

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】

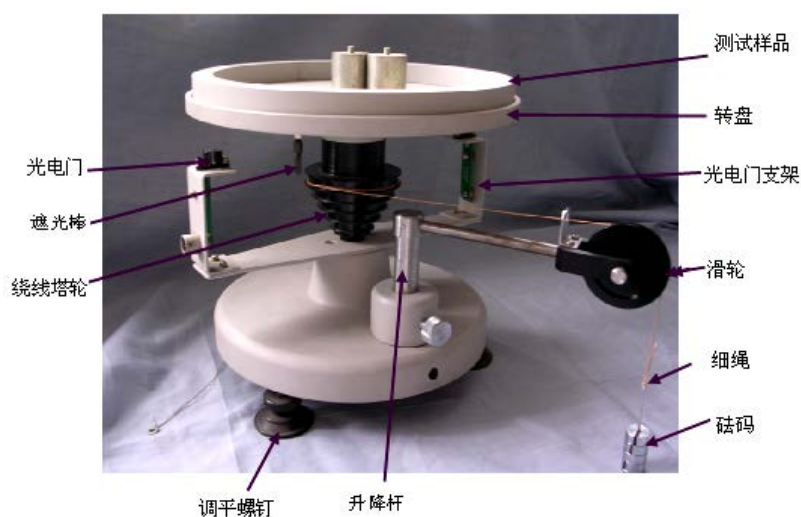


图 1 转动惯量实验组合仪




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】

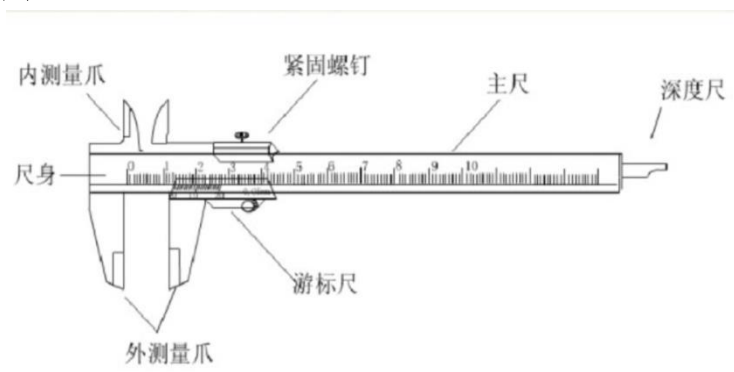
1. 分析影响实验精度的各种因素，如何减少这些因素的影响？
2. 是否可以通过实验和作图，既求出转动惯量，又求出摩擦力矩？

转动惯量测量实验注意要点

1. 测量圆环内外径

仔细观察游标卡尺的构造，分辨使用的游标卡尺上哪部分是内测量爪，哪部分是外测量爪？

并思考用实验室中游标卡尺的内测量爪测量圆环内径的时候会对数据造成什么影响（已知闭合时内测量爪长 1cm）。



2. 测量圆柱直径

游标卡尺的一对内/外测量爪之间均有缝隙，所以我们测量圆柱半径的时候要注意什么？

3. 称量重量

使用电子天平称量重量的时候先查看该仪器不同称量范围的精确度，从而确定称量圆环、砝码和圆柱体时天平的精确度。测圆环时侧立。

4. 绕线

绕线前要确保绕线整体平滑、中间无打结，绕好后确保无重叠部分且绕线圈数在四圈以上（10 个数据均有效需要 5 圈以上），再确保细线不与校准圆孔接触。记住自己绕线滚轮位置，保持一致。利用砝码自重绕线会更加轻松。

5. 验证平行轴定理

验证平行轴定理时，仅测量圆柱体位于样品台两端的数据，再与理论值比较即可，不需要再测量圆柱体在样品台中心的数据（误差较大）。

6. 测阻力矩

测量阻力矩时，轻轻拨动即可，确保其旋转 5 圈以上即可，不可过快。

7. 调平--水平仪