



数理化自学丛书

物理

第三册

賈冰如 胡善智 編

数理化自学丛书

物

理

(第三册——电磁学)

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书詳尽地叙述了电磁学的基础知識以及它們在各方面的应用。全书共分六章，先讲靜电場，然后依次讲述穩恒电流、磁場、电磁感应和交流电，最后介紹了无綫电的基础。书中包含有大量的例題、习題和总复习題，并且在每章末了都附有复习提要，以供复习巩固之用。

本书可供具有相当于初中三年級以上文化水平的自学青年閱讀。

数理化自学丛书

物 理

(第三册——电磁学)

賈冰如 胡善智 編

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路 450 号)

上海市书刊出版业营业許可証出 093 号

商务印书館上海厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 850×1168 1/32 印張 10 14/32 排版字數 257,000

1964 年 10 月第 1 版 1964 年 10 月第 1 次印刷 印數 1—40,000

統一書号 T 13119·595 定价(科二) 0.85 元

目 录

第一章 静电场

第一章 静电场.....1

- §1.1 带电现象.....1
- §1.2 电量, 库仑定律.....5
- §1.3 导体上电荷的分布.....15
- §1.4 电子论简述.....18
- §1.5 静电感应.....23
- §1.6 电场, 电场强度.....26
- §1.7 电势.....35
- §1.8 导体的电势.....44
- §1.9 电容和电容器.....48
- 本章提要.....62
- 复习题一.....65

第二章 稳恒电流.....69

- §2.1 电流.....69
- §2.2 电路.....72
- §2.3 电阻, 欧姆定律.....77
- §2.4 电流的功和功率, 焦耳-楞次定律.....86
- §2.5 有关部分电路的讨论.....92
- §2.6 电源, 电动势.....105
- §2.7 有关全电路的讨论.....109
- §2.8 液体导电和电解.....124
- §2.9 化学电源——电池.....135
- 本章提要.....145
- 复习题二.....149

第三章 磁场.....153

- §3.1 磁现象和磁场.....153

- §3.2 电流的磁场.....163
- §3.3 磁感应和电磁铁.....166
- §3.4 磁性起源假设.....172
- §3.5 磁场对电流的作用.....174
- §3.6 电流计, 安培计和伏特计.....182
- 本章提要.....192
- 复习题三.....195

第四章 电磁感应.....199

- §4.1 感生电流的获得.....199
- §4.2 感生电流的方向.....202
- §4.3 感生电动势.....208
- §4.4 自感现象.....216
- 本章提要.....221
- 复习题四.....222

第五章 交流电.....225

- §5.1 交流电的产生.....225
- §5.2 交流发电机.....232
- §5.3 三相交流电.....235
- §5.4 交流电动机.....241
- §5.5 直流发电机.....248
- §5.6 直流电动机.....251
- §5.7 变压器和远距离输电.....256
- 本章提要.....265
- 复习题五.....268

第六章 无线电基础.....270

- §6.1 电磁振荡和振荡电路.....270
- §6.2 振荡电流的周期和频率.....273

§ 6.3 电磁波和电磁波的发送···275	§ 6.10 无线电的发送和接收····292
§ 6.4 调制·····278	§ 6.11 有线广播·····293
§ 6.5 电谐振·····280	§ 6.12 半导体和晶体管·····297
§ 6.6 检波·····281	§ 6.13 电子射线管·····302
§ 6.7 二极电子管。电子管整 流器·····285	§ 6.14 无线电技术的广泛应用··303
§ 6.8 三极电子管。电子管放 大器·····288	本章提要 ·····306
§ 6.9 栅极检波。电子管收音 机·····290	复习题六 ·····309
	总复习题 ·····311
	习题答案 ·····320

第一章 靜 电 場

在这一章里,我們所要討論的現象,統称为**靜电現象**。有关靜电現象的这一部分知識叫做**靜电学**,它是全部电学知識的基础。

一切电現象都离不开**电場**的作用。与靜电現象有关的电場叫做**靜电場**。我們將以靜电場的基本特性作为这一章的中心內容,并环繞着它討論一些重要的靜电現象,以及这些現象的基本理論和实际应用。

我們已經知道,整个自然界是由不断运动着的物质所組成,絕對靜止的物质是不存在的。电也是一种物质,所以它也是在永不停息地运动着,根本不会有靜止不动的电。所謂靜电,是指沒有定向运动的电而言。所謂靜电現象,則是指电在沒有定向运动时所产生的現象。

电灯、電話、电动机等装置的工作原理,都要牽涉电在流动时所产生的現象,它們不属于本章所要討論的範圍,而将在以后各章中逐步加以討論。为了学好以后各章,必須首先学好靜电学这一章。

§1.1 带 电 現 象

1. 摩擦起电 远在紀元前七世紀,古希腊人退利斯就曾发现,被毛皮或毛織物摩擦过的琥珀能吸引紙屑、头发等輕微的物体。我国东汉时代的学者王充在他所著“論衡”一书中,也有“頓牟掇芥”的記載。“頓牟”就是琥珀,“掇芥”就是吸引輕微物体的意思。后来,到了紀元 1600 年,英国的医生兼物理学家吉伯又发现,

除了琥珀之外,还有許多物体,如玻璃、火漆、硫磺、水晶和胶木(硬橡胶)等,在和呢絨或絲綢摩擦后,也有吸引輕微物体的本領(图 1·1)。

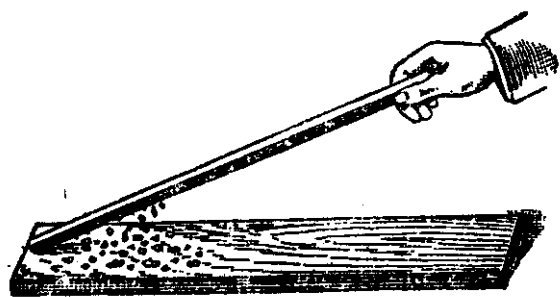


图 1·1 摩擦起电

这种吸引輕微物体的現象,我們把它叫做**带电現象**。

物体有了这种吸引輕微物体的性质,我們就說它带了电,或說它有了**电荷**。带电的物体就叫做**带电体**。

使物体带电叫做**起电**。用摩擦的方法使物体带电叫做**摩擦起电**。

习 題 1·1(1)

1. 把一块洗淨擦干的玻璃板,架在平放在桌面上的两本练习簿上。在玻璃板的下面、两本练习簿中間的桌面上,放一些剪得很碎的紙屑。然后用干燥的手帕在玻璃板的上面摩擦,观察所发生的現象。

2. 把胶木棒或胶木笔杆的一端放在干燥的毛織物上使勁摩擦,然后把它移近輕微的紙屑,观察所发生的現象。(当心不要用手抹拭摩擦过的胶棒。)

3. 把自来水龙头稍稍轉开,維持一綫水流。拿上題中已經带了电的胶棒靠近水流(不要碰着),試观察所发生的現象。

2. 两种电荷 用毛皮摩擦两根火漆棒或胶木棒。把其中的一根用鈎子悬挂起来(見图 1·2),拿另一根靠近它,可以看到它們互相推斥。

用絲綢摩擦两根玻璃棒。把其中的一根悬挂起来,拿另一根靠近它,也可以看到它們互相推斥。

如果改用絲綢摩擦过的玻璃棒去靠近用毛皮摩擦过的胶

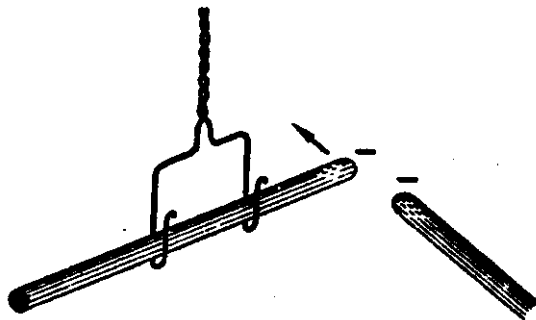


图 1·2 同种电相斥

木棒，或用毛皮摩擦过的胶木棒去靠近用絲綢摩擦过的玻璃棒，則它們互相吸引。

實驗的結果說明什么呢？

首先，它說明電荷間存在着相互作用的斥力或吸力；其次，它說明上述胶木棒和玻璃棒所帶電荷的性質不同；最後，我們還可以從這裡看出一個規律：同種電荷互相推斥，異種電荷互相吸引。

在1747年，美國科學家富蘭克林把用絲綢摩擦過的玻璃棒所帶的電荷叫做**正電荷**，把用毛皮摩擦過的胶木棒所帶的電荷叫做**負電荷**。實驗證明，所有其他的物體，無論用什麼方法起電，所帶的電荷不是和上述玻璃棒上的電荷（正電荷）相同，便是和上述胶木棒上的電荷（負電荷）相同。所以我們說：在自然界里只存在正、負兩種電荷。

3. 導電體和絕緣體 把帶電體和不帶電體相接觸，總會有一部分電荷從帶電體跑到不帶電體上去，使它也變成了帶電體。這種使物體帶電的方法叫做**接觸起電**。

用接觸的方法使物體帶電，如果電荷停留在接觸過的部分，而不顯著地向其他部分傳遞，那麼這種物體就叫做**絕緣體**。絕緣體又叫做**電介質**（此處的介字不可寫成解字）。玻璃、石蠟、火漆、琥珀、松香、絲綢、胶木、瓷器等都是很好的絕緣體。

能把所得到的電荷迅速傳遞到其他各部分的物體叫做**導電體**。導電體又簡稱為**導體**。各種金屬材料、人的身體和地球等都是很好的導電體。此外，還有各種酸、鹼、鹽的溶液也是良好的導電體。

還有一種導電能力介於導電體和絕緣體之間的物體，如樹木、紙張、大理石以及一些非金屬結晶體（硅、硒等），叫做**半導體**。

導電體、半導體和絕緣體彼此之間並沒有確定的界限，只是在導電的程度上有著大小的差別。

要使導體能保留所帶的電荷，就必須用絕緣體把它和地球隔

开,否则电荷就要传给地球。我们平常看到的电学仪器,多半装在玻璃或胶木的底座上,也就是这个道理。例如,在图1·2里的那个钩子,必须用丝线悬挂起来,才能更好地防止棒上的电荷逃掉。

平常我们做摩擦起电的实验,总是用绝缘体而不用导体,这并不是因为导体不能起电,而是因为导体所得到的电荷会很快地通过人的身体传到地面、不能保留下来的缘故。如果在导体上装一个玻璃的或其他绝缘体的把手,那么它就和绝缘体一样可以用来进行摩擦起电的实验。

4. 金箔验电器 验电器是用来检验物体是否带电和带哪一种电荷的仪器。通常所用的一种验电器叫做**金箔验电器**。

金箔验电器是利用同种电荷相斥、异种电荷相吸的作用制成的,它的构造如图1·3所示,在一个金属棒的上端装一个金属球,在

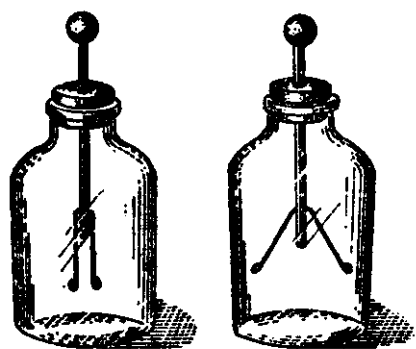


图1·3 金箔验电器

其下端贴两条很薄的金属箔,金属棒插在用绝缘体制成的瓶塞中,瓶塞塞在玻璃瓶或有玻璃窗的金属盒子上。

要检验物体是否带电,只要把物体和验电器的金属球接触一下就行了。如果物体是带电的,那么金属球在接触时就带了电,并将部分电荷传

到金属箔上去,于是两条金属箔就因为带同种电荷而相斥、张开。如果物体原来不带电,金属箔就不会张开。

如果让金箔验电器先带某种已知电荷(正的或负的),然后再把要检验的物体移近验电器的金属球(不接触),根据金属箔张角度的增大还是减小,就可以看出物体所带的电荷是正的还是负的。当物体所带的电荷和验电器原先所带的电荷种类相同时,因同种电荷相互排斥,则球上原有的电荷有一部分被排斥到离物体较远的金属箔上去,使金属箔带的电荷比原来的多,从而加大张开的角度。反之,当物体所带的电荷和验电器原先所带的电荷种类不

同时,由于异种电荷相互吸引,金属箔上原有的电荷就要有一部分被吸引到靠近物体的小球上来,从而使金属箔的張角减小. 如果物体原来不带电,那么金属箔的張角就不会起显著的变化.

习 題 1.1(2)

1. 两根胶木棒,一根带电,一根不带电. 如果不用驗电器,有什么方法可以知道哪个带电,哪个不带电?

2. 如果用手直接握住銅棒,并使它和絲綢相摩擦,則檢驗不出銅棒上有带电現象. 如果用帶橡胶手套的手握住銅棒,使它和絲綢相摩擦,就可以檢驗出銅棒上有带电現象. 这是什么道理?

3. 用絲綫悬着一个不带电的小通草球,并把它移近一个带电体,我們就可以看到:通草球先被带电体吸过去,等到和带电体接触后,又被它推开. 这又是什么道理?

4. 要使一个带电的导体变成不带电的物体,用什么方法最方便? 要使一个带电的絕緣体不带电,又需要怎样做呢?

5. 現有兩個金属箔驗电器. 用什么方法可以檢驗一根棒是导电的还是絕緣的?

6. 怎样使用金属箔驗电器来檢驗带电体所带的电荷是正的还是負的?

§ 1.2 电量. 庫侖定律

我們已經知道带电物体具有吸引輕微物体的能力. 但是,这种能力和哪些因素有关呢? 这就是在这一节里所要討論的問題.

1. 电量概念 讓我們重复一下习題 1.1(1) 第 1 題里的实验,并按下列順序进行观察. 首先用手帕輕輕地摩擦一下玻璃板,观察板下紙屑被吸引的情况;然后重重地摩擦一下,观察紙屑被吸引的情况;最后連續地重摩好几次,再观察紙屑被吸引的情况.

比較一下观察所得到的結果,我們就会发现玻璃板吸引紙屑的能力一次比一次强. 为什么会有这种現象呢? 首先我們应当承认,玻璃板之所以能吸引輕微紙屑是由于它带有电荷,这即是由于摩擦起电. 其次根据摩擦的輕重程度和次数的不同,我們不难想

象到,玻璃板所帶電荷一次比一次多,所以吸引紙屑的能力也一次比一次強。這就是說,帶電體吸引輕微物體的能力跟它所帶電荷的多少有關。所帶的電荷越多,吸引輕微物體的能力就越強;所帶的電荷越少,吸引輕微物體的能力就越弱。或者說,吸引輕微物體的能力是物體帶電多少的一種表現,一種標志。帶電體吸引輕微物體的能力強,就標志着它所帶的電荷多;吸引輕微物體的能力弱,就標志着它所帶的電荷少。

物體所帶電荷的多少叫做**電量**。

帶電體吸引輕微物體的能力是否只與所帶電荷的多少有關呢?為了解決這個問題,讓我們再來做一個實驗。實驗的用具和習題 1·1(1) 第 1 題里所述的完全相同,不過要準備好兩套。在一塊玻璃板底下墊兩本較薄的練習簿,在另一塊玻璃板底下墊兩本較厚的練習簿。實驗時,用手帕摩擦兩塊玻璃板,摩擦的輕重程度尽可能相同,摩擦次數也相等。仔細觀察兩塊玻璃板下的紙屑被吸引的情況。

實驗的結果說明,帶電體吸引輕微物體的能力,不僅與它所帶的電荷的多少有關,還與它離開輕微物體的距離有關。距離越大,吸引輕微物體的能力也就越小。

2. 庫倫定律 帶電體能夠吸引輕微物體的現象,是由電荷間相互作用的吸力和斥力所引起的(關於這一點,以後還要討論)。吸引輕微物體的能力強,就說明電荷間的相互作用大;吸引輕微物體的能力弱,就說明電荷間的相互作用小。

在介紹金箔驗電器時,我們已經講過,金屬箔的張角隨着金屬箔上電荷的多少而增減。這個現象使我們想到,電荷間相互作用力的大小與電荷的電量有關。

電荷間相互作用力的大小,與電量有什麼關係呢?在 1785 年法國物理學家庫倫應用一種叫做扭秤的儀器進行實驗,結果發現了它們之間的關係,這個關係我們稱它為**庫倫定律**。

庫侖定律是电学中最基本的定律之一。它的內容是：在真空中，两个点电荷之間的相互作用力，沿着它們之間的連線，大小相等，方向相反；作用力的大小跟两个电量的乘积成正比，跟两个点电荷之間的距离平方成反比。

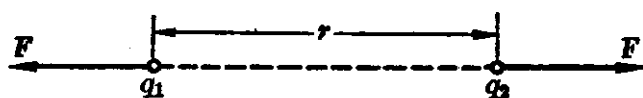


图 1.4 电荷間的相互作用

如图 1.4 所示，以 q_1 和 q_2 表示两个点电荷的电量， r 表示它們之間的距离， F 表示它們之間的相互作用力，那末庫侖定律的代数表示式应为

$$F = K \frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

上式叫做庫侖定律公式。公式中的 K 是比例常数，它的大小取决于式中各物理量 (F 、 r 、 q_1 和 q_2) 的单位。 K 的物理意义可以这样来理解：如果在真空中有两个点电荷，它們的电量各等于 1 单位，它們之間的距离也等于 1 单位，那么它們之間的相互作用力就等于 K 单位。

如果两个电荷是同种的，式中的 q_1 和 q_2 就应当同为正号或同为負号，而求得的 F 却总是正值，这就表示两电荷相斥。如果两个电荷是异种的， q_1 和 q_2 的符号就应当相反，那么，求得的 F 总是負值，这就表示两电荷相吸。

必須指出，庫侖定律公式只适用于点电荷。点电荷，从字面上来理解，就是一个小到和几何点一样的带电体所带的电荷。实际上，符合这种条件的带电体是不存在的。在物理学里，点电荷的意义是相对的，不管是什么形状的带电体，只要它們的大小比它們之間的距离小很多，我們就可以把它們所带的电荷看作是点电荷。

同样两个任意形状的带电体，当它們相距很远时就可以看做

是点电荷,当它們相距不够远时就不能看做是点电荷. 所以我們說,点电荷的意义是相对的,而不是絕对的.

如果相互作用的带电体不能看做是点电荷,那么由于它們之間的距离 r 沒有确定的意义,所以不能直接应用庫侖定律. 在这种情况下,必須把带电体分成很多微小部分来考虑. 每一个微小部分所带的电荷可以看做是一个点电荷,每一个带电体所带的电荷可以看做是这許多点电荷的总和. 先应用庫侖定律求出各个点电荷之間的相互作用,然后再用求合力的方法求出两个带电体之間的相互作用.

对电荷分布均匀的球状带电体來說,理論証明,在計算它和別的带电体之間的相互作用时,可以认为它的全部电荷都集中在球心上. 因此,在計算两个均匀带电球体之間的相互作用时,我們可以把它們看做是两个位置在球心的点电荷,并且可以直接应用庫侖定律公式来进行計算. 在这种情况下,公式里的 r 就是两个球心之間的距离了.

根据庫侖定律求得的电荷之間的相互作用力,叫做靜电力,又叫做庫侖力.

3. 电量的单位 在明确了电荷之間的相互作用与电量間的关系——庫侖定律之后,我們就可以根据这个定律,用力的大小来量度电量,从而也就确定了电量的单位.

在厘米·克·秒制里,电量的单位叫做厘米·克·秒制靜电系单位电量,或簡称为靜庫.

靜庫的大小是这样規定的:有两个电量相等的点电荷,在真空中相距 1 厘米,如果它們之間的作用力适为 1 达因,我們就規定这两个电荷的电量各为 1 靜庫.

这样,当电量用靜庫、力用达因、距离用厘米作为单位时,庫侖定律公式中的比例常数 K 就等于 1. 因此,真空中适用的庫侖定律公式可以簡化为

$$F = \frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

在电学里，根据厘米·克·秒制单位和静电学定律所确定的单位系统，叫做厘米·克·秒制静电单位系，或简称为静电单位系。

在实际应用中，由于静库这个电量单位实在太小，我们常常使用一个叫做库仑的电量单位。库仑和静库的关系是：

$$1 \text{ 库仑} = 3 \times 10^9 \text{ 静库}.$$

4. 电介质中的库仑定律 电介质就是绝缘物质。例如空气、煤油、纯水、玻璃、橡胶、瓷器等都是电介质。

实验证明，在电量 q_1 和 q_2 以及距离 r 都相同的情况下，如果把两个带电体放在电介质（例如煤油）里，它们之间的相互作用力总比在真空中小一些，至于小多少，那就要依电介质的性质来决定。通常我们把电介质中的库仑定律公式写成

$$F = \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}.$$

式中的 ϵ ^① 代表电介质的介电常数。不同物质的介电常数大小不同，但总大于 1。下表列出几种常用电介质的介电常数：

空 气	1.0006	硬 橡 胶	4
煤 油	2~4	瓷 器	6
纯 水	81	云 母	6~8
石 蜡	2	玻 璃	4~7

真空的介电常数为 1，空气的介电常数近似地等于 1。

例 1. 现有两个均匀带电球体，它们分别带有电量 0.25 库仑和 0.24 库仑。(1) 如果把它们放在空气里，彼此相距 3 米远，问它们之间的相互作用力是多大？(2) 如果把它们放在石蜡里，彼此间的距离也是 3 米，相互作用力又是多大呢？

【解】 这个题目的要求很明确，那就是求两个已知电荷之间的相互作用力。由于两个带电体都是球体，在计算时我们可以把

① ϵ 是希腊字母，读作 epsilon (依伯西隆)。

它們当做两个位置在球心的点电荷来处理，所以可以直接应用庫侖定律公式来求解。但在应用庫侖定律公式时，必須把电量的单位从庫侖变换成靜庫，把距离的单位从米变换成厘米，那就是：

$$q_1 = 0.25 \text{ 庫侖} = 0.25 \times 3 \times 10^9 \text{ 靜庫},$$

$$q_2 = 0.24 \text{ 庫侖} = 0.24 \times 3 \times 10^9 \text{ 靜庫},$$

$$r = 3 \text{ 米} = 300 \text{ 厘米}.$$

經過分析，我們对問題的性質(条件和要求)有了足够的認識，并掌握了解題的方法(步驟、公式、单位等)，于是就可以开始运算。

(1) 在空气中，介电常数 ϵ 可近似地看作等于 1；根据庫侖定律求得电荷間的相互作用力

$$F = \frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{0.25 \times 3 \times 10^9 \times 0.24 \times 3 \times 10^9}{300^2} = 6 \times 10^{12} \text{ 达因}.$$

(2) 在石蜡里，介电常数 $\epsilon = 2$ ；电荷間的相互作用力

$$F = \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2} = \frac{0.25 \times 3 \times 10^9 \times 0.24 \times 3 \times 10^9}{2 \times 300^2} = 3 \times 10^{12} \text{ 达因}.$$

例 2. 在空气里放着三个均匀带正电荷的球体 A 、 B 和 C ，它們所带的电量依次为 400、300 和 100 靜庫； A 和 B 之間的距离为 60 厘米， C 在 \overline{AB} 的中垂綫上，离开 \overline{AB} 40 厘米。求带电体 C 所受到的靜电力(即庫侖力)。

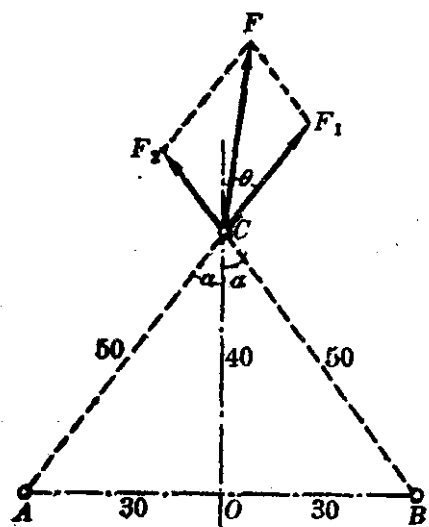


图 1.5 例 2 附图

【解】 先按題意作出三个带电球体的位置图(图 1.5)。从图上可以看出，带电体 C 同时受到两个庫侖力 F_1 和 F_2 的作用。 F_1 是带电体 A 对它的斥力，方向在 A 和 C 的連綫上。 F_2 是带电体 B 对它的斥力，方向在 B 和 C 的連綫上。 F 是 F_1 和 F_2 的合力，这就是我們所要求的合靜电力

由于带电体 A 、 B 和 C 都是均匀带电的球体，所以我們可以把它們看做是三个电荷集中在球心的点电荷，直接应用庫侖定律公式来求各个靜电力：

$$F_1 = \frac{q_1 q_3}{AC^2} = \frac{400 \times 100}{50^2} = 16 \text{ 达因,}$$

$$F_2 = \frac{q_2 q_3}{BC^2} = \frac{300 \times 100}{50^2} = 12 \text{ 达因.}$$

在求出 F_1 和 F_2 之后，我們可以用平行四边形法則求合力 F 。根据三角学中的余弦定律，可以得出

$$\begin{aligned} F^2 &= F_1^2 + F_2^2 + 2F_1 F_2 \cos \angle F_1 C F_2 \\ &= F_1^2 + F_2^2 + 2F_1 F_2 \cos \angle ACB. \end{aligned}$$

从图上可以看出， $\angle ACB = 2\alpha$ ；根据三角公式，

$$\cos 2\alpha = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha = \left(\frac{4}{5}\right)^2 - \left(\frac{3}{5}\right)^2 = \frac{7}{25}.$$

代入上式，得出

$$F^2 = 16^2 + 12^2 + 2 \times 16 \times 12 \times \frac{7}{25} = 508;$$

$$F = \sqrt{508} = 22.5 \text{ 达因.}$$

合靜电力的方向可用 F_1 的方向为标准来描述，即用角 θ 来表示。仍旧应用余弦定律，

$$F_2^2 = F^2 + F_1^2 - 2FF_1 \cos \theta,$$

$$\begin{aligned} \text{求得} \quad \cos \theta &= \frac{F^2 + F_1^2 - F_2^2}{2FF_1} = \frac{508 + 256 - 144}{2 \times 22.5 \times 16} \\ &= \frac{620}{720} = 0.861; \end{aligned}$$

查三角函数表，得出

$$\theta = 30^\circ 41'.$$

例 3. 如图 1.6 所示，两个点电荷 A 和 B ，分别带有正电荷 9 靜庫和 36 靜庫，它們之間的距离为 30 厘米。現在要在它們之間放上第三个点电荷，正好使各个点电荷所受到的靜电力平衡，即各

个电荷所受到的合静电力为零。问这第三个电荷应该是正的还是负的？电量有多少？应当放在哪里？

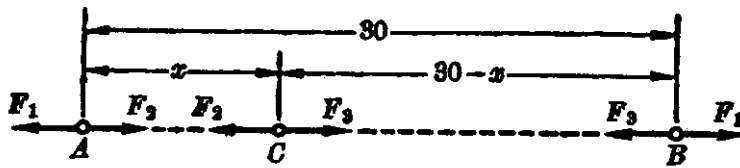


图 1·6 例 3 附图

【解】 先根据题意作图表示电荷 C 在电荷 A 和 B 之间，并离开 A 点 x 厘米。在这三个电荷中，每一个电荷都要受到另两个电荷的作用力。已知 A 和 B 都是正电荷，如果 C 也是正电荷，那么 A 受到 B 和 C 对它的两个电斥力方向相同（都向左）， B 受到 A 和 C 对它的两个电斥力方向也相同（都向右），因而 A 和 B 都不能处于平衡状态，即它们所受到的合力都不可能为零。所以我们可以断定， C 不应当是正电荷。

如果 C 是负电荷，那么， A 受到 B 对它的电斥力和 C 对它的电引力， B 受到 A 对它的电斥力和 C 对它的电引力， C 受到 A 和 B 的电引力作用；因为在每个电荷上都作用着两个方向相反的静电力，只要力的大小适当，平衡是可能实现的。所以我们可以断定， C 应当是负电荷。

设令电荷 C 的电量为 q ，根据库仑定律可以算出： A 和 B 之间的相互作用力（斥力）

$$F_1 = \frac{q_A q_B}{AB^2} = \frac{9 \times 36}{30^2} = 0.36 \text{ 达因,}$$

A 和 C 之间的相互作用力（引力）

$$F_2 = \frac{q_A q_C}{AC^2} = \frac{9 \times q}{x^2} = \frac{9q}{x^2} \text{ 达因,}$$

B 和 C 之间的相互作用力（引力）

$$F_3 = \frac{q_B q_C}{BC^2} = \frac{36 \times q}{(30-x)^2} = \frac{36q}{(30-x)^2} \text{ 达因.}$$

由于要求各个电荷都处于平衡状态，那么从电荷 C 来看，它所

受到的电引力 F_2 和 F_3 就应当大小相等、方向相反,即

$$F_2 = F_3.$$

于是我們得到方程式

$$\frac{9q}{x^2} = \frac{36q}{(30-x)^2},$$

即

$$(30-x)^2 = 4x^2,$$

$$30-x = \pm 2x;$$

解方程,得出

$$x = +10 \text{ 厘米和 } x = -30 \text{ 厘米.}$$

x 的第二个根是負值,它表示 C 在 A 的左側,这不合題意,所以我們的結論是:电荷 C 应当放在离开电荷 A 10 厘米处.

再从电荷 A 来看,它所受的力 F_1 和 F_2 应当大小相等、方向相反,即

$$F_2 = F_1,$$

并从而得出方程式:

$$\frac{9q}{x^2} = 0.36,$$

即

$$q = 0.04x^2;$$

把求得的 x 值代入,得出电荷 C 的电量

$$q = 0.04 \times 10^2 = 4 \text{ 靜庫.}$$

讀者可以根据电荷 B 的平衡条件計算一下,看电量 q 是否也等于 4 靜庫.

例 4. 两个带有等量同种电荷的小球,各重 0.1 克,并各用 50 厘米长的細絲綫挂在同一点上. 两球因彼此相斥而張开,在平衡状态下它們相距 20 厘米. 求每个球所带的电量. (g 值取 980 厘米/秒²)

【解】 如图 1.7 所示,在平衡状态下,两球各受三个力的作用,这三个力是小球的重力 mg 、絲綫的拉力 T 和电斥力 F ,并且 mg 和 F 的合力 R 应该与絲綫的拉力 T 大小相等、方向相反. 也

就是說，合力 R 應和絲綫 OB 在同一直綫上。

由于对称，三角形 AOB 是等腰三角形， \overline{OC} 是它的高。从几何关系可以看出， $\triangle OCB$ 与力 mg 和 R 以及它们的端点連綫所組成的三角形相似，因此

$$\frac{F}{mg} = \frac{\overline{CB}}{\overline{OC}}.$$

設两球各带电荷 q 靜庫，則它們間的斥力

$$F = \frac{q^2}{AB^2} = \frac{q^2}{20^2} = \frac{q^2}{400}.$$

已知

$$\overline{CB} = 10 \text{ 厘米},$$

$$\begin{aligned} \overline{OC} &= \sqrt{\overline{OB}^2 - \overline{CB}^2} = \sqrt{50^2 - 10^2} \\ &= 20\sqrt{6} \text{ 厘米}, \end{aligned}$$

$$mg = 0.1 \times 980 = 98 \text{ 达因}.$$

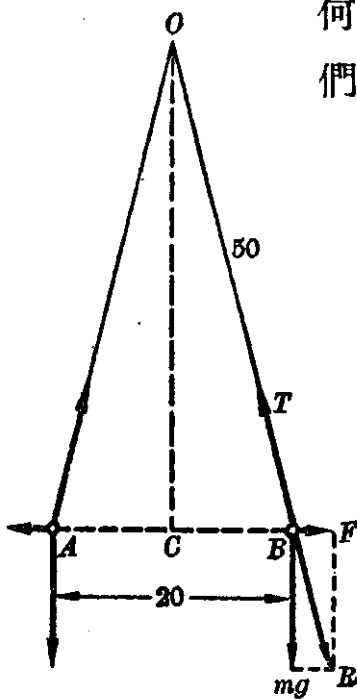


图 1.7 例 4 附图

把各已知量代入上面的比例式，得出

$$\frac{q^2}{400 \times 98} = \frac{10}{20\sqrt{6}};$$

并解得

$$q = \sqrt{\frac{400 \times 980}{20\sqrt{6}}} = 89.5 \text{ 靜庫}.$$

习 題 1.2

1. 在真空中有两个带同种电荷的小球，它們的电量分别为 20 和 30 靜庫，它們之間的距离为 10 厘米；求这两个带电小球之間的相互作用力。如果这两个带电小球是处在石蜡中，它們之間的相互作用力又应该是多大？

2. 在空气中两个带异种电荷的小球，一个小球所带的电量是另一个小球所带电量的 4 倍。当它們相距 5 厘米时，相互吸引的力是 16 达因。当它們相距 10 厘米时，相互吸引的力应该是多少达因？而小球所带的电量又各等于多少呢？

3. 有两个带电小球, 当它们在空气中相距 12 厘米时, 相互作用的力是 36 达因. 问当它们在纯水中相距 4 厘米时, 相互作用的力应该是多大?

4. 均匀带电球体 A 和 B 的位置是固定不动的, 它们彼此相距 15 厘米, A 带正电荷 Q , B 带负电荷 $4Q$. 现在有另一个带电小球 C , 问应当把它放在什么地方才能使它处于平衡状态? 又这个平衡位置与 C 球所带电荷的电量和正负有没有关系?

5. 如果前题中的 A 和 B 同时带正电荷或同时带负电荷, 那么小球 C 的平衡位置应当在哪里?

6. 均匀带电球体 A 和 B 的电量分别为 $+q$ 和 $+4q$, 它们之间的距离为 150 厘米. 如果引进另一个带电球体 C , 正好能使三个球体都处于平衡状态, 问 C 球所带的电荷应当与 A 和 B 同号还是反号? 为什么?

7. 前题中的 C 球应当放在什么地方? 所带电荷的电量应当是 q 的几倍?

8. 两个点电荷 A 和 B 之间的距离是 a 厘米, 各带同种电荷 q 静电系单位电量. 第三个点电荷的电量是 1 静电系单位, 离开 A 和 B 的距离也都是 a 厘米. 试求第三个点电荷所受到的静电力的大小和方向.

9. 两点电荷 A 、 B 相距 10 厘米, 各带异种电荷 400 静库. 第三个点电荷的电量是 5 静库, 放在离开 A 和 B 都是 20 厘米处. 求第三个点电荷所受到的静电力的大小和方向.

10. 两个带有同种等量电荷的小球各重 0.1 克, 分别用 4 厘米长的丝线悬挂在同一点上. 由于电荷之间的斥力作用, 丝线间的张角正好是 90° . 试求电荷的电量.

§ 1.3 导体上电荷的分布

导体的特征是能够导电. 也就是说, 导体能把它的一部分所得到的电荷, 迅速地传播到其他各部分去. 在传播的过程中, 电荷在作定向运动, 此时所发生的一切现象均不属于静电学的范围. 但是, 这个传播过程是进行得很快的, 过了这个极短的时间后, 电荷的定向运动就消失了, 电荷又处于平衡状态. 我们称电荷没有定向运动的状态为**静电平衡状态**, 或简称为**静电平衡**.

在这一节里, 我们所要讨论的问题是: 在静电平衡状态下, 导

体上的电荷是怎样分布的？

1. 电荷分布在导体的外表面上 英国物理学家法拉第曾经做过一个有名的圆筒实验。他用的仪器如图 1·8 所示。A 和 B 是两个金箔验电器。A 和普通验电器一样，它的顶端是一个金属球。B 的顶端是一个几乎完全封闭的金属空心圆筒 C。当圆筒带有定量电荷时，B 的金箔就张开一定的角度。

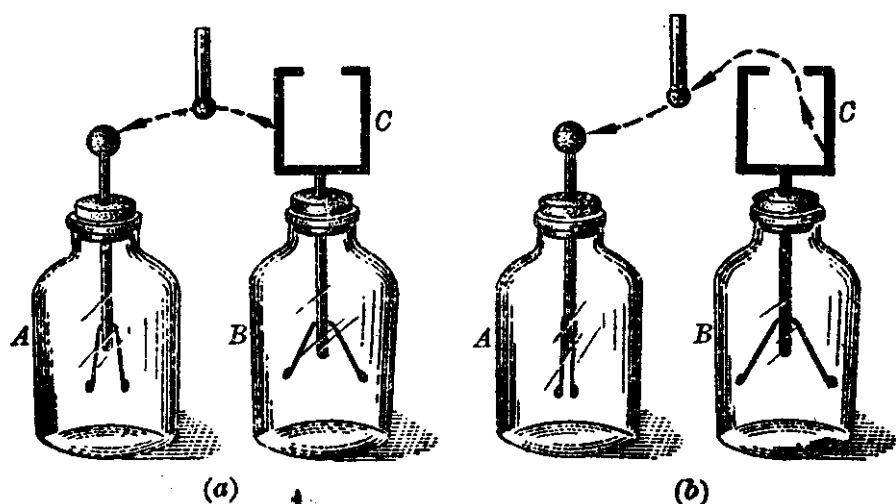


图 1·8 法拉第圆筒实验

实验时，先用一个绝缘的金属小球（例如一个有玻璃柄的金属小球）和圆筒 C 的外表面接触一下，再去和验电器 A 的球顶接触，就发现 A 器的金箔微微张开，B 器的金箔张角略有减小，如图 1·8 (a) 所示。重复若干次后，A 器和 B 器的金箔张角分别有了显著的增减。这说明圆筒 C 的外表面是带有电荷的；绝缘金属小球和它接触就可以取得电荷。

如果先用绝缘金属小球和圆筒 C 的内表面接触一下，再去和验电器 A 的球顶接触，就会发现 A 器的金箔始终不张开，B 器的金箔张角始终不减小，如图 1·8 (b) 所示。这说明圆筒 C 的内表面是不带电荷的；绝缘金属小球和它接触不能取得电荷。

用各种形状不同的空心导体来代替圆筒 C 进行实验，实验证明，不管圆筒所带的电荷是从内部传入的还是从外部传入的，所得结果总和上面所述的一样。因此，我们可以作出结论：在静电平衡

状态下,导体上的电荷完全分布在它的外表面上。

空心导体的内表面上既然不带电,那么,实心导体的内部也一定不带电。于是我们可以从实心导体的内部挖去任何一部分而使它变成空腔,结果并不会影响导体外表面上的电荷分布。

在1836年,法拉第还做过这样一个实验:在绝缘板上放一个金属丝做的笼子,在笼子的内部和外部各放一个金箔验电器,并用金属链条分别把验电器的金属球和笼子连接起来,如图1.9所示。尽量增加金属丝笼所带的电荷,直到笼外验电器的金箔张角已经很大时,笼内验电器的金箔照旧下垂,丝毫也没有带电的现象。法拉第称这种现象为静电屏蔽现象,意思就是说,金属丝笼子能对内部物体起着电的屏蔽作用。

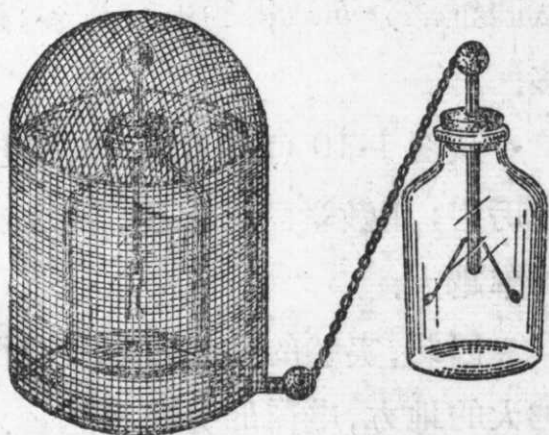


图1.9 金属笼实验

2. 电荷的分布与导体表面的曲率有关 电荷在导体的外表面上是怎样分布的呢?是疏密均匀的呢,还是有疏有密的呢?为

了回答这一问题,我们可以作下面的实验:

取一个由圆柱和圆锥所组成的绝缘导体(如图1.10所示),使它预先带电。另外在一个绝缘柄上装一块软橡皮,它的末端贴着一片金属箔。把金属箔揪在带电导体某一位置上,它就和带电导体这一部分

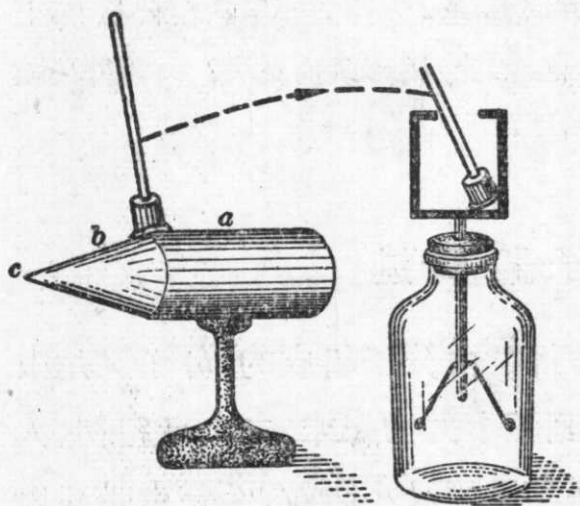


图 1.10

密切接触,并成为接触部分的外表面,这样金属箔从带电导体上分得的电荷应当和接触部分原先所带的电荷完全相等。然后使它与

驗电器上的法拉第圓筒的内表面相接触，这样金属箔带来的电荷又全部傳給了法拉第圓筒和驗电器的两片金箔。根据驗电器金箔張角的大小，就可以比較出从带电导体各部分所取得的电荷的多少，从而也就比較了带电导体上电荷分布的疏密程度。

实验結果証明：从圓筒部分 a (見图 1.10) 取得的电荷最少；从圓錐部分 b 取得的电荷較多；越接近圓錐尖端 c ，取得的电荷越多。

从图 1.10 可以看出，越接近圓錐的尖端，导体外表面弯曲得越厉害；用数学語言來說，就是越接近圓錐的尖端，导体外表面的曲率越大。

因此，实验的結果可以使我們作出这样的結論：导体表面曲率越大的地方，电荷的分布也越密。

球形导体的表面曲率到处相同，所以在球形导体外表面上的电荷分布总是均匀的。

习 題 1.3

1. 用什么方法可以驗證电荷分布在导体的外表面上？
2. 在研究导体表面电荷分布疏密的实验里，为什么要用貼在軟橡皮上的金属箔作为移取电荷的导体，而不用絕緣的金属球或金属块？又为什么驗电器的頂部要用法拉第圓筒而不用金属球？

§1.4 电子論簡述

1. 原子結構大意 一切物体都是由分子組成的；分子又是由叫做原子的更小的微粒所組成。到了十九世紀末、二十世紀初，人們才开始認識到，原子原来并不是物质的最小微粒，而是由带正电的原子核和在核外繞核旋轉的带負电的电子組成的。

不同元素的原子有不同的結構。氫原子的結構最簡單，它的核外只有一个电子在旋轉。而象結構很复杂的鈾原子，在它核外

旋轉的电子就有 92 个之多。不管是简单的原子还是复杂的原子，原子核所带的正电电量总是和核外全部电子所带的负电电量相等。

原子的质量差不多完全集中在原子核里，核外电子的质量是很小的。近代的精密实验测知，电子的质量只不过是 9.11×10^{-28} 克，约合氢原子质量的 $1/1840$ 。

每个电子所带的电量，是已知的最小电荷，我们称它为**基本电荷**。基本电荷 $e = 4.8 \times 10^{-10}$ 静库，即 1.6×10^{-19} 库仑。

如果把原子和原子核都想象成球体，原子的直径要比原子核的直径大一万多倍。虽然如此，原子的直径仍不过是 $2 \times 10^{-8} \sim 3 \times 10^{-8}$ 厘米。所谓原子的直径，是指最外层电子轨道的直径而言。

和行星绕太阳一样，原子中的电子分层地、按照各自的轨道绕原子核旋转。电子绕核的运动可以近似地看做是匀速圆周运动；原子核对电子的吸引力就是维持这种运动的向心力。

在正常情况下，原子所带正、负电荷的电量是相等的，对外不显示带电现象。所以我们说，正常原子是**中性的**。

一切电现象都可以用电子运动和核与电子间的相互作用来解释。关于这方面的学问就叫做**电子论**。

2. 用电子论解释几种简单的电现象 物体是由原子组成的，在正常情况下原子是中性的，因此在正常情况下物体也是中性的，对外不显示带电现象。使物体带电，实际上就是给它以多余的电子或者从它那里取出一些电子。物体得到多余的电子就带负电，失去一些电子就带正电。

当两个物体互相摩擦时，一个物体因部分原子失去了电子而带正电，另一个物体因得到了多余的电子而带负电。所以在摩擦起电时，两个物体总是同时带有异种等量电荷。

把带电物体和不带电的物体相接触，电子就要从带负电的物

体移入不带电的物体,使两个物体都带负电;或者从不带电的物体移入带正电的物体,使两个物体都带正电。

把带负电的物体和带正电的物体相接触,结果总是电子从带负电的物体移入带正电的物体。如果总起来讲,电子是多余的,那么两个物体都带负电;与此相反,如果总起来讲,电子是缺少的,那么两个物体都带正电;如果两个物体原先带有等量的异种电荷,那么,在接触后它们就变成都不带电的物体,这种现象叫做**电的中和**。

实质上,起电过程就是物体间电子重新分配的过程。一个物体失去一定数量的电子,必有另一个物体得到相等数量的电子。电荷是不能消灭、也不能创生的,这就叫做**电荷不灭定律**。

金属原子和碳原子的最外层电子很容易脱离原子核的吸引范围,而在原子之间作不规则的运动,这些电子叫做**自由电子**。当金属体的某一部分得到多余电子时,这些电子就以自由电子的状态传到其他部分去;当它失去电子时,其他部分的自由电子就移来补充。这就是金属体的导电现象。这种由于自由电子的运动而形成的导电现象叫做**电子导电**。

有些物体,原子的外层电子不容易脱离原子核的吸引范围,因此自由电子很少,导电能力很弱,这就是**绝缘体**。

还有些物体,自由电子比导体少得多,但比起绝缘体来却要多一些,或者在平常温度下自由电子并不多,但随着温度的升高,自由电子数目却增加起来,这些物体就叫做**半导体**。

例 5. 两个完全相同的球形导体,分别带有不等量的异种电荷 q_1 和 q_2 。当它们相距 2 厘米时,测得相互作用的吸力为 4 达因。把它们接触一下,然后再拿回原位,测得相互作用的斥力为 2.25 达因。求 q_1 和 q_2 的大小。

【解】 在两球没有接触之前它们相吸,这是由于它们带异种电荷。在接触之后它们相斥,这说明它们带了同种电荷。两个带

电导体并不因接触而中和，这因为它们原先所带的异种电荷是不等量的。

由于两球完全相同，接触后它们所带的电荷应当相等。设令 q_1 为正、 q_2 为负，那么两球接触后各带电量

$$q = \frac{q_1 - q_2}{2}. \quad (1)$$

在两球接触前，它们之间的吸力

$$F = \frac{q_1 q_2}{2^2} = 4. \quad (2)$$

在两球接触后，它们之间的斥力

$$F' = \frac{q^2}{2^2} = 2.25. \quad (3)$$

解联立方程(1)、(2)和(3)，得出

$$\begin{aligned} q_1^4 - 68 q_1^2 + 256 &= 0, \\ (q_1^2 - 64)(q_1^2 - 4) &= 0, \\ q_1^2 &= 64 \text{ 或 } 4, \end{aligned}$$

则 $q_1 = 8$ 静库 或 2 静库 (正电荷)。

把 q_1 的数值代入方程(2)，得出

$$q_2 = 2 \text{ 静库 或 } 8 \text{ 静库 (负电荷)}。$$

【注】 如果不假设 q_1 为正、 q_2 为负，则上述三个方程应为

$$q = \frac{q_1 + q_2}{2}, \quad (1)$$

$$F = \frac{q_1 q_2}{2^2} = -4, \quad (2)$$

$$F' = \frac{q^2}{2^2} = 2.25. \quad (3)$$

解方程同样可以得出方程

$$q_1^4 - 68 q_1^2 + 256 = 0.$$

但因尚未确定 q_1 的正负，正负根都应保留，所以

$$q_1 = \pm 8 \text{ 静库 或 } \pm 2 \text{ 静库,}$$

$$q_2 = \mp 2 \text{ 静库 或 } \mp 8 \text{ 静库.}$$

例 6. 氢原子是由一个带正电荷的核和一个绕核旋转的电子

所組成,如果电子軌道半徑为 2.1×10^{-8} 厘米,电子质量为 9.1×10^{-28} 克,問电子每秒钟繞核旋轉多少次?

【解】 电子繞核作匀速圓周运动,所需要的向心力就是核对它的靜电引力.核与电子所带电荷是等量异种的,并且都是 4.8×10^{-10} 靜庫,所以它們之間的靜电引力为

$$F = \frac{q^2}{r^2} = \frac{(4.8 \times 10^{-10})^2}{(2.1 \times 10^{-8})^2} = 5.2 \times 10^{-4} \text{ 达因.}$$

設电子每秒繞核旋轉 n 次,則所需的向心力

$$\begin{aligned} F' &= m(2\pi n)^2 r = 9.1 \times 10^{-28} \times 4\pi^2 n^2 \times 2.1 \times 10^{-8} \\ &= 76 \times 10^{-36} \pi^2 n^2 \text{ 达因.} \end{aligned}$$

因为

$$F' = F,$$

所以

$$76 \times 10^{-36} \pi^2 n^2 = 5.2 \times 10^{-4},$$

$$n^2 = \frac{5.2 \times 10^{32}}{76\pi^2} = 69 \times 10^{28},$$

$$n = \sqrt{69} \times 10^{14} = 8.3 \times 10^{14} \text{ 轉/秒.}$$

习 題 1.4

1. 物体要失去多少个电子才能带正电 1 靜庫? 要得到多少电子才带負电 1 庫侖?

2. 两个电子相距 10^{-10} 厘米. 它們之間的靜电斥力有多大? 它們之間的万有引力又是多大?

3. 有人把“摩擦起电”說成“摩擦生电”. 这种說法妥当不妥当? 为什么?

4. 1 克氫含有 6.02×10^{23} 个原子, 每个氫原子有一个带正电荷的原子核和一个带負电的核外电子. 假設把 1 克氫里的全部电子都集中在地球的北极, 把全部原子核都集中在地球的南极, 那么它們間的电引力合多少吨重? 已知地球两极間的距离为 12,000 公里.

5. 为什么原子中的核外电子必須繞核旋轉, 如果不旋轉就会出现什么情况? 如果电子繞核旋轉的速度有了增加或减少, 又将有怎样的变化?

§1.5 靜電感應

把帶電體移近金箔驗電器，當帶電體還沒有接觸到驗電器的金屬小球時，金箔就已經張開(圖 1.11)，這表示它已經帶電了。若把帶電體移去，驗電器金箔又重行合攏，表示它不再帶電。

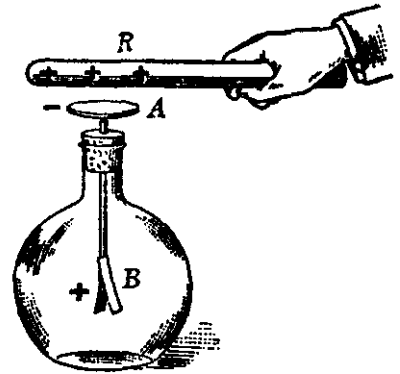


圖 1.11 靜電感應實驗(一)

在兩個金屬圓筒上各用絲綫系一個通草球(圖 1.12)，把它們并排地放在一塊絕緣板上，并使它們互相接觸。當把帶正電的物體 R 移近兩個圓筒中的任何一個時，就可以看到兩個圓筒上的通草球都被排斥而當空懸起，這表示兩個圓筒都帶有電荷。如果把帶

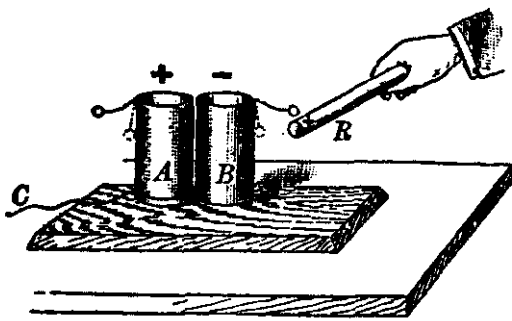


圖 1.12 靜電感應實驗(二)

電體 R 移開，那麼通草球又都下垂，這就表示兩筒都不再帶電。

如果在移開帶電體 R 之前，用絲綫 C 把兩個圓筒拉开，使它們不再接觸。那麼在移開帶電體 R 後，兩筒繼續保持帶電狀態，通

草球依舊被排斥而當空懸起。用驗電器檢驗發現： A 筒所帶的電荷與帶電體 R 上的電荷同種，是正電荷； B 筒却帶負電荷，與帶電體 R 上的電荷異種。

如果再用絲綫把兩個圓筒拉攏，使它們重行接觸，則兩個通草球都立刻下垂，這表示正負電荷中和，兩筒都不再帶電。它說明兩個圓筒所帶的正負電荷的電量正好相等。

因此，我們可以作出結論：把帶電體移近導體，在導體兩端同時出現電量相等的兩種電荷；在接近帶電體的一端，出現和帶電體上相異的電荷，在遠離帶電體的一端，出現和帶電體上相同的電荷。這種現象叫做靜電感應現象。

带电体上原先带有的电荷叫做**施感电荷**。导体上因静电感应而出現的电荷叫做**感生电荷**。

静电感应现象可用电子論来解释：当带电体移近导体时，导体中的自由电子因受静电力作用而作定向运动。如果施感电荷是正的，自由电子受到吸引作用，跑向靠近带电体的一端，使这一端得到多余的电子而带负电荷，于是远离带电体的一端就因缺少电子而带正电荷。如果施感电荷是负的，自由电子受到推斥作用，結果在导体上就形成和上述情况正负相反的感生电荷。

静电感应，实际上就是在施感电荷的作用下，使导体中的正负电荷分离。如果导体原来是中性的，那么在受到感应后它一端多余的电子数正是另一端缺少的电子数，所以感生的正负电荷总是等量的。

在施感电荷移开以后，导体两端的正负电荷相互吸引，自由电子在静电引力作用下，从多余的一端移向缺少的一端，与正电荷中和，整个导体又呈中性。

带电体能够吸引輕微物体的现象，也与静电感应有关。在紙屑、粉末、灰尘、毛发等輕微物体的外表面上，經常有一薄层碳酸溶液，它是导体。在沒有外电荷的影响时，这种溶液是中性的；当把带电体移近它們时，由于静电感应，在这薄层中形成了电荷分离的现象。因为在靠近施感电荷的一端是异种的感生电荷，在远离施感电荷的一端是同种的感生电荷，所以电引力大于电斥力，物体就被吸起。

至于干燥的輕微物体也能被带电体吸起，这是因为外电荷和輕微物体的电子、原子核之間的相互作用所引起的。将来讲到电介质极化时还要討論有关这方面的問題。

图 1·13 表示一个带施感电荷的物体 B 和一个絕緣导体 A 。如果在移开施感电荷之前，先用手接触一下导体 A 。然后再依次移开手和施感电荷，那么导体上留下了与施感电荷异种的感生电

荷。也就是說，如果施感电荷是正的，导体上留下的就是負电荷；如果施感电荷是負的，导体上就留下了正电荷。这种起电的方法叫做**感应起电**。

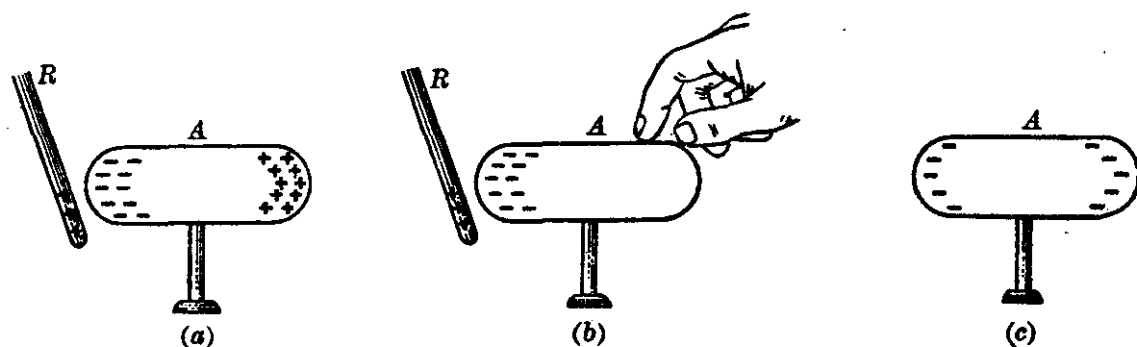


图 1·13 感应起电

感应起电的原因可以这样来解释：人体和地球都是导体，当手和导体 A 接触时，它就不再和地球絕緣，而是和人体、地球联成一个大的导体。在施感电荷的影响下，地球是远离的一端，它所带的感生电荷应该与施感电荷同种，导体 A 是靠近的一端，它所带的感生电荷与施感电荷异种。人手移开，就是把导体 A 和地球重行分开，互相絕緣，这相当于图 1·12 所表示的用絲綫把两个导体分开。于是，导体 A 和地球上的感生电荷就都被保留下来了。

因为用手接触导体就是使导体和地球連接，所以我們簡称为**接地**。接地不一定要用手，也可以用任何其他导体；用手只不过是方便一点罢了。

习 題 1·5

1. 三个絕緣导体，一个带正电荷，两个不带电。(1) 怎样才能使两个原来不带电的导体也都带上正电荷？(2) 怎样才能使它們两个都带上負电荷？(3) 怎样才能使它們分別带上等量的异种电荷？

2. 在应用金箔驗电器檢驗导体是否带电时，为什么不一定要使导体和驗电器金属球相接触？

3. 把一个原来不带电的导体移近一个原来已經带电的金箔驗电器，金箔的張角就要减小。怎样来解释这个現象呢？

4. 在用金箔驗电器檢驗电荷的正負时，怎样做才能得出最可靠的判断？
5. 把原来不带电的紙屑放在玻璃板上或金属板上，当带电体移近的时候，問在哪一种情况下紙屑比較容易被吸起？为什么？

§1.6 电場. 电場强度

1. 电場概念 电荷之間的相互作用是怎样进行的呢？經過长期的科学研究，人們終於認識到：在电荷的周圍存在着一种叫做电場的特殊物质；靜电力并不是两个电荷之間直接作用，而是一个电荷的电場对另一个电荷的作用。

我們通常所遇到的物质都是由分子、原子等所构成的，它們就叫做实物。电場是一种特殊物质，它不是由分子、原子等构成的。無論是在有实物存在的空間里，还是在沒有实物存在的真空中，电場都可以存在。这种特殊物质的性质，在許多方面是和实物不一样的，但是在最主要的方面却和实物相同，如它也具有质量、能量、动量等。

电荷和电場是一个不可分割的整体。只要有电荷存在，在它周圍的空間里就一定有电場存在。如果同时有許多电荷存在。那么因为每个电荷都有它自己的电場，所以在整个空間里就同时存在着許多电場，它們迭加在一起形成一个比較复杂的合电場。

因为电荷間相互作用的靜电力，实际上就是电場作用在电荷上的力，所以我們常常称靜电力为**电場力**。

2. 电場强度 电場对电荷有力的作用是电場特性的一种表現。为了表示这种特性的强弱，我們引入一个新的物理量——**电場强度**。

为了便于用实验方法来檢驗电場的性质，我們需要用**檢驗电荷**。檢驗电荷是一个电量很小的点电荷（例如一个很小的带电球体）。如果檢驗电荷的电量不是很小，那么在实验时就要影响原来

的电場(被檢驗的电場),使檢驗出的結果不符合被檢驗电場的真实情况.

在图 1.14 里, Q 表示一个带电体, 在它的周圍存在着电場. 把檢驗电荷 q 放在位置 1, 測得它所受到的电場力为 F_1 ; 放在位置 2, 測得电場力为 F_2 ; 等等. 实验結果表明, 在这样的电場里, 檢驗电荷 q 在不同地点所受到的电場力的大小和方向是不同的. 这就說明, 电場各处的性质是不同的, 或者说电場中各点的电場强度是不同的.

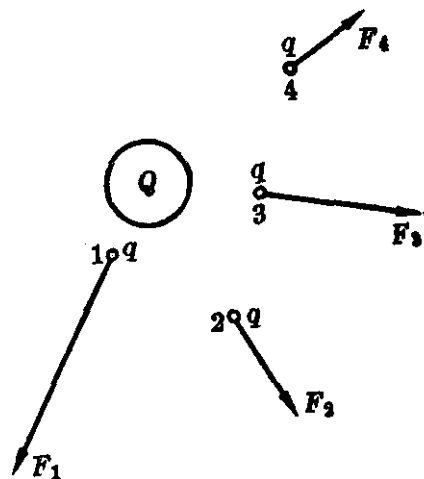


图 1.14 电場强度各处不同

既然电場强度是各处不同的, 那么进一步討論的問題就是, 用什么来比較电場的强弱, 也就是用什么来量度电場强度.

是不是可以用任意一个檢驗电荷所受到的电場力来量度电場强度呢? 我們的答复是不能.

实验指出, 把不同电量的檢驗电荷放在电場中同一地点, 它們所受到的电場力并不相同. 这說明, 电場力不仅与电場本身的性质有关, 同时还与檢驗电荷的电量有关. 如果不考虑檢驗电荷的电量, 而直接用电場力来量度电場强度, 显然是錯誤的. 如果簡單化地把电場强度說成就是电場力, 那就更加錯誤了.

为了帮助理解, 我們可以打一个比喻: 买鉛笔所花的錢数, 不只与鉛笔的价目有关, 同时还与所买鉛笔的枝数有关, 如果不考虑枝数, 而用所花的錢数来量度价目, 显然是錯誤的.

如果上述实验中所用檢驗电荷的电量分別为 q_1, q_2, q_3, \dots , 依次放在电場中某一地点(例如地点 1), 測得的电場力分別为 F_1, F_2, F_3, \dots . 那么, 尽管 F_1, F_2, F_3, \dots 各不相同, 但檢驗电荷所受的电場力跟檢驗电荷的电量之比却总是一个恒量, 即

$$\frac{F_1}{q_1} = \frac{F_2}{q_2} = \frac{F_3}{q_3} = \dots = \text{恒量.}$$

这就说明，在电场中同一地点，检验电荷所受到的电场力 F 跟它的电量 q 的比值只与电场本身有关，而与检验电荷所带的电量大小无关。

再把电量为 q_1, q_2, q_3, \dots 的各个检验电荷，依次放在电场中另一地点（例如地点 2）进行实验，测得各个检验电荷所受到的电场力 F'_1, F'_2, F'_3, \dots 与在地点 1 的电场力 F_1, F_2, F_3, \dots 不同，但电场力和电量的比值却也是一个恒量，即

$$\frac{F'_1}{q_1} = \frac{F'_2}{q_2} = \frac{F'_3}{q_3} = \dots = \text{恒量.}$$

用同样的方法在电场中各处进行实验，结果表明：对电场中任一确定的地点讲，电场力 F 跟检验电荷电量 q 的比值总是一个恒量；对电场中不同的地点来讲，电场力 F 跟检验电荷电量 q 的比值不同。由此可以看出，比值 F/q 是一个只与电场性质有关，而与检验电荷电量无关的量，它可以用来量度电场强度。

我们规定：电场中某一地点的电场强度 E 的大小，等于放在那一地点的点电荷所受到的电场力 F 跟它的电量 q 的比值。 用公式表示，则为

$$E = \frac{F}{q}.$$

在厘米·克·秒制静电单位系中，电场强度的单位为达因/静库，叫做**静电系单位电场强度**。如果把 1 静库的点电荷放在电场中某一位置，它所受到的电场力正好是 1 达因，那么这一位置的电场强度就是 1 静电系单位。

电场强度是矢量。我们规定，正电荷在电场中某一地点所受到的电场力的方向就是那一地点的电场强度的方向。因此，我们又可以这样说：电场中某一地点的电场强度，等于放在那一地点的、具有单位电量的正点电荷所受到的电场力。

負电荷所受到的电場力与电場强度的方向相反。

3. 点电荷的电場 电場是不能脱离电荷而单独存在的。与不同电荷相联系的电場具有不同的性质。在一个点电荷周圍的空間里，也存在着电場，我們称它为点电荷的电場。

如果点电荷的电量为 $+Q$ ，把一个檢驗电荷 $+q$ 放在距离 Q 为 r 的地点(如图 1.15 所示)，那么根据庫侖定律可以知道，檢驗电荷所受电場力

$$F = \frac{Qq}{\epsilon r^2},$$

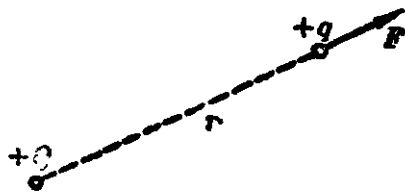


图 1.15 点电荷的电場

代入公式 $E = F/q$ ，求得檢驗电荷所在地点的电場强度

$$E = \frac{Q}{\epsilon r^2}.$$

如果 Q 在真空中，那么

$$E = \frac{Q}{r^2}.$$

必須指出，公式 $E = F/q$ 和公式 $E = Q/\epsilon r^2$ ，虽然都是表示空間某点的电場强度的，可是它們的意义却不相同，适用范圍也不同。只有彻底明确它們之間的区别和联系，才会不致錯用。現在讓我們着重說明一下：

(1) 公式 $E = F/q$ 是电場强度的定义式。它直接表示电場强度的物理意义和量度方法。在任何电場里，我們都可以根据实际测得或算得的 F 和 q ，应用定义式来计算电場强度。它的适用范圍是不受限制的。

(2) 公式 $E = Q/\epsilon r^2$ 是点电荷电場的专用公式。它是从定义式和庫侖定律公式推导出来的。除了点电荷的电場之外，任何別的电場都不适用。

还要指出，如果同时有几个点电荷存在，那么在它們周圍的空間里就有几个点电荷的电場迭加在一起。这时候，如果我們要求某

一地点的电場强度,应当先求各个电場在該处的强度,然后再用矢量合成的方法求它們的合矢量。

例 7. 真空中两带电金属小球 A 和 B 相距 40 厘米, A 带正电荷 10 靜庫, B 带負电荷 40 靜庫. (1) 求中性点(即电場强度等于零的一点)的位置. (2) 通过 B 球的球心画一直綫 BC 与 AB 垂直, 已知 \overline{BC} 等于 30 厘米, 求 C 点的电場强度。

【解】 現在有两个点电荷(带电金属球体可以看做位置在球心的点电荷)同时存在, 空間里就有两个点电荷的电場迭加在一起, 任一点处的場强(电場强度的简称)都应当是两个分場强的合量(如图 1.16 所示)。

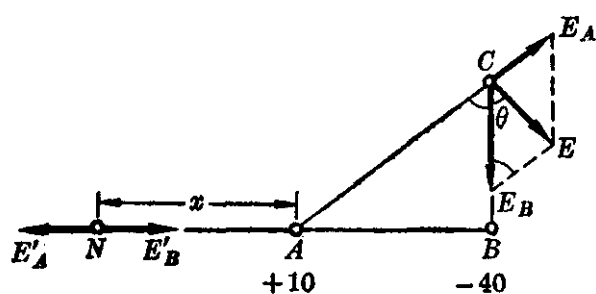


图 1.16 例 7 附图

显然中性点应该在 A, B 的連綫上, 設中性点在 N 点, 那么两个电場在 N 点的場强 E'_A 和 E'_B 的合量应该为零, 也就是說它們必須大小相等、方向相反. 由于电荷 B 的电量比电荷 A 大, 故中性点 N 必須在靠近 A 的一側. 設令 $\overline{AN} = x$, 那么电荷 A 的电場在 N 点的强度

$$E'_A = \frac{Q_A}{x^2} = \frac{10}{x^2}, \quad (1)$$

电荷 B 的电場在 N 点的强度

$$E'_B = \frac{Q_B}{(40+x)^2} = \frac{40}{(40+x)^2}, \quad (2)$$

由于 $E'_A = E'_B$, 所以

$$\frac{10}{x^2} = \frac{40}{(40+x)^2},$$

$$(40+x)^2 = 4x^2,$$

$$40+x = \pm 2x,$$

$$x = 40 \text{ 厘米, 或 } x = -\frac{40}{3} \text{ 厘米(不合理).}$$

(2) 在 C 点处, 电荷 A 的电場强度

$$E_A = \frac{Q_A}{50^2} = \frac{10}{2500} = \frac{1}{250} \text{ 达因/靜庫,}$$

电荷 B 的电場强度

$$E_B = \frac{Q_B}{30^2} = \frac{40}{900} = \frac{4}{90} \text{ 达因/靜庫.}$$

应用余弦定律, 求得 C 点处合場强的大小

$$E = 0.0422 \text{ 达因/靜庫.}$$

应用正弦定律, 求得合場强 E 的方向角

$$\theta = \sin^{-1} 0.0758 = 4^\circ 21'.$$

习 題 1.6(1)

1. 在真空中有点电荷 Q , 它的电量是 20 靜电系单位. 求在离它 10 厘米处的电場强度.

2. 在煤油($\epsilon=2$)中有一点电荷 Q , 在离它 5 厘米处的电場强度是 10 达因/靜庫. 求 Q 的电量.

3. 在电場中某一点放一个电量 $q=0.15$ 靜庫的檢驗电荷, 它受到的电場力为 3 达因. 求該点的电場强度. 如果这是一个点电荷的电場, 点电荷的电量 $Q=5$ 靜庫; 問檢驗电荷离开点电荷 Q 有多远? (一般在題目中未提介质, 就按在真空中的情况处理)

4. 两个均匀带正电荷的球体 A 和 B 相距 60 厘米, 它們分別带电 10 靜庫和 90 靜庫. 求中性点的位置和几何中心点(\overline{AB} 的中点)的場强.

5. 在正方形的四个頂角上各放一个正电荷 Q . 求: 对角綫交点处的电場强度.

6. 在正方形的三个頂角上各放一个正电荷 Q . 求(1)第四个頂角处的电場强度; (2)对角綫交点处的电場强度.

7. 在等边三角形的两个頂点上分別放一个正电荷 Q 和負电荷 Q . 求第三个頂点处的場强. 如果两个电荷 Q 都是正的, 第三个頂点处的場强又是多少?

4. 电力綫 为了便于表示电場中各点处电場强度的方向和大小, 最好是用图示法. 英国物理学家法拉第提出了一种叫做**电力綫**的图示法.

在电场中从任一点 A 开始,作一条短线 AB 表示 A 点的电场强度方向(注意:不表示电场强度的大小),如图 1.17(a) 所示. 再

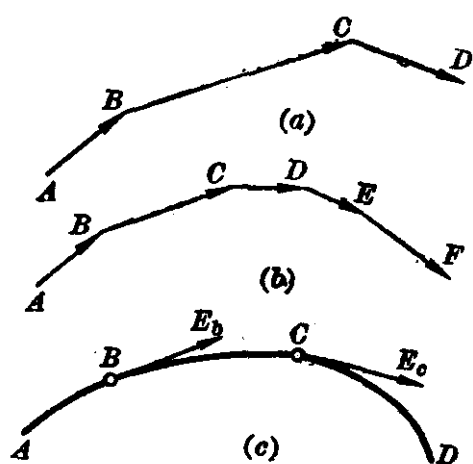


图 1.17 电力线示意图

从 B 点作短线 BC 表示 B 点的电场强度方向. 同样再作短线 CD 表示 C 点的电场强度方向. 由这些短线组成的折线 $ABCD$ 就指出了折线上 A 、 B 、 C 三点处的电场强度方向.

如果把各个线段缩短,并且增加折线的折数,如图 1.17(b) 所示,则用此线可以表明线上更多点处

(如 A 、 B 、 C 、 D 、 E) 的电场强度方向.

如果所作的线段无限地缩短,折线的折数无限地增多,那么就形成一根曲线 $ABCD$. 曲线上任何一点处的切线方向就表示那一点处的电场强度方向,如图 1.17(c) 所示.

在电场里,我们可以作出一系列的曲线,使线上每一点处的切线方向都和该点处的电场强度方向一致,这些曲线就叫做电力线.

理论和实验都证明,细小而能自由转动的针状绝缘体,在电场中停止时的方向就是该处场强的方向. 把奎宁的针状结晶浮在蓖麻油面上,放在强电场里,它们就首尾相接按电场强度的方向排列成线. 把很短的头发洒在玻璃板上,并把玻璃板放在强电场里,也可以显示出电力线的形象.

利用上述的方法,可以发现:在点电荷的电场里,电力线的形状如图 1.18 所示. 图(a)为正点电荷的电场,图(b)为负点电荷的电场.

利用这种方法,还可以发现:在两个电量相等的点电荷的电场里,电力线的形状如图 1.19 所示. 图(a)表示两个异种等量点电

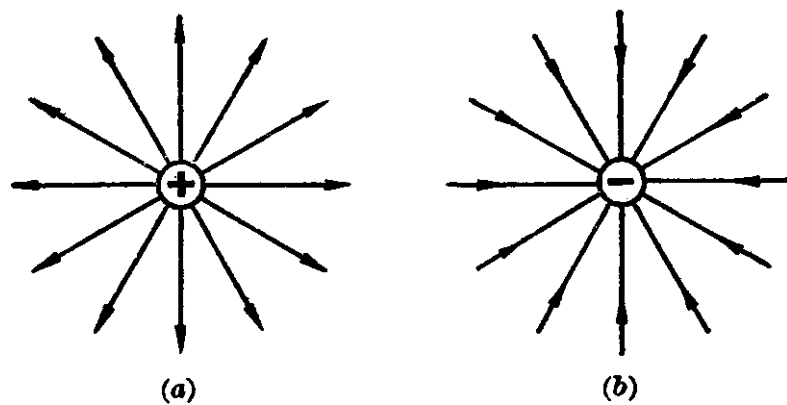


图 1.18 点电荷电场里的电力线

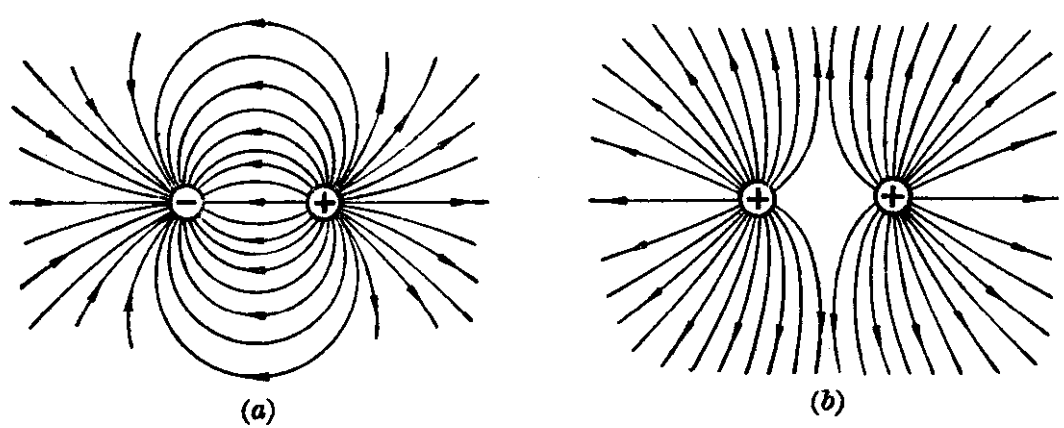


图 1.19 两个等量点电荷电场里的电力线

荷的电场,图(b)表示两个等量正点电荷的电场。

根据电力线的意义——用来表示电场强度的方向,我们可以对它的性质作出四点结论:

(1) 电力线总是从正电荷出发到负电荷终止,如以上各图中的箭头所示。电力线既不可能是闭合曲线,也不可能在正负电荷之间中断。

(2) 因为在电场中任一点处,总有一个确定的电场强度,所以通过电场里每一点总可以,也只能作出—根电力线。这就是说,除开在有电荷存在的地点之外,任意两条电力线决不相交。假如电力线在某点相交,那就表示这点的电场强度有两个方向,这显然是不可能的。

(3) 电力线表示电场中各点处的场强方向,也就是说,它还表

示正电荷在各点处所受电场力方向和所具有的加速度方向，但一般不表示正电荷的速度方向。我们不能把电力线和正电荷的运动轨迹混为一谈。

(4) 电场是真实存在的，电力线却并不真实存在，它只是我们为了形象化地表示电场情况而作出的一种图线。然而，尽管电力线并不真正存在，它所表示的电场情况却是符合客观实际的。

电力线既是由人画出来的，当然我们就可以按照需要画得疏些或者画得密些。通常我们用电力线的疏密程度来表示电场强度的大小，并规定用穿过单位横截面（垂直于电力线的截面）的电力线条数来代表电场强度的静电系单位数。

例如，电场中某处的电场强度为 3 达因/静库，我们就画 3 根电力线穿过每平方厘米的横截面。又如电场中另一处的电场强度为 5 达因/静库，我们就画 5 根电力线穿过每平方厘米的横截面。

5. 匀强电场 在电场的某一区域里，如果各点处的电场强度的大小和方向都相同，那么这个区域里的电场就叫做匀强电场。

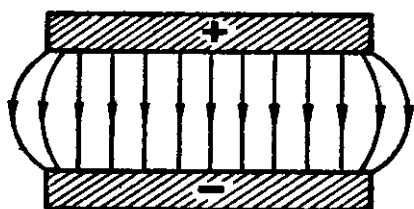


图 1·20 匀强电场

在匀强电场里，由于各点处场强的方向都相同，所以电力线是互相平行的直线；又由于各点处场强的大小都相同，所以电力线的疏密程度也均匀。图 1·20 所示的是两块大小相等的平行金属板，它们分别带等量的正负电荷。当两板间的距离足够近时，除边缘附近之外，其余部分差不多是匀强电场。

习 题 1·6(2)

1. 什么叫做电力线？它有什么用处？为什么任意两条电力线总不会相交？为什么用来表示匀强电场的电力线是疏密程度均匀的平行线？
2. 现有两个带异种等量电荷的小球，距离相当远。试画出它们之间的

电力綫。

3. 現有两个帶同种等量电荷的小球, 距离相当远. 試画出它們之間的电力綫。

4. 現有两块互相平行的金属板, 分別帶等量的正、負电荷. 試画出兩板間的电力綫。

5. 在两个水平放置的金属板之間, 有一个方向豎直向下的、場强等于 0.49 靜电系单位的匀强电场. 現在有一个带电的小液滴, 正好能悬浮在兩板間而处于平衡状态, 它所帶的电荷是正的还是負的? 如果液滴的重量是 10^{-6} 克, 問它所帶的电量是多少靜庫?

§ 1.7 电 势

1. 电場力的功和电势能 在力学里我們已經学习过, 当物体在重力的作用下移动时, 重力要作功, 同时物体的重力势能要发生变化。如果物体順着重力方向运动, 即物体下降时, 重力作正功, 同时势能减少; 重力作多少正功, 势能就有多少减量。当物体逆着重力方向运动, 即上升时, 重力作負功, 同时势能增加; 重力作多少負功, 势能就有多少增量。

与地球上的物体一定要受到重力作用相似, 在电場里的电荷也一定要受到电場力的作用。当电荷在电場力的作用下移动时, 电場力要作功, 电势能要发生变化。当电場力作正功时, 电势能减少; 当电場力作負功时, 电势能增加。电場力作多少功, 电势能就有多少变化。

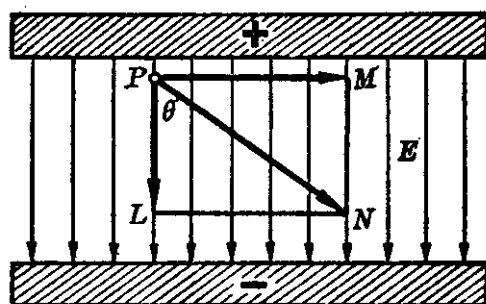


图 1.21 电場力的功

图 1.21 表示一个場强为 E 的匀强电場. 正电荷 q 所受到的电場力与場强 E 同方向, 它的大小

$$F = qE.$$

P 为电荷 q 的起始位置. 当它順着場强的方向移动到位置 L

时, 电场力 F 作正功

$$A = F \cdot \overline{PL} = qE \cdot \overline{PL}.$$

当它沿垂直于场强的方向移动到位置 M 时, 电场力不作功. 当它沿 PN 直线移动到位置 N 时, 电场力作正功

$$A = F \cdot \overline{PN} \cos \theta = qE \cdot \overline{PL}.$$

从图上可以看出, 如果电荷 q 不是直接从 P 点移动到 L 点, 而是经过路径 $PMNL$ 到达 L 点, 那么电场力所作的总功等于在各段路程 (PM 、 MN 和 NL) 上所作出的功的和. 在 PM 段, 电场力不作功; 在 MN 段, 电场力作功 $qE \cdot \overline{MN}$; 在 NL 段, 电场力也不做功. 因此, 在整个路程 $PMNL$ 上, 电场力的功

$$A = 0 + qE \cdot \overline{MN} + 0 = qE \cdot \overline{PL}.$$

如果经过路径是 PNL , 那么根据同样的方法, 可以求得电场力的功

$$A = qE \cdot \overline{PN} \cos \theta + 0 = qE \cdot \overline{PL}.$$

理论证明, 不管电荷 q 是沿直线路径、折线路径, 还是沿任意的曲线路径从 P 点移动到 L 点, 电场力所作的功总是等于 $qE \cdot \overline{PL}$.

根据以上的讨论, 我们可以得出结论: 当电荷在电场里移动时, 电场力的功只与电荷的起始位置和终止位置有关, 而与电荷实际经过的路径无关.

由于电场力的功等于电势能的变化量 (增量或减量), 所以我們也可以說: 当电荷在电场里移动时, 电势能的增减只与电荷的起迄位置有关, 与它实际经过的路径无关.

上面的结论, 不仅对匀强电场适用, 对别种电场也同样适用. 这是电场的又一重要性质.

在研究有关电势能的问题时 (其实, 在研究有关重力势能的问题时也是这样), 重要的是要了解电荷从一个位置移到另一位置时势能的增减量, 至于电荷在某一位置究竟具有多少势能, 却不是

一个重要的問題。通常我們总是先在电場中任意选定一个位置，假設电荷在这一位置时的电势能为零（称它为零势能位置），然后根据电場力作功的正負和多少，来确定电荷在其他位置的电势能。

仍以图 1·21 所示的匀强电場为例來說明：当正电荷从 P 点移到 L 点时，电場力作正功 A ，电势能减少 A ；当負电荷从 P 点移到 L 点时，电場力作負功 A ，电势能增加 A 。如果我們选定 P 为零势能位置，那么正电荷在 L 点时电势能等于 $-A$ （比零小），負电荷在 L 点时电势能等于 $+A$ （比零大）。如果我們选定 L 为零势能位置，那么正电荷在 P 点时电势能等于 $+A$ ，負电荷在 P 点时电势能等于 $-A$ 。由此可見，电势能的大小是没有什么絕對意义的，它只不过是和任意选定的零势能位置相比較而得出的結果而已。

电势能和重力势能一样，都不是矢量，都沒有方向性。如果电荷在某一位置的电势能为正值，这就表示电荷在該位置的电势能比在标准位置（任意选定的零势能位置）的电势能大；如果为負值，則表示較小。类似地，在研究重力势能时，我們常取地面为标准位置（即取物体在地面处的势能为零），故物体在地面以上的势能为正值，在地面以下为負值。

在力学里我們还曾学过，重力势能是为地球和重物所共有的，而不是为重物所独有的。同样，电势能也是为电場和电荷所共有的。离开电場，电荷就不受电場力的作用，当它从一个位置移到另一位置时就不做功，因而也就根本談不到电势能的增减和电势能。通常我們說“电荷具有多少势能”，只是一种慣用的簡便說法，絕對不能誤解为电荷单独具有势能。

2. 电势 在电場里，只要有电荷存在，就一定有电势能存在。这是电場特性的另一种表現。

电势能的大小虽然沒有絕對的意义，但在选定了**标准位置**以

后,电荷在一定位置的电势能总是确定的,不可能时大时小. 这说明电势能的大小与电场的某种性质有关. 同一个电荷,在电场中不同的位置上,由于这种性质的不同,其电势能的大小也就不同.

除此以外,电势能既为电场和电荷共同所有,它的大小也就必然不会单独为电场的性质所决定,而是也要为电荷的电量及正负有关.

为了定量地表示电场的这种性质,我们引入一个新的物理量——**电势**,并且规定:

电场中某一点的电势等于单位正电荷在该点的电势能.

或说:

电场中某一点的电势等于电荷在该点的电势能和电荷电量的比.

如果用 W 表示电荷 q 在电场中某一位置的电势能,那么该位置的电势 U 可用定义式表示如下:

$$U = \frac{W}{q}.$$

由于电荷在标准位置的电势能假定为零,所以标准位置的电势也必须假定为零. 和电势能相同,电势的大小也没有绝对的意义,它只不过是和标准位置相比较出的结果而已. 在实际应用时,我们常取地球为标准位置(即零电势位置);在理论研究时,我们常取无限远处为标准位置. 在习惯上,我们也常用“电场外”这样的说法来代替“零电势位置”.

在厘米·克·秒制静电单位系中,电势的单位为尔格/静库,它就叫做**静电系单位电势**,或简称为**静伏**. 如果把1静库的正电荷放在电场中某一位置,电势能正好是1尔格,那么这一位置的电势就是1静电系单位电势,或称为1静伏.

电势的实用单位为焦耳/库仑,叫做**伏特**. 如果把1库仑的正电荷放在电场中某一位置,电势能正好是1焦耳,那么这一位置的

电势就是 1 伏特。

$$1 \text{ 伏特} = \frac{1 \text{ 焦耳}}{1 \text{ 庫侖}} = \frac{10^7 \text{ 尔格}}{3 \times 10^9 \text{ 靜庫}} = \frac{1}{300} \text{ 靜伏。}$$

即 1 伏特等于 $1/300$ 靜电系单位电势。

习 题 1·7(1)

1. 电場中某一位置的电势是 60 伏特。先后把电量 $q_1 = 100$ 靜庫和 $q_2 = 2 \times 10^{-7}$ 庫侖的正电荷放在这一位置, 問电势能各为多少?

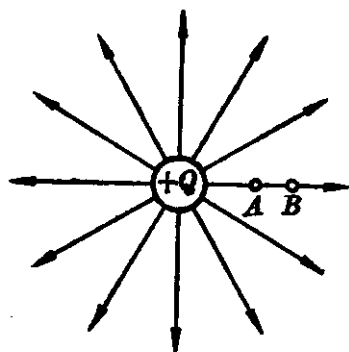
2. 如果前題中的 q_1 和 q_2 都是負电荷, 放在該位置的电势能又各是多少?

3. 如果把正电荷从电場中的一点移向电場外时, 电場力作正功, 那么正电荷在这一点电势能是正值还是負值? 負电荷在这一点电势能是正值还是負值? 这一点的电势是正值还是負值?

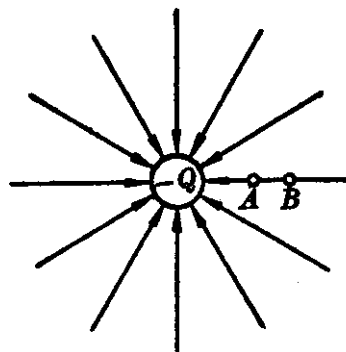
4. 如果負电荷从电場中的一点移向电場外时, 电場力作正功, 那么負电荷在这一点电势能是正值还是負值? 正电荷在这一点电势能是正值还是負值? 这一点的电势是正值还是負值?

5. 把电量为 5 靜庫的正电荷从电場外移到电場中的某一点, 需要用外力抵抗电場力作功 (即电場力作負功) 10 尔格, 問这一点的电势是多少? 如果把电量为 8 靜庫的負电荷放在这一点, 电势能又是多少?

6. 附图表示一个正点电荷 Q 的电場。如果把正电荷 $+q$ 放在 A 点或 B 点, 問它在哪一点时电势能較大? 如果把負电荷 $-q$ 放在 A 点或 B 点, 問它在哪一点时电势能較大? 哪一点的电势較高?



正点电荷电場
(第 6 題)



負点电荷电場
(第 7 題)

7. 附图表示一个負点电荷 Q 的电場。問正电荷 $+q$ 在 A 点处的电势能較大呢, 还是在 B 点处的电势能較大? 如果把負电荷 $-q$ 放在 A 点或 B

点,問在哪一处时电势能較大? 哪一点的电势較高? (要求說明理由)

3. 电势差 对一定的标准位置來說, 电場中每一点处都有一个确定的电势. 例如在习题 1.7(1) 第 6 題附图中, A 点处的电势为 U_A , B 点处的电势为 U_B , 那么 U_A 和 U_B 的差值就叫做 A 、 B 两点間的电势差, 并用下面两个等式来表示:

$$V_{AB} = U_A - U_B,$$

$$V_{BA} = U_B - U_A.$$

式中 V_{AB} 表示 A 点处电势比 B 点处电势高出多少, V_{BA} 表示 B 点处电势比 A 点处的电势高出多少.

設令正电荷 q 在 A 点和 B 点的电势能分别为 W_A 和 W_B , 那么根据电势的定义式, 可以写出等式:

$$W_A = qU_A,$$

和

$$W_B = qU_B,$$

从而可以看出, 电荷 q 从 A 点移到 B 点的电势能减量

$$W_A - W_B = q(U_A - U_B),$$

或

$$W_A - W_B = qV_{AB}.$$

由于电势能减量等于电場力所作的功, 所以正电荷 q 从 A 点移到 B 点时, 电場力所作的功

$$A = qV_{AB}.$$

这就是說: 电場中 A 、 B 两点間的电势差等于单位正电荷从 A 点移动到 B 点时电場力所作的功.

正电荷的电量 q 为正值, 当它从电势較高的 A 点移向电势較低的 B 点时 (如习题 1.7(1) 第 6 題附图所示), 电势差 V_{AB} 也为正值, 故此时 $A = qV_{AB}$ 为正值, 即电場力作正功; 当它从电势較低的 A 点移向电势較高的 B 点时 (如习题 1.7(1) 第 7 題附图所示), 电势差 V_{AB} 为負值, 故此时 $A = qV_{AB}$ 为負值, 即电場力作負功. 原来靜止在电場里的正电荷, 如果只受电場力的作用, 那么它总是从电势較高的一点向着电势較低的一点运动.

負电荷的电量 q 为負值, 当它从电势較高的 A 点移向电势較低的 B 点时(如习题 1.7(1)第 6 题附图所示), 电势差 V_{AB} 为正值, 故此时 $A = qV_{AB}$ 为負值, 即电場力作負功; 当它从电势較低的 A 点移向电势較高的 B 点时(如习题 1.7(1)第 7 题附图所示), 电势差 V_{AB} 为負值, 故此时 $A = qV_{AB}$ 为正值, 即电場力作正功. 原来靜止在电場里的負电荷, 如果只受电場力的作用, 那么它总是从电势較低的一点移向电势較高的一点.

总之, 原来靜止在电場里的电荷, 不管它帶正电还是負电, 只要是在电場力的单独作用下运动, 总是向着电場力作正功的方向运动, 也就是說, 它总是从电势能較大的一点移向电势能較小的一点.

4. 等电势点和等电势面 在电場中, 凡是电势相等的各点都叫做等电势点. 在匀强电場里, 分布在同一个垂直于电力綫的平面上的各点都是等电势点. 这个垂直于电力綫的平面就叫做等电势面, 意即面上各点的电势都相等. 图 1.22 表示一个匀强电場. AB 、 CD 等許多垂直于电力綫的平面都是等电势面. 每一个等电势面都有确定的电势, 但不同等电势面的电势却不相同.

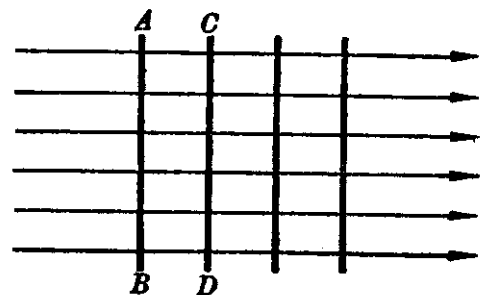


图 1.22 匀强电場等电势面

在点电荷电場里, 所有的等电势点都是离开点电荷等距离的点, 它們分布在一个以点电荷为中心的球面上. 这个球面也叫做等电势面. 图 1.23 表示一个点电荷电場, 許多同心球面都是等电势面, 但各个球面上的电势却互不相同.

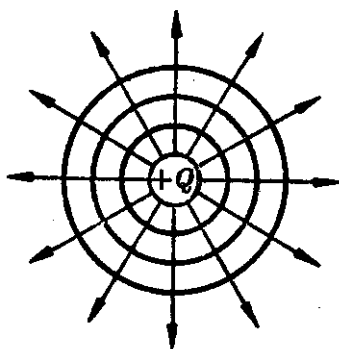


图 1.23 点电荷电場等电势面

电荷 q 在一个等电势面上运动时, 由于电势能沒有增减, 所以电場力不作功.

由于在两个等电势面之間总有确定的电势差 V 存在, 电荷 q 从一个等电势面移到另一个等电势面的电势能变化(增或减)等于 qV , 因而电場力所作的功也等于 qV (負或正).

只要电荷 q 在电力綫的方向(即电場强度的方向)上有运动, 电場力总是

要作功的。已知电荷在等电势面上运动时电场力不作功，所以一切等电势面总是和电力线正交(即相垂直)。

习 题 1·7(2)

1. 电场中 A 、 B 两点间的电势差 $V_{AB}=0.2$ 静伏。现在把 $q=+0.3$ 库仑的正电荷从 A 点移到 B 点，问电场力作多少功？如果把 $q=-0.5$ 库仑的负电荷从 A 点移到 B 点，电场力又作多少功呢？

2. 在电场中，把 $q=10^{-5}$ 库仑的正电荷从 A 点移到 B 点，需要抵抗电场力作功 600 尔格，求 A 、 B 两点间的电势差，并指出哪一点的电势较高。

3. 在电场中有甲、乙两个等电势面，甲等电势面的电势是 300 伏特，乙等电势面的电势是 200 伏特。求在下列各情况下电场力所作的功：

(1) 电量是 10^{-7} 库仑的正电荷从甲面移到乙面；

(2) 电量是 10^{-8} 库仑的负电荷从甲面移到乙面；

(3) 电量是 500 静库的正电荷从乙面移到甲面；

(4) 电量是 400 静库的负电荷从乙面移到甲面；

(5) 电量是 50 静库的正电荷从甲面上某一点移到甲面上另一点；

(6) 电量是 80 静库的负电荷从乙面上某一点移到乙面上另一点。

4. 分别说明正、负电荷在电场里移动时的作功情况和电势能增减情况。并说明电荷在电场中移动时，电场力的功是怎样计算的？

5. 原来静止在电场中的带电体，如果除电场力之外，不受任何其他力的作用，问它沿什么方向运动？势能的增减情况怎样？减少的势能变成什么能？

6. 什么叫做电势？电势是用什么来量度的？电势的单位是怎样规定的？什么叫电势差？

7. 什么叫做等电势点？什么叫做等电势面？为什么电荷在等电势面上运动时电场力不作功？

5. 电势差跟电场强度的关系 场强和电势都是用来表示电场特性的物理量，它们从不同的方面来表现电场的特性。场强表现电荷在电场里总要受到电场力的作用，电势表现电荷在电场里总要具有电势能。电场的这两个特性是相互联系的，所以场强和电势虽是两个不同的物理量，它们之间却存在着一定的关系。这种关系可用匀强电场作例子来作初步的说明。

图1·24表示一个场强等于 E 的匀强电场。如果把正电荷 q 放在 A 点,那么,在电场力的作用下它将顺着场强的方向(即电力线的方向)移向 B 点。这说明 A 点的电势高于 B 点的电势,同时还说明电势顺着场强的方向降落。

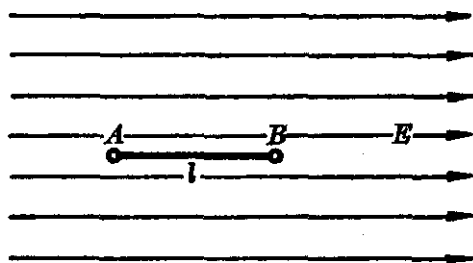


图1·24 场强和电势差的关系

这个结论,对不均匀的电场也是适用的。拿习题1·7(1)

第6题附图所示点电荷电场来说,场强的方向由 A 指向 B ,电势降落的方向也是由 A 指向 B 。再拿习题1·7(1)第7题附图所示点电荷电场来说,场强的方向由 B 指向 A ,电势降落的方向也是由 B 指向 A 。

场强和电势降落,不仅在方向上存在着上述的关系,在数量上也存在着一定的关系。

仍旧拿图1·24所表示的匀强电场来说,假设 A 、 B 间的距离为 l ,电势降落为 V (即 $U_A - U_B$)。那么当正电荷 q 从 A 点移到 B 点时,电场力所作的功可以用两个不同的等式来表示:

$$A = Fl = qEl,$$

和

$$A = qV,$$

式中的 F 表示作用在电荷 q 上的电场力。根据上面两个等式,我们可以看出:

$$V = El.$$

这一等式说明:在匀强电场里,两点间的电势差等于电场强度和两点在场强方向的距离的乘积。

在匀强电场里,我们称两点间的电势差 V 和沿场强方向的距离 l 的比(即 V/l)为匀强电场的电势梯度,或称为匀强电场的电势陡度。把上面的等式变换为

$$E = \frac{V}{l},$$

我們就可以作出这样一个結論：電場強度等于電勢梯度，并指向電勢降落的方向。

理論可以證明，最后这一个結論，不仅对勻強電場适用，而且对任何別种電場也都适用。但由于電勢梯度，除勻強電場之外，一般都不等于 V/l ，所以上面的等式只对勻強電場适用，对別种電場都不适用。

在厘米·克·秒制靜電单位系中，電勢梯度的单位为靜伏/厘米。勻強電場的電勢梯度在数值上等于沿場強方向相隔 1 厘米兩点間的電勢差的靜伏数。

习 題 1.7(3)

1. 在勻強電場中，在場強的方向上依次排列 A 、 B 、 C 三点， A 、 B 的距离是 4 厘米， B 、 C 的距离是 6 厘米。 A 点的電勢最高。設場強 $E=0.5$ 靜電系单位 (达因/靜庫)，求電勢差 V_{AB} 、 V_{BC} 和 V_{CA} 。

2. 在電場里，電勢沿什么方向降落？沿什么方向升高？勻強電場的電勢梯度等于什么？電場強度和電勢梯度之間有怎样的关系？

3. 在实际应用中，常用伏特/厘米作为電場強度的单位。試證明 1 伏特/厘米 = $1/300$ 达因/靜庫。

4. 在原子物理学中，常常用电子伏特作为能量的单位。1 电子伏特的能量就是一个电子在通过電勢差等于 1 伏特的一段路程上所得到的能量。試證明 1 电子伏特 = 1.6×10^{-12} 尔格。

§1.8 导体的電勢

1. 导体上的靜電平衡 靜電平衡就是电荷沒有定向移动。电子理論指出，导体是含有很多自由电子的物体。在電場力的作用下，自由电子总要作定向移动，即总要逆着電場強度的方向移动。所以我們說，只要在导体內部有電場存在，靜電平衡就不可能；那里的電場強度不等于零，那里的自由电子就要作定向移动。由此可知，导体上靜電平衡的条件是体内電場強度到处为

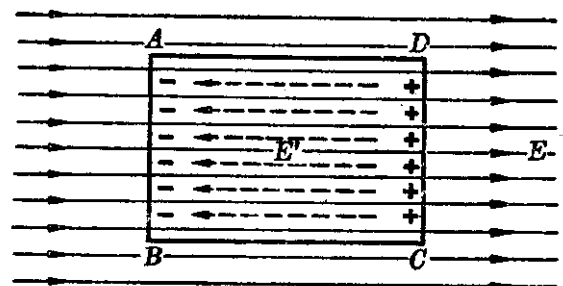
零。

由于电场强度等于电势梯度，电场强度到处为零就是电势梯度到处为零，电势梯度到处为零就是电势到处相等（不一定到处为零）。由此可知，在静电平衡状态下，导体是一个等电势体，导体的外表面是一个等电势面。

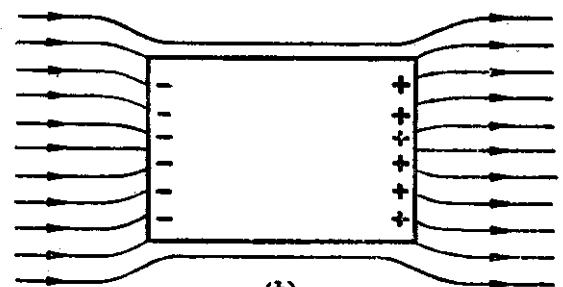
导体上电荷分布发生自发变化的过程，实际上都是从不平衡状态趋向平衡状态的过程。在这个过程中，导体内部的电场强度从不是到处为零转变成到处为零，导体上各点的电势从互不相等转变成到处相等。所以我们说，只有在静电平衡状态下，导体才有确定的电势。否则，不但各点的电势不同，而且都还在不断变化中。

导体上的电荷，从不平衡状态趋向平衡状态的变化过程是极其短暂的，一般可以看做是瞬时完成的。兹举静电感应现象为例，来说明这种过程：

把一块原来不带电的金属导体 $ABCD$ 放入一个匀强电场里，如图 1.25(a) 所示。在开始的时候，导体内部的电场强度和外部一样，都等于 E 。图里的自左向右的实线表示这个电场的电力线。在电场 E 的作用下，导体里的自由电子逆着电力线的方向移动（即自右向左移动），因而使 AB 面上有了过多的电子，形成带负电荷的现象， CD 面上缺少了电子，形成带正电荷的现象，于是在导体内部建立了新的电场 E' 。图里的自右向左的虚线就表示新建电场的电力线。 E' 的方向与 E 方



(a)



(b)

图 1.25 导体内部场强等于零

向相反,它使导体里的电场强度从原来的 E 削弱为 $E - E'$. E 是恒定不变的, E' 是随着电子的迁移在不断加强的. 只要 $E - E' \neq 0$, 电子总要继续向左移动, 导体两端的正、负电荷总要不断增加. 直到最后达到 $E - E' = 0$, 电子才停止定向移动, 导体内部形成静电平衡状态. 这时, 导体内部的电场强度到处为零, 导体内部没有电力线, 导体的两端分别带有等量的异种电荷. 这就是我们所熟悉的静电感应现象.

进一步的研究指出, 在有导体存在的情况下, 原有电场的电力线分布也略有变化. 在靠近导体处, 这种变化特别显著. 图 1.25(b) 表示这种变化的大概情形.

理论还证明, 在静电平衡状态下, 空心导体内部的电场强度也到处为零, 所以它能起静电屏蔽作用.

2. 导体的电势 我们已了解, 在静电平衡状态下, 带电导体总是一个等势体. 但是, 不同带电体的电势却不一定相同; 也正是由于如此, 才会产生电荷传递的现象. 如果使两个原来电势不等的绝缘导体互相接触, 或者用导线把它们连接在一起, 自由电子就从电势较低的一个导体移向电势较高的一个导体, 形成电荷定向移动的现象. 在电荷传递的过程中, 两个导体的电势差逐渐减小, 直到最后它们的电势相等, 才达到静电平衡状态.

在研究有关这一类的问题时, 我们常常需要知道导体的电势. 为了定量地说明电势的高低, 在实际应用中我们总是取地球为标准导体, 并规定它的电势为零.

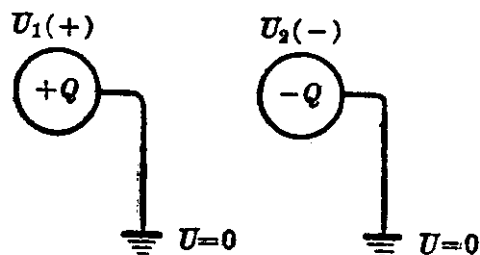


图 1.26 带电导体接地

凡是比地球电势高的都称为正电势, 较低的都称为负电势.

把一个带正电的导体 (图 1.26), 用导线与地连接, 它就失去了正电荷. 这说明有自由电子从地下移入导体, 和它原先带有的正电荷中和. 由于自由电子总是从低电势体移向高电势体, 所以

这又说明：带正电荷的导体具有正电势。

如果把一个带负电的导体，用导线与地相连，它也要失去自己的负电荷。这说明自由电子要从导体移入地下，即：带负电荷的导体具有负电势。

在这样的规定下，所谓某一个导体的电势，实际上就是那一个导体跟地球之间的电势差。

用来量度导体电势的仪器叫做静电计。它的构造如图 1.27 所示，与验电器大体相似，唯一的区别是静电计必须有一个金属外壳，验电器就不一定需要。

静电计的理论比较复杂，超过了本书的范围，所以现在我们就讲它的使用方法。

如果把静电计的金属外壳 K 接地，把顶球 A 连接被测的导体，根据指针 Z 偏转角度的大小，就可以知道导体的电势。利用图 1.28 的装置，我们可以用静电计测出导体上各处的电势，从而证明导体的外表面是一个等电势面。

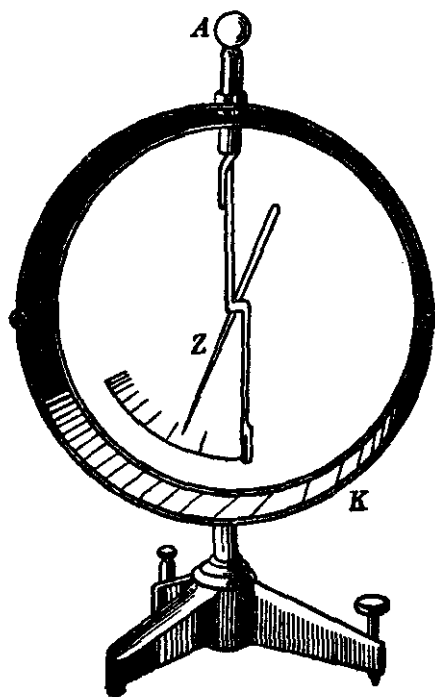


图 1.27 静电计

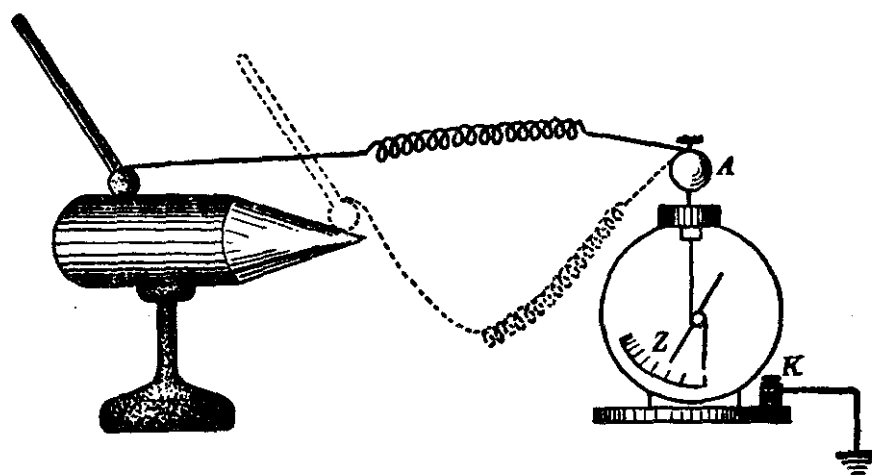


图 1.28 导体上各处电势相同

如果把靜电計的金属外壳 K 和金属頂球 A 分别与两个导体相連(如图 1.29 所示), 那么指針 Z 的偏轉角度就表示两个导体間的电势差 $U_1 - U_2$.

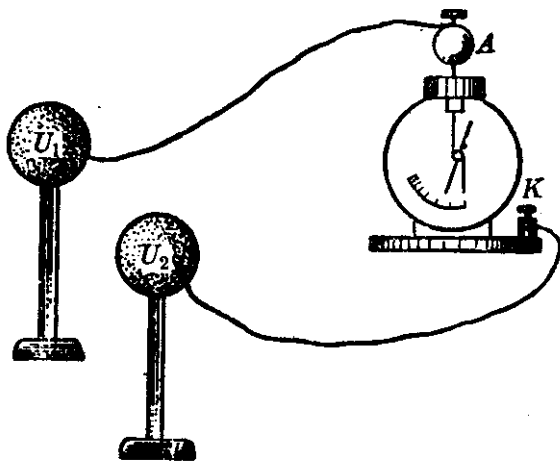


图 1.29 用靜电計測量电势差

习 題 1.8

1. 为什么从导体表面出发, 或終止于导体表面的电力綫总是与导体的外表面相垂直?
2. 在計算均匀带电球体外部的电場强度时, 我們可以把带电球体当做是全部电荷集中在球心的点电荷看待. 試述均匀带电球体外部某一点处的电場强度和哪些因素有关? 如果带电球体的半徑为 R , 那么球面上的电場强度等于什么? 球內的电場强度又等于什么?
3. 怎样用靜电計測量两个带电导体之間电势差? 怎样用它来測量一个带电导体的电势?
4. 在靜电平衡状态下, 接地导体的电势等于什么?

§ 1.9 电容和电容器

在上一节里我們讲过, 在靜电平衡的条件下, 带电导体具有确定的电势. 同时我們也已經学会了用靜电計来測量导体的电势. 但是我們还没有了解导体的电势究竟与哪些因素有关. 在这一节里, 我們就要討論这一个問題.

1. 导体的电容 首先讓我們来看一个实验.

在进行实验前，我們准备好几个大小和形状都不同的絕緣空心导体和若干个帶等量同种电荷的絕緣金属小球。絕緣空心导体上都开有小孔，可以容許金属小球出入。只要把帶电的金属小球伸入空心导体并和它的內壁相接触，就可以使小球上所帶电荷全部傳給空心导体。

先拿一个空心导体做实验。把它和一个外壳接地的靜电計連接在一起，如图 1.30 所示。在空心导体不帶电时，靜电計的指針不偏轉，这表示空心导体的电势和地球的电势相等，它們都等于零。依次傳給它一个小球所帶电荷 q ，两个小球所帶电荷 $2q$ ，三个小球所帶电荷 $3q$ ， \dots ，并在每次增加电量之后，測定一次电势（即讀一次靜电計指針偏轉的刻度）。結果指出：导体的电势和它所帶的电量成正比，也就是說，电量和电势的比是一个恒量。

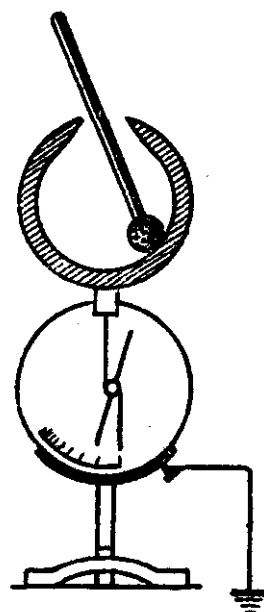


图 1.30 研究导体的电容

換用別的空心导体做同样的实验。我們將发现，当它帶有电量 q ， $2q$ ， $3q$ ， \dots 时，靜电計指針偏轉的刻度数与上一个空心导体帶有相等电量时靜电計指針偏轉的刻度数不同，即电量相等的电荷并不能使不同的导体都获得相等的电势。这就說明，导体的电势不但与所帶电荷的电量有关，同时还与导体本身的性质有关。

对許多不同的导体做同样的实验，結果指出：对指定导体來說，电量和电势的比都是一个与电量大小无关的恒量（即导体的电势和它所帶的电量成正比）；但对不同的导体來說，这个比值的大小却各不相同。因此我們认为这个比值可以用来表示导体在这一方面的特性。

为了定量地表示导体的这种特性，我們引入一个新的物理

量——**电容**，并规定：导体的电容等于它所带电荷的电量和它的电势之比。

如用 C 表示导体的电容， Q 表示它所带电荷的电量， U 表示它的电势，那么电容的定义式就是

$$C = \frac{Q}{U}.$$

进一步的实验还指出：导体的电容跟它的大小和形状有关，制成它的材料无关。

在厘米·克·秒制静电单位系里，电容的单位为静库/静伏，叫做**静法**，又叫**静电系单位电容**。

如果有一个导体，当它带电 1 静库时，它的电势正好是 1 静伏，那么这个导体的电容就是 1 静法。

电容的实用单位叫做**法拉**。如果有一个导体，当它带电 1 库侖时，它的电势正好是 1 伏特，那么这个导体的电容就叫做 1 法拉。

$$1 \text{ 法拉} = \frac{1 \text{ 库侖}}{1 \text{ 伏特}} = \frac{3 \times 10^9 \text{ 静库}}{\frac{1}{300} \text{ 静伏}} = 9 \times 10^{11} \text{ 静法}.$$

理论证明，在厘米·克·秒制静电单位系里，均匀带电球形导体的电容在数值上等于它的半径。也就是说，电容的静法数等于半径的厘米数。

在我们经常接触到的导体中，地球可以算是一个半径最大的球形导体了。它的半径约为 6.4×10^3 千米 = 6.4×10^8 厘米，它的电容约为 6.4×10^8 静法 $\approx 700 \times 10^{-6}$ 法拉。

由此可见，法拉是个很大的电容单位。在实际应用中，我们常用它的百万分之一 (10^{-6} 法拉) 作为单位，叫做**微法拉**。有时还用它的亿万分之一 (10^{-12} 法拉) 作为单位，叫做**微微法拉**。

必须指出，电容是表示导体性质的物理量；导体在带电时，电量和电势的关系就由这种性质来决定。这种性质为导体的本身条

件(如大小、形状等)所决定,与它是否带电和带电多少无关.切不可误认为导体要在带电时才有电容,在不带电时就没有电容.

还须指出,决定导体电容的条件,除了导体的大小和形状之外,还有它周围的导体和电介质.只有孤立导体的电容才只与它本身的大小和形状有关.而孤立导体,实际上是不存在的;在真空或空气中的导体,如果距离其他导体或电介质很远的話,可以近似地看成是孤立导体.

例 8. 金属球 A 和 B 相距很远,它们的半径分别为 10 厘米和 5 厘米,所带电量也分别为 +1000 静库和 -400 静库.现在用一根细导线把它们连接起来,问它们各带多少电荷?

【解】 题目指明这两个球体相距很远,意即它们可以各自看做是孤立导体,它们的电容也可以认为只与自己的大小和形状有关.由于孤立球形导体电容的静法数等于半径的厘米数,所以两金属球的电容应当分别为:

$$C_A = R_A = 10 \text{ 静法},$$

$$C_B = R_B = 5 \text{ 静法}.$$

根据导体电容的定义式,我们可以看出,在用细导线连接两个导体之前,它们的电势应当分别为:

$$U_A = \frac{Q_A}{C_A} = \frac{+1000}{10} = +100 \text{ 静伏},$$

$$U_B = \frac{Q_B}{C_B} = \frac{-400}{5} = -80 \text{ 静伏}.$$

这说明两个导体的电势不同,用导线连接后,自由电子要从电势較低的 B 球移向电势較高的 A 球,形成电荷重行分配,直到最后两球电势相等为止.

设令达到静电平衡后的共同电势为 U , A 球上的电荷为 Q'_A , B 球上的电荷为 Q'_B , 那么

$$U = \frac{Q'_A}{C_A} = \frac{Q'_B}{C_B}. \quad (1)$$

由于在电荷重行分配的过程中,总电量不会有所增减,所以

$$Q'_A + Q'_B = Q_A + Q_B. \quad (2)$$

解方程(1)和(2),并代入数值,得出

$$Q'_A = 400 \text{ 靜庫}; \quad Q'_B = 200 \text{ 靜庫}.$$

【注】 题目中明确指出,用来连接两球的导线是细导线.其目的是告诉我们,导线的电容很小,可以忽略不计,因而分布在导线上的电量也可以忽略不计.

习 题 1·9(1)

1. 一个导体在带电 2×10^{-8} 庫侖时,电势是 500 伏特. 问导体的电容是多少微微法拉和多少靜法.

2. 导体的电容是 10 靜电系单位,当它带电 2×10^{-10} 庫侖时,电势应该多少伏特?

3. 导体的电容是 0.01 微法拉,如果要使它的电势达到 0.1 靜伏,应该给它带多少电荷?

4. 两个金属球,一个较大,另一个较小. 现在使它们带等量电荷. 它们的电势是否相等? 如果用导线把两个球连接起来,会不会有电荷流动? 负电荷流动的方向怎样? 流到什么情况为止?

5. 两个完全相同的绝缘金属球,一个带电,一个不带电,它们相距很远. 现用一根细导线把它们连接起来,试述两球的电量和电势将作怎样的变化.

6. 孤立的球形导体带正电荷 10 靜庫,半径为 10 厘米. 求(1)在靠近球面处的场强;(2)球体的电势;(3)球体内部的场强.

7. 两个绝缘金属球的半径分别为 3 厘米和 1 厘米,它们之间的距离很大. 已知大球带正电荷 15 靜庫. 要使它们被导线连接起来时没有电荷的迁移,问小球应带多少电荷?

2. 电容器 孤立导体的电容一般是很小的. 地球是我们可以接触到的最大的导体,它的电容也不过 700 微法拉. 9000 米半径的大球,它的电容只不过 1 微法拉,这在实际应用方面是很不方便的. 此外,由于任何实际导体都不可能是孤立的,在它周围的空間里总有别的导体和电介质存在. 实验和理论都证明,这种周围环境的变化总要影响实际导体的电容值,使它不能保持恒定.

为了說明这种影响,讓我們来叙述一下下面的实验。

图 1·31(a) 表示一个带正电荷 Q 的金属板 A , 当它的附近沒有别的导体存在时, 用靜电計測得它的电势等于 U 。如果在它的附近另外放一个和它平行的金属板 B , 如图 1·31(b) 所示, 則靜电計的指針偏轉角略有减小。这就表明, 尽管 A 板上的电荷并未减少, 但它的电势却有了降低, 显而易见这是由于电容有了增加的緣故。

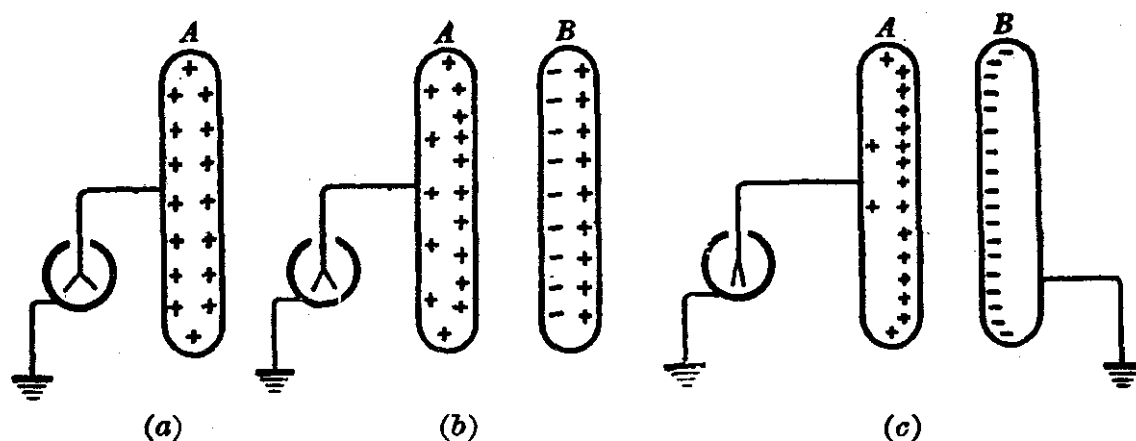


图 1·31 研究电容器的原理

如果把 B 板接地, 如图 1·31(c) 所示, 此时 A 板上的电势降得更低了, 也就是說电容增加得更大了。

进一步的实验还指出, 如果 A 、 B 两板之间的距离越近, 則 A 板的电势降得越低, 也就是說电容增加得越大。

实验的结果告訴我們, 在不增加导体大小的条件下, 用什么方法可以来加大电容。

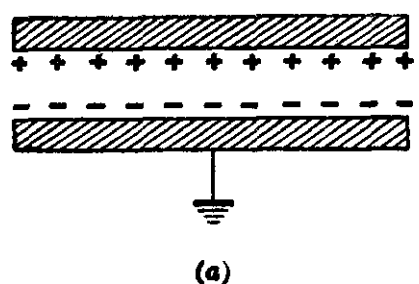
理論和实验都还指出, 当两块带等量异种电荷的平行金属板足够接近时, 它們的电容就不再受周圍环境的影响, 而变成几乎完全恒定。

所謂导体的电容恒定, 就是指一定的电量总可以使它达到一定的电势, 不会因周圍环境的改变而时高时低。导体的电容大, 就表示当它帶有比較大量的电荷时它的电势并不会很高。在电学理論研究和实际应用中, 我們常常要用到一种电容較大而恒定的装

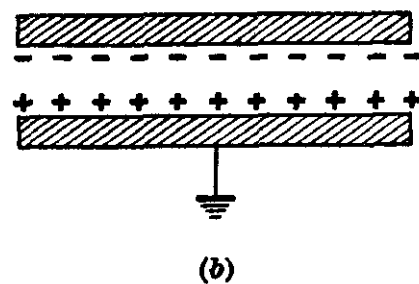
置。这种装置就叫做电容器。

电容器的种类虽多，但原则上总是由两个互相绝缘而又互相接近的导体所组成。

最简单的电容器是平行板电容器，它由两块互相绝缘的、相距很近的平行金属板所组成。应用时，两板分别带有等量异种电荷。



(a)



(b)

图 1-32 平行板电容器

或一板带电，另一板接地，结果也能获得同样的效果。由于异种电荷相吸，所以板上的电荷完全集中在两板的内侧，如图 1-32 所示。这种装置的电场近似为匀强电场，并且几乎完全局限在两板之间。即使在它的周围有别的导体存在，也不受静电感应的作用。这种装置的电容是常定的；当它带有一定电量的电荷时，总有一定的电势，不会因周围环境发生变化而有所增减。

电容器的两个带异种电荷的金属板，叫做电容器的极板，带正电的叫做正极板，带负电的叫做负极板。一个极板所带电荷的电量，叫做电容器所带的电量。

3. 电容器的电容 把电容器的两个极板，分别和静电计的外壳 K 和顶球 A 相连接（如图 1-33 所示）。如果电容器极板中有一个接地，那么就把不接地的那一个极板和静电计的顶球连接在一起，并把静电计的外壳接地（如图

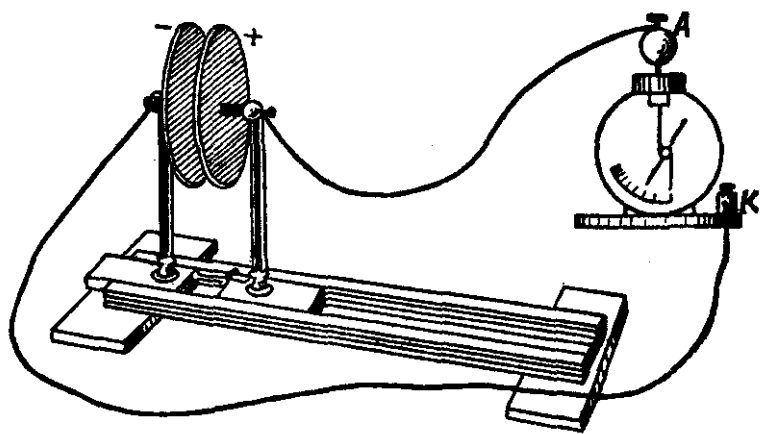


图 1-33 研究电容器的电容

1·31(c)所示)。这样一来，靜电計指針的偏轉角度就直接表示电容器两极板之間电势差 V 。实验指出，在不改变电容器本身条件的情况下，极板間电势差 V 跟电容器所带电量 Q 成正比，也就是 Q 和 V 的比恒定不变。这个恒量的大小，完全决定于电容器的性质，叫做电容器的电容，并且規定：电容器的电容等于所带电荷的电量跟两极板間电势差的比。用公式表示，即为

$$C = \frac{Q}{V}.$$

当 $V=1$ 靜伏时， $C=Q$ ；所以我們也可以說：电容器的电容在数值上等于使两极板間电势差升高 1 单位所需要的电量。

电容器的电容究竟由哪些本身条件来决定呢？

为了解决这个問題，我們可以繼續应用图 1·33 所表示的装置来进行下述实验：

(1) 維持电容器极板面积和所带电荷的电量不变，单独改变极板間的距离，并測出相应的电势差。結果指出：当距离增大时，电势差也加大，这表示电容在减小；当距离减小时，电势差也减小，这表示电容在加大。由此可見，平行板电容器的电容和极板間的距离有关。

(2) 維持电容器极板距离和所带电荷的电量不变，单独改变极板的面积，并測出相应的电势差。結果指出：面积增大时，电势差减小，这表示电容在增大；面积减小时，电势差增大，这表示电容在减小。这說明平行板电容器的电容和极板的面积有关。

(3) 維持电容器极板面积、距离和电量都不变，依次用介电常数 ϵ 不同的电介质插入两块极板之間来代替空气介质，并測出相应的电势差。結果指出：电介质的 ϵ 越大，电势就越小，这表示电容随着 ϵ 增大而增大。

通过以上的实验，使我們知道：平行板电容器的电容跟极板面积、板間距离和板間电介质的介电常数有关。理論推导得出平行

板电容器的电容公式如下；

$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi d}$$

式中 ϵ 代表电介质的介电常数，在极板面积 S 的单位为厘米²，板间距离 d 的单位为厘米时，电容 C 的单位为静法。

习 题 1·9(2)

1. 一个电容器，电容是 1.5×10^{-4} 微法拉。把它的两板接在电压(即电势差)为 90 伏特的电源上，问电容器带电多少？

2. 有一个电容器，当它所带电荷的电量为 Q 时，两板间的电势差为 V 。现在使它增加带电量 4×10^{-8} 库仑，则电势差增加 20 伏特。试求电容器的电容。

3. 有一平行板电容器，当两板之间的电介质是空气时，电容是 25 微法拉；当两板之间的电介质是白蜡时，电容是 55 微法拉。问白蜡的介电常数为多少？

4. 平行板空气电容器的板半径是 3 厘米，它的电容相当于一个直径为 1 米的金属球。求极板之间的距离。

5. 什么叫做电容器？电容器的电容是用什么来量度的？什么叫做平行板电容器？平行板电容器的电容与哪些因素有关？有怎样的关系？

4. 电容器的连接法 在实际应用中，常常需要把几只电容器连接起来使用。连接电容器的方法基本上只有两种——**并联**和**串联**。

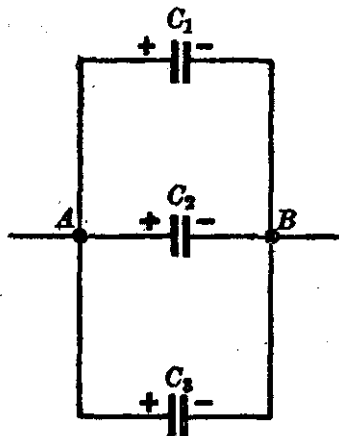


图 1·34 电容器并联

(1) 并联——图 1·34 表示三个电容器并联在一起，它们的电容分别为 C_1 、 C_2 和 C_3 。所谓并联就是把各个电容器的一个极板连接在一起，另一个极板另外连接在一起。充电后(即使电容器组带电后)，带正电荷的各个极板电势相等，带负电荷的各个极板电势也相等；这也就是说，各个电容器的板间电势差都等于 V 。但是由于各个电容器的电容不同，所

以它們的电量并不相同；如果 Q_1 、 Q_2 和 Q_3 分别表示各电容器所带的电量，則

$$Q_1 = C_1 V,$$

$$Q_2 = C_2 V,$$

$$Q_3 = C_3 V.$$

因而三个电容器所带的总电量

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = (C_1 + C_2 + C_3) V.$$

如果把这个并联組看成是一个电容器，那么它的电容 C 就称为这个并联組的合电容，并且

$$C = C_1 + C_2 + C_3.$$

这就是說，电容器并联組的合电容等于各个电容器电容的总和。

如果把 n 个电容都是 C_1 的电容器并联在一起的話，那么这个并联組的合电容

$$C = nC_1.$$

由此可見，并联組的合电容总比各个电容器原有的电容来得大。在需要电容器組能带大量电荷而不致引起过大的电势差时，常常采用并联接法。

(2) 串联——图 1·35 表示三个电容器串联在一起，它們的电容分别为 C_1 、 C_2 和 C_3 。串联

就是使每一个电容器的一个极板只和另一个电容器的一个极板連接。向串联組两端的极板

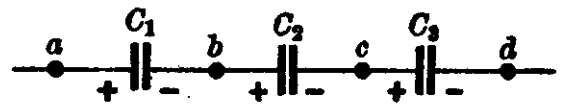


图 1·35 电容器串联

上充等量异种电荷 Q (或向一端的极板上充电荷 Q ，并把另一端的极板接地)，在达到靜电平衡后，其他各极板就因靜电感应分别带有电荷 $+Q$ 或 $-Q$ 。由于各个电容器的电容不同，所以它們的电势差就各不相同；如用 V_1 、 V_2 和 V_3 来表示各电容器的板間电势差，則

$$V_1 = \frac{Q}{C_1},$$

$$V_2 = \frac{Q}{C_2},$$

$$V_3 = \frac{Q}{C_3}.$$

从图上可以看出,在串联组最左侧的一根导线和电容器 C_1 的左极板连接在一起的,它们可以看做是一个导体,因而它们的电势相等. 同样的理由,电容器 C_1 的右极板、电容器 C_2 的左极板和它们之间的导线是一个等电势体;电容器 C_2 的右极板、电容器 C_3 的左极板和它们之间的导线是一个等电势体;电容器 C_3 的右极板和最右侧的导线也是一个等电势体. 所以

$$V_1 = V_{ab},$$

$$V_2 = V_{bc},$$

$$V_3 = V_{cd}.$$

因而三个电容器的总电势差

$$\begin{aligned} V = V_{ad} &= V_{ab} + V_{bc} + V_{cd} = V_1 + V_2 + V_3 \\ &= \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right) Q. \end{aligned} \quad (1)$$

如果把把这个串联组看成是一个电容器,那么它的电容 C 就称为这个串联组的合电容,并有

$$V = Q/C. \quad (2)$$

由(1)、(2)导出

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}.$$

这就是说, 电容器串联组的合电容的倒数等于各个电容器电容的倒数之和.

如果把 n 个电容都是 C_1 的电容器串联在一起,那么这个串联组的合电容

$$C = \frac{C_1}{n}.$$

由此可見，串联組的合电容总比各个电容器原有的电容来得小。如果需要对电容器組充少量电荷就能使它获得很大的电势差，那么就采用串联接法。

例 9. 两个完全相同的平行板电容器，一个用空气作电介质，另一个用 $\epsilon=2.2$ 的松节油做电介质。当把它们并联在一起后，給它們充电 512 靜庫，問它們各带电荷多少？

【解】 假設空气电容器的电容为 C_1 ，所带电荷的电量为 Q_1 ；松节油电容器的电容为 C_2 ，所带电荷的电量为 Q_2 。由于电容器在并联时，各个电容器的电势差相等，所以

$$V = \frac{Q_1}{C_1} = \frac{Q_2}{C_2}.$$

因为电容器的电容和介电常数 ϵ 成正比，所以松节油电容器的电容 $C_2=2.2 C_1$ 。把这一关系代入上式，得出

$$2.2 Q_1 = Q_2. \quad (1)$$

根据題意，总电量 $Q=512$ 靜庫，所以

$$Q_1 + Q_2 = 512. \quad (2)$$

解方程式(1)和(2)，得出

$$Q_1 = 160 \text{ 靜庫}; Q_2 = 352 \text{ 靜庫}.$$

例 10. 在实际应用中，常常应用一种由許多金属片和电介质片相間叠置而成的电容器。如果把所有的奇数金属片連接在一起，所有的偶数金属片另外連接在一起(如图 1.36 所示)，那么它的合电容是多大呢？

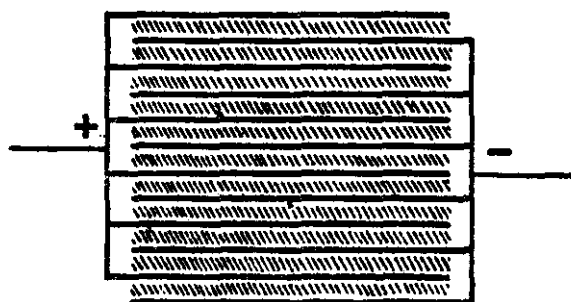


图 1.36 薄片电容器并联

【解】 充电后全部奇数金属片带正电荷，全部偶数金属片带負电荷。除最上一块和最下一块金属片只有一个表面带电之外，其余各块金属片都是两个表面带电。每一片电介质和它上下兩側

带异种电荷的金属片表面构成一个电容器。如果在整个系统中有 n 块电介质片，这就是一个包含 n 个电容器的并联组。每个电容器的电容

$$C_1 = \frac{\epsilon S}{4\pi d},$$

整个系统的合电容

$$C = nC_1 = \frac{n\epsilon S}{4\pi d}.$$

式中 ϵ 为电介质的介电常数， S 为极板的一个表面的面积， d 为板间距离。

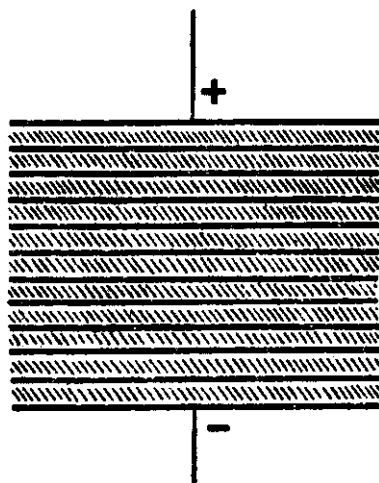


图 1·37 薄片电容器串联

例 11. 如果把前题给出的系统连接如图 1·37 所示，则应当怎样来求它的合电容？

【解】 充电后，最上一块金属片的下表面带正电荷，最下一块金属片的上表面带负电荷，其余各块的上下表面分别带等量的异种电荷。整个系统构成一个电容器串联组。每个电容器的电容

$$C_1 = \frac{\epsilon S}{4\pi d},$$

整个系统的合电容

$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi d n}.$$

习 题 1·9(3)

1. 用 10 片锡箔跟 9 片 0.5 毫米厚的云母片 ($\epsilon=6$) 组成一个平行板电容器。锡箔和云母片的面积都是 2 平方厘米。试分别求并联和串联时的合电容。

2. A 和 B 是两只串联着的电容器， B 的电容是 A 的 2 倍。充电后，哪一个电容器的板间电势差较大？为什么？它们的比值是什么？

3. 三个完全相同的电容器, 电容各等于 0.5 微法拉. 现在要把它们连接起来使合电容等于 0.75 微法拉, 问应当怎样连接? (画图并计算)

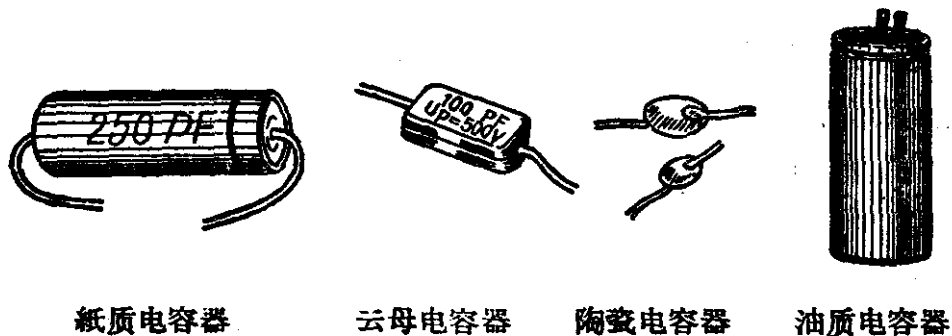
4. 两个电容器的电容分别为 1 微法拉和 2 微法拉. 串联后充电使串联组两端的电势差等于 4 静伏. 求每个电容器各带多少电量?

5. 平行板电容器的板间距离为 5 毫米, 充电后板间电位差为 30 伏特, 求板间电场的强度(看做匀强电场).

5. 几种常用电容器 电容器是无綫电綫路中不可缺少的元件之一.

常用的电容器, 因构造和用途的不同, 可分为固定电容器、可变电容器和半可变电容器三种.

电容不能随意改变的, 叫做固定电容器. 以蜡紙为介质的固定电容器叫做紙质电容器; 以云母、陶瓷、油质等作为介质的, 分别称为云母电容器、陶瓷电容器、油质电容器等, 如图 1-38 所示.



紙质电容器

云母电容器

陶瓷电容器

油质电容器

图 1-38 固定电容器

可变电容器的电容可以在一定范围内随意变动. 它是由两组相对的金属片组成的. 固定不动的一组叫做定片; 另一组和转轴相连接, 能随意转动, 就叫做动片. 转动动片, 就改变了两组金属片相对部分面积的大小, 从而可以改变它的电容. 可变电容器有以空气作介质的和以固体作介质的两种, 如图 1-39 所示.

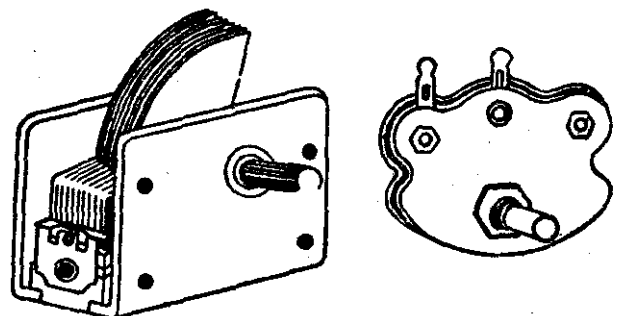


图 1-39 可变电容器

只能在小范围内改变

电容的,叫做半可变电容器。常见的有云母介质和陶瓷介质的两种,如图1.40所示。

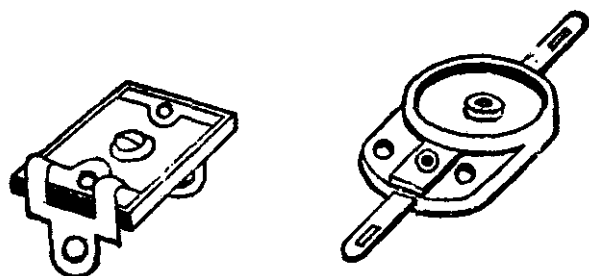


图 1.40 半可变电容器

本章提要

1. 电荷间的相互作用 使物体带电(起电)的方法主要有摩擦起电、接触起电和感应起电。起电的过程就是把其他形式的能量转变成电能的过程。

电荷 在自然界里只存在正、负两种电荷,同种电荷互相推斥,异种电荷互相吸引。

导体和绝缘体 能把所得到的电荷迅速地传播到其他各部分的物体叫做导体。电荷只停留在物体的某部分,而不显著地向其他部分传播的物体叫做绝缘体。

金箔验电器 用来检验物体是否带电和带哪一种电荷的仪器。

电量 物体所带电荷的多少。

库仑定律 两个点电荷之间的相互作用力,沿着它们之间的连线,大小相等,方向相反,作用力的大小跟两个电量的乘积成正比,跟两个点电荷之间的距离的平方成反比。

$$F = K \frac{q_1 \cdot q_2}{\epsilon \cdot r^2}$$

两个电量相等的点电荷,在真空中相距1厘米时,如果它们之间的作用力适为1达因,我们规定这两个电荷的电量各为1静库。

$$1 \text{ 库仑} = 3 \times 10^9 \text{ 静库}$$

ϵ 是电介质的介电常数。不同物质的 ϵ 不同。真空的 $\epsilon=1$, 空气的 ϵ 近似等于 1。

在静电平衡状态下,导体上的电荷完全分布在它的外表面上,导体表面曲率越大的地方,电荷的分布也越密。

电子论 一切物体都由原子组成,原子由带正电的原子核和带负电的核外电子组成。原子核所带的正电量和核外电子所带的总负电量相等。电子

的电量是 4.8×10^{-10} 靜庫。原子核集中了几乎全部原子的质量。原子核只占整个原子体积的极小部分。核外的电子在繞核旋轉着。

用电子論的知識可以簡便地解釋起电現象、中和現象、导体和絕緣体的不同导电特性等。

2. 电場和电場强度

电場 电荷的周圍总存在着电場。电荷和电場是同时存在、不可分割的。电荷間的相互作用是通过它們的电場来进行的。

电場是一种物质，这种物质并不是由分子、原子和电子等实物粒子所构成的，而是另一种形式的物质。

电場强度 是一种用来描述电場强弱的，或者說是描述有关电場力的性质的物理量。

我們規定：电場中某点的电場强度，等于放在該点的点电荷所受的电場力跟它的电量之比。即

$$E = \frac{F}{q},$$

$$1 \text{ 靜电系单位电場强度} = \frac{1 \text{ 达因}}{1 \text{ 靜庫}}.$$

电場强度是矢量。电場中某一点的电場强度的方向就是正电荷在那一点所受的电場力的方向。电場强度的大小和方向还可以用电力綫表示。一条曲綫，如果它上面任何一点的切綫方向都跟該点的电場强度的方向相同，这条曲綫就叫做电力綫。电場强度的大小用穿过垂直于电力綫的单位截面上电力綫的条数来表示。

点电荷的电場 在点电荷 Q 的电場中，某一点的电場强度由 $E = \frac{Q}{\epsilon r^2}$ 来决定。

匀强电場 电荷在匀强电場內任何一点所受的电場力都是相等的。

电場强度和电場力的主要区别：

区别	电場强度 (E)	电場力 (F)
1	反映电場本身的有关力的性质。	指电荷在电場中所受的力。
2	它的大小只决定于电場本身，而与檢驗电荷无关。	它的大小由置于电場中的电荷和电場本身的性质二者决定。
3	它的方向与正电荷置于电場中所受的力的方向相同。	正电荷在电場中所受的电場力与場强方向相同；負电荷在电場中所受的电場力与場强方向相反。
联系	$F = q \cdot E$	

3. 电势和电势差

电势能 电荷在电场中具有电势能。

电荷在电场里运动时，跟物体在重力场里运动一样，因受电场力的作用而有能量的转换。电荷顺着电场力运动时，电场力做功，电势能减少；电荷逆着电场力运动时，电荷反抗电场力做功，电势能增加。

电势 电势是描述有关电场的势能的性质的物理量。电场中某一点的电势，等于电荷放在那一点的电势能跟它的电量之比

$$U = \frac{W}{q}.$$

$$1 \text{ 静电系单位电势} = \frac{1 \text{ 尔格}}{1 \text{ 静库}}.$$

$$1 \text{ 伏特} = \frac{1 \text{ 焦耳}}{1 \text{ 库仑}} = \frac{1}{300} \text{ 静电系单位电势 (静伏)}.$$

注意：(1) 电势是一个标量，它可以是正值、负值或零。零电势的点可以任意选择，一般选在地面或无限远处。电势比零高者为正值，低者为负值。

(2) 电势是反映电场性质的物理量，它的大小仅与电场本身的性质有关，而与检验电荷 q 无关。

(3) 电势能 W 的值与 U 和 q 有关 ($W = q \cdot U$)。当 U 和 q 同号时， W 为正值；异号时， W 为负值。

电势差 (电压) 表示电场中两已知点之间电势的差值。设在电场中 A 点的电势为 U_A ， B 点的电势为 U_B ，那么 A 、 B 两点之间的电势差为 $V_{AB} = U_A - U_B$ 。两点间电势差在数值上等于单位正电荷在两点间移动时，电场力所做的功 (或减少的电势能)。 $V_{AB} = \frac{W}{q}$ 。

电场力使电荷移动时，正电荷总是由电势较高的位置移向电势较低的位置，而负电荷却相反。但无论正电荷或负电荷，都是从势能较大的位置移向势能较小的位置。

单位 电势差的单位和电势的单位相同。

在匀强电场里，两点间的电势差等于电场强度和两点在场强方向的距离的乘积。 $V = El$ 。

导体的电势 导体上电荷达到平衡时，导体上各点电势相等；导体内部的电场强度为零，而电势却并不为零 (与其表面上各点的电势相等)。两个导体相連后，电势最后必然相等。

4. 电容和电容器

导体的电容 导体所带的电量跟它的电势的比对于同一导体来说，是一个恒量；对不同导体来说，这个恒量是互不相同的。电容就是描述导体容纳电量特征的一种物理量。导体的电容，等于它所带电荷的电量跟它的电势之比。即 $C = \frac{Q}{U}$ 。

导体的电容跟它的大小、形状有关系，而跟制成它的材料没有关系。

电容器的电容 两个彼此绝缘的、但又相互接近的导体，就组成一个电容器。电容器上一个极板所带的电量，跟它的两极板间的电势差成正比。电容器的这种性质，就用电容器的电容来表示。 $C = \frac{Q}{V}$ 。在一定电势差的情况下，电容器的电容越大，每一个极板上所带的电量越多。

平行板电容器的电容 $C = \frac{\epsilon S}{4\pi d}$ ；式中 ϵ 代表电介质的介电常数，在极板面积 S 的单位为厘米²，板间距离的单位为厘米时，电容 C 的单位为静法。

$$1 \text{ 静电系单位电容} = \frac{1 \text{ 静库}}{1 \text{ 静伏}}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ 法拉} &= \frac{1 \text{ 库仑}}{1 \text{ 伏特}} = 9 \times 10^{11} \text{ 静法} \\ &= 10^6 \text{ 微法拉} = 10^{12} \text{ 微微法拉} \end{aligned}$$

$C_{\text{并联}} = C_1 + C_2 + C_3$ ；即电容器并联组的合电容等于各个电容器电容的总和。

$\frac{1}{C_{\text{串联}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$ ；即电容器串联组的合电容的倒数等于各个电容器电容的倒数之和。

常用的电容器有三种：固定电容器、可变电容器和半可变电容器。

复 习 题 一

1. 静电系单位电量(静库)和库仑是怎样规定的?
2. 怎样正确理解电场强度的三个公式?

$$E = \frac{F}{q}; \quad E = \frac{Q}{r^2}; \quad E = \frac{V}{l}.$$

它们各适用什么范围?

3. 两个固定的带电球体 A 和 B ，分别带正电荷 q 和 $9q$ ，它们之间的距离是 12 厘米。现在要在它们之间放另一个电荷 C ，使它正好处于平衡状态。求 C 的位置。在什么情况下平衡是稳定的? 在什么情况下平衡是不稳定

的?

[提示: 把物体从平衡位置稍稍撥动, 如果它所受的力能使它回到原来的平衡位置, 这就是稳定平衡. 題中电荷 C 可能是正的也可能是負的.]

4. 两个完全相同的带电球体, 它們的质量都是 10 克, 它們所带的电荷同种等量. 如果电荷間的斥力正好和两球間的万有引力平衡, 問两球应各带多少电量? (万有引力恒量 $f=6.66 \times 10^{-8}$ 达因·厘米²/克²)

5. A 、 B 两点到点电荷 Q 的距离分别是 1 厘米和 2 厘米, 一个带 10^{-9} 庫侖的正电荷 q , 放在 B 点时受到 300 达因的吸引力. 求: (1) q 在 A 点受到的电场力是多少? (2) 点电荷 Q 的电量及其性质. (3) A 点的电场强度.

6. 附图上画出两块带电的平行板, 在它們当中有一个场强 $E=0.3$ 靜电系单位的匀强电场. 电子沿垂直于电力綫的方向, 以 3×10^9 厘米/秒的初速度从場外飞入. 如果匀强电场的宽度为 5 厘米, 求电子在离开电场时, 从原来飞行的方向偏离多少? 不考虑地球对电子的引力作用.

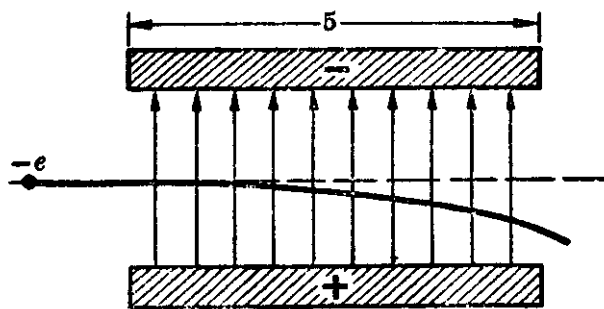
[提示: 水平方向是匀速运动, $s_{\text{水平}} = v \cdot t$ (1)

垂直方向是匀加速运动, $s_{\text{垂直}} = \frac{1}{2} at^2$ (2)

再根据 $F = ma = Ee$ (3)

(其中 $e = -4.8 \times 10^{-10}$ 靜庫; $m = 9.1 \times 10^{-28}$ 克).

由三个关系式求出 $s_{\text{垂直}}$ 的值.]



(第 6 題)

7. 已知氫原子核的质量为 1.7×10^{-24} 克, 电子的质量为 9.1×10^{-28} 克, 电子和原子核之間的距离为 5.3×10^{-9} 厘米. 求: (1) 原子核与电子之間电引力和万有引力之比; (2) 电子在核外軌道上旋轉的綫速度.

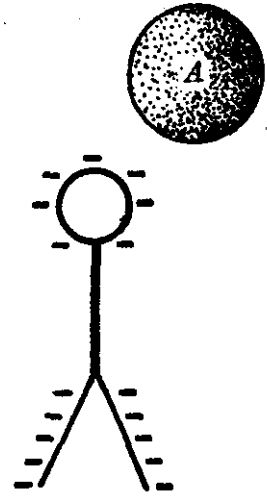
8. 卢瑟福的实驗証明, 两个原子核之間的斥力, 在它們之間的距离小到 10^{-12} 厘米时还遵循庫侖定律. 元素金的原子核里含有 79 个质子, 元素氮的原子核里含有 2 个质子. 每个质子带一个正的基本电荷. (1) 当金原子核和氮原子核相距 10^{-12} 厘米时, 它們之間的电斥力是多少公斤? (2) 这个斥力能

使氦原子核得到多大的加速度？已知氦核的质量为 6.7×10^{-24} 克。

9. 附图表示一个原来带负电荷的金箔验电器和一个金属球 A，它们互不接触。现用起电机使 A 球带正电荷，并逐渐增加它的电量。试述金箔张角应起怎样的变化，并用电子理论对这个现象进行解释。

[提示：金箔张角先逐渐缩小，小到零之后又逐渐张大。]

10. 绝缘铜球的直径为 16 厘米，带正电荷 136 静库。(1) 如果用一根细长导线，把它和另一个放在远处的、直径为 18 厘米的、原来不带电的绝缘铜球连接起来，电势应较原来降落多少？(2) 如果把它和一个电容为 128 静法的导体连接起来，电势又应该降落多少？



(第 9 题)

11. 按照前题所给出的条件，分别求出在(1)、(2)两种情况下，带电铜球所分出的电量。

12. 按照第 10 题所给出的条件，如果先使绝缘的带电铜球和原来不带电的绝缘铜球连接，然后再把导线拆下，使它与电容为 128 静法的导体相连接。问最后的电势应是多少？原来带电的铜球现在带多少电量？

13. 如右图所示，问：

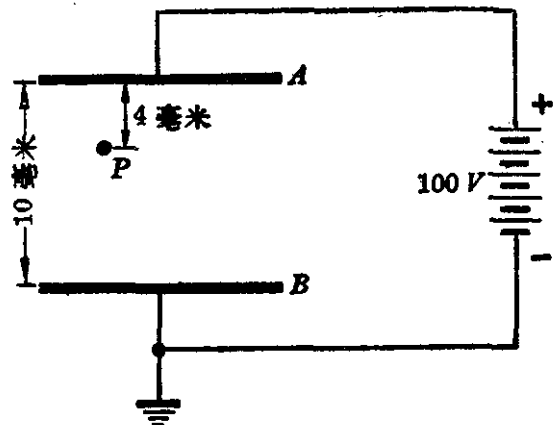
(1) 两板间电势差为___伏特。

(2) A 板的电势为___伏特。

(3) B 板的电势为___伏特。

(4) P 点的电势为___伏特。

(5) 一电子放在 P 点具有的静电势能为___尔格。



(第 13 题)

(6) 将电子从 P 点移向 A 板，电场力做了___的功；电子到达 A 板时静电势能___(填“增加”或“减少”)了___尔格。

14. 电容器 A 和 B 的电容分别为 3 微法拉和 2 微法拉。充电后使它们的板间电势差分别为 300 伏特和 200 伏特，求各带多少电荷？

15. 如果把前题中两个已经充了电的电容器并联起来，求并联组的电势差和从电容器 A 迁移到电容器 B 上去的电量。

16. 如果在进行如第 15 题所述的并联时，没有把两个正极板和两个负

极板分別接在一起，而是錯將正、負极板接在一起了。求錯接后的电勢差和从 A 电容器迁移到 B 电容器上去的电量。

17. 有一个空心銅球和一实心鉄球，銅球半徑比鉄球半徑大，如果两者都帶上了等量的正电荷，两者的电勢相等嗎？为什么？今把两球用一根銅絲連接起来，銅絲上有沒有电荷的移动？怎样移动？

第二章 稳恒电流

在前一章里,我們討論过靜电現象。所謂靜电現象,就是在靜电平衡状态下的电現象。在靜电平衡状态下,电荷只作无規則的热运动,而不作有規則的定向移动。

在这一章里,我們將要討論电荷在作有規則移动时所产生的現象,以及有关的基本規律。

§ 2.1 电 流

电荷的有規則移动叫做电流。

1. 产生电流的条件 一般地說,要想产生电流,就必需同时具备两个条件:第一,要有可以移动的电荷;第二,要有能使电荷作定向移动的电場。

电荷是不能脫离物质而独立存在的。电荷的定向移动,实际上就是带电的物质微粒在作定向移动。

在导电的固体(如金属固体和碳)里,在电場的作用下能作定向移动的是帶負电荷的自由电子。自由电子总是逆着电場的方向移动,总是从电势較低的位置移向电势較高的位置。

在导电的液体(如酸、碱、盐的溶液)里,在电場的作用下能作定向移动的是正离子和負离子^①。正离子順着电場的方向移动,即从高电势处移向低电势处。負离子逆着电場的方向移动,即从

^① 失去一个或几个电子的原子、分子或原子团叫做正离子。获得一个或几个多余电子的原子、分子或原子团叫做負离子。在导电的液体里,經常存在着一定数量的正离子和負离子。

低电势处移向高电势处。

在不导电的物质里,由于缺乏自由电子和离子,所以在一般情况下不能形成电流。

2. 瞬时电流和稳恒电流 把带电导体接地, 或把两个电势不相等的带电导体用导线连接起来(如图 2·1 所示), 则在有电势差存在的这一段时间里, 总有电荷在作定向移动(自由电子从低电势体移向高电势体)。但是这个变化过程是十分短促的, 它们很快就达到静电平衡状态了, 所以我们称这种电流为**瞬时电流**。

在日常生活和生产技术上需要用到的是**持续电流**。所谓持续电流, 就是能在长时间里存在的电流。

怎样才能获得持续电流呢?

在图 2·1 所示的实例里, 如果我们能够经常保持 $U_1 > U_2$, 而不让它们因电荷迁移而达到静电平衡状态, 那么就可以获得持续电流了。为了经常保持 $U_1 > U_2$, 就需要采用一种叫做**电源**的装置。

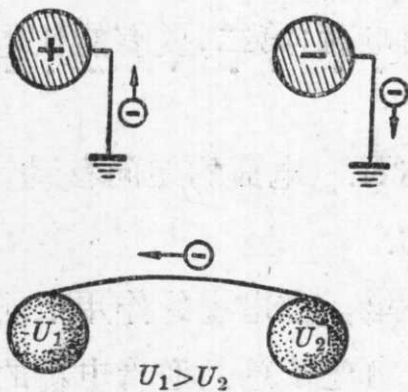


图 2·1 瞬时电流

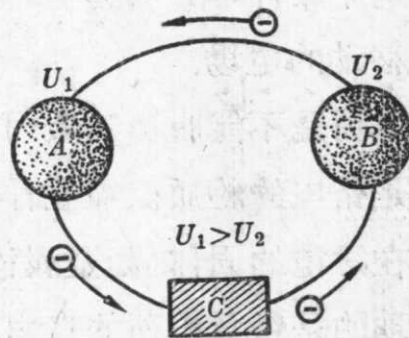


图 2·2 持续电流

图 2·2 所示的装置包含两个带电导体 A 和 B , 一个电源 C , 以及连接它们用的导线。 A 的电势 U_1 高于 B 的电势 U_2 。在不装电源的那根导线上, 自由电子从低电势体 B 流向高电势体 A ; 在装有电源的那根导线上, 电源发挥它的作用, 把流到导体 A 的自由电子及时地全部搬回到导体 B 上去, 维持一定的电势差 $U_1 - U_2$, 使自由电子能在整个导体系统里周流不息, 形成持续电流。

电池、发电机等都是电源。包括电源在内的整个导电系统叫做**电路**，意思就是电流通过的道路。

电源并不是电荷的补给者，更不能理解为电荷的制造者（电荷是不能创生的），它只是电荷的搬运者。把电子从高电势体搬回到低电势体是需要抵抗电场力作功的，也就是说，需要消耗能量。所以，电源必需是能量的供给者。

如果持续电流的方向和电荷流量（单位时间里流过的电量）都是常定而不随时间改变的，那么它就叫做**稳恒电流**，或称为**直流**。

在这一章里，我们将专门讨论有关稳恒电流的问题。

3. 电流强度和方向 电流强度就是电荷流量。在一切都稳定的情况下，流过导体中任一横截面的电量跟经过的时间成正比。我们规定：电流强度等于流过导体中任一横截面的电量和所用的时间之比。

如果在时间 t 内，流过导体中某一横截面的电量为 Q ，那么电流强度的定义式就是

$$I = \frac{Q}{t},$$

式中 I 代表电流强度。

电流强度的实用单位是库仑/秒，叫做**安培**。用安培做电流强度单位的名称，是为了纪念法国物理学家安培。

在导体中的电流，可能是正电荷的流动，也可能是负电荷的流动，还可能是正电荷和负电荷同时分别向相反的方向流动。那么，我们取什么来作为电流的方向呢？

按照习惯，我们规定：正电荷流动的方向叫做电流的方向。

在图 2.1 和图 2.2 里，箭头表示自由电子（即负电荷）流动的方向。电流的方向正好和它相反，应

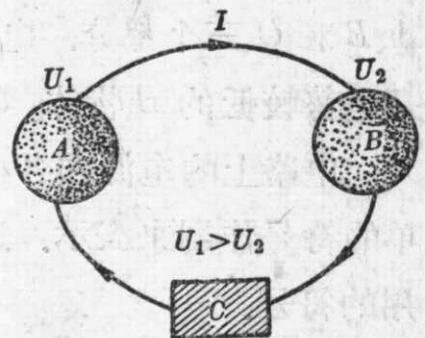


图 2.3 电流的方向

如图 2·3 所示:在不包含电源的那根导线上,电流从高电势体 A 流向低电势体 B ; 在包含电源的导线上, 电流从低电势体 B 流向高电势体 A .

电流从高电势点流向低电势点的时候, 电场作正功. 电流从低电势点流向高电势点的时候, 电源作正功.

§ 2·2 电 路

1. 电路的組成 有电流通过的导体就叫做**电路**. 周流不息的电荷所经过的整个导体系统叫做**全电路**. 全电路中任何一部分导体叫做**部分电路**.

在全电路中,除了必须包含电源之外,还包含各种各样的用电装置,以及连接它们的导线. 电灯、电炉、电铃、电动机等,都是用电装置,统称为**用电器**,或简称为**电器**. 实际上,电器只是特制的导体罢了. 如果电器不是由导体制成的,那么电流就不能通过,于是它就发挥不了作用.

在全电路中,还经常装有电键. 电键的种类很多,例如电灯开关、电铃按钮、掷刀开关等都是电键. 电路里装了电键,就可以根据需要,随时接通电路或切断电路. 电路只有在接通时才有电流存在;切断了电路,电流就不存在了.

电源的种类很多,常用的有电池(化学电源)和发电机(机械电源)两种. 不管是电池或是发电机,在构造上都包括图 2·3 所示的 A 、 B 和 C 三个部分. 电源的正极就是电势较高的 A 物体,负极就是电势较低的 B 物体, C 表示电源的内部.

电路上的电源和各种电器,以及它们的连接方法,都可以用简单的符号作图来表示. 这样的图叫做**电路图**. 图 2·4 表示几种常用的符号.

2. 电路的连接法 在一个电路里,常常要连接好几个电器,例如几盏电灯或几只电钟等. 那么要怎样把这些电器连接在一个

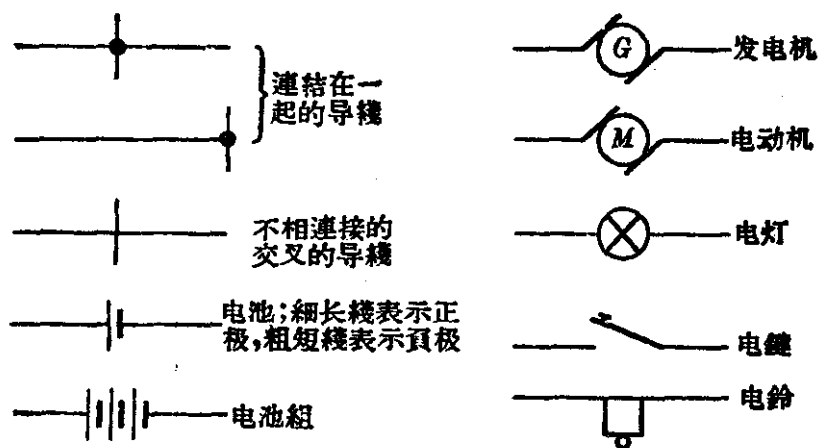


图 2·4 电路組成部分的符号

电路里呢?

基本上有两种不同的连接方法。象图 2·5 那样, 把两盏电灯顺次地连接在电路里, 这就叫做**串联**。或者象图 2·6 那样, 把电路分成两个支路, 在每个支路里各连接一盏电灯, 这就叫做**并联**。

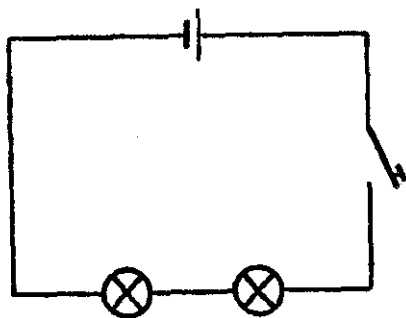


图 2·5 两灯串联

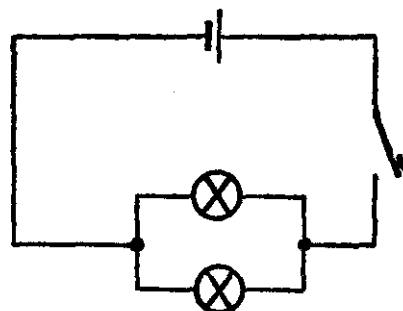


图 2·6 两灯并联

串联就是把几个用电器连接在一条路线上; 当电路接通时, 通过各个用电器的电流强度完全相等。如果在它们中间有一个用电器发生故障, 那么整个电路上都不再有电流存在。也即全电路被切断了。

并联就是把几个用电器分别连接在几个并列的支路上; 在接通电路时, 通过各个用电器的电流只是全部电流中的一部分, 并且彼此也不一定都相等。如果在它们当中有一个用电器发生故障, 那只不过切断了一个支电路, 别个支路上还是有电流存在的。

在实际工作中, 这两种连接法都经常使用。

3. 安培計和伏特計 安培計和伏特計是電學中兩種不同用途的測量儀器。它們的構造大同小異,外形幾乎完全相同,都有一個刻度盤和一根能自由轉動的指針。安培計上的刻度單位是安培,

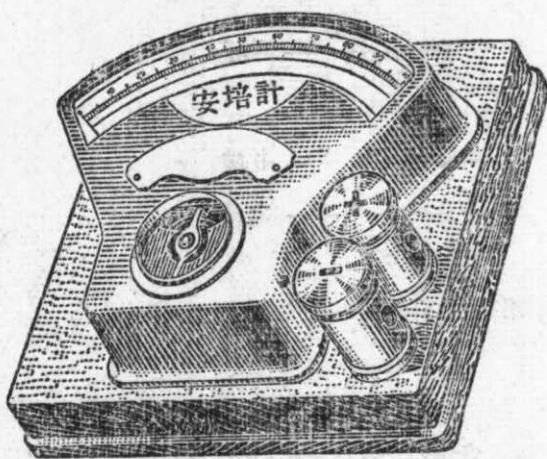


圖 2·7 安培計外形

伏特計上的刻度單位是伏特。圖 2·7 所示的是一種安培計的外形。

安培計和伏特計的構造原理要等到第三章里才能加以討論,現在只講它們的用法。

測量電路里的電流強度用安培計。測量電路上任何兩點間的電勢差用伏特計。在直流電路里,兩點間的電勢差又叫做這一段電路上的電壓。

要測量通過某一電器的電流強度,就要把安培計和那一個電器串聯在一起。圖 2·8(a) 表示用安培計測量通過電燈 L_1 的電流強度,(b) 表示用安培計測量通過電燈 L_2 的電流強度,(c) 表示測量電路上的總電流強度。

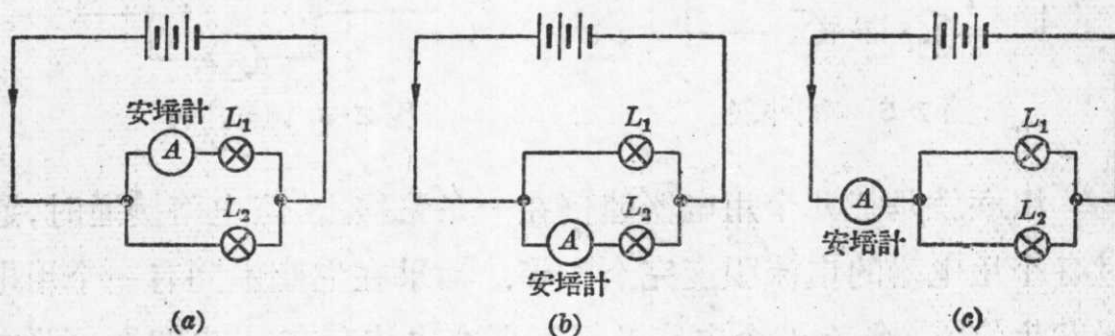


圖 2·8 安培計的連接法

要測量某一段電路上的電壓,就要把伏特計和那一段電路並聯在一起。圖 2·9(a) 表示用伏特計測量電燈 L_1 上的電壓(即電燈 L_1 兩端的電勢差),(b) 表示用伏特計測量電燈 L_2 上的電壓,(c) 表示測量電燈 L_1 和 L_2 上的總電壓。

很多安培計和伏特計的接線柱上,都分別標志着“+”號和

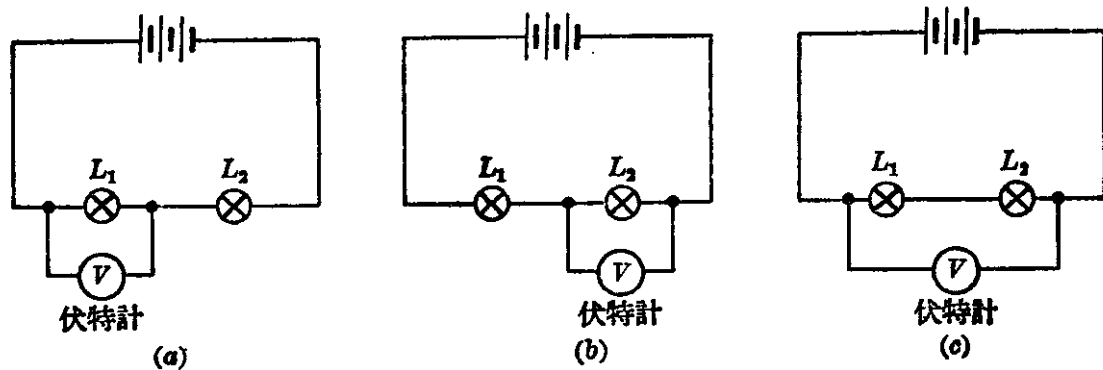


图 2·9 伏特計的连接法

“-”号。在使用这种仪器时，必須让电流从“+”接线柱流进仪器，从“-”接线柱流出仪器。如果接反了，仪器上的指针就要向没有刻度的那边偏转，或者完全不动。

为了测量微弱的电流和很小的电压，还有以毫安培(千分之一安培)为刻度单位的毫安計，以微安培(百万分之一安培)为刻度单位的微安計，以及以毫伏特为刻度单位的毫伏計。

允許通过安培計的电流是有限度的，如果电流强度超过了安培計的刻度范围，仪器就有被损坏的可能。所以在把安培計正式接入电路之前，应当先用从电源接出的电路的两头試触一下安培計的接线柱，如果指针的偏转越过了刻度范围，那就表示电流太强，应当换用一个量度范围較大的仪器。实用的安培計常常有两种量度范围(例如 0.3 安培和 3 安培)，在这种情况下，应该先用量度范围較大的接线柱試触。

实验証明，在一个包含多个用电器的串联电路里，不管把安培計放在什么位置上(如靠近电源的正极、靠近电源的负极或放在任何两个用电器之間)，只要安培計是串联在电路里，測得的安培数总是一样的。这說明：在串联电路里，电路各处的电流强度都相等。

图 2·10 表示一个接有伏特計的并联电路，它的讀数表示 P 、 Q 两点間的电势差。因为 P 和 Q 既是支路 L_1 的两端，又是支路

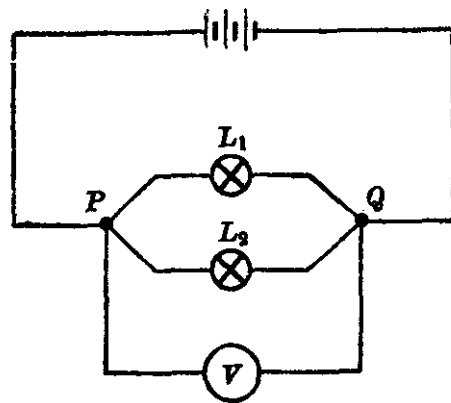
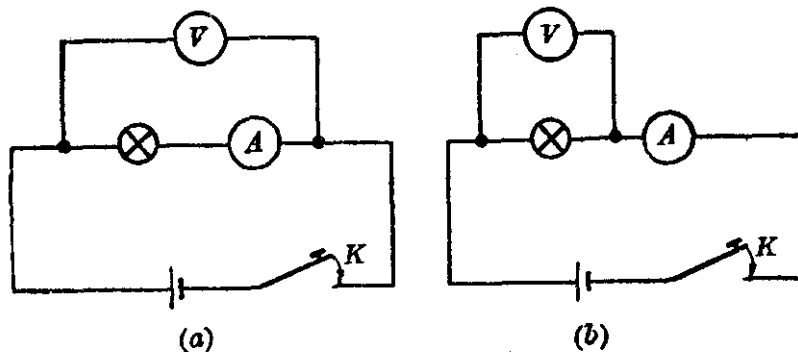


图 2·10 并联电路上电压都相等

L_2 的两端, 所以伏特计的读数既代表支路 L_1 上的电压, 又代表支路 L_2 上的电压. 这说明: 在并联着的几个支路上, 电压都相等.

习 题 2·2

1. 有三盏电灯, 想把它们连接在一个电路里, 并且开闭每一盏灯都不会影响到别的灯, 问应该怎样连接? 试画一个电路图来表示.
2. 在一个装有电铃的电路里, 想装两个按钮, 只要按它们中的任何一个, 都能使电铃发出响声. 试画一个电路图来表示连接法.
3. 在图 2·10 所表示的电路里, 5 分钟内通过电灯 L_1 的电量是 150 库仑, 通过电灯 L_2 的电量是 60 库仑. 问这两个并联支路上的电流强度和电路上的总电流强度各为多少?
4. 在电源、用电器均相同的条件下, 试分别比较附图上两电路中安培计和伏特计的读数有何不同, 为什么? 要正确量出用电器中通过的电流, 安培计应如何连接? 要正确量出用电器两端的电压, 伏特计又应该如何连接?



(第 4 题)

§ 2.3 电阻. 欧姆定律

在 § 2.1 里已经讲过, 产生电流的条件是: (1) 具有可以移动的电荷; (2) 具有使电荷移动的电场. 电路是由导体组成的, 它具有大量可以移动的电荷 (自由电子或离子), 所以在电路里形成电流的唯一条件是具有电场, 也就是说, 在任一段导体上都要具有电压, 或者说在任一段导体的两端都要具有电势差.

究竟电流强度和电压之间存在着怎样的关系呢? 这就是我们在这一节里所要讨论的主要问题.

1. 欧姆定律 把电池组、导线圈、安培计和伏特计组成如图 2.11 所示的电路. 从伏特计的读数可以知道导线圈上的电压 (即导线圈两端间的电势差), 从安培计的读数可以知道通过导线圈的电流强度^①.

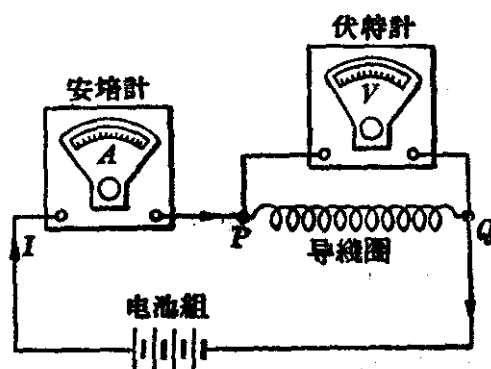


图 2.11 研究电流和电压的关系

作实验时, 先用一个电池作为电源, 记下安培计和伏特计的读数. 然后再依次用两个、三个……电池作为电源, 并把每次增加电池后的安培计和伏特计的读数记录下来. 结果发现: 当电压一定时电流强度也一定, 当电压增加到几倍时电流强度也增加到几倍. 这就是说: 通过给定导线的电流强度跟导线两端的电势差 (即导线上的电压) 成正比.

上面这个结论是德国物理学家欧姆在 1862 年从实验中得出的, 所以叫做**欧姆定律**.

如果用 I 表示通过导体的电流强度, 用 V 表示导体两端的电

^① 从理论上说, 在图 2.11 所示的电路中, 安培计的读数表示通过两个支路 (导线圈支路和伏特计支路) 的总电流. 但因通过伏特计的电流很小, 所以在实际应用中, 我们常常把安培计的读数看做是通过导线圈的电流.

势差,则欧姆定律可用公式表示如下:

$$I = KV,$$

公式中的 K 是比例恒量,也就是电流强度和电势差的比.

由于电流的方向就是正电荷移动的方向,而正电荷又总是向着电势降落的方向移动,所以电流进入导线圈的一端(P 端)电势较高,流出导线圈的一端(Q 端)电势较低. 如用 U_1 表示 P 端的电势, U_2 表示 Q 端的电势,则欧姆定律公式又可以写作

$$I = K(U_1 - U_2),$$

公式中的 $U_1 - U_2$ 表示 P 、 Q 两端的电势差,即为 PQ 这段导线上的电压,一般也称为这段导线上的电势降落.

2. 电导和电阻 用不同的导线圈来做上述的实验,结果指出,欧姆定律总是成立的,但比例恒量 K 的大小,一般说来是各不相同的. 这说明: 通过一段导线的电流强度不仅与这段导线两端的电势差有关,还与导线本身的某种特性有关. 比例恒量 K 就显示出导线的这种性质,叫做导线的电导.

K 值越大表示导线的导电本领越强,即当电势差一定时通过的电流强度越大. 导线的电导在数值上等于单位电势差所能维持的电流强度,即

$$K = \frac{I}{V}.$$

电导 K 的倒数 R 叫做电阻,它同样也是一个显示导线性质的物理量. R 值越大表示导线对电流的阻碍越大,即当电流强度一定时所需要的电势差越大. 导线的电阻在数值上等于维持单位电流强度所需要的电势差,即

$$R = \frac{V}{I}.$$

在引入了电阻概念以后,欧姆定律公式可以写作

$$I = \frac{V}{R},$$

并叙述为：通过给定导线的电流强度跟导线两端的电势差成正比，跟导线的电阻成反比。

电阻的实用单位是伏特/安培，我们把它叫做欧姆。如果某段导线两端的电势差是1伏特，通过的电流强度正好是1安培，那么这段导线的电阻也就正好是1欧姆。

1908年在伦敦举行的电学会规定：长106.3厘米、横截面积1平方毫米的水银柱在 0°C 时的电阻为1欧姆。这样规定的电阻单位叫做国际标准欧姆。

为了便于比较导体的电阻，通常把具有一定电阻的绝缘导线（金属线外包绝缘材料）绕成线圈，用它作为实用的标准电阻。标准电阻有0.01, 0.1, 1, 10, 100, 1000等欧姆的。图2.12表示一种标准电阻的外壳，线圈装在它的里面。

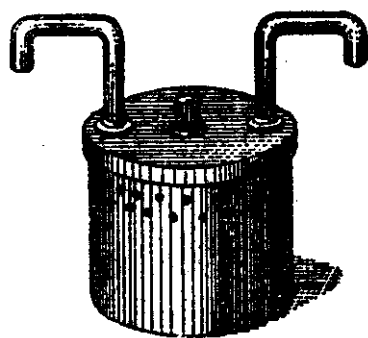


图2.12 标准电阻

导体为什么会有电阻呢？就金属导体来说，在电场的作用下作定向移动的自由电子，经常要与导线中作热振动的原子相碰撞。这种碰撞阻碍了自由电子的定向运动，实际上也就是对电流起了阻碍作用。

习题 2.3(1)

1. 家用电灯泡的电压是220伏特，通过的电流是0.25安培。求灯丝的电阻。

2. 小灯泡的电阻是30欧姆，当电压为6伏特时，通过的电流应该是多少安培？

3. 导体两端的电势差是4伏特，在2分钟内通过15库仑的电量。求导体的电阻。

4. 用纵标表示通过导线的电流 I ，用横标表示导线两端的电势差 V ，试作一图线来表示电阻不变时的 $I-V$ 关系。如果电阻增加了，图线将怎样改变？如果电阻减少了，图线又将怎样改变？如何利用这个图线来求导线的电阻？

3. 导体的电阻 既然电阻是显示导体本身性质的物理量，当然它的大小就应该由导体本身的条件来决定。在温度不变的情况下，金属导体的电阻与导体的长度、粗细和材料有关。为了确定它们之间的定量关系，我们可以按照图 2·11 所示的电路对很多根长度、粗细和材料各不相同的导线进行实验。

实验时，先拿一根导线连接在 P 和 Q 之间以代替图 2·11 里的导线圈，读出安培计所表示的电流强度 I 的数值和伏特计所表示的电势差 V 的数值，并根据欧姆定律算出这根导线的电阻 R 。然后依次对几根长度不同、但粗细和材料都相同的导线进行同样的实验，并分别算出它们的电阻。结果指出：当材料和粗细一定时，导线的电阻和它们的长度成正比。

再对几根材料和长度都相同、但粗细不同的导线进行上述实验，结果指出：当材料和长度一定时，导线的电阻和它们的横截面积成反比。

把上面两项关系合起来，我们可以说：当导体的材料一定时，导体的电阻跟它的长度成正比，跟它的横截面积成反比。 并可用公式表示如下：

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

公式中的 R 表示导体的电阻， l 表示它的长度， S 表示它的横截面积， ρ 是比例恒量。

对不同材料的导线进行实验，结果证明 ρ 的大小为材料本身的性质所决定。对同一材料的导线来说，在温度不变的条件下， ρ 的大小保持不变。对不同材料的导线来说， ρ 的大小一般是不同的。

我们称比例恒量 ρ 为材料的**电阻率**。

在使用上面的电阻公式时，科学工作者们用欧姆作为 R 的单位，厘米作为长度的单位，厘米²作为横截面积的单位，因此 ρ 的单

位是欧姆·厘米,它的意义如图 2·13 所示,在数值上等于一块 1 厘米长、1 平方厘米横截面的导体所具有的电阻.工程技术工作者們用欧姆作为 R 的单位,米作为 l 的单位,毫米²作为 S 的单位,因此 ρ 的单位是欧姆·毫米²/米,它的意义如图 2·14 所示.在数值上等于一根 1 米长、横截面积为 1 平方毫米的导体所具有的电阻.

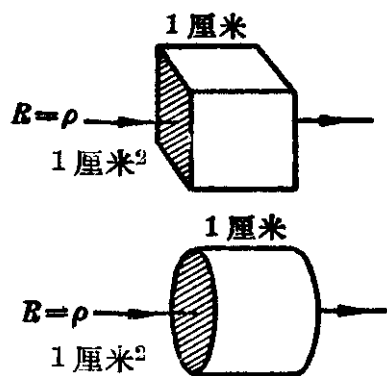


图 2·13 电阻率示意(一)

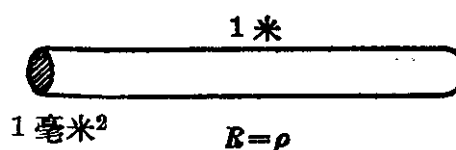


图 2·14 电阻率示意(二)

下表所列的是几种常用材料在 20°C 时的电阻率.

材 料	电阻率(欧姆 $\frac{\text{毫米}^2}{\text{米}}$)
純 金 属	
銀	0.016
銅	0.0175
鋁	0.029
鎊	0.055
鉄	0.10
水銀	0.958
合 金	
黃銅(66% 銅+34% 鋅)	0.065
錳銅(85% 銅+3% 鎳+12% 錳)	0.39
康銅(58.8% 銅+40% 鎳+1.2% 錳)	0.47
臬各姆(67.5% 鎳+15% 鉻+16% 鉄+1.5% 錳)	1.1
絕 緣 体	
象牙	2×10^{12}
賽璐珞	2×10^{14}
素燒瓷	3×10^{18}
火漆	8×10^{19}
硬橡胶	1×10^{22}

从上表可以看出：(1)合金的电阻率要比它所含有的各种纯金属的电阻率来得大；(2)各种纯金属和合金的电阻率的范围约为 $0.01\sim 1$ 欧姆·毫米²/米；(3)绝缘体的电阻率的范围约为 $10^{12}\sim 10^{22}$ 欧姆·毫米²/米，它们基本上是不导电的。

还有些固态物质，它们的电阻率介于导体和绝缘体之间，我们把它们叫做**半导体**。半导体在现代技术上的用途一天比一天大，有关半导体的知识已经成为一门独立的学科。锗、硅、硒、氧化铜等都是半导体。

导体的电阻率和导体的温度有关。差不多所有金属材料电阻率都跟着温度一起增加。但有許多合金的电阻率几乎不随温度的变化而变化，它们宜于用来制作标准电阻。

1911年，荷兰科学家卡曼林·盎聶斯发现，某些纯金属如锌、汞、铈、铝、锡、铟、钛等，在温度降到很低时（约绝对温度 $1^{\circ}\sim 7^{\circ}$ ）电阻剧烈地减小，几乎接近于零。这种现象就叫做**超导电性现象**。

任何导体都有电阻。任何用电器都是用导体制成的，所以也都有电阻。

习 题 2·3(2)

1. 把两根长度和横截面积都相同的铜丝串联在电路里，哪一根导线上的电压大些？如果这两根铜丝的长度是相同的，但是一根粗一根细，那么哪一根导线上的电压大？

2. 两根铜丝的重量相同，其中一根的长度是另一根的10倍。问哪一根铜丝的电阻比较大？是另一根铜丝电阻的几倍？

3. 如果要用铜做一根导线，使它的长度等于10公里，电阻等于10欧姆，那么要用多少铜？（已知铜的密度是8.9克/厘米³。）

4. 把一根导线对折后，它的电阻将发生怎样的变化？

5. 在测定导线电阻的实验中（图2·11），测得导线的长度是8米，横截面积是2毫米²，安培计的读数是1.6安培，伏特计的读数是2.5伏特。求导线的电阻和它的电阻率，并判别出它是用什么材料制造的。

4. 变阻器和电阻箱 我们已知，在一定电压的情况下，

电路里的电流强度随着电阻的大小而改变。在生产技术和实验工作中，常常需要逐渐改变电路中的电流强度。例如在起动电动机时、调节收音机的声音强弱时、变更剧院中的照明强度时，都要用改变电阻大小的方法来改变电流强度。

用来改变电阻大小的装置叫做变阻器。变阻器的种类很多，常用的有滑动变阻器、转柄变阻器、电灯变阻器和液体变阻器等几种。

滑动变阻器 如图 2.15 所示，用涂漆的镍铜线（铜 60%，镍 40%）绕在绝缘的瓷筒上，线的两头分别接在 A、B 两接线柱上，瓷筒上面装有一根和瓷筒平行的

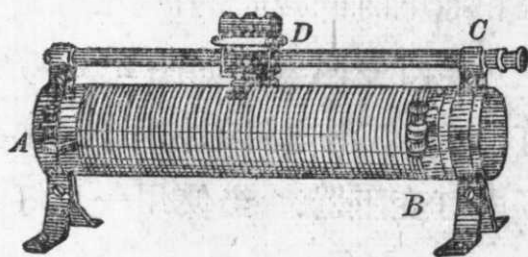


图 2.15 滑动变阻器

金属棒，棒上套有一个可以左右滑动的铜片 D，铜片下端与镍铜线相接触（线圈与铜片接触地方的漆已经刮掉）。利用金属棒上的接线柱 C 及接线柱 A 或 B，把变阻器接入电路里，当滑动铜片左右移动时，就改变了电路中所接入的镍铜线的长度，相应地改变了电路中电阻的大小。滑动变阻器使用起来很方便，电阻的增减是

逐渐进行的而不是跳跃式的；但是它不容易散热，所以通过的电流不宜过强，通电的时间也不宜过长。

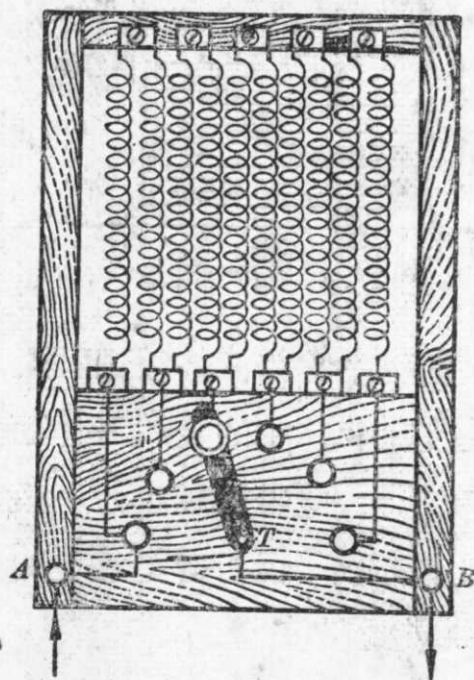


图 2.16 转柄变阻器

转柄变阻器 如图 2.16 所示，在用绝缘板制成的框架上安装许多金属片（图中的矩形片）；把许多卷成螺旋形的电阻线分别接在各个金属片上；下方的各个金属片又分别跟固定在绝缘板上的接触钉相连。T 是一个有绝缘把手的金属转柄，旋动转柄，使它能和任何一个接触

釘緊密接觸。當 T 向左旋轉時，在接綫柱 A 、 B 之間的電阻就變小；當 T 向右旋轉時， A 、 B 之間的電阻就增大。如果使轉柄跟最右面的一個接觸釘相接觸，電流就通過變阻器的全部電阻綫， A 、 B 間的電阻也就最大。應用這種變阻器時，電阻的增減是跳躍式進行的，而不是逐漸改變的，轉柄依次與不同的接觸釘相接觸，每次電阻要有相當大的改變；但它散熱較快，適用於電路上具有較強電流和通電時間較長的情況。

電燈變阻器 如圖 2·17 所示，在一塊板上安裝幾個並聯的電燈，每只燈泡電阻都相同，只要把 A 、 B 兩端串聯在電路里就組成了電燈變阻器。當使用一只燈泡時，變阻器的電阻就等於燈泡的電阻 R ；當使用兩只燈泡時，電阻就減小為 $\frac{R}{2}$ ；當使用 n 個燈泡時， A 、 B 間的電阻就減小為 $\frac{R}{n}$ 。這種變阻器的特點是構造簡便，而它的作用和轉柄變阻器相類似。

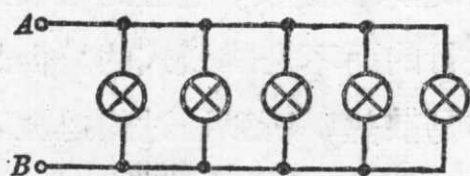


圖 2·17 電燈變阻器

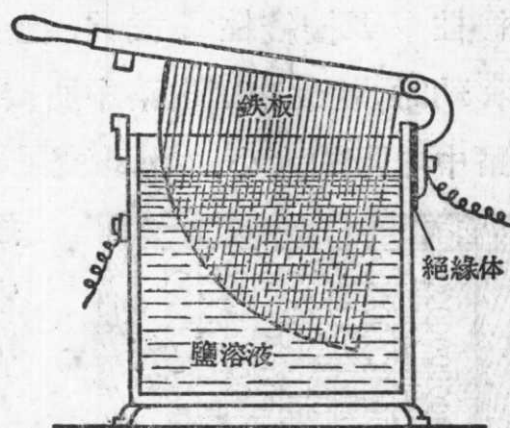


圖 2·18 液體變阻器

液體變阻器 為了變更照明強度，劇院中常用液體變阻器。如圖 2·18 所示，這種變阻器是靠改變浸沒在液體中的金屬導體面積大小來改變電阻的，浸在液體中的面積越大，電阻就越小。一般是用鹽水來做導電溶液。這種變阻器比較經濟，但有容易觸電的危險；倘若用於低電壓，并使外殼接地，那就比較安全。

一般變阻器只能改變電阻，而不能直接讀出電阻的數值。如

果需要知道电阻的数值,可以用如图 2·19(a) 所示的**电阻箱**。

电阻箱 是一种箱形的电阻器,箱里装有定值电阻的电阻线圈。箱盖上安有厚的黄铜块,如图 2·19(b) 中的 A、B、C 所示。铜块间有孔,可以插入或拔出金属塞 1 及 2。箱内电阻线圈的两个端点依次连接在相邻的铜块上,电阻线圈的数值分别记在箱盖上各插孔的旁边。图(a) 中左侧的两个接线柱是供连入电路用的。如果在某两个铜块间的孔里没有插入金属塞,那么电流就要通过铜块间的电阻线圈,则电路里也就有这个线圈的电阻。当同时拔出几个金属塞时,电路中的电阻就为这几个相应电阻线圈电阻值的总

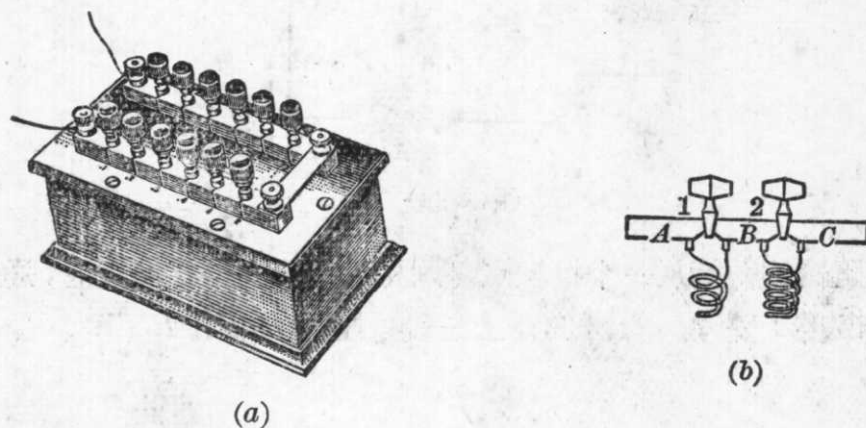


图 2·19 电 阻 箱

和。随着需要的不同,有的电阻箱上能精确读出 0.1 欧姆的电阻,也有的能读出几百或几千欧姆的电阻。当金属塞插入铜块间的孔里时,金属塞就起了连结铜块的作用,因为金属塞是跟电阻线圈并联的,它们的电阻与金属塞的电阻相比,小到可以忽略不计的程度。所以当所有金属塞都插入时,电阻箱的电阻应为“0”。

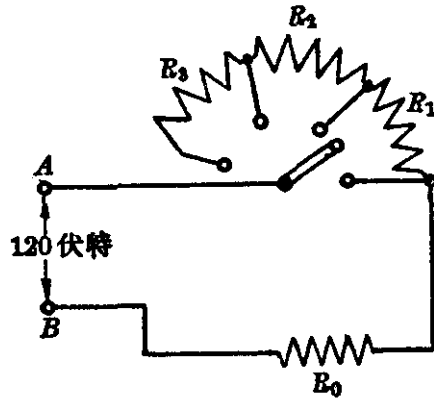
习 题 2·3(3)

1. 在改变电路中的电流强度时,常常用一滑动变阻器串联在电路里,为什么? 试画出具有用电器、滑动变阻器、电键和安培计的电路图。
2. 为了跳跃较小地来改变电路中的电流强度,应该用哪一种变阻器? 为什么?
3. 为什么用电阻箱就能直接读出定值电阻的值来?

4. 有一弧光灯在正常发光时，需要 40 伏特电压和 5 安培电流，现供给电压为 110 伏特，问应联入一个多大的变阻器？怎样联法？

5. 把 6 只电阻都是 480 欧姆的电灯并联起来，做成一个电灯变阻器，问这个变阻器的电阻的最小值和最大值分别是多少？如果要使变阻器的电阻为 120 欧姆，问应接通几只电灯？

6. A 、 B 两点间的电压保持 120 伏特（见附图）。仪器的电阻 R_0 是 30



(第 6 题)

欧姆。当变阻器的转柄从一个接触点转到相邻的另一个接触点时，通过仪器的电流强度改变 1 安培。问变阻器上三段电阻线的电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 各是多少欧姆？

§ 2.4 电流的功和功率，焦耳-楞次定律

1. 电流的功和功率 电流通过导体可以看做是正电荷从电势较高的一端移向电势较低的一端，此时电场做功。图 2.20 表示电路里的一段导线，它的电阻为 R ①， A 端的电势为 U_1 ， B 端的电势为 U_2 ，通过的电流强度为 I 。

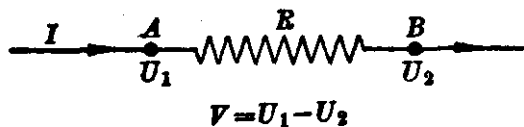


图 2.20 部分电路

根据电流强度的定义，我们知道，在 t 秒钟里流过导线 AB 的电量

$$Q = It;$$

根据电势差的定义，我们知道，当电荷 Q 从 A 端移到 B 端的时候，

① 在画电路图的时候，我们经常用 M 符号来表示电阻。实际上，电阻是分布在整个导线上的，但在画电路图时，为了方便和醒目起见，总是集中表示在一小段导路上，其余用直线表示的线路就一概认为没有电阻。

电場力作功

$$A = QV,$$

或写作

$$A = IVt.$$

上面这个公式說明，只要有电流存在，电場力总是要作功的，习惯上我們称上式所示的功为**电流的功**。这样的叫法，并不表示电流或电荷在作功，而是表示电場为了維持电流在作功。

在应用上面的公式时，如果 I 的单位是安培， V 的单位是伏特， t 的单位是秒，则 Q 的单位是庫侖， A 的单位是焦耳。所以

$$1 \text{ 焦耳} = 1 \text{ 安培} \times 1 \text{ 伏特} \times 1 \text{ 秒}.$$

因为功率

$$N = \frac{A}{t},$$

所以在这段导綫上的电流的功率

$$N = IV.$$

功率的实用单位是焦耳/秒，又叫做**瓦特**。

$$1 \text{ 瓦特} = 1 \text{ 安培} \times 1 \text{ 伏特};$$

$$1 \text{ 千瓦特} = 1000 \text{ 瓦特}.$$

在工业上，常称：

$$1 \text{ 焦耳为 } 1 \text{ 瓦特} \cdot \text{秒},$$

$$3600 \text{ 焦耳为 } 1 \text{ 瓦特} \cdot \text{小时},$$

$$3,600,000 \text{ 焦耳为 } 1 \text{ 千瓦} \cdot \text{小时}.$$

例 1. 小电炉上标记着“200 伏特；600 瓦特”。这个符号說明：当这个电炉的电压（即电炉两端的电势差）为 200 伏特时，它的电功率为 600 瓦特。求：(1) 通过电炉絲的电流强度；(2) 电炉絲的电阻；(3) 如果把它接在电压为 220 伏特的电路里，电功率应是多少？(4) 如果把它接在电压为 110 伏特的电路里，电功率又应该是多少？

【解】 (1) 电炉上标明：

电功率 $N = 600$ 瓦特,

电路的电压 $V = 200$ 伏特;

根据公式 $N = VI$,

可以求得通过电炉絲的电流强度

$$I = \frac{N}{V} = \frac{600}{200} = 3 \text{ 安培.}$$

(2) 根据欧姆定律

$$I = \frac{V}{R},$$

求得电炉絲的电阻

$$R = \frac{V}{I} = \frac{200}{3} = 66.7 \text{ 欧姆.}$$

(3) 如果把电炉接在电压为 220 伏特的电路里, 由于电炉絲的电阻可以假定为不变, 电流强度要加大到

$$I' = \frac{V'}{R} = \frac{220}{66.7} = 3.3 \text{ 安培,}$$

因而电功率要加大到

$$N' = V'I' = 220 \times 3.3 = 726 \text{ 瓦特.}$$

(4) 如果把电炉接在电压为 110 伏特的电路里, 电流强度要减小到

$$I'' = \frac{V''}{R} = \frac{110}{66.7} = 1.65 \text{ 安培,}$$

因而电功率要减小到

$$N'' = V''I'' = 110 \times 1.65 = 181.5 \text{ 瓦特.}$$

根据电功率公式 $N = VI$, 和欧姆定律公式 $V = IR$, 可以导得下面两个等式:

$$N = I^2 R,$$

$$N = \frac{V^2}{R}.$$

把后一等式改写成:

$$R = \frac{V^2}{N},$$

可以直接求出电炉絲的电阻

$$R = \frac{200^2}{600} = 66.7 \text{ 欧姆.}$$

习 题 2·4(1)

1. 电灯泡上常常标记着“220 伏特; 40 瓦特”。这个符号的意思是: 灯泡应该接在电压为 220 伏特的电路上, 电流通过它的电功率为 40 瓦特. 求通过这个灯泡的电流强度和钨絲(电灯泡里发光的那部分金属絲)的电阻.

2. 如果把前题中的电灯泡错接在 110 伏特的电路上, 就会发现电灯泡暗淡无光. 这是什么道理? 此时通过电灯泡的电流是多少? 电功率又是多大? (假定钨絲的电阻不变.)

3. 如果把标记着“200 伏特; 40 瓦特”的灯泡接到电压为 220 伏特的电路上去, 就会发现灯光特别明亮. 这是什么道理? 此时通过灯泡的电流强度是多少? 电功率又是多大? (假定钨絲的电阻不变.)

4. 电动机的输出功率是 40 千瓦, 效率是 80%, 电路上的电压是 380 伏特. 求通过电动机的电流强度.

2. 焦耳-楞次定律 我們已經知道, 作功的过程就是能量的轉換过程. 在有电流存在的时候, 电场力作多少功, 就有多少电能轉換成別种形式的能(例如机械能、化学能、內能……).

經驗指出, 在有电流通过导体时, 导体的温度总要升高. 这說明通电时电能轉換成了导体的內能. 从很古的时候起, 人們就已經知道, 用傳遞热量的办法可以使物体的温度升高, 等到后来发现电流能使导体温度升高的現象, 就把它称为**电流的热效应**. 电灶、电炉、电灯等都是利用电流热效应的用电器.

电流的热效应跟哪些因素有关呢? 我們可以用下述的實驗方法来研究这个問題.

图 2·21 表示一个特制的量热器, 小容器里装有一种不导电的液体(例如煤油), 液体里安装好一个电阻为 R 的导线圈. 通过盖子上的接綫柱, 把导线圈、电池組和安培計串联在一起(如图所示). 通电后, 小容器以及它里面的液体和导线圈的温度都有了升

高，即内能都有了增加。如果这个温度升高是用传递热量的办法

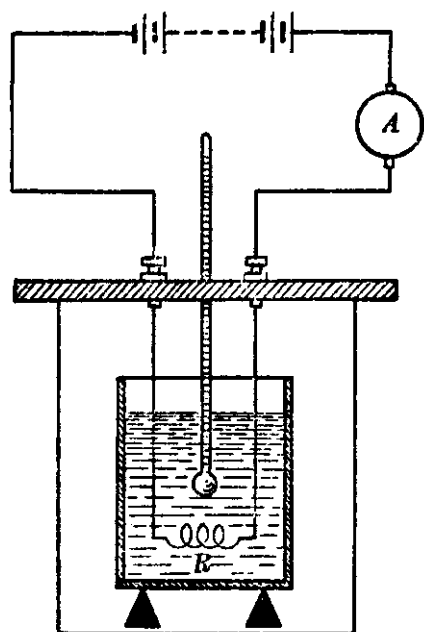


图 2-21 电流热效应

来达到的，我们就可以根据各有关物体的质量、比热和温度变化计算出热量的多少。通常我们总是拿这个热量来表示电流的热效应，并把它说成是电流通过导体时所发放的热量。

进行实验时，先保持电路上的电流强度和导线圈的电阻不变，仅仅改变通电的时间。结果指出，发放的热量跟通电的时间成正比。

再保持电流强度和通电的时间不变，换用不同电阻值的导线圈进行实验。

结果指出，发放的热量跟导线圈的电阻成正比。

最后，再保持导线圈的电阻和通电时间不变，仅仅用增减电池的办法，或别的办法来改变电路中的电流强度。结果指出，发放的热量跟电流强度的平方成正比。

综合以上的实验结果，我们得出结论：电流通过导体所发放的热量 Q 跟电流强度的平方 I^2 、导体的电阻 R 和通电的时间 t 成正比。

这个关系是英国物理学家焦耳和俄国物理学家楞次各自独立地从实验中得出的，我们把它叫做焦耳-楞次定律。这个定律可以用公式表示如下：

$$Q = KI^2Rt.$$

公式中的 K 是比例恒量，它的数值与式中各量所取的单位有关。如果热量 Q 的单位为卡，电流强度 I 的单位为安培，电阻 R 的单位为欧姆，时间 t 的单位为秒，那么，从实验知道， K 的数值等于 0.24。这就是说，如果导体的电阻是 1 欧姆，通过它的电流强度是 1 安培，那么在 1 秒钟里发放出的热量就是 0.24 卡。

在选用卡、安培、欧姆和秒作为各量的单位时,焦耳-楞次定律公式可以写作:

$$Q = 0.24I^2Rt.$$

焦耳-楞次定律是从实验中得来的,但是应该如何理解公式所表示的物理意义呢?

根据欧姆定律,我们已经知道,当强度为 I 安培的电流通过电阻为 R 欧姆的导体时,导体两端的电势差为 $V = IR$ 伏特,这时电流的功 $A = VIt = I^2Rt$ 焦耳.

焦耳-楞次定律公式的物理意义是:从改变物体温度(即增加物质内能)这个效果上来说, I^2Rt 焦耳的电流功相当于 Q 卡的热量,即相当于 $0.24I^2Rt$ 卡的热量.

当 $I^2Rt = 1$ 焦耳时, $Q = 0.24$ 卡. 意思就是说,1 焦耳的电流功相当于 0.24 卡的热量. 通常我们把 $K = 0.24$ 卡/焦耳叫做**功热当量**.

功热当量 $K = 0.24$ 卡/焦耳是热功当量 $J = 4.18$ 焦耳/卡的倒数.

习 题 2·4(2)

1. 两根长度和粗细都相同的导线,一根是铜制的,一根是铁制的. 哪一根导线的电阻大? 它是另一根导线电阻的几倍? 如果把这两根导线串联在一个电路里,在相同的时间内哪一根导线放出的热量多? 是另一根导线放出热量的几倍? 如果把这两根导线并联在一个电路里,在相同的时间内哪一根导线放出的热量多? 是另一根导线放出热量的几倍?

[提示:串联电路上各处的电流强度相等,并联电路上各支路的电压相等.]

2. 导体的电阻是 4 欧姆,在两分钟内通过导体的电量是 600 库仑. 求在这段时间里导体放出的热量.

3. 把 990 克的水从 20°C 烧到 100°C 需要多少热量? 现在有一只电灶,它的电阻是 22 欧姆,把它接在电压为 220 伏特的电路里,每分钟要放出多少热量? 如果用这个电灶烧上述的水,需要经过 7.5 分钟. 求电灶的效率为多

少?

4. 在一个质量是 55.5 克的铝制量热器小容器里, 装有煤油 314.2 克, 煤油里浸着一个导线圈. 已知导线圈两端的电势差是 8 伏, 通过的电流是 1.1 安培. 通电 20 分钟后, 煤油的温度从 14°C 升高到 28.5°C . 根据这些实验数据求功热当量的数值.

[提示: 从本丛书物理第二册里查阅铝和煤油的比热.]

5 上海电能的价格约为每千瓦·小时 0.30 元. 某用户装有一只 400 瓦特的小电炉, 三只 40 瓦特和 2 只 25 瓦特的电灯泡. 如果平均每天用电灯 3 小时, 用电炉 2 小时, 问每月应付多少电费?(每月以 30 天计算.)

§ 2.5 有关部分电路的讨论

这里所讨论的部分电路是指不包括电源在内的那一部分电路.

在实际应用的电路里, 常常遇到由好几个导体连接起来的导体组. 这些导体可以按不同的方法连接起来, 但是基本上只有串联和并联两种.

有关部分电路的讨论, 主要是讨论怎样应用欧姆定律和焦耳-楞次定律来处理有关部分电路的问题, 也就是怎样计算部分电路上的电压、电流强度、电阻和电功率.

为了对任何形式的导体组都能直接应用欧姆定律和焦耳-楞次定律, 首先需要计算导体组的总电阻.

什么叫做总电阻呢? 我们可以这样来想象: 如果用一个单导体来代替一个串联的或并联的导体组, 结果并不影响电路上的电流强度和电压, 那么, 这个单导体所具有的电阻就是这个导体组的总电阻.

现按不同形式的导体组来分别讨论有关计算的若干规律:

1. 串联导体组 图 2.22 表示两个串联的导体 (或两个串联的用电器) AB 和 BC , 它们的电阻分别为 R_1 和 R_2 .

我们已经知道: 当有稳恒电流通过串联导体时, 各段电路上的

电流强度相等。

如果 A 点处的电势为 U_A , B 点处的为 U_B , C 点处的为 U_C , 那么, AB 这段导体上的电压(即 A 点和 B 点间的电势差)为

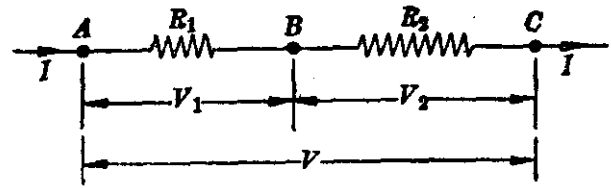


图 2·22 串联导体组

BC 这段导体上的电压为

$$V_1 = U_A - U_B,$$

$$V_2 = U_B - U_C,$$

AC 这段导体上的电压为

$$V = U_A - U_C;$$

显然

$$V = V_1 + V_2.$$

如果在电路中有 n 段导体串联在一起, 则全段电路的总电压为

$$V = V_1 + V_2 + \cdots + V_n.$$

这就是说: 在串联电路里, 全段电路上的电压等于各分段电路上的电压之和。

设令通过串联导体的电流强度为 I , 那么, 根据欧姆定律, 求得

$$V_1 = IR_1,$$

$$V_2 = IR_2.$$

两式相加, 求得

$$V = I(R_1 + R_2),$$

式中 $(R_1 + R_2)$ 叫做串联导体的总电阻。如用 R 表示总电阻, 则两个串联导体的总电阻为

$$R = R_1 + R_2;$$

同理, n 个串联导体的总电阻为

$$R = R_1 + R_2 + \cdots + R_n.$$

这就是说: 串联导体的总电阻等于各导体的电阻之和。

根据以上的讨论,还可以看出:

$$V_1:V_2:\dots:V_n:V = R_1:R_2:\dots:R_n:R.$$

这就是说:在串联电路里,各段导体的电压跟它们的电阻成正比。

由于电流的功率

$$N = I^2R,$$

因为 I 到处相等

所以 $N_1:N_2:\dots:N_n:N = R_1:R_2:\dots:R_n:R.$

这就是说:在串联电路里,各段的电功率跟它们的电阻成正比。

例 2. 图 2.23 里的 A 和 E 是外电路的两个接线头,它们间的电势差为 220 伏特. $ABCDE$ 为屋内电路. AB 和 DE 是两根

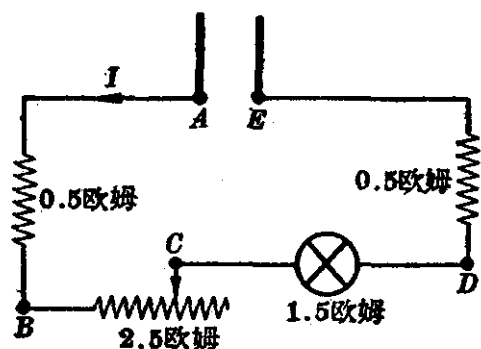


图 2.23 例 2 附图

导线,它们的电阻各等于 0.5 欧姆. BC 是一个用来调节电流强度的变阻器,它这时的电阻是 2.5 欧姆. CD 是一盏弧光灯,它的电阻是 1.5 欧姆. 求电路上的电流强度、各段电路上的电压和各段电路上的电功率。

【解】 屋内电路上的总电阻

$$R = 0.5 + 2.5 + 1.5 + 0.5 = 5 \text{ 欧姆},$$

屋内全电路上的电压(即 A 点和 E 点间的电势差)已知为

$$V = 220 \text{ 伏特}.$$

根据欧姆定律,求得电流强度

$$I = \frac{V}{R} = \frac{220}{5} = 44 \text{ 安培};$$

AB 段的电压

$$V_{AB} = IR_{AB} = 44 \times 0.5 = 22 \text{ 伏特},$$

AB 段的电功率

$$N_{AB} = V_{AB}I = 22 \times 44 = 968 \text{ 瓦特};$$

BC 段的电压

$$V_{BC} = IR_{BC} = 44 \times 2.5 = 110 \text{ 伏特},$$

BC 段的电功率

$$N_{BC} = V_{BC}I = 110 \times 44 = 4840 \text{ 瓦特};$$

CD 段的电压

$$V_{CD} = IR_{CD} = 44 \times 1.5 = 66 \text{ 伏特},$$

CD 段的电功率

$$N_{CD} = V_{CD}I = 66 \times 44 = 2904 \text{ 瓦特};$$

DE 段的电压

$$V_{DE} = IR_{DE} = 44 \times 0.5 = 22 \text{ 伏特},$$

DE 段的电功率

$$N_{DE} = V_{DE}I = 22 \times 44 = 968 \text{ 瓦特}.$$

想一想:在上题已求得的数值中,各部分电压和总电压有什么关系?各部分电阻和总电阻有什么关系?各部分的电功率跟它们的电阻有什么关系?这些关系应该在什么样的电路里才能成立?

习 题 2.5(1)

1. 把电阻为 4 欧姆的弧光灯和 18 欧姆的电阻器串联在一起,然后接入电压为 220 伏特的电路上.求通过弧光灯的电流强度、弧光灯两端的电压和电功率.

2. 小电灯泡的电阻为 23 欧姆,允许通过的最大电流强度是 0.28 安培.应该把多少只这样的灯泡串联在一起,才能把它们连接在 219 伏特的电路里?

3. 在一段电路上有两个串联的用电器,它们的电阻分别为 10 欧姆和 15 欧姆.已知这段电路上的电压为 110 伏特,试分别求这两个用电器的电压和电功率.

4. 把两个“220 伏特; 40 瓦特”的灯泡串联在电压为 220 伏特的电路上.求通过它们的电流强度和各个灯泡的电功率.

5. 把一个“110 伏特; 40 瓦特”的灯泡和一个“110 伏特; 25 瓦特”的灯泡串联在一个电压为 110 伏特的电路上. 求它们的电功率, 这时哪一个灯泡比较亮些?

6. 把上题中的两个灯泡串联在电压为 220 伏特的电路上, 它们的电功率又各为多少呢?

2. 并联导体组 图 2·24 表示两个并联的导体, 它们的电阻分别为 R_1 和 R_2 .

从图上可以看出, A 和 B 是各个分路的公共端点, 所以两个分路上的电压都等于 V . 这就是说: 在并联电路里, 各个分路两端的电压都相同.

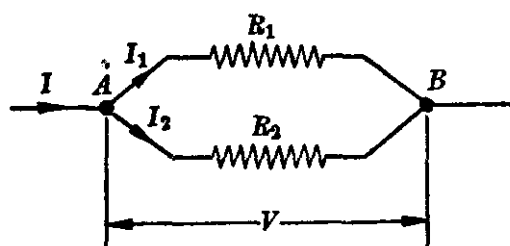


图 2·24 并联导体组

如果干路里的电流强度为 I , 两个分路里的电流强度分别为 I_1 和 I_2 , 那么在稳定的情况下,

$$I = I_1 + I_2,$$

否则, 每秒钟流到 A 点的电量将不等于每秒钟从 A 点流出的电量, 于是 A 点就有电荷集聚或脱节的不稳定现象.

如果有 n 个导体并联在一个电路上, 则上面的等式应该写作

$$I = I_1 + I_2 + \cdots + I_n.$$

这就是说: 在并联电路里, 干路上的电流强度等于各分路上的电流强度之和.

根据欧姆定律, 求得各个分路上的电流强度为

$$I_1 = \frac{V}{R_1},$$

$$I_2 = \frac{V}{R_2}.$$

两式相加, 求得干路上的电流强度

$$I = V \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

式中 $\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$ 的倒数叫做并联导体的总电阻. 如用 R 表示总电

阻, 則两个并联导体的总电阻的倒数

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2};$$

如有 n 个导体并联在一起, 則总电阻的倒数

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

这就是說: 并联导体的总电阻的倒数等于各个导体的电阻倒数之和. 或說: 并联导体的总电导等于各个导体的电导之和.

从上面的等式可以看出, 并联导体的总电阻比其中任一导体的电阻都要小 (即并联导体的总电导比其中任一导体的电导都要大). 还可以看出, 如果有 n 个电阻相等的导体并联在一起, 它們的总电阻等于任一个分路电阻的 n 分之一 (即总电导等于任一分路电导的 n 倍).

根据以上的討論, 我們可以看出:

$$I_1 : I_2 : \dots : I_n : I = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \dots : \frac{1}{R_n} : \frac{1}{R}.$$

这也就是說: 在并联电路里, 各分路的电流强度跟它們的电阻成反比.

由于电流的功率

$$N = VI = \frac{V^2}{R},$$

而且各并联分路上的电压相等,

所以
$$N_1 : N_2 : \dots : N_n : N = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \dots : \frac{1}{R_n} : \frac{1}{R}.$$

这也就是說: 在并联电路里, 各分路的电功率跟它們的电阻成反比.

例 3. 图 2.25 里的 A 和 B 是外电路的两个接綫头. $ACDEFGHB$ 为屋內电路, 在它上面装着三盞弧光灯, 它們的电阻分別为 $R_1 = 2.2$ 欧姆, $R_2 = 2.5$ 欧姆和 $R_3 = 4.4$ 欧姆. 已知干路上的电流强度 $I = 119$ 安培. 如果不計全部連接弧光灯的导綫电阻,

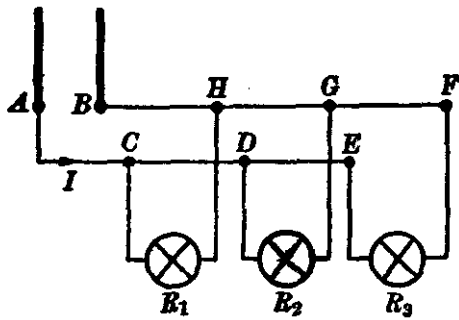


图 2.25 例 3 附图(一)

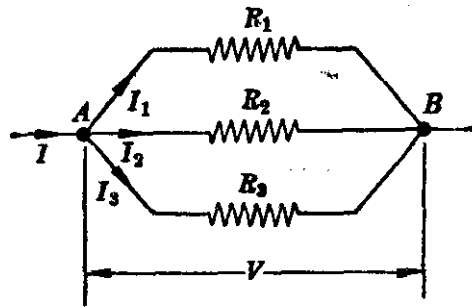


图 2.26 例 3 附图(二)

A、B 两个接头间的电势差该是多大？流过各个弧光灯的电流强度和电功率又应该多大？

【解】 首先应当看出，三个弧光灯是并联在屋内电路上的。其次由于不须考虑导线的电阻，在作电路示意图时，可以把 ACDE 这段导线看做是一点（如图 2.26 里的 A 点），把 BHGF 这段导线看做是另一点（如图 2.26 里的 B 点）。在这两点之间并列着三条分路，每条分路上装一盏弧光灯，它们的电阻分别为 R_1 、 R_2 和 R_3 。

根据公式，求得并联弧光灯的总电阻的倒数

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{2.2} + \frac{1}{2.5} + \frac{1}{4.4} = \frac{119}{110}.$$

已知总电流强度

$$I = 119 \text{ 安培,}$$

根据欧姆定律，求得 A、B 两点间的电势差

$$V = IR = 119 \times \frac{110}{119} = 110 \text{ 伏特.}$$

从而可以求得 R_1 这条分路上的电流强度

$$I_1 = \frac{V}{R_1} = \frac{110}{2.2} = 50 \text{ 安培,}$$

电功率

$$N_1 = VI_1 = 110 \times 50 = 5500 \text{ 瓦特;}$$

R_2 这条分路上的电流强度

$$I_2 = \frac{V}{R_2} = \frac{110}{2.5} = 44 \text{ 安培,}$$

电功率

$$N_2 = VI_2 = 110 \times 44 = 4840 \text{ 瓦特};$$

R_3 这条分路上的电流强度

$$I_3 = \frac{V}{R_3} = \frac{110}{4.4} = 25 \text{ 安培},$$

电功率

$$N_3 = VI_3 = 110 \times 25 = 2750 \text{ 瓦特}.$$

想一想:在上题所求得的数值中,各分路电流和干路电流有什么关系?各分路电阻和总电阻是哪个好?有什么规律?各分路电功率跟它们的电阻有什么关系?这些关系应该在什么电路里才能成立?

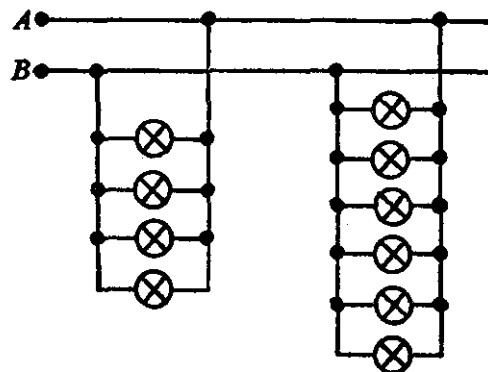
习 题 2.5(2)

1. 10 个相同的电灯并联在 220 伏特的电路上. 每个灯泡的电阻是 1210 欧姆. 求干路上的电流强度.

2. 两个并联导体的电阻分别为 R 和 $9R$. 接入电路后,通过各个导体的电流强度是总电流强度的几分之几? 如果这两个导体的电阻分别为 R 和 $999R$, 通过各个导体的电流强度又是总电流强度的几分之几?

3. 一个导线圈的电阻是 4.95 欧姆. 为了只让百分之一的干路电流通过它,应当和它并联一个电阻等于多大的导体? 并联这个导体之后,总电阻又等于多大?

4. 在附图中, A 和 B 是从外电路接入的两个线头. 在室内电路上有两个分路; 在一个分路上并联 4 只电阻为 1000 欧姆的灯泡, 在另一个分路上并联 6 只电阻为 1200 欧姆的灯泡. 如果干路电流强度是 1.98 安培, 求通过各个灯泡的电流强度和电功率.



(第 4 题)

5. 用均匀导线折成一个正四边形的框架, 并把接头处焊好. 如果每一边的电阻为 r , 那么两个对顶之间的总电阻是多大? 两个邻顶之间的总电阻又是多大?

3. 一般导体组 在实际应用中,电路里所包含的导体组常常不是单纯的串联或单纯的并联。在很多情况下,一个比较复杂的导体组可以分解为若干个串联组和若干个并联组。在处理这一类问题时,首先应该全面地审查电路的结构,看出各个导体之间的串联或并联关系,作出简单明了的电路示意图。然后分别求出各个串联组或并联组的合电阻,用一个单导体来代替一个导体组。这样就可以使复杂的电路逐步简化,一直到能够直接应用欧姆定律来计算为止。

我们举下面两个例题来阐明一般导体组的处理方法。

例 4. 用均匀导线折成一个正四边形框架,并用同样的导线焊上一根对角线,如图 2·27 所示。已知四边形每一边的电阻为 2 欧姆。如果把框架的两个顶点 A 和 D 连接在电压为 12 伏特的电路里,求 (1)干路电流, (2)通过对角线和各边的电流。

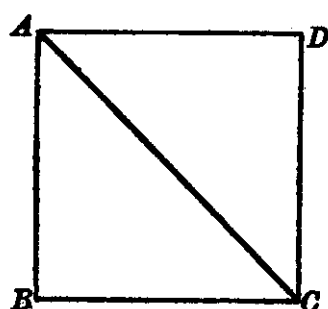


图 2·27 例 4 附图(一)

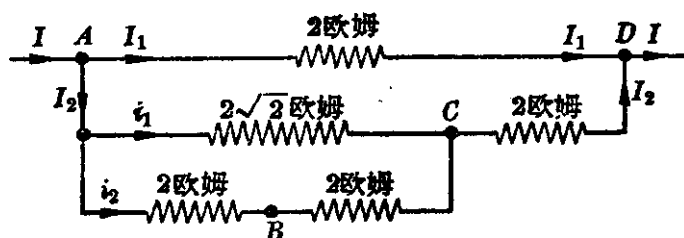


图 2·28 例 4 附图(二)

【解】 根据题意,假定电流从 A 点流入框架,并从 D 点流出框架,我们可以看出,电流在经过 A 点后,分入三条支路:第一条支路由 A 直接到 D ,第二条支路由 A 经 B 、 C 到 D ,第三条支路由 A 经 C 到 D 。这样的导体组可以用电路示意图(图 2·28)来表示。这一部分电路可以认为是由两个分路所组成,一个分路里只包含一根导线 AD ,另一个分路里包括四根导线,形成一个比较复杂的导体组。 AB 和 BC 是一个串联组,它和 AC 并联;这个并联组又和 CD 串联成为第二个分路。

ABC 串联组的总电阻

$$r_1 = 2 + 2 = 4 \text{ 欧姆};$$

ABC 和 AC 并联的总电导

$$\frac{1}{r_2} = \frac{1}{4} + \frac{1}{2\sqrt{2}} = \frac{1 + \sqrt{2}}{4},$$

故总电阻

$$r_2 = \frac{4}{1 + \sqrt{2}} \text{ 欧姆};$$

第二分路的总电阻

$$r_3 = r_2 + 2 = \frac{4}{1 + \sqrt{2}} + 2 = \frac{6 + 2\sqrt{2}}{1 + \sqrt{2}} \text{ 欧姆};$$

整个电路的总电导

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_3} + \frac{1}{2} = \frac{1 + \sqrt{2}}{6 + 2\sqrt{2}} + \frac{1}{2} = \frac{2 + \sqrt{2}}{3 + \sqrt{2}},$$

总电阻

$$R = \frac{3 + \sqrt{2}}{2 + \sqrt{2}} = \frac{4 - \sqrt{2}}{2} \text{ 欧姆}.$$

已知 A 、 D 两点间的电势差 $V = 12$ 伏特, 根据欧姆定律, 求得干路电流强度

$$I = \frac{V}{R} = 12 \times \frac{2}{4 - \sqrt{2}} = 9.28 \text{ 安培};$$

通过第一分路 AD 的电流强度

$$I_1 = \frac{V}{r} = \frac{12}{2} = 6 \text{ 安培};$$

通过第二分路 $ABCD$ 的电流强度

$$I_2 = \frac{V}{r_3} = 12 \times \frac{1 + \sqrt{2}}{6 + 2\sqrt{2}} = 3.28 \text{ 安培};$$

A 、 C 两点间的电势差

$$V' = I_2 r_2 = 12 \times \frac{1 + \sqrt{2}}{6 + 2\sqrt{2}} \times \frac{4}{1 + \sqrt{2}} = 5.44 \text{ 伏特};$$

通过对角线 AC 的电流强度

$$i_1 = \frac{V'}{\sqrt{2} r} = \frac{5.44}{2\sqrt{2}} = 1.92 \text{ 安培};$$

通过 ABC 串联组的电流强度

$$i_2 = \frac{V'}{2r} = \frac{5.44}{4} = 1.36 \text{ 安培};$$

通过 CD 导线的电流强度

$$I_2 = i_1 + i_2 = 1.92 + 1.36 = 3.28 \text{ 安培}.$$

例 5. 图 2·29 里的 A 和 B 表示由发电厂引出的两个接线头, 它们之间的电势差为 110 伏特; AC 和 BD 是两根从发电厂引到用电户的导线, 它们的电阻各为 1 欧姆. 在用电户的电路里, 并联着三只电阻各为 27 欧姆的小电炉. 求在下列四种情况下, C 、 D 两点之间的电势差:

- (1) 三只电炉都不使用时;
- (2) 使用一只电炉时;
- (3) 使用两只电炉时;
- (4) 三只电炉全部使用时.

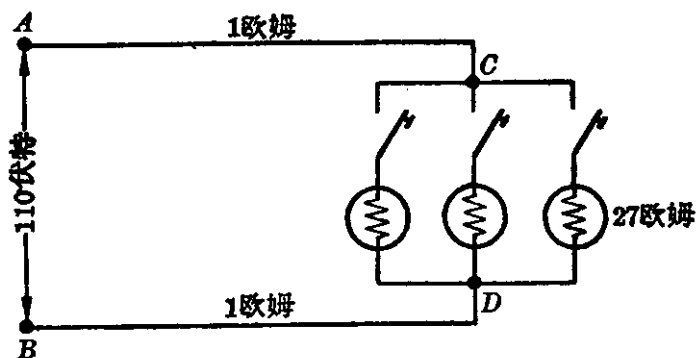


图 2·29 例 5 附图

【解】 (1) 当三只电炉都不使用时, 电路不通, 电路上没有电流, 因此 A 点和 C 点等电势, B 点和 D 点等电势, C 、 D 两点间的电势差等于 A 、 B 两点间的电势差, 即 110 伏特.

(2) 当使用一只电炉时, 整个电路就是一个简单的串联电路, 总电阻

$$R = 1 + 27 + 1 = 29 \text{ 欧姆},$$

总电压

$$V = 110 \text{ 伏特,}$$

因而求得电路上的电流强度

$$I = \frac{V}{R} = \frac{110}{29} \approx 3.8 \text{ 安培;}$$

并求得 C 、 D 間电势差

$$V' = I \times R' = 3.8 \times 27 \approx 102.5 \text{ 伏特.}$$

(3) 当使用两只电炉时, 用电户电路是一个包括两只电炉的并联组, 它的总电阻

$$R' = \frac{27}{2} = 13.5 \text{ 欧姆,}$$

整个部分电路的总电阻

$$R = 1 + 13.5 + 1 = 15.5 \text{ 欧姆,}$$

总电压

$$V = 110 \text{ 伏特,}$$

因而求得干路上的电流强度

$$I = \frac{V}{R} = \frac{110}{15.5} = 7.1 \text{ 安培;}$$

并求得 C 、 D 間电势差

$$V' = IR' = 7.1 \times 13.5 = 95.9 \text{ 伏特.}$$

(4) 当三只电炉全部使用时, 用电户电路是一个包括三只电炉的并联组, 它的总电阻

$$R' = \frac{27}{3} = 9 \text{ 欧姆,}$$

整个部分电路的总电阻

$$R = 1 + 9 + 1 = 11 \text{ 欧姆,}$$

总电压

$$V = 110 \text{ 伏特,}$$

因而求得干路上的电流强度

$$I = \frac{V}{R} = \frac{110}{11} = 10 \text{ 安培;}$$

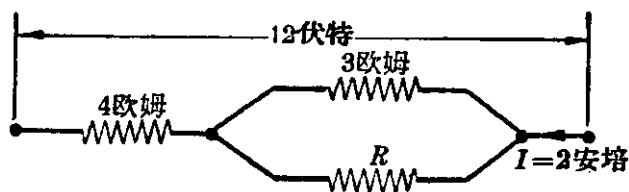
并求得 C 、 D 两点间的电势差

$$V' = IR' = 10 \times 9 = 90 \text{ 伏特.}$$

从上面的计算结果可以看出，在用户电路上并联的用电器越多，用户电路上的电压（即 C 、 D 两点间的电势差）就越小，通过每一个用电器的电流强度也越小，因而每个用电器的电功率也越小。在夜晚当接通电炉或电烙铁时，电灯光会立即暗淡下来，这就是用户电路上电压降低的表现。

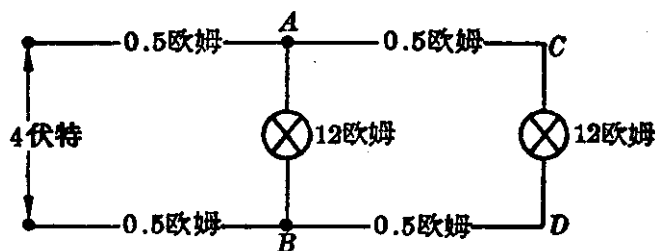
习 题 2.5(3)

1. 在例 5 所述的后三种情况下，电炉的电功率各等于多少？
2. 从发电厂引出的两个接线头之间的电势差为 110 伏特，从发电厂到用电户的往返导线的电阻为 1 欧姆，用电户电路上并联着四个用电器，它们的电阻分别为 20 欧姆、40 欧姆、50 欧姆和 200 欧姆。求(1)干路电流强度；(2)用户电路上的电压；(3)通过各用电器的电流强度。
3. 求附图里的电阻 R 。



(第 3 题)

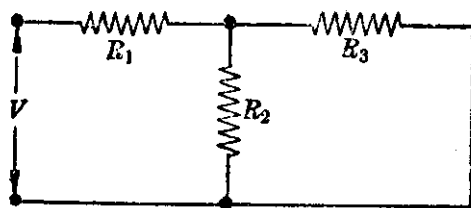
4. 求附图里两个电灯上的电压。



(第 4 题)

5. 有一个弧光灯，点燃时需要 60 伏特电压和 10 安培电流。现用电压为 120 伏特的发电机对这个弧光灯供电。已知连接发电机和弧光灯的导线电阻为 0.2 欧姆，问在弧光灯处应该串联多大的电阻才能使它正常地工作。

6. 附图中的 $R_1 = 10$ 欧姆， $R_2 = 4$ 欧姆， $R_3 = 6$ 欧姆。已知通过 R_3 的电流强度为 0.1 安培。求通过 R_2 和 R_1 的电流强度以及电压 V 。



(第6題)

7. 从发电厂引出两根导线直达用电区。用电区里并联着 300 盏电灯，每只灯泡的电阻为 400 欧姆。在 300 盏灯泡全部开亮时，用电区的电压为 180 伏特；在熄灭 100 盏灯泡时，用电区的电压为 200 伏特。求(1)在两种情况下通过每盏电灯的电流强度；(2)导线的电阻和发电厂的电压。

8. 电热水壶里有两段电热丝，当其中的一段通电时，经过 10 分钟水就沸腾了，而当另一段通电时，要经过 20 分钟水才沸腾。(1)如果把两段电热丝串联起来再通电，问要经过多少时间水才会沸腾？(2)如果把两段电热丝并联起来使用，问通电多少时间水就会沸腾？(假使电压不变)

§ 2.6 电源. 电动势

1. 电源 要在导体里维持稳恒电流，就必须在导体的两端维持稳恒的电势差，也就是说必须要有电源。

电源的种类很多，经常使用的有电池和发电机两种。它们的构造和工作原理，以后还要讨论。在这一节里，我们着重讨论一切电源的共同特性。

一切电源都是用导电材料制成的，并且都有两个叫做极的导电固体。一个极的电势较高，叫做**正极**；另一个电势较低，叫做**负极**。使用电源时，只要把一个导体或一个导体组的两端和两极接在一起，就可以得到稳恒电流。图 2.30 和图 2.31 分别表示用电池或发电机作为电源的简单电路。

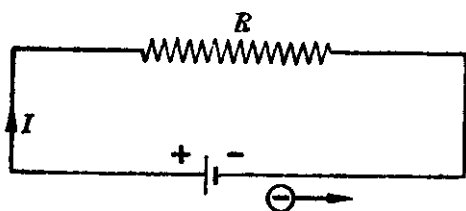


图 2.30 电池电源图

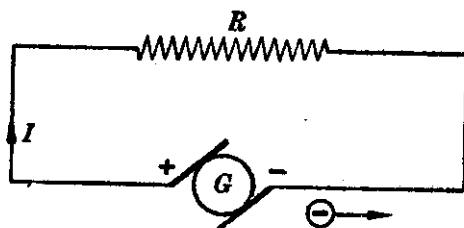


图 2.31 发电机电源图

电荷周流的整个电路，从电源的正极出发回到电源的正极为止，叫做**全电路**。电源本身也是电路的一个部分；这部分电路，从电源的负极出发通过电源的内部到达电源的正极为止，叫做**内电路**。电源以外的那一部分电路叫做**外电路**。

在外电路上，形成电流的实质是自由电子从电源的负极流向正极。但是在习惯上，总把它说成是正电荷从电源的正极流向负极，或者说成是电流从电源的正极流向负极。

在电源的内部，电荷的实际流动情况与电源的种类有关。在发电机里，那就是自由电子从正极流向负极；在电池里，那就是正离子和负离子分别向两极流动。但在习惯上，不管其内部实际情况怎样，总把它说成是正电荷从负极流向正极，或者说成是电流从负极流向正极。

在外电路上，电流从高电势的正极流向低电势的负极，也就是正电荷顺着电场的方向移动；此时，电场力作正功，电势能转换成别种形式的能（例如导体的内能）。在内电路上，电流从低电势的负极流向高电势的正极，也就是正电荷逆着电场的方向移动；此时，电场力作负功，别种形式的能转换成电势能。所以我们可以说：电源是把别种形式的能转换成电能的装置。

电池是把化学能转换成电能的装置。 发电机是把机械能转换成电能的装置。 此外还有把光能转换成电能的光电池，把物质内能转换成电能的热电偶等等。

2. 电动势 我们已知，电源可以看做是把正电荷从负极搬运到正极的装置（或把负电荷从正极搬运到负极的装置），也可以看做是把别种形式的能转换成电能的装置。但是，电源的这种性能是怎样发挥作用的呢？这种性能的强弱是用什么来量度的呢？这就是我们现在所要讨论的问题。

在一切电源里，都存在着一种抵抗电荷间相互作用的力。电荷间相互作用的力叫做静电力；抵抗电荷间相互作用的力称作为

电源力, 电源力是非静电力。在不同种类的电源里, 电源力的性质和起因都不同。例如在电池里, 这种非静电力就叫做化学力, 起因于金属和酸溶液之间的化学反应。

图 2·32 所示的是一个电源示意图。A 和 B 是电源的两个极, 开始时它们都是中性的。由于电源力的作用, 正电荷从 B 极脱出, 移至 A 极(或说负电荷从 A 极脱出, 移至 B 极), 使两极分别带等量的异种电荷, 从而在电源内部建立了电场。这样建立起来的电场阻碍电荷继续迁移。

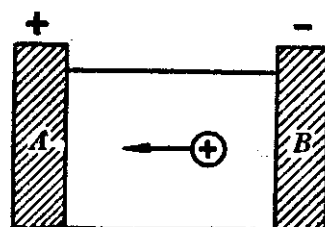


图 2·32 电源示意图

但在两极之间的电势差达到一定程度之前, 由于电源力大于电场力, 所以正电荷要继续从 B 极迁向 A 极。直到两极间的电势差达到一定的限值 \mathcal{E} 时, 电源力和电场力平衡, 电荷才停止定向迁移。这时两极所带电荷的电量和两极间的电势差都不再增加。

电源两极间电势差的限值 \mathcal{E} 就叫做电源的电动势。

电动势的大小单独为电源自身的条件所决定, 与电源以外的电路情况无关。不同结构的电源一般具有不同大小的电动势; 一定的电源具有一定的电动势。电源的电动势可以用来表示电源具有把正电荷从负极移向正极的性能。

在电源内部, 电荷移动的过程就是电源力作功的过程。在这个过程中, 电源的能(如化学能、机械能、光能等)转换成电势能; 转换能量的多少就等于电源力所作的功。把正电荷 q 从电源的负极搬运到正极, 电势能的增量

$$W = q\mathcal{E}.$$

这就是说, 在电荷 q 从负极迁移到正极的过程中, 有大小等于 $q\mathcal{E}$ 的别种形式的能转换成电势能, 也就是说, 电源力作了 $q\mathcal{E}$ 的功。把上面的等式变成 $\mathcal{E} = \frac{W}{q}$, 我们就可以说: 电源的电动势等于电源力在迁移电荷时所作的功跟被迁移的电量的比值。

电源的电动势还可以用来表示电源具有把别种形式的能转换成电能的性能。

3. 路端电压 只有在外电路没有接通时,即断路时,电场力和电源力才能处于平衡状态,电源两极间的电势差才能达到它的最大限值 \mathcal{E} 。所以我们说:在外电路断开时,电源两极间的电势差等于电源的电动势。

如果用导线把外电路接通,使整个电路成为闭合电路,那么正电荷就要从电源的正极经过外电路流向负极,形成电流。此时,电源两极所带电荷的电量要比断路时少一些,因而两极间的电势差也不再等于电动势 \mathcal{E} ,而是减小到另一数值 V 。电势差的减小就是表示电场的削弱,也就是电场力不再与电源力相平衡。于是,电源内部重新出现了正电荷从负极向正极迁移的现象。

在外电路上,电场力对电荷的迁移起推动作用,两极间电势差越小电流强度也越小;在内电路上,电场力对电荷的迁移起阻碍作用,两极间电势差越小电流强度反而越大。在外电路开始接通的那一时刻,两极间电势差最大,等于电动势 \mathcal{E} ,此时外电路上的电流强度最大,内电路上的电流强度为零。这是一个不稳定的状态。随着两极间电势差的减小,外电路上的电流强度逐渐减小,内电路上的电流强度逐渐增大。最后,等到两极间电势差减小到一定的大小 V 时,内外电路上的电流强度相等,这时才算建立了稳恒状态。所以我们说:在闭合电路里有稳恒电流存在时,电源两极间的电势差总小于电源的电动势。

从接通电路到建立稳恒状态,所经历的时间极短,完全可以看做是瞬时变化。如果我们用伏特计和外电路并联,接在电源的两极之间,只能观察到稳恒状态的极间电势差 V ,不能观察到从 \mathcal{E} 减小到 V 的迅速变化过程。

在闭合电路里,电源两极间的电势差又叫做路端电压(也叫做端电压),它的意思就是:从外电路的一端到另一端的电压。

严格地说,电源的电动势只能用静电计来测量,而不能用伏特计来测量.当电源的两极和静电计连接时,外电路并未接通,所以测得的电势差等于电动势(断路时的端电压等于电源的电动势).当电源的两极和伏特计连接时,不管有没有别的导体和伏特计并联,伏特计本身就已经成为一个接通了的外电路,所以测得的路端电压不等于电源的电动势,而是比电动势来得小一些.

在实际应用中,我们常用电阻很大的伏特计来测量电源的电动势(测得的结果当然只是近似的正确),其理由将在下一节里加以讨论.

§ 2·7 有关全电路的讨论

所谓全电路,是指电流通过的整个闭合电路而言,它包括电源、导线以及与电源两极相连接的各种用电器.

在全电路上,电源所起的作用是维持电流.它把别种形式的能(如化学能、机械能等)转换成电能.

电源以外的全部电路叫做外电路.在外电路上,一般地说,电能可以转换成各种形式的能(如物质内能、化学能、机械能等).现在我们所讨论的是最简单的电路,即在这种电路上电能只能转换成物质的内能,而不能转换成其他形式的能.这种简单的外电路我们叫它做单纯的电阻电路.在这种简单的电路上,只包含有电灯、电炉等发光发热的用电器,而不包含电动机、电解池等比较复杂的用电器(这些用电器以后还要讨论).

1. 全电路的欧姆定律 一切导体(固体导体或液体导体)都有电阻.外电路是由导体组成的,它的总电阻称为**外电阻**.内电路也是由导体组成的,它的总电阻称为**内电阻**.

图 2·33 表示一个由任一种电源组成的、简单的闭合电路. R 为外电阻, r 为内电阻, U_1 为电源正极的电势, U_2 为电源负极的电势.两极间的电势差为

$$V = U_1 - U_2.$$

欧姆定律指出,在电流通过有电阻的导体时,电势总是要降落的,

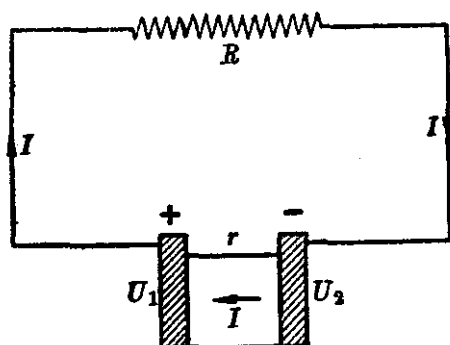


图 2·33 闭合电路图

的,也就是说电势总要沿着电流的方向逐渐降低.假设通过闭合电路的电流强度为 I ,那么外电路上的电势降落等于 IR ,内电路上的电势降落等于 Ir .

外电路的情况比较简单,只有电阻而没有电源,电势只有降落而没有上升.电源的两极就是外电路的两个端点,正极的电势 U_1 经过降落成为负极的电势 U_2 ,所以

$$U_1 - IR = U_2,$$

即

$$U_1 - U_2 = IR;$$

又知

$$V = U_1 - U_2,$$

故

$$V = IR.$$

这就是说,电源两极间的电势差等于外电路上的电势降落.

内电路的情况比较复杂,除了电阻之外还有电源力存在.由于电阻的作用,电势要降落一个数值 Ir ;由于电源力的作用,电势要上升一个数值 \mathcal{E} (即电动势).这就是说,在电源内部,从负极到正极,电势既有降落又有上升.负极的电势 U_2 经过降落和上升成为正极的电势 U_1 ,所以

$$U_2 - Ir + \mathcal{E} = U_1,$$

即

$$\mathcal{E} = (U_1 - U_2) + Ir,$$

或

$$V = \mathcal{E} - Ir.$$

这就是說，电源两极間的电势差等于电源的电动势减去内电路上的电势降落。

給定电源的电动势 \mathcal{E} 是恒定的。电源的内电阻 r ，在温度变化不大的情况下，也可以认为接近恒定。但电源的极間电势差（即路端电压） V 却并不恒定，它与电路上的电流强度 I 有关。电流强度 I 越小，路端电压 V 越接近于电源的电动势 \mathcal{E} 。当电流强度 $I=0$ ，即当外电路断开时，路端电压 V 就等于电动势 \mathcal{E} 。

把上面的两个等式 $V=IR$ 和 $V=\mathcal{E}-Ir$ 合并在一起，消去 V ，就得到

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}.$$

这一等式的形式和欧姆定律公式相似，叫做**全电路欧姆定律**，它表示：閉合电路里的电流强度跟电源的电动势成正比，跟全电路上的总电阻成反比。

在电源的电动势 \mathcal{E} 和内电阻 r 恒定的情况下，外电阻 R 越大，电流强度 I 越小；反之，外电阻 R 越小，电流强度 I 越大。在外电路断开时，电流强度 $I=0$ ，外电阻 R 可以认为等于无限大。在外电阻小到可以认为等于零时，电流强度 I 接近等于 \mathcal{E}/r 。这种情况叫做**捷路**，或叫**短路**； \mathcal{E}/r 叫做**捷路电流强度**，或叫**短路电流强度**。

捷路电流强度不仅与电源的电动势有关，还与内电阻有关。有些电源的内电阻比较大（例如干电池），故捷路时的电流强度不很大，所以还不至于燒坏电源。有些电源的内电阻很小（例如蓄电池），捷路时的电流强度就常常大到足以燒坏电源的内部结构。在用强大发电机作为电源的电力电路或照明电路里，由于电动势相当大，捷路时的电流强度很大，不但有燒毀发电机的危險，还可能引起火灾事故。一般地說，捷路是有害的，应当防止。

例 6. 用两个各等于 2 欧姆的电阻和一个电源串联，測得电

流强度为 1 安培。再用这两个电阻和电源并联，测得干路电流强度为 3 安培。求电源的电动势和内电阻。

【解】当两个电阻和电源串联时，外电路上的总电阻

$$R = 2 + 2 = 4 \text{ 欧姆,}$$

根据全电路欧姆定律公式，得出方程

$$1 = \frac{\mathcal{E}}{4 + r},$$

即

$$\mathcal{E} = 4 + r. \quad (1)$$

当两个电阻和电源并联时，外电路上总电阻

$$R = \frac{1}{2} \times 2 = 1 \text{ 欧姆,}$$

根据全电路欧姆定律公式，得出方程

$$3 = \frac{\mathcal{E}}{1 + r},$$

即

$$\mathcal{E} = 3 + 3r. \quad (2)$$

解方程(1)和(2)，求得电源的内电阻

$$r = 0.5 \text{ 欧姆;}$$

电源的电动势

$$\mathcal{E} = 4.5 \text{ 伏特.}$$

例 7. 电源的电动势 $\mathcal{E} = 8$ 伏特，内电阻 $r = 1$ 欧姆；外电路上有三个电阻，一个 2 欧姆的和 3 欧姆的并联，再跟一个 1.8 欧姆的串联，如图 2·34 所示。求：

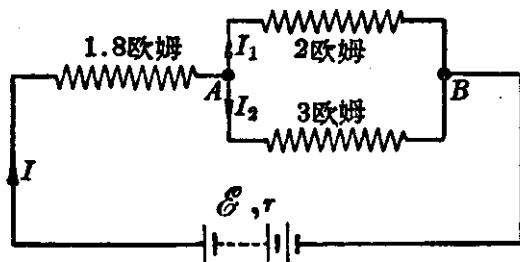


图 2·34 例 7 附图

- (1) 干路电流强度 I ; (2) 分路电流强度 I_1 和 I_2 ;
 (3) 路端电压 V ; (4) 并联组两端的电势差 V' ;
 (5) 电源内部的电势降落 V'' .

【解】 (1) 为了便于应用全电路欧姆定律公式来求干路电流 I , 需要先求外电路的总电阻.

并联组 AB 的总电导

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} = \frac{5}{6},$$

总电阻

$$R' = \frac{6}{5} = 1.2 \text{ 欧姆}.$$

整个外电路的总电阻

$$R = R' + 1.8 = 1.2 + 1.8 = 3 \text{ 欧姆}.$$

根据全电路欧姆定律公式, 求得干路电流强度

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r} = \frac{8}{3+1} = 2 \text{ 安培}.$$

(2) 在 AB 这部分并联电路上,

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 = IR'.$$

代入数值, 求得

$$I_1 = \frac{IR'}{R_1} = \frac{2 \times 1.2}{2} = 1.2 \text{ 安培};$$

$$I_2 = \frac{IR'}{R_2} = \frac{2 \times 1.2}{3} = 0.8 \text{ 安培}.$$

(3) 外电路的路端电压 (即电源两极间电势差)

$$V = IR = 2 \times 3 = 6 \text{ 伏特}.$$

(4) A 、 B 间的电势差 (即 AB 这部分电路上的电压)

$$V' = IR' = 2 \times 1.2 = 2.4 \text{ 伏特}.$$

(5) 电源内部的电势降落 (即内电路上的电势降落)

$$V'' = Ir = 2 \times 1 = 2 \text{ 伏特}.$$

想一想: 从这题所得的数据中, 路端电压、电源内部的电势降落之和跟电源的电动势有什么关系?

习 题 2·7(1)

1. 电源的电动势为 1.5 伏特, 外电路上的总电阻为 3.5 欧姆, 用安培计测得电流强度为 0.4 安培. 求电源的内电阻.

2. 电源的内电阻为 0.5 欧姆, 外电阻为 2.5 欧姆, 用伏特计测得路端电压为 2.5 伏特. 求电源的电动势.

3. 电池的内电阻是 0.2 欧姆, 外电路上的电势降落是 1.8 伏特, 电路里的电流强度是 0.5 安培. 求电池的电动势和外电阻.

4. 把一个滑动变阻器和一个安培计串联在电池的两极上, 并把一个伏特计和它们并联. 当变阻器的滑动铜片在某一位置时, 安培计的读数是 0.2 安培, 伏特计的读数是 1.8 伏特. 当滑动铜片移到另一位置时, 安培计和伏特计的读数分别是 0.4 安培和 1.6 伏特. 求电池的电动势和内电阻.

5. 铅蓄电池的电动势是 2 伏特, 内电阻是 0.04 欧姆, 用它来作小电灯的电源. 如果连接蓄电池和小灯泡的铜线共长 4 米, 横截面积是 0.5 毫米², 路端电压是 1.98 伏特, 那么小灯泡的电阻应该是多少欧姆?

6. 电源的电动势是 120 伏特, 内电阻是 0.75 欧姆. 如果用它使一盏“45 伏特; 540 瓦特”的弧光灯正常发光, 要在电路中串联多大的电阻? 如果用横截面为 1 毫米²的康铜丝来绕这个电阻圈, 康铜丝的长度应该是多少米?

7. 电池 A 的电动势为 2 伏特, 内电阻为 1 欧姆; 电池 B 的电动势为 2.5 伏特, 内电阻为 2 欧姆. 先后用 A 和 B 作为电源使电流通过同一个导线圈, 结果两次所得的电流强度正好相等. 求导线圈的电阻和电流强度.

8. 某一电源的捷路电流强度为 1.2 安培; 外电路的电阻为 10 欧姆时, 电流强度为 0.2 安培. 求电源的电动势和内电阻.

9. 某一电源和 3 欧姆的电阻连接时, 路端电压为 6 伏特; 和 5 欧姆的电阻连接时, 路端电压为 8 伏特. 求电源的内电阻和电动势.

10. 电源的电动势为 96 伏特, 内电阻为 5 欧姆. 断路时的路端电压是多少伏特? 捷路时的路端电压是多少伏特? 外电阻等于多大时路端电压等于电动势的一半? 为什么用电阻很大的伏特计单独和电源的两极连接时, 它的读数近似等于电动势? 如果用一个电阻很小的导体和伏特计并联, 它的读数将发生怎样的变化?

2. 全电路上的能量转换 当闭合电路里有稳恒电流 I 通过时, 如果路端电压为 V , 那么在外电路上的电流的功 (参阅 § 2·4)

$$A = VIt.$$

这說明,在外电路上,有等于 VIt 的这部分电能轉換成別种形式的能.

如果外电路是單純的电阻电路,那么路端电压 V 等于外电路上的电势降落 IR , 电流的功

$$A = I^2Rt.$$

这部分等于 I^2Rt 的电能全部轉換为組成外电路的物质的內能,并使它发热.

在內电路上,电势降落等于 Ir . 根据同样的理由,有等于 I^2rt 的一部分电能轉換为組成內电路的物质的內能,使它发热.

在全电路上,电能的总消耗(即轉換成別种形式能的那部分电能)

$$W = VIt + I^2rt.$$

如果外电路上只有热效应,上式可写作

$$W = I^2Rt + I^2rt.$$

在电源內部,电源力的功

$$A = \mathcal{E}q = \mathcal{E}It.$$

这就是說,有等于 $\mathcal{E}It$ 的这部分电源能轉換成电能.

在穩恒状态下,电源两极間的电势差恒定,在电源中轉換成的电能应当等于在电路上消耗的电能. 所以

$$\mathcal{E}It = VIt + I^2rt.$$

上式各項中的 It 是在电路上流动的电荷的电量.

用电量 It 除上式中各項,得出

$$\mathcal{E} = V + Ir,$$

式中路端电压 V 等于单位电量的电荷在通过外电路时所消耗的电能,內电路上的电势降落 Ir 等于单位电量的电荷通过內电路时所消耗的电能,兩項之和 $V + Ir$ 等于单位电量的电荷通过全电路一周所消耗的电能,因此我們可以看出: 电源的电动势 \mathcal{E} 等于維持单

位电量的电荷通过全电路一周电源所供給的能量。

用时间 t 去除上式中各項，得出

$$\mathcal{E}I = VI + I^2r,$$

式中 VI 为外电路上的电功率， I^2r 为内电路上的电功率， $\mathcal{E}I$ 为电源力的功率，因此我們还可以說：电源的电动势 \mathcal{E} 等于維持单位电流通过全电路的电源功率。

3. 电源組 在实际应用中，我們經常把好几个电源連接成組使用。电源組基本上有两种：串联組和并联組。

电源的串联是把一个电源的負极和第二个电源的正极相連接，再把第二个电源的負极和第三个电源的正极相連接，这样連接下去，直到最后一个电源的正极为止。其中最初一个电源的正极

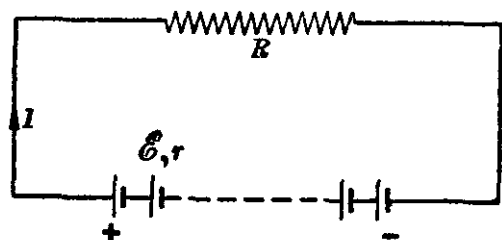


图 2·35 串联电池組

就是电源組的正极，最后一个电源的負极就是电源組的負极。图 2·35 表示一个用串联电池組作为电源的全电路。

如果串联組里各个电源的电动势都是 \mathcal{E} ，并且内电阻都是 r ，那么整个串联組的电动势和内电阻又各等于多大呢？

首先必須了解，相邻两电源的正負极是用导綫連接的，在不考虑导綫电阻的情况下，它們的电势應該相等。其次还应该了解，在外电路断开的情况下，每个电源的正极电势总比它的負极电势高一个 \mathcal{E} 。这样，从图中最右一个电源的負极算起，向左每經過一个电源，电势就高一个 \mathcal{E} ，經過 n 个电源，电势一共高起 n 个 \mathcal{E} 。那就是說，在断路时，串联組的极間电势差等于 $n\mathcal{E}$ ，或等于各个电源电动势的和。也就是說：串联电源組的电动势等于組内各个电源的电动势之和。

在将图示的电路接通以后，这个电源組就在閉合电路中維持稳恒电流，它的强度

$$I = \frac{n\mathcal{E}}{R + nr}$$

式中 nr 就是串联组的内电阻，也就是说：串联电源组的内电阻等于组内各个电源的内电阻之和。

电源的并联是把所有电源的正极连接在一起成为电源组的正极，而把所有电源的负极连接在一起成为电源组的负极。图 2·36 表示一个用并联电池组作为电源的全电路。

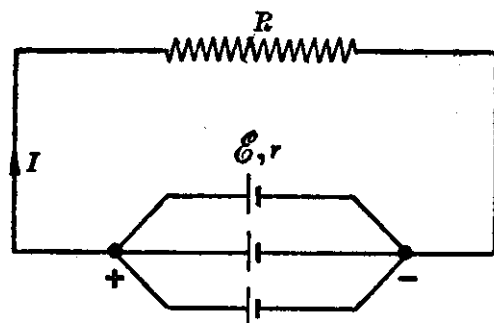


图 2·36 并联电池组

在并联组里，所有电源的正极电势都相等，所有电源的负极电势也都相等。如果并联组里各个电源的电动势都是 \mathcal{E} ，内电阻都是 r ，那

么在外电路断开的情况下，并联组的极间电势差等于 \mathcal{E} 。也就是说： n 个相同的电源并联时，并联组的电动势等于组内任意一个电源的电动势。

在外电路接通以后，闭合电路里的稳恒电流强度

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + \frac{r}{n}}$$

式中 r/n 就是并联组的内电阻，也就是说： n 个相同的电源并联时，并联组的内电阻等于组内任意一个电源内电阻的 $1/n$ 。

在什么情况下需要把电源串联起来使用，在什么情况下需要把电源并联起来使用呢？

如果需要获得较大的路端电压，那就应当使用串联电源组而不应当使用并联组。

如果需要获得较大的电流强度，那就要根据电路的具体情况来决定电源的串联或并联。对比上面两个等式就可以看出：在外电阻 R 比内电阻 r 大很多的情况下，宜用串联组；在外电阻 R 比内电阻 r 小很多的情况下，宜用并联组。在大多数的情况下，外电

阻总比内电阻大,所以使用串联组的时候也就比较多。

当电源串联时,全部电流都要通过每一个电源;当电源并联时,通过每一电源的电流只是总电流的一部分。在有些电源里(象蓄电池),通过的电流不宜过强,否则会缩短它的使用寿命,甚至会损坏电源结构。所以在需要较强的总电流而通过每一个电源的电流又不宜过强时,应当使用并联组。

如果把电动势不同的电源并联在一起,电路的情况就要复杂一些,我们将在下一节里对它进行讨论。

习 题 2·7(2)

1. 干电池的电动势为 1.5 伏特,内电阻为 2 欧姆。

(1) 用一个这样的干电池作为电源,向电阻为 28 欧姆的线圈供电,问电流强度和端电压各等于多少?

(2) 用五个这样的干电池串联起来作为电源,向同样的线圈供电,电流强度和端电压又各等于多少?

(3) 用五个这样的干电池并联起来作为电源,向同样的线圈供电,干路电流强度和端电压应该各等于多少?通过每一电池的电流又是多大?

2. 按照上题的三种情况,分别作出线路图来(参看图 2·35 和图 2·36)。

3. 丹聂尔电池的电动势为 1.08 伏特,内电阻为 3 欧姆。外电路上的电阻为 0.4 欧姆。

(1) 用八个这样的电池串联起来向外电路供电,电流强度和端电压各等于多少?

(2) 用八个这样的电池并联起来向外电路供电,电流强度和端电压又各等于多少?

4. 在上题串联和并联的两种情况下,各供电 10 分钟。求每个电池所放出的热量。

5. 电池的电动势为 1.1 伏特,内电阻为 2.5 欧姆。现在有四个这样的电池,当外电阻为 6 欧姆时,把它们串联起来得到的电流强度大呢,还是并联起来得到的电流强度大?各等于多少?

6. 外电路的电阻为 5 欧姆。现在有两个电池,一个是电动势为 1.5 伏特、内电阻为 3 欧姆的干电池,另一个是电动势为 0.8 伏特、内电阻为 0.2 欧

姆的氧化銅電池。用哪一個電池供电得到的電流強度較大？各等於多少？

7. 如果把上題里的兩個電池串聯起來供电，電流強度應該等於多少？

8. 用四個干電池（電動勢各等於 1.5 伏特）串聯在一起向電阻為 10 歐姆的導線圈供电，測得的電流強度為 0.15 安培。已知在這四個電池中，有三個電池的內電阻各等於 0.5 歐姆，求另一個電池的內電阻。如果不用這個電池，電流強度是增加呢還是減少？相差多少？

9. 把電動勢都是 1.5 伏特、內電阻都是 0.8 歐姆的 10 個電池分成兩個串聯組，每組包含 5 個電池，然後再把這兩個串聯組并聯起來成為所謂混聯組。用這個電池組向電阻為 23 歐姆的外電路供电，求電流強度和路端電壓，並畫一個電路圖。

4. 電路上任何兩點間的電勢差 在實際上所遇到的電路，往往比較複雜。它可能包含許多電阻和若干個性質、大小和接法都不同的電動勢。在應用歐姆定律處理這一類問題時，常常需要按照具體情況把整個電路分成若干部分，逐一分析電勢變化的情況，並用方程式把它們表示出來。這樣列出的方程式就是歐姆定律在各個部分電路上的應用。

在分析電路上電勢變化的情況時，必須掌握下列各點：

(1) 電流每通過一個電阻（外電阻或內電阻），電勢總有一個降落，它的大小等於 IR 。電流通過電阻時，電能轉換成物質內能，並使它發熱。

(2) 電流每正向通過一個電源（這時電流從電源的負極流入、正極流出），電勢總有一個上升，它的大小等於電源電動勢 \mathcal{E} 。這時，別種形式的能轉換成電能。

(3) 電流每反向通過一個電源（如對蓄電池充電時，電流從它的正極流入、負極流出），或通過電動機、電解池等具有反電動勢（和電流方向相反的電動勢）的電器時，電勢總有一個下降，它的大小等於電源電動勢或電器的反電動勢。這時，電能轉換成別種形式的能（如化學能、機械能等）。

上述分析方法的具體應用，可用下面的例題來說明。

例 8. 图 2·37 表示一个对蓄电池充电的电路。蓄电池的电动势 $\mathcal{E}_1=6$ 伏特, 内电阻 $r_1=1$ 欧姆。电源的电动势 $\mathcal{E}_2=12$ 伏特, 内电阻 $r_2=1$ 欧姆。 R 是一个 10 欧姆的电阻。求下列各项:

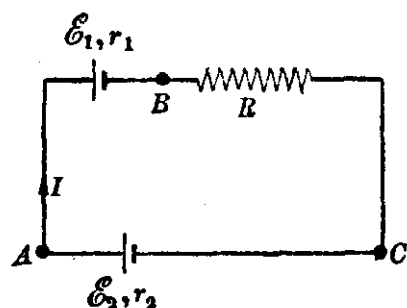


图 2·37 例 8 附图

- (1) 电流强度 I ;
- (2) A 、 B 两点间的电势差 V_{AB} ;
- (3) B 、 C 两点间的电势差 V_{BC} ;
- (4) A 、 C 两点间的电势差 V_{AC} ;
- (5) 电源的功率以及能量转换情况的分析。

【解】 首先必须了解, 这是一个特殊的串联电路, 被充电的蓄电池和电源反接。由于 $\mathcal{E}_2 > \mathcal{E}_1$, 所以电流的方向显然是 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 。

从图上还可以看出, 电流从蓄电池的正极流入、负极流出, A 点的电势 U_A 经过一个降落 \mathcal{E}_1 和一个降落 $I r_1$ 成为 B 点的电势 U_B , 即

$$U_A - \mathcal{E}_1 - I r_1 = U_B,$$

则 A 、 B 两点间的电势差

$$V_{AB} = U_A - U_B = \mathcal{E}_1 + I r_1. \quad (1)$$

在 B 、 C 两点之间, 只有电阻而没有电动势, B 点的电势 U_B 经过一个降落 IR 成为 C 点的电势 U_C , 即

$$U_B - IR = U_C,$$

则 B 、 C 两点间的电势差

$$V_{BC} = U_B - U_C = IR. \quad (2)$$

从 C 到 A , 电流正向通过电源, C 点的电势 U_C 经过一个降落 $I r_2$ 和一个上升 \mathcal{E}_2 成为 A 点的电势 U_A , 即

$$U_C + \mathcal{E}_2 - I r_2 = U_A,$$

则 A 、 C 两点间的电势差

$$V_{AC} = U_A - U_C = \mathcal{E}_2 - I r_2. \quad (3)$$

在上面三个独立方程中,共有四个未知量 I 、 V_{AB} 、 V_{BC} 和 V_{AC} , 故还须补充一个独立方程.

从 ABC 这部分电路可以看出,

$$V_{AC} = V_{AB} + V_{BC}. \quad (4)$$

解以上四个方程,得出

$$\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1 = I(R + r_1 + r_2),$$

代入已知数值,求得电流强度

$$I = \frac{\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1}{R + r_1 + r_2} = \frac{12 - 6}{10 + 1 + 1} = 0.5 \text{ 安培}.$$

再把 I 值分别代入方程(1),(2)和(3),求得

$$V_{AB} = \mathcal{E}_1 + Ir_1 = 6 + 0.5 = 6.5 \text{ 伏特};$$

$$V_{BC} = IR = 0.5 \times 10 = 5 \text{ 伏特};$$

$$V_{AC} = \mathcal{E}_2 - Ir_2 = 12 - 0.5 = 11.5 \text{ 伏特}.$$

电源的功率

$$N = I\mathcal{E}_2 = 0.5 \times 12 = 6 \text{ 瓦特}.$$

其中转换成物质内能而发热的那部分功率

$$N_1 = I^2R + I^2r_1 + I^2r_2 = 3 \text{ 瓦特};$$

在蓄电池中转换成别种能(化学能)的那部分功率

$$N_2 = I\mathcal{E}_1 = 0.5 \times 6 = 3 \text{ 瓦特}.$$

例 9. 两个不同的电池和三个不同的电阻组成如图 2·38 所示的闭合电路. 已知:

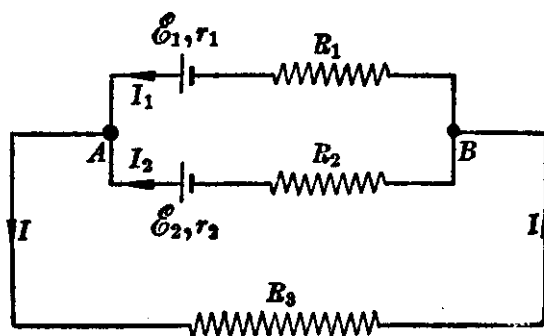


图 2·38 例 9 附图

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_1 &= 20 \text{ 伏特}, & \mathcal{E}_2 &= 30 \text{ 伏特}, \\ R_1 &= 5 \text{ 欧姆}, & R_2 &= 10 \text{ 欧姆}, \\ r_1 &= 4 \text{ 欧姆}, & r_2 &= 2 \text{ 欧姆}, \\ R_3 &= 12 \text{ 欧姆}. \end{aligned}$$

求干路的电流强度 I 和两个分路的电流强度 I_1 和 I_2 。

【解】 假定电流的方向如图上的箭头所示。把全电路分成三个部分来考虑，它们的端点都是 A 点和 B 点。

就图最上面的一部分电路来看，

$$\begin{aligned} U_B - I_1 R_1 - I_1 r_1 + \mathcal{E}_1 &= U_A, \\ V_{AB} = U_A - U_B &= \mathcal{E}_1 - I_1 (R_1 + r_1). \end{aligned} \quad (1)$$

就中间的一部分电路来看，

$$\begin{aligned} U_B - I_2 R_2 - I_2 r_2 + \mathcal{E}_2 &= U_A, \\ V_{AB} = U_A - U_B &= \mathcal{E}_2 - I_2 (R_2 + r_2). \end{aligned} \quad (2)$$

就图最下面的一部分电路来看，

$$\begin{aligned} U_A - I R_3 &= U_B, \\ V_{AB} &= I R_3. \end{aligned} \quad (3)$$

就全电路来看，

$$I = I_1 + I_2. \quad (4)$$

把已知数值代入方程(1)、(2)、(3)，得出

$$\begin{aligned} V_{AB} &= 20 - 9I_1, \\ V_{AB} &= 30 - 12I_2, \\ V_{AB} &= 12I; \end{aligned}$$

并解得

$$I_1 = (20 - 12I) / 9, \quad (5)$$

$$I_2 = (30 - 12I) / 12. \quad (6)$$

代入方程(4)，得出

$$\frac{20 - 12I}{9} + \frac{30 - 12I}{12} = I,$$

并解得

$$I = \frac{17}{12} \text{ 安培.}$$

把 I 的数值代入(5)和(6), 求得

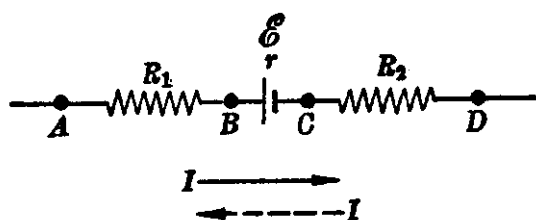
$$I_1 = \frac{4}{12} \text{ 安培,}$$

$$I_2 = \frac{13}{12} \text{ 安培.}$$

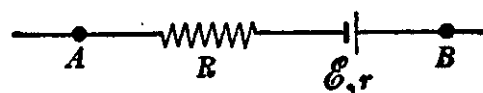
习 题 2·7(3)

1. 在一个部分电路里串联着两个电阻器和一个蓄电池组(如附图所示). 已知 $R_1=2$ 欧姆, $R_2=3$ 欧姆, $\mathcal{E}=6$ 伏特, $r=1$ 欧姆. 如果有电流强度 $I=0.5$ 安培的电流从 A 点流入、由 D 点流出, 问 A 、 B 两点间的电势差等于多少伏特? B 、 C 两点间的电势差等于多少伏特? A 、 D 两点间的电势差等于多少伏特?

2. 如果上题里的电流从 D 点流入、 A 点流出, 问 B 、 C 两点间和 A 、 D 两点间的电势差又各等于多少伏特?



(第 1 题)



(第 3 题)

3. 在一个部分电路 AB 里, 串联着一个 $R=9$ 欧姆的电阻器和一个电动势 $\mathcal{E}=2$ 伏特、内电阻 $r=1$ 欧姆的电池, 如附图所示. 如果有电流强度 $I=1$ 安培的电流从 A 点流入、由 B 点流出这段电路, 路端电压 V_{AB} 等于多大? 如果同样大小的电流从 B 点流入、由 A 点流出这段电路, 路端电压 V_{AB} 又应该等于多大?

4. 蓄电池组的电动势是 6 伏特, 内电阻是 0.4 欧姆, 充电时的电流强度是 2.5 安培(电流从蓄电池的正极流入、负极流出), 问端电压应该为多大?

5. 在上题中蓄电池所消耗的电功率是多少瓦特? 有多大一部分电功率转换成物质内能而发热? 多大一部分转换成蓄电池的化学能?

6. 当某一蓄电池在放出 4 安培的电流时 (电流从正极流出), 它的端电压为 3.85 伏特; 当以 4 安培的电流对它充电时 (电流从正极流入), 它的端电压为 4.25 伏特. 求蓄电池的电动势和内电阻.

7. 有一个蓄电池, 它的电动势为 2.1 伏特, 内电阻为 0.2 欧姆. 另外一个干电池, 它的电动势为 1.5 伏特, 内电阻为 1.8 欧姆. 如果把它们串联起来向电阻为 2 欧姆的导线圈供电, 电流强度应是多大? 如果在串联时把干电池的正负极接反了, 电流强度又应是多大?

8. 把上题里的两个电池并联起来向电阻为 20 欧姆的导线圈供电, 问通过线圈的电流强度等于多大? 通过各个电池的电流强度又是多大? 如果用这个并联电池组向电阻为 0.2 欧姆的导线圈供电, 通过线圈和各个电池的电流强度各等于多少?

[提示: 参看例 9 中所列出的四个方程, 然后求解. 所得结果中的负号表示电流反向通过电池.]

§ 2.8 液体导电和电解

1. 液体导电 并不是所有的液体都是导电的. 图 2.39 表示一套简单的实验装置: A 和 K 是放在一个玻璃容器里的两块碳板, B 是一组电源, L 是一个小灯泡 (或一个安培计), 它们串联在一起.

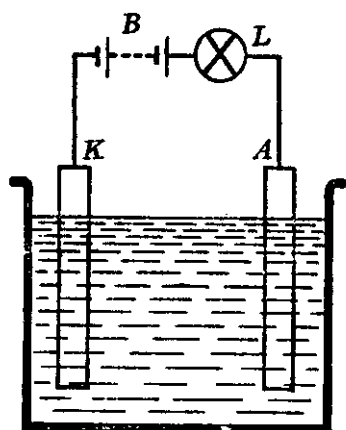


图 2.39 液体导电
实验装置

一起. 实验时, 先向容器内注入蒸馏水, 这时我们看不到电路上有电流通过的迹象, 这说明纯水是不导电的. 再用糖溶液代替蒸馏水, 我们还是看不到电路上有电流通过的表示, 这说明糖溶液也是不导电的. 如果用盐溶液来进行这个实验, 那么就能发现电路上有电流通过 (小灯泡发出了亮光或安培计指针有了偏移), 这说明盐溶液是导电的.

用各种不同的液体进行实验, 结果发现: 所有单纯的溶剂都不导电, 所有酸、碱、盐的稀溶液都能很好地导电, 熔融了的盐类也是导电体. 从化学研究知道: 凡是能够导电的液体都是具有离子的

液体,因此我們可以得出这样一个結論:只有具有离子的液体才能导电。

能够导电的液体称为**电解液**。在电解液里,經常有一定百分比的正离子和負离子存在。正离子就是失去了一个或几个电子的原子或原子团;負离子就是获得了一个或几个額外电子的原子或原子团。拿食盐(NaCl)溶液来說吧,正离子就是失去了一个电子的鈉原子,叫做鈉离子(Na^+);負离子就是获得了一个額外电子的氯原子,叫做氯离子(Cl^-)。中性分子分解为正离子和負离子的現象叫做**离解**,或叫**电离**。一切酸、碱、盐的分子,在水溶液里都要离解。金属离子和氫离子都帶正电荷,都是正离子;一切酸根离子和氫氧根离子都帶負电荷,都是負离子。

溶液里的离子,和分子一样,經常在作无規則的热运动。在沒有外电場的时候,溶液里的正、負离子只作无規則的热运动,而不作有規則的定向运动。在和电源接通后,碳板 A (叫做**阳极板**) 帶了正电荷,碳板 K (叫做**阴极板**) 帶了負电荷,这样就在溶液里建立起一个电場,它的方向从 A 极板指向 K 极板(如图 2.40 所示)。在这个电場的作用下,正、負离子除了作无規則的热运动之外,还要作有規則的定向运动,即正离子順着电場方向运动,負离子逆着电場方向运动。正、負离子分別向两极流动的結果,从导电的角度看来,和正电荷直接从 A 极板流向 K 极板沒有什么两样,所以我

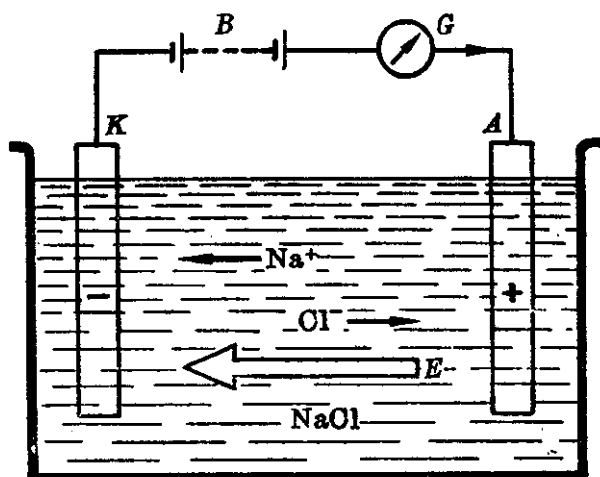


图 2.40 离子导电

們称这种現象为液体导电現象。

液体导电和固体导电在本质上是不同的。金属和碳的导电是由于自由电子在离子和分子之間作单向移动所致，离子和分子并不移动。这种导电方式叫做**电子导电**。这一类导体叫做**第一类导体**。酸、碱、盐溶液（或盐的熔液）的导电是由于正、負离子分別向两极移动所致。这种电荷和原子或原子团一起移动的导电方式叫做**离子导电**。这一类导体叫做**第二类导体**。

液体导电和固体导电所遵循的規律有相同或相似之处。例如，液体导电和固体导电都遵循欧姆定律 $I = V/R$ 。又如，第一类导体的电阻取决于导体的性质、导体的长度和导体的橫截面积等，而第二类导体的电阻則取决于液体的性质、极板間的距离和极板与液体的接触面积等。

2. 电解 在电流通过电解液的过程中，正离子移到阴极板（ K ）后，从它那里获得电子；負离子移到阳极板（ A ）后，向它那里放出电子，結果它們都变成了中性的物质（原子或原子团）。这种因为通过电流而分解化合物的反应叫做**电解**。电解化合物所用的整套設備叫做**电解池**。

图 2·41 所示的是一套电解盐酸（ HCl ）用的电解池。阳极板（ A ）和阴极板（ K ）一般是用鉑板，或用碳板組成的；电解液为稀盐酸溶液。通电后，氫离子（ H^+ ）移向阴极板（ K ），在获得电子后变成

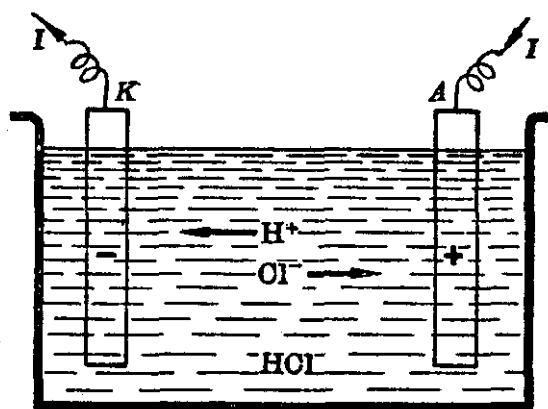
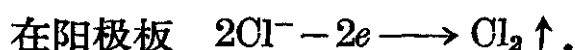
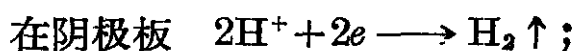


图 2·41 电解盐酸

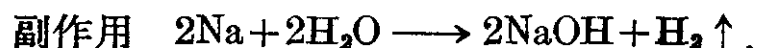
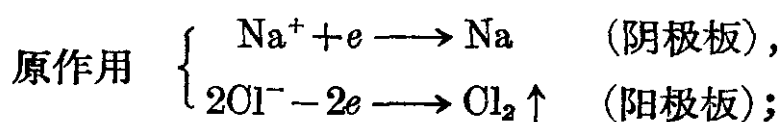
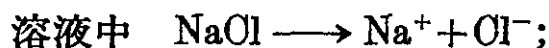
氫原子，并生成氫气泡上升到液面；氯离子(Cl^-)移向阳极板(A)，在放出电子后变成氯原子，也生成氯气泡上升到液面。这一系列的化学反应可以用下面的方程来表示：



上式中的 e 表示电子。

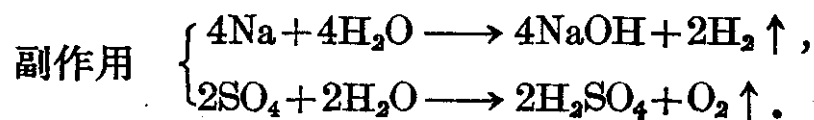
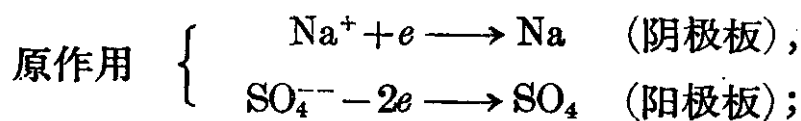
化合物經电解而析成原子或原子团的作用，叫做**电解的原作用**。由原作用析出的原子和原子团，又和极板或它周圍的化合物起化学反应而生成新的化合物，这就叫做**电解的副作用**。上述事例中生成的氫气和氯气，就是原作用的产物。至于副作用，可以用下面两个事例来说明。

例 10. 电解食盐时，只在一个极板附近起副作用。电解食盐的化学反应如下：



这就是說，电解食盐时析出的物质不是鈉和氯气，而是氫气和氯气。电解食盐的結果是失去了水和食盐，生成了氫气、氯气和氫氧化鈉。

例 11. 电解硫酸鈉时在两个极板附近都起副作用。电解时的化学反应如下：



这說明，电解硫酸鈉时析出的物质不是鈉，而是氫气和氧气。在这个过程中失去了硫酸鈉和水，生成了氫氧化鈉、硫酸、氫气和氧气。

电解池是轉变电能为化学能的装置。当有电流 I 通过电解池时，电源供給的电能是 VIt (V 为电解池两极間的电势差， t 为通电的时间)，它一部分轉换为物质內能并使电解池发热，另一部分轉换为化学能使化合物分解。在一般情况下，轉换成內能的这部分能量是比較小的一部分；根据焦耳-楞次定律，这部分能量等于 I^2Rt (R 为电解池的电阻)。轉换成化学能的这部分能量

$$W = VIt - I^2Rt.$$

将上式中各項除以 It ，得出

$$\frac{W}{It} = V - IR,$$

式中 V 为电解池两极間的电势差， IR 为电流通过电解液时的电势降落，它們的差額叫做电解池的**反电动势** \mathcal{E} ，如用公式表示，則为

$$\mathcal{E} = V - IR.$$

任何电解池都有阻碍电流通过的反电动势存在，它的大小由电解液的性质决定。因此，在电解池里，两极間的电势差总大于电势降落，即

$$V > IR.$$

否則，电流便不能通过（在只有电能和物质內能轉换的电路里， V 总是等于 IR ）。

3. 电解工业 电解在工业上的应用很广泛。在化学工业上經常用电解水的方法制取氫气和氧气，用电解食盐水的方法制取氯气和氫氧化鈉。电鑄、电镀和电冶等都是电解实际应用的例子。

电鑄和电镀 电鑄就是应用电解的方法来鑄制物品。先用蜡或其他范性材料制出物体的模型，然后在它上面涂上一层石墨（石

墨是导体)，用它来作为电解硫酸铜溶液的阴极；用铜板作为电解池中的阳极。电解时在阴极析出的铜就沉淀在模型的外表面上；通电的时间越长，铜层就越厚。等到铜层有了一定的厚度以后，挖出壳内的范性材料，并用熔融了的金属填充，这就制成了坚实的铸件。

电镀就是在某种制品上镀一层比较美观的或不容易氧化的金属。电镀时，把被镀物品当作阴极，把所镀的金属当作阳极，而把所镀金属的盐溶液作为电解液。镀金、镀银、镀铜、镀镍、镀铬时都是应用这种方法的。

电冶 用电解的方法提纯金属，叫做电冶。从矿石直接熔炼出来的铜，通常含有硫化铜等杂质，它们不宜于电气工业的应用。如果用这种不纯的铜作为阳极，用硫酸铜或硫酸的溶液作为电解液，通电后，阴极上就有纯铜析出。这样析出的纯铜叫做电解铜。

要提纯化学性质比较活泼的金属，如钠、钾、镁、铝等，可以用电解它们熔融的盐、碱或氧化物的方法。在这种电解池里，通常用碳作为电极，电解液不是溶液而是熔液。用比较强的电流通过这种熔液时，散发出的热量足以保持熔液不致凝固，从而保证了电解的持续进行。电冶铝工业所需的电流常常大到几万安培，所以制铝工厂常常设在水力发电站附近，这样可以用到比较廉价的电能。

习 题 2·8(1)

1. 产生电流的条件是什么？
2. 哪些物体是第一类导体？哪些是第二类导体？这两类导体的导电情况有些什么不同之点？
3. 什么叫电离(或离解)？什么叫电解？
4. 什么叫离子？离子在溶液中是怎样运动的？

5. 电解池是怎样构成的? 电解池里的电阻与哪些因素有关?
6. 电解池里的电势降落与极间电势差有什么区别? 为什么前者总是比后者小呢?
7. 液体导电是否遵循欧姆定律? 是否也遵循焦耳-楞次定律?
8. 电解池里的能量转换情况是怎样的? 试举例说明之.
9. 为什么我们可以说: 电解的过程就是液体导电的过程? 这两种过程能够各自单独进行吗?
10. 举例说明: 什么是电解的原作用? 什么是电解的副作用?
11. 试画出镀铜用的电解池, 并说明它的工作原理.

4. 法拉第电解定律 英国物理学家法拉第, 在 1834 年, 通过一系列的电解实验, 总结出两条定律, 叫做**法拉第电解定律**. 这两条定律, 叙述了物理现象和化学现象之间的重要联系, 奠定了电化学的基础.

第一定律 在电解时, 析出的物质质量 m 跟通过电解液的电流强度 I 和通电时间 t 成正比. 用公式表示即为

$$m = KIt,$$

式中的 K 叫做**电化当量**. 由于式中的乘积 It 等于通过电解液的电量 Q , 所以上式又可写作:

$$m = KQ.$$

因此, 法拉第电解第一定律又可以更简单地叙述为: 电解时, 析出的物质质量 m 跟通过电解液的电量 Q 成正比.

电化当量是一个视物质不同而不同的比例恒量, 它定量地表示化学变化与物理变化之间的关系. 某种物质的电化当量, 在数值上等于 1 单位电量所析出的物质. 如果质量的单位为克, 电量的单位为库仑, 则电化当量的单位为克/库仑. 在实际应用中, 电化当量的单位常用毫克/库仑. 各种物质的电化当量数值可以用电解实验来测定, 测出电流强度 I , 通电时间 t 和析出的物质质量 m , 就可算出电化当量值来. 下表所示的是几种常用物质的电化当量 K 值:

物质	原子量 A	化合价 n	电化当量 K (克/庫侖)	化学当量 A/n	普适恒量 $C=K/\frac{A}{n}$
氢	1.008	1	10.45	1.008	10.36
氧	16.000	2	82.90	8.000	10.36
氯	35.46	1	367.0	35.46	10.36
铝	27.1	3	93.00	9.03	10.36
镍	58.7	2	304.0	29.4	10.36
铜	63.6	2	329.0	31.8	10.36
银	107.9	1	1118	107.9	10.36
铅	207.1	2	1070	103.6	10.36

法拉第电解第一定律是从大量的实验结果中总结出来的，但是也很容易根据电解液导电理论来解释。我们已了解，电解的过程就是液体导电的过程。在电解液里，电流是由离子的定向流动所形成的，这些离子都带有一定电量的电荷。通过的电量越多就意味着流过的离子数越多，因而析出的物质也越多。由于流过的离子数和通过的电量成正比，析出的物质质量又和流过的离子数成正比，所以析出的物质质量就和通过的电量成正比。

上面已经讲过，不同物质的电化当量是不同的。但电化当量到底与物质的那些性质有关呢？法拉第电解第二定律解决了这个问题。

第二定律 各种物质的电化当量 K 跟它们的原子量 A 成正比，而跟它们的化合价 n 成反比。它的表示式为

$$K = C \frac{A}{n},$$

式中 C 是一个普适恒量，它的数值只与 K 的单位有关。当 K 的单位为克/庫侖时， $C = 10.36 \times 10^{-6}$ ；当 K 的单位为毫克/庫侖时， $C = 0.01036$ （见前表）。

在化学里，我们称 A/n 为化学当量，所以法拉第电解第二定律又可叙述为：各种物质的电化当量 K 和它们的化学当量 A/n 成正比。

法拉第电解第二定律同样是从大量实验结果中总结出来的，但是也不难根据离子导电的理论来加以解释。在电解液中，离子所带的电荷是一定的（相当于一个或几个电子所带的电荷），一定数目的离子只能带一定电量的电荷；或反过来说，要带一定电量的电荷就需要有一定数目的离子。一价离子所带的电量最少，相当于一个电子电荷，二价离子所带的电量相当于两个电子电荷， n 价离子所带的电量相当于 n 个电子电荷。在电解池里，如果 B 个一价离子能带1库仑的电量，那么只需要 $B/2$ 个二价离子或 B/n 个 n 价离子就能带1库仑电量了。假设析出物质的原子量为 A ，那就是说每个原子的质量为 A 个氧单位（1个氧单位 $=1.66 \times 10^{-24}$ 克；1克 $=6.023 \times 10^{23}$ 个氧单位），那么，通1库仑的电量所析出的物质质量（即电化当量）

$$K(\text{氧单位/库仑}) = \frac{B}{n} A.$$

如果 K 的单位为克/库仑，则上式变成

$$K(\text{克/库仑}) = \frac{B}{6.023 \times 10^{23}} \frac{A}{n},$$

式中的 $B/6.023 \times 10^{23}$ 就是法拉第电解第二定律公式里的普适恒量 C 。

综合法拉第电解第一定律和第二定律，得出表示式

$$m = C \left(\frac{A}{n} \right) Q.$$

这就是说：在电解池里，析出物质的质量跟通过电解池的电量和物质的化学当量成正比。

库仑计和国际安培 在电解池里析出物质的质量可以用来量度通过它的电量。作这种用途的电解池叫做库仑计。电量的库仑数

$$Q = \frac{m}{K},$$

式中 m 是析出物质的质量, K 是它的电化当量。

純銀的电化当量是 1.118 毫克/庫侖(意即通过 1 庫侖的电量能析出純銀 1.118 毫克)。如果让稳恒电流通过銀盐(如硝酸銀)溶液,經過一秒钟正好析出 1.118 毫克的純銀,那么这个稳恒电流的强度就叫做 1 国际安培。

庫侖計可以用来校准安培計。

例 12. 在一个以銀盐溶液作电解液的电解池里,通过稳恒电流 3 小时后析出純銀 66.6 克。在电解过程中,电路中安培計的讀数始終为 5.63 安培。試求这个安培計的誤差。

【解】 根据法拉第电解第一定律,

$$m = KIt,$$

已知銀的电化当量 $K = 1.118$ 毫克/庫侖,析出銀的质量 $m = 66,600$ 毫克,通电時間 $t = 3 \times 3600$ 秒,所以

$$66,600 = 1.118 \times 3 \times 3600 I,$$

解得

$$I = \frac{66,600}{1.118 \times 3 \times 3600} = 5.51 \text{ 国际安培.}$$

現用安培計的讀数为 5.63 安培,其誤差为 $5.63 - 5.51 = 0.12$ 安培,即安培計的讀数超过标准值 0.12 安培。

5. 法拉第恒量 法拉第电解定律已經告訴我們,电解时析出物质的质量为

$$m = C \left(\frac{A}{n} \right) Q,$$

那么,析出 m 克物质所需要的电量应为

$$Q = \frac{nm}{CA}.$$

化学知識指出:当物质质量的克数 m 等于它的原子量 A 时,我們就称这样多的物质为 1 个克原子量;当物质质量的克数等于它的原子量和化合价之比时,即当物质质量 $m = A/n$ 克时,我們就

称这样多的物质为 1 个克当量。

引入了克原子量和克当量的概念之后,我們可以看出:在电解池里析出 1 克原子量物质所需要的电量为

$$Q = \frac{nA}{CA} = \frac{n}{C} = \frac{n}{10.36 \times 10^{-6}} = 96,500 n \text{ 庫侖};$$

在电解池里析出 1 克当量物质所需要的电量(用 F 表示)为

$$F = 96,500 \text{ 庫侖}.$$

这个量就叫做**法拉第恒量**,是法拉第首先从实验中测得的。意思就是说:在电解池里,不管析出 1 克当量什么物质,总是需要通过 96,500 庫侖的电量;不管析出 1 克原子量什么物质,所需要的电量总是等于它的化合价乘法拉第恒量。

例如:氢、氧、铝的化合价分别为 1、2、3。在电解池里,析出 1 克原子量(即 1.008 克)的氢需要电量 96,500 庫侖,析出 1 克原子量(即 16 克)的氧需要电量 $2 \times 96,500 = 193,000$ 庫侖,析出 1 克原子量的铝(即 27.1 克铝)需要电量 $3 \times 96,500 = 289,500$ 庫侖。

习 题 2·8(2)

1. 法拉第电解第一定律说明的是哪些物理量之间的关系? 它们之间具有怎样的关系?
2. 法拉第电解第二定律说明的是哪些物理量之间的关系? 它们之间具有怎样的关系?
3. 法拉第电解定律是实验的结果,怎样从离子导电的角度来理解它?
4. 法拉第恒量具有怎样的物理意义?
5. 通过硫酸铜的电流是 75 安培,在半小时内可以析出多少铜? 沉淀在电解池的阳极板上呢还是阴极板上?
6. 如果在电解硫酸铜的实验中,通过电解池的电流强度是 6 安培,在 25 分钟内析出的铜是 2.934 克。求铜的电化当量。
7. 锌的原子量是 65.38, 它的化合价是 2。求锌的电化当量。
8. 金的原子量是 197.2, 化合价是 3。要想在电解池里析出 1 克金,需要通过多少庫侖的电量?

9. 鍍鎳時所用的電流密度(電流強度 I 和極板面積 S 之比叫做電流密度)為 0.4 安培/分米²。連續通電 4 小時後,所鍍的鎳層厚度應是多少?(鎳的密度是 8.75 克/厘米³。)

10. 把銀電解池和銅電解池串聯起來,讓 15 安培的電流通過 40 分鐘。問析出銀和銅各幾克?

11. 把鎳電解池和銅電解池串聯起來,在析出鎳 6.08 克的同時析出了多少克銅?

12. 在一個製造電解銅的工廠里裝有 100 只硫酸銅電解池。每只電解池里裝有 20 塊相互並聯的陰極板。陰極板的面積都是 100 厘米 \times 80 厘米。而全部電解池都串聯着。如果通過的電流密度是 200 安培/米²,求在一晝夜內可析出銅多少?

13. 化學知識指出, 1 克原子量物質含有 6.023×10^{23} 個原子(阿佛加德羅常數)。求每個 1 價離子所帶電荷的電量。

[法拉第認為這個電量 (1 價離子所帶的電量)是電荷的最小基元,故把它稱為基本電荷。現已證明,基本電荷就是電子電荷。]

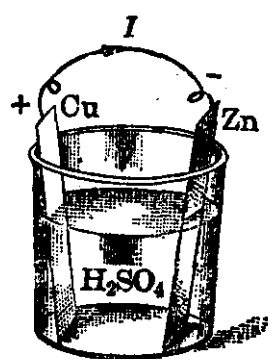
14. 當電流通過稀硫酸溶液時,析出的是哪兩種物質? 它們的質量之比等於什麼?

§ 2.9 化學電源——電池

電流通過導體時要消耗電能,它們被轉變為別種形式的能(如物質的內能等)。要在導體里維持持續電流,就要有一種能不斷地供給能量的裝置;如果要在導體里維持穩恒電流,那就要求這種裝置能夠維持穩定的路端電壓。電池就是這種不斷轉變別種形式的能為電能,並且維持穩定的路端電壓的裝置。

電池和電解池相反,它是把化學能轉變為電能的裝置,所以又稱為**化學電源**。所有的電池都是用兩種不同的第一類導體(金屬和碳)浸在電解液(酸、鹼或鹽的溶液)里做成的。這兩個第一類導體叫做電池的**兩極**。電池的兩個極板要和電解液發生化學變化。在化學變化的過程中,參與反應的物質放出化學能,並轉變為電能。由於兩種極板和電解液的化學反應不同,因而產生了電動勢。

1. 伏打电池 电池的种类很多,最简单的一种叫做伏打电池,是意大利物理学家伏打发明的。伏打电池的正极是铜板(Cu),负极是锌板(Zn),电解液是稀硫酸溶液(H_2SO_4),如图 2·42 所示。



伏打电池的电动势约为 1.1 伏特,即在外电路没有接通时,铜板的电势比锌板的高 1.1 伏特。在外电路接通以后,外电路上的电流从铜极板流向锌极板,内电路上的电流从锌极板流向铜极板,形成稳恒电流。在稳定状态下,两极板间电势差(即路端电压)要比电动势小。在用伏打电池作电源维持电流时,锌板不断地溶解——和稀硫酸化合为硫酸锌($ZnSO_4$),氢气泡不断地在铜板附近生成,并上升逸出液面,直到锌板溶解完或硫酸耗尽为止。

实践指出,若在伏打电池的外电路上接一个小灯泡,起初灯泡很亮,可是过不多时它就会逐渐暗下来,这表示通过灯泡的电流并不是稳定的,而是在逐渐减小着。所以我们说,伏打电池的发明为研究化学电源的理论提供了有利条件,但在实际应用上还存在着困难。

2. 伏打电池的电动势 在伏打电池里,电动势是怎样形成的呢?为了回答这个问题,就需要先讨论一下:在外电路没有接通之前,电池的两个极板和电解液究竟起了哪些变化?

在稀硫酸溶液里,经常有一定百分比的硫酸分子(H_2SO_4)离解为带正电荷的氢离子(H^+)和带负电荷的硫酸根离子(SO_4^{2-})。在没有外电场的时候,这些离子只作无规则的热运动;在有外电场的时候,除了无规则的热运动之外,正离子还要顺着电场的方向运动,负离子还要逆着电场的方向运动。

把纯粹的锌板(即不含杂质的锌板)浸在稀硫酸溶液里,由于所谓化学力(一种非静电力)的作用,带正电荷的锌离子(Zn^{++})被推出锌板,进入溶液,从而锌板由不带电变成了带负电荷。脱离锌板的锌离子由于受到锌板上负电荷的吸引作用(即静电力的作用),而聚集在接触面的周围非常狭窄的区域内。这样,在接触面的一侧是带负电荷的锌板,它的电势比较低;在接触面的另一侧是带正电荷的锌离子,它的电势比较高,也就是说,在接触面附近

的狹窄区域内，建立起一个很强的电场，从锌板到溶液有一个电势跃升（突然上升）。这个电场要阻碍锌离子脱出锌板。但在化学力的作用大于静电力的作用时，锌板上的锌离子还是要继续脱出，于是锌板与溶液间的电势差还在继续加大。直到阻碍离子脱出的静电力和推动离子脱出的化学力相互平衡时，锌板周围的锌离子数才不再增加。此时，每秒钟从锌板上脱出的锌离子数等于每秒钟从溶液中返回锌板的锌离子数，即形成一种所谓动态平衡的状态。此时，锌板和溶液间的电势差已经达到它的最大值，它就叫做锌和稀硫酸的接触电动势。图 2·43(a) 表示锌板周围离子的分布情况，图 2·43(b) 是表示电势变化情况的线图。图中的 \mathcal{E}_1 表示锌板和稀硫酸之间的接触电动势。

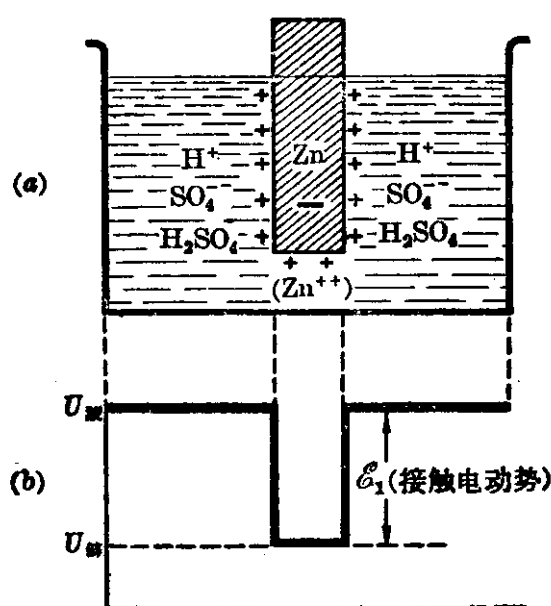


图 2·43 接触电动势

必须指出：(1) 所谓接触电动势，是指动态平衡时锌板与溶液之间的电势差而言；在尚未达到动态平衡之前，或在动态平衡已被破坏之后，实际存在于锌板和溶液之间的电势差都不等于接触电动势。(2) 从锌板浸入溶液开始，到建立起动态平衡为止，所经过的时间很短促，实际上可以看做是瞬时变化。在这过程中，从锌板脱出的锌离子数并不多，因此不能认为锌在继续溶解。(3) 在锌板周围的狭窄区域里虽有相当强的电场，但在这个狭窄区域以外的溶液里，实际上并没有电场的作用（由于锌板所带的负电荷数和锌离子所带的正电荷数是相等的，所以它们所起的作用可以认为相互抵消），故溶液里的氢离子(H^+)和硫酸离子(SO_4^{2-})还是只有热运动，而没有定向运动。

接触电动势的大小只与导体和电解液的性质有关，而与接触面积的大小无关。把一根细锌丝和一滴稀硫酸相接触，或把一大块锌板浸在一大缸同样浓度的稀硫酸里，它们之间的接触电动势完全相等。一般地说，任何一种第

一类导体和任何一种电解液接触时,都存在着因化学力而引起的接触电动势;不过,化学力的大小各有不同,因而引起的接触电动势也各不相同。接触电动势可以用静电计测量出来。

在伏打电池里,除了锌板之外还有一块铜板。实验指出,把铜板浸在稀硫酸溶液里,化学力不但不能推出铜离子,相反,它还要吸引溶液里的氢离子(H^+),并从它们那里获得正电荷而使铜板带正电。氢离子给出正电荷后就成为氢气泡上升到液面逸出,剩下的硫酸根离子就围绕在铜板的周围,并在接触面附近的狭窄区域里形成另一个电场,它从溶液到铜板有一个电势跃升。在到达动态平衡后,溶液和铜板之间的电势差就是铜与稀硫酸的接触电动势。图 2.44(a) 表示伏打电池里的离子分布情况,图 2.44(b) 表示伏打电池里的电势升降情况。图中 \mathcal{E}_1 表示锌与稀硫酸之间的接触电动势,锌的电势低于溶液的电势; \mathcal{E}_2 表示铜与稀硫酸之间的接触电动势,溶液的电势低于铜的电势。显然,铜的电势要比锌的电势高。这时两极板间的外电路没有接通,铜极板(正)与锌极板(负)之间的电势差 $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2$, 这就是伏打电池的电动势。

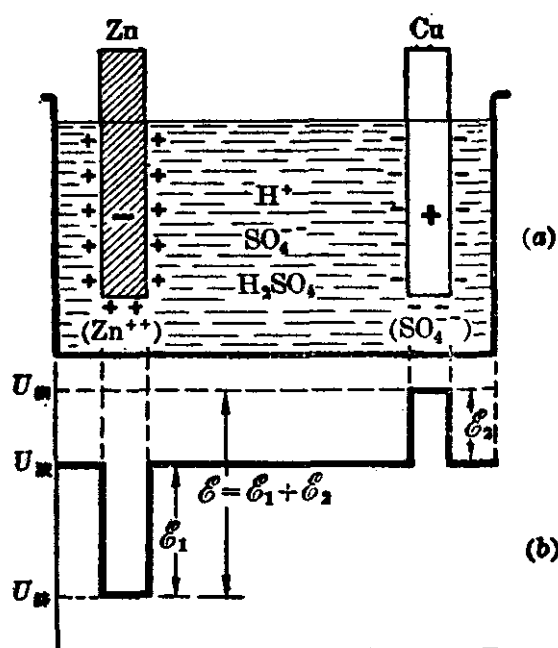


图 2.44 伏打电池的电动势

实验测得,锌与稀硫酸的接触电动势 $\mathcal{E}_1 = 0.76$ 伏特,铜与稀硫酸的接触电动势 $\mathcal{E}_2 = 0.33$ 伏特,因此求得伏打电池的电动势

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 = 0.76 + 0.33 = 1.09 \text{ 伏特.}$$

用任何两种不同的第一类导体浸在稀硫酸里都能获得电动势,不过电动势的大小各不相同。例如:不用铜而改用铁作为正极,那么因为铁和稀硫酸

的接触电动势 $\mathcal{E}_3 = 0.45$ 伏特(铁的电势比溶液低),所以这种电池的电动势

$$\mathcal{E}' = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3 = 0.76 - 0.45 = 0.31 \text{ 伏特}$$

要比伏打电池的电动势小得多了。

3. 伏打电池里的化学反应 在外电路没有接通之前,伏打电池里的化学反应并不是连续进行的。如果用导线把铜板(正极)和锌板(负极)接通,那么在整個电路上(包括外电路和內电路)将发生下列各种变化(如图 2.45 所示):

(1) 正电荷从正极通过外电路流向负极(实际上是自由电子从负极流向正极),形成外电路上的电流 I 。结果:正极的电势比断路时降低了一些,负极的电势比断路时升高了一些,两极间的电势差从断路时的 \mathcal{E} 减小到 V 。

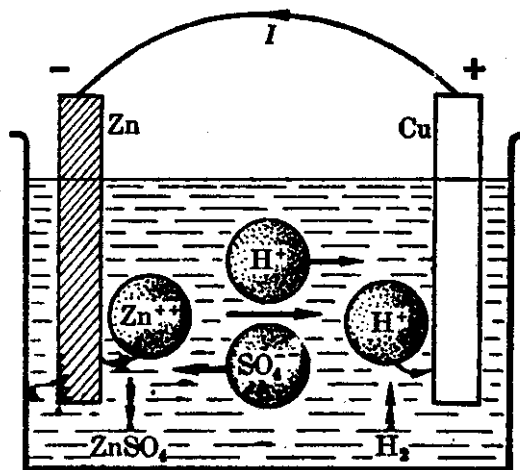


图 2.45 伏打电池中的化学反应

(2) 由于两个极板上的电势有了变化,极板与溶液接触处的电势差就都小于接触电动势 \mathcal{E}_1 和 \mathcal{E}_2 ,这就破坏了

原来的动态平衡状态。于是,极板和周围离子所带的异种电荷数不再相等,因而在整个溶液里建立了电场。由于锌板周围的正电荷数(锌离子所带的正电量)多于锌板本身所带的负电荷数,铜板周围的负电荷数(硫酸离子所带的负电量)多于铜板本身所带的正电荷数,结果这种新建立的电场方向是从锌板指向铜板的。

(3) 由于溶液里有了电场,氢离子在顺着电场的方向移向铜板,硫酸根离子在逆着电场的方向移向锌板,形成正负离子分向两极流动的内电路电流。内电路的电流方向由锌板(即负极)通过溶液流到铜板(即正极)。

(4) 氢离子移到铜板后,给出它所带的正电荷而变成气泡上升逸出液面;硫酸离子移到锌板后,与锌离子化合成硫酸锌(ZnSO_4)向下沉淀,化学力继续推动锌离子脱离锌板。这样,正负两极板就因不断得到补充电荷而稳定了电势。在稳定状态下的两极电势差就是外电路的路端电压,它比电动势小。在稳定状态下的电流就是稳恒电流。

只有在外电路没有接通时,动态平衡才有可能。外电路接通后首先就破坏了动态平衡;而也只有在动态平衡被破坏了之后,上述各项反应才能继续进行,并且继续进行到锌或硫酸消耗完了为止。在这种反应继续进行的过程中,电路上存在着稳恒电流;氢气泡不断在铜板附近形成,并上升逸出液面;

鋅离子不断从鋅板脫出，形成溶解現象；硫酸分子不断离解；硫酸鋅不断生成。在这种复杂变化的过程中，化学能不断轉变成电能；它把正电荷从电势較低的鋅板移入电势較高的溶液，再从溶液移上电势更高的銅板，从而維持稳定的路端电压和电路中的稳恒电流。在这种变化过程中，起主要作用的是化学反应，即所謂化学力，所以我們把电池称作为化学电源。

4. 伏打电池的极化和局部作用 前面已經讲过，如果在伏打电池的外电路上接一个小灯泡，起初灯泡很亮，可是过不多时就会逐渐暗下来。这是什么原因呢？如果在灯泡暗下来的时候仔細观察一下，就会发现在銅板的外表面上附着了一层来不及上升的氫气泡。氫气泡的存在，要起两种不良的影响：(1) 由于氫气泡附在銅板的表面，这就减少了銅和溶液的接触面积，因而加大了电池的内电阻（电池的内电阻随着极板面积的减小而加大，并随着两极板之間的距离增大而加大）。(2) 在銅板上有了一层气泡以后，跟溶液相接触的是氫而不是銅，这就改变了正极板的性质；已知氫和稀硫酸的接触电动势比銅小（通常看做等于零），所以电池的电动势也要减小（变成約为0.77伏特）。这种因氫气泡的集聚而减小电动势和加大内电阻的現象，叫做伏打电池的极化。消除或减少极化的方法是利用去极剂，常用的去极剂有二氧化錳和重鉻酸鉀等，它們能把正极上附着的氫气氧化成水。用机械抖动的方法也可以在一定程度上减少极化的影响，例如当我们抖动一下伏打电池里的銅板时，就可以看到小灯泡亮一些。

在外电路沒有接通时，純鋅是不会繼續溶解于稀硫酸的；只有在外路接通时才会繼續不断地溶解。通常所用的鋅一般含有鉄、碳等杂质，它在外电路断开时也要繼續不断地溶解，結果极板損耗得很快，显然这是一种浪费。在含有杂质的鋅块浸入稀硫酸后，杂质鉄与鋅或杂质碳与鋅就形成了許多小电池，鉄或碳为正极，鋅为負极。在鋅块里电流从杂质流到鋅，在溶液里电流从鋅流到杂质，結果形成了所謂局部电流。这种局部电流，不管外电路接通与否，都照样存在。这也就是说，不管外电路接通与否，鋅都要繼續不断地溶解生成硫酸鋅。这种因杂质存在而引起的局部电流叫做局部作用。消除这种局部作用的方法是先把鋅板洗干净，然后涂上一层水銀（汞），使鋅溶解在水銀里成为一种叫做鋅汞齐的物质。这样，稀硫酸只能和汞齐中的鋅接触，而不能再和杂质接触，因此局部电流就不可能形成了。

5. 勒克朗謝电池和干电池 勒克朗謝电池的正极为碳棒，負极为鋅棒，电解液为氯化氨稀溶液。为了减少极化作用，电池的

正极不是一根单独浸在溶液里的碳棒,而是把碳棒 C 放在一只没有上过釉的瓷筒里,并在 C 的周围填满碳屑和二氧化锰粉末,然后把整个瓷筒浸在氯化氨稀溶液里,如图 2.46 所示. 电池的负极或者用一根锌棒组成,或者用一个比瓷筒大一些的空底锌筒组成. 瓷筒里的碳屑和二氧化锰混合物是预先用氯化氨溶液浸湿了的. 无釉瓷筒具有半透性,它允许氨离子和氯离子透过,却不让碳屑和二氧化锰粉末透过. 在外电路接通时,通过适当的化学反应,在负极附近生成了氯化锌,在正极中所放出的氢气被

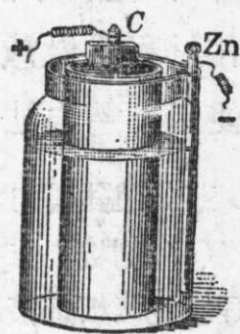


图 2.46 勒克朗谢电池

二氧化锰逐渐氧化成水,因此极化作用可以大大地减小. 在去极化良好的情况下,勒克朗谢电池的电动势最大可以达到 1.4 伏特以上,但不能超过 1.5 伏特. 如果使用时间过长,常因去极化(即二氧化锰对氢气的氧化作用)不尽而显著地降低电动势. 但停止使用一会儿,又可恢复原状了. 所以这种电池只适用于断续通电的工作,如手电筒、电铃、电话及其他电动号志机等.

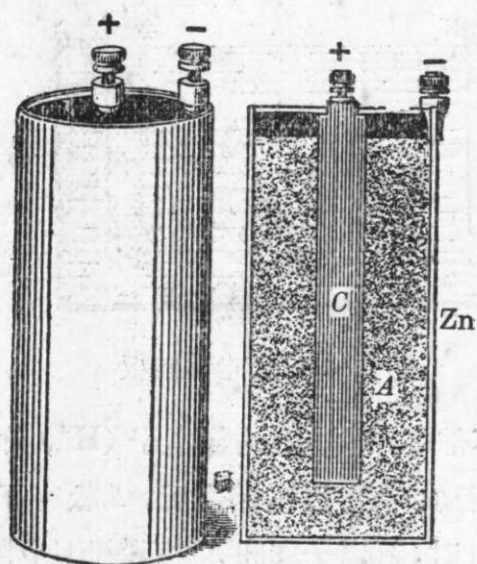


图 2.47 干电池

为了方便,勒克朗谢电池可以改装成所谓干电池. 干电池的外壳是用锌板压成的圆筒,它同时也是电池的负极. 碳棒放在圆筒的中央(不与锌筒接触)作为正极,它周围有一圈用氯化氨溶液湿透了的碳屑和二氧化锰. 筒内其余部分填满一种糊状混合物,其中包含有氯化氨、氯化锌等化合物. 为了防止蒸发,用瀝青封好筒顶,如图 2.47 所示. 这种干电池的性能,和勒克朗谢电池相同.

6. 蓄电池 象伏打电池和勒克朗谢电池那样,只能把化学

能轉變成電能的電池，我們稱它們為**原電池**。原電池在使用時不斷地消耗負極板（一般是鋅板）和電解液，所以用過一定的時間後就不能再用了。**蓄電池**能把由外界輸入的電能轉變成化學能，使用時，再把化學能轉變成電能。前一個變化過程叫做**充電**，後一個變化過程叫做**放電**。只要保養妥善，蓄電池可以反復充電放電，長期使用。蓄電池又叫做**次電池**。最常用的蓄電池是**鉛蓄電池**。

茲分述鉛蓄電池的工作原理和使用方法如下。

(1) **制板** 先把兩塊純粹的鉛板浸在稀硫酸溶液（濃度 20%）里，然後用導線把兩板連接起來，並串聯一個小燈泡或安培計（如圖 2-48 所示）。此時，我們不能發現電路上有電流通過，這也說明用相同的兩塊金屬浸在同一種電解液里的裝置不能用來作為電源。因為兩塊鉛板與稀硫酸的接觸電動勢相等，則在兩板之間不能形成電勢差。如果把上述兩塊鉛板與一組電源和一個安培計串聯起來（如圖 2-49 所示），我們可以看到電流從 A 板進入溶液，從 K 板流出溶液，並引起了一系列的化學變化。這種化學變化的過程和結果如下所述：

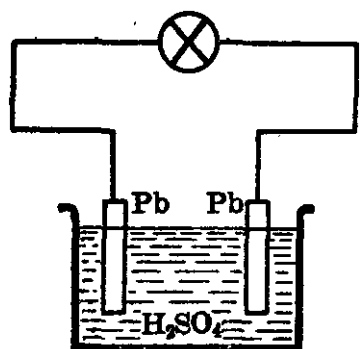


圖 2-48 電源的两极不能用同种金属

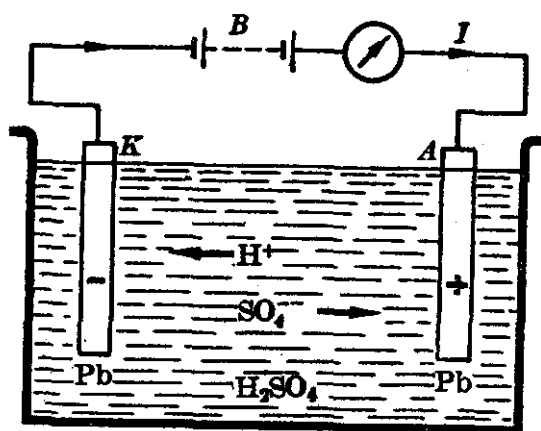


圖 2-49 蓄電池制板

在沒有接通電路之前，A 板和 K 板都不帶電，溶液中的氫離子 (H^+) 和硫酸根離子 (SO_4^{2-}) 只作熱運動而不作定向運動。在接通電路之後，A 板帶了正電，K 板帶了負電，溶液里就有了電場。此時，氫離子移向 K 板，給出所帶的正電荷後，變成氫氣泡上升到液面；硫酸根離子移向 A 板，給出所帶的負電荷後與水化合，還原為硫酸並放出氧氣。它使 A 板的外表面氧化為二氧化鉛 (PbO_2)。這個變化過程叫做蓄電池的制板過程，要一直進行到斷開電路為止。在制板過程中，整個系統發生的變化是：

溶液里的水 (H_2O) 不斷分解為氫和氧；

A 极板的外表面不断被氧化成二氧化铅(PbO₂);

在 K 极板的附近不断生成氢气泡升出液面;

电源供给的电能不断转变为蓄电池的化学能。

(实际应用的蓄电池不需要使用者自己制板.)

(2) 放电 已经制好了板的蓄电池可以用来向外电路供电。电流从 A 极板流出,从 K 极板流入,如图 2·50 所示。我们称 A 极板为正极, K 极板为负极。这时,电池中的化学能转变为电能,叫做蓄电池的放电过程。

在放电过程中,铅板所起的作用和伏打电池中锌板所起的作用相似,铅不断地与硫酸根化合生成硫酸铅(PbSO₄),附着在铅板的外表面上;二氧化铅与氢离子化合,生成氧化铅(PbO)和水,氧化铅再与硫酸(H₂SO₄)化合,生成硫酸铅(PbSO₄)和水。在放电过程中,两极板和溶液的变化可以表示如下:



这也就是说,在放电过程中,

两个极板都在不断变成硫酸铅(PbSO₄);

溶液里的硫酸在不断消耗,水在不断生成,即溶液的浓度在不断降低;

化学能不断地转变为电能。

铅蓄电池在开始放电时,电动势可以高到 2.7 伏特,但很快就降到 2 伏

特左右,这以后电动势就比较稳定。

要过很久后才又逐渐降低,直到 1.85 伏特时就不能再应用了,应当重新充电后才能使用,否则,极板上的硫酸

铅会因堆积过厚而硬化,损坏蓄电池的机能。

(3) 充电 蓄电池的充电过程

就是电能转变为化学能的过程。充电过程中所发生的化学变化和制板过程中所发生的化学变化不同,图 2·51

表示这种变化的情况。充电时,外电源的正极和蓄电池的正极(A 板)相接,

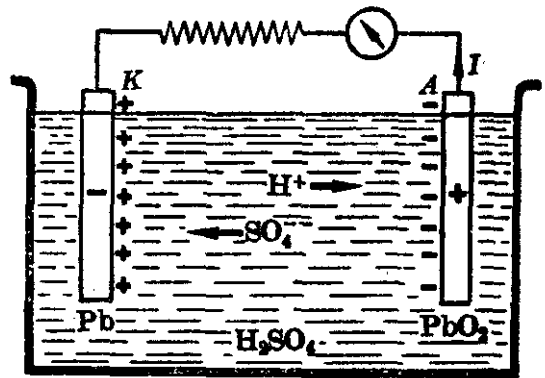


图 2·50 蓄电池放电

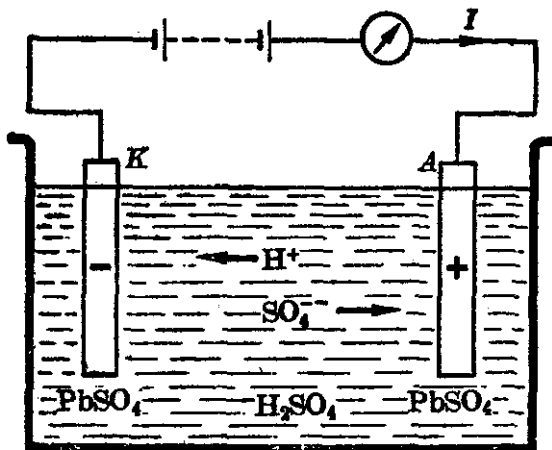
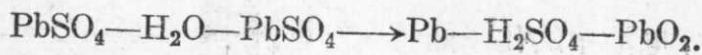


图 2·51 蓄电池充电

表示这种变化的情况。充电时,外电源的正极和蓄电池的正极(A 板)相接,

外电源的负极和蓄电池的负极(K板)相接,它使A、K两板分别带正、负电荷,在溶液里建立电场.溶液里的氢离子(H^+)移向K板,使硫酸铅还原为铅(Pb),并生成硫酸(H_2SO_4).硫酸根离子在移向A板的过程中与水化合,生成硫酸(H_2SO_4)和氧离子(O^{--});氧离子移到A板后,与水及硫酸铅发生复杂的变化,生成硫酸(H_2SO_4),并变硫酸铅为二氧化铅.在充电过程中,发生的化学变化虽与制板时不同,但其结果则是相同,那就是A板变成了二氧化铅,K板变成了铅.这一变化可表示如下:



也就是说,在充电过程中,

A极板逐渐从硫酸铅变成了二氧化铅;

K极板逐渐从硫酸铅变成了铅;

溶液里的水在不断地消耗减少,硫酸在不断地生成增加,即溶液的浓度在不断地升高;

电源供给的电能不能地转变成蓄电池的化学能.

铅蓄电池在充电时,它的电动势很快就达到2伏特以上,最后可以达到2.7伏特.充电过程继续到极板上的硫酸铅($PbSO_4$)完全消失为止.如果再继续通电,那么就又恢复到制板时的情况,在K极板附近将要放出氢气,发出微弱的噼噼声.这是过量充电现象,应当防止.

(4) 保养 实际应用的铅蓄电池,用格状铅板填充疏松的二氧化铅作为正极,用格状铅板填充疏松的纯铅作为负极(此铅称海绵状铅),用20%的硫酸溶液作电解液.图2·52表示一个蓄电池的并联组,它包括四块并联的正极板和四块并联的负极板,整个系统装在一个玻璃容器里.

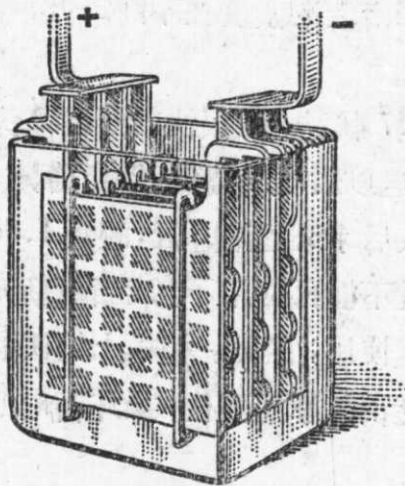


图2·52 实用蓄电池组

蓄电池的极板所以要用疏松的二氧化铅和铅,是为了增加两极板和电解液的接触面,以保证化学反应的迅速进行.用时必须慎防机械震动,以免填充在格子里的物质因震动而脱落.过量放电和过量充电都会导致填充物质

损坏或硬化.蓄电池久置不用,应将极板取出,用清水洗净单独放置,切勿长期浸在硫酸溶液中.

蓄电池在放电过程中允许放出的最大电量叫做蓄电池的容量.蓄电池的容量通常用安培小时来表示,1安培小时 = 3600安培秒 = 3600库仑.一

般鉛蓄電池的電容量約為 3.5~6.0 安培小時/千克，即蓄電池極板每重 1 千克，允許放出 3.5~6.0 安培小時的電量。在 3.5~6.0 安培小時之間究竟取哪一個數值，那就要看蓄電池的構造是否完善來決定了。

鉛蓄電池在放電時，溶液的濃度逐漸降低，比重逐漸減小；在充電時，溶液的濃度逐漸升高，比重逐漸加大。在電動勢為 2.2 伏特時，硫酸溶液的比重約為 1.2 克/厘米³，在電動勢為 1.85 伏特時，比重約為 1.17 克/厘米³；實際應用中常常以這兩個比重作為放電和充電的限度。蓄電池中溶液的比重可用一種特制的比重計來量度，從它的標記上可以直接讀出蓄電池的儲電情況（儲電情況表示蓄電池還可以放出多少電量）。

蓄電池的極板面積比較大，板間距離比較小，因而內電阻很小。使用時切忌短路。在一般情況下，每平方分米極板面積上的電流強度不允許超過 0.5 安培。否則，就可能因發熱過劇而損壞極板。

由於蒸發的關係，蓄電池里的水分將逐漸減少，所以應該及時補給蒸餾水，以使極板的上端不致露出液面。

蓄電池的應用範圍很廣，它是汽車、火車、飛機、潛水艇上和電話中不可缺少的電源設備，也是實驗室中最常用的電源。

除了鉛蓄電池之外，還有鐵鎳蓄電池，它的正極是氧化鎳，負極是氧化鐵，電解液是氫氧化鉀溶液。它的電動勢約為 1.3 伏特。這是一種鹼性蓄電池，而鉛蓄電池是酸性蓄電池。鐵鎳蓄電池比鉛蓄電池輕，也比較能耐機械震動。

本章提要

1. 電流

(1) 電流 電荷的定向移動叫做電流。

產生電流的條件是：要有可以移動的電荷和要有能使電荷作定向移動的電場。

在電路中存在電流的條件是：電路中要有電源。

(2) 電流的強度和方向 表示電流強弱的物理量叫電流強度。電流強度等於流過導體中任一橫截面的電量和所用的時間之比。

$$I = \frac{Q}{t}$$

實用單位：

$$1 \text{ 安培} = 1 \frac{\text{庫倫}}{\text{秒}}$$

正電荷流動的方向被規定為電流的方向。

2. 欧姆定律

(1) 部分电路的欧姆定律 通过给定导线的电流强度跟导线两端的电势差成正比,跟导线的电阻成反比。

$$I = \frac{V}{R} \text{ 或 } V = IR.$$

当电流强度 I 的单位为安培,电势差的单位为伏特时,电阻的单位为欧姆。

(2) 电阻定律 导体的电阻是表示导体对电流起阻碍作用的物理量。它为导体本身的物理条件所决定,而与导体两端的电压和通过导体的电流强度无关。

当导体的材料一定时,导体的电阻跟它的长度成正比,跟它的横截面积成反比。

$$R = \rho \frac{L}{S},$$

ρ 为材料的电阻率,单位是 $\frac{\text{欧姆} \cdot \text{毫米}^2}{\text{米}}$ 或欧姆·厘米,大小由导体的性质决定。

(3) 导体的串联和并联

串联电路的特点:

(i) 通过各段串联导体的电流强度相等。

(ii) 整段电路上的电压等于各段电路上的电压之和,即

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n.$$

(iii) 导体组的总电阻等于各个导体电阻之和,即

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n.$$

(iv) 各段电路上的电压跟它们的电阻成正比,即

$$V_1 : V_2 : \dots : V_n : V = R_1 : R_2 : \dots : R_n : R.$$

(v) 各段电路上的电功率跟它们的电阻成正比,即

$$N_1 : N_2 : \dots : N_n : N = R_1 : R_2 : \dots : R_n : R.$$

并联电路的特点:

(i) 各个分路上的电压都相同。

(ii) 干路上的电流强度等于各分路上的电流强度之和,即

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n.$$

(iii) 并联导体的总电阻的倒数等于各个导体电阻的倒数之和(或说:并联导体的总电导等于各个导体的电导之和),即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

(iv) 各分路的电流强度跟它们的电阻成反比,即

$$I_1:I_2:\dots:I_n:I = \frac{1}{R_1}:\frac{1}{R_2}:\dots:\frac{1}{R_n}:\frac{1}{R}.$$

(v) 各分路的电功率跟它们的电阻成反比,即

$$N_1:N_2:\dots:N_n:N = \frac{1}{R_1}:\frac{1}{R_2}:\dots:\frac{1}{R_n}:\frac{1}{R}.$$

(4) 全电路欧姆定律 全电路里的电流强度跟电源的电动势成正比,跟全电路上的总电阻成反比.

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}.$$

电源电动势:电源两极间电势差的限值 \mathcal{E} 叫做电源的电动势. 电源的电动势等于电源力在迁移电荷中所作的功跟被迁移的电量之比.

当外电路断开时,电源两极间的电势差(路端电压)就等于电源的电动势.

当闭合电路里有稳恒电流存在时,电源两极间的电势差总小于电源的电动势,并等于电动势减去内电路上的电势降落 $V = \mathcal{E} - Ir$.

(5) 电源组的串联和并联

串联——串联电源组的电动势等于组中各个电源的电动势之和. 如果各个电源的内电阻都为 r , 电动势都为 \mathcal{E} , 那末全电路的总电阻为 $R+nr$, 电路里的总电流强度应为

$$I_n = \frac{n\mathcal{E}}{R+nr}.$$

并联——由几个相同的电源组成的并联电源组的电动势等于组中任意一个电源的电动势. 全电路的总电阻为 $R+\frac{r}{n}$, 电路中的电流强度为

$$I_n = \frac{\mathcal{E}}{R+\frac{r}{n}}.$$

3. 电流的功和功率

(1) 电功和电功率 电流在闭合电路里流过时,总在进行着能的转变. 电源的非静电力移送电荷时,消耗了某种形式的能(例如化学能、机械能等),产生电能. 电流在外电路里通过时,电能转变成其他形式的能(例如导体的内能等).

在部分电路里:

电功

$$A = VQ = VIt;$$

电功率 $N = VI$.

在全电路里:

电功 $A = \mathcal{E}Q = \mathcal{E}It$;

电功率 $N = \mathcal{E}I$.

单位:

电功 焦耳(瓦特秒); 瓦特小时; 千瓦小时(度);

1 千瓦小时 = 1000 瓦特小时 = 36×10^5 焦耳.

电功率 瓦特; 千瓦; 1 千瓦(1 瓩) = 1000 瓦特(焦耳/秒).

(2) 焦耳-楞次定律 电流通过导体时, 消耗在电阻上的能量转变为导体的内能. 焦耳-楞次定律指出: 电流通过导体所放出的热量跟电流强度的平方、导体的电阻和通电的时间成正比.

$$Q = KI^2Rt,$$

式中 K 为功热当量, 它与热功当量互为倒数:

$$K = \frac{1}{J} = \frac{1}{4.18} \text{ 卡/焦耳} = 0.24 \text{ 卡/焦耳}.$$

4. 法拉第电解定律

(1) 电离和电解

电离——电解质分子在溶液中分解成正离子和负离子的现象叫做电离.

电解——当电流通过电解液的时候, 在极板上进行着化学反应, 结果极板上有物质析出, 这种现象叫做电解.

电解的过程是电能转变为化学能的过程.

(2) 法拉第电解定律

电解第一定律——电解时析出物质的质量跟通过电解液的电流强度和通电时间成正比. 用公式表述如下:

$$m = KQ \text{ 或 } m = Kit; \text{ 或 } m_1:m_2 = Q_1:Q_2.$$

K 为比例常数, 叫做电化当量, 某种物质的电化当量的数值等于在电解液中通过 1 库仑电量所析出的那种物质的质量. K 的单位是克/库仑.

电解第二定律——各种物质的电化当量跟它们的原子量成正比, 跟它们的化合价成反比. 用公式表述如下

$$K = C \frac{A}{n}.$$

C 是一个普适恒量, 对于所有的物质来说都是相同的. 若 K 以克/库仑为单位, A 以克为单位, 则 C 的值为

$$C = 10.36 \times 10^{-6}.$$

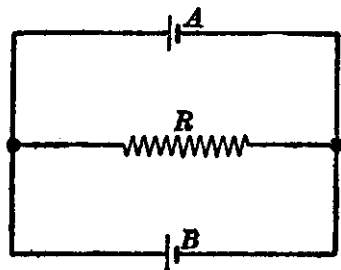
如将两定律合并起来,法拉第电解定律可以用下式表示:

$$m = C \frac{A}{n} It = 10.36 \times 10^{-8} \frac{A}{n} Q.$$

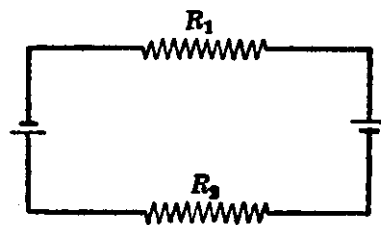
法拉第电解第一定律反映的是用不同的电量电解同一物质的规律;第二定律反映的是用同一电量电解不同物质的规律.

复习题二

1. 附图中的 A 、 B 两电池的电动势各为 2 伏特,内电阻各为 0.1 欧姆, R 的电阻为 0.95 欧姆,求通过 R 的电流强度和 R 两端的电压.



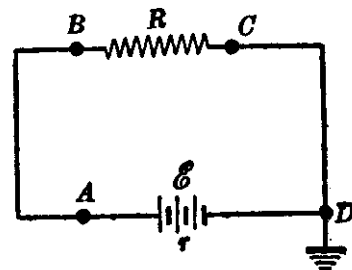
(第 1 题)



(第 2 题)

2. 附图中的两个电池的电动势各为 2 伏特,内电阻各为 0.1 欧姆, $R_1 = 3$ 欧姆, $R_2 = 4.8$ 欧姆,求通过 R_1 、 R_2 的电流强度, R_1 两端的电压和 R_2 两端的电压.

3. 在附图中, $R = 2.5$ 欧姆, $\mathcal{E} = 6$ 伏特, $r = 0.5$ 欧姆, D 点接地,求 (1) 电池组内外电路的电流方向; (2) A 、 B 、 C 、 D 各点的电势? (3) 路端电压?



(第 3 题)

[提示: 接地点的电势为零]

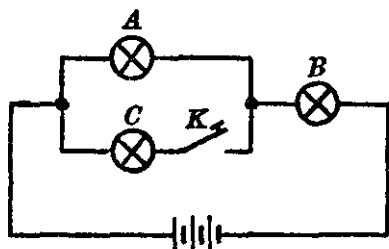
4. 电路中有一电池,当外电路的电阻是 2.9 欧姆时,量得电流强度为 0.5 安培;当外电路的电阻是 1.4 欧姆时,量得路端电压为 1.4 伏特,求该电池的电动势和內电阻.



(第 5 题)

5. 如附图所示,在相距 40 公里的甲、乙两地引两条粗细均匀的导线,电阻共 800 欧姆,若在两地间某处发生捷路,这时接在甲地的伏特计的读数为 10 伏特,安培计的读数为 40 毫安培,求发生捷路处和甲地的距离.

6. 如附图所示, A 、 B 、 C 是三个具有相同电阻的电灯, 設电源的内电阻可略去不計, 求(1)电鍵断开和閉合时 A 灯所消耗的功率之比; (2)电鍵断开和閉合时 B 灯所消耗的功率之比; (3)說明原来断开的电鍵 K 在閉合后两灯明暗情况各有什么变化?



(第 6 題)

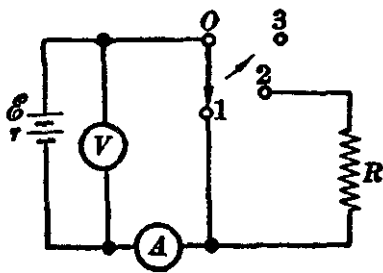
7. 在 220 伏特的电路上, 接有 10 安培的保險絲(电流超过 10 安培时, 保險絲会燒断),

問在这个电路上能并联几盞 40 瓦特的灯泡?

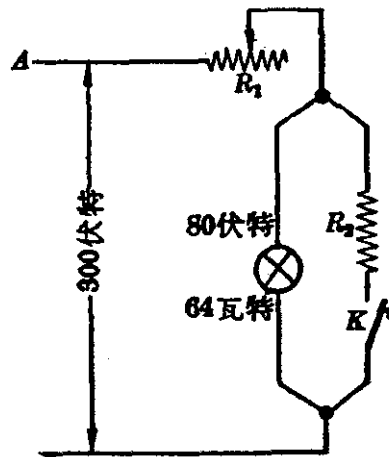
8. 有一个电池組, 第一次用电阻为 4 欧姆的导綫連接, 第二次用电阻为 9 欧姆的导綫連接. 在这两种情况下, 測出外电路在相等时间里放出的热量相等. 求电池組的内电阻是多少?

9. 有一个伏特計、一个电池和一个定值电阻, 問怎样利用它們来測定一个未知导体的电阻?

10. 如附图所示, $\mathcal{E}=3$ 伏特, $r=0.5$ 欧姆, $R=5.5$ 欧姆, 設安培計和伏特計的連接并不影响电路, 問单刀三擲开关分別連接 1、2、3 位置时, 安培計和伏特計的讀数各是多少?



(第 10 題)



(第 11 題)

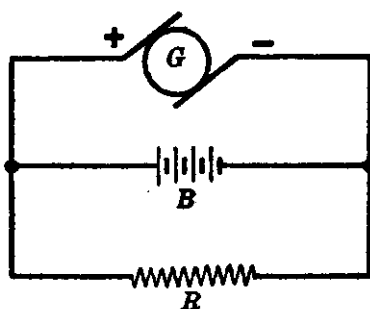
11. 在附图中, AB 間电压保持 300 伏特不变, 当变阻器 R_1 为 200 欧姆时, 把电鍵 K 閉合, 这时电灯恰好正常发光, 問当电鍵 K 断开时(1)电灯两端的电压是变大呢还是变小? 为什么? 改变了多少伏特? (2)电灯实际消耗的电功率是变大了呢还是变小? 为什么? 改变了多少瓦特? (3)如果在电鍵断开后仍要使电灯正常发光, 变阻器 R 的电阻要变大呢还是变小? 为什么? 要改变多少欧姆?

12. 把一根电阻导线埋在 100 克 0°C 的碎冰中, 通上 5 安培的电流, 经过 4 分钟后冰全部熔解为 0°C 的水, 再过 5 分钟水即沸腾. 求导线的电阻和冰的熔解热.

13. 有电动势为 1.5 伏特、内电阻为 2.5 欧姆的干电池两节, 把它们串联起来使用. 另有一个小电珠, 其上标有“2.5 伏特, 0.625 瓦特”字样. 如果把这一小电珠接在电路里, 好不好? 为什么? 这时小电珠实际功率是多少? 如果两节干电池可以释放出的总电能为 4320 焦耳, 问这一小电珠能连续使用多少时间?

[注意: 计算时不要忽略内电路也要消耗电能.]

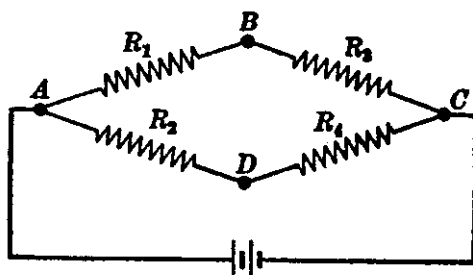
14. 如附图所示, G 为发电机, 它的电动势为 120 伏特, 内电阻为 0.5 欧姆; B 为蓄电池组, 其电动势为 110 伏特; R 为外电阻. 问当 R 值为多少欧姆时, 蓄电池组内没有电流通过? 当 R 值比该值大或小时, 蓄电池是充电呢, 还是放电呢?



(第 14 题)

15. 配电站以 3000 伏特的电压输送 75 千瓦的电功率给 3 公里远的工厂, 如果要使在输电线上消耗的功率不超过输送功率的 2%, 求(1)输电铜线的横截面积最小应为多大? (2)工厂获得的实际电压和功率应是多少?

16. 在附图中, $R_1 = R_4 = 4$ 欧姆, $R_2 = R_3 = 3$ 欧姆, 问 B 、 D 间有无电势差? 如果用导线把 B 和 D 两点连接起来, 问导线中是否有电流通过? 电流的方向怎样? 如果 $R_1 = R_2 = 4$ 欧姆, $R_3 = R_4 = 3$ 欧姆, 那么, 连接 B 、 D 间的导线有无电流通过?



(第 16 题)

17. 串联着的两个电解池,一个在鍍銀,一个电解水,当一个析出銀 0.5394 克时,另一个析出氧气应是多少克? 在 75 厘米高水銀柱, 27°C 时,它的体积为若干立方厘米?

18. 已知氯的原子量为 35.5,化合价 $n=1$. 要在 NaCl 溶液里电解出氯气 17.7 公斤. 問:(1)需要多少电量? (2)欲在一昼夜里析出,电流强度应是多少? (3)有多少氯离子跑到阳极上去? (4)求出氯的电化当量 K ; (5)在 50 伏特电压下电解要消耗多少电能?

第三章 磁 場

远在两千多年前,人們就已經发现了磁現象,但因为一直把它孤立地看做是某种物质所具有的特殊性质,所以对它的認識不深,应用也不广泛. 直到十九世紀初,奧斯特、安培、夫来銘等科学家先后发现了电流的磁場和磁場对电流的作用之后,才确定了磁現象与电現象之間的相互联系,并大大地扩大了它的应用范围. 到了二十世紀初,由于原子結構理論的建立,人們才开始認識到磁現象的本质.

在这一章里,我們將从介紹磁現象的基本知識出发,引出磁場概念,着重討論电流的磁場和磁場对电流的作用,并簡單地介紹一下有关电流計、安培計和伏特計的构造、工作原理等知識.

§ 3.1 磁現象和磁場

1. 有关磁現象的基本知識

(1) 磁体: 磁現象和电現象一样,很早就被发现. 我国是发现和应用磁鉄最早的一个国家,約在紀元前 300 年,我們的祖先就发现了磁鉄矿(Fe_3O_4)能够吸引鉄制的物体,如图 3.1 所示. 这种矿石我們就称为**天然磁体**(俗称吸鉄石). 我国的本溪、銅陵、当涂、繁昌等地,貯藏着很丰富的磁鉄矿.

我們通常所用的磁体一般都是用鋼或其他合金制成的,叫做**人造磁体**. 人造磁体有条形的、蹄形的和針形的,它們分別叫做条形磁体、蹄形磁体和磁針,如图 3.2 所示.

磁体不但能够吸引鉄和鋼,还能吸引鎳、鈷和鉻等物质. 这种

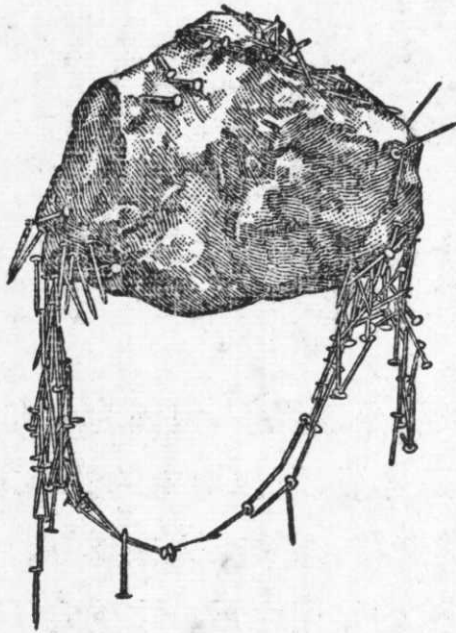


图 3·1 天然磁体

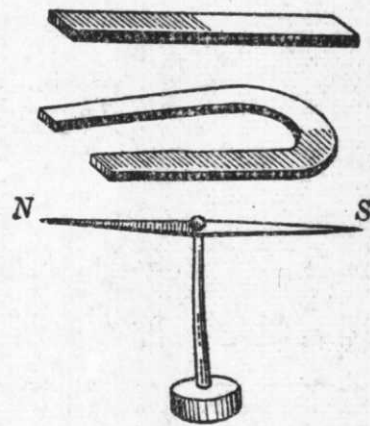


图 3·2 人造磁体

性质叫做**磁性**。这些能够被磁体吸引的物质叫做**铁磁性物质**。

天然磁体和人造磁体都能比较长期地保持磁性，我们称它们为**永磁体**。使原来不具磁性的物体得到磁性叫做**磁化**。使磁体失去磁性叫做**去磁**。

(2) **磁极**：把磁体放到一盒铁屑里，然后再拿出来，我们可以看到它能吸起很多的铁屑，如图 3·3 所示。吸引铁屑最多的地方磁性最强，称为**磁极**。条形磁体和磁针的两端都是磁极；蹄形磁体可以看做是弯曲了的条形磁体，所以它的两个磁极也就在它的两端。

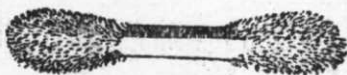


图 3·3 磁 极

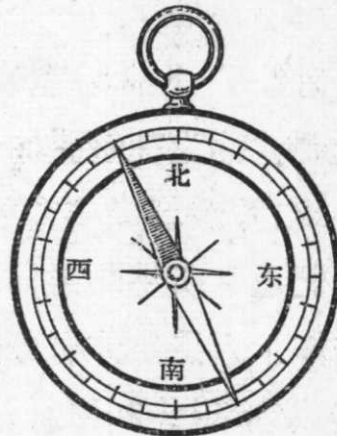


图 3·4 简单罗盘

把一根条形或针形磁体悬挂或支撑起来，使它能在水平面里自由转动，我们就可以看到：当磁体静止下来以后，它的一个磁极总是指向北方，另一个磁极总是指向南方。我们把这个总是指北方的磁极叫做**北极**，用 N 表示；把这个总是指南方的磁极叫做**南极**，用 S 表示。我国首先利用磁针的定向性制造了指南针（又叫罗盘）。图 3·4 表示一种日常应用的简单罗盘。在刻度盘的中央放一根可以自由转动的磁针。使用时，先等磁针静止下来，然后转动刻度盘，使盘上的“北”字和磁针的北极相合，这就可以根据盘上的分度来确定方向。远在十一世纪的初期，我国已在航海方面应用指南针来辨别方向。直到现在，在航空、航海和地质工作等方面，还经常用到罗盘。

磁极不但能比较显著地吸引铁磁性物质，它们彼此之间也有很显著的相互作用。实验指出：同号磁极相互排斥，异号磁极相互吸引。图 3·5 表示两个 N 极相斥。用同样的方法可以观察到，两个 S 极也相斥，但 S 极和 N 极则是相吸的。

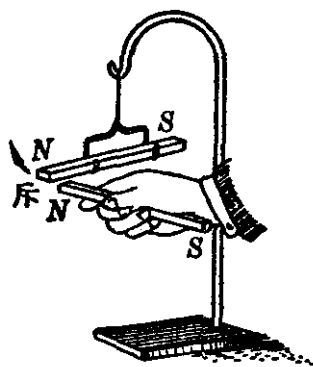


图 3·5 磁极相互作用

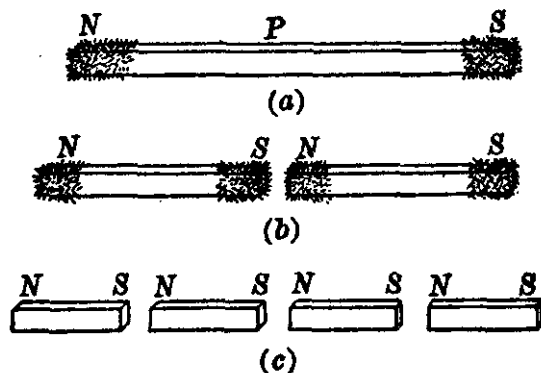


图 3·6 没有独立的磁极

实验还指出：如果把一根磁棒折成两段，如图 3·6 所示，那么在折断处就会出现两个异号磁极，因而每一段又都变成了具有南、北两极的磁棒。再分下去，每一小段又都具有南、北两极；继续分割下去，情况总是如此，每一小段总是一根完全的磁体，我们永远也得不到一个独立的磁极。在自然界里，有单独存在的正电荷或负电荷，却没有单独存在的南磁极或北磁极，这就是磁极和电荷

的根本区别。

一般说来,不同磁极对铁磁性物质的作用力大小是不相等的。这说明不同磁极所具有的磁性有强弱之分;为了便于定量地比较这种强弱,我们引入**磁极强度**这一概念。两个磁极,如果对距它们距离相等的第三个磁极的作用力相同,我们就说它们的磁极强度相等;如果作用力不同,我们就说它们的磁极强度不等,作用力较大的一个磁极的磁极强度较大,作用力较小的一个磁极的磁极强度较小。

实验证明:同一个磁体上的两个磁极的磁极强度总是相等的。

(3) 磁力:一个磁体总有两个磁极,由于磁极是不能单独存在的,所以,在用实验方法研究某一磁体的一个磁极对另一磁体的一个磁极的作用力时,难免要受其余两个磁极的影响。库仑和卡文笛许曾各自独立地使用很长而且很细的磁针进行实验。在实验时,如果把它们之间的距离调整得相当近,则其他两极距离它们就比较远,所起的影响也就可以小到忽略不计的程度。同时,又因为细磁针的磁极比较小,磁性比较集中,可以看成是点磁极;这就和研究电力时想象的点电荷情况相似。

库仑对磁极间的相互作用进行了系统的实验,结果得出了磁极间相互作用的库仑定律:两个磁极间的引力或斥力的方向在两个磁极的连线上,大小跟它们的磁极强度的乘积成正比,跟它们之间距离的平方成反比。

设两个磁极的磁极强度分别为 m_1 和 m_2 , 它们之间的距离为 r , 作用力为 F , 那么在真空中的库仑定律可用公式表示如下:

$$F = K \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

式中 K 是比例恒量,它的大小和式中各量的单位有关。在厘米·克·秒制里,磁极强度的单位是这样规定的:当两磁极强度相等的

磁极在真空中相距 1 厘米时，如果它們之間的相互作用力正好是 1 达因，它們的磁极强度就各规定为 1 单位。这样规定的单位，叫做厘米·克·秒制磁极强度单位，或簡称为单位磁极。

在用厘米·克·秒制单位时，上式中的 $K = 1$ ，因此真空中的庫侖定律公式可写作

$$F = \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

在应用公式时，应当注意：当两个磁极同号（即同为 N 极或同为 S 极）时， F 为正值，表示相斥；当两个磁极异号（即一个 N 极、一个 S 极）时， F 为負值，表示相吸。

习 題 3·1

1. 在研究两个磁极之間的相互作用时，为什么要用細而长的磁針？
2. 如果只有一根鋼針，你用什么方法可以辨別它是否具有磁性？
3. 把鋼条的一端移近磁針的一极，結果它們相吸，能不能就根据这一点来判断鋼条具有磁性？为什么？
4. 把鋼条的一端移近磁針的一极，結果它們相斥，能不能就根据这一点来判断鋼条具有磁性？为什么？
5. 有两根鋼棒，已知一根有磁性，另一根沒有磁性。如果沒有任何其他用具，用什么方法可以判断出哪一根鋼棒具有磁性？

2. 磁場 我們已經知道，电荷的周圍总存在着电場，电荷之間的相互作用是通过电場来进行的。同样，磁体的周圍也存在着磁場，磁极間的相互作用也是通过磁場来进行的。

近代科学証明，磁場也是一种特殊物质。它和电場相似，也具有力和能的特性。电場对电荷有电場力的作用，磁場对磁极有磁場力的作用。电荷在电場里具有势能，磁极在磁場里也具有势能。在本章里，将集中討論有关磁場力的問題。有关磁場势能的問題将在以后各章里逐步加以討論。

(1) 磁場强度：在研究电場性质时，我們曾經引用过檢驗电

荷(即帶電很少、所占位置也很小的電荷),現在研究磁場性質,我們要引用檢驗磁極(即磁極強度很小、所占位置也很小的磁極),如果有一根很長很細的磁針,把它的一個極放在磁場里,那麼實際上它就是一個檢驗磁極。

初步的實驗指出:把不同強度的檢驗磁極放在磁場里的同一位置上,它們所受到的磁場力大小不同,這說明磁場力的大小與受力磁極的強度有關;把同一檢驗磁極放在磁場里的不同位置上,它所受到的磁場力大小一般是不同的,這說明磁場力的大小還與磁場本身的性質有關。進一步的實驗表明了下述的定量關係:如果我們取好幾個檢驗磁極,它們的磁極強度分別為 m 、 $2m$ 、 $3m$ 、 \dots ,先把它們依次放在磁場里的某一位置 A 上,測得各磁極所受到的磁場力分別為 F 、 $2F$ 、 $3F$ 、 \dots ,再把它們依次放在磁場里另一位置 B ,測得各磁極所受到的磁場力分別為 F' 、 $2F'$ 、 $3F'$ 、 \dots 。根據以上的結果可以看出:在位置 A ,磁場力和磁極強度的比總是等於 F/m ;在位置 B ,磁場力和磁極強度的比總是等於 F'/m 。也就是說,這個比值的大小只與磁場的性質有關,而與檢驗磁極的強度無關。因此,我們就可以用這個比值來量度磁場的這種性質。這種性質我們稱它為磁場的力的性質,量度這種性質的物理量稱為**磁場強度**。磁場強度是一個矢量;為了表明這個矢量的方向,我們規定:磁場中某一點的磁場強度的大小,等於放在那一點的檢驗磁北極所受到的磁場力跟它的磁極強度之比;磁場強度的方向,就是磁北極所受磁場力的方向。

如用 H 表示磁場強度, F 表示磁場力, m 表示磁極強度,則

$$H = \frac{F}{m}.$$

在厘米·克·秒制單位里,磁場強度的單位是這樣規定的:把具有1單位磁極強度的磁極放在磁場里某一點,如果作用在這個磁極上的磁場力正好是1達因,那麼這一點處的磁場強度就叫做1

厘米·克·秒制磁場强度单位,或者叫做1 奥斯特。

各点处磁場强度都相同的磁場叫做匀强磁場,各点处磁場强度不同的磁場叫做非匀强磁場。匀强磁場是很少見的,只有当两个互相平行的异种磁极,放得很近时,它們之間的磁場才近似均匀,如图 3·7 直綫部分所示。

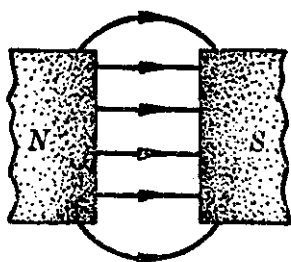


图 3·7 匀强磁場

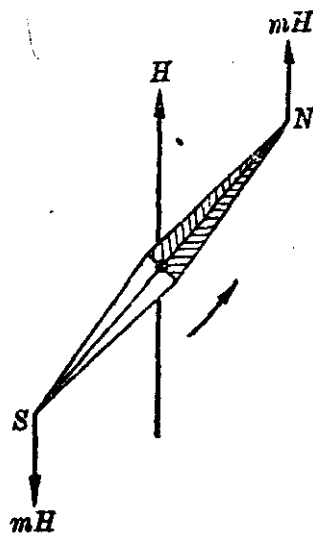


图 3·8 放在磁場里的磁針

把一个磁极强度等于 m 的磁极,放在磁場强度等于 H 的一点处,它所受到的磁場力

$$F = mH.$$

在匀强磁場里,放一个磁針,它的两个磁极各受一个大小等于 mH 的磁場力.但是这两个力的方向相反,北极所受磁場力的方向与磁場强度 H 的方向相同,南极所受磁場力的方向与磁場强度 H 的方向相反,如图 3·8 所示.这两个大小相等、方向相反的平行力組成一个力偶,它要促使磁針轉动,直到磁針 N 极的指向和磁場强度 H 的方向相同为止.这就是說:能够自由轉动的磁針,停止在磁場里的方向总和磁場强度的方向一致.

(2) 磁力綫和磁通量: 在研究电場的时候,我們曾經引用电力綫来表示电場里电場强度的分布情况.与此相似,在研究磁場时,我們也可以引用磁力綫来表示磁場里磁場强度的分布情况。

在磁場里,我們可以画出这样一些綫(直綫或曲綫),使綫上任一点的切綫方向都跟該点处的磁場强度方向一致,这些綫就叫做

磁力綫.

如果我們在磁場里任一点处放一个能够自由轉动的小磁針(把小磁針的中点放在所討論的位置上), 那么磁針北极所指的方向就是这一点处的磁場强度方向. 如果我們在磁場里排列許多小磁針, 那就可以根据各个小磁針的指向, 近似地估計出磁力綫的形状和分布情况. 图 3·9 表示的是条形磁体周圍的磁力綫分布(小

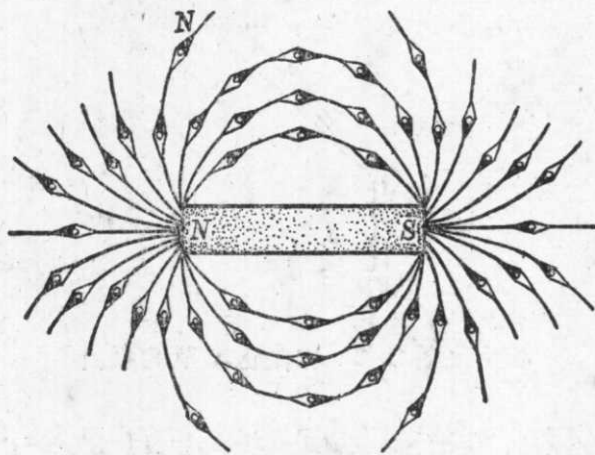


图 3·9 小磁針按磁力綫排列

磁針涂黑的一端是北极).

用鉄屑代替磁針来表示磁力綫的方法比較簡便. 先在磁場里放一块玻璃板, 并在板上撒一薄层鉄屑, 再用手指輕輕地敲击玻璃板使鉄屑可以自由轉动, 它們就按照磁力綫的形状排列, 如图 3·10 和图 3·11 所示. 鉄屑

之所以能够用来代替小磁針, 是由于鉄屑能在磁場里被磁化为小磁体. 这种現象叫做**磁感应**.

永磁体周圍的磁力綫总是从磁体的北极出发, 展伸到南极为止. 因为在磁場里的任一点处, 磁場强度只有一个方向, 所以磁力綫永不相交, 同时通过一点只能而且总能作出一根磁力綫.

和电力綫相似, 我們也可以用磁力綫的疏密来表示磁場强度

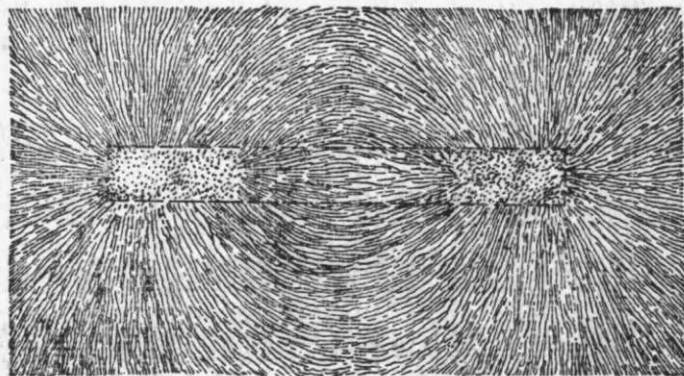


图 3·10 条形磁体周圍的磁力綫

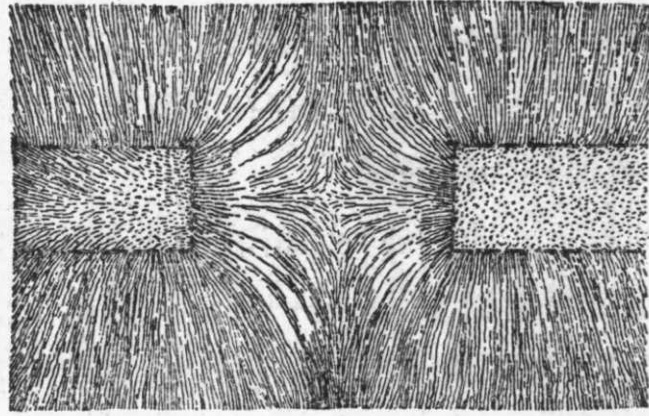


图 3·11 两个同号磁极間的磁力綫

的大小。我們規定：1 奧斯特的磁場強度，用穿过单位横截面（和磁場強度的方向垂直并具有 1 平方厘米面积的平面）的 1 根磁力綫来表示。那么，在磁場強度等于 H 奥斯特的地方，穿过单位横截面的磁力綫就是 H 根。因此，在磁場強度較大的地方磁力綫比較密，在磁場強度較小的地方磁力綫比較疏，在磁場強度均勻的地方磁力綫就疏密均匀并且互相平行。

在磁場里，垂直穿过某一横截面的磁力綫根数叫做磁通量；在这个面上的平均磁場強度等于穿过这个横截面的平均磁力綫密度（即穿过单位横截面的磁力綫根数），如用公式表示，則为

$$\bar{H} = \frac{\Phi}{S},$$

式中 \bar{H} 表示平均磁場強度， S 表示横截面的面积， Φ 表示通过横截面的磁通量。

在匀强磁場里，横截面上各点的磁場強度相同，都等于 H ，因此上式可写作

$$H = \frac{\Phi}{S},$$

或写作

$$\Phi = HS.$$

这一等式表示，在匀强磁場里，穿过任一横截面的磁通量 Φ 等于匀强磁場強度 H 和横截面积 S 的乘积。

3. 地球磁場 磁針之所以能够指示南北方向,是由于地球本身是一个大磁体,在地球的周圍存在着磁場。地球周圍的磁場叫做**地球磁場**,或簡称为**地磁場**。

根据前面的討論,我們已知磁針在靜止时的指向应是磁力綫的方向。所謂磁針指南指北,只是一种近似的說法。精密的观测指出:地磁的两极与地理的两极并不迭合,地磁的北极(*N*极)在南半球南緯 $70^{\circ}10'$ 和东經 $150^{\circ}45'$ 的地方,地磁的南极(*S*极)在北半球北緯 $70^{\circ}50'$ 和西經 96° 的地方;地磁場的磁力綫,从地磁 *N* 极出发到地磁 *S* 极終止,和地理子午面(經綫所成的平面)成一角度。磁針靜止的方向和磁力綫相切,因此它和地理子午面相交成某一角度,而不正确地指向地球的南极和北极。

通过磁針靜止位置所作的豎直平面叫做**地磁子午面**。地磁子午面和地理子午面所夹的角度叫做**磁偏角**。实际測量的結果指出,地球各处的磁偏角不同。

一般地說,地磁場的磁力綫与地理子午綫也不平行,即和地面不平行。地磁場磁力綫与水平面相交的角度叫做**磁傾角**。不同地点的磁傾角不同,在地磁极上磁傾角为 90° 。

能够在水平面上自由轉动的磁針可以用来測量磁偏角,而能够在豎直平面上自由轉动的特制磁針可以用来測量磁傾角。

地 名	磁 偏 角 (偏西)	磁 傾 角	水 平 强 度 (奧斯特)
北 京	$4^{\circ}48'$	$57^{\circ}23'$	0.289
沈 阳	$6^{\circ}49'$	$58^{\circ}43'$	0.277
兰 州	$1^{\circ}15'$	$53^{\circ}24'$	0.312
上 海	$3^{\circ}13'$	$45^{\circ}25'$	0.333
武 昌	$2^{\circ}23'$	$44^{\circ}34'$	0.343
成 都	$0^{\circ}58'$	$45^{\circ}06'$	0.346
广 州	$0^{\circ}47'$	$31^{\circ}41'$	0.375

为了确定地球上某一地点的磁場强度(方向和大小),我們需要了解三个物理量,即磁偏角、磁傾角和磁場强度的大小。通常我們称磁偏角、磁傾角和磁場强度的水平分量大小为**地磁三要素**。上表所列出的的是我国几个城市的地磁三要素。

§ 3·2 电流的磁場

在1820年,丹麦物理学家奥斯特发现了通电导体的周圍存在着磁場。如图3·12所示,奥斯特在靜止磁針的上方平行地拉直一根导綫,然后通过电流(方向如图示),发现磁針的北极向着紙外偏轉;电流方向改变时,发现磁針北极的偏轉方向也改变了(即变成向着紙內偏轉)。实验的結果說

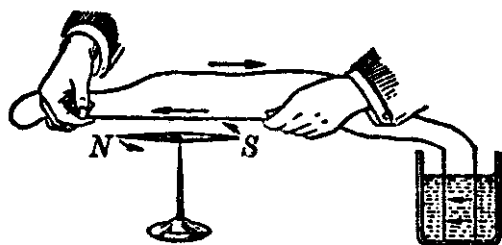


图3·12 奥斯特实验

明:电流的周圍存在着磁場,磁場的方向(即磁場强度的方向)和电流的方向有关。

奥斯特实验的重大意义就在于它揭露了电現象和磁現象之間的联系,为电学的研究开辟了新的道路,并扩大了电的实际应用范围。

1. 直綫电流的磁場 用一根直导体,垂直地穿过一块水平玻璃板或硬紙板(在板中央有一小孔以便导体穿过),并在板上撒一层很薄的鉄屑。当电流通过这个垂直导体时,我們用手指輕敲玻璃板以振动板上的鉄屑。这时,鉄屑在电流磁場的作用下,沿磁力綫方向排列起来(如图3·13所示)。至于磁力綫的方向可用小磁針来檢驗,图3·14里小磁針北极(黑色的一端)所指的方向就是磁力綫的方向(即磁場强度的方向)。

从图上还可以看出,电流磁場里的磁力綫,并不是从什么磁极出发到什么磁极終止的,而是环繞着电流的一些閉合曲綫。其实磁体的磁力綫也是閉合曲綫,它在磁体的外部从北极到南极,在磁

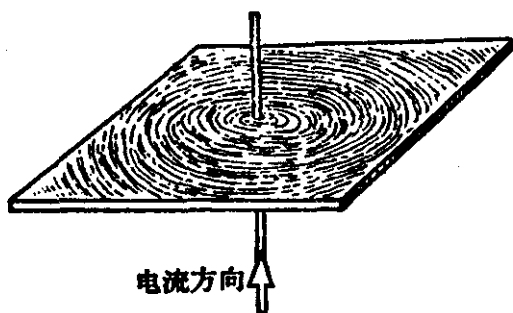


图 3-13 直綫电流磁場的磁力綫

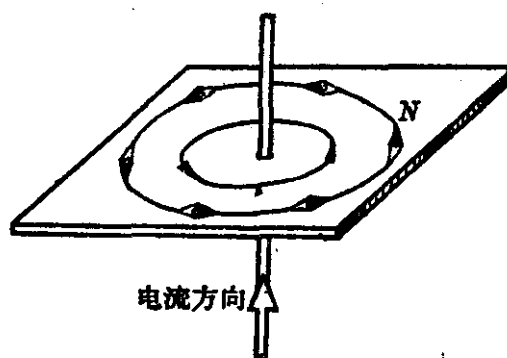


图 3-14 直綫电流磁場的磁力綫方向

体的内部从南极到北极；并不象电力綫那样从正电荷出发到負电荷終止。

直綫电流周圍的磁力綫，是一些在垂直于电流的平面上的同心圓，这些圓的公共中心就在电流穿过磁力綫平面的地方。靠近电流的地方磁力綫分布得比較密，这就表示磁場强度比較大；远离电流的地方磁力綫分布得比較疏，这就表示磁場强度比較小。如果我們的眼晴沿着电流前进的方向，那么将会发现所有的磁力綫都

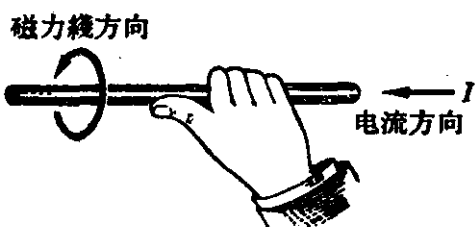


图 3-15 右手拇指法則之一

沿着順时針的方向。为了便于記忆，磁力綫方向和电流方向之間的关系，可用图 3-15 所表示的右手拇指法則来表示：用右手握住

导綫并把拇指伸直，如果拇指指

向电流的方向，那么环绕导綫的四指就指示出磁力綫的方向。理論和实验都証明：当一根很长的直导体中有电流通过时，在它周圍磁場里任一点处的磁場强度 H 跟电流强度 I 成正比，跟这一点到导体的垂直距离 r 成反比。

2. 环电流的磁場 先把导体做成环状，再使它通电，电流方向如图 3-16 所示。用撒鉄屑的方法可以得知磁力綫的分布情况，并可看出它們都是环绕通电导体的閉合曲綫，在靠近导体处有些象同心圓。用小磁針檢驗，可以发现磁力綫的方向如小箭头所示。

实验和理論都証明：在环中心处的磁場强度 H 跟电流强度 I

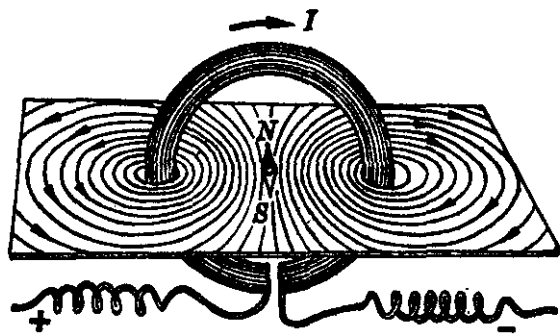


图 3·16 环电流磁场的磁力线

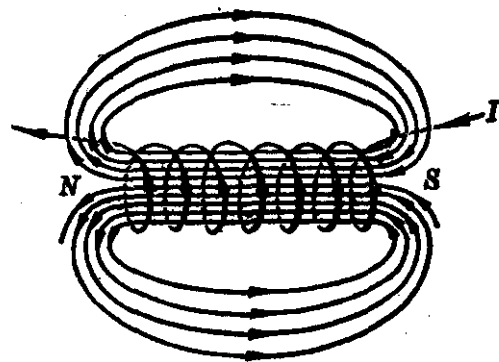


图 3·17 通电螺线管磁场

成正比,跟环半径 R 成反比.

3. 通电螺线管的磁场 把导线绕成螺线管形,通电后磁力线分布情况如图 3·17 所示.在螺线管内部的磁力线大部分是和管轴平行的,在螺线管的两端磁力线逐渐向外散开.每一根磁力线都是穿过螺线管内部的封闭曲线.

理论和实验都证明:长螺线管内部的磁场强度大致均匀.这个匀强磁场的强度 H 跟通过导线的电流强度 I 以及线圈的匝数 n 成正比,跟螺线管的长度 l 成反比.

根据磁力线的分布情况,我们可以把整个螺线管看做是一个条形磁体,磁力线出发的一端相当于北极,磁力线进入的一端相当于南极.如果把通电管悬挂起来,使它能够在水平面上自由转动,那么它也会象条形磁体一样,静止在指南指北的方向上.所以我们可以说,通电螺线管具有两个磁极,各在管的一端.

通电螺线管的极性,可用图 3·18 所表示的右手拇指法则来说明:用右手握住螺线管,使环绕螺线管的四指指示电流的方向,则伸直的拇指所指的一端是北极,即拇指指向磁力线发出的一端.

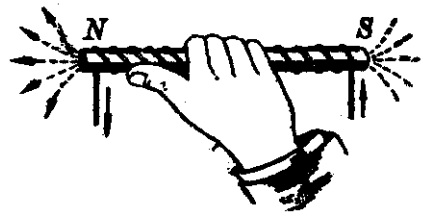


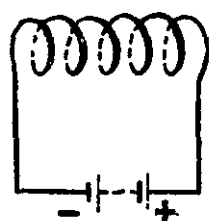
图 3·18 右手拇指法则之二

通电螺线管可以看做是串联起来的环电流,而每匝线圈相当于一个环电流.于是环电流可以相当于一个很短的条形磁体,它

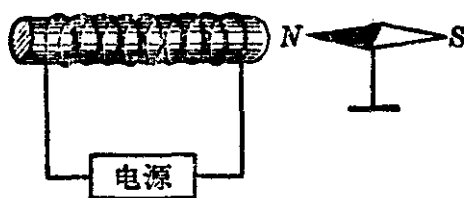
也有北极和南极,并且也遵循上述的右手拇指法则。

习 题 3·2

1. 如果电流的方向是自北向南,现在在它的上方放一个可以自由转动的小磁针,问磁针的北极偏向何方?为什么?
2. 某人站在一根南北方向的电线下方,发现磁针的磁北极向东偏转,问线上的电流方向是怎样的?为什么?
3. 把一个线圈平放在桌面上,并沿顺时针方向通过电流。如果在线圈的中心处有一个磁南极,问它要向哪个方向运动?为什么?
4. 什么叫磁力线?根据磁力线的分布情况可以说明什么?放在磁场里的磁针最后停在什么方向上?
5. 在匀强磁场和非匀强磁场里,磁力线的分布各有些什么不同?在直线电流的磁场里,为什么在靠近电流处的磁力线要画得比较密集些?
6. 什么叫做磁通量?磁场强度和磁通量之间有什么关系?
7. 试确定附图中通电螺线管的北极和南极。
8. 试确定附图中电源的正极和负极。



(第7题)



(第8题)

§ 3·3 磁感应和电磁铁

1. 磁感应 在图3·19上有一根铁钉,它原来没有磁性,所以不能吸引铁屑。当我们把一个磁体移近铁钉之后,它就吸引铁屑了,也即具有了磁性。这说明,铁钉被近旁的磁体磁化了,或说被磁体的磁场磁化了。

在原来没有磁性的铁棒上,用绝缘导线(即有绝缘包皮的导线)绕成螺线管形(如图3·20所示)。当电流通过螺线管线圈时,铁棒就具有了磁性,能够吸引铁屑或小铁钉。这说明,铁棒被螺线

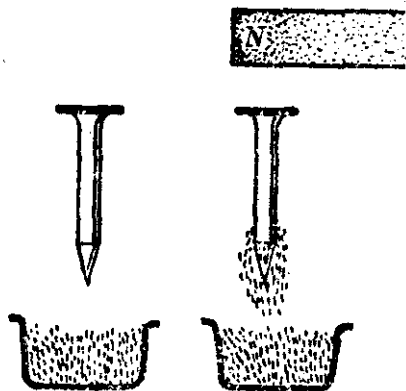


图 3·19 磁感应现象(一)

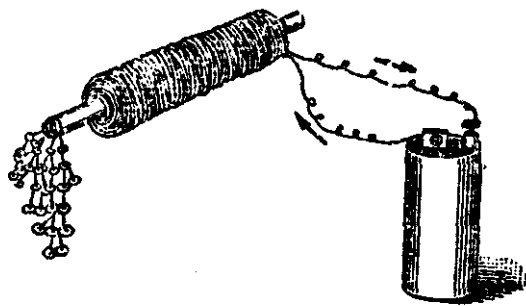


图 3·20 磁感应现象(二)

管里的电流的磁场磁化了。

物质在磁场中被磁化的现象叫做**磁感应**。实验证明，所有铁磁性物质都能够被磁场感应。铁磁物质被感应磁化后，又产生附加磁场，这就大大地加强了原来的磁场强度。实验指出，有些物质（如铁和钢）磁化后的附加磁场比原有的磁场强几千倍以上，而另一些物质（如钴、镍等）磁化后的附加磁场只比原有的磁场强几十倍或几百倍。由此可知，不同的物质被磁化的程度是不同的。

把铁磁物质放在通电螺线管里磁化。断电以后，它们的磁性并不完全失去，而是有不同程度的保留。这种被保留下来的磁性叫做**剩磁**。软铁保留磁性的本领最小，在断电以后它几乎立即失去全部的磁性，所以经常被利用来制造**电磁铁**。钢和一些合金保留磁性的本领很大，所以被经常用来制造**永磁体**。

2. 电磁铁 在螺线管里加一个软铁心，就制成了一个最简单的电磁铁。通常应用的电磁铁大多是蹄形的（如图 3·21 所示），

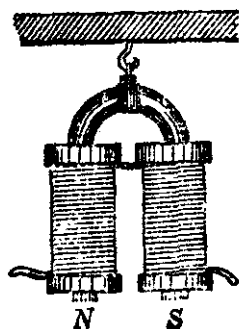


图 3·21 蹄形电磁铁

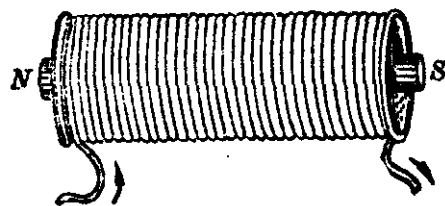


图 3·22 条形电磁铁

或条形的(如图 3·22 所示)。图 3·23 表示一只电磁起重机上的大型电磁铁。它的内部是一只蹄形电磁铁，我們可以用它来搬运重大的铁器。

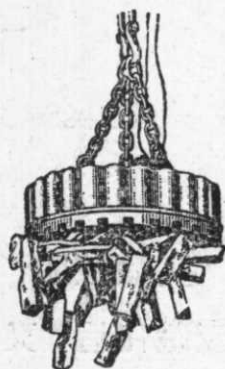


图 3·23 电磁起重机

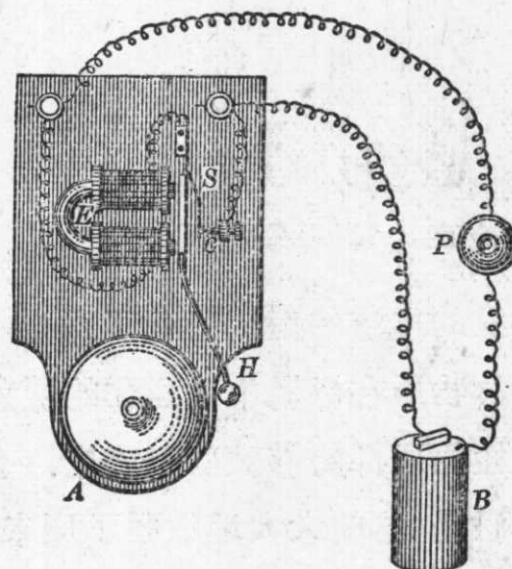


图 3·24 电铃装置

实验和理论都指出，如果螺线管上导线的匝数越多，导线上的电流越强，那么电磁铁的作用也就越强。因此，我们可以按照需要来决定螺线管上导线的匝数和通过螺线管导线的电流强度。

电磁铁在日常生活和生产技术上都有广泛的应用。

(1) 电铃：图 3·24 所示的是一套电铃装置。图中 E 是一个蹄形电磁铁；靠近磁极的地方有一个用软铁制成的弹簧振子，它的上端固定，下端与铃锤 H 相联； C 是一个小螺丝（铜制）。电路的连接如图所示。当我们按下电钮 P 以接通电路时，电流通过螺线管而使铁心磁化，同时吸引振子向左运动，并带动小锤 H 敲打铃 A 。当振子向左运动时，电路在 C 处断开（簧片 S 与螺丝钉 C 分开），于是铁心失去了磁性，在弹簧的弹力作用下振子向右运动恢复原位，这就又重行接通了 C 处的电路。在电磁铁和弹簧片的交替作用下，振子不断地左右摆动，小锤 H 也就不断地敲打铃 A ，直到我们松开电钮 P 为止。

(2) 电报：图 3·25 是说明电报工作原理的简图。 A 是发报

机构， B 是收报机构。发报机的主要装置是一个铜制的发报电键 K 和一組电池。收报机的主要装置是一个由电磁铁操纵的符号记录器；其中 W 和 W' 是两个能够匀速轉动的輪子， R 是一个滚軸。 W 上卷着空白的紙条，繞过 R 后接在 W' 上，收报时匀速轉动 W' ，使 W 上的紙条逐漸卷上 W' 。在靠近电磁铁 M 的一极处有一个鉄制的杠杆 CF ， F 是一个带有墨水的薄边小輪。为了节约用銅，电路的一部分是銅导綫，另一部分是借用地面（潮湿的泥土是相当好的导体），称为地綫。当发报人按下电键时，电路接通，电磁铁 M 就吸引杠杆的 C 端向下，同时小輪 F 却向上压紧紙条并留下画痕。发报人松开电键时，电路断开， M 就失去了磁性，这时在彈簧 S 作用下，小輪 F 离开了紙条。按下电键的时间长一些， F 輪就在紙条上画下一条长痕（—）；按的时间短一些，它就在紙条上画下一个短痕（·）。按照規定把（—）和（·）組織起来，就表达了一定的文字意义。

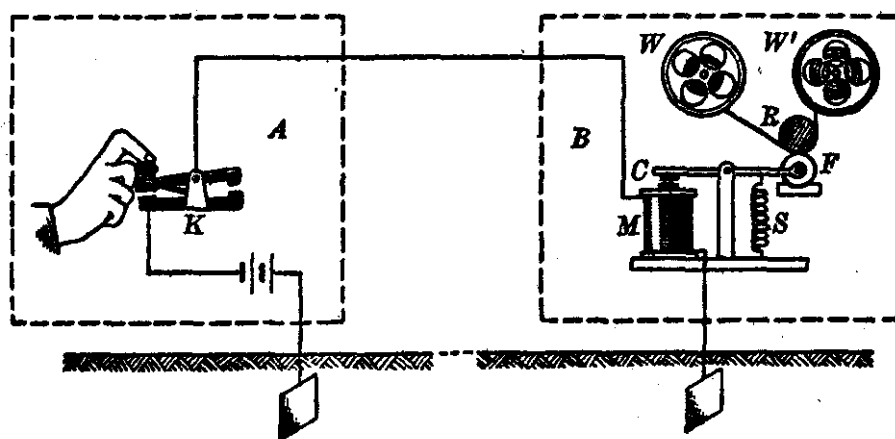


图 3.25 简单电报装置图(一)

我国通常用的电报符号有十个，每个符号代表一个数目字（如图 3.26 所示）。每四个数目字組成一个字，例如：0022(中)5478(华)0086(人)3046(民)0364(共)0735(和)0948(国)5502(万)2979(岁)。

实际应用的电报机比上面所讲的要复杂得多，并且在每一个电报局里都有发报机和收报机。图 3.27 表示最简单的收、发装置

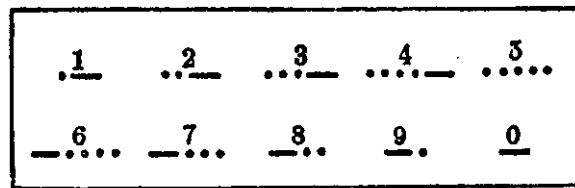


图 3·26 通用电报符号

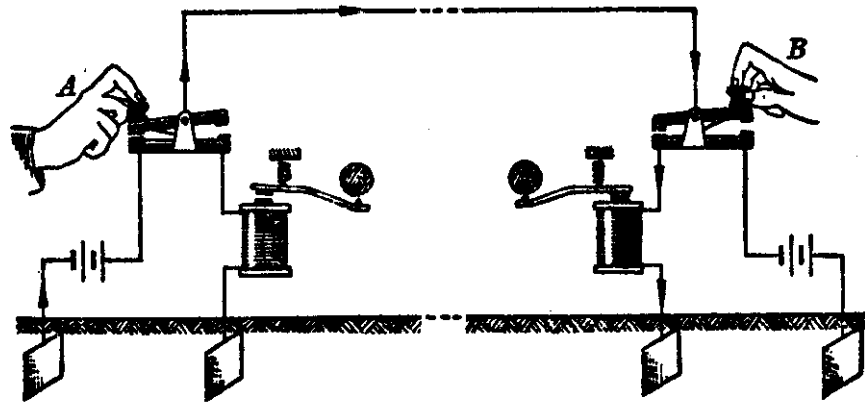


图 3·27 简单电报装置图(二)

俱备的电报机。

(3) 电磁替續器：在自动控制和远距离操纵方面，替續器是一种很重要的装置。替續器的工作原理是利用弱电流电路的接通或断开，来控制另一个强电流电路的接通或断开，从而改变这个电路上的用电情况。用电磁鉄做成的替續器叫做电磁替續器。

图 3·28 表示一个电磁替續器的遥控示意图。整个系统包含两个电路。一个是弱电流电路，用电池做电源，串联着一个电鍵 K 和一个电磁替續器 E 。一个是强电流的电路，和电源串联的是一

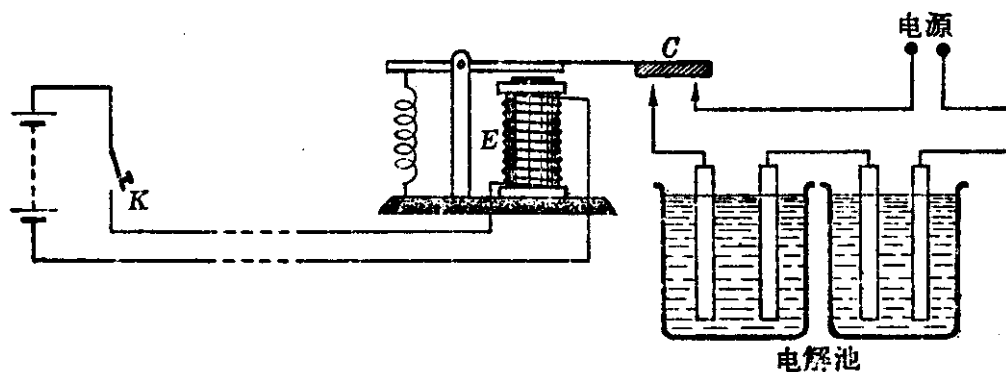


图 3·28 用电磁替續器遥控示意图

系列的电解池。电键 K 可以装在距离电解池很远的地方。只要一按下电键 K , C 处的电路就被接通, 电解池就开始工作; 一松开电键 K , C 处电路就被断开, 电解池就停止工作。

(4) 电磁选矿机: 在冶铁厂里为了从铁矿中去除不含铁的砂石, 在制造纯净玻璃的工厂里为了从砂石中清除含铁的杂质, 都可应用电磁选矿机。图 3.29 是电磁选矿机的构造示意图。

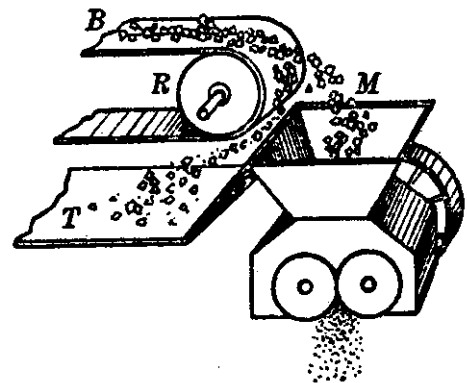


图 3.29 电磁选矿机

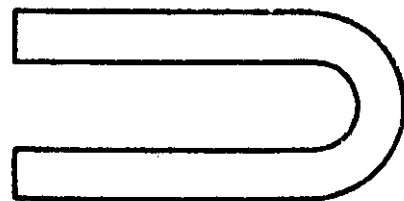
大滚筒 R 是一个强电磁铁, 当由传送带 B 传送来的矿石到达大滚筒处时, 铁磁物质被隔着皮带的磁铁所吸引, 要等它转到皮带下方才离开滚筒落入 T 槽, 非铁磁物质却直接跌入碎石机 M 中被轧成粉末。

习 题 3.3

1. 要使如附图所示的软铁棒变成左端是 N 极右端是 S 极的电磁铁, 应当怎样绕导线并怎样通电? 试作图表示。



(第 1 题)



(第 2 题)

2. 要使附图所示的蹄形软铁变成 N 极在上、 S 极在下的电磁铁, 应当怎样绕导线并怎样通电? (作图表示)

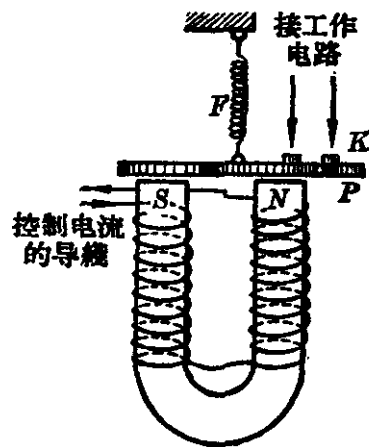
3. 在蹄形软铁棒上绕通电导线, 问导线怎样绕法才能不发生磁化的现象?

4. 试详细说明图 3.27 所示的电报机之工作原理。

5. 试作简图来说明电铃的工作原理。

6. 试详细说明图 3.28 中的替续器的工作过程。

7. 下图是电磁替續器的示意图, 其中 P 是鉄片, F 是彈簧, K 代表工作电路的电鍵. 試分析說明这种替續器的工作原理.



(第7題)

§ 3.4 磁性起源假說

1. 庫侖假說 根据永磁体可以无限分割为小磁体的現象, 庫侖首先提出了元磁体假說. 他认为: 凡是可以磁化的鉄磁物质, 都是由許多具有两个异号磁极的极小的磁体所組成, 这种小磁体叫做元磁体, 或叫做分子磁体.

在未經磁化的鉄磁体里, 虽然存在着許多元磁体, 但由于它們无秩序地排列(如图 3.30 所示), 所有元磁体的磁极作用都互相抵消, 因而对外不起任何磁性作用.

把鉄磁体放在磁場里, 即放在永磁体的近旁或通电螺綫管里,

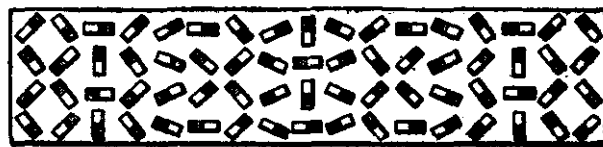


图 3.30 未磁化的鉄磁体



图 3.31 已磁化的鉄磁体

部分元磁体因为受到磁場的作用而发生偏轉，在一定程度上按照磁場的方向作有秩序的排列(如图 3·31 所示)。这时，各个元磁体的磁极作用并不完全抵消。作为一个整体來說，它們对外显示出一定程度的磁性作用。这就是說，鉄磁体在不同程度上是被磁化了。

把鉄磁体放在强磁場里，并用振动或加高温度的办法来增加元磁体的活动性，結果就可以使元磁体按照磁場方向排列成行，如图 3·32 所示。此时，在鉄磁体内部，元磁体的磁极作用仍然互相抵消，但在鉄磁体的两端則显示出最强的磁极作用。这种情况称为**飽和磁化**，意即該鉄磁体已經磁化到了最大限度了。

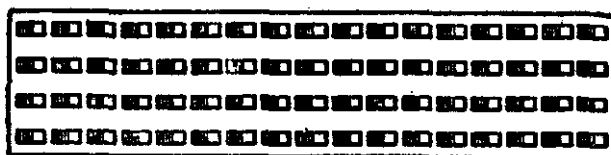


图 3·32 磁化飽和了的鉄磁体

庫侖假說告訴我們，鉄磁体的磁化过程，就是它内部的元磁体，在外磁場的作用下，从无規則排列轉变成有規則排列的过程。庫侖假說揭示了鉄磁体磁化的原因，但对元磁体为什么具有磁性，并未加以說明，也沒有涉及磁現象和电現象之間的联系。

2. 安培假說 在奥斯特发现了磁現象与电流之間的关系以后，安培又在庫侖假說的基础上，进一步提出了**磁性起源假說**。他认为：元磁体就是原子、分子、分子团等物质微粒，它們之所以具有磁性，是由于在每个微粒里都具有永不停息的环电流。这也就是說，元磁体的磁場是由环电流产生的，元磁体的两极分在环电流的兩側。这种环形电流，在当时只是一种假說，人們叫它做**安培电流**。直到电子理論得到高度发展，人們对原子結構有了深刻的認識以后，安培电流才有了真实的意义。即原子、分子和分子团里的电子运动形成了安培电流。

在鉄磁体不显示磁性时，各个物质微粒里的安培电流的旋轉

方向是杂乱无章的(如图 3·33(a)所示), 它们的磁作用在内部互相抵消。在铁磁体被磁化后, 各个物质微粒里的安培电流的旋转

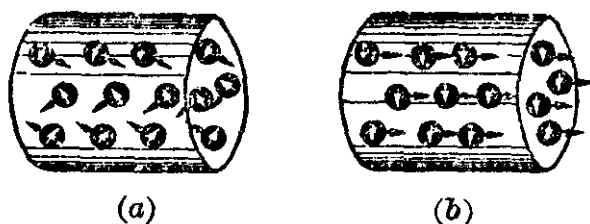


图 3·33 安培磁性起源假说的附图

平面在不同程度上转成相互平行, 并且向着同一个方向转动(如图 3·33(b)所示)。

安培假说很成功地阐明了磁现象的电本质。它使

我们认识到, 任何磁体的磁性, 都是由于电流的存在产生的。

§ 3·5 磁场对电流的作用

安培假说指出, 一切磁性都起源于电流。我们已知磁场对磁体有力的作用, 那么, 磁场对电流有没有力的作用呢? 关于这一问题, 在奥斯特发现了电流磁场的二年后, 安培通过实验, 发现磁场对电流确有力的作用。我们现在按照不同的情况分述如下。

1. 磁场对直导线电流的作用 先把一根直导体 AB 的两端用两个细而轻的铜制螺旋弹簧吊住(如图 3·34 所示)。再通过一个电键把 AB 串联到电池的两极上, 然后移来一个蹄形磁铁, 使导体 AB 横在磁铁的两极之间, 并与磁力线相垂直。关上电键接通电路, 使电流从直导体的 A 端流入、 B 端流出, 我们就可以看到通电导体 AB 要向上运动, 直到弹簧有了一定程度的缩短为止(如图 3·34(a)所示)。这说明, 当电流从 A 流入、从 B 流出时, 通电直导体 AB 受到一个向上的磁场力 F 的作用。如果不改变磁场的方向而单独改变电流的方向(即使电流从 B 端流入、 A 端流出), 则通电直导体 AB 要向下运动, 直到弹簧有了一定程度的伸长为止(如图 3·34(b)所示)。这说明, 当电流从 B 流入、从 A 流出时, 通电直导体 AB 受到一个向下的磁场力 F 的作用。如果不改变原先电流的方向而仅仅反转一下磁场的方向, 则作用在通电直导体 AB 上的磁场力方向也要改变(向下)。如果同时反转电流和磁场的方向,

則通電導體 AB 所受到的磁場力方向仍舊向上。

這些實驗，一方面說明通電導體（或稱載流導體）要受到磁場力的作用，另一方面說明通電導體所受磁場力的方向跟電流及磁場的方向有關。圖 3·35 記錄了三者之間的方向關係。從左向右，對着通電導體 AB 的 B 端看去，如果電流的方向從 A 向 B ，即流向讀者，用 \odot 表示；如果電流的方向從 B 到 A ，即向背離讀者的方向流去，用 \ominus 表示。圖中 H 表示磁場方向， F 表示通電導體所受磁場力的方向。

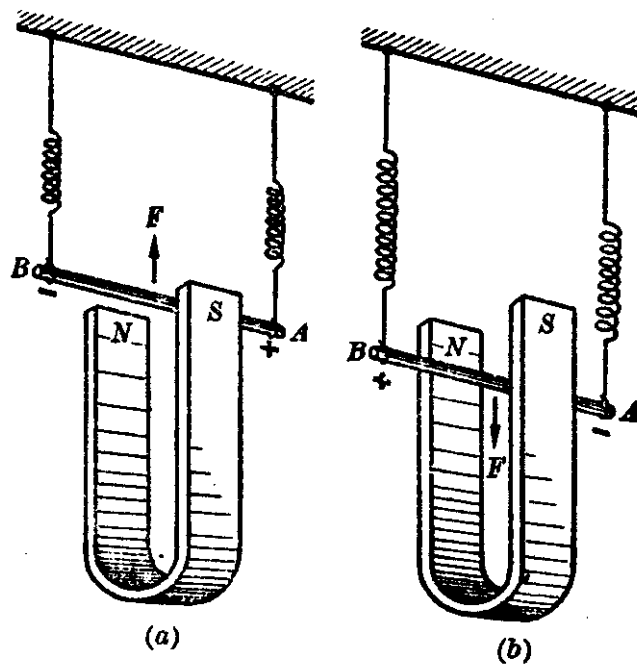


圖 3·34 磁場對直線電流的作用

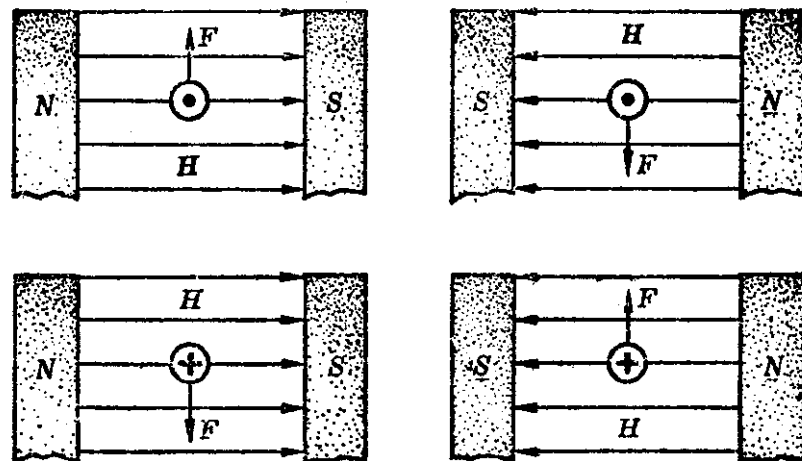


圖 3·35 電流、磁場和磁場力的方向圖

为了更方便地掌握电流、磁场和磁场力三者之间的方向关系，我们可以应用图 3·36 所示的左手法则：伸出左手，把手掌摊平，

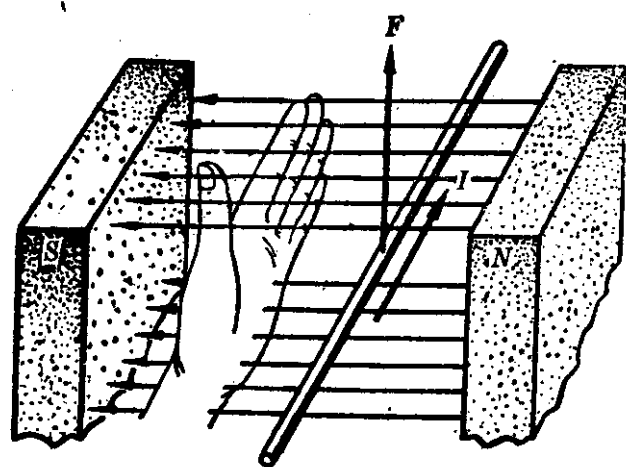


图 3·36 左手法则

让拇指和其余四指垂直并同在一个平面内；把伸开的左手放入磁场中，使掌心对着磁力线的来向，并使四指指着电流的方向，这时拇指所指的就是通电导体所受磁场的方向。

定量的实验还指出：在匀强磁场里，当通电导体和

磁力线垂直时，磁场作用在通电导体上的磁场力 F 跟磁场强度 H 、电流强度 I 和直导体的长度 L (在磁场里的这一段导体的长度) 成正比。即

$$F = KHIL,$$

式中的比例恒量 K 与各量所采用的单位有关。当磁场强度 H 的单位为奥斯特，电流强度 I 的单位为安培，长度 L 的单位为厘米，磁场力的单位为达因时，比例恒量 K 的数值等于 0.1 (理论推导从略)。因此，在选用上述单位时，前面的公式可以写作：

$$F = 0.1HIL.$$

实验的结果还指出，当通电导体和磁力线相平行时，作用在导体上的磁场力等于零；当通电导体和磁力线成任意角度 θ 时 (如图 3·37 所示)，磁场力的大小与夹角 θ 有关。这一关系可推导如下：

把磁场强度 (矢量) H 分成两个分量：一个分量 $H_1 = H \sin \theta$ ，和通电直导体垂直；另一个分量 $H_2 = H \cos \theta$ ，和通电直导体平行。由于只有前一个分量对通电导体有力的作用，后一个分量对通电导体没有力的作用，所以在这种情况下，通电导体所受到的磁场力

$$F = 0.1HIL \sin \theta.$$

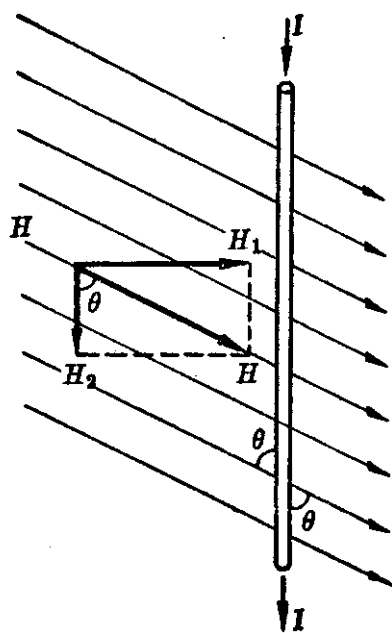


图 3·37 通电导体与磁力线成任意角度 θ

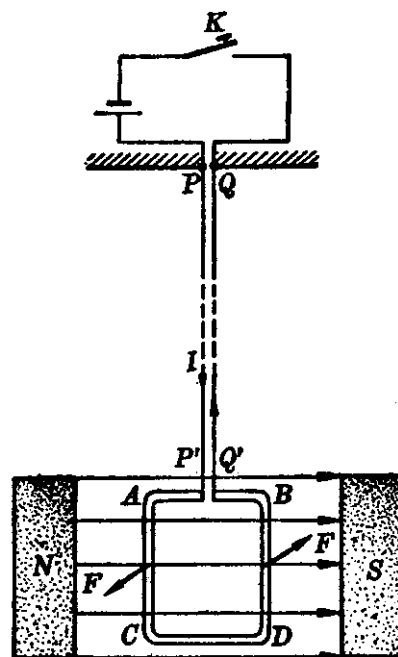


图 3·38 磁场对通电线圈的作用(一)

2. 磁场对通电线圈的作用 把一个通电的矩形线圈 $ABCD$ 放入匀强磁场里, 使线圈平面和磁力线的方向平行, 如图 3·38 所示. 图中 PP' 和 QQ' 是两根悬在磁场外面的细导线, 它们都不受磁场力的作用. 线圈的 AB 边和 CD 边都和磁力线平行, 它们都不受磁场力的作用. 只有线圈的 AC 边和 BD 边才是和磁力线垂直的, 它们各受到一个磁场力 F 的作用. 这两个力 F 的作用线平行, 方向相反, 大小都是

$$F = 0.1HIL.$$

图 3·39 表示通电线圈在磁场中不同位置时, AC 边和 BD 边的受力情况. 由于在作图时是从上向下看的, 所以只能看见线圈的 AB 边, 而看不到其余各边. 图中 A 端的 \otimes 号表示 AC 边里的电流方向是从上向下, B 端的 \odot 号表示 BD 边里的电流方向是从下向上. 现就不同的情况分别说明如下:

(1) 当线圈平面跟磁力线平行时, AC 边和 BD 边所受到的两个磁场力 F 组成一个如图 3·39(a) 所示的力偶, 使线圈沿逆时针方向转动. 这个力偶的转矩

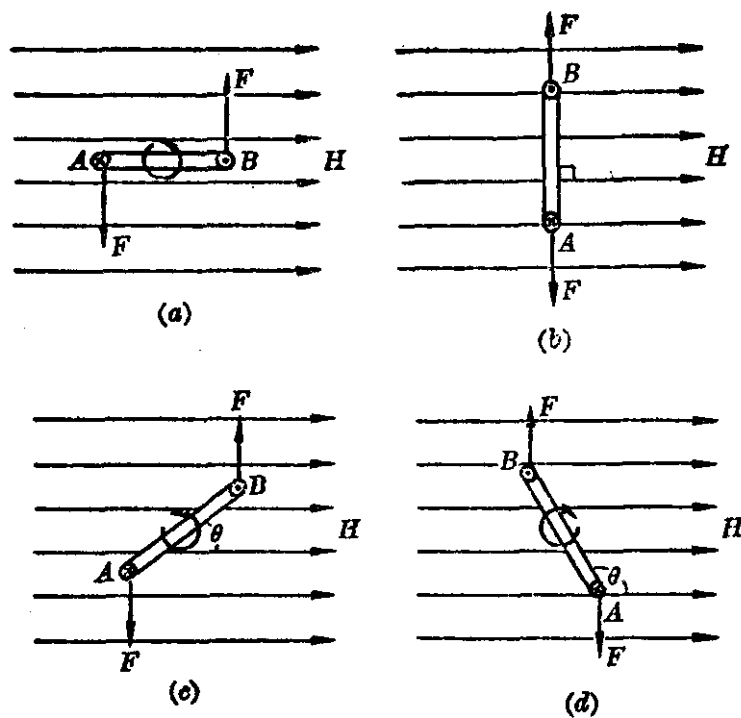


图 3·39 磁场对通电线圈的作用(二)

$$M = F \cdot \overline{AB} = 0.1HI \cdot \overline{AC} \cdot \overline{AB}$$

因为 $\overline{AC} \cdot \overline{AB}$ 等于线圈的面积 S ，所以上式可以写成

$$M = 0.1HIS$$

(2) 在线圈平面跟磁力线垂直时，上述两个磁场力 F 的大小相等、方向相反并在同一直线上，如图 3·39(b) 所示。此时，通电线圈在磁场力的作用下处于平衡状态。这个位置（线圈平面和磁力线成 90° 角）称为线圈的平衡位置。

(3) 在线圈平面跟磁力线成任意角度 θ 时，上述两个磁场力 F 的大小照旧不变，但力偶臂（两力间的垂直距离）有了缩短，不再象 (a) 图中所示的那样等于 \overline{AB} ，而是象 (c) 图和 (d) 图那样等于 $\overline{AB} \cos \theta$ 。此时，通电线圈所受到的力偶使它向平衡位置转动。这个力偶的转矩

$$M = F \cdot \overline{AB} \cos \theta = 0.1HI \overline{AC} \overline{AB} \cos \theta,$$

或写作

$$M = 0.1HIS \cos \theta.$$

显然,在上述情况中线圈的 AB 边和 CD 边,除在第一种情况下不受磁场的力作用外,在其余位置都要受到磁场的力作用,不过两边所受的磁场力大小相等、方向相反、并在同一直线上,所以它们互相平衡。

上面所讲的第三种情况,可以看做是一般的情况;第一和第二两种情况可以看做是特殊情况,前者 $\theta=0$, 后者 $\theta=90^\circ$ 。因此,最后的一个等式也可以看做是一个一般公式,它的意思就是说:通电线圈在磁场里要受到磁场的力偶作用,这个力偶的转矩 M 跟通过线圈的电流强度 I 、磁场强度 H 、线圈的面积 S 以及线圈平面和磁力线交角的余弦成正比。

理论证明,上面这个公式不仅对矩形线圈适用,对任何形状的通电线圈也都适用。但必须注意,上面这个公式只适用于单匝线圈;在求多匝线圈所受到的力偶矩作用时,应当把公式变成

$$M = 0.1NHIS \cos \theta,$$

式中 N 为线圈的匝数。

3. 平行电流间的相互作用 我们已知电流的周围存在着磁场,还知道磁场对电流有力的作用,因此我们就很容易想象,电流与电流之间应当有通过它们磁场的相互作用。

在图 3·40 里悬挂着两根互相平行的直导线 A 和 B , 它们的下端同浸在一个水银杯里。图 3·40(a) 中的平行导线里有反向电流通过,图 3·40(b) 里的平行导线里有同向电流通过。实验的结果指出,在有反向电流通过时两根导线相斥,在有同向电流通过时两根导线相吸。

这种相互作用的原因,是由于 A 电流的磁场对 B 电流有作用,同时 B 电流的磁场对 A 电流也有作用。图 3·41 表示两根通电导体周围的磁场情况(从上向下看)。其中(a)图里的两电流反向,在导线 A 里向上流,在导线 B 里向下流。(b)图里的两电流同向,在两根导线里电流方向都向下。磁力线的方向用右手拇指法则来决定(参看图 3·15)。

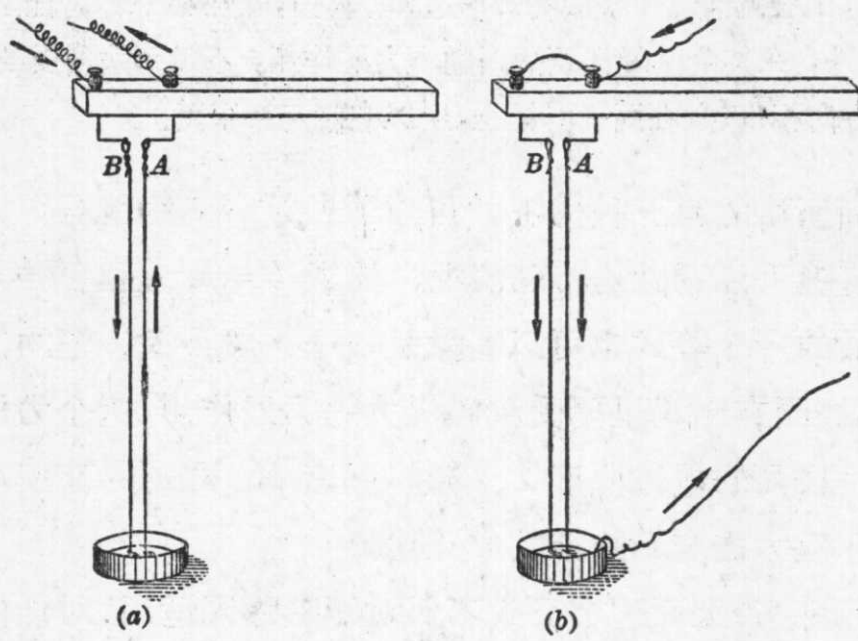


图 3.40 平行电流間相互作用的实验装置

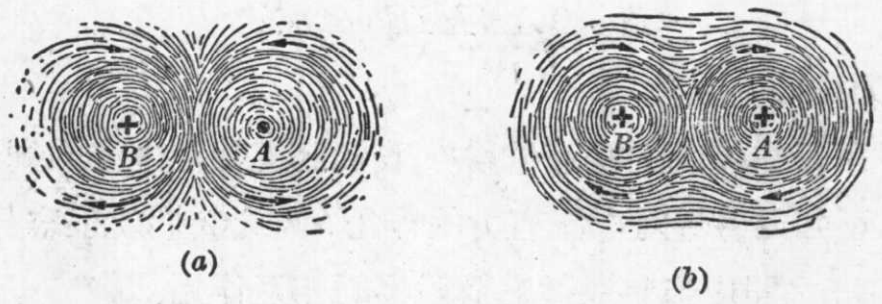


图 3.41 平行电流周圍的磁場

現用 3.41(a) 图所示的情况来分析，先考虑电流 A 的磁場对通电导体 B 的作用。我們以导綫 A 的横截面中心为圓心，以两导綫横截面中心之間的距离为半徑画一个圓，如图 3.42 所示。它是电流 A 周圍磁場里的一根磁力綫，方向是逆时針的，由右手拇指法

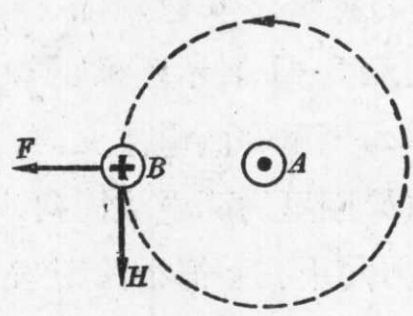


图 3.42 反向平行电流相斥

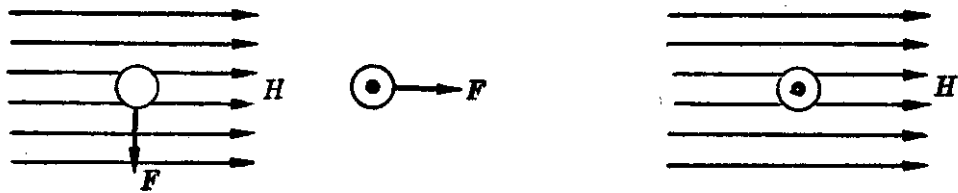
則决定。图中 H 为 B 处的磁場强度方向，它和磁力綫相切。应用左手法則可知通电导体 B 所受磁場力 F 的方向向左。用同样的方法考虑电流 B 的磁場对通电导体 A 的作用，得出它所受磁場力 F 的方向向右。这就是說，它們所受到

的磁場力迫使它們相互分离,即它們相斥。

用同样的方法来分析图 3·41(b) 所示的情况,結果得知,两同向的平行电流相互吸引。

习 題 3·5

1. 下图表示一个放在磁場里的通电直导体。图中已标明了电流强度、磁場强度和磁場力这三个物理量中的两个量的方向。試画出第三个量的方向。



(第1題)

2. 通电直导体在磁場中所受磁場力的大小和哪些物理量有关? 有着怎样的关系?

3. 把一根电流强度为 8 安培, 长度为 15 厘米的导线放在匀强磁場里。如果在导线和磁力綫垂直时量得的磁場力为 3000 达因, 求磁場强度。如果使导线和磁力綫相交成 30° 角, 問磁場力应为多大?

4. 把一个通电綫圈放在匀强磁場里。問在什么位置时綫圈所受磁場力的力偶矩最大? 在什么位置时为零? 在什么位置时为最大值的一半?

5. 在一个半径为 4 厘米的导线圆环里, 通入 6 安培的电流, 并把它豎直放在水平磁場(磁力綫方向水平)里, 使它的平面和磁力綫平行。如果磁場强度等于 100 奥斯特, 那么导线环所受磁場力的力偶矩应是多大?

6. 把一个通电的矩形綫圈悬挂在匀强磁場里。試分別說明在下列两种情况下綫圈四条边的受力情况。(1) 綫圈平面和磁力綫平行; (2) 綫圈平面和磁力綫垂直。

7. 在两根互相平行的导线里, 通过同向电流, 問它們将怎样相互作用? 为什么?

8. 在两根互相平行的导线里, 通过反向电流, 問它們将怎样相互作用? 为什么?

9. A、B、C 是三根通电的平行导线, C 在 A 和 B 的正当中。如果通过 A 和 B 的电流方向相同, C 所受到的磁場力情况怎样? 如果通过 A 和 B 的

电流方向相反, C 所受到的磁場力情况又将是怎样的?

10. 把 20 匝的矩形綫圈(参看图 3·37)放在磁場强度为 50 奥斯特的磁場里. 已知綫圈的 AB 边等于 10 厘米, AC 边等于 15 厘米, 通过的电流等于 4 安培. 当綫圈平面与磁場平行时, 綫圈所受磁場力的力偶矩等于多大? 当綫圈平面和磁力綫成 30° 角时, 所受磁場力的力偶矩又等于多大?

§ 3·6 电流計, 安培計和伏特計

1. 电流計 电流計是一种用来測量电流强度并檢驗电流方向的仪器. 最常用的电流計叫做**动綫圈电流計**, 是根据通电綫圈要在磁場中轉动的道理制成的.

动綫圈电流計又叫做**达松发尔电流計**.

我們已經知道, 通电綫圈在匀强磁場里所受到的力偶矩为

$$M = 0.1NHIS \cos \theta.$$

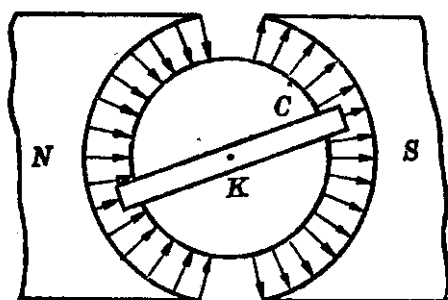


图 3·43 均匀輻向磁場

如果把蹄形磁体的两个磁极各做成半个空心圓柱状, 并在两极之間装置一个圓柱形的軟鉄 K , 使磁极和軟鉄柱之間的空隙很狹, 那么我們就可以得到一种如图 3·43 所示的

磁場. 在这种磁場里, 空隙里的磁力綫几乎完全是沿圓柱的半徑方向 (即和圓柱面垂直), 并且分布均匀. 这种磁場就称为**均匀輻向磁場**, 它的磁場强度大小均匀, 方向沿圓柱的半徑, 即輻向.

均匀輻向磁場与匀强磁場不同, 它的磁場强度的大小虽然相等, 但磁力綫的方向却不一样 (沿着輻向), 而匀强磁場的方向是平行的.

如果在軟鉄圓柱体的外面, 套上一个矩形通电綫圈 C (图 3·43), 則不管它在什么位置, 綫圈平面总是和磁力綫平行的 (即 $\theta = 0$), 它所受到的力偶矩总是

$$M = 0.1NHIS,$$

不象在匀强磁场里与角度 θ 有关。

达松发尔电流计就是根据这个道理制成的，图 3·44 是它的构造示意图。图中 N 表示蹄形永磁体的北极（为了显示内部构造，蹄形磁体的另一部分已被截去）； K 表示软铁圆柱体； C 表示套在圆柱体外面的矩形线圈（绕在一个与圆柱体不接触的很轻的铝框上），它能够绕 $a-a$ 轴转动； $a-a$ 轴被两个发丝弹簧 Q （象钟表里的游丝那样）所固定，在线圈的 $a-a$ 轴上还固定一根指针 n ； B 是一个刻度盘；在线圈中没有电流通过时，指针 n 指着刻度盘上的 0 点。

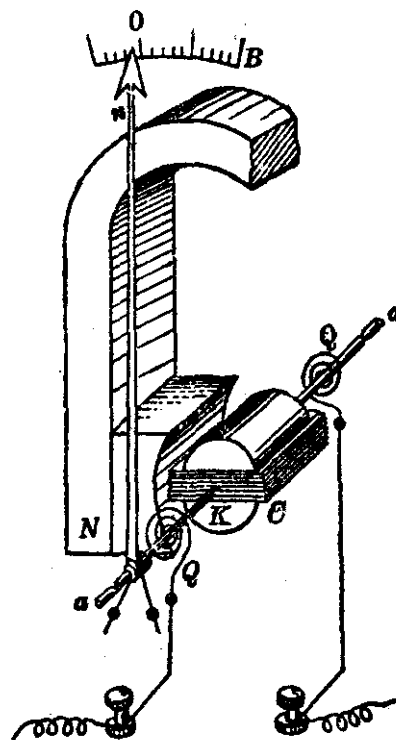


图 3·44 电流计构造图

当电流通过发丝弹簧 Q 而流进线圈 C 时，线圈因受磁场的力偶作用而带动轴和指针一起转动。它们的转动使弹簧扭转而出现一个还原力矩 M' （还原力矩的方向使线圈恢复原来的位置）。根据弹性理论，这个还原力矩 M' 的大小跟弹簧扭转的角度（即线圈转动的角度） θ 成正比，即

$$M' = C\theta,$$

式中 C 是弹簧的扭转恒量，它的大小由弹簧的性质来决定。当线圈转过一定的角度 θ 后，磁场力矩和还原力矩平衡，线圈和指针就停止转动。此时，

$$M = M',$$

即

$$0.1NHIS = C\theta.$$

因而可以求得电流强度跟转角的关系式：

$$I = \left(\frac{C}{0.1NHS} \right) \theta.$$

对給定的电流計來說， C 、 N 、 H 和 S 都是确定的，因此上式右側的括弧代表一个恒量，叫做**电流計恒量**。如用 K 表示这一恒量，則上式可写作

$$I = K\theta.$$

这就是說：通过达松发尔电流計的电流强度跟綫圈的轉动角度（即指針的轉动角度）成正比。

指針偏轉的方向跟通过綫圈的电流方向有关。如果电流以某一方向通过綫圈时，指針向 0 点的右側偏轉，那么改变电流的方向后，指針就向 0 点的左側偏轉。所以利用电流計不仅可以根據轉动角度的大小来确定电流强度的大小，还可以根据指針偏轉的方向来确定电流的方向。

这种电流計，在 H 和 S 固定的条件下，綫圈中导綫的匝数 N 越多，灵敏度就越高（如果不大的电流强度就能获得很大的轉角，我們就說电流計的灵敏度高）。但整个綫圈的重量必須很輕，否則会增加机械装置上的困难。一般我們用极細的絕緣导綫来繞綫圈，它的电阻从几十欧姆到几百欧姆不等。灵敏度較高的电流計可以測出 10^{-10} 安培的电流强度。但由于电阻相当大，电流稍强一些，綫圈导綫的絕緣就可能因发热过多而損坏。所以应用时应当十分小心，允許通过綫圈的电流强度一般不超过百分之几到十分之几安培，这个限度叫做**安全限度**；通电的时间也不宜过长。

习 題 3·6(1)

1. 匀强磁場和均匀輻向磁場有些什么不同？在这两种磁場里，通电綫圈所受到的磁場力矩又有什么不同？
2. 电流計包括哪几个主要部分？各起什么作用？如果没有彈簧 Q ，将会产生怎样的現象？
3. 如果电流計里的磁場是匀强磁場，問通过綫圈的电流强度和它的轉角具有怎样的关系？（用公式表示）
4. 在均匀輻向磁場的情况中，通过电流計綫圈的电流强度和它的轉角

具有怎样的关系? (用公式表示)

5. 为什么制造达松发尔电流计时必须用均匀辐向磁场而不用匀强磁场?

6. 在一定的 H 和 S 的条件下, 可用什么方法来增加电流计的灵敏度?

7. 为什么电流计不能用来测量较强的电流?

2. 安培计 安培计是一种特制的、可以用来测量较强电流的电流计。它应该符合这样的要求, 那就是既要让电路上的全部电流通过, 又不允许通过线圈的电流超过安全限度。满足这个要求的办法就是与达松发尔电流计中的线圈并联一个电阻较小的分路 (如图 3.45 所示)。这样流进安培计的电流将大部分通过分路流出, 小部分通过线圈流出。

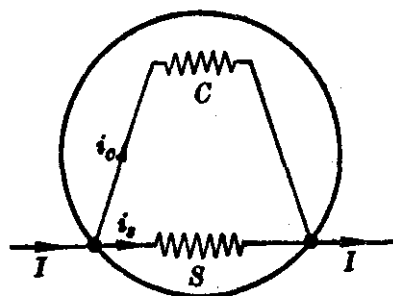


图 3.45 安培计构造示意图

图中 C 为线圈电阻, S 为并联的分路电阻, I 为通过安培计的总电流强度 (即电路上的电流强度), i_c 为通过线圈的电流强度, i_s 为通过分路的电流强度。在这个并联电路里,

$$i_c C = i_s S = IR,$$

式中 R 为安培计的合电阻 (即 C 和 S 两个并联电阻的合电阻), 它的大小为

$$R = \frac{CS}{C+S} = C \left(\frac{1}{1 + \frac{C}{S}} \right).$$

因此, 求得 i_c 与 I 的关系式:

$$i_c = I \left(\frac{1}{1 + \frac{C}{S}} \right).$$

从上式可以看出, 当电路中电流强度 I 一定的时候, 只要减小分路电阻 S 的大小, 就可以减小通过线圈 C 的电流 i_c 。如果把上面的等式变成

$$I = i_c \left(1 + \frac{C}{S} \right),$$

我們又可以看出，在通过綫圈的电流强度 i_c 一定的时候，只要减小分路电阻 S 的大小，就可以加大通过安培計的总电流（即电路上的电流）强度 I 。

如果 C/S 的比值为 1、2、…… 9、99、999、…… n ，則总电流 I 将为 i_c 的 2 倍、3 倍、…… 10 倍、100 倍、1000 倍、…… $n+1$ 倍。或者說：如果电流計原来的电阻（即綫圈电阻）为 C ，只要和它并联一个电阻等于 C/n 的分路，就可以使它的量度范围增大到 $n+1$ 倍。如果并联一个电阻等于 $C/(n-1)$ 的分路，就可以使它的量度范围增大到 n 倍。

这样改装好了的电流計，应当按照增大了的量度范围，即按照总电流 I 来标明刻度盘上的刻度。电流强度的刻度以安培为单位的，就叫做**安培計**；以千分之一安培为单位的叫做**毫安培計**；以百万分之一安培为单位的就叫做**微安培計**。

在一个安培計里，常常与綫圈并联着好几个电阻不同的分路。这样，它就可以用来量度不同范围的电流强度。当然，在这种安培計里，还必须具有不同的接綫柱，刻度盘上应有不同的标度。

对一个标度已經刻制好的安培計來說，如果我們要使它的讀数放大 m 倍（即使刻度盘上每一格所代表的电流强度放大 m 倍），則应当另外再并联上一个分路，它的电阻要等于安培計总电阻的 $1/(m-1)$ 。

例 1. 一个电流計的綫圈电阻 $C = 100$ 欧姆，每一个刻度代表 1 毫安。現要把它改装成安培計（即每一刻度代表 1 安培），問需要并联一个电阻多大的分路？

【解】 根据題意，把毫安計改装成安培計后，刻度盘上标度放大的倍数（即量度范围扩大的倍数）为

$$m = \frac{1}{0.001} = 1000.$$

則并联分路的电阻应当为

$$S = \frac{C}{m-1} = \frac{100}{1000-1} = \frac{100}{999} \text{ 欧姆,}$$

即需要并联一个电阻约为 0.1 欧姆的分路。

例 2. 某电流计的线圈电阻 $C=50$ 欧姆, 量度范围为 10 毫安培. 如果按照图 3.46 所示的方法接上两个电阻, 把它改装成量度范围分别为 1 安培和 10 安培的两用安培计, 问这两个分路电阻 R_1 和 R_2 各等于多少?

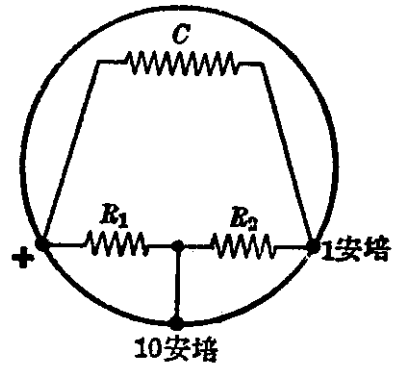


图 3.46 例 2 附图(一)

【解】 当量度范围为 1 安培时, R_1 和 R_2 串联后再与 C 并联(如图 3.47 所示). 此时, 量度范围放大的倍数为

$$m = \frac{1}{0.01} = 100;$$

分路电阻为

$$S = R_1 + R_2.$$

因为分路电阻应为线圈电阻的 $1/(m-1)$, 即

$$S = \frac{C}{m-1} = \frac{50}{100-1} = \frac{50}{99},$$

所以

$$R_1 + R_2 = \frac{50}{99}. \quad (1)$$

当量度范围为 10 安培时, C 和 R_2 串联后再与 R_1 并联, 如图 3.48 所示. 此时, 量度范围放大的倍数为

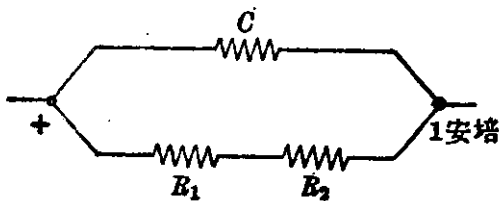


图 3.47 例 2 附图(二)

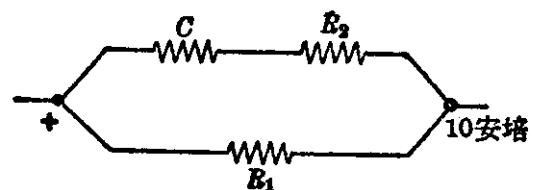


图 3.48 例 2 附图(三)

$$m' = \frac{10}{0.01} = 1000;$$

分路电阻

$$R_1 = \frac{C + R_2}{m' - 1} = \frac{50 + R_2}{1000 - 1},$$

即

$$R_1 = \frac{50 + R_2}{999}. \quad (2)$$

解上得方程式(1)和(2), 得出

$$R_1 = \frac{5}{99} \text{ 欧姆}; R_2 = \frac{5}{11} \text{ 欧姆}.$$

习 题 3·6(2)

1. 某安培計, 标尺上每一格代表1安培. 如果在这个仪表上接一个分路, 它的电阻等于安培計电阻的1/4或1/9, 分別算出在改装后的安培計刻度盘上每格代表多少安培.

2. 电流計的綫圈电阻为45欧姆. 通过它的电流强度为1毫安时, 指針偏轉一格. 現在要把它改装成每格代表1安培的安培計, 那应当如何改装?

3. 安培計的电阻是0.04欧姆. 現在要把它的量度范围加大到6倍, 問需要并联一个多大的电阻?

4. 安培計的电阻是0.05欧姆. 为了适应临时需要, 給它并联一个电阻等于0.005欧姆的分路. 当它的讀数为0.4安培时, 实际上通过它的电流强度有多大?

5. 电流計的綫圈电阻为20欧姆, 允許量度的最大电流强度为5毫安培. 現在要把它改装成量程为1安培和10安培的两用安培計, 問应当怎样改装? (要求作图表示接法, 并計算接入的电阻)

3. 伏特計 伏特計是一种特制的、用来測量电路上任何两点間电势差的电流計.

我們已經知道, 电流計指針的偏轉角度是跟通过綫圈的电流强度成正比的. 对給定的电流計來說, 綫圈的电阻是恒定不变的, 根据欧姆定律, 通过綫圈的电流强度应当跟綫圈两端的电势差成

正比。所以，电流計指針偏轉的角度也应当和綫圈兩端的電勢差成正比。如果在电流計的刻度盤上標出相應的電勢差，那似乎就可以直接用它來測量電路上的電壓了。

直接利用這樣的电流計來測量電壓所得到的結果是否符合要求呢？這可以用圖 3·49 所示的綫路來說明。在未曾接入电流計 G 之前，電路上的外電阻為 R ，電流強度

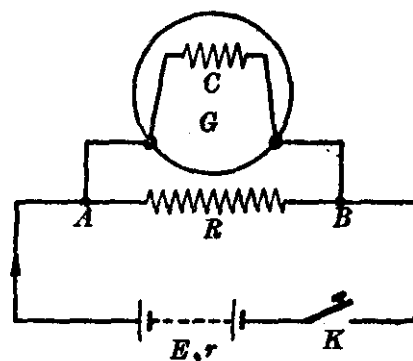


圖 3·49 用電流計量電壓不夠理想

$$I = \frac{E}{R+r},$$

A 、 B 兩點間的電勢差

$$V_{AB} = IR = E - Ir.$$

在已經接入電流計 G 之後，電路上的外電阻變成了

$$R' = \frac{CR}{C+R} = \frac{R}{1+\frac{R}{C}},$$

電流強度變成了

$$I' = \frac{E}{R'+r},$$

A 、 B 兩點間的電勢差變成了

$$V'_{AB} = I'R' = E - I'r.$$

比較上述兩種情況，顯然可以看出，因為 R' 總小於 R ，則 I' 總將大於 I ，因而 V'_{AB} 也總是比 V_{AB} 來得小。這就是說，在接入電流計 G 之後， A 、 B 兩點間的電勢差（即電流計量得的電勢差）比原來的（即沒有接入電流計之前的）電勢差來得小了。此外，當電阻 C 不比電阻 R 大很多時，電路上的總電流要有很大一部分通過電流計綫圈 C ，結果可能使它因發熱過多而損壞。所以我們說，未經改裝過的電流計不能用來測量電壓。

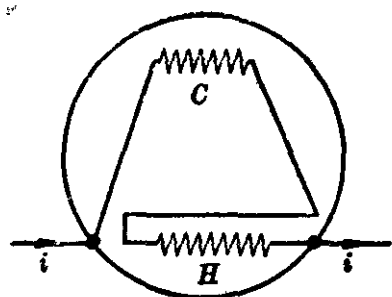


图 3·50 伏特計构造示意图

如果在电流計里, 用一个高电阻(即阻值很大的电阻) H 和綫圈 C 串联在一起(如图 3·50 所示), 那就改装成一个相当满意的测量电压的仪表了. 用这样改装过的仪表代替电流計 G 接入图 3·49 所示的电路里, 电路上的外电阻变成了

$$R'' = \frac{(C+H)R}{(C+H)+R} = \frac{R}{1 + \frac{R}{C+H}}$$

电流强度变成了

$$I'' = \frac{E}{R'' + r},$$

A 、 B 两点間的电势差变成了

$$V''_{AB} = I''R'' = E - I''r.$$

显然, 只要电阻 H 很大, 比值 $R/(C+H)$ 就接近于零, R'' 就接近于 R , I'' 就接近于 I , 因而 V''_{AB} 也就接近于 V 了. 这也就是说, 在接入这种仪表之后, A 、 B 两点間的电势差(即量得的电势差)和原来的(即沒有接入仪表之前的)电势差很接近. 此外, 由于仪表分路上的总电阻 $(C+H)$ 很大, 电路上的总电流只有很小一部分通过綫圈分路, 并不致于超过它的安全限度. 所以我們說, 用这样改装过的仪表测量电压, 具有很大的实际意义.

在这样改装过的仪表里, 刻度盘上的标度不是根据綫圈上的电压来制訂的, 而是根据整个仪表綫路上的电压, 即 A 、 B 两点間的电势差来制訂的, 否則就不能讀出电路上的电压. 我們已經知道, 在一个串联电路里, 电流强度是恒定的, 电压和电阻成正比. 因此, 在这个仪表的电路里,

$$\frac{V_C}{C} = \frac{V_H}{H} = \frac{V_{AB}}{C+H},$$

式中 V_C 为綫圈上的电压, V_H 为串联高电阻上的电压, V_{AB} 为整

个仪表线路上的电压(即 A 、 B 两点间的电势差)。根据关系式

$$V_{AB} = V_C \left(\frac{C+H}{C} \right)$$

可以看出,如果串联的电阻 H 是线圈电阻 C 的 n 倍,则仪表上所标度的电压 V_{AB} 应当是线圈电压的 $n+1$ 倍。

在这样改装过的仪表里,如果刻度是以伏特为单位的,就叫做**伏特计**;如果是以千分之一伏特为单位的,就叫做**毫伏特计**。

对于一个已经刻制好的伏特计来说,如果我们要使它的量度范围放大 m 倍,则应当另外串联一个电阻,它的大小等于伏特计电阻的 $m-1$ 倍。

例3. 某电流计的线圈电阻 $C=30$ 欧姆,当通过它的电流为 1 毫安培时,指针偏转全标度。如果按照图 3.51 所示的方法接上两个电阻 H_1 和 H_2 ,把它改装成量度范围分别为 3 伏特和 30 伏特的两用伏特计,问这两个电阻应当各等于几个欧姆?

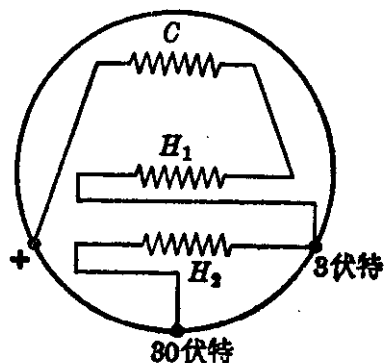


图 3.51 例 3 附图

【解】 指针偏转全标度时,线圈上的电压

$$V_C = iC = \frac{1}{1000} \times 30 = 0.03 \text{ 伏特.}$$

当量度范围为 3 伏特时,放大的倍数

$$m = \frac{3}{0.03} = 100,$$

因此串联电阻

$$H_1 = (m-1)C = (100-1) \times 30 = 2970 \text{ 欧姆.}$$

当量度范围为 30 伏特时,放大的倍数

$$m' = \frac{30}{0.03} = 1000,$$

因此串联电阻

$$H_1 + H_2 = (m' - 1)C = (1000 - 1) \times 30 = 29970 \text{ 欧姆},$$

$$H_2 = 29970 - H_1 = 29970 - 2970 = 27000 \text{ 欧姆}.$$

习 题 3·6(3)

1. 电流计的指针偏转角度，本来是跟通过电流计线圈的电流强度成正比的，为什么它又可以用来量度线圈两端的电势差呢？

2. 电流计为什么不宜直接用来测量电路里的电流强度？为什么又不宜直接用来测量电路上的电压？

3. 安培计和伏特计在构造上主要有些什么区别？为什么要有这样的区别？

4. 如果在实验时错误地把一个安培计并联在一个电路里，或把一个伏特计串联在电路里，将会产生怎样的后果？

5. 一个伏特计，它的电阻是 140 欧姆。现在要把它的量度范围扩大 10 倍，问需要串联一个多大的附加电阻？

6. 某伏特计的电阻是 800 欧姆，标度每格代表 1 伏特。如果串联一个和它相等的电阻，每格标度应代表多大伏特？怎样才能把它改装成每格代表 10 伏特的仪表？

7. 一个伏特计的电阻是 400 欧姆。现在和它串联一个 2000 欧姆的附加电阻后，再用来测量某段电路上的电压，如果指针指在 5 伏特的位置上。问这段电路上的电压实际是多大？

8. 一个电流计的线圈电阻为 25 欧；通过它的电流是 $1/1500$ 安培时，指针偏转一格。现在要把它改装成每格读数是 (1) 1 伏特的伏特计，(2) 1 安培的安培计，问应当怎样改装？

本章提要

1. 磁现象和磁场

(1) **磁体和磁极** 磁体有天然磁体(如磁铁矿 Fe_3O_4)和人造磁体(用钢或其他合金制成)两种。磁体吸铁本领特别强的两极叫做磁极。能在水平面自由转动的磁针总是停驻在指南指北的位置上，指北的一极叫做北极(N极)，指南的一极叫做南极(S极)。同号磁极总相斥，异号磁极总相吸。

(2) **磁力** 两个磁极间的引力或斥力的方向在两个磁极的连线上，大小跟它们的磁极强度的乘积成正比，跟它们之间距离的平方成反比。

$$F = K \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

式中 m_1 和 m_2 代表磁极强度，它是表示磁极磁性强弱的物理量。 K 是一个恒量，它的大小和式中各量所采用的单位有关。在用厘米·克·秒制时， $K=1$ 。

在应用公式时，应当注意：当两个磁极同号时， F 为正值，表示相斥；当两个磁极异号时， F 为负值，表示相吸。

(3) 磁場和磁場强度 磁場是一种物质。磁体之間的相互作用是通过它們的磁場来进行的。一切磁場都起源于电流。

磁場强度表征磁場的力的性质，用单位磁北极在磁場里所受磁場力来量度。它是矢量。

$$H = \frac{F}{m}.$$

当 F 为达因、 m 为厘米·克·秒制磁极强度单位时，規定 H 的单位是奥斯特。

(4) 磁力綫和磁通量

磁力綫是用来形象化地表示磁場中各点的磁場强度的曲綫或直綫，綫上任意一点的切綫方向代表該点的磁場强度的方向。磁力綫密度（通过单位横截面积的磁力綫条数）可以用来代表該处的磁場强度的大小。磁力綫是閉合的曲綫。

磁通量是穿过磁場中某一横截面的磁力綫条数。在匀强磁場里，磁通量 Φ 可以用 $\Phi = HS$ 来计算。（ H 是匀磁場强度， S 是横截面积。）

(5) 地球磁場 地磁場强度的大小和方向，可以由磁偏角、磁傾角和地磁水平强度三个量来决定，这三个量被称为地磁三要素。

2. 电流的磁場

(1) 直綫电流的磁場 磁力綫是一些在跟通电导綫垂直的平面上，以导綫为中心的同心圆。在很长的直綫电流周围磁場里任一点处的磁場强度跟电流强度成正比，跟这一点到通电导体的垂直距离成反比。

(2) 环电流的磁場 在环中心处的磁場强度跟电流强度成正比，跟环半径成反比。

(3) 通电螺綫管的磁場 长螺綫管内部的磁場强度大致均匀，这个匀强磁場的强度跟通过导綫的电流强度以及綫圈的匝数成正比，跟螺綫管的长度成反比。

通电导綫的磁場方向可用右手拇指法則来判断。

3. 磁感应和电磁铁 铁磁性物质(铁、钴、镍和某些合金)在磁场中被磁化的现象叫做磁感应。软铁保留磁性的本领很小,因而可以用来做电磁铁,钢或某些合金保留磁性(剩磁)的本领很大,因而可以用来制造永久磁铁。

在螺线管里加一个软铁心,就成为电磁铁。电铃、电报和电磁起重机等都是它的具体应用。

电磁继电器也是用电磁铁做成的,它的工作原理是利用弱电流电路中的电磁铁作电键来控制(闭合、断开)强电流电路的装置。

4. 磁性起源假说

库仑假说 库仑认为凡是可磁化的铁磁物质,都是由许多具有两个异号磁极的极小的磁体所组成的,这种小磁体叫做元磁体,或叫做分子磁体。铁磁体的磁化过程,就是内部的元磁体在外磁场的作用下,从无规则排列转变成有规则排列的过程。

安培假说 安培认为元磁体就是原子、分子、分子团等物质微粒,它们之所以具有磁性,是由于在每个微粒里都具有永不停息的环电流。

安培假说阐明了磁现象的电本质,使我们认识到,任何磁体的磁性,都是由于电流的存在所产生。

由近代原子结构的理论知道,安培电流是由原子、分子或分子团内电子的运动所形成的。

5. 磁场对电流的作用

(1) **磁场对直导线电流的作用** 直导线中电流所受磁场力的方向可以用左手法则来确定。

左手法则 伸出左手,把手掌摊平,让拇指和其余四指垂直并在同一个平面上;把伸开的左手放入磁场中,使掌心对着磁力线的来向,并使四指指着电流的方向,这时拇指所指的就是通电导体所受磁场力的方向。

作用力的大小: $F = 0.1HIL \sin \theta$.

F 是导线受力的大小, H 是磁场强度, I 是电流强度, L 是置于磁场部分的导线长度, θ 是通电导体和磁力线的夹角。式中 F 的单位必须用达因, H 用奥斯特, I 用安培, L 用厘米。如导体与磁力线平行, $\theta = 0^\circ$, $\sin \theta = 0$, 则 $F = 0$ 。

(2) **磁场对通电线圈的作用** 通电线圈在磁场里,要受到磁场力的力偶作用,这个力偶的转矩 M 跟通过线圈的电流强度 I 、磁场强度 H 、线圈的面积 S 以及线圈平面和磁力线的交角的余弦成正比。 $M = 0.1HIS \cos \theta$ 。

(3) **平行电流间的相互作用** 在有反向电流通过时,两根导线相斥;在

有同向电流通过时，两根导线相吸。

6. 电流計、安培計和伏特計

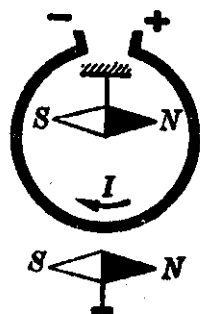
(1) **电流計** 电流計是根据磁場对通电綫圈的作用原理制成的。通过达松发尔电流計的电流强度 I 跟綫圈的轉动角度 θ 成正比： $I = K\theta$ 。

(2) **安培計和伏特計** 都是由电流計改装而成，两者的特点和区别如下表所示：

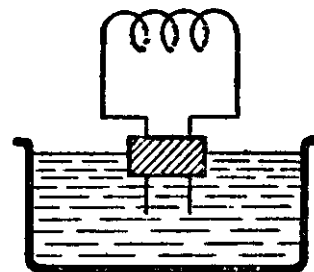
	安 培 計	伏 特 計
用 途	測定电流强度	測定电压
构 造	在电流計上并联一个低电阻的分路，以扩大量度电流强度的范围	在电流計上串联一个高数值的附加电阻，以扩大量度电压的范围
扩大量度范围的計算方法	依照电阻并联的方法計算。如扩大量度范围为原来的 m 倍，則此并联的分路电阻阻值应为原来綫圈电阻的 $1/(m-1)$ 倍	依照电阻串联的方法計算。如扩大量度范围为原来的 m 倍，則此串联的附加电阻阻值应为原来綫圈电阻的 $(m-1)$ 倍
用 法	与待测电流的电路串联	与待测电压的那段电路并联

复 习 題 三

1. 磁和靜电有那些性质是类似的？有那些性质是不同的？
2. 有一个磁針放在环形电流的下面，电流的方向如附图所示，求磁針的偏轉方向，并說明理由。



(第 2、3 題)



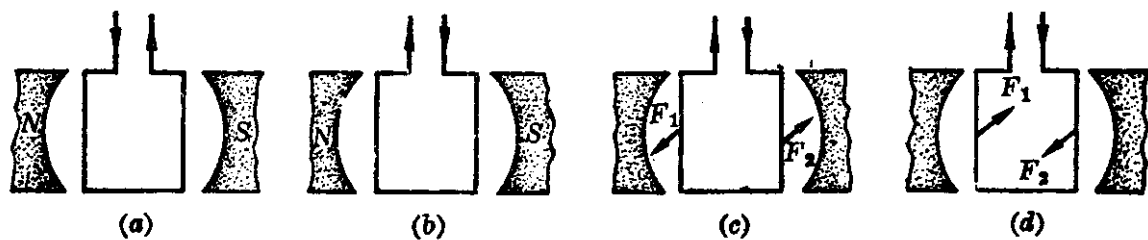
(第 4 題)

3. 如果在上題的环中悬一个磁針，通电后，磁針的 S 极将向什么方向偏轉？
4. 在一个盛着稀硫酸的大容器中，浮着一个軟木塞，在木塞中插上一片

鋅片和一片銅片，它們的上部用一個小的銅線圈連起來，如附圖所示。問在地磁場的作用下線圈將停置在什麼方向？

5. 為什麼永久磁鐵不能用軟鐵來做？為什麼電磁鐵不能用鋼來做？

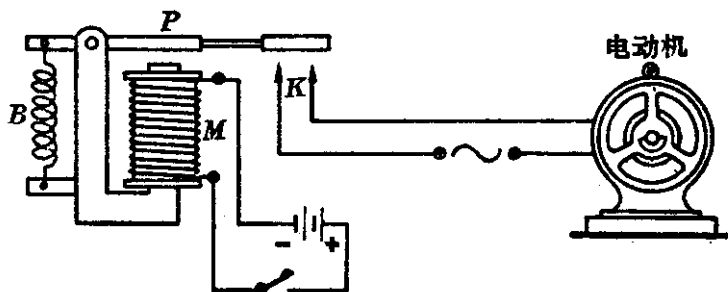
6. 試決定附圖中各種情況下通電線圈跟磁力線垂直的兩邊所受力的方向或決定磁場方向。



(第 6 題)

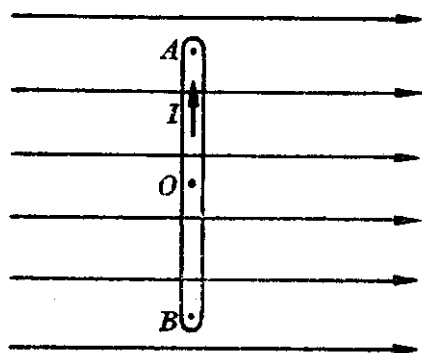
7. 設在方向指北、強度為 5 奧斯特的勻強磁場中，放置一個磁極強度為 100 厘米·克·秒制單位的條形磁體，它的兩磁極間的距離為 10 厘米，磁軸與磁場成 30° 夾角，求該條形磁體所受到的力偶矩。如果磁體是可以自由轉動，那末最後它平衡在什麼位置？

8. 電磁替續器的螺線管線圈里，為什麼總要放一個軟鐵心？試根據附圖說明電磁替續器的工作原理。



(第 8 題)

9. 如下圖所示，在磁場強度為 300 奧斯特的勻強磁場中，放置一根長 10 厘米、通有 1 安培電流的直導線 AB ，求在下列各種情況下所受磁場的作用力：(1) 電流方向與磁力線方向垂直；(2) 導線以 O 點為中心，順時針轉過 30° ；(3) 導線以 O 點為中心，順時針轉過 90° ；(4) 導線以 O 點為中心， A 向紙背、 B 向紙前轉過 90° 。



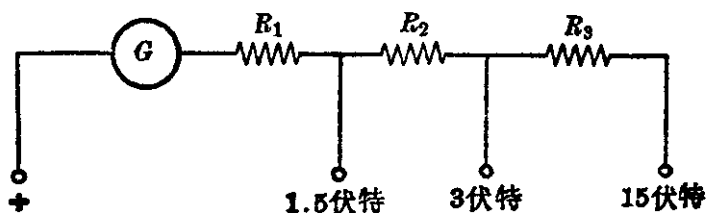
(第 9 題)

10. 有一個電流計，其電阻為 80 歐姆，通過 1 毫安培的電流時，指針偏轉一格。現

欲使其一格表示 1 安培或 1 伏特，問各应如何改装？

11. 安培計的电阻是 0.05 欧姆，如果用一条长 15 厘米、截面积是 1 毫米²的銅导綫 ($\rho=0.017$ 欧姆 毫米²/米) 与它并联，再把这个装置串联在电路中，这时看出安培計上的讀数是 0.2 安培。求电路中实际的电流强度？

12. 附图中的四个接头上分別标出“+”、1.5 伏特、3 伏特及 15 伏特，电流計 G 的綫圈电阻为 27 欧姆，最大容許电流强度为 2 毫安，試求 R_1 、 R_2 、 R_3 的数值？



(第 12 題)

13. 一个电流計的綫圈电阻为 50 欧姆。当通过它的电流是 $2/1000$ 安培时，指針偏轉整个标度。現在要把它改装成量度范围为 1 伏特和 10 伏特的两用伏特計，試設計两种改装的方法，并算出所需要的电阻。（作图并計算）

[提示：其中一种方法如例題所示.]

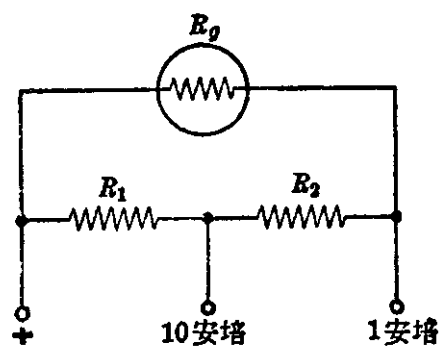
14. 在附图中所示的部分电路上， A 、 B 两点間的电势差固定为 90 伏特， $R_1=900$ 欧姆， $R_2=100$ 欧姆。求下列各项：

- (1) A 、 C 之間和 C 、 B 之間电势差各等于多少？
- (2) 如果把一个电阻为 900 欧姆的伏特計和 R_1 并联，量出 A 、 C 之間电势差为多大？此时 C 、 B 之間电势差又是多大？
- (3) 如果把这个伏特計和 R_2 并联，量出 C 、 B 之間电势差为多大？此时 A 、 C 之間电势差又是多大？
- (4) 如果用另一个电阻为 9000 欧姆的伏特計和 R_1 并联，量出 A 、 C 之間电势差是多大？此时 C 、 B 之間电势差又是多大？
- (5) 如果把这个伏特計和 R_2 并联？量出 C 、 B 之間电势差是多大？此时 A 、 C 之間电势差又是多大？



(第 14 題)

15. 附图是有两个量度范围的安培计的內部接綫情况, 綫圈的电阻 R_g 是 25 欧姆, 最大的許可电流是 0.02 安培, 求电阻 R_1 和 R_2 的值.



(第 15 題)

第四章 电磁感应

自从丹麦物理学家奥斯特在 1820 年发现了电流的磁场之后,人们提出了一个新的问题:能不能利用磁场来获得电流呢?经过了系统的实验研究之后,英国的物理学家法拉第终于在 1831 年作出了肯定的答复:利用导体在磁场里作适当的相对运动可以获得电流.

利用磁场获得电流的现象叫做**电磁感应现象**,所获得的电流叫做**感生电流**,形成感生电流的电动势叫做**感生电动势**.

电磁感应现象的发现是物理学上的重大成就之一,它为发电机的制造奠定了理论基础,也为工农业生产的电气化创造了条件.

在这一章里,我们将要着重地讨论获得感生电流的方法、感生电流的方向和感生电动势的大小,并适当讨论自感现象.

§ 4.1 感生电流的获得

利用磁场获得感生电流的方法,人们为方便起见,把它分成两大类.现在分别叙述如下.

(1) 图 4.1 里的 N 和 S 是强磁铁的两个磁极,它们之间的磁力线从 N 指向 S . ABG 是一个闭合线路, G 是一个灵敏电流计, AB 是闭合线路里的一段导线. 电流计的指针有无偏转表示线路中是否有感生电流. 实验结果指出:

(i) 当导线 AB 和磁场相对静止时,电流计指针不偏转,即表明线路里没有感生电流.

(ii) 当导线 AB 沿磁力线的方向和磁场作相对运动时,电流

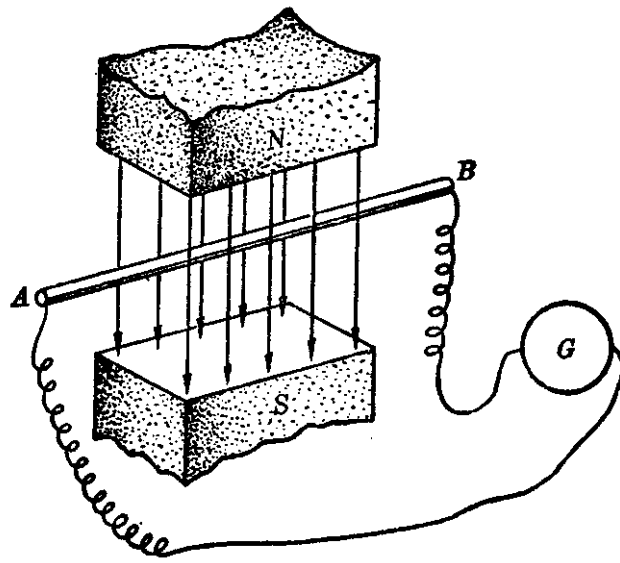


图 4·1 导体作切割磁力线运动时获得感生电流

計指針也不偏轉，即綫路里也沒有感生电流。

(iii) 只有当导綫 AB 在不平行于磁力綫的方向和磁場作相对运动时，才能发现电流計指針的偏轉。这表明綫路里有了感生电流。

在上述三种情况中，当导綫 AB 在不平行于磁力綫的方向和磁場作相对运动时， AB 是在切割磁力綫；当导綫 AB 和磁場相对靜止，或在平行于磁力綫的方向作相对运动时， AB 都不切割磁力綫。所以，根据实验結果，我們可以作出这样一个結論：当閉合綫路的一部分导綫在磁場中作切割磁力綫的运动时，綫路里就有感生电流产生。

人們认为这是获得感生电流的一种方法，并称它为切割磁力綫法。

(2) 图 4·2 里的 AB 是一个导綫圈， G 是連接在导綫圈两端的电流計， ABG 組成一个閉合綫路。 NS 是一根永磁棒，也可以是一个电磁鉄，或一个通电螺綫管。实验指出：当磁棒插入导綫圈中或从导綫圈中拔出时，即它們作相对运动时，电流計指針有偏轉，这就表明綫路里存在感生电流。

图 4·3 里的 R 是一个軟鉄环； P 是一个接有电源的导綫圈，

叫做原线圈； S 是一个不接电源的导线圈，叫做副线圈； P 和 S 都绕在软铁环 R 上。在原线圈的电路里，除了包含有电源之外，还串联着电键 K 和变阻器 H 。在副线圈的电路里，则串联一个电流计 G 。电键可以用来接通或断开原线圈电

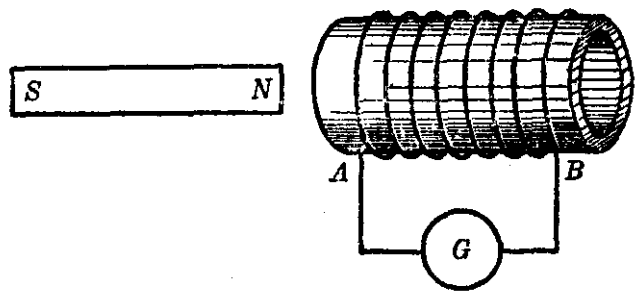


图 4.2 磁体对导线圈作相对运动时获得感生电流

路，变阻器可以用来增减原线圈里的电流强度。实验指出：当原线圈

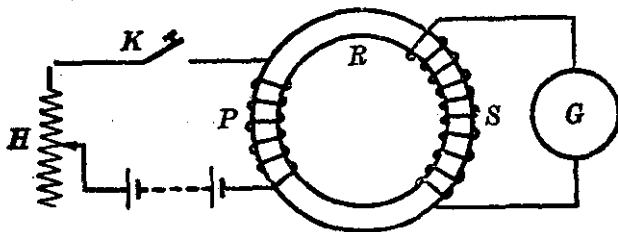


图 4.3 改变原线圈里的电流强度时获得感生电流

圈里的电流强度发生变化（包括接通电路、断开电路和改变变阻器的电阻）时，副线圈里有感生电流产生；当原线圈里的电流强度恒定不变时，副线圈里没有感生电流。

我們已經了解，在磁体和通电螺线管的周围都有磁场存在。当磁体 NS （如图 4.2 所示）移近或移远导线圈 AB 时，通过导线圈的磁通量（即磁力线条数）要发生变化（增加或减少）。当原线圈 P （如图 4.3 所示）里的电流强度发生变化时，它周围的磁场强度也就要发生变化，因此通过副线圈 B 的磁通量也要发生变化。综上所述，我们可以把实验结果归结为：当穿过闭合线路里的磁通量（即磁力线条数）在变化（增或减）时，线路里就有感生电流产生。

人们认为这是获得感生电流的另一种方法，并称它为增减磁通量法。

切割磁力线法和增减磁通量法，从表面上看，好象并不一样，但是在实质上它们是一致的。拿图 4.1 中所示的 AB 导线来说，当它向后运动切割磁力线时，穿过 ABG 这一闭合线路的磁通量

在增加；当它向前运动切割磁力线时，穿过 ABG 这一闭合线路的磁通量在减少；因此，切割磁力线的结果实际上是在增减穿过闭合线路的磁通量。

切割磁力线和增减磁通量是同一种变化的两种说法。当我们对局部线路的运动情况进行观察研究时，常用前一种说法。当我们对整个线路的变化情况进行观察研究时，常用后一种说法。至于在具体情况中到底应用哪一种说法较好，还要看哪一种说法更能联系已知情况来决定。

§ 4.2 感生电流的方向

感生电流的方向决定于产生感生电流的条件。如果我们重复一下图 4.1 所示的实验，就会看到：在改变切割磁力线的方向或改变磁场方向时，电流计指针的偏转方向也要随着改变，即感生电流的方向也要改变。如果我们重复一下图 4.2 和图 4.3 中所示的实验，就会发现：当穿过闭合线路的磁通量从增加变为减少、从减少变为增加、或改变方向时，线路中感生电流的方向都要改变。

为了确定感生电流的方向，人们根据实验的结果，总结出一条比较直观的法则——右手法则来，并抽象出一条比较原则的规律——楞次定律。现在分别叙述如后。

1. 右手法则 系统地进行图 4.1 所示的实验：先使磁力线的方向由上向下（即磁 N 极在上， S 极在下），再依次使导线 AB 向右和向左切割；然后使磁力线的方向由下向上（即磁 N 极在下，

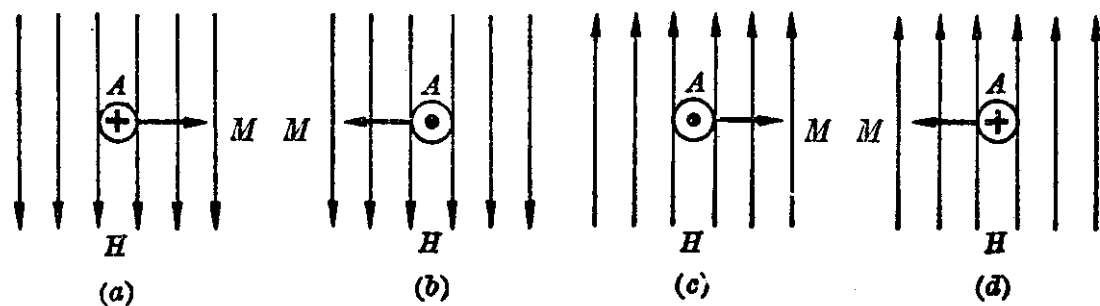


图 4.4 切割磁力线获得感生电流的方向

S 极在上),再依次使导线 AB 向右和向左切割. 图 4.4 为实验结果的记录图,图中的圆圈 A 表示导线的 A 端, H 表示磁力线的方向, M 表示导线 AB 切割磁力线的方向, \oplus 表示感生电流从 A 端流向 B 端, \odot 表示感生电流从 B 端流向 A 端.

全面研究上述实验中感生电流、磁力线和切割运动三者之间的方向关系,人们提出了如图

4.5 所示的**右手法则**:伸出右手,把手掌摊平,让拇指和其余四指垂直并在同一个平面上;把伸开的右手放入磁场中,使掌心对着磁力线的来向,如果拇指指着切割运动的方向,四指就指着感生电流的方向.

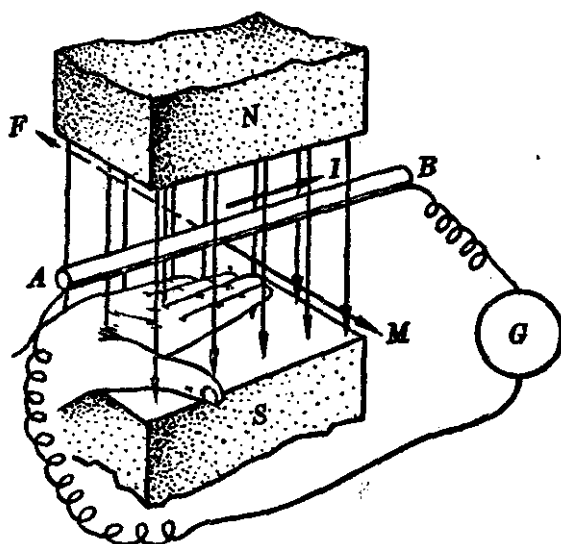


图 4.5 右手法则

进一步分析还可以看出:当导线 AB 里有了感生电流

后,它就和有了其他电流一样,立刻受到了磁场的作用;按照左手法则, AB 这段导线所受磁场的方向应如图 4.5 里的虚线箭头 F 所示. 显然,磁场力 F 的方向和切割运动 M 的方向相反,即它对切割运动起着阻碍的作用. 所以我们可以说:用切割磁力线的方法所获得的感生电流,使切割导体受到一个阻碍切割运动的磁场力作用.

2. 楞次定律 系统地进行了图 4.2 中所表示的实验,就可以发现,导线圈中感生电流的方向,不但和磁通量是在增加还是在减少有关,还和磁力线的方向有关. 图 4.6 记录着系统实验的结果:

图中 M 表示磁体(永磁棒、电磁铁或通电螺线管)的运动方向, I 表示感生电流的方向.

在图 4.6 (a) 所表示的情况下,磁体 N 极下方的磁力线倾向下方(参看图 3.9),而且越近磁极越密,当磁体向下运动时穿过导

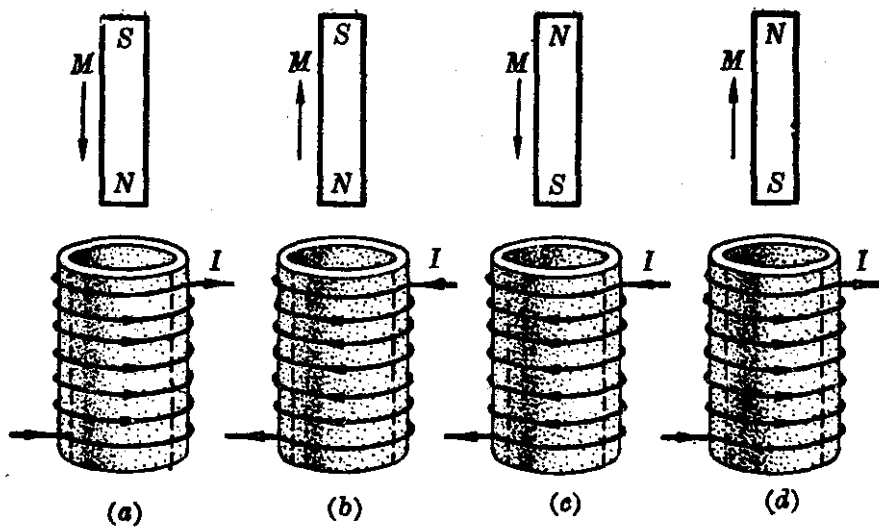


图 4.6 增减磁通量获得感生电流的方向

线圈的磁通量(磁力线数)增加,此时,导线圈里有感生电流 I 产生,按照右手拇指法则,它在导线圈的内部形成一个磁力线向上的感生磁场(感生磁场就是感生电流的磁场,参看图 3.17);这样形成的感生磁场对正在增加的、方向向下的磁场起抵消作用,或者说感生电流的磁场在阻碍着穿过导线圈的磁通量增加。

再看图 4.6 (b) 所表示的情况,磁体向上运动时减少方向向下的穿过导线圈的磁通量,此时,导线圈里的感生电流方向与前相反,在导线圈的内部形成一个磁力线向下的磁场;这样形成的感生磁场对正在减少的、方向向下的磁场起补偿作用,或者说感生电流的磁场在阻碍着穿过导线圈的磁通量减少。

逐一对图 4.6 (c) 和 (d) 所表示的情况进行分析,可以得到相同的结论,那就是:感生电流的磁场总在阻碍穿过导线圈的磁通量发生变化(增加或减少)。

系统地进行了图 4.3 所表示的实验,得到如图 4.7 所记录的结果(因为这里只作定性的讨论,而不作定量的分析,所以图中没有画出软铁心来;在实际应用中,为了加强电流的磁场,需要采用如图 4.3 所示的环状铁心):

图中 P 表示原线圈, S 表示副线圈;原线圈上的箭头表示原

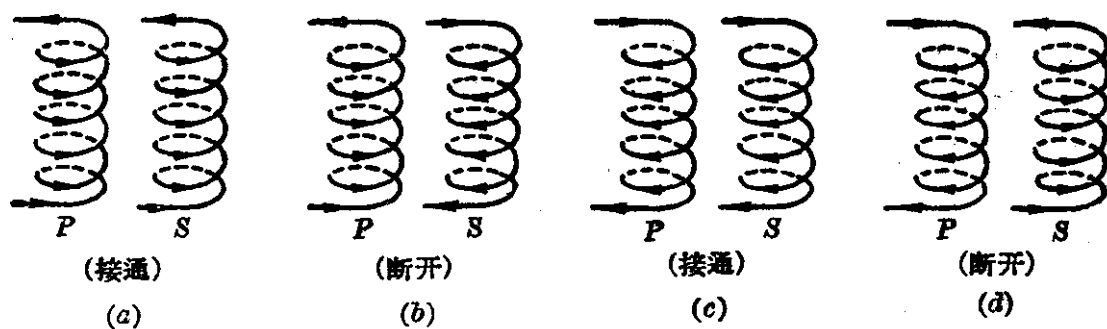


图 4·7 接通或断开原线圈电流获得感生电流的方向

线圈中电流(叫做施感电流)的方向,副线圈上的箭头表示副线圈中感生电流的方向.图 4·7 (a) 和 (c) 表示原线圈电流在接通(或增加)那一瞬时的感生电流方向,图 4·7 (b) 和 (d) 表示原线圈电流在断开(或减小)那一瞬时的感生电流方向.

从实验结果的记录图中可以看出:在向原线圈 P 通入或增加电流时,副线圈 S 里的感生电流与原线圈里的电流方向相同;在割断或减小原线圈 P 里的电流时,副线圈 S 里的感生电流与原线圈里的电流方向相反.

实验和理论都证明,由于当原线圈里的电流强度在增强或减弱时,它周围的磁场强度要有相应的增强或减弱,因而穿过副线圈的磁通量也要有相应的增加或减少.在图 4·7 (a) 所表示的情况中,副线圈 S 里的感生电流是因为穿过它的方向向下的磁通量正在增加而产生的,此时的感生电流,在副线圈内部形成一个磁力线向上的磁场,以阻碍穿过副线圈的磁通量增加.在图 4·7 (b) 所表示的情况中,副线圈 S 里的感生电流是因为穿过它的方向向下的磁通量正在减少而产生的,此时的感生电流,在副线圈内部形成一个磁力线向下的磁场,它阻碍穿过副线圈的磁通量减少.再逐一对图 4·7 (c) 和 (d) 所表示的情况进行分析,可以得出相同的结论,那就是:感生电流的磁场总在阻碍穿过副线圈的磁通量发生变化(增加或减少).

俄国物理学家楞次在 1834 年根据多次实验的结果,概括出一条意义重大的结论,叫做楞次定律,它的内容是:感生电流的磁场

总在阻碍原来的磁場发生变化。

右手法則比較具体地确定了感生电流、磁力綫和切割运动三者之間的方向关系；但在切割运动不很显著的情况下，应用它就不大方便。楞次定律是从大量电磁感应現象中抽象出来的，它比較原則地說明了感生电流的方向，所以对一切电磁感应現象都是适用的。

例1. 图4·8里的 AB 是一个水平放置的螺綫管，它和一个电池組及一个电鍵串联着； C 和 D 是两个用絕緣綫悬挂起来的金属环，它們的平面都和螺綫管 AB 的軸綫垂直。試分別說明，在接通和断开电路时，各个金属环里的电流方向以及 C 、 D 两个金属环的运动情况。

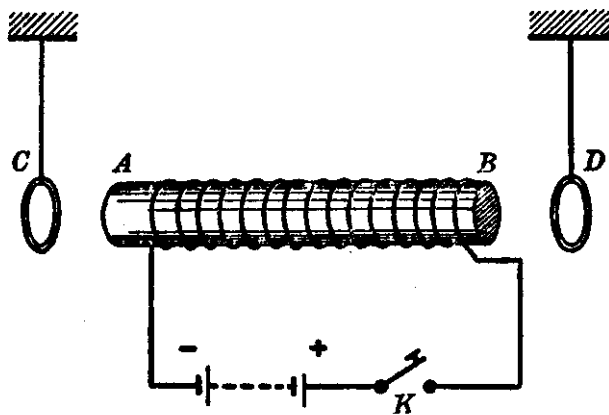


图4·8 例1附图

金属环，它們的平面都和螺綫管 AB 的軸綫垂直。試分別說明，在接通和断开电路时，各个金属环里的电流方向以及 C 、 D 两个金属环的运动情况。

【解】 我們可以把螺綫管 AB 看做是原綫圈，

把 C 和 D 看做是两个閉合的副綫圈。当原綫圈里的电流强度发生变化时，它周圍的磁場也要发生变化，穿过各个副綫圈的磁通量也都要发生变化，因此在各个副綫圈里都要产生感生电流；它們的方向可以根据楞次定律来确定。

螺綫管通电后，按照右手拇指法則，它的 A 端相当于磁棒的 N 极； B 端相当于 S 极。金属环 C 在螺綫管的 A 端附近，磁力綫从右向左穿过它；金属环 D 在螺綫管的 B 端附近，磁力綫也是从右向左穿过它。

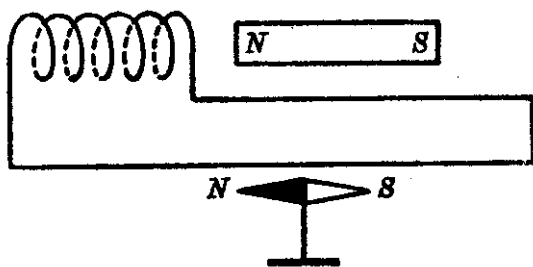
在按下电鍵（即接通电路）的那一瞬时， C 、 D 两环都因为从右向左穿过它們的磁通量增加而产生感生电流，电流的方向根据楞次定律和右手拇指法則确定为逆时針方向（从右向左看）。在有感生电流存在时，各个金属环都具有磁性，即各相当于一个小磁

針。C 环和 D 环的 N 极都在环面的右侧，S 极都在环面的左侧。因为受到螺旋管两极的推斥作用，故它们分别向左、右两侧作离开螺旋管的运动。

在拉开电键（即断开电路）的那一瞬时，C、D 两环都因为从右向左穿过它们的磁通量减少而产生感生电流，它们的方向可以确定为顺时针方向（从右向左看）。此时，C、D 两环的 N 极都在环面的左侧，S 极都在环面的右侧，因受螺旋管两极的吸引作用而分别向右、左两侧作靠攏螺旋管的运动。

习 题 4·2

1. 在附图所示的装置中，如果使磁棒的 N 极作移向线圈的运动，磁针的 N 极将向什么方向转动？如果我们把磁棒作离开线圈的移动，磁针的 N 极又将向什么方向转动？要求说明理由。



(第 1 题)

2. 在进行上题所述的实验时，实验者会感到有一种阻碍磁棒运动的力

存在；如果把线圈的电路断开，那么这种阻力就不存在了。试说明这种现象。[提示：反复精读例题]

3. 把第 1 题里的磁棒向左移动，使它从螺旋管的右端插入，并从它的左端拔出。试说明电路中的感生电流在整个过程中的变化情况（包括有、无和方向）。

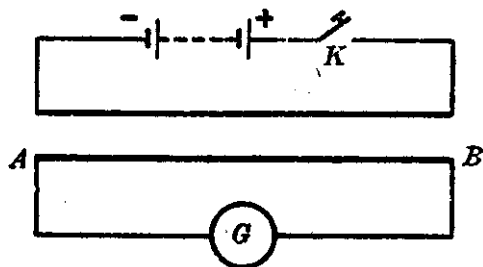
4. 让两根相同的条形磁铁作下落运动，其中一根在中途要穿过一个闭合线圈。试问当这根磁铁在通过线圈的过程中，它的运动和另一根自由降落的磁棒运动相比有什么不同？如果线圈不是闭合的，那么两根磁棒的运动又有什么不同？

5. 有人说，“要获得感生电流必须做功。”试就上题为例，来说明这种讲法是否正确？

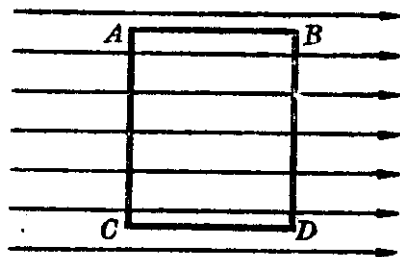
6. 当闭合线路的一部分导线在切割磁力线时，是否要做功？为什么？如果线路不是闭合的，那是否要做功？为什么？

7. 在附图中有两个线路，一个接有电源，一个没有电源。在撤上和拉

开电键 K 时, AB 导线中总有感生电流通过. 试用楞次定律来分别确定在这两种情况下 AB 导线里感生电流的方向. [提示: 把有电源的那个线路看作是原线圈, 没有电源的那个线路看作是副线圈.]



(第 7 题)

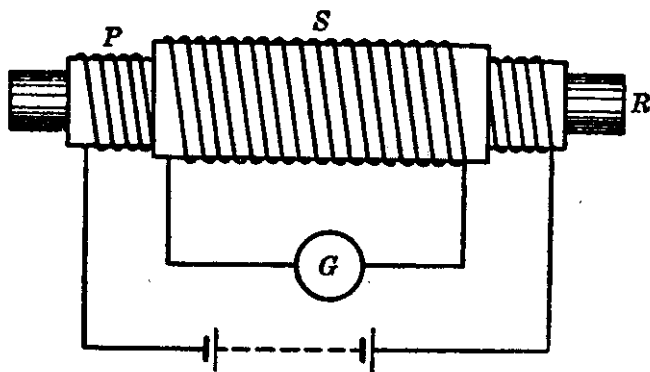


(第 8、9 题)

8. 把矩形金属框 $ABCD$ 放在匀强磁场里, 使它的平面和磁力线平行, 如附图所示. (1) 让它沿磁力线方向移动, 框中有没有感生电流产生? (2) 让它垂直于磁力线的方向移动, 框中有没有感生电流产生? (要求说明理由)

9. 让附图里的金属框绕 CD 边转动, 框中是否有感生电流产生? 让它绕 AC 边转动, 框中又是否有感生电流产生? (要求说明理由)

10. 在附图中, P 是一个接有电源的原线圈, S 是一个套在原线圈外面的副线圈, R 是一根塞在原线圈里面的软铁棒.



(第 10 题)

(1) 当原线圈里有稳恒电流通过时, 副线圈里有没有感生电流? 为什么? (2) 当把软铁棒拔出或插进的那一瞬时, 副线圈里有没有感生电流? 为什么? (3) 拔出或插入软铁棒时, 感生电流的方向是怎样的? (与原线圈里的电流方向相比较)

(4) 拔出或插入软铁棒时, 要不要做功? 是抵抗什么力做功?

§ 4.3 感生电动势

我們已經知道: 在有电流通过一段导体时, 这段导体的两端必须具有电势差; 在有电流通过一个闭合电路时, 这个闭合电路里必须具有电动势. 感生电流之所以能够形成, 就是由于线路里有了

感生电动势.

在定量地研究电磁感应现象的时候,感生电动势是比感生电流更重要的物理量.感生电动势只跟产生电磁感应的条件有关,而感生电流则由感生电动势和电路的电阻等条件来决定.知道了感生电动势的大小,我们就可以根据电路的条件,应用欧姆定律来确定感生电流的大小.

1. 感生电动势的形成 在学习第二章的时候,我们已知知道,电池的电动势是由于化学力的存在,使正、负电荷在电池中作不均匀的分布所形成.与此相似,感生电动势是由于磁场的力的存在,使导体中的自由电子作不均匀的分布所形成.为了便于阐明感生电动势形成的过程,让我们取导体切割磁力线为例来进行讨论.

图 4.9 (a) 表示一根导体 AB , 在磁场中沿 M 方向作切割磁力线的运动. 导体 AB 本来是中性的, 它所带的正、负电荷的电量相等, 分布均匀, 并且不作定向运动. 但当导体 AB 在磁场中沿 M 方向作切割磁力线的运动时, 它所带的正、负电荷也就都跟着沿 M 方向作定向运动. 沿 M 方向运动的正电荷, 形成沿 M 方向的电流; 按照左手法则, 它们要受到指向 B 端的磁场力作用. 沿 M 方向运动的负电荷, 形成与 M 方向相反的电流; 它们所受到的磁

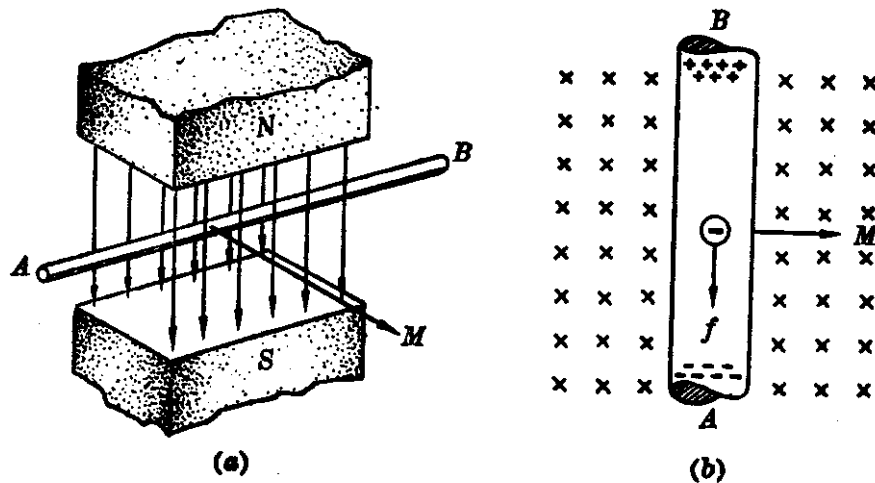


图 4.9 感生电动势的形成

場力方向与正电荷所受到的相反,指向导体的 A 端. 导体中原子核所带的正电荷和繞核旋轉的电子所带的負电荷,由于受到結晶点陣和正負电荷間相互作用的束縛,并不能因为受到磁場力的作用而发生电荷分离現象. 只有在导体中作无規則运动的自由电子(如图 4·9(b)所示),沿磁場力 f 的方向有附加的定向运动. 这样就使导体 A 端的自由电子越来越多,而呈帶負电現象,同时 B 端的自由电子越来越少,就呈帶正电現象,并在导体中建立起一个越来越强的电場(場强的方向从 B 向 A). 这种新建立起来的电場,对自由电子的定向运动起阻碍作用;最后,当电場力和磁場力达到相互平衡,自由电子就不再向 A 端增加;此时, A 、 B 两端間的电势差最大,就是这段导体上的**感生电动势**.

在有感生电动势存在的情况下, AB 这段导体就相当于电池的內电路;它的 B 端电势較高,相当于电池的正极; A 端的电势較低,相当于电池的負极. 在外电路沒有接通时,导体 AB 上只有感生电动势 $\mathcal{E} = U_B - U_A$,而沒有感生电流. 在用导綫把 A 、 B 两端接通以后,在外电路上,电流从高电势的 B 端流向低电势的 A 端,在內电路上,电流从低电势的 A 端流向高电势的 B 端. 此时 A 、 B 两端間的电势差(即外路电势降落) $U_B - U_A$ 小于感生电动势 \mathcal{E} ,而等于感生电流强度 I 和外路电阻 R 的乘积 IR ; 閉合电路上的感生电动势 \mathcal{E} 和感生电流 I 的关系遵循欧姆定律,即

$$\mathcal{E} = Ir + IR,$$

式中 r 为內电阻(即 AB 导体上的电阻), Ir 为內路的电势降落.

在討論这类問題时,可能有人会这样想:在 AB 这段导綫里,电流的方向既然是从 A 向 B ,那么 A 端的电势就应当高于 B 端,怎会 B 端的电势反而高于 A 端呢? 显然,这是錯誤的想法. 导致这种錯誤的原因是把具有电动势的內电路看成了沒有电动势的外电路了,由于只注意到从 A 到 B 有一个电势降落 Ir 而忽略了有一个等于电动势 \mathcal{E} 的电势跃升.

2. 感生电动势的大小 感生电流和别种电流一样，当它在电路中流过时总要消耗电能转换成别种形式的能量（例如物质内能）。这些消耗掉的电能是由什么能量转换来的呢？是通过怎样的方式来转换的呢？让我们仍旧以导体切割磁力线为例来讨论吧。

图 4.10 表示一个放在均匀磁场里的矩形线圈 $abcd$ ，它的平面和磁力线垂直，它的 ab 边可以向左右任意移动（在移动时仍与导线框接触）。当 ab 边沿 M 方向移动而切割磁力线时，矩形线圈里就有感生电流产生，应用右手法则可以确定它的方向为逆时针方向，即在 ab 这段导线里是从 b 流向 a ，如图中箭头 I 所示。

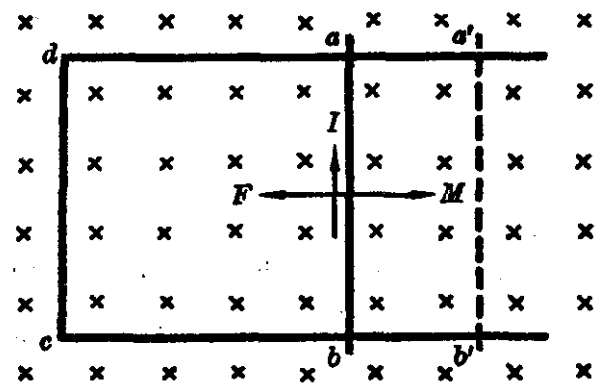


图 4.10 研究感生电动势用图

当线圈里有感生电流通过时，线圈的各个部分都要受到磁场力的作用；应用左手法则，可以确定 ab 这段导线所受磁场力 F 作用的方向与切割方向 M 相反，即它阻碍切割运动。我们已了解，只有导线正在作切割磁力线的运动时，线圈中才有感生电流；切割运动一停止，感生电流就立即消失。要使导线 ab 不断地作切割磁力线的运动，就必须有一个与磁场力 F 相等、方向相反的外力（即沿 M 方向的外力）作用，它抵抗磁场力 F 做功。通过做功，外力的机械能就转变为矩形线圈中的电能。所以我们说，在用闭合线路的一部分导线切割磁力线时，感生电流的能量是由机械能转换来的，是通过抵抗磁场力做功的方式来转换的。

感生电流的能量既是通过抵抗磁场力做功来转换的，那么根据功能定理可知，感生电流在闭合线路中所消耗的总能量应当等于维持切割运动所做的功。

通过第三章的学习，我们已知道，当导线 ab 在作切割运动时，即线圈 $abcd$ 中有感生电流时， ab 导线所受到的磁场力

$$F = 0.1HIL = 0.1HI\bar{ab},$$

式中 H 为磁场强度, 单位为奥斯特; I 为感生电流强度, 单位为安培; \bar{ab} 为作切割运动的导线的长度, 单位为厘米; F 为磁场力, 单位为达因. 设在时间 t 里, 切割导线从位置 ab 移到位置 $a'b'$, 那么在这段时间里外力抵抗磁场力 F 所做的功

$$W_1 = F \cdot \bar{aa'} = 0.1HI\bar{ab} \cdot \bar{aa'} = 0.1HIS,$$

式中 S 为切割导线在时间 t 内所扫过的面积, 单位为平方厘米; W_1 的单位为尔格.

由于 HS 等于穿过面积 $aa'b'ba$ 的磁通量 (即在 t 秒钟里切割的磁力线条数) Φ , 所以上式又可写作

$$W_1 = 0.1I\Phi.$$

通过第二章的学习我们还知道, 电流在全电路上所消耗的能量

$$W_2 = \mathcal{E}It (\text{焦耳}) = 10^7 \mathcal{E}It (\text{尔格}),$$

式中电动势 \mathcal{E} 的单位为伏特, 电流 I 的单位为安培, 时间 t 的单位为秒.

根据功能定理 $W_1 = W_2$, 求得感生电动势的大小

$$\mathcal{E} = 10^{-8} \frac{\Phi}{t}.$$

这就是说: 当导线在作切割磁力线的运动时, 导线里感生电动势的大小跟导线在单位时间里切割磁力线的数目成正比.

再从图 4.10 来看, 当滑动导线从位置 ab 移到位置 $a'b'$ 时, 闭合线圈的面积从 $abcd$ 增加到 $a'b'cd$, 穿过闭合线圈的磁通量增加了 $\Phi = HS$, 即在每单位时间里增加 Φ/t . 因此, 上面的公式又可以理解为: 当穿过闭合线路的磁通量发生变化时, 线路里感生电动势的大小跟穿过闭合线路的磁通量变化率成正比.

这是由法拉第首先提出的, 所以我们把它叫做法拉第电磁感应定律; 它的一般表示式为

$$\mathcal{E} = 10^{-8} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

式中 $\Delta\Phi/\Delta t$ 为磁通量变化率；在变化均匀的情况下，磁通量变化率等于单位时间里增加或减少的磁通量（注意：不要把磁通量变化率误解为磁通量变化）。

在上面，我們拿矩形綫圈为例来进行討論，只是为了方便，而理論和实验都証明，法拉第电磁感应定律对于任何形状的閉合綫路都是适用的；并且还証明，这一定律不仅对单匝綫圈（象图 1.14 所表示的那样）适用，对多匝綫圈也适用。在具有 n 匝綫圈的閉合綫路里，感生电动势是单匝綫圈的 n 倍，即

$$\mathcal{E} = 10^{-8} n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

例 2. 如图 4.10 所示， ab 长 30 厘米，整个矩形綫圈放在磁場强度等于 5000 奥斯特的匀强磁場里；磁場方向与紙面垂直（向紙內）。（1）若导綫 ab 以 4 米/秒的速度向右运动，求感生电动势的大小。（2）若綫路 $abcd$ 的电阻恒定，并等于 0.2 欧姆，求移动导綫 ab 所需要的外力。（3）比較外力所做的功率（即抵抗磁場力所做的功率）和全电路上的电功率。

【解】（1）根据題意，导綫 ab 向右移动时切割磁力綫，因而产生感生电动势。

导綫 ab 每秒钟移动的距离为 4 米（即 400 厘米），每秒钟扫过的面积为 $30 \times 400 = 12,000$ 厘米²，因而每秒钟所切割磁力綫的数目（即 $\Delta\Phi/\Delta t$ ）为 $5000 \times 12,000 = 6 \times 10^7$ 。根据法拉第电磁感应定律，求得感生电动势

$$\mathcal{E} = 10^{-8} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 10^{-8} \times 6 \times 10^7 = 0.6 \text{ 伏特}.$$

（2）在有感生电流通过时，导綫 ab 所受到的磁場力

$$F = 10^{-1} H I \bar{ab} = 0.1 \times 5000 \times \frac{\mathcal{E}}{R} \times 30$$

$$= 0.1 \times 5000 \times \frac{0.6}{0.2} \times 30 = 45,000 \text{ 达因.}$$

为了维持导线 ab 向右移动, 需要一个大小等于 F 、方向和它相反的外力.

(3) 外力的功率

$$N = Fv = 45,000 \times 400 = 1.8 \times 10^7 \text{ 尔格/秒}$$

$$= 1.8 \text{ 瓦特};$$

闭合电路上的电功率

$$N' = I^2 R = \frac{\mathcal{E}^2}{R} = \frac{0.6 \times 0.6}{0.2} = 1.8 \text{ 瓦特.}$$

对比以上结果可以看出, 全电路的电功率等于外力的机械功率.

例 3. 把一根直导线放在匀强磁场里, 使它和磁力线方向垂直, 并使它在和磁力线成 θ 角的方向上以匀速度 v 运动(如图 4.11 所示). 试导出一个等式来表示感生电动势 \mathcal{E} 与速度 v 的关系.

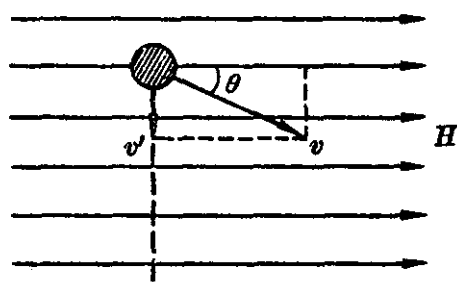


图 4.11 例 3 附图

【解】 根据法拉第电磁感应定律, 我们已了解导体中的感生电动势与导体切割磁力线的快慢有关, 即与每秒钟切割磁力线的数目有关.

当导体沿磁力线方向运动时, 因为它不切割磁力线, 所以不产生感生电动势. 当导体的运动方向和磁力线成某一角度 θ 时, 我们可以应用平行四边形法则把导体的运动分成两个分运动来考虑: 一个与磁力线方向平行的分运动叫做无效分运动(导体在这个方向上运动时不切割磁力线), 另一个与磁力线方向垂直的分运动叫做有效分运动(导体在这个方向上运动时切割磁力线). 在研究电磁感应现象时只需要考虑有效分运动就可以了, 不需要再考虑无效分运动, 所以有效分运动又叫

做切割运动。

从图 4.11 可以看出,有效分运动的速度(即切割运动的速度)

$$v' = v \sin \theta.$$

設导体的长度(垂直于磁力綫方向的长度)为 l , 那么导体每秒钟扫过的面积为 lv' , 即 $lv \sin \theta$; 导体每秒钟所切割的磁力綫数为 $Hlv \sin \theta$.

根据法拉第电磁感应定律, 得出感生电动势的表示式:

$$\mathcal{E} = 10^{-8} Hlv \sin \theta.$$

(在解类似的問題时, 上式可以当作公式来使用.)

例 4. 在一个磁場强度 $H = 10$ 单位的均匀磁場里, 放一个面积为 100 平方厘米的导綫圈, 其匝数为 500 匝. 在 0.1 秒钟內, 把綫圈从平行于磁力綫的方向轉过 90° , 变成与磁力綫的方向垂直. 求感生电动势的平均值.

【解】 在綫圈轉动的过程中, 导綫切割磁力綫的快慢是不均匀的, 或者说穿过綫圈的磁通量变化率是不均匀的, 所以感生电动势也不均匀. 但是, 我們可以根据穿过綫圈的磁通量的平均变化率来求得感生电动势的平均值.

在時間 0.1 秒里, 綫圈轉过 90° , 穿过它的磁通量从 0 变成

$$\Phi = HS = 10 \times 100 = 1000.$$

在这段时间里, 磁通量的平均增加率

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{\Phi - 0}{\Delta t} = \frac{1000 - 0}{0.1} = 10,000.$$

根据法拉第电磁感应定律公式, 求得多匝綫圈的感生电动势平均值

$$\bar{\mathcal{E}} = 10^{-8} n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = 10^{-8} \times 500 \times 10,000 = 0.05 \text{ 伏特.}$$

习 題 4.3

1. 一根豎直的金属棒, 在地磁場中自东向西运动. 問棒的那一端电势

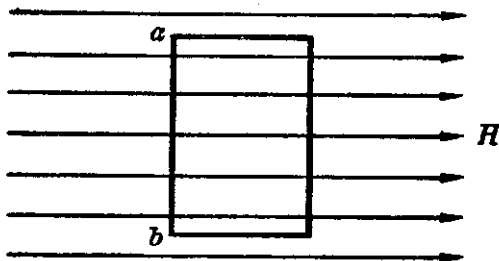
比較高？你是怎样确定的？

2. 导线在5秒钟里一共切割了 7×10^7 根磁力线。求感生电动势的平均值。

3. 有长度等于0.5米的导线，在磁场强度 $H = 400$ 奥斯特的匀强磁场里作匀速运动，速度的大小 $v = 3$ 米/秒。(1) 如果导线的长度、速度的方向和磁力线的方向互成直角，求感生电动势的大小。(2) 如果导线的长度和磁力线的方向垂直，而速度的方向和磁力线方向的夹角是 30° ，求感生电动势的大小。

4. 有一个200匝的线圈，如果穿过它的磁力线，在3秒钟内从 6×10^6 根减少到0，问线圈中的感生电动势是多大？

5. 把一个面积为 20×40 厘米²的矩形线圈放在磁场强度 $H = 2000$ 奥



(第5题)

斯特的匀强磁场里，使线圈平面和磁力线方向平行，两个竖直边和磁力线垂直(如附图所示)。在线圈绕 ab 边以每秒30转的速度旋转时，(1) 感生电动势的平均值等于多少？(2) 线圈在什么位置时的感生电动势为零？在什么位置的感生电动势最大？(3) 感生电动势的最大值等于多少？

[提示：(1) 每转 $1/4$ 圈需时 $1/120$ 秒，磁通量的变化情况重复一次；(2) 切割边的运动速度 $v = 1200\pi$ 厘米/秒。]

§ 4.4 自感现象

自感现象是电磁感应现象的一种特殊表现，是法拉第在1835年首先发现的。它在无线电技术和其他生产技术方面，具有很重要的意义。

1. 自感现象的实验

观察 图4.12表示一个实验用的电路装置。在这个电路里，用电池组作为

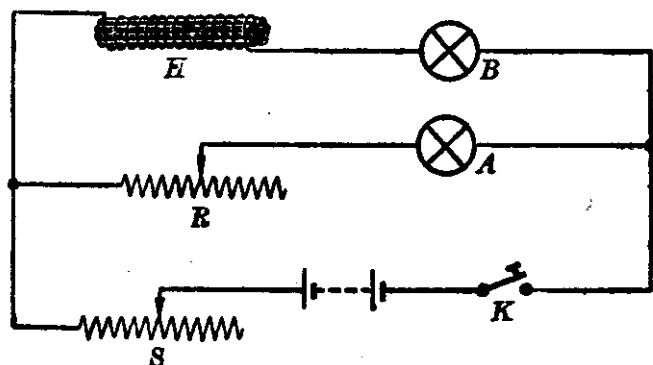


图4.12 自感现象实验装置(一)

电源，向两个并联的支路供给电流。K是电键；S是用来调节干

路电流强度的可变电阻。共有两个支路，在一个支路上串联一个电磁铁（即具有软铁心的导线圈） H 和一个小电灯泡 B ，在另一个支路上串联一个变阻器 R 和一个小电灯泡 A 。实验前，调整变阻器 R 使两个支路上的电阻相等，再调整变阻器 S 使电灯发出适度的亮光。然后拉开电键准备进行观察。

在刚按下电键 K 的一瞬间，可以看到：小灯泡 A 几乎立即正常发光，而小灯泡 B 却要经过一个短促的逐渐亮起来的过程（在这过程中灯丝从红逐渐变白）。这是自感现象的一种表现。这个现象说明：在没有电磁铁的一个分路里，电流是从零迅速增加到某一个稳定值的；而在接有电磁铁的那个分路里，电流因为受到某种阻碍而是逐渐增加的。

利用同一装置，我们还可以看到另一种现象：如果不接通 HB 分路，那么当拉开电键 K 时，小灯泡 A 几乎立即熄灭；而在接通了 HB 分路的情况下，拉开电键 K 后，两个灯泡并不立即熄灭，而是要经过一个短促的继续发光阶段才会熄灭，在这个阶段中，灯光甚至比原来更亮。这是自感现象的又一种表现。这个现象说明：在接有电磁铁的电路里，切断电路后电流非但不立即停止，而且还可能有瞬时的增强。

以上观察到的两种自感现象是怎样形成的呢？我们可以根据电磁感应的一般规律——楞次定律和法拉第电磁感应定律来进行解释。

2. 自感电动势的大小 形成自感现象的主要原因是由于电路中有了自感电动势。让我们先来讨论自感电动势是如何产生的以及它的大小与什么有关。

在学习第三章时，我们已经知道：在通电导体的周围总存在着磁场；当通过导体的电流强度发生变化时，它周围的磁场强度也要跟着成正比地发生变化。理论和实验也都证明：在电磁铁的周围磁场强度特别强，当通过电磁铁线圈的电流强度发生变化时，磁场

强度的变化也特别显著。

在通过电磁铁线圈的电流强度发生变化时，由于线圈里的磁场强度发生显著的变化，引起穿过线圈的磁通量也发生显著的变化，并因而在线圈里引起了感生电动势。这种因通过导体本身的电流强度发生变化，而在导体中引起的感生电动势，就叫做自感电动势。

设在时间 Δt 里，通过电磁铁导线圈的电流变化为 ΔI ，那么根据理论研究，可以知道穿过线圈的磁通量变化为

$$\Delta\Phi = K \Delta I,$$

式中 K 为比例恒量，它的大小决定于导线圈的形状、大小、匝数和软铁心的性质等。

根据法拉第电磁感应定律，可以求得自感电动势

$$\mathcal{E} = 10^{-8}n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 10^{-8}nK \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

如用 L 代表 $10^{-8}nK$ ，则自感电动势公式可写作

$$\mathcal{E} = L \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

式中的 L 叫做导线圈的自感系数，它的大小跟线圈的几何条件（形状、大小、匝数）和铁心的性质有关。对同一个线圈来说，自感系数 L 是个定值；对不同的线圈来说，自感系数一般是不同的。

自感系数的单位是亨利。如果通过线圈的电流变化率是1安培/秒时，线圈里的自感电动势正好等于1伏特，那么这个线圈的自感系数就叫做1亨利。即

$$1 \text{ 亨利} = 1 \text{ 伏特} / \text{安培} / \text{秒},$$

即
$$1 \text{ 亨利} = 1 \text{ 伏特} \cdot \text{秒} / \text{安培}.$$

此外，自感系数的单位还有毫亨利和微亨利。

$$1 \text{ 毫亨利} = 10^{-3} \text{ 亨利},$$

$$1 \text{ 微亨利} = 10^{-6} \text{ 亨利}.$$

3. 自感电动势的方向 为什么会有上述两种不同的自感现象呢？为了解答这个问题，那就需要先讨论一下有关自感电动势的方向问题。

楞次定律指出：感生电流的磁场总在阻碍原来的磁场发生变化。在我们所讨论的问题中，感生电流起因于自感电动势，自感电动势起因于原来磁场的变化，原磁场的变化起因于通过线圈的电流变化，所以我们说：自感电动势总在阻碍通过线圈的电流发生变化。

在所述的实验里，当按下电键 K 时，通过电磁铁线圈的电流在增强（即从无到有），此时的自感电动势阻碍电流增强（即与原来的电流反方向），使它不能立刻达到应有的强度（即符合欧姆定律的强度），而是要在一小段时间里逐渐增强。当拉开电键 K 时，通过电磁铁线圈的电流在减弱（即从有到无），线圈里的自感电动势阻碍电流减弱，与原来的电流同方向，在一小段时间里维持电流继续通过闭合线路 $HBARH$ ，使两个灯泡继续发光。在这一瞬时，电磁铁线圈（我们称它为自感线圈）起电源的作用，电流的方向为 $HBARH$ ，即在 HB 支路上与原来的电流同方向，在 RA 支路上与原来的电流反方向。这一瞬时的感生电流强度取决于自感电动势和闭合线路 $HBARH$ 的总电阻，当线圈的自感系数 L 和电流的变化率 $\Delta I/\Delta t$ 都很大时，自感电动势往往要比原来电池组的电动势大得多，如果这时线路里的总电阻不大，则在拉开电键 K 断开电源时，闭合线路 $HBARH$ 里的感生电流就可能比原来的电流更强一些，所以也就会产生灯泡比原来更亮一些的现象。

为了加强实验效果，使灯泡比原来更亮一些，我们应当尽可能地加大线圈的自感系数和尽可能地减小线路的总电阻。图 4-13 表示适合这一要求的装置。图中 H 是用绝缘粗导线绕在软铁框上的自感线圈，相当于图 4-12 里的 HB 支路； A 是一个小灯泡，相当于图 4-12 里的 RA 支路。 H 的自感系数很大，整个电路上

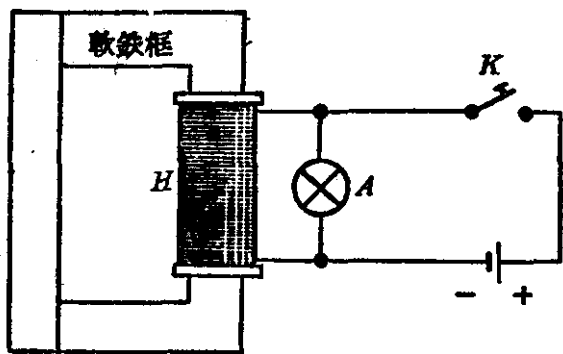


图 4·13 自感现象实验装置(二)

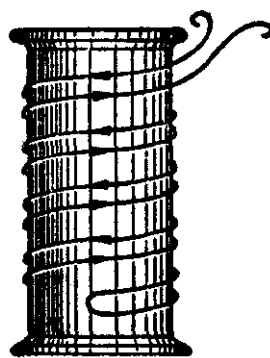


图 4·14 双绕法

的电阻很小。

综合以上的讨论，我们可以得出这样的结论：在通过线路的电流强度发生变化时，在线路里有阻碍电流变化的自感电动势产生。在同一线路里，自感电动势的大小和电流的变化率成正比。如果电流在增强（或接通电路），则自感电动势与原来的电流反方向；如果电流在减弱（或切断电路），则自感电动势与原来的电流同方向。

自感现象不仅存在于自感线圈里，即使在直导线上也存在着，不过由于直导线的自感系数 L 要比自感线圈的小得多，所以产生的自感电动势也很小，不容易被发现。自感系数比较大的电路叫做自感电路。

如果我们把两根电流强度相等而方向相反的绝缘导线绞在一起，或平行地放在一起，那么由于它们周围的磁场永远互相抵消，这就不会因为电流的变化而引起自感现象。制造电阻线圈时，往往用来回绕线的方法（又叫做双绕法）来消除自感。图 4·14 表示双绕法。

4. 自感现象中的能量转换 在有自感的电路里，开始通电时，电流从无到有，逐渐增加，最后才达到应有的最大值。这个电流逐渐增强的过程就是电路周围磁场逐渐建立的过程。磁场和电场相似，是具有能量的，这部分能量是由电源的能量转换来的。在电流强度还没有达到应有的最大值之前，电源供给的能量分成两部分来转换：一部分转换成电流的能量，消耗在电路上使导线发

热；另一部分抵抗自感电动势做功（此时自感电动势与电流反方向），轉換成磁場能。在电流已經达到应有的最大值之后，磁場已經穩定，磁場能不再增加，自感电动势也不再存在。此时，电源所供給的能量全部被轉換成电流的能量而消耗在电路上使导綫发热，除此之外不再有別的能量消耗。如果在电流穩定之后，除去电源的作用而不切断电路（如在图 4·12 所示的装置中拉开电鍵，此时电源綫路已被切断，但綫路 $HBARH$ 并未切断），則在一个很短的时间內，电路里仍有电流存在（拿图 4·12 所示的电路來說，感生电流的方向为 $HBARH$ ）。这个电流的能量就是由磁場能轉換来的。等到磁場完全消失，感生电流也降为零。所以我們說：在有自感的电路里，电流逐漸增强的过程就是周圍磁場的建立过程，电流逐漸减弱的过程就是周圍磁場的消失过程。

在第六章里，上面这个結論还要得到进一步发展，成为电場和磁場相互轉換的理論。

习 題 4·4

1. 导綫圈的自感系数 $L=1.5$ 毫亨利，当通过它的电流在 $1/400$ 秒里由零增加到 3 安培，問綫圈里的自感电动势有多大？

2. 我們已經知道，在图 4·17 所示的电路里，拉开电鍵 K 时，两个灯泡并不立即熄灭，甚至在一极短的时间里还会发出比原来更亮的光来。这是什么原因？在什么条件下电灯泡才会发出比原来更亮的光来？

本 章 提 要

1. 产生感生电动势和感生电流的条件 导体在磁場里切割磁力綫时，导体內部就要产生感生电动势，如果导体是閉合电路的一部分，那么就有感生电流产生。或者当通过綫圈的磁通量发生变化时，綫圈里就要产生感生电动势，如果电路是閉合的，电路中就有感生电流产生。

2. 感生电流的方向 可由右手法則与楞次定律来确定。

(1) 右手法則 伸出右手，把手掌摊平，让拇指和其余四指垂直并同处在一个平面上；把伸开的右手放入磁場中，使掌心对着磁力綫的来向，如果拇

指指着切割运动的方向，那么四指就指着感生电流的方向（而所获得的感生电流使切割导体受到一个阻碍切割运动的磁場力的作用）。

(2) **楞次定律** 楞次定律是确定感生电流方向的普遍适用的規律，它的内容是：感生电流的磁場总在阻碍原来的磁場发生变化。

注意：① 具有感生电动势的导体，可以被看成是一个电源的内电路，感生电流从电势较高的一端流出，相当于电池的正极；从电势较低的一端流入，相当于电池的负极。

② 电磁感应现象是完全符合能量守恒定律的。

3. 感生电动势的大小

(1) 当导线在磁場中切割磁力线时，导线中所产生的感生电动势的大小跟导线在单位时间内切割磁力线的条数成正比。

即
$$\mathcal{E} = 10^{-8} H L v \sin \theta .$$

式中的 v 如果是即时速度，则所得的结果是即时感生电动势；如果是平均速度，则所得的结果是平均感生电动势。比例常数确定为 10^{-8} 时，各量的单位必须是： \mathcal{E} 用伏特， H 用奥斯特， v 用厘米/秒， L 用厘米。当 $\theta = 0^\circ$ 时 $\sin \theta = 0$ ， $\mathcal{E} = 0$ 。

(2) 当穿过闭合线路的磁通量发生变化时，线路里的感生电动势的大小跟穿过闭合线路的磁通量变化率成正比。

$$\mathcal{E} = 10^{-8} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} .$$

这个式子叫做法拉第电磁感应定律，求得的是平均感生电动势。

4. **自感现象** 自感现象是导体由于本身的电流变化而发生的电磁感应现象。

(1) 自感电动势的大小与通过线圈的电流强度的变化率成正比：

$$\mathcal{E} = L \frac{\Delta I}{\Delta t} ,$$

式中 L 是自感系数，单位是亨利（1亨利 = 1伏特·秒/安培）。

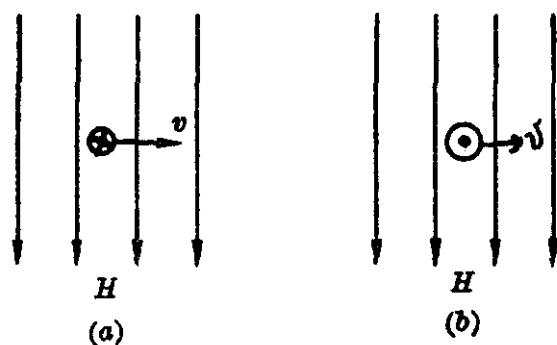
(2) 自感电动势的方向遵守楞次定律，总在阻碍原电流的变化。

(3) 在自感电路里，电流逐渐增强的过程就是周围磁场的建立过程，电流逐渐减弱的过程就是周围磁场的消失过程。

复 习 题 四

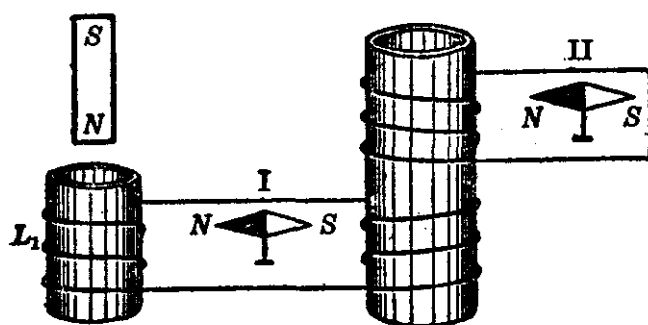
1. 把一根通电直导线垂直于磁场方向放入匀强磁场中，它的运动方向

如附图(a)所示, 試判断这根导线中的电流方向. 如果一根直导线(它是閉合电路的一部分)由于切割磁力綫而产生电流, 电流方向如附图(b)所示, 試判断导线的运动方向. 在以上两种情况中哪一种应该用左手定則来判断, 哪一种应该用右手定則来判断? 为什么?



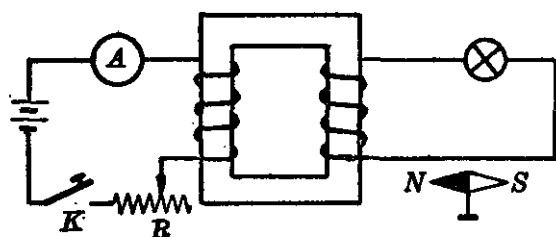
(第1題)

2. 如附图所示, 問当条形磁铁插入綫圈 L_1 时和从綫圈 L_1 中取出时, 磁針 I 和 II 的 N 极要怎样偏轉?



(第2題)

3. 如附图所示, 問在 K 閉合的瞬时、閉合以后和断开的瞬时, 安培計、灯泡和磁針都将发生什么变化? 为什么? 如果 K 接通后, 改变电阻 R 的大小, 安培計、灯泡和磁針又将发生什么变化?



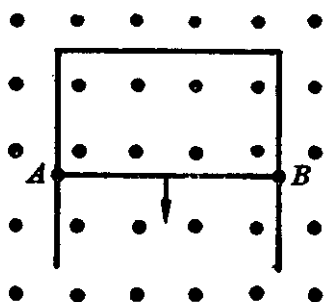
(第3題)

4. 有两个閉合电路 A 和 B , 綫圈匝数相同, 通过 A 的磁力綫在 3 秒钟內减少了 60,000 条, 通过 B 的磁力綫在 5 秒钟內增加了 80,000 条, 問两电路中的感生电动势是否相同? 哪个大? 为什么?

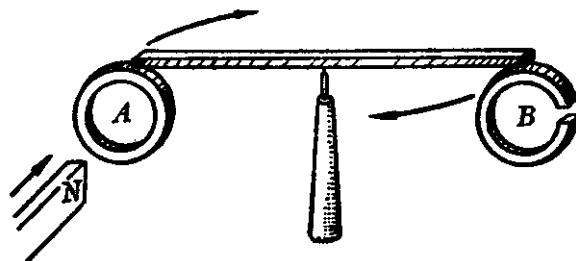
5. 在一匀强磁場內有一个 30 匝的綫圈, 它在 0.01 秒內从垂直磁力綫的位置轉到平行于磁力綫的位置, 已知磁場强度为 0.6 奥斯特, 綫圈的半徑为 5 厘米, 綫圈的电阻为 1.2 欧姆, 求它的平均感生电动势和感生电流.

6. 如附图所示, 一水平的匀强磁場, 磁力綫的方向指向讀者, 在垂直于磁場的豎直面內放一矩形金属框, 框的一边 AB 可紧靠着框架无摩擦地上下滑动(滑动时 AB 仍保持水平), (1) 試在图中画出 AB 边下落时框中的电流

的方向, (2) 如果 AB 边匀速下落, 試用下列数据, 求出下落的速度: AB 边的质量 $m=0.2$ 克, 长度 $l=10$ 厘米, AB 边的电阻 $R=0.2$ 欧姆 (框的其他三边的电阻忽略), 磁場强度 $H=1000$ 奥斯特, 重力加速度 $f=10$ 米/秒², 空气阻力不計.



(第 6 題)

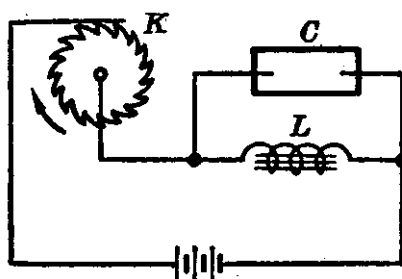


(第 7 題)

7. 附图中所示的 A 和 B 各是一个輕的鋁环, 其中 A 是閉合的, B 是断开的, 它們被支持在共同的重心上. 如果用磁鉄的任一极来接近 A 环, 可以發現 A 环被磁鉄推开; 如果把磁极从 A 环移开, 又可以發現 A 环被磁鉄吸引. 但是磁极移近或远离 B 环时, B 环却始終不动, 試解釋所观察到的現象.

8. 在磁場强度 $H=5000$ 奥斯特的匀磁場里, 有一长 15 厘米的导线, 以 20 厘米/秒的速度, 沿着与磁力綫垂直的方向运动. 求感生电动势. 若运动方向与磁力綫方向成 60° 角, 那末产生的感生电动势又該是多大?

9. 如图 4-13 所示, 当接通电路时, 自感电动势能否大于电路中原来的电压? 当切断电路时呢? 为什么?



(第 10 題)

10. 如附图所示, L 是具有鉄心的自感綫圈, C 是氖管, K 是手搖断續器. 轉动手搖断續器, 氖管就发光, 断續器不动时, 氖管并不发光. 怎样解釋这个現象.

第五章 交流电

在第二章里，我們研究过强度和方向都不随時間而改变的穩恒电流。但是，在工农业生产和日常生活中广泛应用的，絕大部分是强度和方向都在作周期性变化的电流。这种电流叫做交变电流，或簡称为交流电。

有关交变电流的理論，要比穩恒电流的复杂得多。在这一章里，我們只对交流电的产生、輸送和应用等方面作一些簡單的介紹和討論。

§ 5.1 交流电的产生

1. 交流电的获得 在第四章里曾經讲过，当导綫在磁場中作切割磁力綫的运动时，导綫中就有了感生电动势，它的大小跟切割磁力綫的快慢（即每秒钟所切割的磁力綫条数）成正比；如果这个切割磁力綫的导綫是閉合綫路的一部分，那么在綫路中就有了感生电流。

現在，我們要研究交流电是怎样获得的。

把一个矩形綫圈放在匀强磁場里，装置如图 5.1 所示。如果让綫圈繞 OO' 軸緩慢地作勻速轉动（ OO' 軸綫与磁

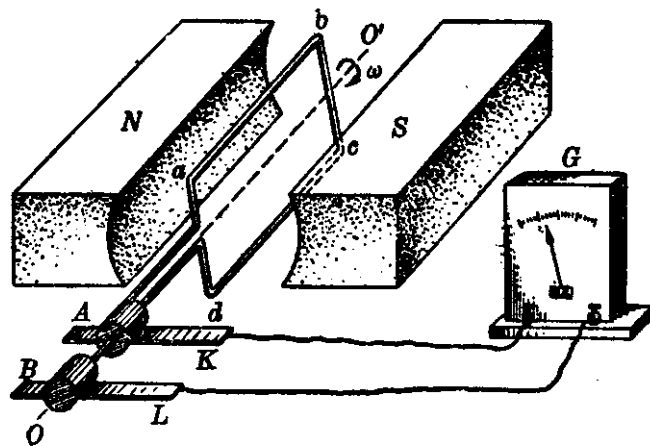


图 5.1 获得交流电的簡單装置

力綫垂直)，那么就可以看到电流計的指針跟着綫圈的轉动作来回

摆动。这说明线圈里的感生电流在不断地变化。这样获得的感生电流就是我们要讨论的交流电流。

2. 交流电的变化规律 交流电流的强度和方向是怎样跟着线圈的转动而变化的呢？设想图 5.1 里的矩形线圈以角速度 ω 绕 OO' 轴作匀速转动。在转动中，线圈的 bc 边和 da 边始终是不切割磁力线的，因而也不产生感生电动势，它们只起导线的导电作用，而不起电源的作用。线圈的 ab 边和 cd 边是和磁力线垂直的，当线圈绕轴转动时它们要切割磁力线而产生感生电动势，结果就成为两个串联着的电源在闭合电路中形成感生电流。

当线圈在作匀速转动时， ab 边和 cd 边的运动速率 v （即速度的大小）是均匀不变的，但它们切割磁力线的快慢却是随时改变的，因此线圈里的感生电动势和感生电流也是随时改变的（法拉第电磁感应定律指出：感生电动势的大小跟导线切割磁力线的快慢成正比）。

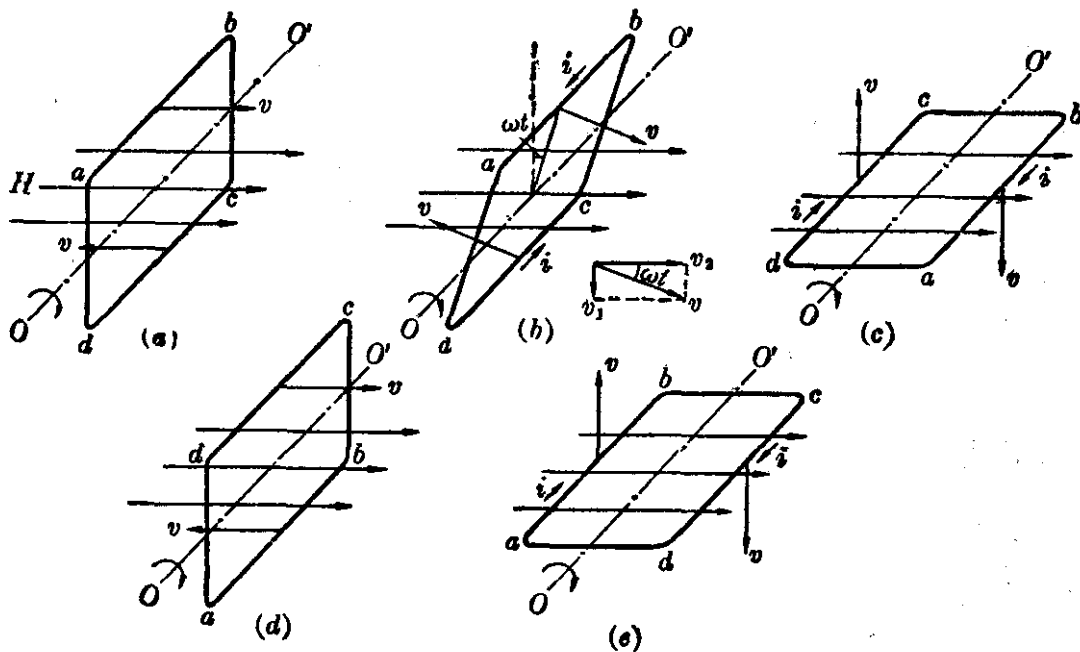


图 5.2 讨论交流电变化规律用图

当线圈在图 5.2(a) 所表示的位置时， ab 边向右运动， cd 边向左运动；在这一瞬时，它们的运动方向都和磁力线平行，都不切

割磁力綫，因此綫圈里的感生电动势和感生电流都等于零。轉过了这个位置以后， ab 边和 cd 边的运动方向开始和磁力綫成角度； ab 边沿自上而下的方向切割磁力綫， cd 边沿自下而上的方向切割磁力綫，因此綫圈里就开始有了感生电动势和感生电流。

設想在 t 秒钟后，綫圈轉过了角度 ωt ，到达图 5·2(b) 所表示的位置。此时， ab 边和 cd 边的切割速度都等于 $v \sin \omega t$ (与磁力綫垂直的分速度 v_1)，感生电动势都等于 $10^{-8} Hlv \sin \omega t$ 伏特 (H 为磁場强度， l 为 ab 边或 cd 边的长度)。根据右手法則可以确定綫圈中感生电流的方向为 $b \rightarrow a \rightarrow d \rightarrow c \rightarrow b$ 。

随着角度 ωt 的增大， ab 边和 cd 边的切割速度 $v \sin \omega t$ 也逐漸增大。当 $\omega t = 90^\circ$ 时， $\sin \omega t = 1$ ，切割速度等于 v ；此时， ab 边和 cd 边里的感生电动势最大，各等于 $10^{-8} Hlv$ 伏特；綫圈里的感生电流也最大。图 5·2(c) 就表示这个位置。

再繼續轉动綫圈， ab 边仍旧是自上而下地切割磁力綫， cd 边仍旧是自下而上地切割磁力綫，因而感生电流的方向也仍旧不变，但是感生电动势和感生电流的大小則随着切割速度 $v \sin \omega t$ 的逐漸减小而减小。这个过程要繼續到图 5·2(d) 所示的位置为止；此时， $\omega t = 180^\circ$ ，切割速度、感生电动势和感生电流的瞬时值都等于零。

在綫圈轉动的第二个半圈里， ab 边切割磁力綫的方向变成了自下而上，而 cd 边切割磁力綫的方向却变成了自上而下，感生电流的方向也变成为 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow a$ 。在轉角 ωt 从 180° 到 270° 的过程中，随着 ωt 的增大，反向感生电动势和感生电流的大小也逐漸增大；当綫圈到达图 5·2(e) 所表示的位置时，它們重新达到最大值。在从 270° 到 360° 的过程中，感生电动势和感生电流的大小随着 ωt 的增大而逐漸减小；当 $\omega t = 360^\circ$ ，即綫圈恢复到图 5·2(a) 所表示的位置时，它們又都减小到零。

綫圈繞 OO' 軸綫轉动一周，感生电动势和感生电流完成一次

变化。线圈不停地转动，感生电动势和感生电流的变化就不断地重复着。由于线圈的转动角速度是均匀的，每转一周所经过的时间是一定的，故感生电动势和感生电流重复一次变化所经过的时间也是一定的。所以我们说，交流电的电动势和电流的方向和大小都在作周期性的变化。

在图 5.2(a) 和 (d) 所表示的位置上，线圈平面跟磁力线垂直，在这一瞬时的感生电动势和感生电流都为零，我们称这个位置为中性面。线圈在转动时，每一次经过中性面后，感生电动势和感生电流的方向就要改变一次。所以我们说，中性面是交流电改变方向的分界面。线圈每转一周，交流电的方向要改变两次。

3. 交流电的公式和图线 仍旧拿图 5.2 所示的装置来讨论。设想从中性面开始，线圈以角速度 ω 弧度/秒绕 OO' 轴匀速转动， ab 边和 cd 边以线速度 v 厘米/秒作匀速圆周运动，经过时间 t 秒后，线圈离开中性面的角度为 ωt 。如果 ab 边和 cd 边的长度各等于 l 厘米，磁场强度等于 H 奥斯特，那么根据法拉第电磁感应定律，这时 ab 边和 cd 边的感生电动势各为

$$\mathcal{E}' = 10^{-8} Hlv \sin \omega t \text{ 伏特.}$$

因为这两个电动势是串联的，所以线圈里的感生电动势为

$$\mathcal{E} = 2 \times 10^{-8} Hlv \sin \omega t. \quad (1)$$

从上式中可以清楚地看出，感生电动势 \mathcal{E} 是跟着时间作周期性变化的。当线圈在中性面时， $\omega t = 0$ 或 180° ；此时 $\sin \omega t = 0$ ，感生电动势也等于 0。当线圈平面与磁力线平行的时候， $\omega t = 90^\circ$ 或 270° ；此时 $\sin \omega t = \pm 1$ ，感生电动势的数值最大，如用 \mathcal{E}_m 表示，则

$$\mathcal{E}_m = 2 \times 10^{-8} Hlv \text{ 伏特.} \quad (2)$$

感生电动势的最大值又称为感生电动势的幅值。把 (2) 式代入 (1) 式，得出任一时刻的感生电动势

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \sin \omega t. \quad (3)$$

設綫圈里的电阻为 R ，把(3)式的两边各除以 R ，得出

$$\frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{\mathcal{E}_m}{R} \sin \omega t,$$

即綫圈中任一时刻的感生电流为

$$I = I_m \sin \omega t, \quad (4)$$

式中 I_m 为感生电流的最大值，又叫做感生电流的幅值。

在綫圈轉动一周的过程中， $\sin \omega t$ 的变化为自 $0 \rightarrow +1 \rightarrow 0 \rightarrow -1 \rightarrow 0$ ；綫圈中感生电动势的变化为自 $0 \rightarrow +\mathcal{E}_m \rightarrow 0 \rightarrow -\mathcal{E}_m \rightarrow 0$ ；感生电流的变化为自 $0 \rightarrow +I_m \rightarrow 0 \rightarrow -I_m \rightarrow 0$ 。根据上面的等式(3)和等式(4)，我們可以作出这样一个結論：当矩形綫圈在匀强磁場中匀速轉动时，所产生的感生电动势和感生电流跟着時間按正弦規律变化。我們称这样的交流电为**正弦式交流电**。

图 5·3 里的曲綫表示正弦式交流电的电流强度怎样跟着時間变化，曲綫上方的五个图分別表示綫圈在各个时刻的位置。这个曲綫叫做**正弦式交流电图綫**。

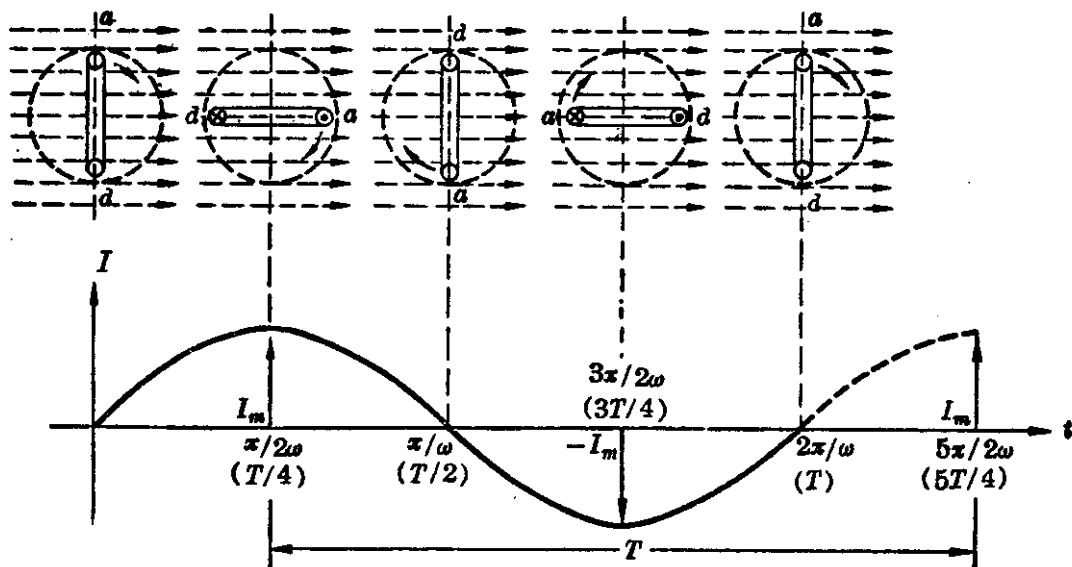


图 5·3 正弦式交流电图綫

4. 交流电的周期和頻率 綫圈每轉动一周，交流电的变化(包括电动势和电流强度的变化)也重复一次，习惯上我們称为交流电完成一次全振动。**交流电完成一次全振动的時間叫做交流电**

的周期。周期用字母 T 表示，单位是秒。在一秒钟里交流电振动的次数叫做交流电的頻率。頻率用字母 f 表示，单位是赫兹。如果交流电在 1 秒钟里完成 10 次全振动，我们就說交流电的頻率为 10 赫兹。

頻率和周期互为倒数，即

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{或} \quad T = \frac{1}{f}.$$

綫圈轉动的角速度 ω (弧度/秒) 叫做交流电的圓頻率或角頻率，它跟周期和頻率有下列关系：

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}.$$

我国发电站发放出来的交流电，一般周期是 $1/50$ 秒，即頻率等于 50 赫兹。在 1 秒钟里，电流的方向要改变 100 次。

5. 交流电的有效值 我們已知，正弦式交流电的电动势和电流强度都按照正弦規律跟着時間改变。当然，在交流电路里，任何一段导綫上的电压也按正弦規律跟着時間改变。例如一只接在交流电路里的电炉，它的实际电压和实际通过的电流都是在不断变化的，但我們描述这只电炉的用电情况却总是用确定的电压值和电流值(例如 220 伏特，4.5 安培)，这些确定的数值的含义是什么呢？它們所指的显然不是电压和电流的瞬时值，而是它們的有效值。所謂有效值，是根据电流的热效应来規定的。让交变电流和稳恒电流通过同样大小的电阻，如果它們在相同的時間里放出相等数量的热，我們說这一个稳恒电流的大小就是这个交变电流的有效值。根据电流的有效值和电阻，用欧姆定律計算出的电压就是交变电压的有效值。

显然，交变电压和交变电流的有效值总比它們的幅值(即最大值)来得小。理論和实验都証明，正弦式交流电的有效值等于幅值的 $1/\sqrt{2}$ 倍，即 0.707 倍；因此，我們得出

$$I_{\text{有效值}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}};$$

$$V_{\text{有效值}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}};$$

$$\mathcal{E}_{\text{有效值}} = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{2}}.$$

交变电压和交变电流的瞬时值不能用仪表来直接量度，而它们的有效值却可用交流伏特计和交流安培计直接量度。交流伏特计和交流安培计的构造和工作原理，跟我们在第三章里讨论过的直流仪表不同。限于篇幅，本书将不作讨论。

例 1. 一个每边长 20 厘米的正方形金属框，在磁场强度为 50 奥斯特的匀强磁场中，以 30 转/分的转速绕中心轴作匀速转动，轴跟磁力线垂直，求 (1) 感生电动势的最大值，(2) 当金属框平面跟中性面成 30° 角时，电动势的瞬时值。

已知： $l = 20$ 厘米， $H = 50$ 奥斯特，

$\omega = 30$ 转/分 $= 0.5$ 转/秒 $= \pi$ 弧度/秒。

求： (1) \mathcal{E}_m ； (2) \mathcal{E} (当 $\omega t = 30^\circ$ 时)。

【解】 金属框边的线速度

$$v = \omega R = \pi \times \frac{20}{2} = 10\pi \text{ 厘米/秒.}$$

(1) 感生电动势最大值

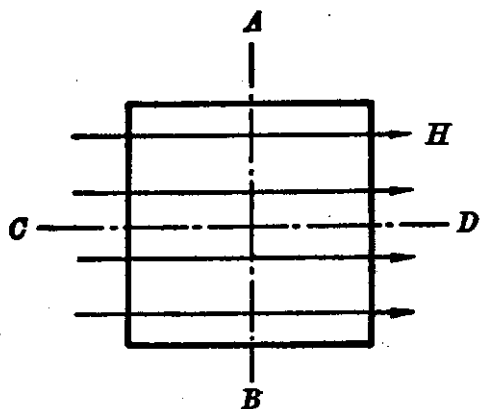
$$\begin{aligned} \mathcal{E}_m &= 2 \times 10^{-8} Hlv \\ &= 2 \times 10^{-8} \times 50 \times 20 \times 10\pi \\ &= 6.28 \times 10^{-4} \text{ 伏特.} \end{aligned}$$

(2) 当 $\omega t = 30^\circ$ 时，感生电动势的瞬时值

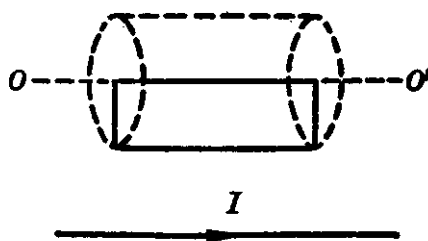
$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= 2 \times 10^{-8} Hlv \sin \omega t \\ &= 2 \times 10^{-8} \times 50 \times 20 \times 10\pi \times \sin 30^\circ \\ &= 6.28 \times 10^{-4} \times \frac{1}{2} = 3.14 \times 10^{-4} \text{ 伏特.} \end{aligned}$$

习 题 5.1

1. 交流电是怎样产生的? 感生电动势的大小与哪些物理量有关?
2. 什么叫做正弦交流电?
3. 什么叫做交流电的周期? 什么叫做交流电的频率? 交流电的周期跟频率有什么关系?
4. 交流电的电流、电压、电动势的最大值与有效值的关系怎样? 什么叫做电流(电压、电动势)的有效值?
5. 矩形线圈在匀强磁场中转动时, 线圈面转到什么位置时感生电动势最大? 转到什么位置时感生电动势等于零? 为什么?
6. 如附图所示, 把矩形金属框的平面和磁力线方向平行地放置. (1) 让它绕 CD 轴线旋转, 金属框里有没有电流产生? 为什么? (2) 让它绕 AB 轴旋转, 金属框里有没有电流产生? 为什么?



(第 6 题)



(第 7 题)

7. 如附图所示, 有一个长方形的金属框, 绕它的一边匀速地转动; 与它并列的一根导线上有稳恒电流通过, 问当金属框转到什么位置时, 金属框上所产生的感生电动势最大和最小?

§ 5.2 交流发电机

发电机是把机械能转变成电能的一种装置。能够发出交变电流的发电机叫做交流发电机。

图 5.4 是最简单的交流发电机的示意图。图中 N 和 S 是永磁体的两极; K_1 和 K_2 是两个滑环, 它们分别和矩形线圈的两个端点焊接在一起, 组成发电机的内电路; B_1 和 B_2 是两个电刷, 它

們作为外电路的两个端点,分别与滑环 K_1 和 K_2 作可以相对滑动的接触. 当线圈在磁场中转动时,滑环也跟着一起转动,它通过电刷与外电路接通组成一个全电路. 由于在内电路里存在着交变的感生电动势,因而在全电路里就形成了交变电流,外电路的小电珠里通过电流就发出光来.

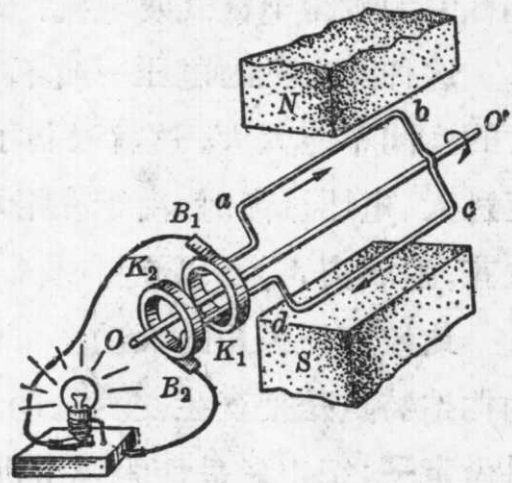


图 5.4 发电机示意图

这种简单发电机的电动势随时变化,遵循正弦规律的,它的大小

$$\mathcal{E} = 2 \times n \times 10^{-8} Hlv \sin \omega t \text{ 伏特.}$$

可见为了增大感生电动势,就需要增强磁场强度 H 、增多线圈的匝数 n 和增长切割边 ab 和 cd 的长度 l , 以及加快切割边 ab 和 cd 的线速度 v .

在实际应用的发电机中,为了有效地加强 H ,总是用电磁铁代替永磁体. 电磁铁的铁心是由硅钢片制成的,它的线圈(叫做激磁线圈)与直流电源相连接,有固定的 N 极和 S 极. 通常把用来形成磁场的永磁体或电磁铁称为**感应体**.

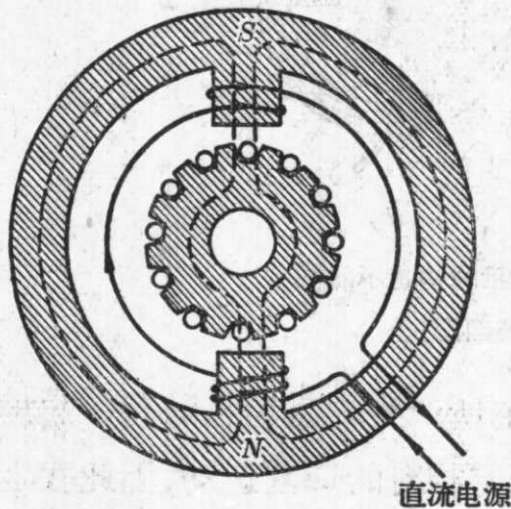


图 5.5 二极交流发电机的示意图

图 5.5 表示一个有两个磁极的交流发电机的示意图. 图中的外圈表示上述的感应体,中部表示一个叫做**电枢**的转动体. 电枢是一个圆柱状的铁心,在圆柱面上开有 $2n$ 个凹槽,槽内绕着 n 匝串联着的线圈.

这种发电机的感应体是固定不动的,它的电枢由发动机带动,

在不停地轉动着，它通过滑环和电刷向外电路供給着交变电流。我們称它为**旋轉电樞式发电机**。

这种发电机的电压一般不超过 500 伏特。一方面因为电樞所占的空間不能太大，这就限制了綫圈匝数的增多；另一方面，当速度过大、电压过高时，由于在滑环与电刷間的滑动接触处容易引起火花，造成灾害，所以旋轉电樞式发电机的功率一般都是較小的。

比較广泛应用的大功率发电机是所謂**旋轉磁場式发电机**。它的构造特点是把产生交变电动势的电樞作为发电机的固定部分，叫做**定子**；把电磁鉄作为发电机的旋轉部分，叫做**轉子**。

如图 5·6 所示，旋轉磁場式发电机的定子是一个鉄制圓筒，在它的內表面上有平行的沟槽，沟槽里繞着电樞。轉子是一个可以旋轉的电磁鉄。电磁鉄的激磁綫圈所需要的直流电，是通过电刷、滑环由另外的电源供給的。因为感应体的电压在 250 伏特以內就够了，所以旋轉磁場式发电机在构造上要比旋轉电樞式发电机簡單得多。

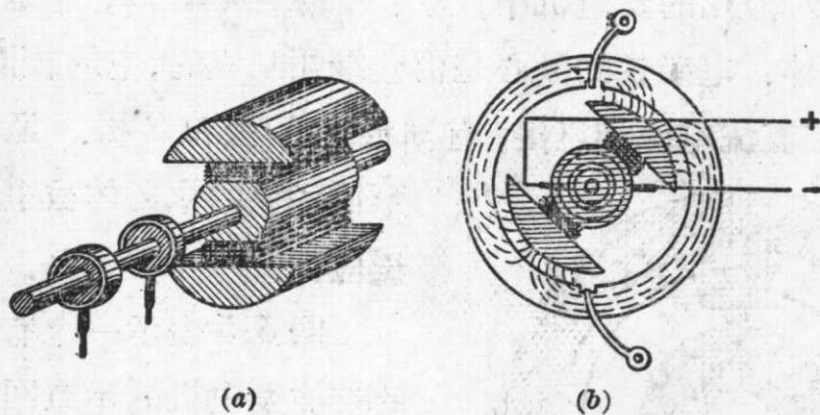


图 5·6 旋轉磁場式发电机的构造示意图
(a—轉子；b—截面图)

当轉子用某种发动机带动时，它所产生的磁場也随着一起旋轉，結果磁力綫与定子沟槽里的导綫有相对的切割运动，因此在定子綫圈組里就产生了交变电动势。如果把定子綫圈組与外电路接通，那就有交变电流形成。

当交流发电机只具有一对磁极时，轉子轉动一周、电流完成一次全振动；如果我們要获得 50 赫兹的頻率，那就必須要使轉子的轉速达到 50 轉/秒，即 3000 轉/分。在用汽輪机带动的发动机中，轉子的轉速确可达到这样高。

为了减低轉子的轉速，我們必須增多磁极的对数。如果发电机里用两对磁极，轉子每轉一周电流就完成两次全振动；如果用四对磁极，轉子每轉一周电流就完成四次全振动；如果用 n 对磁极，轉子每轉一周电流就完成 n 次全振动。因此，多磁极交流发电机的頻率与轉速的关系可用下式表示：

$$\text{轉速(轉/分)} = \frac{f}{n} \times 60,$$

式中 f 为頻率(赫兹)， n 为磁极对数。

习 題 5·2

1. 交流发电机的主要构造有哪几部分？各有什么作用？現代大型交流发电机用什么做轉子？为什么？

2. 有一台小型发电机，电樞綫圈的长寬各为 10 厘米，共有 200 匝， $H = 400$ 奥斯特，轉子在匀强磁場中每秒钟轉 5 周，綫圈轉动軸和磁力綫相互垂直，求綫圈中感生电动势的平均值是多大？

$$\left[\text{提示: } \mathcal{E} = 10^{-8} \cdot n \frac{H \cdot S}{T} \right]$$

3. 一台发电机供給 100 盞并联电灯用电，每只灯泡的电阻是 1220 欧姆，所用电压是 220 伏特，連接导綫的电阻是 4 欧姆，发电机內电阻是 0.8 欧姆，求发电机的电动势、路端电压和輸出功率。

§ 5·3 三相交流电

交变电动势、交变电流和交变电压的大小和方向，都是用来描述交流电路状态的物理量。我們已知，交流电路上的电动势、电流和电压都在作周期性变化，这种現象我們就简单地說成交流电路

的状态在作周期性的变化，或更简单地說成交流电的相在作周期性变化。

在学习 §5.1 时我們已經了解，交变电动势和交变电流的瞬时值分别为

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \sin \omega t,$$

$$I = I_m \sin \omega t;$$

根据同样的理由我們还可以导出，一段电路上的交变电压的瞬时值为

$$V = V_m \sin \omega t.$$

上面三个等式說明：只要 ωt 已知，交流电路上的 \mathcal{E} 、 I 、 V 就都确定了，所以在实际应用中我們都是用 ωt 来表示交流电的相，并且叫它做**位相角**，或簡称为**位相**。

如果在某一时刻 t ， $\omega t = 90^\circ$ ，我們就說交流电在这一时刻的位相为 90° ；如果在另一时刻 t' ， $\omega t' = 120^\circ$ ，我們就說交流电在这一时刻的位相为 120° ；我們还說交流电在这两个时刻的**位相差**为 $120^\circ - 90^\circ = 30^\circ$ 。

如果有两个交流电路甲和乙，在同一时刻，甲电路的状态相当于 $\omega t = 40^\circ$ ，乙电路的状态相当于 $\omega t = 100^\circ$ ，我們就說这两个电路的位相差为 $100^\circ - 40^\circ = 60^\circ$ 。

位相相等或相差 360° 整数倍的称为**同位相**。位相相差 180° 或 180° 奇数倍的称为**反位相**。

1. 三相交流发电机 §5.2 里所介紹的交流发电机只有一个輸出电路(即只沿一个电路向外輸送电能)；在同一时刻，全电路上的状态是一致的。我們称这种发电机为**单相交流发电机**，这样发出的交流电为**单相交流电**，这样的交流电路为**单相交流电路**。

在实际应用中，大部分的发电机是**三相交流发电机**。它发出的交流电叫做**三相交流电**。图 5.7 是三相交流发电机的示意图。图中的轉子和图 5.6 所示的相同，是一个匀速轉动的、磁性很强的

电磁铁。定子上装有三个均匀排列的线圈，它们彼此相隔 120° 。

当转子以某一确定的速度转动时，各线路里都有了按正弦规律交变的感生电动势，它们的幅值、周期和频率都相同，但位相彼此相差 120° 。图 5.8 里的三根曲线 A、B、C 分别表示三个电路中的电动势怎样跟着时间变化，曲线下的四个图分别表示转子在各个时刻的位置。

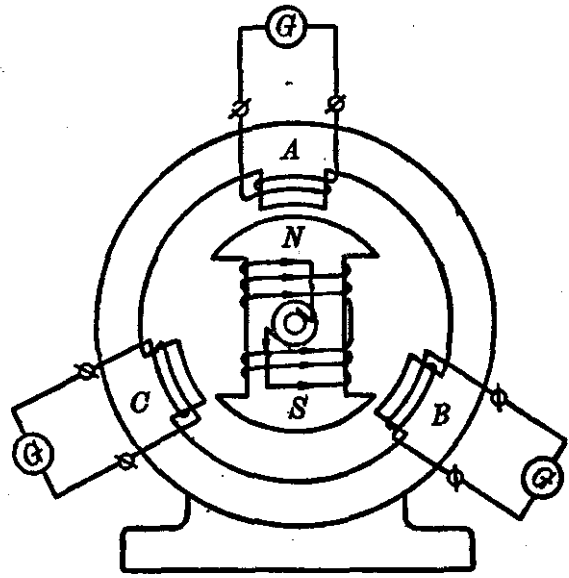


图 5.7 三相交流发电机示意图

如果我们从线圈 A 里的电动势恰好为零的那一时刻开始计时，那么线圈 A 里的电动势可用下式来表示：

$$\mathcal{E}_A = \mathcal{E}_m \sin \omega t.$$

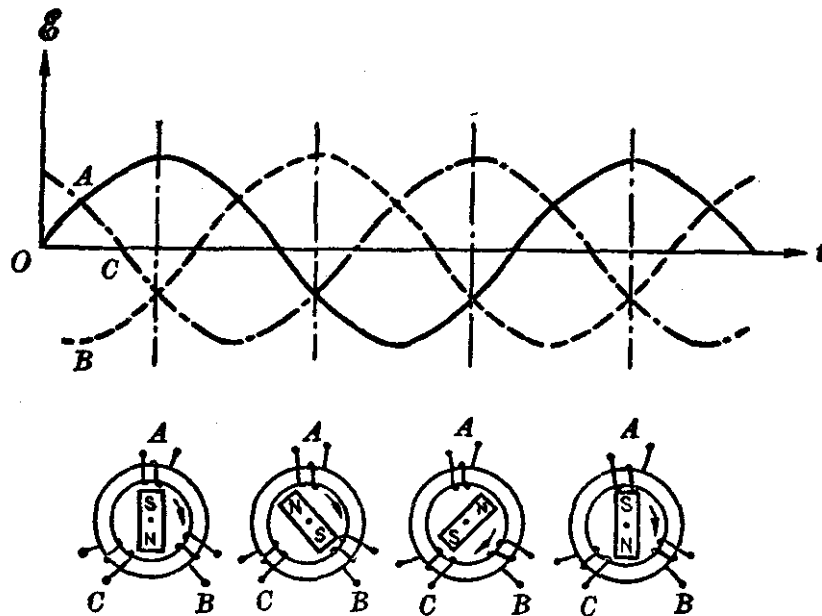


图 5.8 三相交流电的电动势图线

在转子转过 120° 后，线圈 B 才达到线圈 A 的起始状态（即 $t=0$ 时的状态）；在转子转过 240° 后，线圈 C 才达到线圈 A 的起始状态。我们说，线圈 B 的相比线圈 A 的相落后 120° ，线圈 C 的相比线圈

A 的相落后 240° ；它們电动势的表示式为

$$\mathcal{E}_B = \mathcal{E}_m \sin(\omega t - 120^\circ),$$

$$\mathcal{E}_C = \mathcal{E}_m \sin(\omega t - 240^\circ).$$

2. 三相交流电路 在三相发电机中，每一个线圈都自成一个电源，都可以各自向一个电路独立输出电能。因而，在三相发电机的外电路上，就需要有六根连接导线，每两根导线组成一个独立的单相交流电路，如图 5.9 所示。图中 AX 、 BY 和 CZ 分别表示发电机上的三个线圈， ad 、 bd 和 cd 表示三个外电路上的电阻。这样的电路是很不经济的。在实际应用中，为了节省导线，普遍采用两种连接方法——星形连接法和三角形连接法，现分述如下。

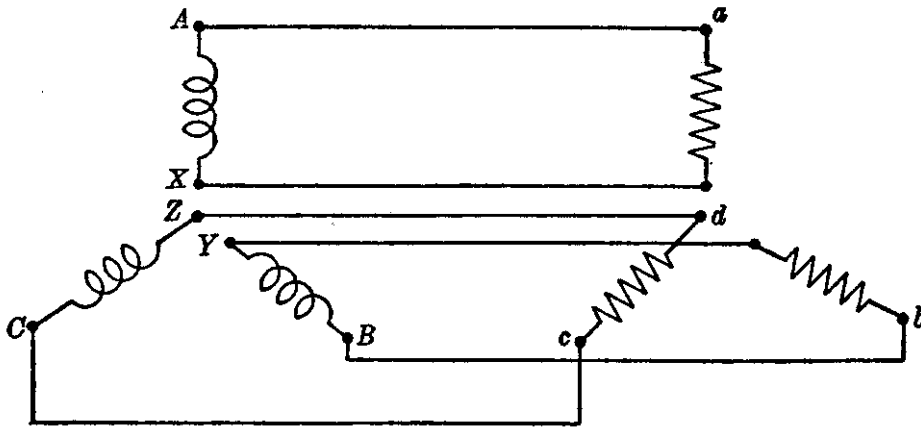


图 5.9 不相关连的六线电路图(一)

星形连接法——如图 5.10 所示，把发电机线圈的三个端点 X 、 Y 、 Z 连接在一起，再把外电路的三个端点 d 连接在一起，用一

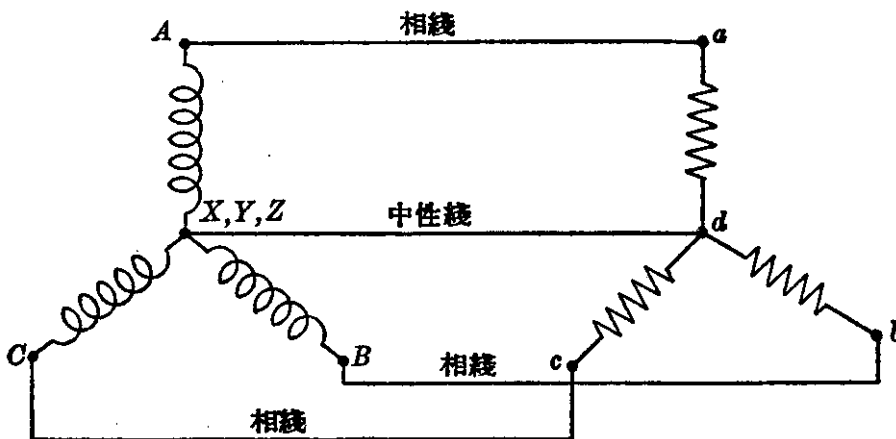


图 5.10 三相四线电路图

根导綫代替图 5·9 里的三根导綫，結果就成了星形連接法。图中仍旧有三个外电路，不过它們有一根公用的导綫。这种电路叫做**三相四綫交流电路**。

从各个綫圈上引出的导綫叫做**相綫**，也叫做**火綫**。从綫圈的公共点引出的导綫(即三个电路的公用綫)叫做**中性綫**；因为中性綫接地，所以又叫做**地綫**：火綫与地綫之間的电压叫做相电压，用 $V_{\text{相}}$ 表示。火綫与火綫之間的电压叫做綫电压，用 $V_{\text{綫}}$ 表示。根据理論計算，可以得出

$$V_{\text{綫}} = \sqrt{3} V_{\text{相}}.$$

在照明电路中，我們总是把电灯接在一根相綫和中性綫之間，电灯泡两端的电压就是相电压，通常为 220 伏特。有很多电动机是接在两根相綫之間的，它的电压就是綫电压。在相电压 $V_{\text{相}} = 220$ 伏特的情况下，綫电压 $V_{\text{綫}} = \sqrt{3} V_{\text{相}} = 220\sqrt{3} \approx 380$ 伏特。

由于中性綫是三个电路的公用导綫，所以通过中性綫的电流等于通过三根相綫的电流之和。而通过三根相綫的电流是位相彼此相差 120° 的交变电流。如果三根相綫的电流幅值相等，那么可以証明中性綫上的电流总等于零；如果三根相綫的电流幅值相差不大，那么可以証明中性綫上的电流是很小的。由于中性綫里的电流总比相綫电流小，所以中性綫常用比較細的导綫来做。

我国大部分地区采用三相四綫制的綫路来輸送交流电。一般照明綫路的干路也都是三相四綫电路。有时把四根导綫并列；有时把三根比較粗一些的相綫装得高一些，而把一根較細的中性綫装得低一些。引进家庭用戶的一般都是单相电路，即与一根中性綫和任意一根相綫連接的电路。

三角形連接法——图 5·11 表示三个不相关連的单相交流电路， AX 、 BY 和 CZ 分別表示三相交流发电机的三个綫圈， ax 、 by 和 cz 分別表示三个外电路上的电阻。这个电路，实质上 and 图 5·9 所示的电路完全相同，不过綫圈和电阻的安放位置与前不同而已。

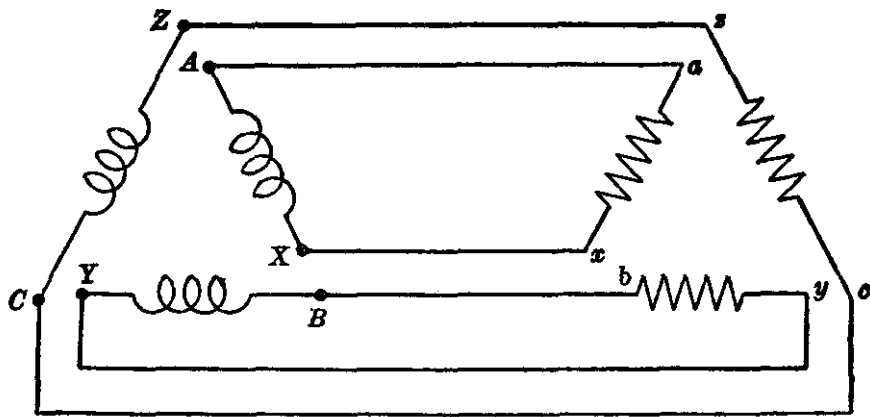


图 5.11 不相关連的六綫电路(二)

如果把綫圈的 A 、 Z 两端， B 、 X 两端和 C 、 Y 两端分別連在一起，把外电路电阻的 a 、 z 两端， b 、 x 两端和 c 、 y 两端分別連在一起，并用三根导綫代替六根导綫，如图 5.12 所示，这就成了三角形連接法。这样的电路叫做**三相三綫交流电路**。

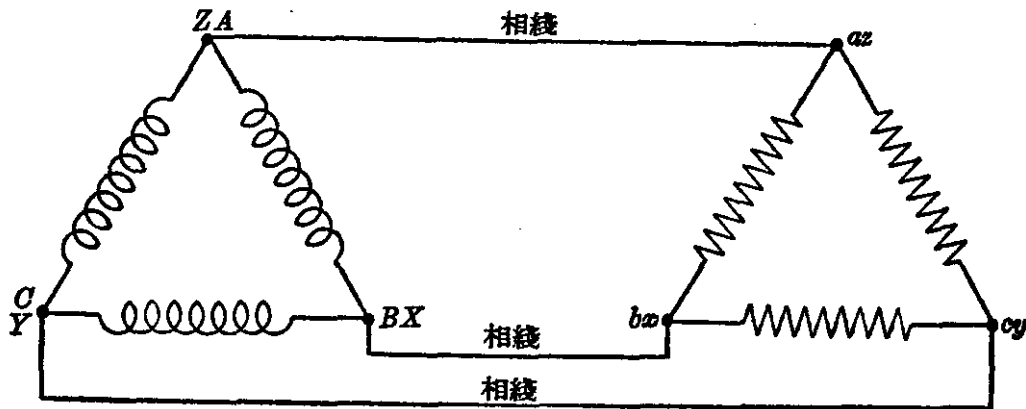


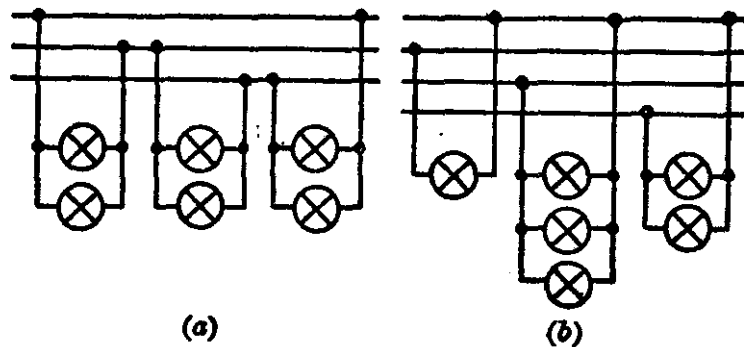
图 5.12 三相三綫交流电路图

在三相三綫的交流电路中，三根导綫都是相綫，都叫做火綫。任何两根相綫之間的电压都等于相电压，即綫电压等于相电压。三个綫圈里的交变电动势的幅值都相等，頻率也相同，但位相彼此相差 120° 。在外电路沒有接通时，三个电动势的代数和总等于零（参看图 5.8），即不会在发电机的内电路里（即三个綫圈里）引起捷路电流。如果接錯了綫头（例如把 B 和 C 接在一起， X 和 Y 接在一起），那么三个电动势的代数和就不等于零，要在内电路里引起很大的捷路电流，甚至会因发热过剧而燒毀綫圈。

远距离输送交流电大多采用三相三线的线路。

习 题 5·3

1. 何谓三相发电机？
2. 三相交流电路有几种接法？
3. 分别说明在下图所示的两个三相交流电路各是属于哪一种接法。



(第 3 题)

4. 与单相交流电路对比，三相交流电路有何优点？
5. 什么叫做相线？什么叫做中性线？观察电杆木上的电线，能否识别出哪几根是相线？哪一根是中性线？

§ 5·4 交流电动机

电动机与发电机相反，是转变电能为机械能的一种机器。通入交流电使它运转的电动机叫做交流电动机。

1. 同步交流电动机 我们已知，发电机是转变机械能为电能的装置。§ 5·2 里所讨论过的各种交流发电机，都可以反过来当作电动机使用，使它转变电能为机械能。

图 5·13 所示的装置和图 5·4 所示的交流发电机完全相同，只是它的线圈不是在外力带动下旋转，而是让交变电流经过电刷和滑环通入其中。如果当线圈在左图所示的位置时，通入的电流方向为 $a-b-c-d$ ，则按照左手法则，可以确定 ab 和 cd 两导线所受到的磁场力（通电导体所受到的磁场力的方向可以用左手法则

来确定)形成一个逆时针方向的力偶,使线圈转动。在线圈转到右图所示的位置时,两个磁场力 F 处在同一直线上,线圈不受力偶作用,但由于存在惯性,线圈可以冲过这一位置,此后线圈所受的两个磁场力立即形成了顺时针方向的力偶,使它恢复到这一位置。在这个位置上,线圈平面和磁力线垂直,在发电机的情况下,我们称这一位置为中性面,现在我们称它为平衡位置。如果在线圈刚刚冲过平衡位置的那一瞬时,立即改变电流的方向为 $d-c-b-a$,则 ab 和 cd 两导线所受到的磁场力又形成一个逆时针方向的力偶,使线圈继续转动。经过 180° ,线圈又达平衡位置;如在此时再将电流方向改变为 $a-b-c-d$,则线圈又将转动 180° 。依此类推,如果交流电的频率(赫兹)正好和线圈的转速(转/秒)相等,那么我们就可以使电流的方向在线圈每一次经过平衡位置(即每转 180°)时改变一次,结果线圈就继续不断地转动,成为电动机。

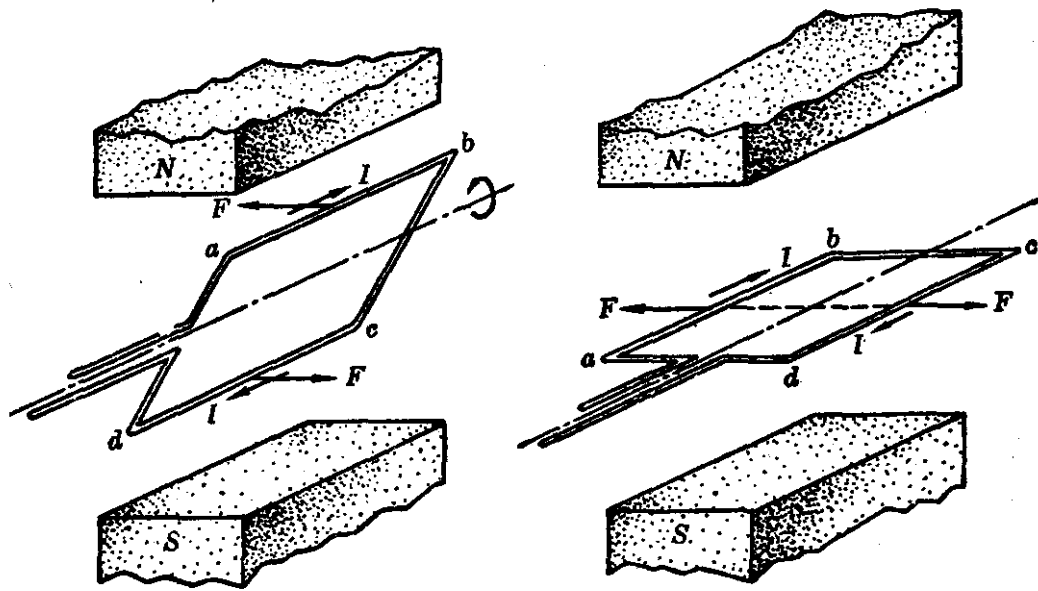


图 5-13 同步交流电动机示意图

对只有一对磁极的电动机来说,线圈每转一周经过平衡位置两次,电流的方向也要改变两次;这时线圈的转速(转/秒)应和通入线圈的交流电的频率(赫兹)相等。对有两对磁极的电动机来说,线圈每转一周经过平衡位置四次,电流的方向也要改变四次;

这时线圈的转速(轉/秒)应当等于交流电频率(赫兹)的 $1/2$ 。对有 n 对磁极的电动机来说, 线圈每轉一周经过平衡位置 $2n$ 次, 电流的方向也要改变 $2n$ 次; 这时线圈的转速(轉/秒)应当等于交流电频率(赫兹)的 $1/n$ 。

这种与交流电频率相适应的转速叫做**同步转速**, 以同步转速运转的电动机叫做**同步电动机**。同步电动机只能有一个与交流电相适应的转速, 不能有任何的转速。在向同步电动机通入交流电之前, 不但要把线圈转动到同步转速, 还要使它恰在经过平衡位置时改变电流的方向, 否则它就不能顺利地运转。所以同步电动机在应用时很不方便, 需要有特为设计的起动装置。用同步电动机带动机器有一个优点, 这就是尽管机器的负载(又叫负荷)有时大些、有时小些, 它的运行速度却能恒定不变。电钟里的电动机就是同步交流电动机。

同步电动机可以是旋转电枢式的, 也可以是旋转磁场式的, 但基本原理总和以上所述的相似。

2. 三相感应电动机 为了阐明感应电动机的基本原理, 让我们先来做一个有趣的实验。

把一个多匝的闭合线圈, 悬挂在蹄形磁铁的两极中间, 如图 5.14 所示, 并使它很容易转动。设法使磁铁绕 OO' 轴转动, 就可以看到线圈也跟着旋转起来。

这个实验说明, 旋转的磁场会使闭合线圈跟着转动。产生这种现象的原因是什么呢?

我们知道, 当磁铁旋转时(相对的说, 可以看做这时磁铁不动, 线圈转动), 通过闭合线圈的磁通量在改变, 因此线圈中就有了感生电流。根据楞次定律, 我们可以确定感生电流的方向; 再根据左手法则, 我们又

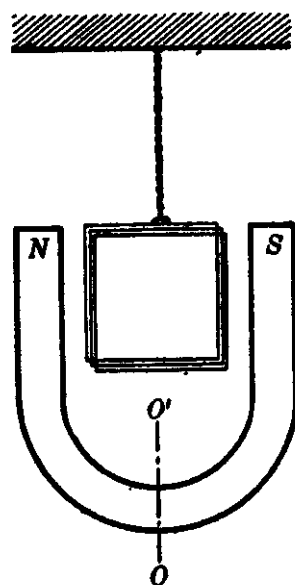


图 5.14 旋转磁场的实验

可以确定通电导线所受磁场的方向；从而我们可以看出，作用在线圈上的磁力偶迫使线圈按磁铁旋转的方向转动。

三相感应电动机的工作原理，基本上与上述实验相似，不过旋转磁场不是依靠磁铁的机械转动，而是依靠通入三相交流电来获得的。

三相感应电动机的主要组成部分包括一个定子和一个转子。定子是电动机的不转动部分，它的任务是利用三相交流电形成一个旋转磁场，它的功能和上述实验中的磁铁相当。转子是一个可以转动的部分，它的任务是在旋转磁场的作用下产生感生电流，并

因受到磁力矩的作用而转动。

把三个完全相同的线圈，嵌绕在定子的沟槽里，它们彼此相隔 120° ，如图 5.15 所示（图中用单匝表示一个多匝线圈）。这三个线圈连接成星形（或三角形），线圈头 A 、 B 和 C 分别和三相交流电路的三根相

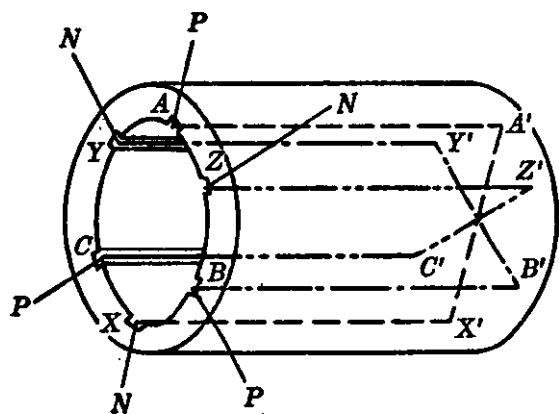


图 5.15 三相感应电动机的定子线圈

线相连接，线圈头 X 、 Y 和 Z 合并在一起和电路的中性线相连接。当通入三相交流电时，由于三个线圈完全相同，线圈 AX 、 BY 和 CZ 里的电流强度分别为

$$I_A = I_m \sin \omega t,$$

$$I_B = I_m \sin (\omega t - 120^\circ),$$

$$I_C = I_m \sin (\omega t - 240^\circ);$$

它们的幅值 I_m 和频率 $f = \omega / 2\pi$ 都相等，位相彼此相差 120° 。图 5.16 表示三个线圈里的电流怎样跟着时间变化的情形。

假定电流的正方向是由线圈的起端 (A 、 B 和 C) 到末端 (X 、 Y 和 Z)，那么这时在起端标以符号 \otimes ，在末端标以符号 \odot ；所谓电流的负方向是由线圈的末端到起端，这时在起端标以符号 \odot ，在末

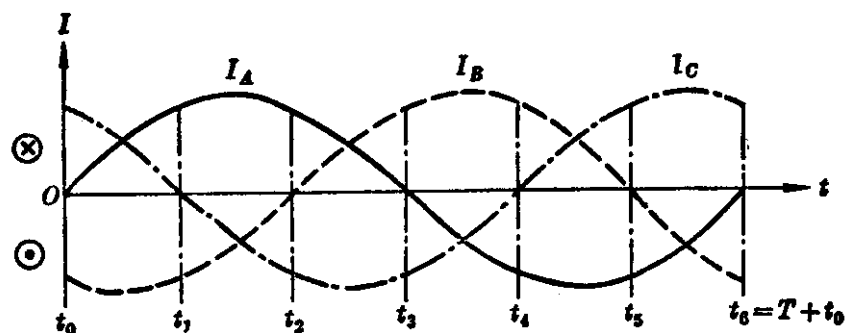


图 5.16 定子线圈中的三相交流电图线

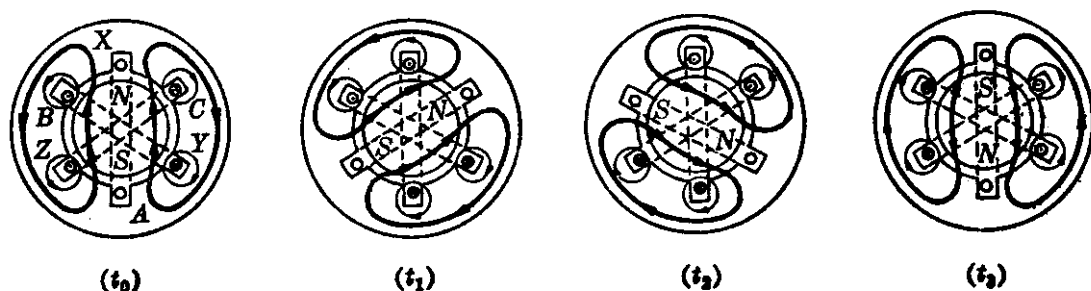


图 5.17 定子线圈在各个时刻的电流方向和磁场方向

端标以符号 \otimes ；当线圈里的电流为零时，两端都标以符号 \circ 。图 5.17 表示三个线圈在各个时刻的电流方向和磁场方向。

从图 5.16 上可以看出，在 $t=t_0$ 时，通过线圈 AX 的电流为零，通过线圈 BY 的电流为负，通过线圈 CZ 的电流为正。此时导线 AA' 和 XX' 的周围没有磁场，其余四根导线 (BB' 、 YY' 、 CC' 和 ZZ') 的周围都有磁场存在，磁力线方向可用右手拇指法则 (或右手螺旋法则) 确定，如图 5.17 中左边第一图所示。这六根导线的合磁场相当于一个磁体 $AA'X'X$ ，它的 AA' 边为 S 极， XX' 边为 N 极。

在 $t=t_1=t_0+\frac{1}{6}T$ 时，通过线圈 CZ 的电流为零，通过线圈 BY 的电流为负，通过线圈 AX 的电流为正，六根导线的合磁场相当于一个磁体 $CC'Z'Z$ ，它的 CC' 边为 N 极， ZZ' 边为 S 极，如图 5.17 中左边第二图所示。与 $t=t_0$ 时的情况 (即左边第一图所示的情况) 相比较，磁场转动了 60° 。

再经过 $T/6$ 后，当 $t=t_2=t_0+\frac{1}{3}T$ 时，通过线圈 BY 的电流

为零,通过线圈 AX 的电流为正,通过线圈 CZ 的电流为负,六根导线的合磁场相当于一个磁体 $BB'Y'Y'$, 它的 BB' 边为 S 极, YY' 边为 N 极, 如图 5·17 中右边第二图所示. 与 $t=t_1$ 时的情况相比较, 磁场又转动了 60° .

依此类推, 交流电每变化一周, 磁场也转动一周; 交流电变化不停, 磁场也就旋转不停. 这样依靠三相交流电获得的旋转磁场和作机械转动的磁铁的磁场 (如图 5·14 所示) 完全一样. 磁场旋转的周期和频率与交流电的周期和频率相同.

图 5·18 表示一种叫做鼠笼式转子的结构, 它包括许多根和转轴平行放置的铜杆, 它们的两端分别焊接在两个铜环上. 在定子

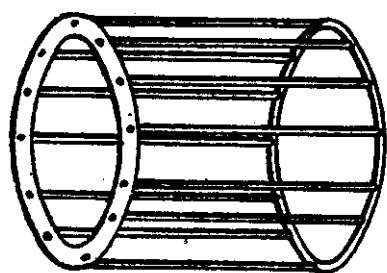


图 5·18 鼠笼式转子

磁场作旋转运动时 (不是定子作机械转动, 而是由三相交流电所引起的磁场的旋转运动), 转子铜杆与磁力线之间有了相对的切割运动, 引起了感生电流 (遵循右手法则). 载有感生电流的铜杆, 都要受到磁场力的作用 (遵循左手法则). 对整个转子来说, 各个铜杆所受磁场力的力矩使它顺着磁场旋转的方向转动. 这就是三相感应电动机的基本原理.

三相感应电动机转子的转动速度总比定子磁场的旋转速度来得小. 也就是说, 转子的转动速度 (转/秒) 总比交流电变化的频率 (赫兹) 来得小. 由于转子的转动是和磁场的旋转同方向的, 只有在转子比磁场转得慢的情况下, 转子铜杆与磁力线之间才可能有相对的切割运动, 铜杆里才有感生电流产生, 整个转子才受磁力矩的作用. 如果转子和磁场的转速相等, 那就意味着转子铜杆与磁力线之间没有相对运动, 铜杆不切割磁力线, 也没有感生电流产生, 因而转子也就不受磁力矩的作用. 在这样的情况下, 转子在阻力矩 (因摩擦和负荷而受到的与转动方向相反的力矩) 的作用下会逐渐慢下来. 在平衡状态下 (磁力矩和阻力矩平衡), 转子的转速

总低于旋轉磁場的轉速。所以我們称三相感应电动机为**异步电动机**。

三相感应电动机的基本原理可概括如下：把三相交流电通入定子綫圈，建立起一个旋轉磁場，利用它和轉子之間的相对运动，在轉子銅杆中形成感生电流，这个电流和磁場相互作用，就使轉子受到磁力矩而轉动。

旋轉磁場的轉动速度是固定的（由交流电的頻率来决定），轉子轉动得越慢，銅杆切割磁力綫的速度就越大，形成的感生电流和磁力矩也越大。三相感应电动机在作稳定運轉时（此时磁力矩与阻力矩平衡），它的轉速由負荷来决定。負荷的力矩越大，轉速越低；反之，負荷的力矩越小，轉速越高。

3. 单相感应电动机 三相感应电动机的效率高，運轉性能好，因此在工农业生产上应用得很普遍。但是，在沒有三相交流电源或者需要的功率很小（如电風扇）时，用单相感应电动机就比較方便、比較經濟。单相感应电动机的功率一般只有几百瓦、几十瓦，有的竟小到只有几瓦。

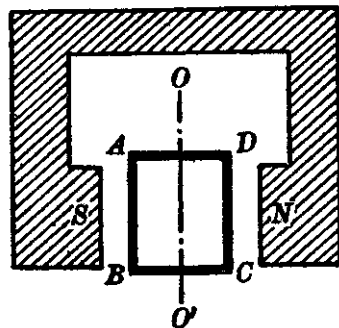
单相感应电动机的轉子，在构造上和三相感应电动机相同，也可以采用鼠籠式的（如图 5-18 所示）。因为通入定子綫圈的交流电是单相的，所以它的磁場不能旋轉，只处在一定的方位上，按照交流电的变化規律来改变磁場强度的大小和方向。这样的磁場叫做**脉动磁場**。

理論証明，按照正弦規律脉动的磁場，实际上相当于两个方向相反的旋轉磁場，它們的轉速相同。每个旋轉磁場对轉子的作用，和三相感应电动机完全一样。順时針轉动的磁場使轉子受到順时針方向的磁力矩；逆时針轉动的磁場使轉子受到逆时針方向的磁力矩。在起动的以前，由于两个旋轉磁場以相等的速度相对于轉子作相反的运动，所以它們对轉子的作用互相抵消，不能使它向任一方向起动。

如果先用外力使单相感应电动机的轉子获得一个起动的速度，那么两个旋轉磁場相对于轉子运动的快慢就不相等，对轉子作用的磁力矩大小也不同，于是轉子可以繼續轉动下去。理論和实验都証明，如果先用外力使轉子向順时針方向起动的，它就沿順时針方向繼續轉动下去；如果向逆时針方向起动的，它就沿逆时針方向繼續轉动下去。一般的单相感应电动机都装有自动起动的装置。

习 題 5·4

1. 什么叫做同步交流电动机？
2. 扼要說明三相感应电动机的构造和作用原理？
3. 扼要說明三相交流电的旋轉磁場是怎样产生的？
4. 在蹄形磁体的两极間，放置一个綫圈 ABCD (如附图所示)，当蹄形磁体繞 OO' 軸轉动时，綫圈将会发生什么現象？为什么？



(第 4 題)

§ 5·5 直 流 发 电 机

方向不变的电流叫做直流电。虽然在工农业生产和日常生活中，交流电的应用比較广泛，并且以后还要討論，在远距离輸送上，交流电要比直流电經濟得多，但在許多实用方面(如电車、电解、电镀、蓄電池充电和电焊等)只能用直流电，而不能用交流电。

发出直流电的发电机叫做直流发电机。它也是一种把机械能轉变成电能的装置。

从 § 5·2 里我們已經了解，当图 5·4 所示的綫圈在匀强磁場里作匀速轉动时，綫圈里就有了交变电动势；利用滑环和电刷接通内外电路，就使全电路里有了交变电流。綫圈每通过中性面(綫圈平面与磁力綫垂直的位置)一次，电动势和电流的方向都要改变一次。

要使线圈里的交变电动势能向外电路输送方向不变的电流，那只要使滑环在电流方向改变的时_刻(线圈通过中性面的时_刻)，自动地变换它所接触的电刷。这样一来，滑环的极性虽然在变，电刷的极性却始终不变，因而外电路上的电流方向也就固定不变。

在最简单的直流发电机里，用两个互相绝缘的半圆环来代替交流发电机上的两个滑环，线圈的两头分别和它们连接在一起。电刷和半圆环之间的相对位置如图 5·19 所示，每当线圈经过中性面时，电刷正好从一个半圆环移向另一个半圆环。这样的装置叫做换向器，或叫整流器。

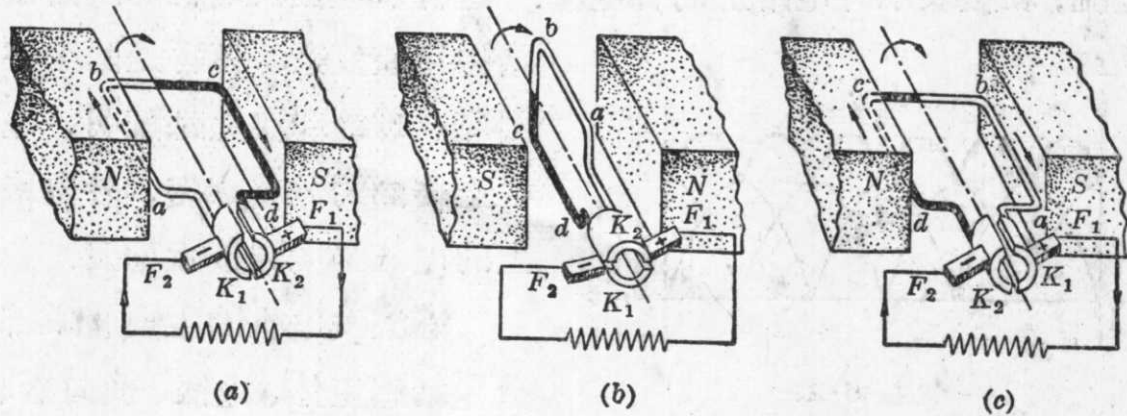


图 5·19 直流发电机的整流器工作原理

当图中的线圈 $abcd$ 沿顺时针方向转动时，电刷 F_1 永远和输出电流的半圆环相接触，即永远和电源的正极相接触；电刷 F_2 永远和输入电流的半圆环相接触，即永远和电源的负极相接触。尽管内电路上的电动势和电流，仍旧按照正弦规律在交替着，外电路上的电流却只改变大小而方向不变。图 5·20 表示电路上电流跟着时间变化的情形，图中虚线表示内电路上的交变电流，实线表示外电路上的单向电流。这样只改变大小而不改变方向的电流叫做单向脉动电流。

上述的脉动电流，由于电流强度的变化太大，应用起来还不十分适宜。实际应用的直流发电机，在电枢上均匀排列着许多线圈，它们依次通过中性面以使电枢的电动势永远不等于零，电路上的

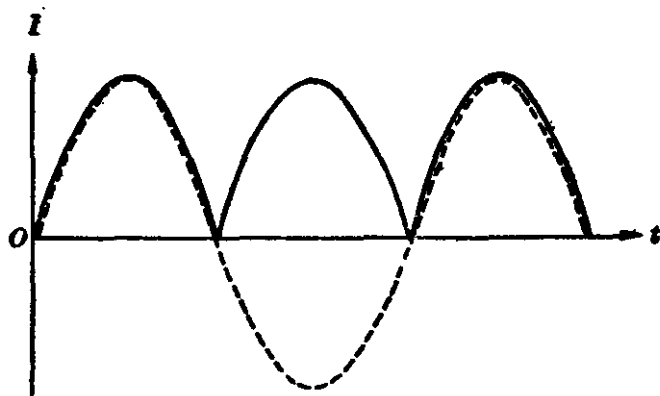


图 5·20 单向脉动电流

电流也就永远不等于零。如果采用两个互相垂直的线圈，电路上的电流变化情况应如图 5·21 所示。图中细线表示各个线圈里的电流，粗线表示外电路上的合电流。这种多线圈发电机的换向器

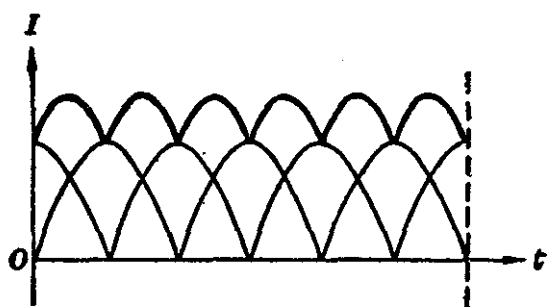


图 5·21

结构比较复杂，不再是两个半圆环。理论和实验都证明，电枢上线圈的分布越密，外电路上的电流强度越接近稳定。

直流发电机的主要组成部分

包括感应体、电枢、换向器、

电刷和轴承等机件。感应体多用电磁铁，有自激和它激两种方式。通过电磁铁线圈的电流叫做激磁电流。用发电机本身发出的电流作为激磁电流就叫做自激。用其他直流电源向感应体供给激磁电流就叫做它激。

应该指出，当电枢线圈里有了感生电流时，它就要受到磁场的作用，这种作用形成一个和转动方向相反的阻力矩，阻碍电枢继续转动。为了维持电枢作匀速转动，那就需要采用蒸汽轮机、水轮机或其他发动机来克服这种阻力矩做功。克服这种阻力矩做功所消耗的能量就转变成电能。

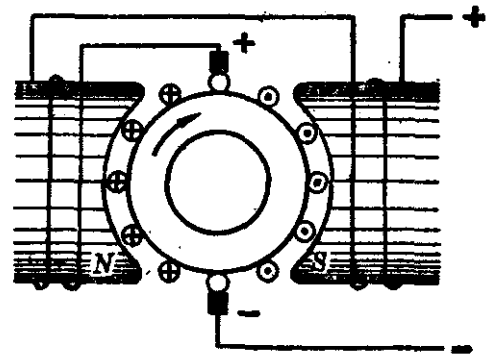
当外电路上并联的支路增多时，通过发电机电枢线圈的电流强度就增大，磁场对电枢转动的阻碍作用也增大。如果要继续维持电枢的转动速度不变，那就必需加大发动机的作用力和功率，否

則,发电机的運轉速度就要随着电流强度的增加而緩慢下来。

习 題 5.5

1. 交流发电机和直流发电机有何异同之点?
2. 直流发电机中整流器的构造和作用怎样?
3. 什么叫单向脉动电流? 它和稳恒电流、交流电有何区别?
4. 什么叫自激发电机? 什么叫它激发电机?

5. 如附图所示, 串激式直流发电机的电动势 $\mathcal{E} = 244$ 伏特, 輸出 8 安培电流。如果电樞的电阻 r_1 为 1 欧姆, 激磁电路的电阻 r_2 为 2 欧姆, 求 (1) 两电刷間的电压; (2) 发电机的輸出电压?



(第 5 題)

6. 一台由柴油机带动的发电机, 能够供給 100 盞电灯用电, 电流强度为 0.4 安培、电压为 110 伏特。設发电机的效率为 80%, 問这台柴油机的功率是多少馬力?

§ 5.6 直流电动机

直流电动机依靠直流电源 (如直流发电机、蓄电池等) 供电而轉动, 也是轉变电能为机械能的机器。

直流电动机的构造和直流发电机一样。同一电机, 既可以当作发电机, 也可以当作电动机来进行工作。

图 5.22 表示一个放在匀强磁場里的綫圈 $abcd$, 它的两端通过換向器、电刷跟直流电源相連接。在图 (a) 里, 綫圈里的电流方向是 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$; 根据左手定則, 可以确定导綫 ab 所受的磁場力指向左边, cd 所受的磁場力指向右边, 两个力組成一个力偶, 使綫圈繞 OO' 軸按箭头所示的方向轉动。如图中 (b) 所示, 当綫圈轉到中性面时, 由于电刷与半圓环相脱离, 电流不能經半圓环通到綫圈里, 但由于慣性, 它将繼續轉动。綫圈轉过中性面后, 如图中 (c) 所示, 两个电刷互換它們所接触的半圓环, 使綫圈中的电流方向改为

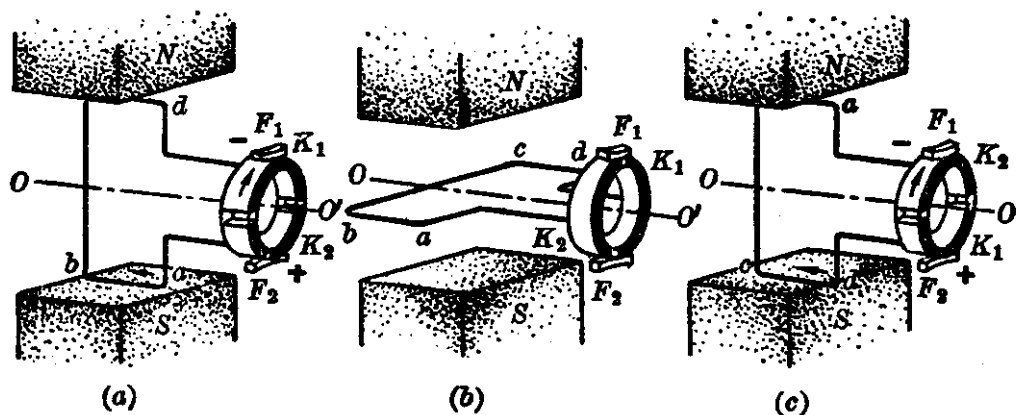


图 5·22 直流电动机的工作原理

$d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$; 此时导线 ab 所受的磁场力改为指向右边, 导线 cd 所受的磁场力改为指向左边, 因而线圈仍将沿原来的方向转动. 线圈每经过中性面一次, 它里面的电流方向就改变一次, 但线圈所受的磁力偶方向却不变. 所以电动机能够继续向同一方向转动.

电枢在磁场里转动时, 不管维持转动的原因是什么, 根据电磁感应定律, 电枢线圈里总要产生感生电动势. 我们已知, 在发电机里感生电动势的方向可以用右手法则来决定. 那末在电动机里, 感生电动势的方向又是怎样来决定的呢? 想一想(答: 由于在两种情况下, 产生感生电动势的原因都是由于电枢在磁场里转动, 所以感生电动势的方向都可以用右手法则来决定). 在发电机里, 感生电流是由感生电动势所形成, 所以它们是同方向的. 在电动机里, 电流是由外电源供给的, 感生电动势的方向和电枢电流 I 的方向相反, 也就是和加在电枢线圈上的外电压 V 的方向相反. 因此我们把电动机里的感生电动势叫做反电动势 $\mathcal{E}_{\text{反}}$.

用 R 表示电枢的电阻, V 表示外加电压, $\mathcal{E}_{\text{反}}$ 表示反电动势, 那末通过电枢的电流强度应为

$$I = \frac{V - \mathcal{E}_{\text{反}}}{R}.$$

上式表示: 反电动势越小, 通过电枢的电流越大.

我们已知, 电动机在工作时, 电枢受到两个力矩的作用.

一个是磁力矩(磁場作用在通电綫圈上的力矩),它使电樞轉动,另一个是阻力矩(因負載和摩擦引起的力矩),它阻碍电樞轉动. 当这两个力矩平衡时,电樞保持匀速轉动. 如果負載增加,阻力矩就增大;此时,原来的平衡被破坏,电樞的轉速就要变慢. 在轉速减慢的过程中,反电动势逐渐减小,于是电樞里的电流逐渐增大,因而磁力矩也逐渐加大,并于最后重新取得平衡;这时,电动机又作匀速轉动,但轉速要比原来的慢了. 經驗指出,負載越小,电动机轉速越快;負載越大,电动机的轉速越慢;負載超过一定限度,电动机就不能正常工作了.

电动机在運轉时,磁場力抵抗負載阻力做功,向外輸送机械能. 磁場力做多少功,就向外輸送多少机械能,所以我們称磁場力的功为电动机的輸出功,磁場力的功率为电动机的輸出功率.

以通电电樞在匀强磁場中轉动为例來說,磁場对电樞上任一导綫(它的方向和磁力綫垂直)的作用力

$$F = 0.1HI l,$$

它的方向和磁力綫及导綫垂直(如图 5·23 所示). 設令导綫的运动速度为 v , 則磁場力 F 的功率

$$N = Fv \cos \alpha = 0.1HI l v \cos \alpha,$$

式中 α 为磁場力 F 和导綫速度 v 之間的夹角, 磁場强度 H 的单位为奥斯特, 电流强度 I 的单位为安培, 导綫长度 l 的单位为厘米, 速度 v 的单位为厘米/秒, 功率 N 的单位为尔格/秒. 如果改用瓦特(焦耳/秒)为功率的单位, 則上式应写作:

$$N = 10^{-8} H I l v \cos \alpha.$$

根据法拉第电磁感应定律, 求得这根导綫里的反电动势

$$\mathcal{E} = 10^{-8} H l v \sin \beta,$$

式中 β 为速度 v 和磁場强度的夹角. 从图上可以看出, $\beta = 90^\circ - \alpha$,

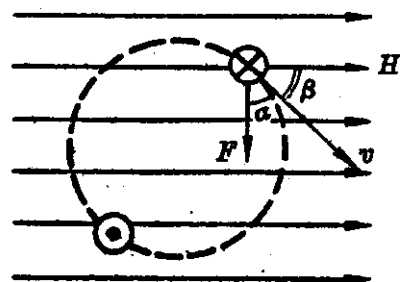


图 5·23 說明磁場力做功的图

所以上式又可写作：

$$\mathcal{E} = 10^{-8} Hlv \cos \alpha.$$

把 \mathcal{E} 代入功率等式，得出

$$N = I\mathcal{E}.$$

上式所表示的关系，不仅对电枢上一根导线适用，而且对电枢上所有的导线都适用，因而对整个电枢讲也是适用的。所以我们说：电动机的输出功率等于通过电枢线圈的电流强度和反电动势的乘积。如用等式表示，则为

$$N_{出} = I\mathcal{E}_{反}.$$

由公式

$$I = \frac{V - \mathcal{E}_{反}}{R}$$

可以得出

$$V = \mathcal{E}_{反} + IR,$$

$$IV = I\mathcal{E}_{反} + I^2R,$$

式中 IV 是电动机的输入功率， $I\mathcal{E}_{反}$ 是电动机的输出功率， I^2R 是使电枢导线发热所耗损的功率。

电动机的输出功率和输入功率的百分比叫做电动机的效率，即

$$\eta = \frac{I\mathcal{E}_{反}}{IV} \times 100\% = \frac{\mathcal{E}_{反}}{V} \times 100\%.$$

电动机的输入功率随负载的大小而改变，负载越大，输入功率也越大。电动机的效率随转速的大小而改变，转速越小，效率越低。

当直流电动机刚刚启动时，由于转速很小，反电动势也很小，因此通过电枢线圈的电流很大（电枢的电阻很小，一般只有 0.5 欧姆左右）。例如：一座电动机规定在直流 220 伏特电压下工作时，允许通过的电流为 40 安培，假定电枢的电阻为 0.5 欧姆，那么在刚启动时，瞬时电流将大到

$$I = \frac{V - \mathcal{E}}{R} = \frac{220 - 0}{0.5} = 440 \text{ 安培}.$$

这样大的电流强度可能把电枢线圈烧毁。因此，在直流电动机起动时，电枢总与适当的电阻串联在一起，来限制电流强度。等到转速增加到一定程度，反电动势已足够大时，再撤去电阻。我们称这样的电阻为**起动电阻**。图 5·24 是起动电阻的示意图。

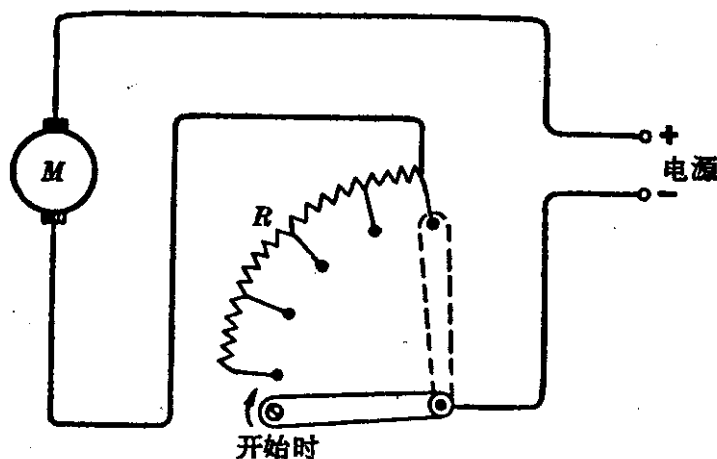


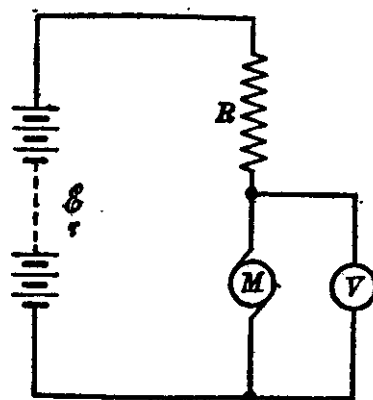
图 5·24 起动电阻示意图

电动机有许多其他发动机所没有的优点，象(1)不需要笨重的传动装置；(2)使用便利，容易控制；(3)危险性小，能在矿井中使用；(4)功率可大可小；(5)效率很高，可达 70% 以上。

习 题 5·6

1. 对比直流发电机和直流电动机的异同之点。
2. 为什么直流电动机起动时要用起动电阻？
3. 一台电动机，它的电枢电阻是 2.5 欧姆，当通过电枢的电流是 20 安培时，它所需要的功率是 2.4 千瓦，求这台电动机的反电动势。当电枢中的电流强度是 18 安培时，它的反电动势又是多少？这时电枢转慢了，还是转快了呢？

4. 如附图所示，电路中 M 为直流电动机，电枢的电阻为 1.5 欧姆，跟电动机串联的电阻 R 为 8.5 欧姆，电源的电动势为 42 伏特，电源的内电阻 r 为 0.5 欧姆，当电动机转动时，伏特计的读数为 24 伏特，求：



(第 4 题)

- (1) 通过电动机的电流强度;
- (2) 输入到电动机里的电功率;
- (3) 转变成机械能的电功率.

5. 供给电动机的电压是不变的. 当负载增加时, 电动机的反电动势、输入功率、输出功率、电枢发热所消耗的功率和效率应如何变化?

§ 5.7 变压器和远距离送电

变压器是用来改变交流电电压和电流强度的一种设备.

人们在富有自然资源(如水利、煤矿等)的地区建立起电力站, 而又需要把电能输送到离开电力站几十或几百公里远的工厂、矿山和人民公社等用电地区. 由于导线具有电阻, 当电流通过很长的输电导线时, 要损耗相当巨大的能量 (I^2Rt) 使导线发热. 为了减少电能在输电线路上的损失, 和使用较细的输电导线以节约金属, 需要采取高压输电的方法. 采用高压输电, 可以用较小的电流输送较多的电能.

变压器可以把发电机发出的电压升高, 使它有利于远距离输送, 也可以在用电地区把电压降低, 使它适于用电器需要. 变压器能够改变交流电的电压, 并相应地改变它的电流强度, 但不能改变交流电的频率. 变压器对扩大交流电的应用范围起了很大的作用.

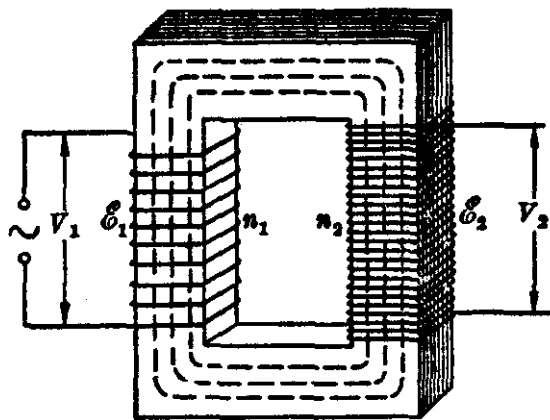


图 5.25 简单变压器

如图 5.25 所示, 在用硅钢片迭成的闭合铁心上, 用绝缘导线绕两个线圈, 使它们的匝数分别为 n_1 和 n_2 , 这就成了最简单的变压器.

在应用时, 我们总是把一个线圈(假定是 n_1 匝的一个)

接在交流电源上, 称它为**原线圈**或**初级线圈**. 另一个线圈称为**副**

綫圈或次級綫圈，我們用它作為一個新的交流電源，向電路里輸送電能。當交流電通過原綫圈時，鐵心上產生了交變磁場，穿過原綫圈和副綫圈的磁通量發生了相應的周期性變化，因而在兩個綫圈里分別產生了交變的感生電動勢 \mathcal{E}_1 和 \mathcal{E}_2 。在原綫圈里， \mathcal{E}_1 起阻礙電流的作用，它的方向和電流 I_1 的方向相反。在副綫圈里， \mathcal{E}_2 起電源的作用；如果副綫圈所連接的電路是閉合的，它就在電路中形成交變電流 I_2 ；如果副綫圈電路是斷開的，那就只有電動勢 \mathcal{E}_2 ，而沒有電流。

由於在兩個綫圈里的磁通量變化是相同的，因此不管是原綫圈或是副綫圈，在每一個單匝綫圈里的感生電動勢 \mathcal{E} 都相等。原綫圈共有 n_1 匝，总的感生電動勢（反電動勢） $\mathcal{E}_1 = n_1 \mathcal{E}$ ；副綫圈共有 n_2 匝，总的感生電動勢 $\mathcal{E}_2 = n_2 \mathcal{E}$ 。所以

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{n_1}{n_2}. \quad (1)$$

如果加在原綫圈兩端的電源電壓是 V_1 ，通過它的電流是 I_1 ，它的電阻是 r_1 ，感生電動勢（反電動勢）是 \mathcal{E}_1 ，則它們之間的关系可以近似地用歐姆定律來表示如下：（在交流電路中，直流電的歐姆定律並不完全適用）

$$V_1 = \mathcal{E}_1 + I_1 r_1. \quad (2)$$

在副綫圈電路閉合時，如果感生電動勢是 \mathcal{E}_2 ，綫圈兩端的電壓是 V_2 ，綫圈的電阻是 r_2 ，通過的電流是 I_2 ，則它們之間的关系可以近似地表示如下：

$$V_2 = \mathcal{E}_2 - I_2 r_2. \quad (3)$$

（為了明白(2)和(3)式的來源，讀者應復習一下第二章的 § 2.7.）

在變壓器里，綫圈電阻 r_1 和 r_2 一般都比較小，而電感系數却很大。在(1)式里， $I_1 r_1$ 和 \mathcal{E}_1 比起來，可以忽略不計；在(2)式里， $I_2 r_2$ 和 \mathcal{E}_2 比起來，也可以忽略不計。因此，在不考慮各量的正、負時，得出下式所表示的关系：

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{n_1}{n_2}. \quad (4)$$

(4)式表明,在实际应用中,变压器原线圈两端的电压和副线圈两端的电压的比等于它们的匝数比。

当 $n_2 > n_1$ 时, $V_2 > V_1$; 这样的变压器叫做升压变压器。当 $n_2 < n_1$ 时, $V_2 < V_1$; 这样的变压器叫做降压变压器。

如果我们不考虑变压器内部的能量损耗,根据能量守恒定律,应有 $I_1 V_1 t = I_2 V_2 t$, 即

$$I_1 V_1 = I_2 V_2. \quad (5)$$

上一等式表明,在不考虑能量损耗的情况下,变压器的输出功率等于输入功率。

精确地说,由于变压器原、副线圈和铁心里都有热损耗,所以输出功率 $I_2 V_2$ 总比输入功率 $I_1 V_1$ 小一些。但实验证明,这种损耗并不很大,最多不超过输入功率的百分之五或百分之六,大型变压器的热损耗可以减小到百分之一左右。

根据上面的等式(5)和(4),可以导得:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (6)$$

上式表明,变压器在工作时,原线圈电流强度和副线圈电流强度跟它们的匝数成反比关系。

由此可见,在利用变压器升高电压的同时,可以相应地减小电流强度,但输出功率并不改变。

任何变压器必需有一个原线圈,也只有一个原线圈。但副线圈可以有一个或几个,它们是用相互绝缘的导线在同一个铁心磁路上绕成的,象收音机内的变压器就属于这一种类型。

仅有原线圈而没有副线圈的变压器,称为自耦变压器。图5.26所示的为把110伏特变为220伏特的升压自耦变压器。同一变压器只要把接线头更换一下,也可把220伏特改变为110伏特

的降压自耦变压器。

在三相交流电中要用三相变压器。一般大型变压器的电压很高，多数都把它放在盛着油的容器里，以达到绝缘和冷却的作用，这就是平常所说的“方棚”。

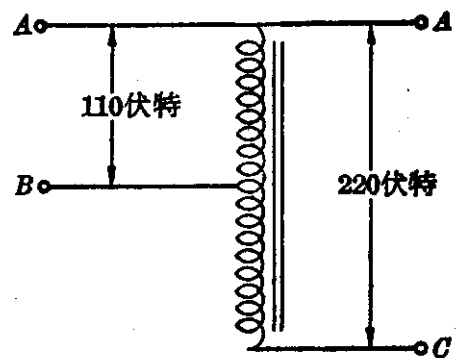


图 5-26

例 2. 发电机的路端电压是 220 伏特，输出电功率是 110 千瓦，用电阻为 0.3 欧姆的导线把电能输送到远处。(1) 如果用 220 伏特的

电压直接输送，导线上的功率损耗是多少？(2) 如果先用变压器把电压升高到 3300 伏特，然后再输送到远处，导线上的功率损耗又是多少？(3) 已知变压器原线圈有 440 匝，问副线圈的匝数是多少？(线圈中的能量损失不计)

【解】(1) 已知发电机的端电压 $V = 220$ 伏特和输出电功率 $N = 110$ 千瓦 = 110,000 瓦特，求得通过外电路的电流强度：

$$I = \frac{N}{V} = \frac{110,000}{220} = 500 \text{ 安培。}$$

又知导线的电阻 $R = 0.3$ 欧姆，求得导线上损耗的电功率：

$$N_1 = I^2 R = 500^2 \times 0.3 = 75,000 \text{ 瓦特} = 75.0 \text{ 千瓦，}$$

约合发电机输出功率的 68.2%。

(2) 已知变压器副线圈的电压 $V' = 3300$ 伏特；由于变压器的输出功率等于变压器的输入功率，也等于发电机的输出功率 N ，因此我们可以求得变压器的输出电流强度：

$$I' = \frac{N}{V'} = \frac{110,000}{3300} = 33.3 \text{ 安培；}$$

并求得导线上的功率损耗

$$N_2 = I'^2 R = 33.3^2 \times 0.3 = 333 \text{ 瓦特} = 0.333 \text{ 千瓦，}$$

约合发电机输出功率的 0.3%。

(3) 因为变压器原、副线圈的端电压和线圈匝数成正比,即

$$\frac{V}{V'} = \frac{n_1}{n_2};$$

已知 $V = 220$ 伏特, $V' = 3300$ 伏特, 原线圈的匝数 $n_1 = 440$, 求得副线圈的匝数:

$$n_2 = n_1 \frac{V'}{V} = 440 \times \frac{3300}{220} = 6600 \text{ 匝}.$$

讨论: 通过这一例题的学习, 我们应当了解下面三点:

(1) 在远距离输送电能的情况下, 不管是用低电压输送或用高电压输送, 发电机的输出功率(即每秒钟输出的电能)都不能全部送到用电区(即不能全部消耗在用电器上, 或用技术语言说: 不能全部消耗在负载上), 而总是有一部分要消耗在输电导线上使它发热, 我们称这部分损耗为输电导线上的热损耗.

(2) 根据例题的计算我们可以看出, 如果输出功率为 N , 输电导线的电阻为 R , 路端电压(即输电电压)为 V , 则导线上的热损耗(请读者自己推导一下):

$$N' = \frac{N^2 R}{V^2}.$$

在发电机的输出功率和输电导线的电阻都一定的情况下, 导线上的热损耗跟采用的输电电压 V 的平方成反比. 在这一例题中, 3300 伏特是 220 伏特的 15 倍, 所以高压输送的热损耗只有低压输送的 $1/225$ (即 $1/15^2$).

在输出功率不超过规定的大小时(本例中规定为 110 千瓦), 输电电压(即路端电压)由发电机或变压器维持恒定. 在电路上的负载过大, 输出功率超过了规定的大小时, 输电电压要有显著的降低. 这是一种不正常的输电状态, 一般应该避免.

(3) 学习这一例题之后, 善于思考的读者可能会提出这样一个问题:

在第二章里学习焦耳-楞次定律时, 我们曾经得到这样一个结

論：導綫上的熱損耗跟導綫上的電壓平方成正比（參看本書第 88 頁），現在我們又說：導綫上的熱損耗跟路端電壓的平方成反比，這里面有沒有矛盾呢？

我們說：這里沒有矛盾。這個問題的提出，對於進一步搞清概念十分有利，它使我們學會具體分析問題的方法。

我們已經了解，所謂一段電路上的電壓，就是這段電路兩端的電勢差；導綫上的電壓指導綫兩端的電勢差，即指導綫上的電勢降落 IR ；路端電壓指整個外電路兩端的電勢差。在整個外電路上，不僅有來回兩根輸電導綫，更重要的還有用電區的負載（即各種用電器）。因此，路端電壓就不僅包括來回兩根輸電導綫上的電勢降落 IR ，還要包括負載兩端的電勢差。如果負載兩端沒有電勢差，電流就不能通過所有的用電器，那就根本達不到輸送電能的目的。

圖 5·27 表示整個外電路上的電壓分布情況。從圖上可以明顯地看出：

$$V_{\text{端}} = V_{\text{綫}} + V_{\text{負}}.$$

設令輸電導綫的電阻為 R ，通過它的電流強度為 I ，那麼根據歐姆定律，我們可以求得來

回兩根輸電導綫上的電勢降落（即導綫上的電壓）為

$$V_{\text{綫}} = IR,$$

並且可以看出路端電壓

$$V_{\text{端}} \neq IR.$$

焦耳-楞次定律指出，導綫上的功率損耗（熱損耗）

$$N_{\text{綫}} = I^2 R = \frac{V_{\text{綫}}^2}{R}.$$

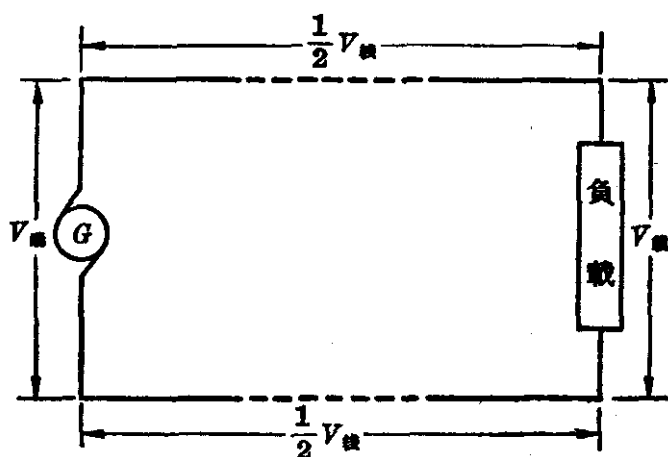


圖 5·27 輸電路上電壓分布情況

这个等式說明，在給定導綫电阻的条件下，導綫上的热損耗跟導綫上的电压平方成正比。

由于 $V_{端} \neq V_{线}$,

所以 $N_{线} \neq \frac{V_{端}^2}{R}$,

即導綫上的热損耗不跟路端电压的平方成正比。

从另一个角度来看，由于发电机輸出的功率（即整个外电路上消耗的总功率）

$$N_{总} = IV_{端},$$

那么輸电導綫上的功率損耗（热損耗）

$$N_{线} = I^2 R = \frac{N_{总}^2}{V_{端}^2} R.$$

这个等式說明，在发电机的輸出功率和輸电導綫的电阻都給定的条件下，導綫上的热損耗跟路端电压平方成反比。

由于 $V_{端} \neq V_{线}$,

所以 $N_{线} \neq \frac{N_{总}^2}{V_{线}^2} R$,

即導綫上的热損耗不跟導綫上的电压平方成反比。

綜合以上的討論，我們可以說：（1）在所提出的問題中涉及到“導綫上的电压”和“路端电压”，当电路上有負載（即有用电器）时，它們是两个不相等的物理量，也是两个不同的概念，不能把它們混淆起来。（2）在談到輸电導綫的热損耗跟導綫上的电压平方成正比，或跟路端电压平方成反比时，都必須注意比例关系成立的条件。只有在導綫电阻恒定的条件下，導綫上的热損耗才跟導綫上的电压平方成正比；只有在发电机輸出功率和導綫电阻都恒定的情况下，導綫上的热損耗才跟路端电压平方成反比。

明确概念和认清条件，是正确分析一切問題的重要关键之一。

例 3. 发电机的功率是 200 千瓦，端电压是 100 伏特。現在要把电能輸送到离开发电站 10 公里远的用电区，还要使輸电導綫

上的功率损耗不超过发电机输出功率的5%。(1)如果用100伏特的电压直接输送,铜质导线的横截面积应是多大?一共要用多少吨铜?(2)如果先用变压器把电压升高到10,000伏特,然后再输送,导线消耗铜量可以减少到多少吨?

【解】 (1) 在不用变压器的情况下,通过输电导线的电流强度为

$$I_1 = \frac{N}{V_1} = \frac{200,000}{100} = 2000 \text{ 安培.}$$

如果输电导线上的功率损耗恰好是发电机输出功率的5%,即10千瓦,那么输电导线的电阻 R_1 可用下式求得:

$$N' = I_1^2 R_1,$$

$$R_1 = \frac{N'}{I_1^2} = \frac{10,000}{2000^2} = 0.0025 \text{ 欧姆.}$$

导线的电阻 $R = \rho \frac{l}{S}$; 已知铜质的 $\rho = 0.0175$ 欧姆·毫米²/米,导线的长度 $l = 2 \times 10 \times 10^3$ 米 = 20,000 米,导线的电阻 $R_1 = 0.0025$ 欧姆,则导线的横截面积:

$$S = \rho \frac{l}{R_1} = 0.0175 \times \frac{20,000}{0.0025} = 140,000 \text{ 毫米}^2.$$

这是一根粗得难以想象的导线(半径约为20厘米)。根据所求出来的横截面积 S 和长度 l 、铜的密度 8.9 克/厘米³,可以算出导线的质量为:

$$\begin{aligned} M &= 8.9 \times 1400 \times 2,000,000 = 249.2 \times 10^8 \text{ 克} \\ &= 24,920 \text{ 吨.} \end{aligned}$$

这样重的输电导线不仅架设困难,并且消耗的铜也十分惊人。

(2) 如果改用10,000伏特的电压输送,通过导线的电流强度只有

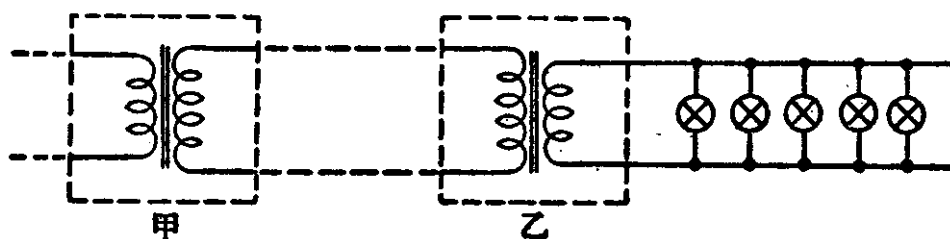
$$I_2 = \frac{N}{V_2} = \frac{200,000}{10,000} = 20 \text{ 安培,}$$

仅合低压输送时的1/100。在功率损耗不变的情况下,根据 N'

$= I_2^2 R_2$, 可以算出 R_2 为 R_1 的 100^2 倍. 因此导线的横截面积和用铜的质量也可以减少到原来的万分之一, 即用铜约 2.5 吨. 这就比较合理并且经济得多了.

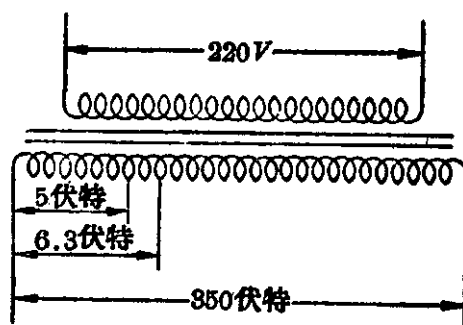
习 题 5.7

1. 同一个变压器, 为什么既可以用来升压, 也可以用来降压?
2. 为什么向远方输送电能要用高压电?
3. 稳恒电流是否可用变压器来变压? 为什么?
4. 附图表示一个输电系统. 甲地有一具升压变压器, 乙地有一具匝数之比为 10:1 的降压变压器. 降压变压器副线圈上的电流是 100 安培, 输出功率是 12 千瓦; 甲、乙两地间输电导线的电阻是 20 欧姆. (1) 求升压变压器副线圈的端电压. (2) 如果不用变压器, 而要在乙地得到同样大小的电流和电功率, 那么电能将在甲地用什么电压送出? (3) 在最后一情况下, 导线热损耗是前一情况的几倍?



(第 4 题)

5. 收音机里的变压器, 原线圈接在 220 伏特的电源上, 有 1210 匝; 副线圈上有四个接线头, 它们之间的电压分别为 5 伏特、6.3 伏特和 350 伏特, 如附图所示. 如果不计原、副线圈中的损失, 问副线圈上各个接线头之间的匝数分别等于多少?



(第 5 题)

6. 直流发电机的功率规定为 40 千瓦, 端电压为 200 伏特, 用导线把电能送入一组电解池. (1) 如果导线的电阻为 0.1 欧姆, 导线上的热损耗是多少? 电解池组两端的电压是多少? (2) 如果电解池组两端的电压不得小于 120 伏特, 问导线的电阻不得超过多大? 此时的导线热损耗又等于多少? (3) 如果单用一根电阻等于 4 欧姆的导线连接在发电机的两极之间 (无其他任何用电器),

导线上的热损耗是多少？通过导线的电流强度是多少？此时，发电机的实际输出功率是多少？

7. 在 110 伏特电压和 220 伏特电压的两种情况下，输送同样多瓦特的电能，要使损失的电能相等，求导线横截面积之比。（导线的长度和电阻率都相等）

8. 画出把电压由 220 伏特降为 110 伏特的自耦变压器接线图？

本章提要

1. 交流电的产生和基本性质

交流电的产生 使闭合线圈在匀强磁场中匀速地转动，线圈里就产生大小和方向都作周期性变化的感生电动势和感生电流。

交流电的变化规律及其描述方法 当线圈在匀强磁场中匀速转动时（转轴与磁力线垂直），感生电动势或感生电流是时间的正弦函数。

感生电动势的最大值

$$\mathcal{E}_m = 2 \times 10^{-8} H l v;$$

感生电动势的即时值

$$\mathcal{E} = 2 \times 10^{-8} H l v \sin \omega t;$$

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \sin \omega t.$$

感生电流的最大值

$$I_m = \frac{\mathcal{E}_m}{R};$$

感生电流的即时值

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{\mathcal{E}_m}{R} \sin \omega t;$$

$$I = I_m \sin \omega t.$$

交流电的周期和频率

$$f = \frac{1}{T}; \quad (f \text{ 频率; } T \text{ 周期})$$

交流电的有效值 是根据电流的热效应来规定的。

$$I_{\text{有效值}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}; \quad V_{\text{有效值}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}; \quad \mathcal{E}_{\text{有效值}} = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{2}}.$$

2. 发电机 发电机是把机械能转变为电能的装置。可以分为交流发电机和直流发电机两类。交流发电机又有单相交流发电机和三相交流发电机之分。

交流发电机和直流发电机的比較:

种 类		交 流 发 电 机	直 流 发 电 机
基 本 原 理		应用电磁感应原理把机械能轉变为电能	相同
基 本 构 造	感 应 体	电磁鉄激磁所需的直流电由其他电源供給。高压交流发电机的感应体为轉子(旋轉磁場式)	感应体用电磁鉄, 激磁电流由发电机本身供給。感应体为定子(旋轉电樞式)
	电 樞	电樞为定子(少数亦为轉子)	电樞为轉子
	引出电流的装置	电刷、滑环(集流环)	电刷、換向器
	电樞里的电流	交流	交流
	发 出 的 电 流 (外电路)	交流	直流

3. 三相交流电 为了节省导綫, 三相交流电路普遍采用星形連接法和三角形連接法。

星形連接法 火綫与地綫之間的电压叫做相电压。火綫与火綫之間的电压叫做綫电压。

$$V_{\text{綫}} = \sqrt{3} V_{\text{相}}$$

三角形連接法 綫电压等于相电压。

4. 交流电动机 是将电能轉变为机械能的装置。

同步交流电动机 与交流电頻率相适应的轉速叫做同步轉速, 以同步轉速運轉的电动机叫做同步交流电动机。

三相感应电动机 依靠三相交流电获得旋轉磁場, 在定子磁場作旋轉运动时, 轉子銅杆与磁力綫之間有了相对的切割运动, 引起了感生电流, 对整个轉子來說, 各个銅杆所受磁場力的力矩使它順着磁場旋轉的方向轉动。三相感应电动机轉子的轉动速度总比定子磁場的旋轉速度小, 即轉子的轉动速度总比交流电变化的頻率来得小。

单相感应电动机 通入定子綫圈的交流电是单相的, 它的磁場只处在一定的方位上, 按照交流电的变化規律, 改变磁場强度的大小和方向; 轉子在构造上和三相感应电动机相同。

5. 直流电动机 构造和直流发电机相同; 是将电能轉变为机械能的装置。

电动机的功率

$$N_{\lambda} = N_{出} + N_{损}.$$

即

$$IV = I\mathcal{E} + I^2R,$$

式中 V 为加在电动机两端的电压, \mathcal{E} 为电枢的反电动势, R 为电枢线圈的电阻. 上式可化为

$$I = \frac{V - \mathcal{E}}{R}.$$

电动机的效率

$$\eta = \frac{N_{出}}{N_{\lambda}} = \frac{I\mathcal{E}}{IV} = \frac{\mathcal{E}}{V} \times 100\%.$$

电动机的输入功率是随着负载的增加而增大的. 因电动机负载增加时, 阻碍电枢转动的反抗力矩增大, 电枢的转速减慢, 反电动势随着减小, 通过电枢的电流相应增大, 输入功率也因而增大.

电动机在刚启动时, 要串入启动电阻, 使启动电流不至过大. 当运转正常时, 再将启动电阻撤去.

6. 变压器和远距离送电 变压器是在交流电路中利用电磁感应的原理来传递能量和改变电压的装置.

变压器的构造是将原、副线圈绕在由硅钢片迭成的框架上.

变压器中能量转换和守恒的关系:

$$\text{原线圈中} \quad I_1 V_1 = I_1 \mathcal{E}_1 + I_1^2 r_1,$$

$$\text{即} \quad V_1 = \mathcal{E}_1 + I_1 r_1;$$

$$\text{副线圈中} \quad I_2 \mathcal{E}_2 = I_2 V_2 + I_2^2 r_2,$$

$$\text{即} \quad \mathcal{E}_2 = V_2 + I_2 r_2.$$

原副线圈的感生电动势和匝数的关系:

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{n_1}{n_2}.$$

如果不计线圈中的电压损失, 则可用下式计算:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_2}; \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1}.$$

变压器的输入功率随着输出功率的增大而增大. 因此当变压器的负载增加, 即输出功率增大时, 变压器的输入功率也增大了. 在空载(没有负载)时, 副线圈没有功率输出, 原线圈的电流趋近于 0, 变压器不再从电源取得能量. 如果将副线圈短路, 变压器原线圈中的电流将最大. 对一定功率的变压器, 过大的电流会烧毁线圈的.

远距离送电 从发电站把电能输送到距离较远的用电地区时, 在输电线上要损失一部分电功率. 如果所输送的总功率为 VI , 那末在导线上损耗的

功率为 I^2R 。

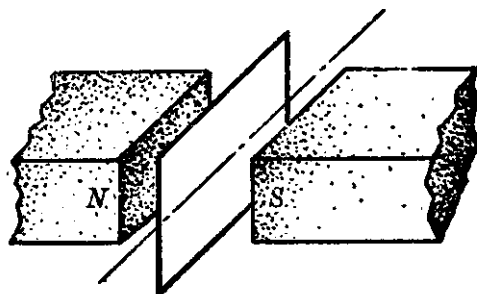
扩大导线横截面积以减少电阻和提高输出电压都是减少损耗的办法，惟前者需用很多有色金属，因而受到一定限制，而后者却是现代远距离送电的有效办法。

如将电压提高到原来的 n 倍，损耗功率即可减少到原来的 $\frac{1}{n^2}$ 倍。

复习题五

1. 交流电和直流电有什么不同？如在用电解方法提炼铜时，使白炽电灯发光时或用变压器改变输出或输入电压时，各应该使用哪种电流？

2. 在附图中，线圈从它的平面和磁力线垂直的位置开始转动，问在什么时候线圈内的电流最强？什么时候最弱？试画出一周期时间内电流变化的图线？什么位置叫做中性面？



(第2题)

3. 画出三相发电机和负载的星形连接法线路图。什么叫三相三线制？什么叫三相四线制？

4. 什么叫旋转磁场？它是怎样产生的？

5. 发电机的路端电压为 220 伏特，输送 100 马力的功率至远处，若输电效率为 90%，求用电户实得的电压及输电线的电阻。

6. 一电动机的内电阻是 3 欧姆，在电枢中通以 15 安培的电流时，磁场对通电电枢的力矩就可以使电枢转动起来。这电动机正常工作时的反电动势是 175 伏特。求：(1) 最初给电动机加上多大电压就可以使它转动起来？(2) 当电动机正常工作时加在它两端的电压是多少？(3) 这电动机需要的功率是多少？(4) 如果一开始就给电动机加上 220 伏特电压将会导致什么结果？(5) 用什么方法来降低电枢上的电压呢？

7. 加在电动机两端的电压是 220 伏特，通过的电流是 20 安培。用这个电动机带动水泵能在 1 小时内使 72 立方米的水升高 20 米。求电动机的效率。

8. 一台直流电动机，电枢线圈的电阻是 0.2 欧姆，加在电动机两端的电压是 600 伏特，轻负载时工作电流是 5 安培，求电动机的反电动势和效率。满负载时工作电流是 50 安培，求这时电动机的效率和线圈所消耗的功率。

9. 通过变压器原线圈的电流为 10 安培，其电压为 2000 伏特，若通过副

线圈的电流为 194 安培，电动势为 100 伏特，问变压器的效率为若干？每小时损失能量若干？

10. 变压器的原线圈是 550 匝，副线圈是 55 匝，原线圈两端的电压是 110 伏特，已知副线圈的电阻为 0.5 欧姆，通过副线圈的电流是 2 安培，试求副线圈的感生电动势及路端电压。

11. 从功率是 5000 千瓦的发电机中把电能输送到 25 公里远的工厂去，如果在输电线中功率损耗 2%。试分别计算当输电电压为 50,000 伏特和 100,000 伏特时所用铜线的截面积和重量。[已知： $\rho=0.017$ 欧姆·毫米²/米， $d=8.9$ 克/厘米³]

12. 某人民公社的发电站通过升压变压器、输电线路和降压变压器，把电流输送给由电动机和电灯组成的用电系统。(1) 试画出从发电机到用电系统的线路示意图；(2) 发电机的输出功率是 100 千瓦，输出电压是 250 伏特，升压变压器中原副线圈的匝数比为 1:25，求副线圈的输出电压和输电线路中的电流强度；(3) 输电线路中的功率损失为 4%，求输电导线的电阻和降压变压器中原线圈的输入电压；(4) 降压变压器副线圈的输出功率分配给生产用的是 60 千瓦，其余的电能用来照明；那么最多可以安装 15 瓦特的电灯多少盏？

13. 有人说：“变压器的铁心中有交变的磁通量，只要副线圈绕组的匝数不断增加，就可以使变压器的输出功率无限地增大。”试分析这句话的错误何在？

14. 有人说：“发电机反正是在转动着的，多开亮或少开亮几盏电灯是一样的。”这句话对不对？为什么？

第六章 无綫电基础

无綫电发明到现在，才不过六十几年，可是在这短短的岁月里，无綫电这一門科学技术却有了日新月异的变化。现在无綫电通信、广播、传真、电视、无綫电操纵和无綫电定位雷达等，已广泛地应用在工农业生产、軍事国防、科学研究、交通运输、征服自然和日常生活等方面。

无綫电技术在很大程度上是用物理学所研究的某些现象和原理作为基础的。我们将在这一章里首先学习有关电磁振荡和电磁波的若干基本概念，从而再学习一些有关无綫电发射和接收方面的原理以及簡易无綫电技术知識。如果讀者能刻苦钻研，克服学习理論的困难，加强操作技能的鍛练，做到实验和理論相結合，那么不仅会对本章的内容感到濃厚的兴趣，并且将对今后学习无綫电电子学創造有利的条件。

§ 6·1 电磁振荡和振荡电路

在力学中，我們已經知道凡是物体的位移、速度、加速度等物理量随着時間作周期性变化的运动，都叫做机械振动。同样，在电学里，凡是导体中电流强度随着時間作周期性变化的电流都叫做**振荡电流**。交流电就是一种振荡电流。

在无綫电技术里，需要的是能够强烈輻射能量的高頻率振荡电流。象发电机所产生的每秒几十周的振荡电流是低頻率振荡电流，它在无綫电技术中是不适用的。为了能够产生强烈輻射能量的振荡电流，我們常用电容器和自感綫圈串联組成的閉合电路（如

图 6.1 所示)。这种能够产生振荡电流的电路,叫做**振荡电路**。使用时,先将开关 K 搬到位置 1,使电容器 C 充电,然后把 K 搬到位置 2,在 L 和 C 组成的振荡电路里就有了振荡电流。

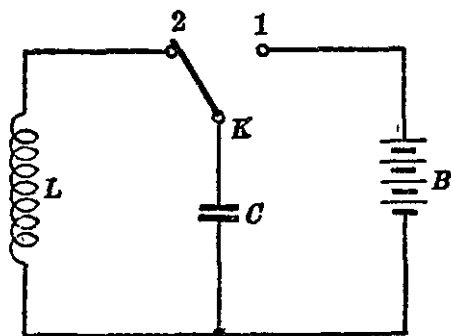


图 6.1 振荡电路

如果在一个电路中,有振荡着的电流,那么在它周围就有周期性变化着的电场和磁场,这种同时存在的电场和磁场的周期性变化,叫做**电磁振荡**。

图 6.2 表示闭合振荡电路中产生振荡电流的情况。最初,给电容器充电,也就是给电路中一定的能量(图 6.2(a));当充电结束而又尚未放电的瞬时,电容器里的电场最强(图 6.2(b)),这时闭合电路中的能量全部都是电场能。在电容器开始放电后,由于线圈的自感作用,电流不能立刻达到最大值,而是逐渐增强,这时在线圈周围空间里的磁场也逐渐增强。同时电容器里的电场逐渐减弱。在这个过程中,电场能逐渐变成磁场能。

在电容器放电结束的瞬间,电场消失,磁场达到最大强度,如图 6.2(c)所示。

在电容器已经放完了电以后,两板都已不带电荷,电路中的电流是不是立即降为零呢?线圈磁场是不是立即消失呢?实际情况不这样简单。回忆在自感现象一节里,我们曾经学习过,线圈磁场的消失,也是一个逐渐减弱的过程,并且在这个过程中,电路里应该有和原来电流方向相同的感生电流。因此,在电容器放电完毕以后,电路里仍有和原来方向相同的感生电流存在。这样的电流使电容器两板重新带电,但它们所带的电荷种类是和原来的相反。我们把这一过程叫做反向充电的过程。在这个过程中,线圈的磁场逐渐减弱,电容器里的反向电场逐渐加强,磁场能逐渐转变成电场能。

在磁場消失的瞬間, 电容器已完成反向充电, 其板間的电場达到最大的强度, 如图 6·2(d) 所示。

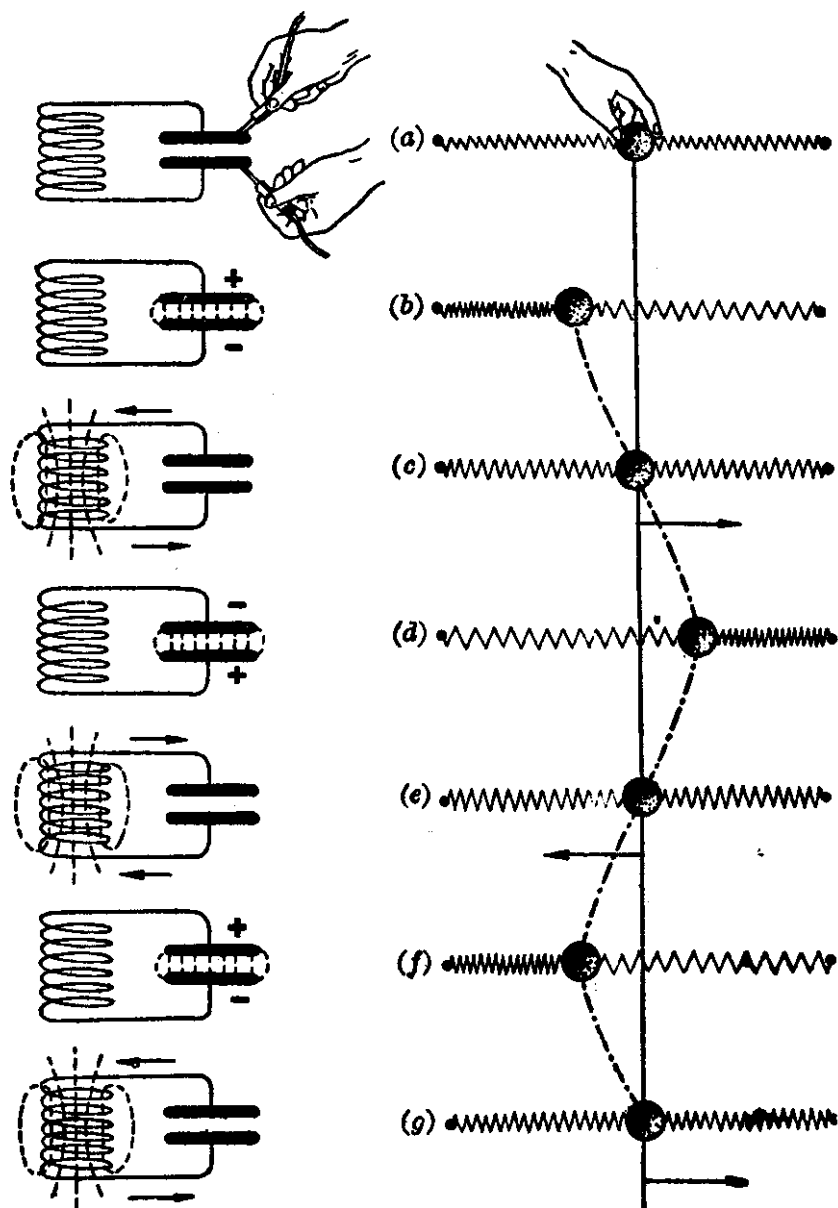


图 6·2 电磁振荡的过程

然后, 电容器又重新放电, 产生跟以前方向相反的电流, 电场能又逐渐减少, 转变成磁场能, 如图 6·2(e) 所示。在电容器再度充电时, 磁场能又转变为电场能, 如图 6·2(f) 所示。此后, 上述的全部过程, 又同样地反复循环下去, 在振荡电路中就出现了振荡电流。

电磁振荡跟我们在振动和波一章里已学过的弹簧的振动很相似, 正如图 6·2 中右侧所示。在这里, 电场能和磁场能的交替转变, 相当于弹簧振子中的势能和动能的相互转变。

为了便于调整振荡频率，采用 L 、 C 所组成的电路，它能依电路本身条件来决定振荡电流的频率，这种振荡称为**自由振荡**。在振荡过程中，由于电路中有电阻存在，要引起能量损失，所以振幅（电流强度的最大值）逐渐减小。振幅逐渐减小的振荡叫做**阻尼振荡**或**减幅振荡**，如图 6·3(a) 所示。如果能在振荡过程中适时补充能量来补偿电路上的能量损耗，那么，振幅就能维持不变。振幅不变的振荡，叫做**无阻尼振荡**或**等幅振荡**，如图 6·3(b) 所示。在无线电技术中，需用无阻尼振荡。

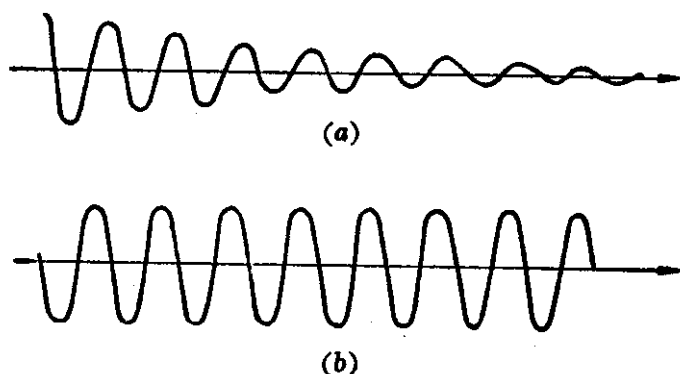


图 6·3 阻尼振荡和无阻尼振荡的图线

§ 6·2 振荡电流的周期和频率

在振荡电路中，通过某一点的电流，由某个方向的最大值再恢复到这个方向的最大值时，我们就说电流完成了一次全振荡。完成一次全振荡所经过的时间，叫做**振荡电流的周期**，在 1 秒钟内完成全振荡的次数，叫做**振荡电流的频率**。

在无阻尼振荡电路里，它的振荡周期是由电路本身的性质所决定的，我们把这个周期叫做振荡电路的**固有周期**，相应的振荡频率，就叫做**固有频率**。

振荡电路的固有周期与电路的自感系数和电容器的电容有关。理论和实验指出：在电阻很小的振荡电路里，它的固有周期应为

$$T = 2\pi \sqrt{LC}.$$

式中自感系数 L 应以亨利为单位，电容 C 应以法拉为单位。

因为频率 $f = \frac{1}{T}$, 所以固有频率应为 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

从以上的式子里, 可以知道: 在振荡电路中, 如果改变线圈的自感, 可以使振荡电流的周期随自感的增减而增减; 如果改变电容器的电容, 也可以使振荡电流的周期随电容的增减而增减. 线圈的自感越大, 阻碍电流增强和减弱的作用也越大, 电容器放电和充电一次所需要的时间就越长, 即周期越长. 如果线圈不变, 最初加在电容器上的电压一定, 那么电容器的电容越大, 它所容纳的电荷就越多, 每放电和充电一次所需要的时间也就越长, 即振荡电流的周期越长.

由此可见, 我们可以用两种方法来改变振荡电路的周期: (1) 改变线圈匝数来改变自感; (2) 用可变电容器来改变电容. 在无线电技术里, 这两种方法, 都被采用.

例 1. 有一自感 $L = 40$ 微亨利, 和电容 $C = 250$ 静电系单位电容所构成的振荡电路, 求它的固有振荡周期和振荡频率.

【解】 因为 $L = 40$ 微亨利 $= 40 \times 10^{-6}$ 亨利;

$$C = 250 \text{ 静电系单位电容} = \frac{250}{9 \times 10^{11}} \text{ 法拉};$$

根据 $T = 2\pi\sqrt{LC}$

$$= 2 \times 3.14 \sqrt{40 \times 10^{-6} \times \frac{250}{9 \times 10^{11}}} \approx 0.67 \times 10^{-6} \text{ 秒}.$$

因为 $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.67 \times 10^{-6}} = 1.5 \times 10^6$ 赫兹 $= 1.5$ 百万赫兹.

习 题 6.2

1. 什么叫振荡电流? 电磁振荡是如何形成的?
2. 阻尼振荡和无阻尼振荡有何不同? 试举例说明.
3. 在振荡电路中, 如果把可变电容器的动片组逐渐旋转得和定片组重迭, 那末它的固有频率将如何改变? 试观察在无线电收音机里, 电台频率的选择和电容改变的关系.

4. 一个电路具有 9×10^{-5} 亨利的自感和 0.004 微法拉的电容, 求它的振荡周期和振荡频率.

5. 如果振荡电路中自感线圈 L 是 2×10^{-3} 毫亨利, 要使该电路能产生 1500 千赫兹的振荡电流, 问它的电容器的电容应该是多少?

§ 6.3 电磁波和电磁波的发送

振荡电路里产生振荡电流的时候, 在它周围空间产生不可分割的电场和磁场. 电磁场理论指出: 任何电场的变化都要在它周围空间产生变化的磁场, 任何磁场的变化都要使它周围空间产生变化的电场. 由此可见, 电场和磁场有着极为密切的关系, 所谓电场和磁场, 原来是一种统一的客观物质——电磁场——的两个方面.

如果在空间某处有一导线, 如图 6.4 所示, 当导线里有振荡电流时, 它的周围就会产生变化的磁场, 变化的磁场在附近空间又会产生变化的电场; 这种变化的电场又产生变化的磁场. 这种不断交变着的电场和磁场, 越来越远地向周围空间传播, 就形成了电磁波. 所以我们说: 电磁波就是在空间传播的电磁场.

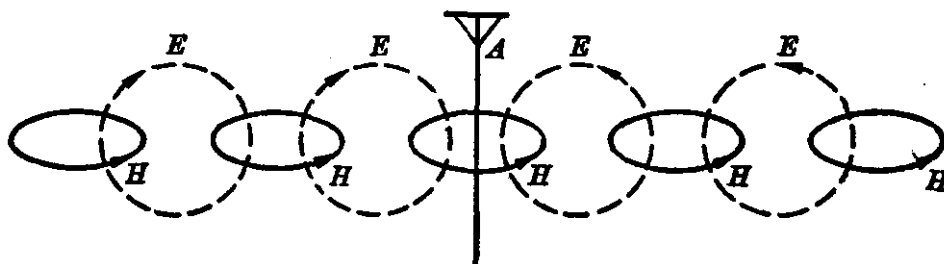


图 6.4 变化电场和变化磁场传播过程的示意图

实验和理论指出: 电磁波的传播速度是很大的, 在真空中它等于光的速度 3×10^{10} 厘米/秒. 在空气中很接近于这一数值.

在电磁场传播过程中, 电场强度和磁场强度彼此间永远互相垂直, 并且它们都垂直于电磁波的前进方向. 所以, 电磁波是一种横波. 图 6.5 所示是电磁波传播的示意图.

什么是电磁波的波长呢?

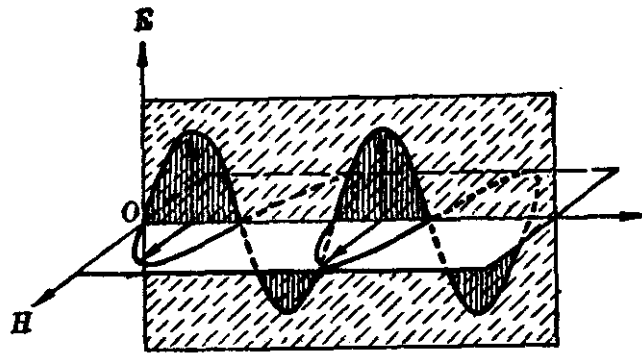


图 6·5 电磁波传播示意图

同机械振动相似，在电路中的振荡电流完成一次振荡的时间（周期）内，电磁场在空间传播的距离，就是电磁波的波长 λ 。电磁波的波长 λ 和频率 f 的乘积等于电磁波的传播速度 c ，即

$$c = \lambda \cdot f \quad \text{或} \quad \lambda = \frac{c}{f}$$

无线电应用的电磁波的波长范围很广，从几毫米到 3000 米以上。通常根据波长的不同，把电磁波划分为许多波段：

名 称	波 长	频 率
长波	3000 米以上	低于 100 千赫兹
中波	200~3000 米	100~1500 千赫兹
中短波	50~200 米	1500~6000 千赫兹
短波	10~50 米	6~30 百万赫兹
超短波：米 波	1~10 米	30~300 百万赫兹
分米波	0.1~1 米	300~3000 百万赫兹
厘米波	0.01~0.1 米	3000~30,000 百万赫兹
毫米波	0.001~0.01 米	30,000~300,000 百万赫兹

不同波长的无线电波具有不同的传播特性，我们按照电台的任务来选择波长。例如：国内广播一般使用中波，国外广播或通信使用短波。中波基本上是沿着地面传播的（简称地波），而短波主要依靠电离层的反射来传播的（简称天波）。地波传送讯号比天波稳定，因此通讯也就可靠些；但地波由于地面的吸收作用，故没有天波传播得远。超短波是高频率的无线电波，它能穿透电离层而不被其反射，与光线的特性相似，主要的用途有短距离通信、雷达、

电视等。

现在来研究一下电磁波的发送。图 6.6 (a) 所示的闭合振荡电路的发送本领是很差的, 实际上它是不能把电磁波发送出去的。在这样的电路里, 电场能几乎完全集中在电容器两块极板中间, 磁场能几乎完全集中在自感线圈以内, 辐射出去的能量极少, 也就是说, 几乎没有电磁波发送出去。我们把这种振荡电路叫做**闭合振荡电路**。如果把电路改成如图 6.6 (b) 所示, 它的辐射本领就要好些; 但如果改成如图 6.6 (c) 所示, 它的辐射本领就更好了。在无线电技术上经常用图 6.6 (c) 所示的电路, 我们称它为**开放振荡电路**。

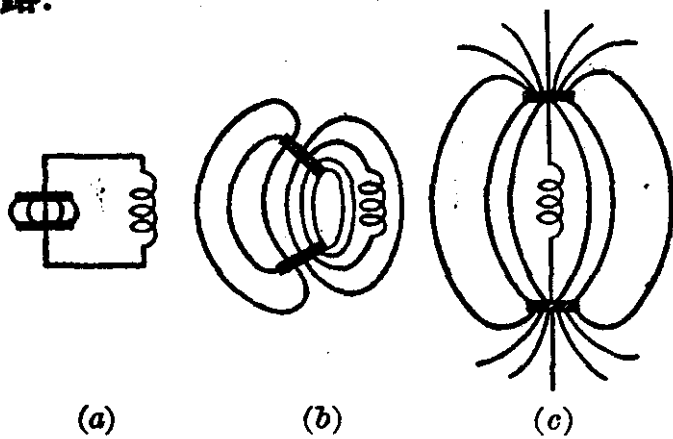


图 6.6 由闭合电路变成开放电路

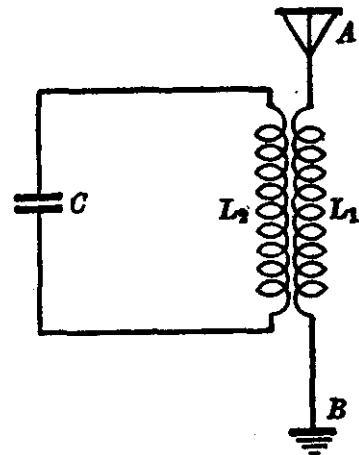


图 6.7 感应耦合

图 6.7 表示一个开放振荡电路 AL_1B 和一个闭合振荡电路 CL_2 相耦合。当闭合电路中存在振荡电流时, 由于 L_1 和 L_2 的感应作用, 在开放电路中也有了同样频率的振荡电流。开放电路在空中的部分导线 A 叫做天线, 跟地连通的导线 B 叫做地线, 这样, 电磁波就通过天线和地线组成的开放电路发送出去。这是一种常用的发送方法, 叫做感应耦合。

习 题 6.3

1. 电磁场是怎样向外传播的?
2. 电磁波的发送为什么要用开放振荡电路?
3. 振荡电流、电磁振荡和电磁波三者之间有些什么不同? 有什么联系?

4. 在無線電訊发射机的振蕩电路里, 自感线圈的 $L=8$ 微亨利, 电容器的 $C=200$ 微微法拉. 求所发出电磁波的波长.

§ 6.4 調 制

無線電发送机发出的电磁波应该能够传递某种信号. 例如, 在無線电报中, 所发出的电磁波必须随电碼符号而改变, 在無線电广播中, 所发出的电磁波必须随声音而改变, 在無線电电视中, 电磁波必须随图象而改变. 因此在無線电发送机中, 必须把电碼、語言、音乐等信号转变成为低频率电压信号, 再把低频率电压信号加在高频率的电磁波里发送出去, 这样把低频率信号加在高频率电磁波的过程, 就叫做调制. 举一个通俗的例子来说, 高频率电磁波好象是一列火車, 低频率信号好象是貨物, 要把貨物运往远处, 必须把貨物装上火車.

要发送的信号叫做调制信号, 未调制的高频率电磁波叫做载波, 载有低频率信号的高频率电磁波叫做调制波.

任何一个载波, 都有一定的振幅、频率和位相. 调制过程可以是使载波的振幅或频率或位相随着调制信号而变化, 相应的调制方法称为调幅、调频或调相.

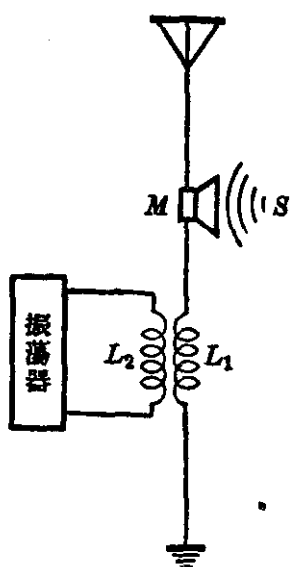


图 6.8

调幅是使载波振幅随着低频率信号的波形而变化. 在無線电广播中, 调制器是利用話筒或拾音器来完成的. 下面谈一谈调幅的简单原理: 如图 6.8 所示, M 是一只炭精話筒, 把它串联在天綫和地綫的开放电路里, 当沒有向話筒說話时, 話筒上的金属薄片不振动, 話筒里炭粒的松紧程度不变化, 因之話筒里的电阻也无变化. 这时, 发送天綫电路里的高频率振蕩电流的振幅是均匀的, 如图 6.9 所示. 当对話筒說話

时, 話筒上的金属薄片随着声波而振动, 炭粒的松紧程度随着金属

片的振动而改变，因而话筒里的电阻也随着声音振动而增减。这时，天线电路里的交变电动势虽然是等幅的，但由于电阻值时大时小，振荡电流的强度就相应地跟着时小时大，因之发送出去的电磁波的波幅也就不均匀了。波幅的改变是跟着声音振动而改变的，如图 6·10 所示。这样依照声音振动而改变振幅的电磁波叫做**调幅波**。调幅在无线电广播和无线电电话中经常被采用着。

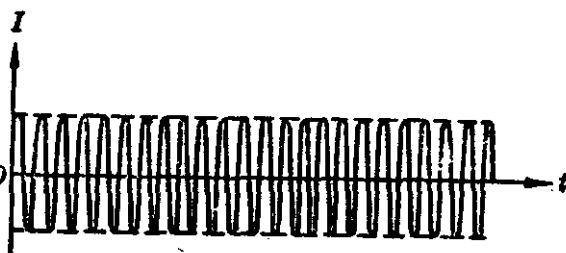


图 6·9 天线电路里的振荡电流

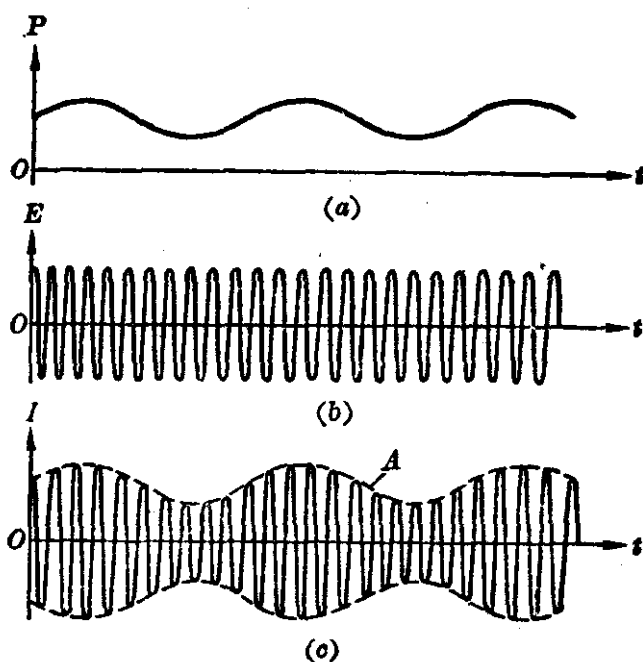


图 6·10 调幅作用

- (a) 传到话筒的声波——调制信号；
- (b) 天线电路中的感生电动势——载波；
- (c) 天线电路中的振荡电流——调幅波

调频就是使载波的频率随低频信号的频率而变化。当载波被低频调制波调制后，形成了调频信号波，其形式如图 6·11 所示。在调频波的频率变化中，不但反应了调制波电压正负的变化，也反应了调制波电压振幅的变化。调频波是等幅波，不管频率发生怎

样的偏移,它的振幅都不改变. 調頻波抵抗干扰的能力比較强,在傳遞过程中失真比較小,近来在我国已經用調頻波来傳遞信号,象北京、上海等地所建立的电视台和普及各城市的电傳真設備,都是发送調頻波的具体例子.

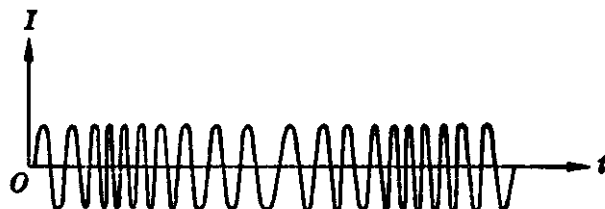


图 6·11 調 頻 波

調相就是使載波的位相随音頻訊号的位相而变化, 目前应用尙不广泛.

习 題 6·4

1. 什么叫做調制? 調制的方法有哪几种?
2. 調幅和調頻有些什么区别? 各有什么用途?

§ 6·5 电 諧 振

当我們要收听无綫电广播时, 会习惯地把收音机上的旋鈕擰到不同的位置, 用它来寻找要听的电台, 这究竟是根据什么道理呢?

世界各国有着无数的无綫电发送电台, 它們发出各种不同頻率的电磁波. 这些电磁波在空間傳播遇到接收天綫时, 在天綫电路里就要依照原有的頻率产生感生电流. 如果我們不經選擇地把它們都接收下来, 并都变成声音信号, 那将除了一片嘈杂声音外, 什么也分辨不出. 因此我們必須設法在这些感生电流中选择出所需要的頻率, 并且把接收到的电磁波, 設法形成相当强的振蕩电流, 其他不需要的, 就让它尽量地微弱.

学习单摆振动时, 我們知道当 A 摆的摆长等于 B 摆的摆长

时,策动力变化的频率就等于 B 摆的固有频率,这时就发生共振。发生共振时物体作受迫振动的振幅是最大的。

电磁振荡也是如此,当振荡电路的固有频率跟接收来的电磁波的频率(或加在电路上的交变电压的频率)相同时,电路里激起的感生电流就最强,在电学中,这种现象叫做电谐振现象。

电谐振的条件是这两个振荡电路的固有频率相同。如果

$$f_1 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}},$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_2 C_2}},$$

只有在 f_1 等于 f_2 , 即 $L_1 \cdot C_1 = L_2 \cdot C_2$ 时才会发生电谐振。

如图 6.12 所示,在天线线圈旁边耦合一个有可变电容器的振荡电路,这样就构成了选择电台的装置。把旋钮拧到不同位置,实质上是用调节电容(或调节电感)的方法使闭合电路的固有频率和我们所要接收的频率相同。这时如果天线电路里有这种频率的振荡电流存在,也就是如果空间里有这种频率的电磁波存在,就会对闭合电路起感应作用,

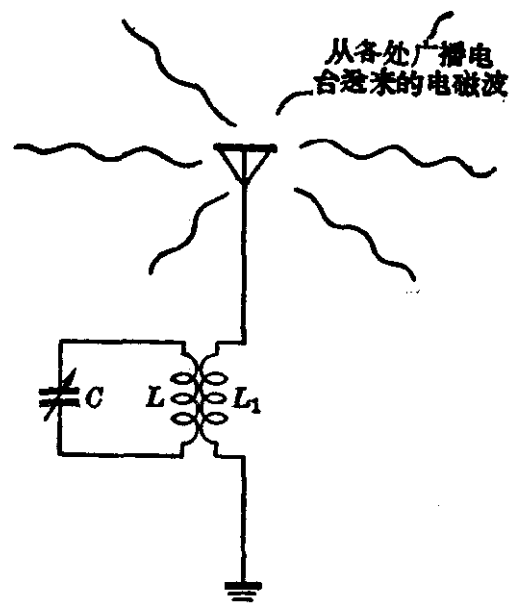


图 6.12

形成电谐振现象,那么这个电磁波在电路中激起的振荡电流比其他频率的振荡电流强得多,这样就收到我们所需要的电磁波。用这样的方法选择电磁波,叫做调谐。在无线电技术中,是利用 LC 调谐电路的谐振作用来完成这一任务的。

§ 6.6 检 波

为了实现无线电通信或广播,必须把要传送的低频信号加到

高频电磁波上传送出去，也就是用低频信号对高频电磁波进行调制。当收音机收到已调制的高频电磁波后，必须把接收机的谐振电路调到和这个已调幅波发生谐振(对其他电台发送的已调幅波不起谐振)，这样，需要接收的电台所发送的已调幅波就被接收下来。但实验证明，把听筒接在电路上，如图 6·13(a)所示，是听不到声音的。

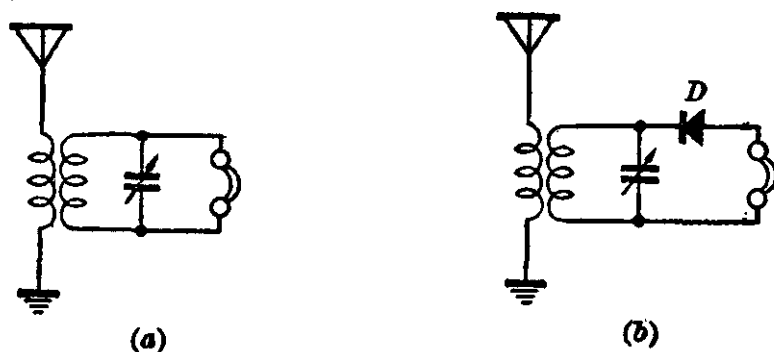


图 6·13

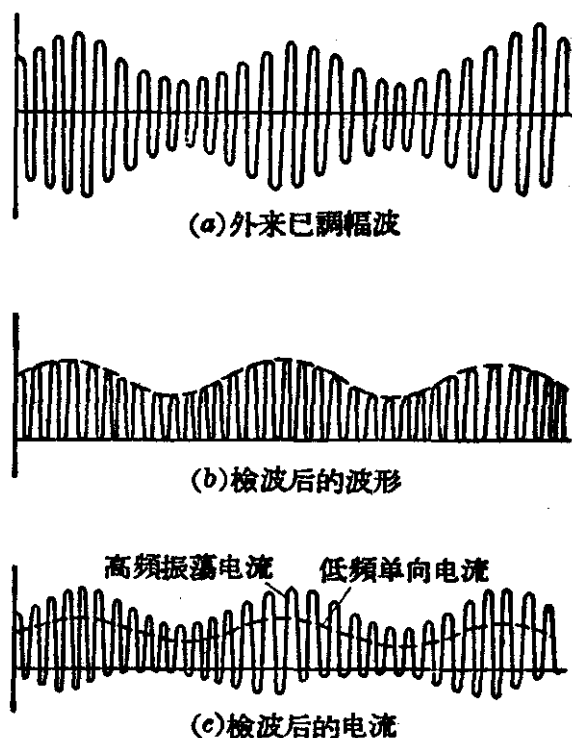


图 6·14

为什么听不到声音呢？

假使调谐回路收到一个由简单的正弦低频信号调幅的高频电磁波(如图 6·14(a)所示)，那么，在听筒中流过的电流也是形状完全相同的高频振荡电流。获得了高频振荡电流还不等于收到了随

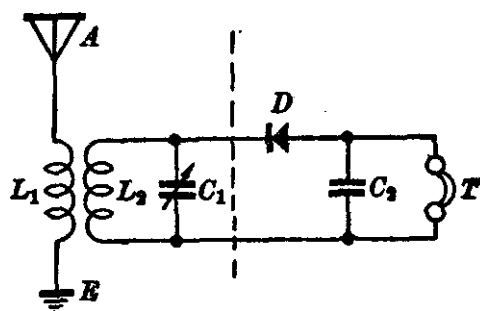
电磁波带来的声音。

我們知道,听筒是依靠电磁鉄在起作用的,电磁鉄綫圈的自感系数很大,高频振荡电流是不容易通过的。同时听筒中成声鉄片的固有频率很低。当高频电流的正半周要使听筒的鉄片向一方振动时,紧接着它的負半周就要使鉄片向另一方振动(高频电流的频率是很高的,例如在中波波段,是从550千赫茲到1650千赫茲)。由于鉄片的机械慣性与这样快的振动不相适应(还没有开始向一方振动时,电流就又已經改变了方向),因此,它的振动非常微弱,以至根本听不到声音。

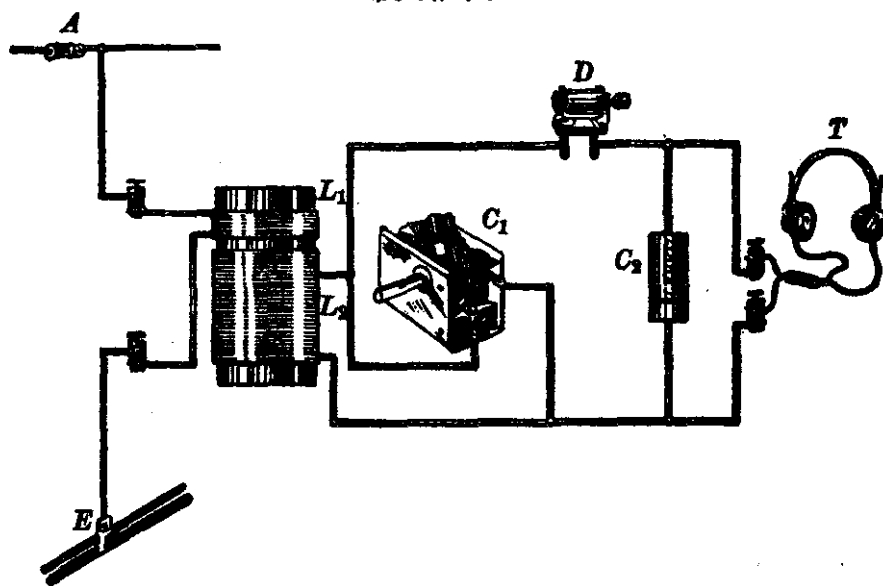
为了听到声音,必須从高频已調幅波中檢出原来的声音信号。从高频已調幅波中檢出音频信号的过程,叫做檢波。在收音机中,檢波是利用具有单向导电性的装置如半导体、电子管来完成的,这种装置叫做檢波器。

如果在图6·13(a)所示的电路中加接一只矿石,如图6·13(b)所示,那么情况就不一样了,矿石具有单向导电的性能。它只允許电流通过某一方向(正向),而通过相反方向(反向)的电流非常小。或者说,它的正向电阻很小,而反向电阻很大。因此,高频电流的正半周能够經矿石流过,形成一些方向相同的脉冲,經檢波后的波形如图6·14(b)所示。这样的电流可以看作是一个低频单向电流和一个高频振荡电流的合成,如图6·14(c)所示。如果要让图(c)中高频电流通过听筒,还是很困难的,它只能引起听筒里的鉄片随着声頻作很微弱的振动,发出不很清晰的、微弱的声音。

图6·15是双回路矿石收音机的綫路图和实体图,我們可以根据所給的器具,配置元件,进行实验。在綫路图虚綫左边是諧振綫路,右边是檢波綫路。听筒上并联一个电容器,其目的是使高频电流容易通过它而滤去。因此,在檢波后的电流中,低频单向电流将通过听筒,高频电流被电容器所旁路,不流到听筒中去,这样就可以从听筒中听得較为清晰的声音了。



綫路图



实体图

图 6·15 双回路矿石机

A—天綫；E—地綫； L_1 —天綫綫圈； L_2 —調諧綫圈； C_1 —調諧电容器，360 微微法可变电容器； C_2 —旁路电容器，2000 微微法固定电容器；D—矿石；T—听筒

收音机可以利用矿石来作檢波器。象黄铁矿(FeS_2)的晶体和方鉛矿(PbS)的晶体等，都是天然的半导体，都具有单向导电的性能，如果用人为的半导体二极晶体管(詳見 § 6·12)作檢波器，那么效果将更好。电子管作檢波器的原理将在 § 6·9 中加以討論。

习 題 6·6

1. 电磁振蕩的共振現象是怎样产生的？
2. 我們有什么方法来選擇所要接收的电磁波？
3. 說明晶体檢波器的作用？
4. 画出双回路矿石收音机的綫路图，并說明各部件的作用。
5. 自己裝制一只矿石收音机。看能否收得到电台的广播？

§ 6·7 二极管。电子管整流器

电子管是无綫电设备中的心脏，电子管的出現加速了无綫电技术的发展。

二极管是一种最简单的电子管，它是在一个抽成真空的玻璃容器中装置两个电极——**阴极和屏极**。阴极是由一根金属絲或金属管子作成，在它表面涂有一层加热到一定温度就能放出电子的氧化物薄层。屏极(又称板极)是套在阴极外圍的，由金属板作成的套筒，如图 6·16 所示。

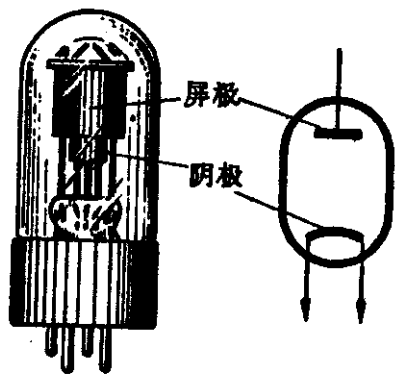


图 6·16

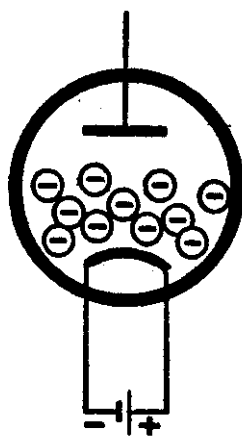


图 6·17 热电子从阴极飞出

金属絲或金属管中的自由电子，象气体中的分子一样，在不停地作无規則运动。当金属受热温度升高时，电子无規則运动的动能也就跟着增加，一些动能特別大的电子，就有可能脫出金属形成所謂**热电子**。高速自由电子脫出金属的过程和液体蒸发的过程非常相似。脫出的热电子聚集在金属表面附近的空間里，形成所謂**电子云**，如图 6·17 所示。这时电子云里的电子仍旧在作无規則的运动。

如果把二极管的屏极和阴极分別和电源(乙电)的正极和負极相接通，并在电路中串联一只电流計，这就构成一个如图 6·18 (a) 所示的屏极电路。这时，相对于阴极來說，屏极的电势較高，在两极間有电场存在。由阴极脫出的电子，在电场的作用下流向屏

极，形成了电流(电流和电子流的方向相反，在电子管内电流的方向从屏极流向阴极)。这个电流叫做屏极电流。它的强度可由电流计的读数来确定。如果把乙电的正负极对调，如图 6·18 (b) 所示，那么屏极比阴极的电势较低，从阴极脱出的电子被屏极推斥，不能形成屏极电流。此时电流计的指针没有偏转。由此可知，当屏极为正时(即电势比阴极高时)，二极管可以导电；当屏极为负时(即电势比阴极低时)，二极管不能导电。这种性质称为二极管的单向导电性。在无线电技术中，经常利用二极管的单向导电性来作成整流和检波的使用。

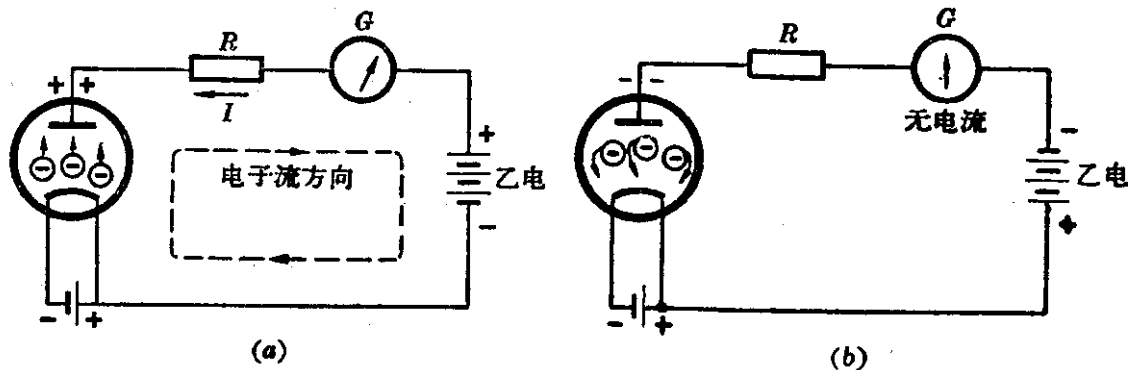


图 6·18 二极电子管的单向导电性

在无线电电子仪器中须要电流不大的直流电源。通过电子管整流器就可把交流电变成直流电。图 6·19 是常见的整流电路。当变压器 T 的初级线圈与交流电源接通后，由于变压器的作用，在次级线圈中产生了感应电压，电压曲线如图 6·20(a) 所示。当 A 端为正时，即二极管屏极电压高于阴极时，二极管导电，整流电流就沿图中箭头方向流经负载电阻 R 。当交流电压变化到 K 端为正时，屏极电压低于阴极电压，二极管不导电(可见交流电只有半个周期被利用)。再过半个周期，交流电压又变化到 A 端为正，又有方向与前一次一样的电流流过 R ，这样负载电阻 R 上就只有单向的电流流过，形成了半波整流电流，其波形如图 6·20(b) 所示。由此可见， R 两端的电势总是 P 端高 Q 端低，但 PQ 之间的电压却仍然是变动着的，而且每隔半周，电压就有一次为零，输出的电压

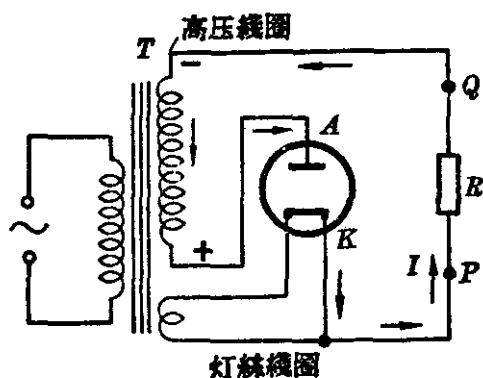


图 6·19 半波整流电路

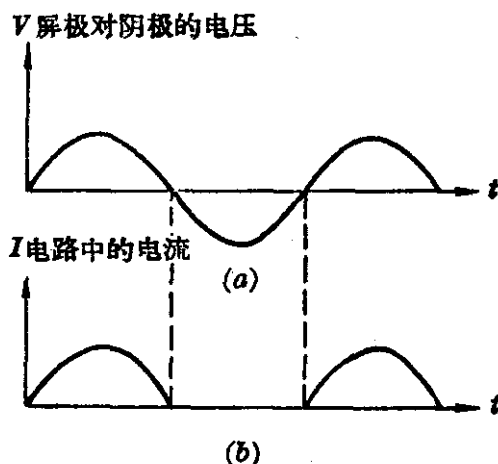


图 6·20 半波整流的输入与输出波形

是不稳定的。

要获得比较稳定的直流电源，必须使用全波整流器，全波整流是由双二极管（如图 6·21 所示）的电路来完成的。实际上，它相当于两个半波整流器组合而成。

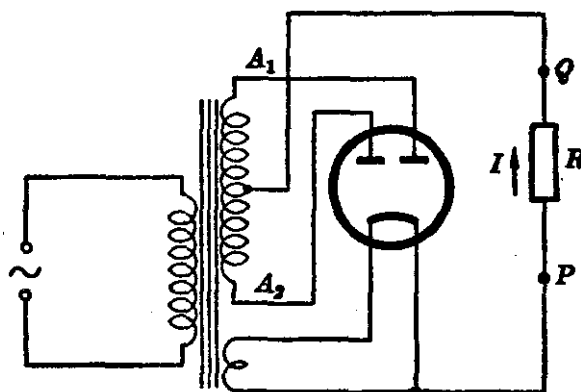


图 6·21 全波整流电路

当变压器次级线圈的 A_1 端电压较高时，管中右半边的两个极板间导电，在负载电阻 R 上有半个周期的电流流过，电流方向由 P 到 Q 。当 A_2 端电压较高时，管中左半边两个极板间导电，在电阻 R 上有另外半个周期的电流流过，方向也是由 P 到 Q 。这样，由于两个屏极相互交替导电的结果，在负载电阻 R 上无论在正半周或负半周都有电流流过，形成全波整流。全波整流不仅输出电流平均值比半波整流大，并且波形也比半波整流稳定得多。图 6·22 所示的图线，表示电流强度随时改变，但方向始终不变的电流，这种电流叫做脉动电流。

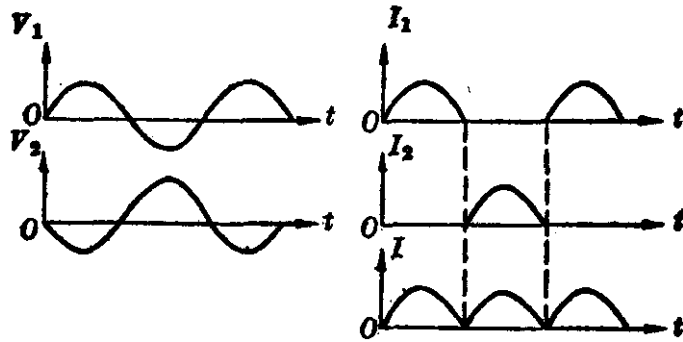


图 6-22 全波整流的输入和输出波形

习 题 6.7

1. 画出半波整流的线路图,并说明其作用原理.
2. 画出全波整流的线路图,并说明其作用原理.
3. 二极管电子管的构造如何?有什么用途?用二极管电子管代替半导体晶体,能起检波作用吗?为什么?

§ 6.8 三极电子管. 电子管放大器

在屏极、阴极间添加了栅极后就构成了三极电子管. 栅极是套在阴极的外面,用金属导线绕在支柱上的圆柱形或扁盒形的稀疏网,它离阴极很近,如图 6-23 所示.

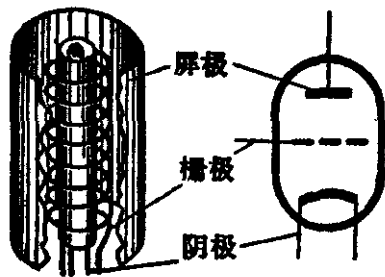


图 6-23 三极电子管的构造和符号

栅极可以控制电子管的电子流,使电子管能作更多的工作. 如图 6-24 所示,用丙电池使栅极带上正电,那么栅极和屏极会产生一个相当强大的合成电场,使从阴极脱出的电子所受的电场力加大,也就是电子的运动速度加快. 同时使通过栅极飞向

屏极的电子数目大为增多,因而屏极电流增大. 其中也有一小部分电子到达栅极时,从栅极电路流回阴极,产生了栅极电流. 如果把丙电池的正负极倒接过来,使栅极带上负电,那末它就会削弱屏极对电子的吸引力,也就是减小屏极电流. 同时由于栅极电压比阴极电压低,因而它排斥电子,不会产生栅极电流. 可见改变栅

极的电压(栅极和阴极间的电势差,在无线电技术中常称为栅极电压。因为一般常把阴极接地,它的电势为零),就能控制屏极电流

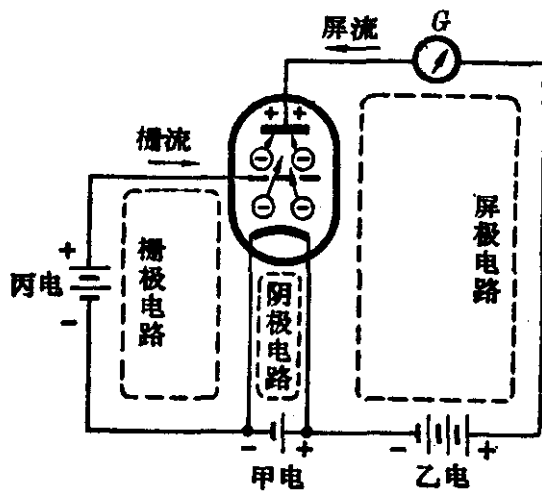


图 6·24 栅压和板流的变化

的变化。

我們知道,如果改变屏极电压(屏极和阴极间的电势差),也能引起屏极电流的变化,但栅极离开阴极比屏极离开阴极近得多,因此栅极电压的变化所引起的屏极电流的变化,要比屏极电压的变化所能引起的大得多。总的来说,栅极电压

作微小的变化,就能引起屏极电流作相当大的变化。

三极管的这种特性使我们可能利用它来作为放大器。

三极管放大器的工作原理如图 6·25 所示,如果在三极管的屏极电路里,串联一个阻值较大的电阻 R 。把需要放大的交变电压 E_1 加在三极管的栅极电路里,于是在屏极电路里就产生一个放大了的电压。因为 E_1 在正半周时,电子容易达到屏极,所以屏流加大, E_1 在负半周时,栅极起了推斥电子的作用,所以屏流减小。可见屏流变化形状是和输入电压 E_1 的变化形状一致的。根据欧姆定律 $V = I \cdot R$,既然 R 的值是固定的,所以 R 两端的电压一定是和屏极电流成比例的,也就是 R 上电势降落的变化是和屏流的变化规律一样的。因为屏流的变化形状又和 E_1 的变化形状一致,所以屏极电压和栅极信号电压的变化一样。由于负载电阻 R 和屏流都相当大,所以屏极的交变电压要比栅极上的信号电压大得多,也就是三极电子管把信号放大了。

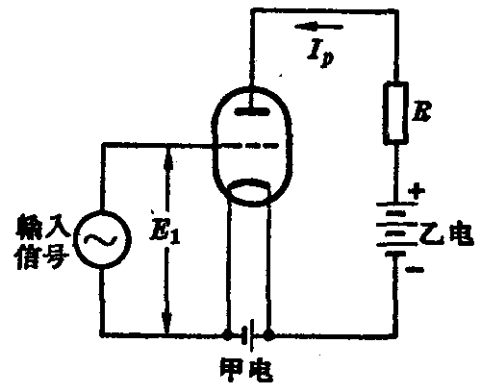


图 6·25 三极管放大器工作原理

三极电子管有放大的作用，它的能量由甲电池和乙电池来供给，所以是符合能量转换和守恒原理的。

四极管和五极管等的构造要比三极管复杂些，图 6·26 是它们的符号，但基本放大原理是一样的。

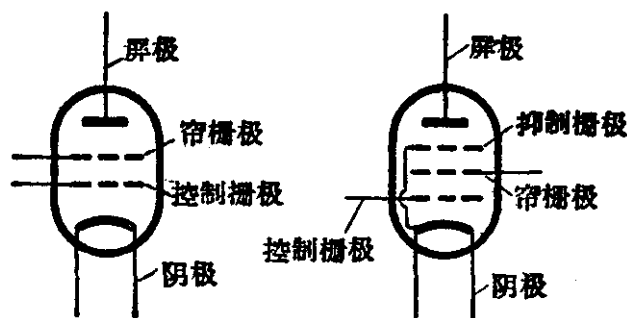


图 6·26 四极管和五极管的符号

放大器的种类很多，按任务分有电压放大器和功率放大器等，按频率范围分有高频放大器和低频放大器（即音频放大器）等，在无线电发送机和接收机里或电子仪器里，放大器被广泛地应用着。

习 题 6·8

1. 三极电子管的构造如何？栅极为什么对屏极电流有控制作用？
2. 说明三极电子管放大器的工作原理。放大的能源是从哪里来的？

§ 6·9 栅极检波。电子管收音机

三极管也能进行检波作用。三极管检波器有两种，一种是屏极检波，一种是栅极检波。

屏极检波是依靠电子管的特性来实现的。如果在栅极上加一个很大的负电压，使屏极电流刚好截止。这样，当已调幅高频电压加到栅极上时，只有正半周能使电子管产生屏极电流，从而完成检波任务。由于目前收音机中用得很少，所以这里不作介绍。

栅极检波是利用电子管的栅极来完成检波任务的。如图 6·27 所示，当有许多外来信号的电磁波作用到天线时，天线内感应出微弱的信号电流，经过输入调谐回路 L_2C_1 的选择，选出我们要收听

的信号电压,加到电子管的栅极与阴极之间.由于电子管的栅极和阴极部分,可以看成是一个二极管,所以相当于把信号电压加到一个二极管.利用栅极阴极间的检波作用,信号电流中的音频电流成分将通过 R_1 到达栅极;其中的高频电流成分将通过 C_2 到达栅极.这两个电流都作用于栅极,三极管就把它們放大.放大后的音频电流流过听筒,发出声音来;放大后的高频电流经过 L_3 、 C_3 旁路到地(电容器对高频电流无阻碍),不影响通过听筒的音频电流.

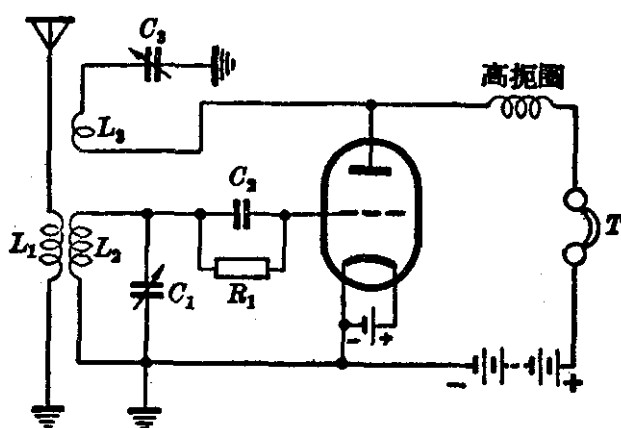


图 6·27 再生式电子管收音机

电子管收音机在工作时有检波作用,又有放大作用,因此效率比矿石收音机高得多,下面来谈一谈再生式收音机的工作原理.

栅极检波与其他的检波方式相比较,有较高的灵敏度,但工作时有栅极电流产生,会影响到调谐回路的质量,从而使选择性变坏,但在一般简单的收音机里,对于灵敏度的要求比其他指标更为重要,所以栅极检波仍被广泛地采用.

检波后得到的高频电流成分本来是沒有用处的,但如果把它回输到栅极调谐回路去,可以增加电能量,从而大大地提高了收音机的灵敏度. 这种再度利用高频能量的方法就叫做再生.

在电路中获得再生的方法最常用的是采用线圈的互感作用.如果在调谐线圈附近放置一个“再生线圈”,如图 6·27 中 L_3 所示,它与调谐线圈的磁通方向应该彼此相同.这样,经过电子管放大的高频电流流过再生线圈的时候,调谐线圈上就感应出一个额外

的高頻电压,它和信号电压一齐加到栅极上,从而增大了栅极输入电压,使电子管的屏流比沒有回輸时增大;然后再从屏极回輸比上一次更大的高頻能量到栅极回路,栅极上电压增大,屏流将更大;如此循环不已,使屏流得到很大的增长,因而收音机的灵敏度大为提高. 由再生所补給的能量,如果刚好抵消調諧回路所損耗的能量,这时叫“临界再生”. 如果补給的能量比回路的損耗大,就会使收音机产生振蕩,发出尖叫声,反而不能收音. 所以一般总把再生調到接近临界点,即振蕩将起未起的状态,这时的灵敏度和选择性最好.

§ 6·10 无綫电的发送和接收

在无綫电广播中,我們要发出的是依声音而改变的电磁波,因此,在发送机中要有振蕩器和发送器,还要有調制器.

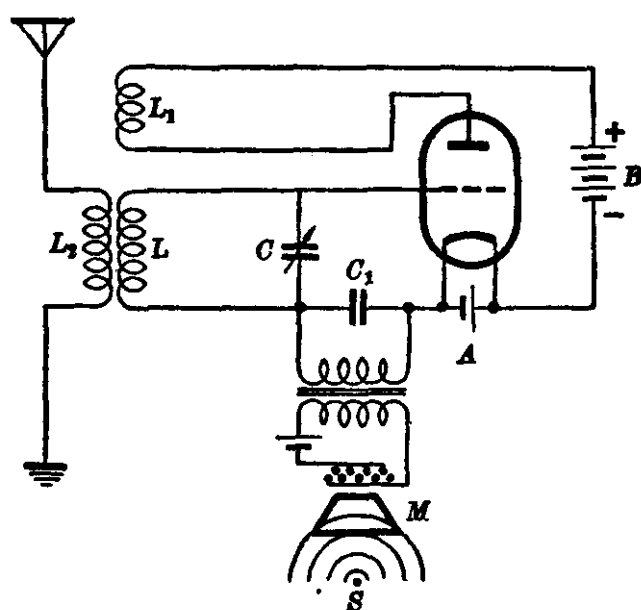


图 6·28 簡易广播发送机

图 6·28 是一个最簡單的广播发送机綫路图. 由声源 S 所发出的声音使送話器的薄片发生振动,薄片的振动引起炭粒的接触时松时紧,因而通过炭粒的电流就时弱时强. 时弱时强的电流在通过变压器的原綫圈时,使副綫圈中产生交变的感生电动势,因而

使栅极的电势随同变化，于是引起屏极电流的相应变化。通过 L_1 和 L 的互感，在振荡电路 LC 中，振荡电流也随同发生强弱的变化。这样就使天线电路中振荡电流的振幅随声音而改变，所发出的电磁振荡的振幅也随声音而改变。

现将无线电发送的主要组成部分和工作顺序，如图 6.29 表示如下：

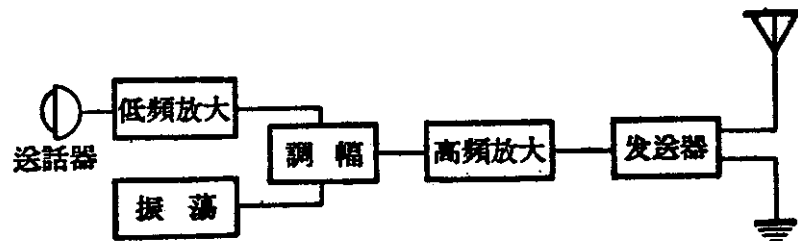


图 6.29

在 § 6.6 及 § 6.9 中分别介绍矿石收音机和电子管收音机，可见在无线电接收机中，除了应有调谐部分和检波器外，还需有放大器，现将无线电接收的主要组成部分和工作顺序，如图 6.30 表示如下：

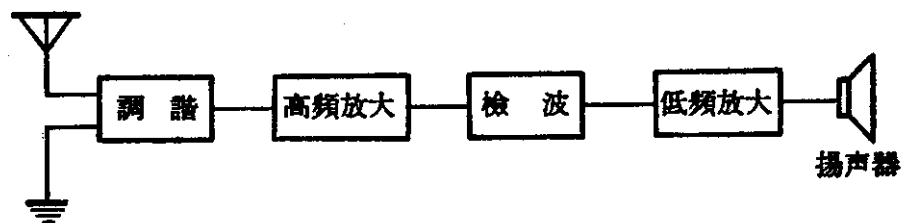


图 6.30

习 题 6.10

1. 画出再生式电子管收音机的线路图，说明各部分的作用。
2. 什么叫做再生？如何提高简易收音机的灵敏度和选择性？
3. 图 6.28 是一个简易广播发送机，试说明它的工作原理。
4. 画出无线电发送机和接收机的方块示意图，并说明各部分所起的作用。

§ 6.11 有线广播

近年来在我国广大的农村里，已普遍建立了有线广播收听网。

它不仅可以用来指导生产和进行宣传教育，同时还能作为提高文化生活的工具。实质上，有线广播是一座大功率的扩音机和许多扬声器的组合。

扩音机的主要任务是把语言和音乐的信号加以放大。图6·31所示的是扩音机各部分的方块图。由送话器或拾音器把声音信号变成音频(低频)电压，经扩音机把音频电压放大以推动扬声器发出具有足够强度的声音。

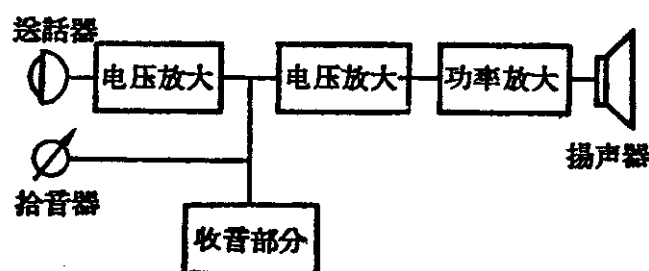


图 6·31 扩音机示意图

来自送话器或拾音器的音频电压是非常微弱的，必须经过多级电压放大，最后经过功率放大，才能获得足够大的输出功率，来推动许多只扬声器。对于有收音设备的扩音机，可以直接收听电台的广播。

在有线广播中，扬声器是供用户使用的主要设备，连接得是否合适，不仅直接影响收听质量，而且还会影响整个广播网路和其他用户。

扬声器是一种电声转换元件，依靠它把音频电流还原成声音，也就是把电磁能转换成声能，使我们可以听到广播的语言或音乐。各种扬声器的工作原理基本上是相同的，现在就以农村中用得最多的舌簧扬声器为例，来说明它是怎样把电磁能转换成声音的。图6·32是舌簧扬声器的结构图，图6·33是舌簧扬声器的工作原理图。在用软铁制成的扁平舌簧的外面套一个线圈，放在永久磁铁的两只极靴的中间。当音频电流经过线圈时，舌簧被磁化。如果某一时刻电流方向如图中所示，根据右手拇指法则，这时舌簧的

右端则为南极，左端为北极，它受到永久磁场的作用，右端将被吸引向上，左端向下，动作的方向如图中箭头所示。当电流方向改变时，舌簧动作的方向也就相反。这样舌簧就将随着线圈中所通过的音频电流的变化规律而来回地振动。舌簧又通过传动杠杆与纸盆相连，于是纸盆也就产生与音频电流相应的振动，从而激动空气成为声音。

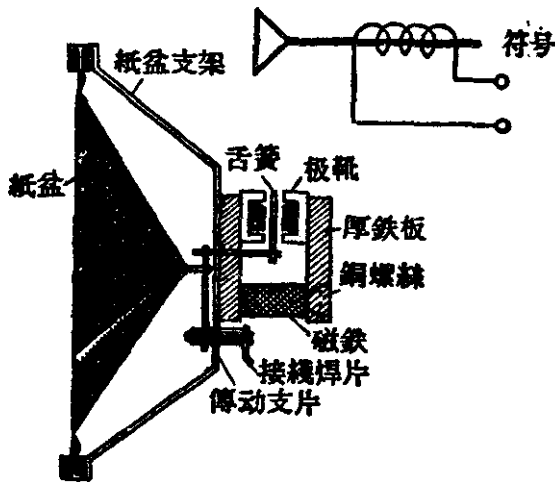


图 6.32 舌簧扬声器

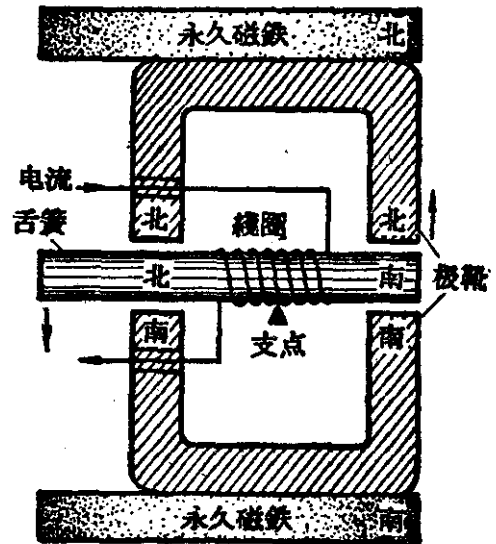


图 6.33

对有线广播来说，扬声器的接法是很重要的。接扬声器时一定要注意到扬声器的阻抗（有铁心的线圈通过交流电时，所表现的电阻称为阻抗，一般用 Z 代表）、线路的电压和扬声器的功率。例如舌簧扬声器一般应接到额定电压为 30 伏特的线路上，如果接到电压为 120 伏特或 360 伏特的线路上，就会烧坏扬声器或使沿线上的其他扬声器不能正常发音。反之，如果接到低于 10 伏特以下的线路上，它就发不出应有的声音

如果线路上的电压与扬声器要求的电压不配合，那就需要用用户变压器来使它们配合。变压器的变压比可以用等式 $n = \frac{V_1}{V_2}$ 来计算。式中 V_1 是线路电压， V_2 是扬声器的额定电压， n 是变压器的变压比。要注意：在应用用户变压器时，不得把原副线圈接反。

高音扬声器和低阻抗电动纸盆扬声器，一般不用额定电压来

表示,而是用阻抗和功率来表示的。这时它们的额定电压就需用等式 $V = \sqrt{N \cdot Z}$ 来换算。式中 N 是扬声器的功率, Z 是扬声器的阻抗, V 就是额定电压。

例 2. 如果要把阻抗为 3 欧姆、功率为 10 瓦特的高音扬声器接到 30 伏特的线路上,求用户变压器的变压比应该是多少?

【解】 已知: $Z=3$ 欧姆, $N=10$ 瓦特, $V_1=30$ 伏特;求: n 。

按 $V = \sqrt{N \cdot Z}$ 可得 $V_2 = \sqrt{10 \times 3} \approx 5.5$ 伏特。

用户变压器的变压比

$$n = \frac{V_1}{V_2} = \frac{30}{5.5} \approx 5.45.$$

假使安装扬声器的地点距离扩音机较近,接线较短,接线电阻很小,那么在使用几只相同扬声器时,可以直接采用并联、串联和混联的方法(如图 6-34 所示)。其中串联的缺点是,如果有一只扬声器断线,那么全部扬声器都将不响,并且扩音机易于损坏,这种接法使用不多;混联一般也用得很少,通常都采用并联接法。如果扬声器接线较长,线路电阻和扬声器阻抗数值大小相差不多时,那就需要用用户变压器来增加有用功率,以达到提高线路的传输效率目的,如图 6-35 所示。

在使用扩音机时应该注意下列几点:(1)检查扩音机使用电压与电源电压是否相同,不可将使用电压为 110 伏特的扩音机接到

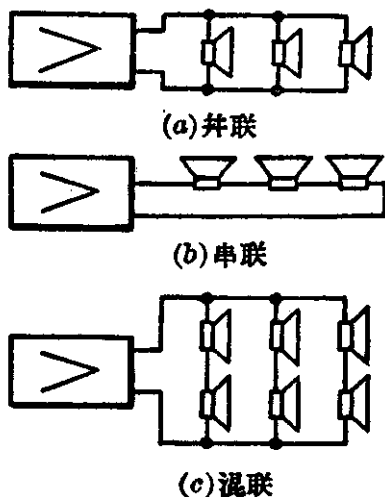


图 6-34 扬声器的连接法

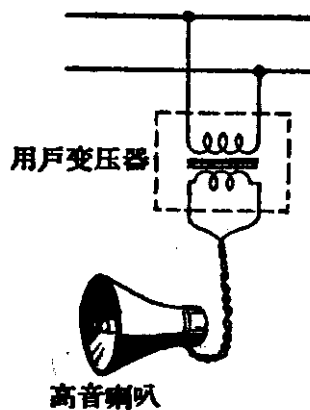


图 6-35

电压为 220 伏特的电源上；(2)全部揚声器所承受的功率必須与扩音机的輸出功率相同；(3)全部揚声器总的阻抗必須与扩音机輸出变压器次級綫圈阻抗相同(否則需加用戶变压器)；(4)先接通灯絲电路,約等一分钟后再开启高压开关；(5)音量应由小到大,不要使揚声器发生嘯叫声；(6)拾音器塞头不要插入送話器的插孔中。

习 題 6·11

1. 画出扩音机的方块示意图。試說明各部分的作用。
2. 装接揚声器时要注意哪几个問題？用戶变压器有什么用途？如果原副綫圈接反,将产生什么后果？
3. 如果要把阻抗为 2.5 欧姆、功率为 2 瓦特的永磁揚声器接到 30 伏特的綫路上,求用戶变压器的变压比应是多少？

§ 6·12 半导体和晶体管

1. 半导体的基本性质 大多数金属的导电性能都是很好的。而琥珀、硬橡胶等物质几乎是不导电的。在自然界中还有许多固态物质,它們的电阻率介乎导体与絕緣体之間,称为半导体。半导体包括的范围很广,象鍍、硒、硅、碲等元素,許多元素的氧化物和一些金属化合物(如氧化亚銅、硫化鉛、銻化銻等),以及大多数矿石,都是半导体。

半导体的原子核和它的外圍电子結合的牢固程度介于导体和絕緣体之間,它本身沒有多少自由电子,但是由于原子的热运动,可以有一部分电子“釋放”出来成为自由电子,因而能在一定程度上起导电的作用。这种导电形式称为半导体的电子导电。由于半导体的原子核对电子的束縛較弱,外界的影响可以显著地改变半导体的导电性质。例如,对半导体加热,可使自由电子数增多,导电性加强,也就是可使它的电阻率减小(和一般导体相反);又如光的刺激也能改变半导体的导电性质。因为半导体有这些独特的电学性质,所以被广泛地应用在許多科学技术部門。

除了电子导电以外, 还有所谓空穴导电, 现在用硅为例, 说明如下. 每一个硅原子的最外层有四个价电子. 在硅的晶体里, 原子排列得很有规则, 每一硅原子都和周围四个硅原子以价键的形式联系着, 每一键由相邻两个原子各出一个电子组成, 如图 6-36 所示. 如果键中有一个电子脱出而成为自由电子时, 键中就有了空位, 邻近键中的电子就可能跳到这个空位上来, 这就相当空位移到邻近的位置去, 所以在外加电场的作用下, 电子移动的方向如果向左, 则空位就向右移动, 这种空位就称作空穴.

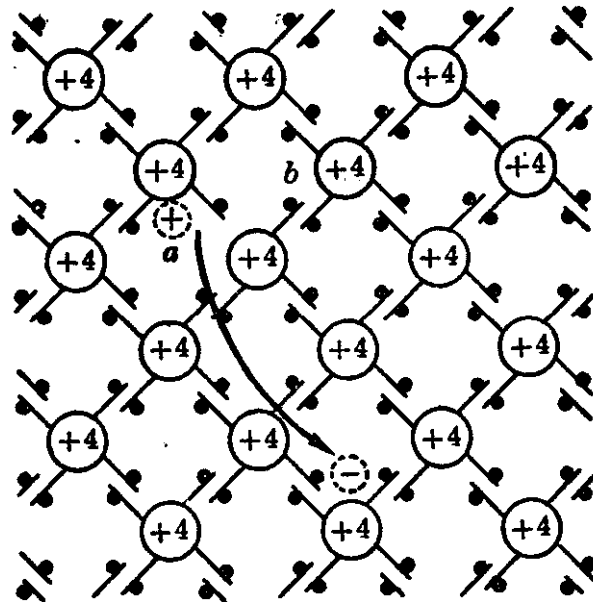


图 6-36 硅晶体点阵

近代的理论研究指出: 在纯净晶体中掺入杂质的办法是增强导电性能的有效措施. 例如: 在硅中掺入极少量的砷, 因为砷的外围有 5 个电子, 当某一个砷原子来代替硅原子时, 它周围的四个电子用来组成价键, 剩余的一个电子则很容易脱离砷原子而成为自由电子, 因此它的导电性就比纯硅好得多. 这样的半导体主要靠电子导电, 故称电子型半导体, 简称 N 型半导体. 反之, 如在硅中掺入少量的铝, 因为铝的外围只有三个电子, 在组成价键时总缺少一个电子, 也就是产生了一个“空穴”. 这样的硅比纯硅更能导电, 它主要是靠空穴导电, 故称为空穴型半导体, 简称 P 型半导体.

2. 晶体管 把 N 型半导体和 P 型半导体适当地结合在一起,就可制成有重大实际意义的装置,晶体管就是利用这样的结合构成的。晶体管有晶体二极管和晶体三极管之分,它们可以象二极电子管和三极电子管一样,具有检波、整流及放大等作用,今分述如下:

晶体二极管——将一块 P 型半导体和一块 N 型半导体紧密地结合在一起,其结合处称为 $P-N$ 结。如图 6·37 所示,左边 P 型半导体中的空穴密度很大,它们就向空穴密度较小的 N 型半导体中扩散。而右边 N 型半导体中的电子就向电子密度较小的 P 型半导体中扩散。结果在交界面附近, P 型半导体中的空穴减少了, N 型半导体中的电子减少了,形成一个叫做阻挡层的区域,它阻止 P 型中的空穴和 N 型中的电子继续向对方扩散。

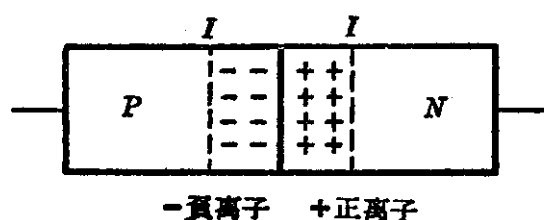


图 6·37

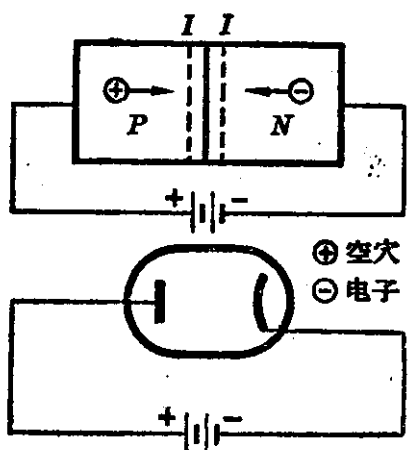


图 6·38

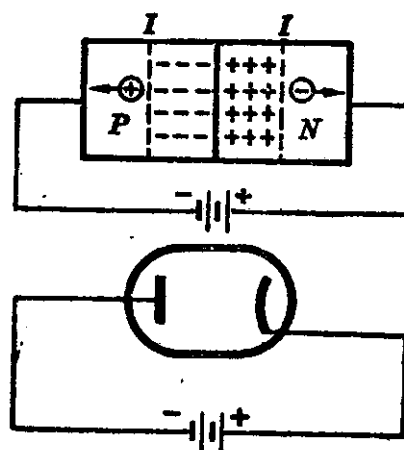


图 6·39

现在在 $P-N$ 结上加一个电压,如图 6·38 所示, P 端接正极, N 端接负极,那么,在电场作用下 P 型半导体中的空穴要向右移动, N 型半导体中电子要向左移动,这时阻挡层的电阻很小,电流很容易流通,就象二极电子管导电时一样。相反,如果在 $P-N$ 结上加一个如图 6·39 所示的电压, N 端接正极, P 端接负极,同理

可知,这时阻擋层变寬,电阻变大,电流难以流通。

利用 $P-N$ 結的单向导电性能,可以做成晶体二极管,它也有檢波和整流的作用。

晶体三极管——如图 6.40 所示,在两层 N 型半导体中間夹一层厚度小于 0.1 毫米的 P 型半导体,构成所謂晶体三极管。左边的一层叫发射极,中間的一层叫基极,右边的一层叫集电极。发射极用 e 表示,它的作用和电子管中阴极相似;基极用 b 表示,它相当于电子管中的栅极,集电极用 c 表示,它相当于电子管中的屏极。給 e 和 b 加一通流方向的电压,这时 $N-P$ 結的阻擋层电阻很小,左边 N 型半导体里的电子很容易进入 P 型半导体。給 c 和 b 加一个相当大的阻流方向的电压,这时阻擋层的电阻很大,右边 N 型半导体里的电子很难进入 P ,而 P 中的电子却很容易进入 N 。因为从左边 N 型半导体进入 P 中的电子,由于 $b-e$ 間电场弱,有 98% 以上的电子靠热运动向前扩散。当它們接近集电极 c 时,在

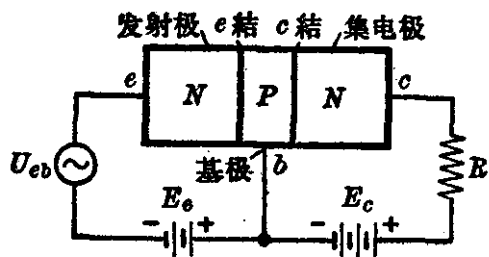


图 6.40

$c-b$ 間强电场的作用下,又被拉入集电极。因此,当发射极电路中的通流方向电压有微小的改变时,直接引起了进入集电极的电子数目的变化,即引起集电极线路中的电流变化,使 R 两端的电压也得到相应的

改变,当 R 的电阻足够大时,两端电压变化就可以比发射极电路中电压改变大好几倍,这就是晶体三极管的电压放大作用。

3. 再生式晶体管收音机 晶体管收音机和电子管收音机一样,如果采用再生式电路,无论灵敏度和选择性都会大大的提高。

晶体管收音机的工作原理如图 6.41 所示,天綫上收集到的各电台的信号,通过电容器 C_1 送到由 C_0L_0 組成的調諧回路,經過調諧回路的选择以后,把所要收听的信号借 L_0L_1 两綫圈間的耦合关系送入晶体二极管进行檢波,檢波器的負載就是晶体三极管的輸

入电阻，这样就可把檢波所得的信号无損耗地交給晶体三极管去放大。

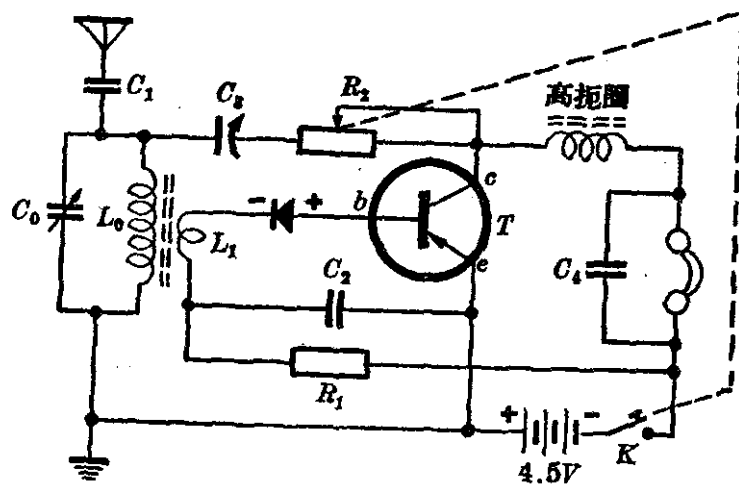


图 6·41 再生式晶体管收音机

一个檢波器在对高频調幅信号进行檢波时，在它的輸出負載上有一个是檢波所得的低頻信号，还有一个是剩余的高頻信号。低頻信号經過晶体三极管的放大以后，从集电极 C 上輸出通过高频扼流圈流入耳机中发声。而高频信号离开集电极 C 以后，由于高频扼流圈的阻碍，不能流入耳机，只好取道 R_2 、 C_3 重新流入調諧回路，这一反饋回来的高頻信号的位相，只要和輸入調諧回路的高頻信号的位相相同，就会进一步加强調諧回路中的高频信号，加强以后的信号再送去檢波和放大，这就是再生式收音机的特点。再生式晶体管收音机除用晶体管代替电子管以外，其他的作用原理和再生式电子管收音机相同。

4. 晶体管的优点及其应用 自从 1948 年晶体管誕生以后，在很多方面晶体管不但已經代替了电子管的工作，而且引起了电子学中根本性的技术革命，晶体管之所以如此迅速地被广泛应用，并且有着广闊的发展前途，那是由于晶体管有很多的优点：

体积小——一个晶体管連外壳在內，其大小也不超过一厘米，而电子管却要比一厘米长好几倍；

耗电少——晶体管不需要加热灯絲，因此就省去了灯絲电源，同时晶体管經常在低电压情况下工作，工作时只需要消耗极少的

电功率；

重量輕——晶体管不仅本身的重量輕，而且因为它不需要灯絲电源，因而从装成成套的仪器来比較，更显出其輕便的优点来；

結構牢固——晶体管能耐受强烈的振动；

寿命长——晶体管使用的時間一般为7万小时，而电子管平均使用時間只有几千小时。

因为晶体管有上述几个优点，所以用晶体管制造的各种仪器在国防和自动控制上有其特殊的用途。象电子计算机上用晶体管代替电子管，就可大大节约电源，缩小体积，增长寿命，使电子计算机可能向超小型化与高速化发展。为了減輕人造卫星，导弹以及其他星际航行仪器的控制设备的重量，减小其体积，增加其耐震程度，增加其寿命，其中无线电控制设备的晶体管化，将是一个重要的解决途径。

习 題 6·12

1. 什么是空穴型半导体？什么是电子型半导体？
2. 晶体二极管是怎样进行檢波和整流作用的？
3. 为什么晶体三极管具有放大作用？
4. 画出再生式晶体管收音机的电路图。
5. 試述晶体管有哪些优点？

§ 6·13 电子射綫管

电子射綫管是重要的电子仪器之一。如图 6·42 所示，电子射綫管是一个一端扩大的玻璃灯泡，灯泡内抽成高度真空， K 为热阴极， B 为带負电荷的圓筒， A 为圓筒状阳极， C_1 为一对豎直平行板， C_2 为一对水平的平行板， P 为荧光屏。

从热阴极 K 发射的热电子，因受圓筒 B 上負电荷的推斥作用和受阴阳两极間的电場作用，形成一束速度很大的电子束，沿着圓筒的軸綫穿过筒状阳极，直射到荧光屏 P 上，使荧光屏发光，出現

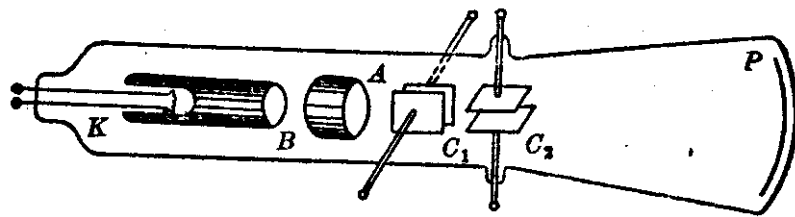


图 6·42 电子射线管

一个光点，如图 6·43(a) 所示。如果在 C_1 平行板间加上电压，产生一个水平方向的电场，那么当电子束通过时，电子要受到水平方向电场力作用，使荧光屏上出现光点的位置改变。如果加上的电压是迅速交变的，那么荧光屏上出现的光点将在水平方向迅速移动，形成一条水平的直线形的亮条，如图 6·43(b) 所示。如果在 C_2 平行板间再加上一个电压，那么荧光屏上的光点将同时有竖直方向的移动，如图 6·43(c) 所示。因此，我们可以从荧光屏上光点运动的情况来研究加在 C_1 或 C_2 平行板上迅速变化的电压，也可以控制 C_1 平行板和 C_2 平行板上的电压，使光点在荧光屏上描绘出我们所需要的图形来。在雷达、电视及示波器中，很多方面都要应用电子射线管的原理。

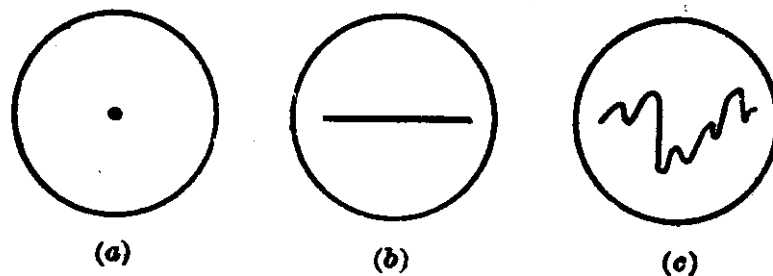


图 6·43

§ 6·14 无线电技术的广泛应用

无线电的应用，除了无线电报、无线电电话和广播以外，在近二十几年来，又有了很大的发展。它可以用来定位、传送形象，也可以用来进行高速运算及远距离操纵等，现在扼要地叙述如下：

1. 雷达 雷达是利用无线电波测量物体的位置与距离的一种无线电装置。

我們知道，任何一种波，在傳播过程中遇到障碍物的时候，就会发生反射。雷达就是利用这个道理来工作的。观测者用超短波发送机和定向天綫，向某个方向发出一束波长很短的电磁波，当它遇到障碍物时，反射回来的反射波，被接收下来。根据从开始发射

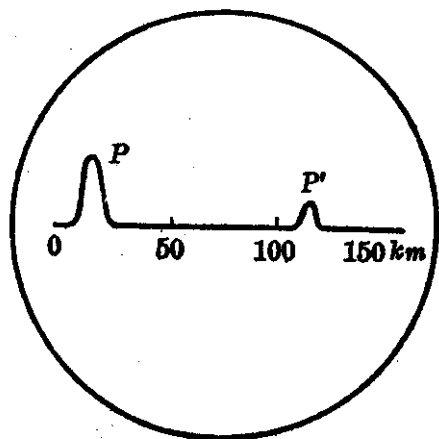


图 6·44 示波器荧光屏

到接收到反射波的时间間隔和反射波的方向，就可測出障碍物的位置和距观测者的距离。当发送机在很短的时间內（如一微秒），发射出一束电磁波时，同时有一小部分送到示波器中去，在荧光屏上出現一个发射波的信号，如图 6·44 中 P 所示。发送机停止工作后，在較长的停歇时间內（如一千微

秒），一部分反射波回到发送处，被接收机接收下来，在荧光屏上出現一个反射波信号，如图 6·44 中 P' 所示。从发射开始到接收到反射波的时间，根据 $2s = vt$ ，就可算出目标和观测者的距离 s 。这里 v 是电磁波傳播速度， t 为由发射到接收反射波的时间。由于距离 s 与时间 t 成正比，故在荧光屏上可直接标出距离来。这时定向天綫所对的方向，就是障碍物的方向。

雷达除了在軍事上用来偵察敌方目标外，还可以利用它指揮飞机或舰船的盲目航行。在气象观测上也可以利用雷达来追踪雷雨或风暴的活动。

2. 电视 电视是利用无綫电波把远处的运动物体的象，送到我們面前的一种装置。

电视的工作过程就是把光学图象变成电信号，通过一定的装置，把它以电磁波形式发送出去，接收机接收后，再把它轉換成原来的光学图象。要把光能轉換成电的信号，需用一个光电管。光电管是一个抽去空气的玻璃泡，如图 6·45 所示。泡內一部分內壁鍍着某种碱金属 K 作为阴极，接在电源的負极上；在泡的中央，另

有一个金属环 A 作为阳极，接在电源的正极上。在光线的照射下，碱金属放射出电子，叫做光电子。放出的光电子数目与照射光的强弱成正比，利用这一光电效应，就能够把光的强弱转变成为与它成正比的电信号。把电信号用电子管放大，并且把它调幅在高频振荡电流里，就能发射出一种按照光的强弱变化的调幅电磁波。

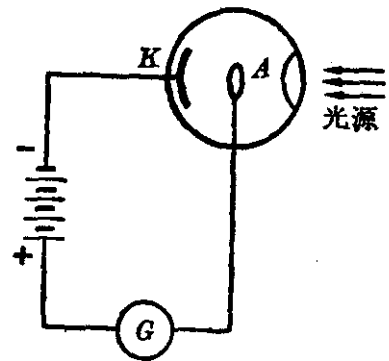


图 6·45 光电管示意图

不论是一张照片还是书刊、杂志上的插图，如果放在显微镜下面，我们就观察到照片或插图都是由许多黑点和白点的微粒组成的。黑暗部分黑点大而密；明亮部分的黑点稀而少。只要这些点子足够细，在观察者的眼里就仿佛联成了一幅整体的图象。在实际工作中，电视是先把图象分成许多极细小的部分，并让各部分的反射光线依次射进光电管，然后转变成和明暗相适应的电流。由于照片上各点的亮度不同，反射光线的强度也不同，这样依次照射，就在光电管里形成一种跟着时间，按照各点亮度变化的电流。这种电流的变化是很快的，它可以发放出与电流变化相适应的电磁波。

在接收方面，也要经过放大和检波，从高频电振荡里，检出电视信号，然后把电视信号送给电视显象管。电视显象管是一种电子射线管，在它阴极前面有一个栅极，接收到的电视信号就加在这个栅极上，利用它来使电子束中的电子数量和速度随电视信号而改变。电子束中的电子数目越多、速度越大，它在荧光屏上引起的亮点就越亮。这样，随电视信号而改变的电子束在荧光屏上扫过时，荧光屏上各点的亮度就跟光电管阴极上各点所受到的光的照度一一对应。

电视机里电子束扫过的速度非常快，一秒钟内要把整个荧光屏扫过几十次，由于人眼有“视觉暂留”的特点，这样我们就看到了

图象的連續变化和整个的图象。

电视不仅应用在文化生活方面，如播送戏剧、体育表演等，而且也应用在生产、科学研究和教育等方面。目前，我国不仅在北京、上海等地建立了电视台，而且已经生产了电视广播设备、电视接收机和工业电视设备等。

习 题 6·14

1. 画出电子射线管的构造示意图，并说明各部分的作用。
2. 说明雷达测量物体的位置和距离的作用原理。
3. 光电管是怎样产生光电子的？
4. 说明电视的基本原理。
5. 雷达所发的电磁波，它的频率为 3×10^6 千赫兹，问它的波长是多少？

本章提要

1. 电磁振荡

振荡电流 作周期性变化的电流。

振荡电路 能够产生振荡电流的电路。由一个电容器和一个自感线圈可以组成一个振荡电路。

电磁振荡 振荡电路中有振荡电流发生时，电容器的电场和线圈的磁场都同时发生周期性的变化。这种同时存在的电场和磁场的周期性变化叫做电磁振荡。

振荡电流的周期和频率 设 L 表示线圈的自感系数， C 为电容器的电容，则振荡电流的周期 T 为

$$T = 2\pi \sqrt{LC}.$$

振荡电流的频率 f 为

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}},$$

式中 L 的单位为亨利， C 的单位为法拉， T 的单位为秒， f 的单位为赫兹。

2. 电磁波 电磁场理论指出：任何变化的电场都要在它周围空间产生变化的磁场；任何变化的磁场都要在它周围空间产生变化的电场。

電場和磁場是一種統一的客觀物質——電磁場——的兩個方面。

交替變化的電場和磁場，由近及遠地在空間傳播，就形成電磁波。

發送電磁波的過程就是振盪電路輻射能量的過程。開放的振盪電路，特別是高頻率振盪電路，不斷地向周圍空間輻射能量。在無線電技術上，常用一個開放的振盪電路感應耦合一個閉合的振盪電路來發送電磁波。

電磁波在真空中的傳播速度 $c = 3 \times 10^{10}$ 厘米/秒。

波速 c 、波長 λ 和頻率 f 三者的關係：

$$c = \lambda f \quad \text{或} \quad c = \frac{\lambda}{T}$$

3. 無線電發送和接收

電磁波的發送 電磁波由發送機發送。發送機的基本組成部分有：振盪器、調制器、放大器和發送器。在振盪器中產生頻率很高的等幅振盪；在調制器中等幅的電磁振盪被變成振幅依信號而改變的調幅高頻振盪，經過調幅以後的電磁波叫做調幅波；信號在調幅前后可用放大器加以放大；最後把電磁振盪經天地綫組成的發送器發送出去。

電諧振和調諧 電諧振是電學中的共振現象。當一個振盪電路的固有頻率跟作用在電路上的電磁波頻率相同的時候，電路裏會引起電諧振。電諧振時產生的感生電流的幅度最大。調諧是調整振盪電路，使它跟某一個外來的電磁波發生諧振的作用。

無線電的接收 電磁波常用無線電接收機接收。無線電接收機的基本組成部分有：接收器、調諧器、檢波器和放大器。在接收時，首先由用天地綫組成的接收器把無線電波接收下來；經調諧器調諧，把所需要的電磁波獲得諧振；然後再把諧振以後的振盪電流通過檢波器檢波，把低頻電流“檢”出來；在檢波前后可用放大器把接收的信號加以放大；最後把低頻電流對揚聲器或聽筒作用，使振動膜按所接收的信號的規律作機械振動。

二極電子管的構造和工作原理 二極電子管有兩個極（陰極和屏極），這兩個極封閉在高度真空的玻璃泡裏。當電流通過陰極時，金屬熾熱，就有大量電子脫出，在陰極附近形成電子雲。如果再在電子管兩極加上變電壓，那麼在電子管的屏極電勢比陰極電勢高的半週期內，屏極帶正電，從陰極脫出來的電子被屏極吸引，飛向屏極，於是在電子管內和屏極電路內就有電流通過。在屏極電勢比陰極電勢低的半週期內，屏極帶負電，推斥電子，屏極電路中就沒有電流。所以在電子管的兩極上加的雖然是交變電壓，但流通的只是單向電流。這種性質稱為二極電子管的單向導電性。

電子管整流器是一種常用的整流器，它能把交流電變成直流電。電子管

整流器的連接綫路參看前面圖 6·19 及圖 6·21 所示。

三極電子管的構造和工作原理 三極管除了具有陰極和屏極外，還有柵極。由於陰極和屏極之間有了柵極，飛向屏極的電子不僅受屏極電勢的影響，還要受到柵極電勢的影響。因為柵極靠近陰極，柵極電勢對電子影響較屏極來得大，因此柵極電勢的微弱變化，就可以使屏流發生很大的改變，這就是三極管具有放大作用的原因。

三極電子管能起檢波、放大和振蕩作用。其綫路連接法參看前面圖 6·27 及圖 6·28。

有綫廣播是我國近年來新興的事業，讀者應注意了解擴音機的性能和維護。

揚聲器是有綫廣播中的主要元件之一，裝接時必須注意揚聲器的阻抗、綫路的電壓和揚聲器的功率。

揚聲器通常採用並聯的方法連接。阻抗不適合時，需要用用戶變壓器來提高綫路的傳輸效率。

4. 半導體及晶體管

半導體的基本性質 電阻率介乎導體與絕緣體之間的物體叫做半導體。鎢、硒、硅、碲等元素，許多元素的氧化物和一些金屬化合物等都屬於半導體。

電子型半導體是利用摻入雜質的辦法來增強導電性能，它主要靠電子導電，簡稱 *N* 型半導體。

空穴型半導體是在晶體中摻入雜質以使組成價鍵時總缺少一個電子，即產生一個空穴，主要就靠這些空穴來導電，簡稱 *P* 型半導體。

利用 *P-N* 結的單向導電性能，可以做成晶體二極管，它有檢波和整流的作用。

晶體三極管有發射極、基極和集電極三個極。當發射極電路中的通流電壓（信號電壓）有微小改變時，引起集電極電路中的電壓相應改變，並且比發射極電壓大好幾倍，這樣就形成晶體三極管的放大作用。

再生式晶體管收音機的綫路參看圖 6·41 所示。

晶體管有體積小、耗電少、重量輕、結構牢固及壽命長等優點。

5. 電子射綫管 電子射綫管的構造可參看圖 6·42 所示，觀察熒光屏上光點運動情況，可以研究偏轉板上迅速變化的電壓；也可以控制電壓，使光點在熒光屏上描繪出我們所需要的圖形。電子射綫管是一種重要的電子學儀器。

6. 无綫电技术的应用

雷达 是利用无綫电波测量物体的位置与距离的一种无綫电装置。

雷达是用超短波发送机和定向天綫，根据电磁波在傳播过程中，遇到障碍物发生反射的道理来工作的。

电视 是利用无綫电波把远处的运动物体的象，送到我們面前的一种装置。它是把光学图象变成电信号，通过一定的装置，把它以电磁波形式发送出去，經接收机接收后，再把它轉換成原来的光学图象。

复 习 題 六

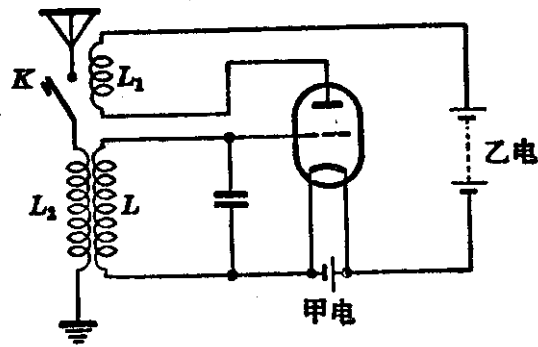
1. 說明振蕩电路中电磁振蕩的过程。
2. 如果振蕩电路中綫圈的自感系数是 0.0025 毫亨利，要发出 30 米长的电磁波，問它的电容器的电容应该是多大？
3. 发送的电磁波为什么要进行調幅？
4. 收音机可变电容器的最大电容是 360 微微法拉，要想使它能收到频率为 840 千赫茲和 1320 千赫茲的电台，問至少应采用自感系数为多大的綫圈和它組成調諧电路？
5. 試画出半波整流和全波整流的綫路图，并說明其作用原理。
6. 三极电子管包括哪几个主要組成部分？并說明栅极是怎样控制屏极电路中的电流的。
7. 三极电子管为什么有放大信号电压的作用？它放大的能源从哪里来的？
8. 有波长为 25 米、229 米、303 米的电磁波，在下列三种情况下，問各是哪一种波长的电磁波可在一架收音机的調諧电路中激起最强的感生电流？为什么？

- (1) 把調諧电路的频率調到 1310 千周处。
- (2) 随后把調諧电路的可变电容器的动片旋轉入某一角度。
- (3) 再把綫圈圈数减少若干圈。

[提示：根据 $\lambda \cdot f = c$ 和 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 两式考虑.]

9. 某电台的振蕩电路中綫圈的自感系数为 0.09 亨利，电容器的电容为 0.0025 微法拉；在收音机的振蕩电路中，已知綫圈的自感系数为 0.75 亨利，問把可变电容器調节到多大电容时，接收这一电磁波所激起的感生电流最强？

10. 附图是无綫电发报机的示意图。試說明它的工作原理。



(第 10 題)

11. 既然檢波时要把訊号电流从振蕩电流中“檢”出来,那么何必在发送时要把訊号加到振蕩电流中去,这是不是多此一举?
12. 說明揚声器各主要部分的名称,并說明它的作用原理。
13. 有綫广播中的扩音器,使用时应注意哪些問題?
14. 說明晶体二极管的檢波作用。晶体三极管的放大作用。

总复习题

1. 把丝绸摩擦过的玻璃棒靠近(不接触)金箔验电器,并使棒与验电器的相对位置不变。(1)这时金箔为什么张开?金箔带什么电?(2)若用手指接触金属球,金箔又为什么会下落?(3)这时让手指离开,金箔为什么仍然是下垂的?(4)把带电的玻璃棒拿走,为什么金箔又会张开?这时金箔上带的是什么电?

2. 两点电荷 q_1 、 q_2 的电量分别是 ± 200 静电系单位,相距 40 厘米,把 $q_3 = 5$ 静电系单位电量的点电荷放在 q_1 、 q_2 连线中点上,求 q_3 所受到的作用力。

3. 大小相同的两个小球体,一个带 20 静电系单位正电荷,另一个带 4 静电系单位负电荷,当相距 4 厘米时,它们之间的相互作用力是多大?若将两球接触后放回原处,作用力又该是多大?

4. 在真空中有二个电量分别为 ± 200 静电系单位电量的点电荷,它们相距 16 厘米,求离这两点电荷的距离都等于 10 厘米处的电场强度。

5. 在边长为 10 厘米的正方形的顶点上各置一 100 静电系单位的自由负电荷,在两对角线的交点上,应该放置多大的正电荷 q 才能使各个电荷都能处于平衡状态?

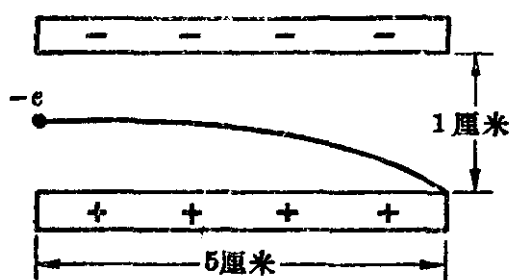
6. 有一个绝缘的不带电的空心导体球。如在球的内部放一个带正电的小球,试问:(1)在什么地方有电场存在?(2)球面上有电荷出现吗?(3)小球在空心球内部移动时,球内的电场是否发生改变?(4)小球不动,如果把另一个带电体移近空心球,那么空心球内的电场是否改变?

7. C 是两个点电荷 q_1 和 q_2 连线的中点,试指出在下述各种情形中, C 点的电场强度大小的次序:(1) q_1 和 q_2 是等量的正电荷;(2) q_1 和 q_2 是等量的负电荷;(3) q_1 和 q_2 是等量的异种电荷;(4)移去 q_2 ,只剩 q_1 。

8. 电场中 A 点的电势是 60 伏特,将 $+120$ 静电系单位电量的电荷从 A 移至另一点 B 时,电场力作了 10 尔格的功,求 B 点的电势。

9. 如附图所示一个电子在 5000 伏特电压的作用下,得到某一速度,然后飞入两块平行金属板中央。若板长为 5 厘米,两板间的距离为 1 厘米,问

至少要在两板間加上多大的电压才能使电子不再飞出平行金属板?



(第9題)

[提示: 电子的动能是由于电场力做功而来, 电子在匀强电场中的运动是一个类似力学中的平抛运动.]

10. 当电荷达到平衡时, 导体内部的电场强度为零, 而电势却不为零, 这两者間是不是有矛盾? 为什么?

11. 电容器两板間的电势差为 50

伏特, 已知它的电容为 25 微法拉. 求这个电容器所带的电量为多少靜庫?

12. 試說明当两个大小不同的球形导体所带的电量不相等时, 它們的电势可能相等; 而它們的电势不相等时, 所带的电量却可能是相等的道理. 有人說: “把两个带电导体相連后, 它們所带的总电量一定平分.” 这句话是否正确? 为什么?

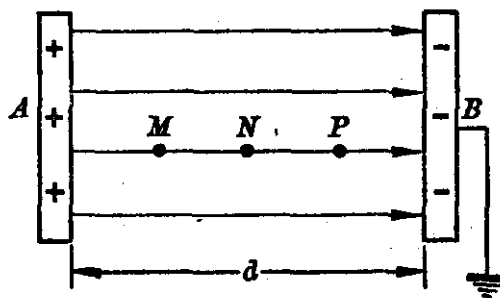
13. 两个大小相等的金属球, 一个是空心的, 一个是实心的. 当它們带有等量同种电荷时, 它們的电势是否相等? 如果用导綫把它們連接起来, 有沒有电荷从一个球移向另一个球?

14. 将两个带有相等电量, 电容分别是 1 微法拉和 4 微法拉的电容器并联起来, 其电势差为 100 伏特. 求 (1) 并联以前每个电容器的电量; (2) 并联以后每个电容器的电量.

15. 氫原子核外电子第一条軌道半徑为 0.5×10^{-8} 厘米, 原子核的电量为 4.8×10^{-10} 靜电系单位电量, 求 (1) 軌道上各点的电场强度? (2) 1 庫侖电荷所形成的电场中, 什么位置的电场强度和这一电场强度相等? (3) 一个电子在軌道上所受的作用力是多大?

16. 一个絕緣导体不带电时, 它的电势多大? 如果把它和带正电的物体接近时, 它的电势有无变化? 为什么?

17. 如右图所示, 已知: 平行板电容器两板間的距离 $d=4$ 毫米; 充电后两板电势差 $V=120$ 伏特; 平行板电容器的电容 $C=3$ 微法拉; B 板接地; A 板至 M 点、 MN 、 NP 和 P 点至 B 板均为 1 毫米. 求 (1) 每一板所带电量是

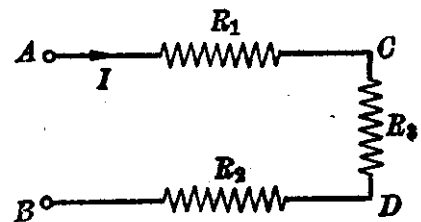


(第17題)

多少? (2) B 板电势为多大? (3) A 板电势为多大? (4) M 点电势为多大? (5) N 点电势为多大? (6) P 点电势为多大? (7) 一个电子处在 M 点时电势

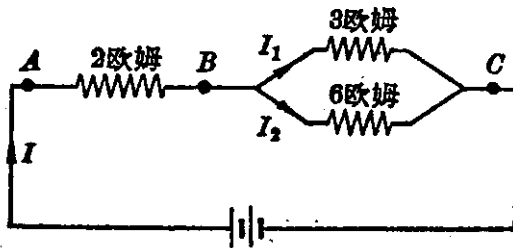
能有多大? (8)一个电子在 B 板时电势能有多大? (9)一个电子由 B 板出发到达 A 板时所获得的动能有多大? (10)一个电子由 B 板到达 A 板时电场力作了多大的功? (11)两板间的电场强度是多大?

18. 如附图所示, $R_1=R_2=2$ 欧姆, $I=1.5$ 安培, $R_3=3$ 欧姆. 如果保持 AB 间的电压不变, 在 CD 上再并联一个电阻为 6 欧姆的 R_4 , 求通过 R_4 的电流强度.



(第 18 题)

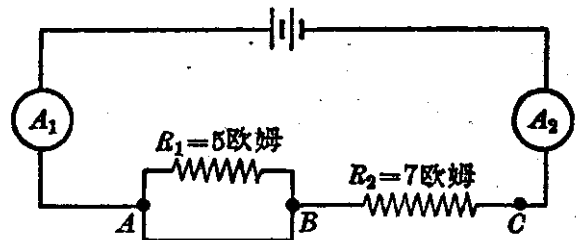
19. 并联着 10 盏电阻各 90 欧姆的电灯, 用两条各长 200 米、横截面积为 7 毫米²的铜导线把它们连到 200 伏特的线路上去. (1) 求加在电灯上的电压; (2) 如果熄去其中 5 盏电灯, 电灯上的电压将是多少?



(第 20 题)

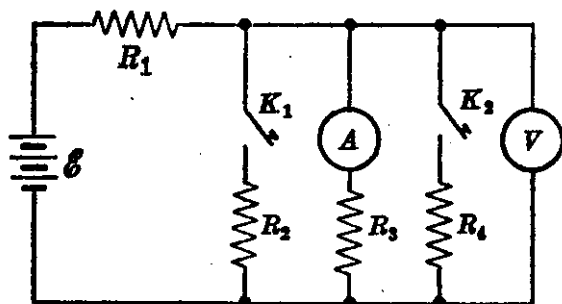
20. 已知每个电池的电动势 $\mathcal{E}=2$ 伏特, 每个电池的内电阻 $r=0.5$ 欧姆, 外电阻如附图所示, 试求通过各电阻的电流强度和每一电阻两端的电压.

21. 已知安培计 A_1 的示数为 0.5 安培, $R_1=5$ 欧姆, $R_2=7$ 欧姆, 如附图所示. 试求: (1) 通过安培计 A_2 的电流强度; (2) AB 两点间的电压; (3) BC 两点间的电压; (4) 通过 R_1 的电流强度.



(第 21 题)

22. 试根据下列的要求画出一张电路图来: (1) 一个电源向两盏并联着的电灯供电; (2) 每盏电灯各有一个开关; (3) 有一个总开关; (4) 用一变阻器控制其中一盏电灯的电流; (5) 有一个安培计来量度通过两盏电灯的总电流; (6) 有一个伏特计来量电源的路端电压.



(第 23 题)

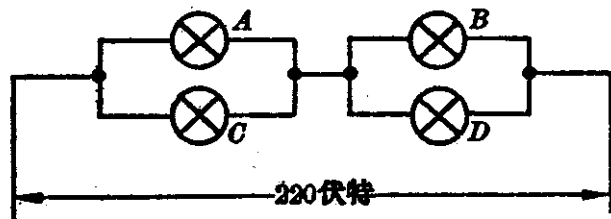
23. 如附图所示, 三个蓄电池串联成的电池组, 每个电池的电动势 $\mathcal{E}=2$ 伏特, 内电阻 $r=0.2$ 欧姆; $R_2=3$ 欧姆; $R_4=6$ 欧姆. (1) 当 K_1 、 K_2 断路时, 安培计的读数是 1.5 安培, 伏特计的读数是 3 伏特, 问 R_1 和 R_3 各为多大? (2) 当 K_1 关闭时, 安培

計和伏特計的讀數各為多少？(3)當 K_1 和 K_2 都關閉時，安培計和伏特計的讀數又各是多少？

24. 為什麼一般電路里的電燈都是並聯的？如果把電燈串聯起來，將會發生什麼現象？

25. 有並聯着的電燈 20 盞，燈泡都是 220 伏特、40 瓦特。求每盞電燈的電阻和通過它的電流？如果每天使用 3 小時，問每月共用去多少度電？(每月以 30 天計算)

26. 把 4 盞 110 伏特、40 瓦特的電燈如附圖所示線路連接，線路的電壓



(第 26 題)

是 220 伏特，求(1)這 4 盞燈能否正常發光？(2)如果其中一盞電燈的燈絲中斷，其他三只燈將發生什麼現象？

27. 把一只 2.5 伏特、1.5 瓦特的小電珠接到由兩個干電池串聯起來的電池組上去，已知每只干電池的電動勢是 1.5 伏特，內電阻是 2 歐姆，問小電珠能不能正常發光？

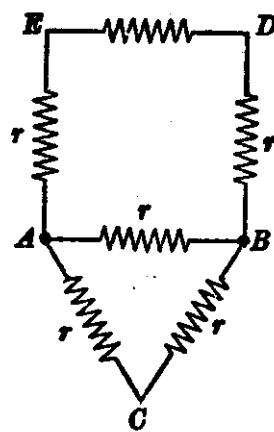
28. 由三只相同的電池串聯而成的電池組，當外電阻是 2.5 歐姆時，產生 1.65 安培的電流；當外電阻是 3.5 歐姆時，產生 1.32 安培的電流。求每個電池的電動勢和內電阻。

29. 由兩個串聯導體組成的一段電路，該電路兩端的電壓是 60 伏特，已知其中一個導體的電阻是 5 歐姆，它的兩端電壓為 25 伏特，試求另一個導體的電阻。

30. 將電動勢為 2 伏特的電池和另一個電動勢較小的電池依反方向串聯(即同極相連接)，再和一個 25 歐姆的外電阻接成閉合電路，要使這時的電流強度和用該兩電池順序串聯、並與一個 175 歐姆電阻相連的電路上電流強度相同，試求(1)另一電池的電動勢；(2)兩種情況下的電流強度均為幾安培？(電池內電阻不計)

31. 長 50 米，直徑 4 毫米的某金屬導線，它的電阻是 0.07 歐姆，求用同一金屬製成橫截面積為 4 毫米²、長 300 米的導線電阻是多少？

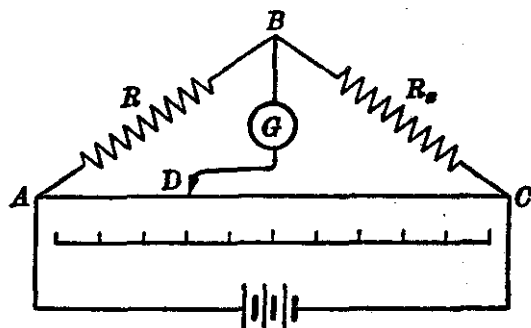
32. 求如附圖所示的線路上 AB 兩點間的總電阻。



(第 32 題)

33. 一台 5 匹馬力的电动机，接在 220 伏特的輸电綫上，当它在滿負載的情况下，須流过 21 安培的电流，試求这台电动机的效率。

34. 要較精确地測定电阻的阻值，常用如附图所示的裝置来作。图中 R 是已知电阻， R_x 是欲测电阻， ADC 是一条均匀的电阻綫， G 是灵敏电流計。測定时先把电路接通，然后在 ADC 电阻綫上移动滑动接头 D ，直到灵敏电流計中无电流通过时为止。从附設的米尺上讀出 AD 和 DC 的长度，再根据 R 、 l_{AD} 、 l_{DC} 算出电阻 R_x 的值。以上的裝置叫做滑綫电桥。



(第 34 題)

如果測定时得出的数据是 $R=6$ 欧姆， $l_{AD}=30$ 厘米， $l_{DC}=70$ 厘米，試計算电阻 R_x 的值。

[提示： G 中无电流通过，表明 B 点和 D 点的电势相等；則通过 R 和 R_x 的电流强度相等；通过 AD 和 DC 的电流强度也相等；由此可得： $R_x=R \cdot \frac{l_{DC}}{l_{AD}}$ 。]

35. 可以把 110 伏特、40 瓦特的灯泡接在 220 伏特的电路上嗎？将会有什么后果，为什么？如果把二只这样的灯泡并联起来使用可以嗎？如果把它們串联起来使用可以嗎？为什么？

36. 灯泡的額定电压为 V ，額定电功率为 N ，灯泡的电阻可按 $R=\frac{V^2}{N}$ 計算。如果实际电压 V' 比 V 小，問实际电功率 N' 将按什么关系变化？这时求灯泡的电阻还能按 $R=\frac{V^2}{N}$ 来計算嗎？

37. 两电解池串联着，一电解池在鍍銀，一电解池在电解水。在某一段時間內，析出的銀是 2.697 克，問析出的氧气應該是多少克？在压强是 75 厘米高水銀柱、温度是 27°C 时，氧气的体积是多少立方厘米？（銀的原子量为 107.88）

38. 有人說：根据焦耳-楞次定律的公式 $Q=0.24I^2Rt$ ，可知电阻所产生的热量跟它本身的电阻成正比。但焦耳-楞次定律也可写成 $Q=0.24\frac{V^2}{R}t$ ，这时产生的热量跟电阻成反比。这两个結論似乎有矛盾，你认为怎样？試說明理由。

39. 将一电阻絲埋入 -8°C 的碎冰中，这个电阻絲和电动势为 12 伏特、內电阻为 0.6 欧姆的电源相連。通电后历 7 分钟，冰完全溶解，如果在电源

两端所接的伏特計示数为 10.8 伏特, 冰的比热为 0.5 卡/克·度, 热损失忽略不計, 試求出冰原来的质量。

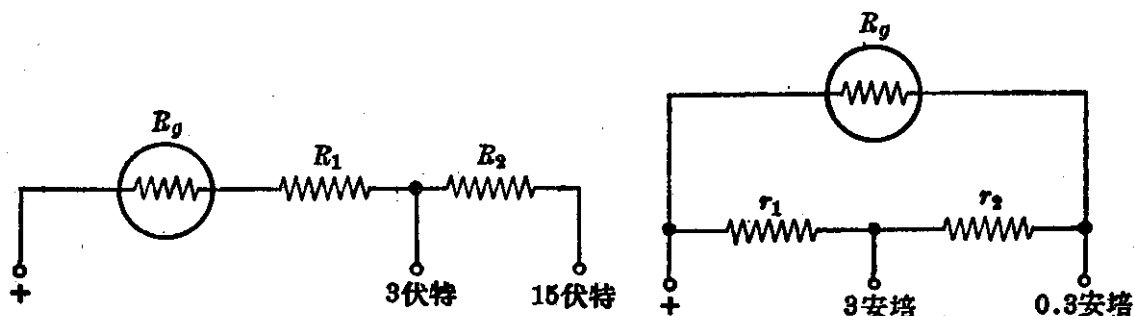
40. 用 2 安培的电流去电解水, 在 3 小时內有多少克水被电解? [提示: 先求出在 3 小时內析出氫气或氧气的质量, 然后根据水的組成的比值去求.]

41. 已知銅的原子量 $A=63.6$, 化合价 $n=2$, 今欲在 CuSO_4 溶液中电解出銅 318 克, 問(1)需要多少电量? (2)倘若需在一昼夜析出, 电流强度应该是多大? (3)有多少銅离子跑到极板上去? (4)求出銅的电化当量 K . (5)在 220 伏特的电压下, 需要多少电能?

42. 只有一根鋼針, 你怎样辨別它是否具有磁性? (习题 3·1(3) 方法除外)

43. 一个电流計, 它的电阻为 18 欧姆, 指針每偏轉一度指示 3 毫安培. 現在把它改装成安培計, 使它的指針每偏轉一度指示 1 安培, 試問, 分路电阻应是多少欧姆? 如果改成伏特計, 使它的指針每偏轉一度指示 1 伏特, 那么, 应串联一个多大的电阻?

44. 附图所示的是有两个量度范围的伏特計內部接綫情况, 已知 $R_g=12$ 欧姆, 最大許可电流为 3 毫安培, 求 R_1 和 R_2 的电阻值。



(第 44 題)

(第 45 題)

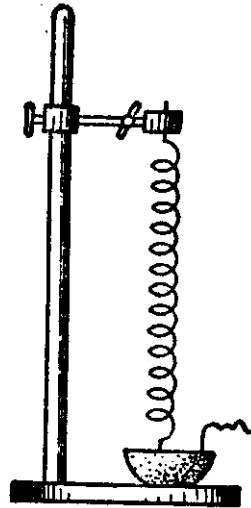
45. 附图所示的是有两个量度范围的安培計內部接綫情况, 已知 $R_g=12$ 欧姆, 最大許可电流为 3 毫安培, 求 r_1 和 r_2 的电阻值。

46. 試証明在真空中距离点磁极 (磁极强度为 m) 为 r 处的磁場强度为 $H = \frac{m}{r^2}$.

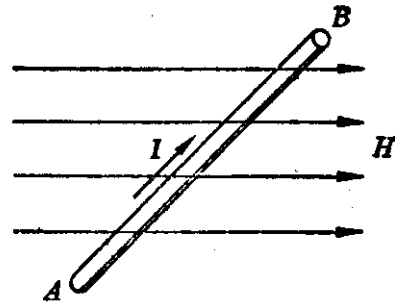
47. 將彈簧的一端固定在支架的夾子上, 下端稍稍浸入水銀中, 如附图所示. 問当通电时, 彈簧將发生什么現象? 为什么? 如果彈簧中加一軟鉄心, 又將怎样?

48. 磁場和电流方向如附图所示, 求通电导綫 AB 所受作用力的方向。

49. 勻强磁場的磁場强度为 400 奧斯特, 在两条水平放置的粗銅导綫上有一根质量为 5 克的銅导綫 AB (如附图所示), 通电后銅导綫开始运动. 已

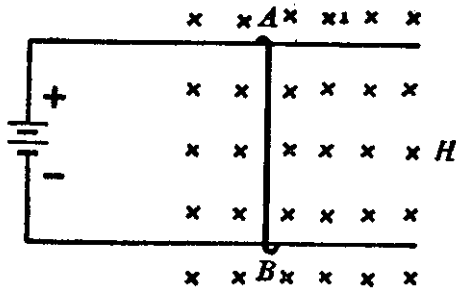


(第 47 題)

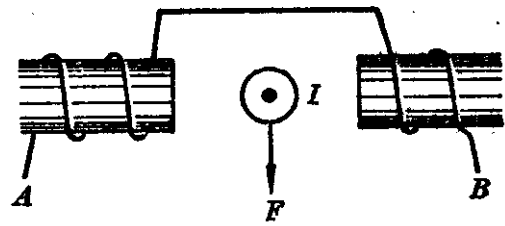


(第 48 題)

知粗銅導線間的距離是 10 厘米，如果通入的電流強度為 2.5 安培，求銅導線運動的加速度大小和方向。



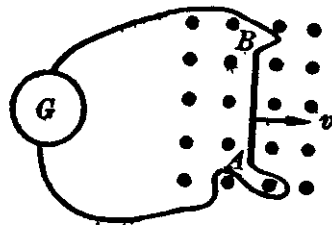
(第 49 題)



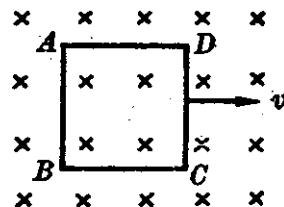
(第 50 題)

50. 已知在電磁鐵磁極間的通電導線所受到作用力方向如圖所示，求電磁鐵激磁電流的方向。

51. 如附圖所示，問導線 AB 和線圈 $ABCD$ 上有無感生電流產生？為什麼？



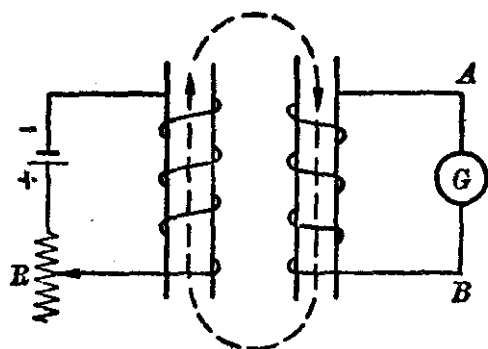
(a)



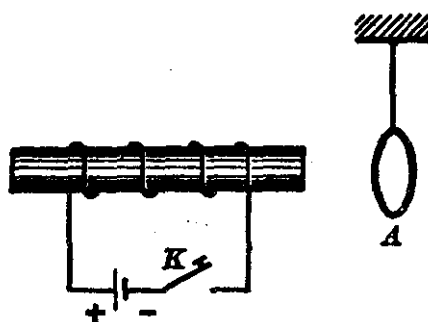
(b)

(第 51 題)

52. 有兩個螺線管線圈，左右放置如附圖所示，問當 R 變化時，電流計 G 中有無感生電流通過？為什麼？



(第 52 題)



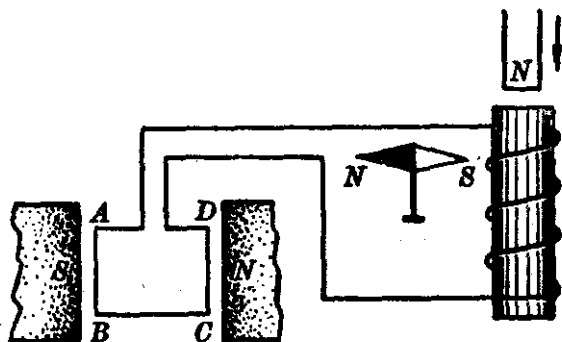
(第 54 題)

53. 一个面积为 240 平方厘米的线圈, 在强度为 400 奥斯特的匀强磁场里匀速转动. 在 0.15 秒内从线圈平面跟磁力线平行的位置转到线圈平面跟磁力线垂直的位置. 求在这个过程中平均感生电动势的大小?

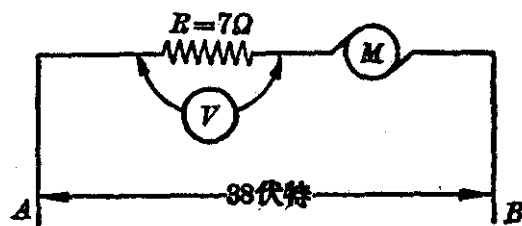
54. 如附图所示, 在电磁铁的右旁用丝线挂一个又轻又小的闭合金属环 A, 问当把电键接通时, A 环将有什么现象发生? 为什么?

55. 两个形状、大小、匝数完全相同的线圈, 一个中间有铁心, 另一个有铜心. 问哪个线圈的自感系数大? 为什么?

56. 如附图所示, 当磁铁 N 极插入螺线管时, 问(1)小磁针 N 极将怎样旋转? (2)矩形线圈 ABCD 将怎样运动?



(第 56 題)



(第 58 題)

57. 一台直流电动机, 电枢线圈电阻是 1.1 欧姆, 现在把它接到电压是 220 伏特的电路中去, 这时电动机的效率是 90%, 求电动机的输入功率.

58. 如附图所示, M 为一直流电动机, 它的电枢电阻 $r=2$ 欧姆; 跟电动机串联的电阻 $R=7$ 欧姆, 当 AB 两端电压为 38 伏特时, 电动机正在转动, 伏特计的读数为 14 伏特, 求(1)通过电动机的电流强度; (2)输入电动机的电功率; (3)转变为机械能的电功率; (4)这时电动机的效率.

59. 一台电动势为 235 伏特, 内电阻为 1.6 欧姆的直流发电机, 以 25 毫米²的铜导线 [$\rho=0.0175$ 欧姆毫米²/米] 向一公里远的一台直流电动机供电,

电动机的电枢电阻为 2 欧姆,在正常机械负载下,它的反电动势为 210 伏特. 求(1)通过该电路上的电流;(2)电动机的外加电压;(3)电动机的输出功率;(4)电动机在每分钟内所发出的热量;(5)电动机的效率;(6)发电机的路端电压;(7)发电机的输出功率.

60. 一台发电机,功率是 20 千瓦,机端电压是 220 伏特,现在要把它生产的电能输送到 1.5 公里远的工厂去,如果要使输电线上损失的功率不超过发电机输出功率的 10%,求输电铜线的横截面积应该多粗?

61. 有一降压变压器,两线圈之比是 15:1,原线圈两端电压是 3300 伏特,副线圈的内电阻是 0.3 欧姆;用这个变压器向 55 盏 220 伏特、40 瓦特的电灯供电,问(1)电灯全部用电时副线圈两端的电压是多少?(2)每个灯泡的实际功率是多少?

62. 收音机中的变压器,原线圈接在 220 伏特电源上,有 990 匝,要求在副线圈上能得到 5 伏特、6.3 伏特和 300 伏特三种输出电压,如果不计原、副线圈中的能量损失.(1)求这三个副线圈的匝数;(2)如果 5 伏特和 6.3 伏特的线圈都供给 2 安培的电流,300 伏特线圈供给 60 毫安培电流,问这时变压器输入电功率应该是多大?

63. 试用方块图画出无线电发送机和接收机的主要组成部分.

64. 试画一张两管收音机的电路图.(一级再生放大和一级功率放大).

65. 在无线电发射机的振荡电路里,自感线圈的自感系数是 0.04 毫亨利,电容器的电容是 0.00025 微法拉. 求发出电磁波的波长.

66. 为什么一般的电子管收音机,不需要安装象通常矿石收音机那样的天线?

习題答案

第一章

习题 1.2 1. 6 达因, 3 达因; 2. 4 达因, 10 靜庫, 40 靜庫; 3. 4 因达;
4. 距 A 球 15 厘米; 5. 距 A 球 5 厘米; 6. 异号; 7. 距 A 球 50 厘米,
 $-\frac{4}{9}q$; 8. $\sqrt{3}q/a^2$ 达因, 垂直于 AB 連線; 9. 2.5 达因, 平行于 AB 連
綫; 10. 56 靜庫.

习题 1.4 1. 2.08×10^9 个, 6.24×10^{18} 个; 2. 23.04 达因, 5.52×10^{-42}
达因; 4. 約 59 吨重.

习题 1.6 (1) 1. 0.2 达因/靜庫; 2. 500 靜庫; 3. 20 达因/靜庫,
0.5 厘米; 4. 在 AB 的連綫上, 距 A 球 15 厘米, 0.089 达因/靜庫, 方向向
A; 5. 合場强为 0; 6. (1) $\frac{2\sqrt{2}+1}{2} \cdot \frac{Q}{r^2}$, (2) $2\frac{Q}{r^2}$; 7. $\frac{Q}{r^2}$,
 $\sqrt{3}\frac{Q}{r^2}$.

习题 1.6 (2) 5. 負电荷, 2×10^{-3} 靜庫.

习题 1.7 (1) 1. +20 尔格, +120 尔格; 2. -20 尔格, -120 尔格;
3. 正值, 負值, 正值; 4. 正值, 負值, 負值; 5. +2 靜伏, -16 尔格;
6. A 点, B 点, A 点电势高; 7. B 点, A 点, B 点电势高.

习题 1.7 (2) 1. +18 焦耳, -30 焦耳; 2. 6 伏特, B 点; 3. (1)
 $+10^{-5}$ 焦耳, (2) -10^{-6} 焦耳, (3) -1.67×10^{-5} 焦耳, (4) $+1.33 \times 10^{-5}$
焦耳, (5) 0, (6) 0.

习题 1.7 (3) 1. 2 靜伏, 3 靜伏, -5 靜伏.

习题 1.9 (1) 1. 40 微微法拉, 36 靜法; 2. 18 伏特; 3. 900 靜庫;
4. 不相等, 大球电势低, 会, 負电荷由大球流向小球, 直到两球电势相等为
止; 5. 电量要平分, 电势要相同; 6. (1) 0.1 达因/靜庫, (2) 1 靜伏,
(3) 0; 7. 5 靜庫.

习题 1.9 (2) 1. 40.5 靜庫; 2. 0.002 微法拉; 3. 2.2;
4. 0.045 厘米.

习题 1.9 (3) 1. $C_{\#}=172$ 靜法, $C_{\#}=2.12$ 靜法; 2. A, 2;

3. 两只串联和另一只并联; 4. 2.4×10^6 靜庫; 5. 60 伏特/厘米.

复习題一

3. 距 A 球 3 厘米; 4. 2.6×10^{-3} 靜庫; 5. (1) 1200 达因,
(2) -400 靜庫, (3) 400 靜电系单位电場强度; 6. 0.245 厘米;
7. (1) 約 2.2×10^{30} , (2) 2.2×10^8 厘米/秒; 8. (1) 約 37 公斤,
(2) 5.4×10^{30} 厘米/秒²; 10. (1) 9 靜伏, (2) 16 靜伏; 11. 72 靜庫,
128 靜庫; 12. $\frac{8}{17}$ 靜伏, $\frac{64}{17}$ 靜庫; 13. (1) 100 伏特, (2) 100 伏特,
(3) 0 伏特, (4) 60 伏特, (5) 9.6×10^{-11} 尔格, (6) 6.4×10^{-11} 尔格, 减少,
 6.4×10^{-11} 尔格; 14. 9×10^{-4} 庫侖, 4×10^{-4} 庫侖; 15. 260 伏特,
 1.2×10^{-4} 庫侖; 16. 100 伏特, 6×10^{-4} 庫侖; 17. 不, 电子由銅球移到鉄球.

第二章

习题 2.2 3. 0.5 安培, 0.2 安培, 0.7 安培.

习题 2.3 (1) 1. 880 欧姆; 2. 0.2 安培; 3. 32 欧姆.

习题 2.3 (2) 1. 相同, 細的电压大; 2. 100 倍; 3. 1.56 吨;
4. 0.25 R; 5. 1.56 欧姆, 0.39 欧姆·毫米²/米.

习题 2.3 (3) 4. 14 欧姆, 串联; 5. 80 欧姆, 480 欧姆, 4 只;
6. 10 欧姆, 20 欧姆, 60 欧姆.

习题 2.4 (1) 1. $2/11$ 安培, 1210 欧姆; 2. $1/11$ 安培, 10 瓦特; 3.
0.22 安培, 48.4 瓦特; 4. 132 安培.

习题 2.4 (2) 1. 鉄导綫电阻是銅导綫的 5.7 倍, 串联时鉄导綫放出的热量
是銅导綫的 5.7 倍, 并联时銅导綫放出的热量是鉄导綫的 5.7 倍; 2. 2880
卡; 3. 79200 卡, 31680 卡, 33.3%; 4. 0.236 卡/焦耳; 5. 11.79 元.

习题 2.5 (1) 1. 10 安培, 40 伏特, 400 瓦特; 2. 35 只; 3. 44 伏特,
66 伏特, 193.6 瓦特, 290.4 瓦特; 4. $1/11$ 安培, 10 瓦特; 5. 5.9 瓦
特, 9.45 瓦特; 6. 23.6 瓦特, 37.8 瓦特, 后一个灯泡有燒坏的危險.

习题 2.5 (2) 1. 1.82 安培; 2. $9/10$, $1/10$, $999/1000$, $1/1000$;
3. 0.05 欧姆, 0.0495 欧姆; 4. 0.22 安培, 0.183 安培, 48.4 瓦特, 40.3
瓦特; 5. r , $0.75r$.

习题 2.5 (3) 1. 390 瓦特, 340 瓦特, 300 瓦特; 2. (1) 10 安培,
(2) 100 伏特, (3) 5 安培, 2.5 安培, 2 安培, 0.5 安培; 3. 6 欧姆;
4. $V_{AB}=3.45$ 伏特, $V_{CD}=3.18$ 伏特; 5. 5.8 欧姆; 6. 0.15 安培,

0.25 安培, 3.1 伏特; 7. (1) 0.45 安培, 0.5 安培, (2) 0.57 欧姆, 257 伏特; 8. (1) 30 分钟, (2) 6.67 分钟.

习题 2.7 (1) 1. 0.25 欧姆; 2. 3 伏特; 3. 1.9 伏特, 3.6 欧姆; 4. 2 伏特, 1 欧姆; 5. 3.82 欧姆; 6. 5.5 欧姆, 11.7 米; 7. 3 欧姆, 0.5 安培; 8. 2 欧姆, 2.4 伏特; 9. 5 欧姆, 16 伏特.

习题 2.7 (2) 1. (1) 0.05 安培, 1.4 伏特, (2) 0.197 安培, 5.52 伏特, (3) 0.053 安培, 1.48 伏特, 0.0106 安培; 3. (1) 0.354 安培, 0.142 伏特, (2) 1.39 安培, 0.556 伏特; 4. 54 卡, 13 卡; 5. 串联, 0.275 安培, 0.166 安培; 6. 干电池, 0.188 安培, 0.154 安培; 7. 0.28 安培; 8. 28.5 欧姆, 增加 0.241 安培; 9. 0.3 安培, 6.9 伏特.

习题 2.7 (3) 1. 1 伏特, 6.5 伏特, 9 伏特; 2. 5.5 伏特, 3 伏特; 3. 8 伏特, -12 伏特; 4. 7 伏特; 5. 17.5 瓦特, 2.5 瓦特, 15 瓦特; 6. 4.05 伏特, 0.05 欧姆; 7. 0.9 安培, 0.15 安培; 8. 0.101 安培, 0.391 安培, -0.290 安培, 5.37 安培, 5.13 安培, 0.236 安培.

习题 2.8 (2) 5. 阴极上沉淀 44.4 克; 6. 0.000326 克/库仑; 7. 339×10^{-6} 克/库仑; 8. 1470 库仑; 9. 0.02 毫米; 10. 40.25 克, 10.84 克; 11. 6.58 克; 12. 9.1 吨; 13. 1.6×10^{-19} 库仑; 14. 0.125:1.

复 习 题 二

1. 2 安培, 1.9 伏特; 2. 0.5 安培, 0.5 安培, 1.5 伏特, 2.4 伏特; 3. (2) 5 伏特, 5 伏特, 0 伏特, 0 伏特, (3) 5 伏特; 4. 0.1 欧姆, 1.5 伏特; 5. 12.5 公里; 6. (1) $\frac{9}{4}$, (2) $\frac{9}{16}$; 7. 55 盞; 8. 6 欧姆; 10. 6 安培, 0 伏特, 0.5 安培, 2.75 伏特, 0 安培, 3 伏特; 11. (1) 增大 20 伏特, (2) 增大 36 瓦特, (3) 增大 75 欧姆; 12. 5.55 欧姆, 80 卡/克; 13. 可以, 不很好, 0.4 瓦特, 2 小时; 14. 5.5 欧姆, 大于 5.5 欧姆, 蓄电池充电, 小于 5.5 欧姆, 蓄电池是放电; 15. (1) 43.75 毫米², (2) 2940 伏特, 73.5 千瓦; 16. 有, 电流由 D 向 B, 没有; 17. 0.04 克, 31.2 立方厘米; 18. (1) 4.825×10^7 库仑, (2) 558 安培, (3) 3×10^{26} 个, (4) 0.000368 克/库仑, (5) 2.4×10^9 焦耳.

第 三 章

习题 3.5 3. 250 奥斯特, 1500 达因; 5. 3000 厘米·达因;
10. 60,000 厘米·达因, 52,000 厘米·达因.

习题 3.6 (2) 1. 5 安培, 10 安培; 2. 并联一个电阻为 $5/111$ 欧姆的分路; 3. 0.008 欧姆; 4. 4.4 安培; 5. $r_1 = \frac{2}{199}$ 欧姆, $r_2 = \frac{18}{199}$ 欧姆.

习题 3.6 (3) 5. 1260 欧姆; 6. 每格代表 2 伏, 串联 7200 欧姆的电阻; 7. 30 伏特; 8. (1) 串联 1475 欧姆的电阻, (2) 并联 $25/1499$ 欧姆的电阻.

复 习 题 三

2. N 极向读者而来; 3. 向读者而来; 4. 铜片一端指北, 锌片一端指南; 7. 2500 厘米·达因; 9. (1) 300 达因, (2) $150\sqrt{3}$ 达因, (3) 0, (4) 300 达因; 10. 并联 $\frac{80}{999}$ 欧姆, 串联 920 欧姆; 11. 4.12 安培; 12. 723 欧姆, 750 欧姆, 6000 欧姆; 13. 450 欧姆, 4500 欧姆, 450 欧姆, 4950 欧姆; 14. (1) 81 伏特, 9 伏特, (2) 73.6 伏特, 16.4 伏特, (3) 81.8 伏特, 8.2 伏特, (4) 80.2 伏特, 9.8 伏特, (5) 81.1 伏特, 8.9 伏特; 15. $R_1 = \frac{5}{98}$ 欧姆, $R_2 = \frac{45}{98}$ 欧姆.

第 四 章

习题 4.2 1. 向读者, 向纸内.

习题 4.3 2. 0.14 伏特; 3. (1) 0.06 伏特, (2) 0.03 伏特; 4. 4 伏特; 5. (1) 1.92 伏特, (3) 3.01 伏特.

习题 4.4 1. 1.8 伏特.

复 习 题 四

1. 用左手定则, 向读者; 右手定则, 向左运动; 2. 插入时, 磁针 (I) N 极向读者而来, 磁针 (II) N 极背读者而去; 4. 不相同, A 电路中的感生电动势较大, 因为在单位时间内穿过 A 线圈的磁力线条数的变化比较大; 5. 1.413×10^{-3} 伏特, 1.18×10^{-3} 安培; 6. (2) 400 厘米/秒; 8. 0.015 伏特, 0.013 伏特.

第 五 章

习题 5.2 2. 1.6 伏特; 3. 306 伏特, 292 伏特, 5.26 千瓦.

习题 5.5 5. (1) 236 伏特, (2) 220 伏特; 6. 7.48 马力.

习题5.6 3. 70伏特, 75伏特, 轉快了; 4. (1) 2安培, (2) 48瓦特, (3) 42瓦特.

习题5.7 4. (1) 1400伏特, (2) 2120伏特, (3) 100倍; 5. 28匝, 35匝, 1925匝; 6. (1) 4千瓦, 180伏特, (2) 0.4欧姆, 16千瓦, (3) 10千瓦, 50安培, 10千瓦; 7. 4:1.

复习题五

5. 198伏特, 0.066欧姆; 6. (1) 45伏特, (2) 220伏特, (3) 3.3千瓦.
7. 89.1%. 8. 599伏特, 99.8%, 98.3%, 500瓦特; 9. 97%,
216 $\times 10^4$ 焦耳; 10. 11伏特, 10伏特; 11. 85毫米², 21.25毫米²,
37.8吨, 9.46吨; 12. (2) 6250伏特, 16安培, (3) 15.6欧姆, 6000伏特, (4) 2400瓩.

第六章

习题6.2 4. 3.77×10^{-6} 秒, 265千赫兹; 5. 0.0056微法拉.

习题6.3 4. 75.4米.

习题6.11 3. $n=13.4$.

习题6.13 5. $\frac{1}{10}$ 米.

复习题六

2. 0.0001014微法拉; 4. 9.94×10^{-5} 亨利; 8. (1) 229米, (2) 303米, (3) 25米; 9. 0.0003微法拉.

总复习题

1. (1) 感应起电, 正电荷, (2) 从手上来的电子与正电荷中和, (3) 金箔上不带电, (4) 金箔带负电; 2. 5达因; 3. 5达因吸引力, 4达因排斥力;
4. 3.2静电系单位电场强度; 5. $25(1+2\sqrt{2})$ 静电系单位电量; 6. (1) 空心球内外都有电场, (2) 球面上有正电荷, (3) 空心球内部的电场要改变, (4) 空心球内的电场不发生改变; 7. C点电场强度分别为: (1) 0, (2) 0, (3) 最大, (4) 次之; 8. 35伏特; 9. 400伏特; 11. 375×10^4 静库; 14. (1) q 各为 2.5×10^{-4} 库仑, (2) 1微法拉电容器的电量是 10^{-4} 库仑, 4微法拉电容器的电量是 4×10^{-4} 库仑; 15. (1) 1.92×10^7 静电系单

位电场强度, (2) 距一库仑电荷 12.5 厘米为半径的球体上, (3) 9.5×10^{-8} 达因; 16. 电势为零, 电势要升高, 因为这时如果把它和地球连接起来, 电子要自地球移向导体; 17. (1) 36×10^{-5} 库仑, (2) 0, (3) 120 伏特, (4) 90 伏特, (5) 60 伏特, (6) 30 伏特, (7) -1.44×10^{-10} 尔格, (8) 0, (9) 1.92×10^{-10} 尔格, (10) 1.92×10^{-10} 尔格, (11) 1 静电系单位电场强度; 18. $\frac{7}{12}$ 安培; 19. (1) 180 伏特, (2) 189.5 伏特; 20. $I=0.8$ 安培, $I_1=0.533$ 安培, $I_2=0.267$ 安培, $V_{AB}=1.6$ 伏特, $V_{BC}=1.6$ 伏特; 21. (1) 0.5 安培, (2) $V_{AB}=0$, (3) $V_{BC}=3.5$ 伏特, (4) 0 安培; 23. (1) $R_1=1.4$ 欧姆, $R_2=2$ 欧姆, (2) 1.125 安培, 2.25 伏特, (3) 1 安培, 2 伏特; 25. 1210 欧姆, 0.181 安培, 72 度; 26. (1) 能, (2) 如果 A 灯灯丝中断, C 灯两端电压将升为 146.7 伏特, $N_{实际}=71.1$ 瓦特, B 和 D 灯两端电压将降为 73.3 伏特, $N_{实际}=17.7$ 瓦特, 这样不能持久使用; 27. 因为实际通过的电流比允许通过的电流小, 所以可以发光, 但较暗; 28. 2.2 伏特, 0.5 欧姆; 29. 7 欧姆; 30. (1) 1.5 伏特, (2) 0.02 安培; 31. 0.132 欧姆; 32. $6r/11$; 33. 79.5%; 34. 14 欧姆; 35. 不可以, 要烧毁; 并联不可以, 串联时可以; 36. $N'=\left(\frac{V'}{V}\right)^2 \cdot N$, 能; 37. 0.2 克, 156 厘米³; 38. 没有矛盾, 它们不同点在于假定的条件不同, 前者是指电流 I 和通电时间 t 不变化, 如果电阻增大, 加在 R 两端电压必然要增大, 这和后者电压不变的条件是不同的, 不能混为一谈; 39. 25.9 克; 40. 约 2.04 克; 41. (1) 965×10^3 库仑, (2) 11.17 安培, (3) 铜离子数为 3.013×10^{24} 个, (4) 0.000329 克/库仑, (5) 2123×10^5 焦耳; 42. 将钢针折断, 使两段接近, 如果互相吸或推斥, 证明钢针有磁性, 否则证明钢针无磁性; 43. $r=\frac{54}{997}$ 欧姆, $R=315$ 欧姆; 44. $R_1=988$ 欧姆, $R_2=4000$ 欧姆; 45. $r_1=\frac{2}{165}$ 欧姆, $r_2=\frac{6}{55}$ 欧姆; 47. 弹簧将时伸时缩, 不断地跳动; 因同方向电流相互吸引, 弹簧收缩; 但收缩后电路中断, 在弹簧弹力作用下电路又被接通; 加铁心后这现象更为显著; 48. 根据左手定则, 作用力的方向跟电流方向垂直, 离读者而去; 49. 200 厘米/秒², 向右; 50. 电流自 B 流入线圈到 A 流出; 51. AB 有感生电流产生, ABCD 框无感生电流产生; 52. 有; 53. 0.0064 伏特; 54. A 环被推斥向右运动; 55. 有铁心的自感系数大, 因为有附加磁场; 56. N 极向读者而来; 根据左手定则, 矩形线圈 AB 边向纸面内旋转; 57. 4.4 千瓦; 58. (1) 2 安培, (2) 48 瓦特, (3) 40 瓦特,

(4) 83.3%; 59. (1) 5 安培, (2) 220 伏特, (3) 1050 瓦特, (4) 720 卡,
(5) 95.5%, (6) 227 伏特, (7) 1135 瓦特; 60. 217 毫米²; 61. (1) 217
伏特, (2) 38.9 瓦特; 62. (1) 22.5 匝, 28.4 匝, 1350 匝, (2) 40.6 瓦
特; 65. 188.4 米.