

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： 请输入

学号： 请输入 姓名： 请输入 日期： 请输入

一、实验名称：刚体转动惯量的测定

二、实验目的：

1. 学习用恒力矩转动法测定刚体转动惯量的原理和方法。
2. 观测刚体的转动惯量随其质量、质量分布及转轴位置改变的情况。
3. 利用圆柱试样的偏轴转动数据，验证平行轴定理。
4. 学会使用智能计时计数器记录遮光次数和相应时间，并由计时数据求角加速度。

三、实验原理：

（一）恒力矩转动法

刚体绕固定轴转动时，合外力矩 M 、转动惯量 J 与角加速度 β 满足刚体定轴转动定律：

$$M=J\beta$$

设空载物台在摩擦阻力矩 M_{μ} 作用下作匀减速运动，其角加速度为 β_1 ；挂上质量为 m 的砝码后，砝码通过半径为 R 的塔轮对载物台施加近似恒定力矩，系统作匀加速运动，其角加速度为 β_2 。由动力学方程联立消去摩擦阻力矩，可得空载物台转动惯量：

$$J_1=\frac{mR(g-R\beta_2)}{\beta_2-\beta_1}$$

在载物台上放置待测试样后，未挂砝码和挂砝码时的角加速度分别记为 β_3 、 β_4 ，则载物台与试样整体的转动惯量为：

$$J_2=\frac{mR(g-R\beta_4)}{\beta_4-\beta_3}$$

根据转动惯量的叠加性，待测试样自身的转动惯量为：

$$J_3=J_2-J_1$$

（二）角加速度的测量

实验仪记录遮光次数 k 及对应时间 t 。每转过半圈产生一次遮光信号，因此第 k 次遮光对应角位移 $k\pi$ 。若刚体作匀变速转动，则有：

$$k\pi=\omega_0t+\frac{1}{2}\beta t^2$$

取任意两组数据 (k_n, t_n) 、 (k_m, t_m) ，消去初角速度 ω_0 ，可得角加速度计算式：

$$\beta=\frac{2\pi(k_nt_m-k_mt_n)}{t_mt_n^2-t_n^2t_m}$$

本实验按对半逐差法处理计时数据，即将第 1 与第 5 组、第 2 与第 6 组、第 3 与第 7 组、第 4 与第 8 组分别配对，求出四个 β 值后取平均值。

（三）圆环、圆柱理论转动惯量和平行轴定理

圆环绕通过几何中心且垂直于环面的轴转动时，理论转动惯量为：

$$J_{\text{环}}=\frac{1}{2}m_{\text{环}}\left(R_{\text{外}}^2+R_{\text{内}}^2\right)$$

圆柱绕自身几何中心轴转动时，理论转动惯量为 $J_0=\frac{1}{2}mR^2$ 。若转轴与该中心轴平行，且两轴距离为 d ，则由平行轴定理：

$$J=J_0+md^2=\frac{1}{2}mR^2+md^2$$

四、主要仪器设备: ZKY-ZS 刚体转动惯量实验仪，网络型刚体转动惯量测试仪，光电门，细线，砝码及砝码托，圆环试样，两个质量相同的圆柱试样，金属载物盘。

五、实验步骤：

1. 将转动惯量实验仪置于实验台上，调节底座螺钉使仪器水平；调整滑轮高度和方位，使细线与塔轮槽位相切且不发生明显摩擦。
2. 空载物台实验：先在未挂砝码状态下轻拨载物台，记录匀减速运动中 $k=1$ 至 $k=8$ 的时间；再挂上砝码，记录匀加速运动中 $k=1$ 至 $k=8$ 的时间。
3. 圆环实验：将圆环试样放在载物台上，使其几何中心尽量与转轴重合，分别记录匀减速和匀加速两组时间数据。
4. 圆柱实验：将两个圆柱对称放置在距转轴 $d=100\text{ mm}$ 的孔位中，分别记录匀减速和匀加速两组时间数据。

5. 用对半逐差法计算各组角加速度，再代入转动惯量公式求出实验值，并与理论值比较。

六、原始数据记录：

实验条件如下表。

项目	符号	数值	单位	说明
待测样品	—	有机玻璃	—	不良导体试样
试样密度	ρ	1124	kg/m³	实验讲义给出
试样厚度	R	0.010	m	实验讲义给出
加热电压	U	18.02	V	仪器显示值
加热膜电阻	r	约 110	Ω	取讲义近似值
热电偶热电常数	z_T	0.04	mV/K	铜—康铜热电偶
面积修正系数	A	0.85	—	实验讲义给出

仪器显示屏热电势单位为 μV。

序号	时间 t/min	中心面 Vc/μV	加热面 Vh/μV	热电势差 Vt/μV	每分钟温升ΔVi/μV	每 8 分钟温升ΔUi/μV
1	13	238	403	165	24	189
2	14	262	428	166	24	187
3	15	286	454	168	24	186
4	16	310	479	169	24	183
5	17	334	504	170	23	181
6	18	357	528	171	24	180
7	19	381	553	172	22	178
8	20	403	577	174	24	177
9	21	427	601	174	22	—
10	22	449	625	176	23	—
11	23	472	649	177	21	—
12	24	493	672	179	22	—
13	25	515	696	181	22	—
14	26	537	719	182	22	—
15	27	559	742	183	21	—
16	28	580	764	184	—	—

其中：

$$V_t=V_h-V_c$$
$$\Delta V_i=V_{c,i+1}-V_{c,i}$$

$$\Delta U_i=V_{c,i+8}-V_{c,i}$$

七、数据处理：

（一）角加速度计算

根据表 2—表 4 中的计时数据，分别以 (k1,k5)、(k2,k6)、(k3,k7)、(k4,k8) 组成四组逐差数据，代入角加速度公式计算。所得结果如下。

表 5 对半逐差法计算角加速度（单位：rad/s²）

测量对象	运动状态	β ₁	β ₂	β ₃	β ₄	平均值
空载物台	匀减速	-0.1094	-0.0907	-0.1292	-0.1014	-0.1077
空载物台	匀加速	1.7936	2.1754	2.1719	2.1643	2.0763
载物台+圆环	匀减速	-0.1169	-0.0776	-0.0719	-0.0725	-0.0847
载物台+圆环	匀加速	1.1630	1.1680	1.1703	1.1695	1.1677
载物台+两圆柱	匀减速	-0.0911	-0.0807	-0.0749	-0.0757	-0.0806
载物台+两圆柱	匀加速	1.3803	1.3813	1.3794	1.3722	1.3783

（二）转动惯量计算

转动惯量的计算统一使用 SI 单位。为便于排版，表 6 中的转动惯量数值以 10⁻³ kg·m² 为单位列出。

表 6 转动惯量计算结果

项目	计算关系	结果/10 ⁻³ kg·m²
空载物台	J ₁ = mR(g-Rβ ₂)/(β ₂ -β ₁)	5.624
载物台+圆环	J ₂ = mR(g-Rβ ₄)/(β ₄ -β ₃)	9.830
圆环测量值	J 环,测 = J ₂ -J ₁	4.206
圆环理论值	J 环,理 = 1/2 m 环(R 外²+R 内²)	5.543
载物台+两圆柱	J ₂ ' = mR(g-Rβ ₆)/(β ₆ -β ₅)	8.434
两圆柱测量值	J 两柱,测 = J ₂ '-J ₁	2.810
单个圆柱测量值	J 柱,测 = J 两柱,测/2	1.405
单个圆柱理论值	J 柱,理 = 1/2 m 柱 R 柱²+m 柱 d²	1.679

表 7 测量值与理论值比较

测量对象	测量值/10 ⁻³ kg·m²	理论值/10 ⁻³ kg·m²	相对误差
圆环	4.206	5.543	-24.12%
单个圆柱	1.405	1.679	-16.30%

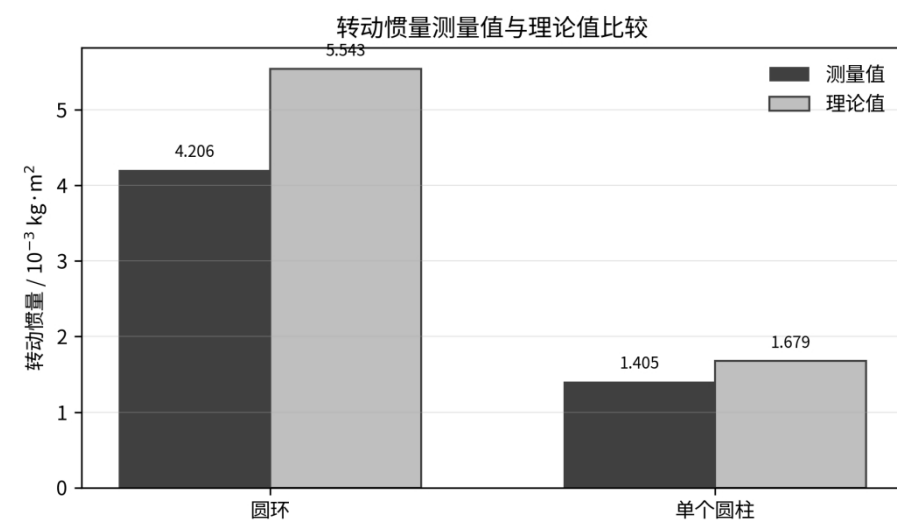


图 1 圆环和单个圆柱转动惯量测量值与理论值比较

八、实验结果与讨论:

（一）关于角加速度和转动惯量的关系

空载物台的平均角加速度为 $\beta_1=-0.1077 \text{ rad/s}^2$ 、 $\beta_2=2.0763 \text{ rad/s}^2$ 。未挂砝码时角加速度为负值，说明载物台主要在摩擦阻力矩作用下作匀减速运动；挂上砝码后角加速度为正值，说明砝码重力通过细线和塔轮提供恒定外力矩，使系统作匀加速转动。

放上圆环后，系统匀加速角加速度减小为 $\beta_4=1.1677 \text{ rad/s}^2$ ；放上两圆柱后，系统匀加速角加速度为 $\beta_6=1.3783 \text{ rad/s}^2$ 。在砝码质量和塔轮半径相同的条件下，系统转动惯量越大，角加速度越小，这与 $M=J\beta$ 的定轴转动规律一致。

（二）关于圆环转动惯量

由实验数据计算得到空载物台转动惯量 $J_1=5.624\times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ，载物台加圆环后的总转动惯量 $J_2=9.830\times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ，因此圆环转动惯量测量值为 $4.206\times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。按圆环外半径 120 mm、内半径 105 mm、质量 436 g 计算，圆环转动惯量理论值为 $5.543\times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ，相对误差为 -24.12%。

圆环测量值小于理论值，但量级一致。偏差说明本组实验中存在较明显的系统误差，尤其是摩擦阻力矩不恒定、塔轮有效半径偏差、圆环放置偏心等因素，会通过角加速度计算进一步影响 J_2-J_1 的间接测量结果。

（三）关于平行轴定理

两个圆柱对称放置在距转轴 $d=100 \text{ mm}$ 的位置时，实验得到两圆柱整体转动惯量为

$2.810\times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ，折合单个圆柱测量值为 $1.405\times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。按单个圆柱质量 166 g、半径 15 mm 及平行轴定理计算，单个圆柱理论值为 $1.679\times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ，相对误差为 -16.30%。

圆柱远离转轴后，转动惯量中出现 md^2 项，且该项远大于圆柱自身中心轴转动惯量项 $1/2mR^2$ 。实验结果表明，质量分布离转轴越远，刚体转动惯量越大，从而能够定性验证平行轴定理。

（四）误差分析

1. 摩擦阻力矩并非严格恒定。理论处理中利用匀减速和匀加速数据消去摩擦阻力矩，但实际轴承摩擦、滑轮摩擦会随转速和受力状态变化。
2. 塔轮有效半径存在误差。细线有厚度，绕线若不紧密或发生重叠，实际力臂将偏离标称值 25 mm。
3. 细线和滑轮会引入附加误差。理论模型近似认为细线不可伸长、无滑动，实际中细线张力变化、砝码摆动和滑轮摩擦都会影响加速度。
4. 试样放置可能存在偏心。圆环未完全同轴或两圆柱距离 d 有定位误差时，实际转动惯量会偏离理论计算值。
5. 光电门计时和初始扰动会影响逐差结果。若开始计时时转速不稳定，或某次遮光触发存在微小偏差，计算得到的 β 值会出现波动。

（五）实验结论

本实验采用恒力矩转动法测得空载物台转动惯量为 $J_1=5.624\times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ；圆环转动惯量测量值为 $4.206\times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ；单个圆柱在距转轴 100 mm 位置处的转动惯量测量值为 $1.405\times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。实验结果说明，刚体转动惯量不仅与质量大小有关，而且与质量相对于转轴的分布有关。圆柱偏轴实验显示转轴平移后转动惯量明显增大，基本体现了平行轴定理的物理意义。