

实验报告

(20)

课程名称: 物理实验B1 实验名称: 转动惯量实验 实验日期: 2024 年 5 月 16 日 晚

班 级: 王红梅班 教学班级: 63012317 学 号: 1120231863 姓 名: 左逸龙

页 数: 1/7

座 号: 20

一、实验名称: 刚体的转动惯量

二、实验目的: (1) 学习测量刚体转动惯量的方法。

(2) 用实验方法验证平行轴定理。

三、实验仪器: 刚体转动惯量实验仪, 通用电脑式毫秒计, 铝环, 铝板, 小钢柱, 牵引砝码, 游标卡尺和天平等。

四、实验原理:

刚体转动惯量实验仪结构如书本所示。对于空实验台, 转动时体系对转轴的转动惯量记为 I_0 。本实验的待测物体为铝环、铝盘等, 要测其对中心轴的转动惯量 I_x , 可以将其放在承物台上。这时转动体系的转动惯量记为 I , $I = I_0 + I_x$, 则:

$$I_x = I - I_0$$

一般情况下 $a \ll g$, 所以可以近似认为细绳中张力为: $T \approx mg$; 由转动定律得:

$$\begin{cases} m_1 g r - M_\mu = I \cdot \beta & (\text{匀加速运动}) \\ -M_\mu = I \cdot \beta' & (\text{匀减速运动}) \end{cases}$$

所以有:

$$I = \frac{m_1 g r}{\beta - \beta'} \quad (3)$$

由式(3)可以看出, 测定转动惯量的关键是确定角加速度 β 和 β' 。

在转动过程中, 转动体系作匀变速转动, 所以有:

$$\theta = \omega_0 t + 1/2 \cdot \beta t^2 \quad (4)$$

从同一个起始点转过两个不同角位移 θ_1 、 θ_2 , 所用时间为 t_1 、 t_2 , 分别代入式(4)可推得:

$$\text{匀加速角加速度 } \beta = \frac{2(\theta_1 t_2 - \theta_2 t_1)}{t_1^2 t_2 - t_2^2 t_1} \quad (5)$$

$$\text{匀减速角加速度 } \beta' = \frac{2(\theta_1 t_2' - \theta_2 t_1')}{t_1'^2 t_2' - t_2'^2 t_1'} \quad (6)$$

把式(5)、式(6)代入式(3)即可得到 I_0 。

联系方式: _____

指导教师签字: _____

实验报告

⑩

课程名称: 物理实验B1 实验名称: 转动惯量实验 实验日期: 2024 年 5 月 16 日 晚

班 级: 王红梅班 教学班级: 63012317 学 号: 1120231863 姓 名: 左逸龙

页 数: 2/7

座 号: 20

在式(4)中,若初角速度 $\omega_0=0$,则有:

$$\beta = 2\theta/t^2 \quad (7)$$

由式(2)可推得:

$$m_1 = \frac{2I\theta}{gr} \cdot \frac{1}{t^2} + \frac{M_\mu}{gr} = K \cdot \frac{1}{t^2} + m_\mu \quad (8)$$

当 θ, r 确定, M_μ 视为常数,则 m_1 和 $1/t^2$ 呈线性关系,通过测量出 m_1-1/t^2 关系曲线即可确定转动惯量 I 。这种确定转动惯量的方法称为直线拟合法。

五、实验内容及操作步骤

为了产生不同的力臂,塔轮上有5个不同半径的绕线轮,从下到上分15mm、20mm、25mm、30mm、35mm共5挡。光电门由发光器件和光敏器件组成,发光器件的电源由毫秒计提供,它们构成一个光电探测器,光电门将细棒每次经过时的遮光信号转变成电脉冲信号,送到通用电脑式毫秒计。毫秒计记录并存储遮光次数和每次遮光的时刻。

注意:

(1) 线绕不要重叠;

(2) 线与塔轮轴线 OO' 垂直,并且要顺着滑轮槽过渡。

1. 测铝环对中心轴的转动惯量

(1) 把铝环放置在承载台上,先测 I

m_1 为砝码与钩的总质量, r 取25mm,毫秒计设置为“0129”,按下“计时”键,然后令系统在外力矩 M 和摩擦力矩 M_μ 的作用下从静止开始转动。注意,保证砝码在第9次计数后才落地。砝码落地后,系统在 M_μ 的作用下继续转动,直到毫秒计停止计数。

取时间值: t_1 : (3次-1次), t_1' : (23次-21次), 角位移均为 2π 。

t_2 : (9次-1次), t_2' : (29次-21次), 角位移均为 8π 。

按一下“ β ”键,显示“1...”得到 β 值;

再按一下“ β ”键,显示“2...”得到 β' 值,注意 β' 为负值。

将 t_1, t_2, t_1', t_2' 和 β, β' 记录下来。

重复以上步骤,进行多次测量,一共得到7组数据。

联系方式: _____

指导教师签字: _____

实验报告

课程名称: 物理实验B1 实验名称: 转动惯量实验 实验日期: 2024 年 5 月 16 日晚

班级: 王红梅班 教学班级: 63012317 学号: 1120231863 姓名: 左逸龙

页数: 3/7

座号: 20

测量并记录铝环的质量、内径和外径。

推导转动惯量的不确定度公式并进行计算, 得到 $I(u_1)$ 。

(2) 把铝环取下, 测量 I_0 。

测量 I_0 的步骤聚同测量 I 。根据式 (1) 得到 I_L 。

用理论公式计算铝环的转动惯量, 并与实验结果进行比较。

$$I_L = \frac{1}{2} m_2 (r_i^2 + r_o^2) \quad (9)$$

其中 m_2 是铝环的质量, r_i 和 r_o 分别是铝环的内半径和外半径。

2. 测量铝盘对中心轴的转动惯量

(1) 测量 I

把铝盘放在承物台上, 角位移定为 8° , 绕线轮半径取 $r = 25 \text{ mm}$, m_1 值取 15 g , 20 g , 25 g , ..., 50 g 共 8 个值, 分别用毫秒计测出时间值 t , 注意: 为使 $\omega_0 = 0$, 体系由静止一开始运动就要计时 (须放好遮光细棒的位置)。测出 $m_1 - 1/t^2$ 关系曲线, 用直线方程拟合, 可以得斜率 K , 进而求出 $I = Kgr/20$ 。

(2) 测量 I_0

把铝盘从承物台上取下, 实验步骤及数据处理与 (1) 相同。

(3) 计算转动惯量 I_L

根据式 (1) 计算出铝盘对中心轴的转动惯量 I_L , 并与理论结果进行比较。

3. 验证平行轴定理

平行轴定理:

$$I_d = I_c + md^2 \quad (10)$$

式中, I_d 为物体绕转轴的转动惯量, I_c 为转轴通过物体质心时的转动惯量, d 为质心到转轴的距离。

把两个质量 m_0 的钢柱分别放在承物台的小孔 2 和 2' 处, 两个钢柱体系的质心在转动轴上, 它们绕轴转动时的转动惯量记为 I_c , 用测铝环转动惯量的同样方法可测出: $I_1 = I_0 + I_c$ 。然后再把两个钢柱放在 1 和 3 (或 1' 和 3') 的位置上, 这时, 两个钢柱体系的质心与转轴的距离变为 d 。用 I_d 表示钢柱体系对转轴的转动惯量, 也用同样方法测出: $I_2 = I_0 + I_d$ 。

按平行轴定理, 有 $I_2 - I_1 = 2mod^2$ 。分别测出 I_1 , I_2 , m_0 和 d , 验证平行轴定理。

联系方式: _____

指导教师签字: _____

课程名称: 物理实验BI 实验名称: 转动惯量实验 实验日期: 2024年5月16日晚

班级: 王红梅班

教学班级: 63012317

学号: 1120231863

姓名: 左逸龙

页数: 4/7

座号: 20

六、实验数据与思考题

实验二 刚体的转动惯量

1. 铝环对中心轴转动惯量:

铝环半径: $R_{\text{内}} = 105.00(0.02) \text{ mm}$, $R_{\text{外}} = 120.00(0.02) \text{ mm}$

砝码+钩质量: $m_1 = 25.0(0.5) \text{ g}$, 塔轮半径: $r = 25.00(0.02) \text{ mm}$, 包含因子 $K=1.645$

有铝环时: $\theta_1 = 2\pi$, $\theta_2 = 8\pi$; 铝环质量: $m_2 = 494 \text{ g}$ (β 和 β' 只算A类不确定度)

	t_1/s	t_2/s	$\beta/\text{rad}\cdot\text{s}^{-2}$	t'_1/s	t'_2/s	$\beta'/\text{rad}\cdot\text{s}^{-2}$
1			0.61725			-0.06096
2			0.60979			-0.06058
3			0.61596			-0.06107
4			0.61482			-0.05696
5			0.61336			-0.06356
6			0.60875			-0.06209
平均值 $\bar{\beta} = 0.61332 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-2}$				$\bar{\beta}' = -0.06087 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-2}$		
不确定度 A 类分量 $u_A = 0.0014 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-2}$				不确定度 A 类分量 $u_A = 0.0009 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-2}$		
$\beta(u) = 0.6133(0.0014) \text{ rad}\cdot\text{s}^{-2}$				$\beta'(u) = -0.0609(0.0009) \text{ rad}\cdot\text{s}^{-2}$		

系统加铝环转动惯量: $I(u_1) = 0.00908(0.00018) \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

无铝环时:

	t_1/s	t_2/s	$\beta/\text{rad}\cdot\text{s}^{-2}$	t'_1/s	t'_2/s	$\beta'/\text{rad}\cdot\text{s}^{-2}$
1			2.43462			-0.22823
2			2.42038			-0.22822
3			2.39867			-0.22988
4			2.41378			-0.22656
5			2.43585			-0.22524
6			2.41915			-0.22475
平均值 $\bar{\beta} = 2.4204 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-2}$				$\bar{\beta}' = -0.22716 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-2}$		
不确定度 A 类分量 $u_A = 0.006 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-2}$				不确定度 A 类分量 $u_A = 0.0008 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-2}$		
$\beta(u) = 2.420(0.006) \text{ rad}\cdot\text{s}^{-2}$				$\beta'(u) = -0.2272(0.0008) \text{ rad}\cdot\text{s}^{-2}$		

系统转动惯量: $I_0(u_{I_0}) = 0.00231(0.00005) \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

铝环对中心轴的转动惯量: (注意有效数字、科学计数法和单位)

实验值: $I_x = I - I_0$, $u_{I_x} = \sqrt{u_I^2 + u_{I_0}^2}$, $I_x(u_{I_x}) = 0.00677(0.00019) \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

理论值: $I_{\text{理}} = m_2(R_{\text{内}}^2 + R_{\text{外}}^2)/2$, $I_{\text{理}}(u_{I_{\text{理}}}) = 0.006280(0.000004) \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

实验报告

(20)

课程名称: 物理实验B1 实验名称: 转动惯量实验 实验日期: 2024 年 5 月 16 日 晚

班 级: 王红梅班 教学班级: 63012317 学 号: 1120231863 姓 名: 左逸龙

页 数: 5/7

座 号: 20

七、数据处理:

1. 有铝环时: 平均值 $\bar{\beta} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \beta_i = 0.61332 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$, $\bar{\beta}' = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \beta'_i = -0.06087 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$

不确定度A类分量: $u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (\beta_i - \bar{\beta})^2}{6 \times 5}} = 0.0014 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$, $u'_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (\beta'_i - \bar{\beta}')^2}{6 \times 5}} = 0.0009 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$

系统加铝环转动惯量 $I = \frac{m_1 g r}{\bar{\beta} - \bar{\beta}'} = \frac{0.0250 \times 9.8 \times 0.02500}{0.61332 - (-0.06087)} = 0.00908495 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

不确定度: $u_I = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial m_1}\right)^2 \cdot u^2(m_1) + \left(\frac{\partial I}{\partial r}\right)^2 \cdot u^2(r) + \left(\frac{\partial I}{\partial \bar{\beta}}\right)^2 \cdot u^2(\bar{\beta}) + \left(\frac{\partial I}{\partial \bar{\beta}'}\right)^2 \cdot u^2(\bar{\beta}')}$
 $= \sqrt{\left(\frac{-m_1 g r}{\bar{\beta} - \bar{\beta}'}\right)^2 \cdot u^2(m_1) + \left(\frac{m_1 g}{\bar{\beta} - \bar{\beta}'}\right)^2 \cdot u^2(r) + \left(\frac{-m_1 g r}{(\bar{\beta} - \bar{\beta}')^2}\right)^2 \cdot u^2(\bar{\beta}) + \left(\frac{m_1 g r}{(\bar{\beta} - \bar{\beta}')^2}\right)^2 \cdot u^2(\bar{\beta}')}$
 $= 0.00018 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ (其中 $\bar{\beta}, \bar{\beta}'$ 只算A类不确定度)

于是 $I(u_I) = 0.00908(0.00018) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

2. 无铝环时: 平均值 $\bar{\beta} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \beta_i = 2.4204 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$, $\bar{\beta}' = -0.22716 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$

不确定度A类分量: $u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (\beta_i - \bar{\beta})^2}{6 \times 5}} = 0.006 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$, $u'_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (\beta'_i - \bar{\beta}')^2}{6 \times 5}} = 0.0008 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$

系统转动惯量 $I_0 = \frac{m_1 g r}{\bar{\beta} - \bar{\beta}'} = 0.002313 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

不确定度 $u_{I_0} = 0.00005 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ (代入1中推导公式)

于是 $I_0(u_{I_0}) = 0.00231(0.00005) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

3. 最终: 铝环不对中心轴的转动惯量:

实验值: $I_x = I - I_0 = 0.0067715 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ } \Rightarrow 结果: $I_x(u_{I_x}) = 0.00677(0.00019) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
 $u_{I_x} = \sqrt{u_I^2 + u_{I_0}^2} = 0.00019 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

理论值: $I_{理} = \frac{m_2 \cdot (R_A^2 + R_B^2)}{2} = 0.006279975 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

$u_{I_{理}} = \sqrt{\left(\frac{R_A^2 + R_B^2}{2}\right)^2 \cdot u^2(m_2) + (m_2 R_A)^2 \cdot u^2(R_A) + (m_2 R_B)^2 \cdot u^2(R_B)} = 0.000004 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

\Rightarrow 结果: $I_{理}(u_{I_{理}}) = 0.006280(0.000004) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

联系方式:

指导教师签字: _____

实验报告

(20)

课程名称: 物理实验B 实验名称: 转动惯量实验 实验日期: 2024 年 5 月 16 日 晚

班 级: 王红梅班 教学班级: 63012317 学 号: 1120231863 姓 名: 左逸龙

页 数: 6/7

座 号: 20

4. 有铝盘时:

$$\frac{1}{T_1^2} = 0.0106 \text{ s}^{-2}, \quad \frac{1}{T_2^2} = 0.0151 \text{ s}^{-2}, \quad \frac{1}{T_3^2} = 0.0200 \text{ s}^{-2}, \quad \frac{1}{T_4^2} = 0.0243 \text{ s}^{-2},$$

$$\frac{1}{T_5^2} = 0.0283 \text{ s}^{-2}, \quad \frac{1}{T_6^2} = 0.0325 \text{ s}^{-2}, \quad \frac{1}{T_7^2} = 0.0370 \text{ s}^{-2}, \quad \frac{1}{T_8^2} = 0.0427 \text{ s}^{-2}$$

设直线方程为: $m = k \cdot \frac{1}{T^2} + b$, 则:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^8 m_i \cdot \frac{1}{T_i^2} - 8 \cdot \bar{m} \cdot (\bar{\frac{1}{T^2}})}{\sum_{i=1}^8 (\frac{1}{T_i^2})^2 - 8 \cdot (\bar{\frac{1}{T^2}})^2}, \quad b = \bar{m} - k \cdot (\bar{\frac{1}{T^2}})$$

$$\text{又因 } \bar{m} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 m_i = 0.033 \text{ kg}, \quad (\bar{\frac{1}{T^2}}) = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (\frac{1}{T_i^2}) = 0.0263323 \text{ s}^{-2}$$

$$\text{代入方程} \Rightarrow: k = 1.1169, \quad b = 0.0031, \text{ 则方程: } m = 1.1169 \cdot \frac{1}{T^2} + 0.0031 \text{ (kg)}$$

$$\text{系统加铝盘转动惯量: } I = \frac{kgr}{2\theta} = 0.005449 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

5. 无铝盘时:

$$\frac{1}{T_1^2} = 0.0280 \text{ s}^{-2}, \quad \frac{1}{T_2^2} = 0.0407 \text{ s}^{-2}, \quad \frac{1}{T_3^2} = 0.0506 \text{ s}^{-2}, \quad \frac{1}{T_4^2} = 0.0628 \text{ s}^{-2},$$

$$\frac{1}{T_5^2} = 0.0738 \text{ s}^{-2}, \quad \frac{1}{T_6^2} = 0.0830 \text{ s}^{-2}, \quad \frac{1}{T_7^2} = 0.0930 \text{ s}^{-2}, \quad \frac{1}{T_8^2} = 0.1030 \text{ s}^{-2}$$

设直线方程为: $m = k_0 \cdot \frac{1}{T^2} + b_0$ 则:

$$\text{由于 } \bar{m} = 0.033 \text{ kg}, \quad (\bar{\frac{1}{T^2}}) = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (\frac{1}{T_i^2}) = 0.06687 \text{ s}^{-2}$$

$$\text{代入4中方程: } k_0 = 0.4685, \quad b_0 = 0.0012, \text{ 则方程: } m = 0.4685 \cdot \frac{1}{T^2} + 0.0012 \text{ (kg)}$$

$$\text{系统转动惯量: } I_0 = \frac{k_0 gr}{2\theta} = 0.002286 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

6. 最终: 铝盘对中心轴的转动惯量:

$$\text{实验值: } I_x = I - I_0 = 0.003163 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\text{理论值: } I_{\text{理}} = \frac{m_3 R^2}{2} = \frac{0.465 \times 0.1200^2}{2} = 0.00335 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

联系方式: _____

指导教师签字: _____

实验报告

20

课程名称: 物理实验B 实验名称: 转动惯量实验 实验日期: 2024 年 5 月 16 日 晚

班级: 王红梅班 教学班级: 63012317 学号: 1120231863 姓名: 左宸龙

页数: 7/7

座号: 20

八、原始数据

(1) 铝环:

表1: 有铝环时 β, β'

铝环质量 $m_2 = 494g$

$\beta/\text{rad}\cdot\text{s}^{-2}$	0.61725	0.60979	0.61596	0.61482	0.61336	0.60875
$\beta'/\text{rad}\cdot\text{s}^{-2}$	-0.06096	-0.06058	-0.06107	-0.05696	-0.06356	-0.06209

表2: 无铝环时 β, β'

$\beta/\text{rad}\cdot\text{s}^{-2}$	2.43462	2.42038	2.39867	2.41378	2.43585	2.41915
$\beta'/\text{rad}\cdot\text{s}^{-2}$	-0.22823	-0.22822	-0.22998	-0.22656	-0.22524	-0.22475

(2) 铝盘:

表3: 有铝盘时

铝盘质量 $m_3 = 4.659g$

m/g	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0
t/s	9.6994	8.1343	7.0683	6.4089	5.9420	5.5463	5.1962	4.8901

表4: 无铝盘时

m/g	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0
t/s	5.4757	4.9561	4.4463	3.9889	3.6818	3.4704	3.2796	3.1153

联系方式: _____

指导教师签字: _____