

测量物体的转动惯量

【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. 观测刚体转动惯量随其质量，质量分布及转轴不同而改变的情况，验证平行轴定理。
3. 学会使用智能计时计数器测量时间

【实验原理】

1. 恒力矩转动法测定转动惯量的原理

根据刚体的定轴转动定律：

$$M = J\beta \quad (1)$$

只要测定刚体转动时所受的总合外力矩 M 及该力矩作用下刚体转动的角加速度 β ，则可计算出该刚体的转动惯量 J 。

设以某初始角速度转动的空实验台转动惯量为 J_1 ，未加砝码时，在摩擦阻力矩 M_μ 的作用下，实验台将以角加速度 β_1 作匀减速运动，即：

$$-M_\mu = J_1\beta_1 \quad (2)$$

将质量为 m 的砝码用细线绕在半径为 R 的实验台塔轮上，并让砝码下落，系统在恒外力作用下将作匀加速运动。若砝码的加速度为 a ，则细线所受张力为 $T = m(g - a)$ 。若此时实验台的角加速度为 β_2 ，则有 $a = R\beta_2$ 。细线施加给实验台的力矩为 $TR = m(g - R\beta_2)R$ ，此时有：

$$m(g - R\beta_2)R - M_\mu = J_1\beta_2 \quad (3)$$

将 (2)、(3) 两式联立消去 M_μ 后，可得：

$$J_1 = \frac{mR(g - R\beta_2)}{\beta_2 - \beta_1} \quad (4)$$

同理，若在实验台上加上被测物体后系统的转动惯量为 J_2 ，加砝码前后的角加速度分别为 β_3 与 β_4 ，则有：

$$J_2 = \frac{mR(g - R\beta_4)}{\beta_4 - \beta_3} \quad (5)$$

由转动惯量的迭加原理可知，被测试件的转动惯量 J_3 为：

$$J_3 = J_2 - J_1 \quad (6)$$

测得 R 、 m 及 β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 ，由 (4)，(5)，(6) 式即可计算被测试件的转动惯量。

2. β 的测量

实验中采用智能计时计数器计录遮挡次数和相应的时间。固定在载物台圆周边缘相差 π 角的两遮光细棒，每转动半圈遮挡一次固定在底座上的光电门，即产生一个计数光电脉冲，计数器计下遮挡次数 k 和相应的时间 t 。若从第一次挡光 ($k=0$, $t=0$) 开始计次，计时，且初始角速度为 ω_0 ，则对于匀变速运动中测量得到的任意两组数据 (k_m , t_m)、(k_n , t_n)，相应的角位移 θ_m 、 θ_n 分别为：

$$\theta_m = k_m \pi = \omega_0 t_m + \frac{1}{2} \beta t_m^2 \quad (7)$$

$$\theta_n = k_n \pi = \omega_0 t_n + \frac{1}{2} \beta t_n^2 \quad (8)$$

从 (7)、(8) 两式中消去 ω_0 ，可得：

$$\beta = \frac{2\pi(k_n t_m - k_m t_n)}{t_n^2 t_m - t_m^2 t_n} \quad (9)$$

由 (9) 式即可计算角加速度 β 。

3. 平行轴定理

理论分析表明，质量为 m 的物体围绕通过质心 O 的转轴转动时的转动惯量 J_0 最小。当转轴平行移动距离 d 后，绕新转轴转动的转动惯量为：

$$J = J_0 + m d^2 \quad (10)$$

【实验仪器】



图 1 转动惯量实验组合仪




图 2 智能计时计数器

转动惯量实验仪如图 1 所示，绕线塔轮通过特制的轴承安装在主轴上，使转动时的摩擦力矩很小。塔轮


半径为 15, 20, 25, 30, 35mm 共 5 挡, 可与大约 5g 的砝码托及 1 个 5g, 4 个 10g 的砝码组合, 产生大小不同的力矩。载物台用螺钉与塔轮连接在一起, 随塔轮转动。随仪器配的被测试样有 1 个圆盘, 1 个圆环, 两个圆柱; 试样上标有几何尺寸及质量, 便于将转动惯量的测试值与理论计算值比较。圆柱试样可插入载物台上的不同孔, 这些孔离中心的距离分别为 45,60,75,90,105mm, 便于验证平行轴定理。铝制小滑轮的转动惯量与实验台相比可忽略不计。一只光电门作测量, 一只作备用, 可通过智能计时计数器上的按钮方便的切换。

图 2 所示的智能计时计数器可测量时间、速度、加速度等多种物理量。在本实验中, 主要利用单电门、多脉冲测量时间。

上电开机后显示“智能计数计时器 成都世纪中科”画面延时一段时间后, 显示操作界面:

上行为测试模式名称和序号, 例: “1 计时”  表示按模式选择/查询下翻按钮选择测试模式。

下行为测试项目名称和序号, 例: “1—2多脉冲”  表示项目选择/查询上翻按钮选择测试项目。

选择好测试项目后, 按确定键, LCD 将显示“选 A 通道测量”  然后通过按模式选择/查询下翻按钮和项目选择/查询上翻按钮进 A 或 B 通道的选择, 选择好后再次按下确认键即可开始测量。一般测量过程中将显示“测量中*****”, 测量完成后自动显示测量值, 若该项目有几组数据, 可按查询下翻按钮或查询上翻按钮进行查询, 再次按下确定键退回到项目选择界面。如未测量完成就按下确定键, 则测量停止, 将根据已测量到的内容进行显示, 再次按下确定键将退回到测量项目选择界面。

【实验内容】

1. 实验准备

在桌面上放置 ZKY-ZS 转动惯量实验仪, 并利用基座上的三颗调平螺钉, 将仪器调平。将滑轮支架固定在实验台面边缘, 调整滑轮高度及方位, 使滑轮槽与选取的绕线塔轮槽等高, 且其方位相互垂直, 如图 1 所示。并且用数据线将智能计时计数器中 A 或 B 通道与转动惯量实验仪其中一个光电门相连。

2. 利用天平测量砝码和样品的质量, 游标卡尺测量样品的尺寸。

3. 测量并计算实验台的转动惯量 J_1

(1) 测量 β_1

上电开机后 LCD 显示“智能计数计时器 成都世纪中科”欢迎界面延时一段时间后, 显示操作界面:

- 选择“计时 1—2 多脉冲”。
- 选择通道。
- 用手轻轻拨动载物台, 使实验台有一初始转速并在摩擦阻力矩作用下作匀减速运动。
- 按确认键进行测量。
- 载物盘转动 15 圈后按确认键停止测量。
- 查阅数据, 并将查阅到的数据记入表 1 中;
- 采用逐差法处理数据, 将第 1 和第 5 组, 第 2 和第 6 组……, 分别组成 4 组, 用 (9) 式计算对应各

组的 β_1 值，然后求其平均值作为 β_1 的测量值。

h) 按确认键后返回“计时 1—2 多脉冲”界面。

(2) 测量 β_2

a) 选择塔轮半径 R 及砝码质量，将 1 端打结的细线沿塔轮上开的细缝塞入，并且不重叠的密绕于所选定半径的轮上，细线另 1 端通过滑轮后连接砝码托上的挂钩，用手将载物台稳住；

b) 重复 (1) 中的 2、3、4 步

c) 释放载物台，砝码重力产生的恒力矩使实验台产生匀加速转动；

记录 8 组数据后停止测量。查阅、记录数据于表 1 中并计算 β_2 的测量值。由 (4) 式即可算出 J_1 的值。

4. 测量并计算实验台放上试样后的转动惯量 J_2 ，计算试样的转动惯量 J_3 并与理论值比较

将待测试样放上载物台并使试样几何中心轴与转轴中心重合，按与测量 J_1 同样的方法可分别测量未加砝码的角加速度 β_3 与加砝码后的角加速度 β_4 。由 (5) 式可计算 J_2 的值，已知 J_1 、 J_2 ，由 (6) 式可计算试样的转动惯量 J_3 。

已知圆盘、圆柱绕几何中心轴转动的转动惯量理论值为：

$$J = \frac{1}{2}mR^2 \quad (11)$$

圆环绕几何中心轴的转动惯量理论值为：

$$J = \frac{m}{2}(R_{\text{外}}^2 + R_{\text{内}}^2) \quad (12)$$

计算试样的转动惯量理论值并与测量值 J_3 比较，计算测量值的相对误差：

$$E = \frac{J_3 - J}{J} \times 100\% \quad (13)$$

5. 验证平行轴定理

将两圆柱体对称插入载物台上与中心距离为 d 的圆孔中，测量并计算两圆柱体在此位置的转动惯量。将测量值与由 (11)、(10) 式所得的计算值比较，若一致即验证了平行轴定理。

理论上，同一待测样品的转动惯量不随转动力矩的变化而变化。

6. 利用控制变量法，改变塔轮半径或砝码质量，保持其他实验条件不变，进行测量并对数据进行分析，探索规律，寻求发生误差的原因，探索测量的最佳实验条件。

【思考题】

1. 分析影响实验精度的各种因素，如何减少这些因素的影响？
2. 是否可以通过实验和作图，既求出转动惯量，又求出摩擦力矩？