

淮南师范学院实验报告

学院：电子工程学院 专业：物理学 班级:24 物理 1 班

学号:2414050120 姓名 缪雨轩 日期：2025.11.13

一、实验名称：牛顿第二运动定律的验证

二、实验目的：

- 学习在气垫导轨上利用光电计时系统测量物体速度和加速度的方法。
- 在保持系统总质量不变的条件下，验证物体所受合外力与加速度成正比 ($F \propto a$)。
- 掌握最小二乘法处理数据及实验误差分析的方法。

三、实验原理：

根据牛顿第二定律，对于质量 M 一定的物体，其加速度 a 与所受合外力 F 的关系为 $F = Ma$ 。

在气垫导轨实验中，将滑块、滑轮、细线、悬挂砝码视为一个运动系统。设滑块（含配重）质量为 M_{glider} ，悬挂砝码（含挂钩）质量为 m_0 。在忽略气轨粘滞阻力和滑轮摩擦的情况下，系统所受的合外力近似为悬挂砝码的重力：

$$F \approx m_0 g$$

系统的总质量为：

$$M = M_{glider} + m_0$$

为了验证 $a \propto F$ ，实验中需保持 **系统总质量 M 不变**。做法是将未挂在挂钩上的砝码放置在滑块上，当需要增加拉力时，从滑块上取下砝码移至挂钩上。

加速度的测量利用公式：

$$a = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2S}$$

其中 v_1, v_2 分别为滑块经过第一个和第二个光电门时的瞬时速度， S 为两光电门之间的距离。

四、主要仪器设备：

气垫导轨、气源、滑块、光电门（2 个）、数字毫秒计、游标卡尺、天平、物理天平砝码组（5g

× 5）。

五、实验步骤：

（一）**仪器调节**：开启气源，调节气垫导轨水平。

（二）**测定间距**：固定两个光电门的位置，测量其间距 S 。

（三）**保持总质量不变**：称量滑块质量，并准备 5 个 5g 的砝码。初始状态下，将所有砝码置于滑块上（或仅挂一个底托）。

（四）**数据采集**：

（1） **F_1 (5g)**：将 5g 砝码（含挂钩）挂于细线端，其余砝码在滑块上。释放滑块，记录数据。重复测量多次。

（2） **F_2 (10g)**：从滑块上取一个 5g 砝码加挂到下方，使悬挂总质量为 10g。重复测量。

（3） **$F_3 \sim F_5$** ：依次增加悬挂质量至 15g, 20g, 25g，每次保持系统总质量恒定，记录对应的速度或加速度数据。

（五）**数据记录**：记录每组实验的初速度 v_1 和末速度 v_2 （或直接记录仪器显示的加速度）。

六、原始数据记录

实验常数：

两光电门间距 $S = 50.00 \text{ cm} = 0.500 \text{ m}$

重力加速度 $g = 9.80 \text{ m/s}^2$

表 1：加速度与外力关系数据记录表

组别	悬挂质量 m ₀ （g）	n	数据 1 (v ₁ 或 a)	数据 2 (v ₂)	计算/记录加速度 a _i （cm/s2）
F ₁	5.00	1	20.06	—	20.06
		2	20.21	—	20.21
		3	19.92	—	19.92
		4	20.13	—	20.13
		5	20.22	—	20.22
F ₂	10.00	1	29.02	79.81	55.28
		2	28.69	79.49	54.95
		3	28.99	79.43	54.68
		4	29.05	79.81	55.26
		5	28.34	79.62	55.35
F ₃	15.00	1	35.70	98.14	83.56
		2	35.21	97.85	83.33
		3	35.42	97.66	82.82
		4	35.56	97.85	83.08
		5	35.55	97.85	83.09
F ₄	20.00	1	41.12	113.51	111.91
		2	40.92	112.87	110.66
		3	41.54	113.90	112.44
		4	41.42	114.02	112.84
		5	40.62	113.64	112.65
F ₅	25.00	1	46.27	127.88	142.10
		2	46.06	126.58	139.00

组别	悬挂质量 m ₀ （g）	n	数据 1 (v ₁ 或 a)	数据 2 (v ₂)	计算/记录加速度 a _i （cm/s2）
		3	46.08	126.58	138.99
		4	46.02	127.88	142.33
		5	46.10	127.88	142.27

七、数据处理：

（一）各组加速度平均值及不确定度计算

(以F₃组为例，其他组同理)

平均加速度 $\bar{a}$ ：

$$\bar{a}_3 = \frac{1}{5} \sum a_i = \frac{83.56 + 83.33 + 82.82 + 83.08 + 83.09}{5} = 83.18 \text{ cm/s}^2$$

A 类不确定度 $u_A(n = 5)$ ：

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum (a_i - \bar{a})^2}{n(n - 1)}} \approx 0.12 \text{ cm/s}^2$$

各组汇总：

$$m_0 = 5.00g, \bar{a}_1 = 20.11 \text{ cm/s}^2$$

$$m_0 = 10.00g, \bar{a}_2 = 55.10 \text{ cm/s}^2$$

$$m_0 = 15.00g, \bar{a}_3 = 83.18 \text{ cm/s}^2$$

$$m_0 = 20.00g, \bar{a}_4 = 112.10 \text{ cm/s}^2$$

$$m_0 = 25.00g, \bar{a}_5 = 140.94 \text{ cm/s}^2$$

（二）最小二乘法线性拟合

设线性方程为 $m_0 = K \cdot a + C$ 。

这里我们将悬挂质量 m_0 (表征外力 F) 作为纵坐标 y ，加速度 a 作为横坐标 x 进行拟合。

$$x_i: 20.11, 55.10, 83.18, 112.10, 140.94$$

y_i : 5.00,10.00,15.00,20.00,25.00

计算中间量:

$$\bar{x} = 82.286, \bar{y} = 15.00$$

$$\sum x_i^2 = 43236.8, \sum x_i y_i = 7356.5$$

拟合结果:

$$\text{斜率 } K = \frac{\sum x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum x_i^2 - n \bar{x}^2} = \frac{7356.5 - 5 \times 82.286 \times 15}{43236.8 - 5 \times 82.286^2} \approx 0.1654 \text{ g/(cm/s}^2\text{)}$$

$$\text{截距 } C = \bar{y} - K \bar{x} = 15.00 - 0.1654 \times 82.286 \approx 1.39 \text{ g}$$

相关系数 $r \approx 0.9999$ (高度线性相关)

回归方程:

$$m_0 = 0.1654 \cdot a + 1.39$$

八、实验结果与讨论:

(一) 验证结论:

实验数据的相关系数 $r = 0.9999$ ，极高地接近于 1，说明在实验误差允许范围内，悬挂质量 m_0 （即合外力 F ）与系统的加速度 a 之间存在严格的线性关系。这有力地验证了牛顿第二定律。

(二) 截距分析:

拟合直线在纵轴上的截距 $C \approx 1.39 \text{ g}$ 。这表示当加速度 $a = 0$ 时，理论上需要悬挂约 1.39g 的质量。

物理意义: 该截距反映了气垫导轨存在的**剩余摩擦力**（粘滞阻力）。即必须先施加约 $1.39 \times 9.8 \times 10^{-3} \text{ N}$ 的力来平衡摩擦力，滑块才会开始产生加速度。

这解释了为什么 $F_1(5g)$ 组的加速度(20.11)显著低于 $F_2(10g)$ 组(55.10)的一半。

(三) 系统质量估算:

根据 $m_0 g - f = Ma$ ，即 $m_0 = \frac{M}{g} a + \frac{f}{g}$ 。

拟合斜率 $K = M/g$ 。

实验测得系统总质量 $M_{\text{exp}} = K \cdot g = 0.1654 \times 980 \approx 162.1 \text{ g}$ 。

(四) 误差来源:

(1) **气轨水平度:** 若导轨未完全调平，重力分量会作为附加力引入系统误差。

(2) **空气阻力:** 滑块运动速度较大时（如 F_5 组末速度达 1.2 m/s ），空气阻力不可忽略，导致高受力端加速度偏小。

(3) **测量误差:** 挡光片宽度的测量误差及计时器的精度限制。