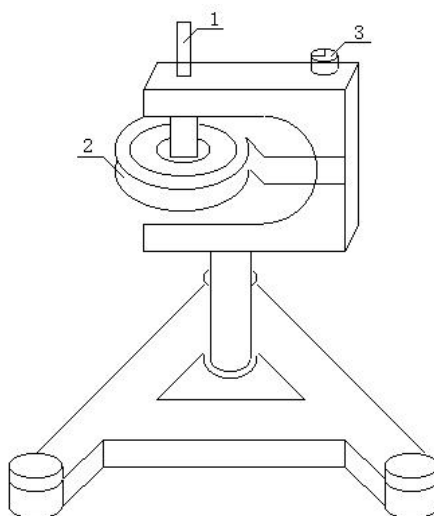


扭摆法测定物体转动惯量

【实验目的】

- 1、测定扭摆的仪器常数（弹簧的扭转常数）K。
- 2、测定几种不同形状物体的转动惯量, 并与理论值进行比较。
- 3、验证转动惯量平行轴定理。

【实验原理】



图（1）

扭摆的构造如图 1 所示，在垂直轴 1 上装有一根薄片状的螺旋弹簧 2，用以产生恢复力矩。在轴的上方可以装上各种待测物体。垂直轴与支座间装有轴承，以降低摩擦力矩。3 为水平仪，用来调整系统平衡。

将物体在水平面内转过一角度 θ 后，在弹簧的恢复力矩作用下物体就开始绕垂直轴作往返扭转运动。根据虎克定律，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

$$M = -K \theta \quad (1)$$

式中， K 为弹簧的扭转常数，根据转动定律

$$M = I \beta \quad \text{即} \quad \beta = \frac{M}{I} \quad (2)$$

式中， I 为物体绕转轴的转动惯量， β 为角加速度，由上式得

$$\beta = \frac{d^2 \theta}{dt^2} = -\frac{K}{I} \theta = -\omega^2 \theta$$

上式 $\omega^2 = \frac{K}{I}$, 忽略轴承的磨擦阻力矩

上述方程表示扭摆运动具有角简谐振动的特性, 角加速度与角位移成正比, 且方向相反。此方程的解为:

$$\theta = A \cos(\omega t + \phi)$$

式中, A 为谐振动的角振幅, ϕ 为初相位角, ω 为角速度, 此谐振动的周期为

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{K}} \quad (3)$$

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

本实验用一个几何形状规则的物体, 它的转动惯量可以根据它的质量和几何尺寸用理论公式直接计算得到, 再算出本仪器弹簧的 K 值。

如先测载物盘转动的周期 T_0 有 $T = 2\pi \sqrt{\frac{I_0}{K}}$ (4)

再测载物盘加塑料圆柱转动的周期 T_1 有 $T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{I_0 + I_1'}{K}}$ (5)

I_1' 为塑料圆柱转动惯量理论计算值 $I_1' = \frac{1}{2}mr^2$ (6)

由 (4) 和 (5) 式可得 $K = 4\pi^2 \frac{I_1'}{T_1^2 - T_0^2} Nm$

若要测定其它形状物体的转动惯量, 只需将待测物体安放在本仪器顶部的各种夹具上, 测定其摆动周期, 由公式 (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 时, 当转轴平行移动距离 X 时, 则此物体对新轴线的转动惯量变为 $I_0 + mx^2$ 。称为转动惯量的平行轴定理。

【实验仪器】

1. 扭摆

2、几种待测转动惯量的物体:

(空心金属圆柱体、实心塑料圆柱体、木球、验证转动惯量平行轴定理用的细金属杆, 杆上有两块可以自由移动的金属滑块)。

3、电子天平

4、游标卡尺

5、转动惯量测试仪

由主机和光电传感器两部分组成。

主机采用新型的单片机作控制系统，用于测量物体转动和摆动的周期，以及旋转体的转速，能自动记录、存贮多组实验数据并能够精确地计算多组实验数据的平均值。

光电传感器主要由红外发射管和红外接收管组成，将光信号转换为脉冲电信号，送入主机工作。因人眼无法直接观察仪器工作是否正常，但可用遮光物体往返遮挡光电探头发射光束通路，检查计时器是否开始计数和到预定周期数时，是否停止计数。为防止过强光线对光探头的影响，光电探头不能置放在强光下，实验时采用窗帘遮光，确保计时的准确。

使用方法

(1) 调节光电传感器在固定支架上的高度，使被测物体上的挡光杆能自由往返地通过光电门，再将光电传感器的信号传输线插入主机输入端（位于测试仪背面）。

(2) 开启主机电源，摆动指示灯亮，参量指示为“P₁、数据显示为‘----’”。

(3) 本机默认扭摆的周期数为 10，如要更改，可参照仪器使用说明 3，重新设定。更改后的周期数不具有记忆功能，一旦切断电源或按“复位”键，便恢复原来的默认周期数。

(4) 按“执行”键，数据显示为“000.0”，表示仪器已处在等待测量状态，此时，当被测的往复摆动物体上的挡光杆第一次通过光电门时，由“数据显示”给出累计的时间，同时仪器自行计算周期 C₁ 予以存贮，以供查询和作多次测量求平均值，至此，P₁（第一次测量）测量完毕。

(5) 按“执行”键，“P₁”变为“P₂”，数据显示又回到“000.0”，仪器处在第二次待测状态，本机设定重复测量的最多次数为 5 次，即（P₁, P₂...P₅）。通过“查询”键可知各次测量的周期值 C_i（i = 1, 2...5）以及它们的平均值 C_A。

【实验步骤】

1. 测出塑料圆柱体的外径、金属圆筒的内、外径、木球直径、金属细长杆长度及各物体质量（各测量 3 次）。

2. 调整扭摆基座底脚螺丝，使水平仪的气泡位于中心。

3. 装上金属载物盘，并调整光电探头的位置使载物盘上的挡光杆处于其缺口中央且能遮住发射、接收红外光线的小孔。测定摆动周期 T₀。

4. 将塑料圆柱体垂直放在载物盘上，测定摆动周期 T₁。

5. 用金属圆筒代替塑料圆柱体，测定摆动周期 T₂。

6. 取下载物金属盘、装上木球，测定摆动周期 T_3 。（在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 。（在计算金属细杆的转动惯量时，应扣除支架的转动惯量）。

8. 将滑块对称放置在细杆两边的凹槽内（见图 2）此时滑块质心离转轴的距离分别为 5.00，10.00，15.00，20.00，25.00 厘米，测定摆动周期 T 。验证转惯量平行轴定理。（在计算转动惯量时，应扣除支架的转动惯量）。

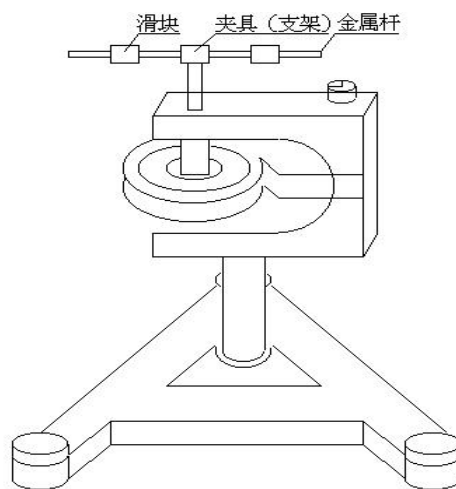


图 (2)

物体名称	质量 (Kg)	几何尺寸 (10^{-2}m)		周期 (S)	转动惯量理论值 ($10^{-n}\text{Kg}\text{m}^2$)	实验值 ($10^{-n}\text{Kg}\text{m}^2$)
金属载物盘				T_0		$I_0 = \frac{I'_0 T_0^2}{T_1^2 - T_0^2}$
				$\bar{T}_0$		
塑料圆柱		D_1		T_1	$I'_1 = \frac{1}{8} m D_1^2$	$I_1 = \frac{K T_1^2}{4\pi^2} - I_0$
		$\bar{D}_1$		$\bar{T}_1$		

金属圆筒		D _外		T ₂		$I_2' = \frac{1}{8}m(D_{外}^2 + D_{内}^2)$	$I_2 = \frac{KT_2^2}{4\pi^2} - I_O$
		$\overline{D}_{外}$		$\overline{T}_2$			
		D _内					
$\overline{D}_{内}$							
木球		D _直		T ₃		$I_3' = \frac{1}{10}mD_{直}^2$	$I_3 = \frac{K}{4\pi^2}T_3^2 - I_{支座}$
		$\overline{D}_{直}$		$\overline{T}_3$			
金属细杆		L		T ₄		$I_4' = \frac{1}{12}mL^2$	$I_4 = \frac{K}{4\pi^2T_4^2} - I_{夹具}$
		$\overline{L}$		$\overline{T}_4$			

表 2

$X(10^{-2}m)$	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00
摆动周期 T (S)					
$\bar{T}$ (S)					
实验值 ($10^{-4}kgm^2$) $I = \frac{K}{4\pi^2}T^2$					
理论值 ($10^{-4}kgm^2$) $I' = I'_4 + I_{夹具}$ $+ 2mx^2 + I_5$					
百分差					

I_5 为两滑块通过块心转轴的转动惯量理论值

$$I_5 = 2 \left[\frac{1}{16} m_{\text{滑块}} (D_{\text{滑块外}}^2 + D_{\text{滑块内}}^2) + \frac{1}{12} m_{\text{滑块}} L_{\text{滑块}}^2 \right]$$

【思考题】

- 1、推导各种形状物体的转惯量理论计算公式
- 2、滑块不对称时平行轴定理的验证
- 3、分析实测值的不确定度
- 4、在扭摆实验中，圆柱的摆动周期和转动惯量测量分别属于
(A) 直接测量和间接测量 (B) 间接测量和直接测量
(C) 直接测量和直接测量 (D) 间接测量和间接测量
- 5、在用扭摆测定物体转动惯量实验中，测定木球质量时是否应将夹具取下。
- 6、在用扭摆测定物体转动惯量实验中，扭摆系统角位移变化方式是否为简谐振动。
- 7、在用扭摆测定物体转动惯量实验中，弹簧扭转常数越大，摆动周期是否越大。

【附录】

细杆夹具转动惯量实验值

$$\begin{aligned} I &= \frac{K}{4\pi^2} T^2 - I_0 = \frac{3.567 \times 10^{-2}}{4\pi^2} \times 0.741^2 - 4.929 \times 10^{-4} \\ &= 0.321 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2 \end{aligned}$$

球支座转动惯量实验值

$$\begin{aligned} I &= \frac{K}{4\pi^2} T^2 - I_0 = \frac{3.567 \times 10^{-2}}{4\pi^2} \times 0.740^2 - 4.929 \times 10^{-4} \\ &= 0.187 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2 \end{aligned}$$

测单个滑块与载物盘转动周期 $T=0.767\text{S}$ 可得到：

$$\begin{aligned} I &= \frac{K}{4\pi^2} T^2 - I_0 = \frac{3.567 \times 10^{-2}}{4\pi^2} \times 0.767^2 - 4.929 \times 10^{-4} = 0.386 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2 \\ I_5 &= 2I = 0.772 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2 \end{aligned}$$

【实验注意事项】

1. 由于弹簧的扭转常数 K 值不是固定常数，它与摆动角度略有关系，摆角在 90° 左右基本相同，在小角度时变小。
2. 为了降低实验时由于摆动角度变化过大带来的系统误差，在测定各种物体的摆动周期时，摆角不宜过小，摆幅也不宜变化过大。一般 90° 左右为宜。
3. 光电探头宜放置在挡光杆平衡位置处，挡光杆不能和它相接触，以免增大摩擦力矩。
4. 机座应保持水平状态。
5. 在安装待测物体时，其支架必须全部套入扭摆主轴，并将止动螺丝旋紧，否则扭摆不能正常工作。
6. 在称金属细杆与木球的质量时，必须将支架取下，否则会带来极大误差。

TH-I 型智能转动惯量实验仪

使用说明

一、产品简介

TH-2 型转动惯量测试仪是我企业研制、开发的智能化物理实验仪器，广泛用于高校物理实验室测量物体转动和摆动的周期以及旋转体的转速。能自动记录、存贮，处理多组实验数据，并能精确计算出多组实验数据的平均值。

TH-2 型转动惯量测试仪采用新型的单片机作控制系统，具有精度高、功能强、产品性能稳定、可靠等优点。

二、性能指标

- | | |
|-----------|---------------------------|
| 1. 供电电源 | AC220V $\pm$ 10% 50Hz |
| 2. 信号输入方式 | 光电传感器信号输入或 TTL、CMOS 的脉冲电平 |
| 3. 显示方式 | 参量、数据通过数码管显示，状态指示由发光二极管指示 |
| 4. 操作方法 | 键盘操作 |
| 5. 计时精度 | 0.001S |

6. 最大计时	1000.000S
7. 功耗	<1W
8. 环境温度	-5℃——+40℃
9. 体积	220mm×204mm×100mm (L×W×H)

三、使用说明

TH-2 型转动惯量测试面板图如图 1 所示。

1. 开机后扭摆指示灯亮，显示“P1——”，若情况异常（死机），可按复位键，即可恢复正常。按键“功能”、“置数”、“执行”、“查询”、“自检”、“返回”有效。开机默认状态为“扭摆”，默认周期数为 10，执行数据皆空，为 0。

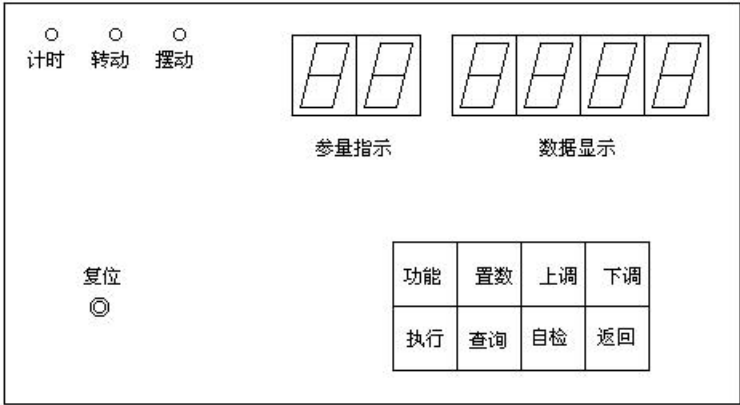


图 （1）

2. 功能选择

按“功能”键，可以选择扭摆、转动两种功能（开机及复位默认值为扭摆）。

3. 置数

按“置数”键，显示“n=10”，按“上调”键，周期数依次加 1，按“下调”键，周期数依次减 1，周期数能在 1—20 范围内任意设定，再按“置数”键确认，显示“F1 end”或“F2 end”，周期数一旦预置完毕，除复位和再次置数外，其它操作均不改变预置的周期数。

4. 执行

以扭摆为例

将刚体水平旋转约 90° 后让其自由摆动，按“执行”键，即时仪器显示“P1 000.0”，当被测物体上的挡光杆第一次通过光电门时开始计时,同时,状态指示的计时灯点亮,随着刚

体的摆动, 仪器开始连续计时, 直到周期数等于设定值时, 停止计时, 计时指示灯随之熄灭, 此时仪器显示第一次测量的总时间. 重复上述步骤, 可进行多次测量. 本机设定重复测量的最大次数为 5 次, 即 (P1、P2、P3、P4、P5)。执行键还具有修改功能, 例如要修改第三组数据, 按执行键直到出现 “P3 000.0” 后, 重新测量第三组数据。

5. 查询

按 “查询” 键, 可知每测量的周期 (C1-C5) 以及多次测量的周期平均值 CA, 及当前的周期数 n, 若显示 “N0” 表示没有数据。

6. 自检

按 “自检” 键, 仪器应依次显示 “n=N-1”, “2n=N-1”, “SC GOOD”, 并自动复位到 “P1—”, 表示单片机工作正常。

7. 返回

按 “返回” 键, 系统将无条件的回到最初状态, 清除当前状态的所有执行数据, 但预置周期数不改变。

8. 复位

按 “复位” 键, 实验所得数据全部清除, 所有参量恢复初始时的默认值。

四、显示信息说明

P1—— 初始状态

n=N-1 转动计时的脉冲次数 N 与周期数 n 的关系

2n=N-1 扭摆计时的脉冲次数 N 与周期数 n 的关系

n=10 当前状态的预置周期数

F1 end 扭摆周期预置确定

F2 end 转动周期预置确定

Px 000.0 执行第 X 次测量 (X 为 1—5)

Cx xxx.x 查询第 X 次测量 (X 为 1—5, A)

SC Good 自检正常

五、注意事项

1. 在使用过程中, 若遇强磁场等原因而使系统死机, 请按 “复位” 键或关闭电源重新启动。但以前的一切数据都将丢失。

2. 为提高测量精度, 应先让扭摆自由摆动, 然后按 “执行” 键进行计时。

