

天津大学物理实验报告

信息: 学院 2013 年级 通信工程 专业 四 班 姓名 刘楠 成绩 9

实验日期: 2014.11.25 学号 3013204212 同组实验者

实验题目: 扭摆法测定物体转动惯量

一. 实验目的

1. 掌握用扭摆法测定刚体转动惯量的原理和方法;
2. 掌握物理天平的结构、性能与使用方法。

二. 实验仪器

扭摆装置、转动惯量测试仪、物理天平、游标卡尺、高度尺等。

三. 实验原理

1. 扭摆的构造如图1所示, 在垂直轴上装有一薄片状的螺旋弹簧2, 用以产生恢复力矩。在轴的上方可以装上各种待测物体, 垂直轴与底座间装有轴承, 以降低摩擦力矩。底座上装有水平仪3, 用来调整仪器转轴成铅直。

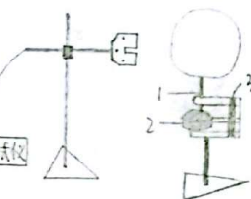


图1 扭摆与转动惯量测试仪

将物体在水平面内转过 θ 角。在弹簧恢复力矩作用下, 物体就开始绕铅直轴作往复扭转运动。根据胡克定律, 弹簧受扭转而产生的恢复力矩 M 与所转过的角度 θ 成正比, 即 $M = -k\theta$ (1-1)

式中: k 为弹簧的扭转常数。

根据转动定律 $M = J\beta$ (式中: J 为物体绕转轴的转动惯量, β 为角速度) 得 $\beta = M/J$ (1-2)

令 $\omega = d\theta/dt$, 忽略轴承摩擦阻力矩, 由式(1-1)式(1-2)得 $\beta = \frac{d\omega}{dt} = -\frac{k}{J}\theta = -\omega^2\theta$

上述方程表示扭摆运动为简谐振动, 角加速度与角位移成正比, 且方向相反, 此方程的解 $\theta = A\cos(\omega t + \varphi)$

式中: A 为简谐振动的角振幅; φ 为初相位; ω 为圆频率。此简谐振动的周期 $T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{J}{k}}$ (1-3)

由式(1-3)可知, 只要实验测得物体扭摆的摆动周期 T , 并在 J 和 k 中任何一个量已知时即可计算出另一个量。

本实验测量形状规则物体的转动惯量, 它的质量和几何尺寸通过量具直接测量得到, 再算出本仪器弹簧的 k 值。若要测定其他形状物体的转动惯量, 只需将待测物体放在本仪器顶部的各种夹具上, 测

天津大学物理实验报告

附 页

定其摆动的周期, 由式(1-3)即可算出该物体绕转动轴的转动惯量。

理论分析证明, 若质量为 m 的物体绕通过质心轴的转动惯量为 I_0 , 当转轴平行移动距离 x 时, 则此物体对新轴的转动惯量变为 $I_0 + mx^2$, 这就是转动惯量的平行轴定理。

2. 测定实验物体的转动惯量

① 测量载物盘的摆动周期 T_0 , 得到其 $I_0 = \frac{T_0^2 k}{4\pi^2}$ ①

② 塑料圆柱体放于载物盘上, 测出其摆动周期 T_1 , 测 $I_1 = I_0 + I_1 = \frac{T_1^2 k}{4\pi^2}$ ②

由式①与式②得 $I_1 = \frac{(T_1^2 - T_0^2)k}{4\pi^2} = \frac{1}{8}mD^2$ 可求出 k

将 k 、式①、式②可得 $I_0 = \frac{T_0^2 T_1^2}{T_1^2 - T_0^2}$

3. 一些规则物体转动惯量的计算公式

① 圆柱体绕中心轴的 $I = \frac{1}{8}mD^2$

② 圆球绕过球心轴的转动惯量 $I = \frac{2}{5}mR^2 = \frac{1}{10}mD^2$

③ 金属圆筒的转动惯量 $I = \frac{1}{8}m(D_1^2 + D_2^2)$

四. 实验步骤

1. 用游标卡尺和高度尺分别测出塑料圆柱体的外径, 金属圆筒的内、外径, 木球的直径 (各测量3次), 并读出物体的质量 (已标出);

2. 调整扭摆底座脚螺钉, 使水平仪中气泡居中;

3. 装上金属载物盘, 并调整光电探头的位置使载物盘上挡光杆处于其缺口中央且能垂直发射红外线的小孔。使用转动惯量测试仪测定摆动周期 T_0 , 重复3次;

4. 将塑料圆柱体垂直放在载物盘上, 测定摆动周期 T_1 , 重复3次;

5. 用金属圆筒代替圆柱体, 测定摆动周期 T_2 , 重复3次;

6. 取下载物金属盘, 装上木球, 测定摆动周期 T_3 , 重复3次 (计算木球的转动惯量时, 应扣除支架的转动惯量);

7. 取下木球, 装上金属细杆 (金属细杆中心必须与转轴重合), 测定摆动周期 T_4 , 重复3次, 计算金属细杆的转动惯量;

天津大学物理实验报告

信息 学院 2013 年级 通信工程 专业 四 班 姓名 刘菊 成绩

实验日期: 2014.11.25 学号 301320422 同组实验者

实验题目: 扭摆法测定转体的转动惯量

8. 将滑块对称放置在细杆两边的凹槽内, 此时滑块质心离转轴距离分别为 5.00 cm、10.00 cm、15.00 cm、20.00 cm、25.00 cm. 测定摆动周期 T , 重复 3 次, 验证平行轴定理 (计算转动惯量时, 应扣除金属细杆的转动惯量).

五. 数据处理

1. 扭摆常数 k 与载物盘转动惯量的测量, 以及各物转动惯量的测量.

表 1. 载物盘的转动惯量.

物体名称	周期 (s) T_0	I_0 实验值 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
载物盘	0.660	5.476×10^{-4}
	0.660	
	0.660	

表 2. 物体的周期以及转动惯量

物体名称	几何尺寸 (cm)	质量 (kg)	周期 (s)	转动惯量理论值 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	实验值 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	误差	
粗杆 圆柱体	10.15 直径 D	0.71315	1.117	\bar{T}_1	$I_1' = \frac{1}{2} m D^2$	I_1	
	10.70		1.117	1.021×10^{-3}			
	10.65		1.117				
金属圆筒	10.10 内径 d	0.646	1.349	\bar{T}_2	$I_2' = \frac{1}{2} m (d^2 + D^2)$	$I_2 = \frac{k D^2}{4 \pi^2}$	3.43%
	10.05		1.349				
	10.10						
	10.15 外径 D_2		1.349	1.680×10^{-3}	1.740×10^{-3}		
	10.15						
	10.65						
	10.30	1.349					
木球	12.90 直径 D_3	0.954	1.144	\bar{T}_3	$I_3' = \frac{2}{5} m D_3^2$	$I_3 = \frac{k D_3^2}{4 \pi^2}$	1.66%
	13.00		1.144	1.680×10^{-3}	1.621×10^{-3}		
	12.94		1.144				

天津大学物理实验报告

附 页

2. 验证平行轴定理

金属细杆及座的转动惯量实验值 $I_4 = \frac{k}{4 \pi^2} T_4^2 = 4.805 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$					1.955	$\bar{T}_4 (s)$
					1.955	
					1.955	1.955
$X (\text{m})$	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	
摆动周期 (s)	2.229	2.229	2.868	2.868	3.703	4.627
	2.229		2.868		3.704	
	2.229		2.868		3.701	
实验值 ($10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$)						
$I = k T^2 / 4 \pi^2 - I_4$	0.124	0.440	1.072	1.913	2.984	
理论值 ($10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$)						
$I' = I_4 + 2 m x^2$	0.127	0.485	1.081	1.916	2.989	
百分差	2.42%	1.04%	0.840%	0.157%	0.134%	

两滑块质心转轴转动惯量理论值 $I_5' = 0.809 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ($2m = 0.471 \text{ kg}$)

由以上实验结果可知, 在误差允许的范围, 两个金属滑块质心轴的转动惯量的实验值和理论值近似相等, 所以 I 正比于 x^2 , 则可验证平行轴定理

3. k 的不确定度分析

10.1 塑料圆柱体的直径 D 的不确定度分析

$$U_{\text{Ap}} = t_{0.683} \cdot S_D = t_{0.683} \cdot \sqrt{\frac{\sum (D_i - \bar{D})^2}{n(n-1)}} = 0.0289 \times 1.32 = 0.0381 (\text{cm})$$

$$U_{\text{Aa}} = \frac{\Delta}{\bar{D}} = \frac{0.05}{1.32} = 0.0288 (\text{mm})$$

$$\therefore U = \sqrt{U_{\text{Ap}}^2 + U_{\text{Aa}}^2} = 0.0382 (\text{cm})$$

$$\therefore \text{直径 } D = 10.70 \pm 0.0382 (\text{cm}) \quad (P=68.3\%)$$

$$U_r = \frac{k}{\bar{x}} \times 100\% = 0.357\%$$

由公式 $I = \frac{1}{2} m D^2$ 可知

10.2 塑料圆柱体的转动惯量的不确定度分析

$$U_{\frac{k}{4 \pi^2}} = \sqrt{4 \left(\frac{U_D}{\bar{D}} \right)^2} = 0.714\% \quad \text{即 } U_{I_4} = 0.714\% \cdot I_4 = 0.729 \times 10^{-3} (\text{kg} \cdot \text{m}^2) \quad (P=68.3\%)$$

天津大学物理实验报告

信息学院 2013 年级 通信工程 专业 四 班 姓名 刘 成绩

实验日期: 2014.11.25 学号 301320422 同组实验者

实验题目: 扭摆法测刚体的转动惯量

1. 塑料圆柱体的转动惯量 $I_1' = (1.021 \pm 0.00729) \times 10^{-3} \text{ (kg} \cdot \text{m}^2)$ ($P=68.3\%$) $U_{I_1'} = 0.714\%$

(3) 载物盘周期的不确定度分析

$$U_{T_0} = t_{0.683} \cdot S_{T_0} = 0 \text{ (s)}$$

$$U_{\frac{1}{T_0}} = \frac{\frac{1}{T_0}}{\frac{1}{T_0}} = \frac{0.01}{\frac{1}{T_0}} = 0.00577 \text{ (s)}$$

$$\therefore U_{T_0} = \sqrt{U_{T_0}^2 + U_{\frac{1}{T_0}}^2} = 0.00577 \text{ (s)}$$

2. 载物盘周期 $T_0 = 0.660 \pm 0.00577 \text{ (s)}$ ($P=68.3\%$)

$$U_T = \frac{U_{T_0}}{T_0} \times 100\% = 0.874\%$$

(a) 塑料圆柱体的周期的不确定度分析

$$U_{T_1} = t_{0.683} \cdot S_{T_1} = 0 \text{ (s)}$$

$$U_{\frac{1}{T_1}} = \frac{\frac{1}{T_1}}{\frac{1}{T_1}} = \frac{0.01}{\frac{1}{T_1}} = 0.00577 \text{ (s)}$$

$$\therefore U_{T_1} = \sqrt{U_{T_1}^2 + U_{\frac{1}{T_1}}^2} = 0.00577 \text{ (s)}$$

3. 塑料圆柱体的周期 $T_1 = 1.17 \pm 0.00577 \text{ (s)}$ ($P=68.3\%$)

$$U_T = \frac{U_{T_1}}{T_1} \times 100\% = 0.517\%$$

$$\therefore \text{由式 } k = \frac{4\pi^2 I_1'}{T_1^2 - T_0^2} \text{ 得}$$

$$\frac{U_k}{k} = \sqrt{\left(\frac{U_{I_1'}}{I_1'}\right)^2 + 4\left(\frac{U_{T_1}}{T_1}\right)^2 + 4\left(\frac{U_{T_0}}{T_0}\right)^2} = 1.604\%$$

$$\therefore U_k = 1.604\% \cdot k = 0.0796 \times 10^{-2} \quad (P=68.3\%)$$

4. 扭摆常数 $k = (4.963 \pm 0.0796) \times 10^{-2}$ ($P=68.3\%$)

$$U_k = 1.604\%$$

天津大学物理实验报告

附 页

(附录:

$$\text{圆柱体转动惯量 } I_1' = \frac{1}{8} m \bar{D}^2 = \frac{1}{8} \times 0.7315 \times (10.70 \times 10^{-3})^2 = 1.021 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\text{扭摆常数 } k = \frac{4\pi^2 I_1'}{T_1^2 - T_0^2} = \frac{4\pi^2 \cdot 1.021 \times 10^{-3}}{(1.17)^2 - (0.660)^2} = 4.963 \times 10^{-2}$$

$$\text{载物盘转动惯量 } I_0 = \frac{T_0^2 k}{4\pi^2} = \frac{(0.66)^2 \times 4.963 \times 10^{-2}}{4\pi^2} = 5.476 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

4. 计算所测金属圆筒和木球的转动惯量的理论值, 并与实验值进行比较.

$$1) \text{ 金属圆筒的转动惯量的理论值: } I_2 = \frac{1}{8} m (\bar{D}_1^2 + \bar{D}_2^2) = \frac{1}{8} \times 0.646 \times [(10.10 \times 10^{-3})^2 + (10.30 \times 10^{-3})^2] = 1.680 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\text{实验值: } I_2 = \frac{k T_2^2}{4\pi^2} - I_0 = \frac{4.963 \times 10^{-2} \times (1.349)^2}{4\pi^2} - 5.476 \times 10^{-4} = 1.740 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\text{百分差: } E_f = \frac{I_2 - I_2'}{I_2'} \times 100\% = 3.45\%$$

$$2) \text{ 木球的转动惯量的理论值: } I_3 = \frac{1}{6} m \bar{D}_3^2 = \frac{1}{6} \times 0.954 \times (17.95 \times 10^{-3})^2 = 1.600 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\text{实验值: } I_3 = \frac{k T_3^2}{4\pi^2} - I_0 = \frac{4.963 \times 10^{-2} \times (1.144)^2}{4\pi^2} - 0.179 \times 10^{-4} = 1.621 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\text{百分差: } E_r = \frac{I_3 - I_3'}{I_3'} \times 100\% = 1.66\%$$

5. 验证平行轴定理, 求出实验值与理论值的百分差.

$$\text{金属杆及支架的转动惯量 } I_4 = \frac{k}{4\pi^2} T_4^2 = \frac{4.963 \times 10^{-2} \times (1.955)^2}{4\pi^2} = 4.805 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\text{二滑块的转动惯量 } I_5' = 0.807 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad 2m = 0.477 \text{ kg}$$

① 当 $X = 5 \text{ cm}$ 时

$$\text{理论值: } I_1 = I_5' + 2mX^2 = 0.127 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\text{实验值: } I_1' = \frac{k T_1^2}{4\pi^2} - I_4 = 0.124 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\text{百分差: } E_r = \frac{I_1 - I_1'}{I_1'} \times 100\% = 2.42\%$$

② 当 $X = 10 \text{ cm}$ 时

$$\text{理论值: } I_1 = I_5' + 2mX^2 = 0.485 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\text{实验值: } I_1' = \frac{k T_1^2}{4\pi^2} - I_4 = 0.480 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\text{百分差: } E_r = \frac{I_1 - I_1'}{I_1'} \times 100\% = 1.04\%$$

③ 当 $X = 15 \text{ cm}$ 时

$$\text{理论值: } I_1 = I_5' + 2mX^2 = 1.081 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

天津大学物理实验报告

天津大学物理实验报告

附 页

信息学院 2013 年级 通信工程 专业 四 班 姓名 刘莉 成绩

实验日期: 2014.11.25 学号 301320422 同组实验者

实验题目: 扭摆法测物体的转动惯量

实验值: $I_3 = \frac{KT_3^2}{4\pi^2} - I_4 = 1.072 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

百分差: $E_r = \frac{I_3 - I_3'}{I_3} \times 100\% = 0.840\%$

④当 $x = 20 \text{ cm}$ 时

理论值: $I_4 = I_3' + 2mx^2 = 1.916 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

实验值: $I_4' = \frac{KT_4^2}{4\pi^2} - I_4 = 1.913 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

百分差: $E_r = \frac{I_4 - I_4'}{I_4} \times 100\% = 0.157\%$

⑤当 $x = 35 \text{ cm}$ 时

理论值: $I_5 = I_3' + 2mx^2 = 2.989 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

实验值: $I_5' = \frac{KT_5^2}{4\pi^2} - I_4 = 2.984 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

百分差: $E_r = \frac{I_5 - I_5'}{I_5} \times 100\% = 0.134\%$

由以上实验结果可知, 在误差允许范围内, 两个金属滑块绕质心轴的转动惯量实验测得值和理论值近似相等, 所以 I 与 x^2 成线性关系, 实验结果可验证平行轴定理。

六. 实验注意事项及感想

1. 注意事项

- ① 由于弹簧的扭转常数 k 值不是固定常数, 它与摆角略有关系, 摆角在 9° 左右时基本相同, 在小角度时变小。
- ② 光电探头宜放置在挡光杆的平衡位置处, 挡光杆不能和它相接触, 以免增大摩擦转矩。
- ③ 机座应保持水平状态。
- ④ 在安装待测物体时, 其支架必须全部套入扭摆主轴, 并将上边螺钉旋紧, 否则扭摆不能正常工作。

2. 实验感想

通过这次实验接触了新的仪器, 转动惯量测试仪, 它使转动惯量的测试变得十分简便, 后来的扭

摆常数 k 的不确定度分析让我掌握了不确定度的计算方法, 十分实用。



天津大学

载物

TIANJIN UNIVERSITY

游标卡尺最小刻度是: 1mm

小游标的格数: 20格. 0.05mm

$$k = \frac{4\pi^2 I_1}{T_1^2 - T_0^2} \quad I_0 = \frac{2T_0^2}{T_1^2 - T_0^2} \quad I_1 = \frac{1}{2} m r^2$$

球支座 $I_2 = 0.179 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$

二滑块 $I_5 = 0.309 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$. $2m = 0.471 \text{ kg}$

载物盘 T_0
0.660
0.660
0.660

I_0 (实验值) kgm^2

物体名称	几何尺寸 (cm)	质量 (kg)	周期 (s)	转动惯量理论值 (kgm^2)	实验值 (kgm^2)	百分差
塑料圆柱体	9.9 + 17 x 0.05 = 10.75 直径 \bar{D}	0.11315	1.117	\bar{T}_1	I_1'	
	9.9 + 16 x 0.05 = 10.70		1.117	1.117	1.021×10^{-3}	
	9.9 + 15 x 0.05 = 10.65		1.117			
金属圆筒	9.9 + 4 x 0.05 = 10.10 内径 \bar{D}_1	0.646	1.349	\bar{T}_2	I_2'	3.45%
	9.9 + 3 x 0.05 = 10.05					
	9.9 + 5 x 0.05 = 10.15					
	10.0 + 3 x 0.05 = 10.15 外径 \bar{D}_2		1.349			
	9.9 + 5 x 0.05 = 10.45			1.349	1.690×10^{-3}	
	10.0 + 2 x 0.05 = 10.10		1.349		1.740×10^{-3}	
木球	12.3 + 30 x 0.02 = 12.90 直径 \bar{D}_3	0.954	1.144	\bar{T}_3	I_3'	1.66%
	12.3 + 35 x 0.02 = 13.00		1.144			
	12.3 + 32 x 0.02 = 12.94		1.144		1.600×10^{-3}	

验证平行轴定理

金属杆及支座的转动惯量实验值 $I_4 = \frac{1}{2} k \cdot \bar{T}_4^2 =$

					1.955	\bar{T}_4 (s)
					1.955	
					1.955	1.955
X (10^{-2} m)	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	
摆动周期 (s)	2.229	2.868	3.703	4.621	5.596	
	2.229	2.868	3.704	4.628	5.591	5.594
	2.229	2.868	3.697	4.633	5.595	
实验值 (10^{-4} kgm^2)						
$I = k T^2 / 4\pi^2 = I_4$	0.124	0.490	1.072	1.913	2.984	
理论值 (10^{-4} kgm^2)						
$I' = I_1' + 2mx^2$	0.127	0.485	1.081	1.916	2.989	
百分差	2.42%	1.04%	0.840%	0.157%	0.134%	

