

# 摩擦综合实验

摩擦是一个比较复杂的问题，它所涉及的相关因素也较多(如物体的材质、表面粗糙度、相对运动速度、接触面积以及环境的温度)。同时摩擦在我们日常生活和工作中无处不在(如人的行走、夹取物体以及各种机械的传送带)，因此对摩擦问题的研究就显得非常重要。在理论力学的课程学习中，摩擦是比较抽象而又难于理解的内容，为了提高学生的感性认识，可以通过摩擦实验来使学生更好地理解其本质。本实验用 MC50 摩擦实验装置来完成。

## 一、实验内容

本实验主要是测定木材与铁、木材与木材以及铁与铁之间的静、动摩擦系数，以及演示当滑块高度较大时，不同载荷下滑块翻倒和滑动的情况。

- (1) 通过改变滑板的倾角，测量不同材料之间的静摩擦系数。
- (2) 通过测量两点之间的平均加速度，测量不同材料之间的动摩擦系数。
- (3) 当滑块高度较高，加载不同载荷时，其在自重作用下，测定滑块向下翻倒和滑动的最大倾角以及滑块向上翻倒和滑动的最大倾角。

## 二、实验装置

MC50摩擦实验装置是由滑板倾角调整机构、角度显示机构和数字测时器三部分组成。通过滑块在不同材质的滑道上运动，可以测定静、动摩擦系数及物体的加速度。并可以进行在不同情况下物体滑动、翻倒的演示。

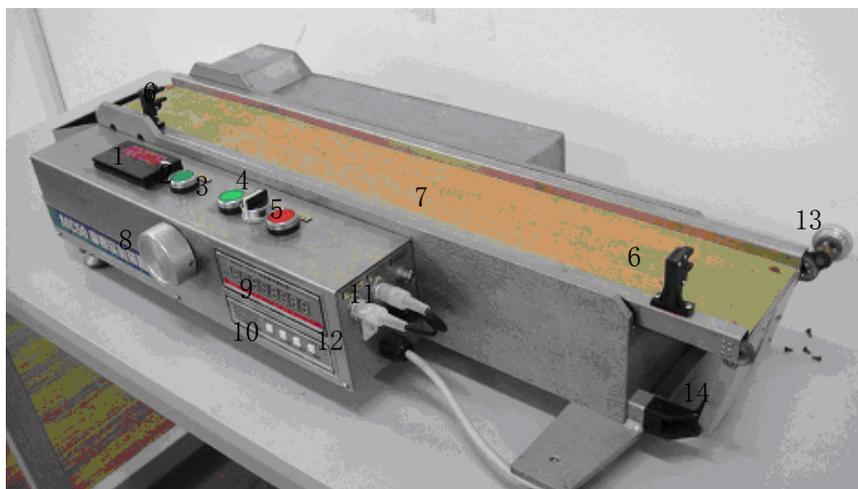


图 1 MC50 摩擦实验装置图

- 1 滑道角度显示仪 2 手动微调按钮 3 电动调节按钮 4 电动调节角度(与 3 配合) 5 角度调节电源开关 6 光电门 7 滑道 8 手动微调(与 2 配合) 9 计时器显示仪 10 计时器操作键 11 光电门接入端口 12 计时器电源开关 13 活动平台调节仪 14 活动平台

## 三、实验原理

### 1 滑道倾角调整机构

该部分是实验装置的基础：由机架、滑道、减速电机、电磁离合器、蜗轮箱等组成。在调整滑道倾角的传动方式上，采用蜗轮蜗杆传动，用来传递两交错轴之间的运动和动力。该传动平稳，运动精度高，噪音和振动较小，并能实现0~50度设定工作范围内的任意角度调整。调整分为电机快速调整和手动慢速微调二部分。

### 1.1 电机快速调整

由电机传递动力，经电机减速部分减速后输出，通过电磁离合器带动蜗杆转动，由此带动蜗轮传动，蜗轮轴输出使滑道转轴运动，实现滑道的倾角变化。操作步骤：将电线插头插入交流 220V, 50HZ 电源插座，按下实验装置操作面板上总电源开关⑤，依次按下机动电源开关③，使联接电机轴的电磁离合器接通，然后转动滑道升降开关④，向左旋转滑道升起，倾角增大。向右旋转滑道倾角减小，直至为零。当滑道倾角接近预设角度时，应当立即关闭滑道升降开关，避免滑道倾角超过预设角度。随后关闭机动电源开关，放开电机轴的电磁离合器，为手动微调作准备。

### 1.2 手动慢速微调

手动微调由手动轮、传动轴、一组圆锥齿轮、电磁离合器和一组直齿圆锥齿轮组成。在使用手轮作慢速微调之前，需按下手动电源开关②，接通手动轴的电磁离合器带动圆柱直齿轮传动，直齿轮转动使蜗杆轴旋转，由蜗轮轴输出使滑道转轴运动，改变滑道的倾角。此传动为二级减速运动，减速比大，旋转手轮⑧可作滑道慢速微调。向左旋转滑道升起，倾角增大。向右旋转滑道倾角减小。当调整至所需倾角时，应关闭手动电源开关，放开手动轴的电磁离合器，为下一步操作做准备。

## 2 角度显示机构

通过角度传感器和显示仪表（如图 2），即时反映滑道倾角的变化值。在转轴输出部位设立角度传感器连接部分，以及传感器安装座，机架上确定固定位置，将转动轴、角度传感器、机架连接为一体；且保持角度传感器与转动轴之间的同轴度，与机架的垂直度。当转轴带动滑道转动时，角度传感器将测得数据传送到显示器，即可反映出滑道的倾斜角度，角度显示精度值为 0.01 度，大大提高测量精度，减少实验角度测量的误差。该部分电源在总电源开通时开通。在使用本实验装置前，须将工作台面水平调整，以免引起滑道倾角的累计误差。



图 2 角度操作显示面板

## 3 数字测时器

测时器有二路光电门信号输入（电脉冲信号输入），机器连接的光电门被挡光时，测时器可测得二次挡光之间的时间（范围可在 50 $\mu$ s~99s 之间）。该测时器还具有数据的存储功能和运算功能，可直接测出平均速度和平均加速度。

测时范围：50 $\mu$ s~99s

分辨率：1 $\mu$ s

精度：50 $\mu$ s（最大时间测量范围为 1s 时）

0.5ms（最大时间测量范围为 10s 时）

## 4 测时器工作过程

在接通电源后，通过面板“选择”键可选择不同的功能，使测时器处于不同的工作方式。见图 3。

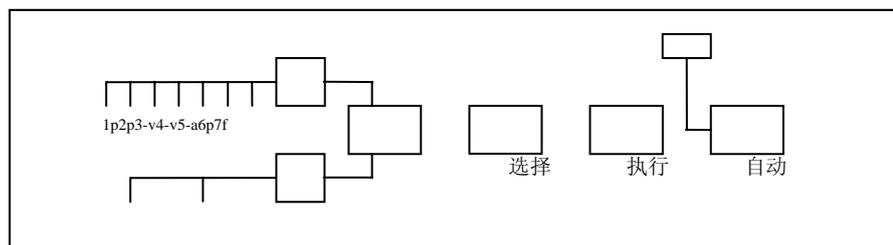


图 3. 键盘板

(a). 电源接通显示 HELLO 时，在键盘板（图 3）上按“选择”键应出现：1pr，以后每按一次选择键应分别出现：2pr、3—V、4—V、5A。以上显示表示分别进入测时器的五种功能。

(b). 测一个时间间隔：1pr

当显示为 1pr 时，按“执行”键就进入测一个时间间隔操作。

当滑块通过光电门 A 或光电门 B 后（开口挡光片通过一次，不开口挡光片通过二次），显示板就显示  $\Delta t$ ，单位为 ms。

例 1：使用光电门 A，安装开口挡光片，可测试图中的  $\Delta t$ 。

例 2：使用光电门 A 和光电门 B，安装不开口挡光片，可测出滑块移动自 A 至 B 的时间，如图 4。

完成一次操作后再按“执行”键则重新测一个时间间隔。

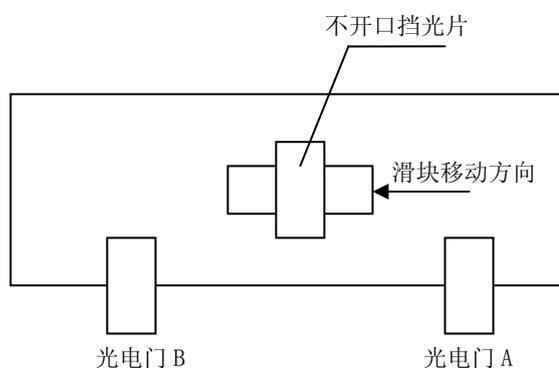


图 4.

(c). 测二个时间间隔：2pr

通过按“选择”键使显示为 2pr 时，按“执行”键即进入测二个时间间隔功能，显示板显示消失。等待光电门 A 或光电门 B 的二次挡光（指开口挡光片，下同）。二次挡光后屏幕显示后一次时间间隔  $\Delta t_2$ ，再按“选择”键出现第一次挡光  $\Delta t_1$ 。每按一次选择键交替显示  $\Delta t_1$  和  $\Delta t_2$ 。

完成一次 2pr 功能后再按“执行”键则再作一次 2pr 测时。

(d). 测一个速度 3—V

当滑块上安装是开口挡光片时，可测出滑块运动的平均速度。进入 3—V 显示后，按执行键，屏幕出现 2.00 提示必须使用宽度  $\Delta s$  为 2.00cm 的开口挡光片。如不想使用 2cm 挡光片还可使用 2.2cm、2.4cm 等多种规格的标准挡片，只需再按选择键便可依次选择上述几种规格的挡光片，以便求出滑块的平均速度。

选择好挡光片宽度后按“选择”键则进入测速。类似 1ps 挡光一次后屏幕显示平均速度单位为 mm/s。

再按执行键可进入下次测速。

(e). 测二个速度 4—V

当显示为 4—V 即进入测二个速度功能。类似于 3—V 按键后显示 2.00，亦可如前例再按“选择”键，选择挡光片宽度。再按“执行”键进入测速，此时显示消失。等待二次挡光后，屏幕显示测得速度 V1。按选择键可显示 V2。此时再按执行键，又重复上述测速动作。

(f). 测加速度 5A

当显示为 5A 即进入测加速度功能，类似于 3—V 按键后显示 2.00，亦可如前操作选择其它挡光片宽度  $\Delta s$ 。再按“执行”键，显示消失。等待光电门 A 和 B 的二次挡光（测加速度时使用一块装有开口挡光片的滑块）。二次挡光后，出现数据显示，即 V2，按选择键显示 V1，再按选择键交替显示 V2、V1；按“执行”键则显示  $\bar{a}$ （按该键后，则 V2、V1 清除）即为滑块的平均速度  $\bar{a}$ 。计算  $\bar{a}$  的公式为：

$$\bar{a} = \frac{V2 - V1}{\Delta t}$$

式中： $\bar{a}$ ——平均加速度，单位  $\text{mm/s}^2$   
 V2、V1——滑块通过光电门时的速度；  
 $\Delta t$ ——滑块在光电门 A、B 之间运动的时间。

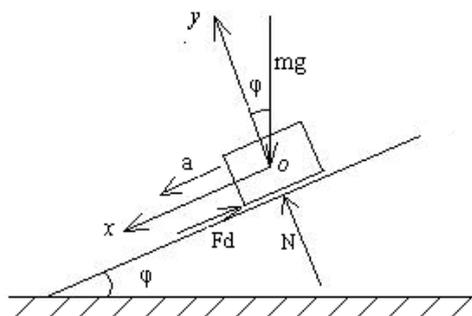


图 5 滑块受力分析图

### 5. 滑动摩擦系数计算公式推导

假设质量为  $m$  的滑块沿滑道滑下，滑道的倾角为  $\varphi$ ，以沿滑道向下的方向为  $x$  轴方向，垂直于滑道向上的方向为  $y$  轴方向，其受力分析如图 5 所示。由于静摩擦系数  $f_s = \tan \theta$  ( $\theta$  为摩擦角)，因此当  $\varphi > \theta$  时，滑块可沿滑道下滑。下面导出动摩擦系数的表达式。

$$\sum F_y = 0 \quad N = mg \cos \varphi \quad (1)$$

$$\sum F_x = ma \quad ma = mg \sin \varphi - N f_d \quad (2)$$

将 (1) 式代入 (2) 得动摩擦系数的计算公式

$$f_d = \tan \varphi - \frac{a}{g \cos \varphi} \quad (3)$$

这里， $f_d$  是动摩擦系数、 $a$  是滑块下滑的加速度、 $g$  是重力加速度。

## 四、实验步骤

### 1. 静摩擦系数实验

- (a) 调整好滑道倾角角度（参见实验原理第一部分），以滑块放在滑道上不下滑时为准；
- (b) 旋转手动微调按钮，将滑道的倾角慢慢调大，直到滑块达到将滑未滑时停止，记下此时的滑道倾角，即为滑块的摩擦角；
- (c) 将所测得的倾角代入静摩擦系数公式，即可得到所测两物理间静摩擦系数。

### 2. 动摩擦系数实验

- (a) 调整好滑道倾角角度（参见实验原理第一部分），在滑块上安装好挡光片。并使挡光片正好从光电门支架中穿过。见图 6

测时器将测出移动的挡光片二次挡光的时间间隔 $\Delta t$ 。

- 注：1). 测定加速度时必须使用开口挡光片。  
2).  $\Delta t$  为滑块通过 $\Delta s$  距离所需的时间。见图 7。  
3). 将光电门连线插头插在“光电门 A”和“光电门 B”插座上。  
4). 标准挡光片的宽度 $\Delta s$  为 2.00cm、2.20cm、2.40cm 等。

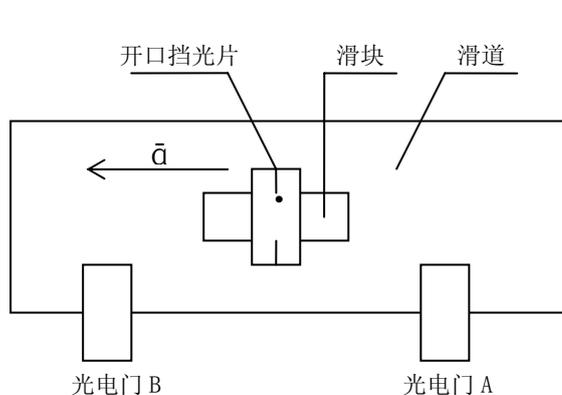


图 6.

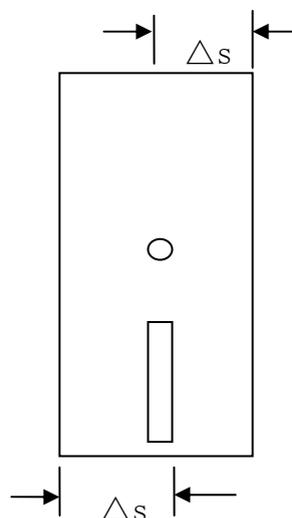


图 7.

- (b) 调节活动平板按钮，使得活动平板与滑道在同一平面内。  
(c) 接通测时器的电源，待键盘板（图 3）显示 HELLO 时，在键盘板上按“选择”键，应出现：1pr，以后每按一次选择键应分别出现：2pr、3—V、4—V、5A。当显示是 5A 时，停止按“选择”键。再按执行键，等待光电门 A 和 B 的二次挡光。  
(d) 将装有开口挡光片的滑块放在活动平板上，放开手后让其顺着滑道下滑，挡光片通过光电门 A 和 B 后，出现数据显示，即 VB，按选择键显示 VA，再按选择键交替显示 VB、VA；按执行键则显示 $\bar{a}$ （按该键后，则 VB、VA 清除）即为滑块的平均加速度 $\bar{a}$ 。  
(e) 记下此时的平均加速度 $\bar{a}$ 和滑道的倾角并代入到动摩擦系数的计算公式即可求得二种介质之间的动摩擦系数。

### 3. 滑块上下滑动和翻倒实验

- (a) 打开滑道调节机构的总电源⑤（如图 1），并按下电动调节按钮③，逆时针旋转按钮④，将滑道倾角调整到适当的角度。  
(b) 利用活动平台调节仪将活动平台调节至水平，并将定滑轮安装在活动平台上。  
(c) 将与托盘相连的线穿过活动平台的孔洞，并绕过滑轮，将线的另一端系在滑块上。  
(d) 在托盘里放一定重量的砝码，使得滑块在滑道上保持静止，然后再慢慢的增加（或减少）砝码，直到滑块开始向上（或向下）滑道或翻到为止，记下此时的砝码重量。

## 五、摩擦实验测试报告

年级专业：                      姓名：                      学号：

1、实验日期                      年                      月                      日

2、实验设备

    实验装置名称：

3、实验数据

1)、不同材料之间的静摩擦系数测定

a 木与木表面之间

测试次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
实测值 $\varphi$										
实测值 $f_s$										
静摩擦系数的统计平均值（去掉最大与最小的，然后平均） $f_s =$										

b 木与铁表面之间

测试次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
实测值 $\varphi$										
实测值 $f_s$										
静摩擦系数的统计平均值（去掉最大与最小的，然后平均） $f_s =$										

c 铁与铁表面之间

测试次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
实测值 $\varphi$										
实测值 $f_s$										
静摩擦系数的统计平均值（去掉最大与最小的，然后平均） $f_s =$										

2)、不同材料之间的动摩擦系数测定

a 木与木表面之间

测试次数	$\varphi$	$\tan \varphi$	$\cos \varphi$	a	$f_d$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
动摩擦系数的统计平均值（去掉最大与最小的，然后平均） $f_d =$					

b 木与铁表面之间

测试次数	$\varphi$	$\tan \varphi$	$\cos \varphi$	a	$f_d$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
动摩擦系数的统计平均值（去掉最大与最小的，然后平均） $f_d =$					

c 铁与铁表面之间

测试次数	$\varphi$	$\tan \varphi$	$\cos \varphi$	a	$f_d$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
动摩擦系数的统计平均值（去掉最大与最小的，然后平均） $f_d =$					

3)、当滑块高度较大，加载不同载荷（砝码）时，其在自重作用下，向下翻倒和滑动的最大倾角以及滑块向上翻倒和滑动的最大倾角。

a 木与木

实验次数	滑板倾角 (°)	向下滑	向下翻	向上滑	向上翻
		砝码重量 (g)			
1					
2					
3					
4					
5					
6					

b 木与铁

实验次数	滑板倾角 (°)	向下滑	向下翻	向上滑	向上翻
		砝码重量 (g)			
1					
2					
3					
4					
5					
6					

c 铁与铁

实验次数	滑板倾角 (°)	向下滑	向下翻	向上滑	向上翻
		砝码重量 (g)			
1					
2					
3					
4					
5					
6					

## 六、思考题

1. 引起实验误差的原因有哪些？在做实验的过程中，怎样才能尽量减小实验误差？
2. 采用本实验测量方法，对被测物体表面有什么要求吗？
3. 比较一下铁与铁、铁与木以及木与木之间摩擦系数的大小。

## IM-2 刚体转动实验仪

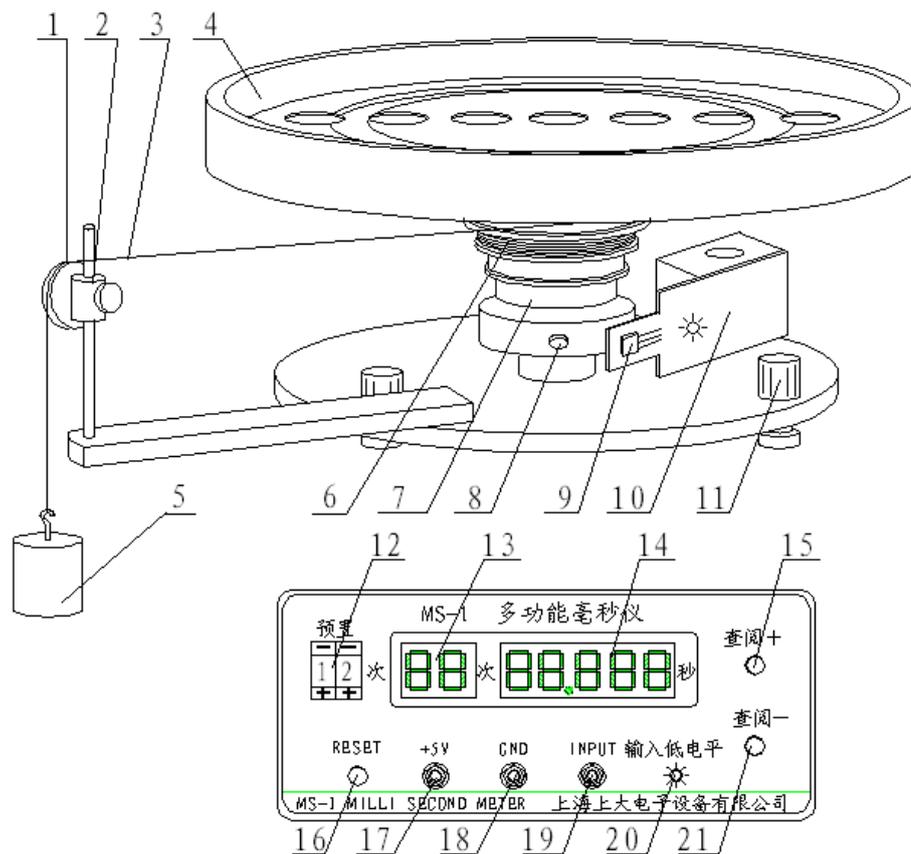
### 一、概述

转动惯量是描述刚体转动中惯性大小的物理量，它与刚体的质量分布及转轴位置有关。正确测定物体的转动惯量，对于了解物体转动规律、机械设计制造有着非常重要的意义。然而在实际工程中，大多数物体的几何形状都不是规则的，难以直接用理论公式算出其转动惯量，只能借助于实验的方法来实现。因此，在工程技术中，用实验的方法来测量物体的转动惯量就有着十分重要了。IM-2 刚体转动惯量实验仪，应用霍尔开关传感器结合计数计时多功能毫秒仪自动记录刚体在一定转矩作用下，转过 $\pi$ 角位移的时刻，测定刚体转动时的角加速度和刚体的转动惯量。因此本实验仪提供了一种测量刚体转动惯量的新方法，实验思路新颖、科学，测量数据精确，仪器结构合理，维护简单方便，是开展研究型实验教学的新仪器。

### 二、实验内容

- (1) 了解多功能计数、计时毫秒仪实时测量（时间）的基本方法。
- (2) 用刚体转动法测定物体的转动惯量。
- (3) 验证刚体转动的平行轴定理。
- (4) 验证刚体定轴转动惯量与外力矩无关。
- (5) 分析实验中误差产生的原因和实验中为降低误差应采取的实验手段。

### 三、实验仪器



- 1、滑轮      2、滑轮高度和方向调节组件      3、挂线      4、铝质圆盘形载物台      5、加力矩砝码  
6、塔轮上的绕线      7、绕线塔轮组      8、磁钢，相对霍尔开关传感器时，传

传感器输出低电平 9、霍尔开关传感器，红线接毫秒仪 + 5 V 接线柱，黑线接 GND 接线柱，黄线接 INPUT 接线柱 10、传感器固定架，装有磁钢，可任意放置于铁质底盘上。11、实验样品水平调节旋钮 12、毫秒仪次数预置拨码开关，可预设 1 - 64 次 13、次数显示，00 为开始计数、计时 14、时间显示，与次数相对应，时间为开始计时的累计时间。15、计时结束后，次数 + 1 查阅键，查阅对应次数的时间 16、毫秒仪复位键，测量前和重新测量时可按该键。17、+ 5 V 电源接线柱 18、电源 GND (地) 接线柱 19、INPUT 输入接线柱 20、输入低电平指示 21、计时结束后，次数 - 1 查阅键，查阅对应次数的时间

#### 四. 实验原理

##### 1. 转动力矩、转动惯量和角加速度的关系。

当系统受外力作用时，系统作匀加速转动。系统所受的外力矩有二个，一个为绳子张力  $F$  产生的力矩  $M_O = F \cdot r$ ， $r$  为塔轮上绕线轮的半径， $M_\mu$  为摩擦力偶矩。所以，

$$M_O + M_\mu = J_c \alpha_2$$

即

$$F \cdot r + M_\mu = J_c \alpha_2$$

(1)

式中  $\alpha_2$  为系统的角加速度，此时为正值， $J_c$  为转动系统的转动惯量， $M_\mu$  为摩擦力矩，数值为负。

由牛顿第二定律可知，设砝码下落时的加速度为  $a$ ，则运动方程为  $mg - F = ma$ 。

绳子张力  $F$ ，

$$F = m(g - r \cdot \alpha_2)$$

式中  $g$  为重力加速度， $\alpha_2$  为系统的角加速度， $r$  为塔轮上绕线轮的半径。

当砝码与系统脱离后，此时砝码力矩  $M_O = 0$ ，摩擦力矩  $M_\mu$  使系统作角加速度  $\alpha_1$ ，数值为负。运动方程 (1) 为

$$M_\mu = J_c \cdot \alpha_1$$

(2)

由方程 (1) 和方程 (2) 解得

$$m(g - r \cdot \alpha_2) \cdot r + J_c \cdot \alpha_1 = J_c \cdot \alpha_2$$

$$J_c = \frac{mr(g - r\alpha_2)}{\alpha_2 - \alpha_1}$$

(3)

##### 2. 角加速度的测量

设转动体系统在  $t = 0$  时刻初角速度为  $\omega_0$ ，角位移为 0，转动  $t$  时间后，其角位移  $\theta$ ，转动中角加速度为  $\alpha$ ，则

$$\theta = \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha \cdot t^2$$

若测得角位移  $\theta_1, \theta_2$ ，与相应的时间  $t_1, t_2$  得

$$\theta_1 = \omega_0 t_1 + \frac{1}{2} \alpha \cdot t_1^2 \quad (4)$$

$$\theta_2 = \omega_0 t_2 + \frac{1}{2} \alpha \cdot t_2^2 \quad (5)$$

所以

$$\alpha = \frac{2(\theta_2 t_1 - \theta_1 t_2)}{t_2^2 t_1 - t_1^2 t_2} = \frac{2(\theta_2 t_1 - \theta_1 t_2)}{t_1 t_2 (t_2 - t_1)} \quad (6)$$

实验时，角位移  $\theta_1, \theta_2$  可取为  $2\pi$ 、 $4\pi$ ... 等，实验转动系统转过  $\pi$  角位移，计数计时毫秒仪的计数窗内计数次数 + 1。计数为 0 作为角位移开始时刻，实时记录转过  $\pi$  角位移的时刻，计算时将角位移时刻减去角位移开始时刻，转化成角位移的时间，应用上述公式 (6)，得到角加速度，实验取值时，一般以转过一圈后作为测速计时段较可靠，因刚开始转动摩擦不稳定。

在求角速度  $\alpha_1$  时，注意砝码与系统脱离的时刻，以下一时刻作为系统作角加速度角位移起始时刻，计算角位移时间时，将角位移时刻减去该角位移开始时刻，在该时间段角加速度为负，实际上是角减速度角位移。

### 3. 转动惯量 $J_c$ 的“理论公式”

1. 设圆环形试件，质量分均匀，质量为  $m$ ，其对中心轴的转动惯量为  $J_c$ ，外径为  $D_1$ ，

内径为  $D_2$ ，则：

$$J_c = \frac{1}{8} m (D_1^2 + D_2^2) \quad (7)$$

若为盘状试件，则  $D_2 = 0$ 。

2. 平行移轴定理：设转动体系的转动惯量为  $J_c$ ，当有  $m_1$  的部分质量远离转轴平行移动  $d$  的距离后，则体系的转动惯量增为：

$$J_o = J_c + m_1 d^2 \quad (8)$$

## 五. 实验方法

测转动体系的转动惯量实验中的角加速度  $\alpha_2$ ,  $\alpha_1$  的方法如下:

1. 放置仪器, 滑轮 1 置于实验台外 3-4cm, 调节仪器水平。设置毫秒仪计数次数。
2. 连接传感器与计数计时毫秒仪。调霍尔传感器 9 与磁钢 8 间距为 0.4-0.6cm, 转离磁钢, 复位毫秒仪, 转动到磁钢与霍尔传感器 9 相对时, 毫秒仪低电平指示灯亮, 开始计数和计时。
3. 将质量为  $m = 100\text{g}$  的砝码挂线的一端打结, 沿塔轮上开的细缝塞入, 并整齐地绕于半径为  $r$  塔轮。
4. 调节滑轮 1 的方向和高度, 使挂线与绕线塔轮相切, 挂线与绕线轮的中间呈水平。
5. 释放砝码, 砝码在重力作用下带动转动体系作加速度转动。
6. 计数计时毫秒仪自动记录系统从  $0\pi$  开始作  $1\pi, 2\pi \dots$  角位移相应的时刻。

注意事项:

1. 连接霍尔开关传感器组件和毫秒仪, 红线接 + 5 接线柱, 黑线接 GND 接线柱, 黄线接 INPUT 接线柱。
2. 霍尔传感器 9 放置于合适的位置, 当系统转过约  $\pi/2$  角位移后, 毫秒仪开始计数计时。
3. 挂线长度以挂线脱离塔轮后, 砝码离地 3 厘米左右为宜。
4. 实验中, 在砝码钩挂线脱离塔轮前转动体系作正加速度  $\alpha_2$ , 在砝码钩挂线脱离塔轮后转动体系作负加速度  $\alpha_1$ , 须分清正加速度  $\alpha_2$  到负加速度  $\alpha_1$  的计时分界处。
5. 数据处理时, 系统作负加速度  $\alpha_1$  的开始时刻, 可以选为分界处的下一时刻, 角位移时间须减去该时刻。
6. 实验中, 砝码置于相同的高度后释放, 以利数据一致。

实验内容如下;

必做部分

1. 由塔轮、铝盘载物台等组成转动系统, 测量在砝码力矩作用下的角加速度  $\alpha_2$  和砝码挂线脱离后的角加速度  $\alpha_1$ , 依驱动砝码、绕线半径确定驱动力矩, 测定空载时实验系统的转动惯量。
2. 以铝盘作为载物台, 加载环形钢质实验样品, 测量在砝码力矩作用下的角加速度  $\alpha_2$  和砝码挂线脱离后的角加速度  $\alpha_1$ 。
3. 以铝盘作为载波物台, 测定加载圆柱形实验样品在离转轴距离为 40、80、120 时实验系统的转动惯量, 测量出实验样品在一定转轴下的转动惯量。比较实验值与理论值。

## 六. 实验数据(可测多次求平均值)

1. 测量空载时实验系统的转动惯量  $J_{c1}$ 。

砝码质量为 $m=100\text{g}$ ，绕线半径 $r=2.0\text{cm}$ ，由砝码重力作力矩时，由转过 $2\pi$ 作为计时段开始则转动至 $4\pi$ 、 $6\pi$ 角位移时间为 $t_1$ 、 $t_2$ ，

转动系统作正角加速度， $\theta_1 = 2\pi$ ， $t_1 = T_{4\pi} - T_{2\pi}$ ； $\theta_2 = 4\pi$ ， $t_2 = T_{6\pi} - T_{2\pi}$

代入公式(6)，得

$$\alpha_2 = \frac{2(\theta_2 t_1 - \theta_1 t_2)}{t_1 t_2 (t_2 - t_1)} = \frac{4\pi(2t_1 - t_2)}{t_1 t_2 (t_2 - t_1)}$$

砝码挂线脱离后下一时刻 $14\pi$ 角位移为角减速度计算时刻， $2\pi$ 、 $4\pi$ 角位移时间为 $t_3$ 、 $t_4$ ，

转动系统作负角加速度， $\theta_1 = 2\pi$ ， $t_3 = T_{16\pi} - T_{14\pi}$ ； $\theta_2 = 4\pi$ ， $t_4 = T_{18\pi} - T_{14\pi}$

代入公式(6)，得

$$\alpha_1 = \frac{2(\theta_4 t_3 - \theta_3 t_4)}{t_3 t_4 (t_4 - t_3)} = \frac{4\pi(2t_3 - t_4)}{t_3 t_4 (t_4 - t_3)}$$

因此，系统的转动惯量 $J_{c1}$ ，由式(3)得，

$$J_{c1} = \frac{mr(g - r\beta_2)}{\beta_2 - \beta_1}$$

表 1

2 $\pi$ 时刻	4 $\pi$ 时刻	6 $\pi$ 时刻	14 $\pi$ 时刻	16 $\pi$ 时刻	18 $\pi$ 时刻	t1/S	t2/S	t3/S	t4/S	b2/( $\pi/S^2$ )	b1/( $\pi/S^2$ )	I/g*cm*cm

由表 1，取平均值，可求得 $J_{c1}$

2. 加载环形钢质实验样品于铝质载物盘内环形槽内，测量在砝码力矩作用下的角加速度 $\alpha_2$ 和

砝码挂线脱离后的角加速度 $\alpha_1$ 。

砝码质量为 $m=100\text{g}$ ，绕线半径 $r=2.0\text{cm}$ 。

环形钢质实验样品： $m=996\text{g}$  外径 $D_{\text{外}}=21.5\text{cm}$  内径 $D_{\text{内}}=17.5\text{cm}$

表 2

2 $\pi$ 时刻	4 $\pi$ 时刻	6 $\pi$ 时刻	14 $\pi$ 时刻	16 $\pi$ 时刻	18 $\pi$ 时刻	t1/S	t2/S	t3/S	t4/S	b2/( $\pi/S^2$ )	b1/( $\pi/S^2$ )	I/g*cm*cm

由砝码重力作力矩时， $2\pi$ 、 $4\pi$ 角位移时间为 $t_1$ 、 $t_2$ ，

转动系统作正角加速度,  $\theta_1 = 2\pi$ ,  $t_1 = T_{4\pi} - T_{2\pi}$ ;  $\theta_2 = 4\pi$ ,  $t_2 = T_{6\pi} - T_{2\pi}$

代入公式(6), 得

$$\alpha_2 = \frac{2(\theta_2 t_1 - \theta_1 t_2)}{t_1 t_2 (t_2 - t_1)} = \frac{4\pi(2t_1 - t_2)}{t_1 t_2 (t_2 - t_1)}$$

砝码挂线脱离后下一时刻  $12\pi$  角位移为角减速度计算时刻,  $2\pi$ 、 $4\pi$  角位移时间为  $t_3$ 、 $t_4$ ,

转动系统作负角加速度,  $\theta_1 = 2\pi$ ,  $t_3 = T_{16\pi} - T_{14\pi}$ ;  $\theta_2 = 4\pi$ ,  $t_4 = T_{18\pi} - T_{14\pi}$

代入公式(6), 得

$$\alpha_1 = \frac{2(\theta_4 t_3 - \theta_3 t_4)}{t_3 t_4 (t_4 - t_3)} = \frac{4\pi(2t_3 - t_4)}{t_3 t_4 (t_4 - t_3)}$$

因此, 系统的转动惯量  $J_{c2}$ , 由式(3)得,

$$J_{c2} = \frac{mr(g - r\alpha_2)}{\alpha_2 - \alpha_1}$$

由表 2, 加载后转动系统的转动惯量取平均值可得  $J_{c2}$

因此, 环形钢质实验样品转动惯量  $J_{c3}$  为

$$J_{c3} = J_{c2} - J_{c1}$$

环形钢质实验样品转动惯量理论值

实验样品:  $M_{\text{铁环}} = 996\text{g}$  外径  $D_{\text{外}} = 21.5\text{cm}$  内径  $D_{\text{内}} = 17.5\text{cm}$

$$J'_{c3} = \frac{1}{8} m_{\text{铁环}} (D_{\text{外}}^2 + D_{\text{内}}^2) = \frac{1}{8} \times 996 \times (21.5^2 + 17.5^2) = 95678\text{gcm}^2 = 95.7\text{kg} \cdot \text{cm}^2$$

实验值与理论值比较, 百分差为,

$$E = \frac{|J_{c3} - J'_{c3}|}{J'_{c3}} \times 100\%$$

### 3. 验证平行移轴定理

将圆柱形实验样品放置于载物台上, 两样品相距转轴中心对称放置于圆形凹槽内, 偏心距分别为 40、80、120mm, 测量在砝码力矩作用下的角加速度  $\alpha_2$  和砝码挂线脱离后的角加速度  $\alpha_1$ 。计算转动系统铝盘偏心安装后其转动惯量的增量, 验证平行移轴定理。实验样品质量为 400g, 外径为 38mm。

偏心距  $d = 12.0\text{cm}$ , 数据如下

表 3

2 $\pi$ 时刻	4 $\pi$ 时刻	6 $\pi$ 时刻	14 $\pi$ 时刻	16 $\pi$ 时刻	18 $\pi$ 时刻	t1/S	t2/S	t3/S	t4/S	b2/( $\pi$ /S*S)	b1/( $\pi$ /S*S)	I/g*cm*cm

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

由表 3 取平均值，可得系统转动惯量  $J_{c4}$

因此，放置于载物盘上的实验样品的转动惯量

$$J_{c5} = J_{c4} - J_{c1} = \quad \text{kg}\cdot\text{cm}^2$$

依照平行移轴定理，距离转轴平行移动 12.0cm 后，圆柱形实验样品的转动惯量的理论值

$$J'_{c5} = \frac{1}{8} M_{\text{圆柱}} D^2 + M_{\text{圆柱}} d^2$$

实验值与理论值比较，百分差为，

$$E = \frac{|J_{c5} - J'_{c5}|}{J'_{c5}} \times 100\% =$$

按表 3 的方法依次测出偏心距为 40、80、120 时的转动惯量，从而来验证平行移轴定理。

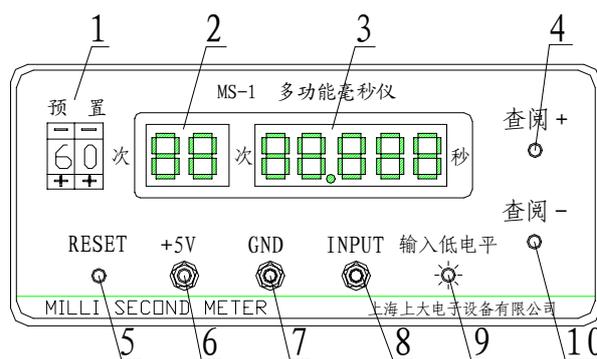
#### 附 计数计时毫秒仪使用说明

### MS-1 MS-2 计数计时毫秒仪使用说明

#### 一. 概述

MS-1 MS-2 系列计数计时毫秒仪采用单片机作主件，其具有测量时间、周期准确度高、重复性好的优点。特别是没有第一个周期的计时误差。自动地利用下降边沿触发开始计时和结束计时。是物理实验中的基本测量仪器。可应用于（集成霍尔传感器与简谐振动实验仪中）测量弹簧的振动周期、（在单摆实验中）测量单摆的振动周期、（在磁阻尼和动摩擦系数测定

仪  
的  
开  
和  
可  
接



告合本厂生产  
以是集成霍尔  
传感器的电源  
变，类似信号  
直至保存到

#### 二

1. 计时次数设定拨码按钮
2. 次数显示屏
3. 时间显示
4. 次数 + 1 时间查阅钮
5. 计数、计时复位钮
6. + 5 V 电源接线柱
7. GND 地接线柱
8. 信号输入接线柱
9. 输入低电平指示
10. 次数 - 1 时间查阅钮

### 三. 技术指标

#### 1. 量程和分辨率

仪器型号	被测次数	量程 (S)	分辨率	备注
MS-1/MS-2	1、2、---64	0.001-99.999	0.001S	记数、计时、可记忆备查阅

2. 准确度优于 0.02%-1 个字。

3. 计时仪输入端电压幅度在 0 - 5V 之间，由高电平向低电平跳变时为有效信号。超过 0 - 5V 之间的输入电压幅度可能损坏计数计时毫仪，务请避免。以使用毫秒仪电源为妥。

4. 计时仪附带的标准+5 电源，其负载电流 < 0.5A, 可为霍尔传感器、激光光电门提供标准+5 工作电源。上述传感器可以并联接入输入信号端和电源端。一般 < 10 个为宜。

5. 输入电压: AC220 ± 10%, 50Hz

6. 功 耗: < 5W

7. 工作温度: 0-50°C, 80%RH