

# 开发设计性和创新性大学物理实验的尝试\*

朱华泽

(陕西师范大学物理学与信息技术学院 陕西 西安 710062;

西安科技大学 理学院 陕西 西安 710054)

孙润广

(陕西师范大学物理与信息技术学院 陕西 西安 710062)

张鹏利

(陕西师范大学物理学与信息技术学院 陕西 西安 710062;

西安科技大学 理学院 陕西 西安 710054)

(收稿日期:2016-04-19)

**摘要:**增加设计性和创新性实验的开设比例,不仅是大学物理实验课程改革需要,更是培养大学生创新能力的必然要求.本文设计、搭建了一种基于刚体转动惯量实验仪的液体粘滞系数测量实验装置,并做了测量举例.该装置不仅克服了手动秒表计时误差大的缺点,而且扩展了测量对象.本装置的设计、搭建可由学生利用实验室已有设备独立完成,适合开设设计性和创新性大学物理实验.

**关键词:**设计性实验 创新性实验 转动惯量 粘滞系数

根据理工科大学物理实验课程教学基本要求和物理实验课程改革的需要,各理工科高校普遍实行了分层次的物理实验教学模式,各学校根据本校的特点和需要,增加了设计性和创新性实验在其他实验类型中的比例.这是大学物理实验课程改革的重要环节,也是提高实验教学质量的的重要举措.物理实验作为高等理工科院校对学生科学实验基本训练的必修课程,目的不单是培养学生学习掌握基本知识 with 技能,更重要的是希望通过提出问题、解决问题能力的培养,使学生具备终身学习的能力<sup>[1]</sup>.而设计性和创新性实验的开出,正是弥补传统验证性实验在教学效果上不足的尝试.西安科技大学物理实验中心对设计性和创新性实验的定位是:在内容安排上要结合物理实验课程的基本要求,在教学要求上要结合学生现有基本素质的平均水平,在硬件配置上要结合学校专业设置与实验室现有资源.正是由于上述原因,在现有物理实验教学仪器市场上很难买到适应本校的设计性和创新性实验装置.因而,开发设计性和创新性实验装置的尝试成为我们

物理实验教学人员必须面对的一项工作.

粘滞系数是表征流体物性的一个重要参数,液体粘滞系数的测量是大学物理实验中的一个基本实验,粘滞系数的常用测量方法有旋转法、毛细管法和落球法等<sup>[1,2]</sup>,落球法因其特别简单而被普遍采用,但传统的落球法有明显的缺点:测量时间采用秒表手动计时,可能引入较大测量误差;实验要求小球要尽量小,这给小球制造和直径测量带来不利;进行多次测量时,所用的数个小球的半径也不是完全相同,这是不等精度测量;不透明液体的粘滞系数测量受到限制;测量样本少,可靠性小等等.针对上述粘滞系数测量实验中存在的问题,本文对大学物理实验课常用的刚体转动惯量实验仪加以改进,提出了一种测量液体粘滞系数新方法.该方法利用光电计时装置对小球在液体中的运动进行连续测量,克服了秒表手动计时误差大,实验数据样本少、可靠性差的缺点.由于不需要直接观察和测量小球在液体中的运动,所以该方法可以测量浑浊液体的粘滞系数.

\* 陕西省科技厅工业攻关项目,编号:2016GY-041,2016GY-182;2015年西安科技大学自研仪器设备项目.

## 1 实验原理

### 1.1 实验装置设计

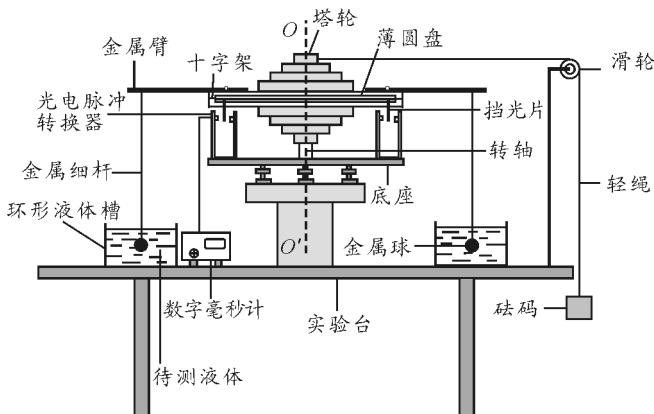


图1 实验装置结构示意图

如图1所示,将刚体转动惯量实验仪中的两个塔轮取下,塔轮的圆盘相对并共轴的安装在一起,下塔轮安装在转轴上.在塔轮底座直径两端安装一对等长的金属臂,在金属臂上等间距的制作4个立杆和砝码安装孔.将立杆一端固定在金属臂的安装孔里,另一端安装一个金属球,小球处于环形槽的中轴线上.在塔轮底座的同一圆周等间隔的安装8个挡光片,挡光片在通过光电脉冲转换器时可以挡光.光电脉冲转换器与数字毫秒计相连,毫秒计将记录相邻挡光片分别通过同一光电脉冲转换器的时间间隔 $\Delta t$ .轻质细线跨过一定滑轮,一端绕在塔轮的线槽中,另一端与砝码连接.当环形液体槽中不添加待测液体时,砝码下落将驱动塔轮加速转动,利用文献[1,3]给出的方法可测出系统的角加速度和转动惯量;当环形液体槽中添加待测液体后,砝码下落将驱动塔轮加速转动,直角金属臂端部的金属球在液体中运动时将受到粘滞阻力,由于粘滞阻力会随着金属球运动速度的增加而变大,系统最终将达到匀速运动,测出该匀速速度,代入公式(18)即可得到粘滞系数.

### 1.2 实验原理

当环形液体槽中不添加任何待测液体时,使砝码由静止下落,对塔轮、金属臂、金属细杆、金属球、薄圆盘、十字架以及挡光片组成的刚体运用定轴转动定律<sup>[3]</sup>

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

其中 $J$ 为刚体转动惯量, $\beta$ 为刚体绕定轴 $OO'$ 转动的角加速度, $M$ 为刚体所受的合外力矩.设 $M_\mu$ 为轴承摩擦阻尼力矩,则

$$M = rT - M_\mu \quad (2)$$

其中 $r$ 是塔轮上线槽的半径, $T$ 是细绳的张力.对下落的砝码运用牛顿第二定律有

$$mg - T = ma \quad (3)$$

$$a = r\beta \quad (4)$$

其中 $m$ 为砝码的质量, $a$ 为砝码下落时的加速度, $g$ 为实验所在地的重力加速度.

由式(1)、(2)、(3)和(4)可得

$$rmg - M = (mr^2 + J)\beta \quad (5)$$

由式(5)可知,刚体将绕定轴 $OO'$ 做匀加速转动, $\beta$ 值可用实验室现有的智能转动惯量仪测出.

当给环形液体槽中加注待测液体后,仍使砝码由静止下落,对刚体运用定轴转动定律有

$$M' = J\beta' \quad (6)$$

$$M' = rT' - M_\mu - M_f \quad (7)$$

式中 $T'$ 为细绳张力, $M_f$ 为金属小球所受液体粘滞阻力产生的力矩.根据斯托克斯定律,小球在液体中运动时所受的粘滞阻力 $f$ 为

$$f = 6\pi\eta Rv \quad (8)$$

$$v = R_0\omega \quad (9)$$

$$M_f = 2R_0f \quad (10)$$

由式(8)、(9)和(10)有

$$M_f = 12\pi\eta RR_0^2\omega \quad (11)$$

其中, $\eta$ 为粘滞系数, $R$ 为金属球的半径, $R_0$ 为金属球球心到转轴的距离, $\omega$ 为刚体绕轴转动的角速度.对砝码运用牛顿第二定律有

$$mg - T' = ma' \quad (12)$$

$$a' = r\beta' \quad (13)$$

由方程(6)、(7)、(11)、(12)和(13)有

$$rmg - M_\mu - 12\pi\eta RR_0^2\omega = (mr^2 + J)\beta' \quad (14)$$

由式(5)和(14)得

$$12\pi\eta RR_0^2\omega = (mr^2 + J)(\beta - \beta') \quad (15)$$

考虑到 $\beta' = \frac{d\omega}{dt}$ ,所以式(15)可改写为

$$\frac{d\omega}{dt} + \frac{12\pi\eta RR_0^2}{mr^2 + J}\omega - \beta = 0 \quad (16)$$

已知初始条件,  $t=0, \omega=0$ , 解方程(16)得

$$\omega = \frac{(mr^2 + J)\beta}{12\pi RR_0^2 \eta} \left(1 - e^{-\frac{12\pi RR_0^2 t}{mr^2 + J}}\right) \quad (17)$$

由式(17)可知, 随着时间增加, 刚体将趋向于匀角速度( $\omega_0$ )转动, 即

$$\text{当 } t \rightarrow \infty, \omega \rightarrow \omega_0, \text{ 即 } \omega_0 = \frac{(mr^2 + J)\beta}{12\pi RR_0^2 \eta}, \omega_0 \text{ 称为}$$

金属球在待测液体中的收尾角速度, 由此可得粘滞系数的测量公式

$$\eta = \frac{(mr^2 + J)\beta}{12\pi RR_0^2 \omega_0} \quad (18)$$

## 2 测量举例

实验所用待测液体为蓖麻油, 当实验温度为

表1 刚体绕轴  $OO'$  转动时角位移  $\theta$  随  $t$  的变化关系

$t/s$	$\Delta t = t_{i+1} - t_i / s$	$\theta / \text{rad}$	$\Delta\theta = (\theta_{i+1} - \theta_i) / \text{rad}$	$\omega_i = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} / \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
0	0	0	0	0
0.453 6	0.453 6	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	3.463 2
0.824 8	0.371 2	$\pi$	$\frac{\pi}{2}$	4.232 1
1.174 2	0.349 4	$\frac{3\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	4.496 0
1.511 8	0.337 6	$2\pi$	$\frac{\pi}{2}$	4.652 4
1.844 0	0.332 2	$\frac{5\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	4.727 9
2.175 9	0.331 9	$3\pi$	$\frac{\pi}{2}$	4.732 4
2.506 7	0.330 8	$\frac{7\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	4.748 1
2.837 3	0.330 6	$4\pi$	$\frac{\pi}{2}$	4.751 4
3.168 1	0.330 8	$\frac{9\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	4.749 2
3.498 9	0.330 8	$5\pi$	$\frac{\pi}{2}$	4.748 1

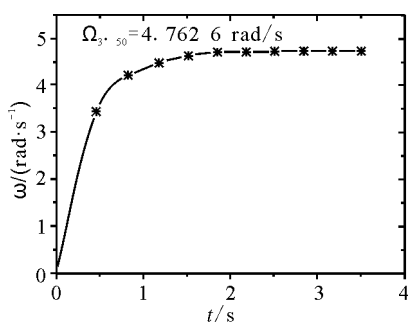


图2 刚体绕轴  $OO'$  转动时角速度  $\omega$  随  $t$  的变化关系

经计算, 当  $r=35.20 \text{ mm}$ ,  $\beta=1.91 \text{ rad/s}^2$ ,  $\omega=4.762 6 \text{ rad/s}^2$  时  $\eta=0.416 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ; 与文献[4]给出的值相比, 其相对误差为  $0.97\%$ 。

$31.4^\circ\text{C}$ , 利用文献[4]提出的蓖麻油粘滞系数与温度的关系式可求得  $\eta=0.412 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

实验中测得金属球半径  $R=32.06 \text{ mm}$ , 金属球球心到转轴的距离  $R_0=22.08 \text{ cm}$ , 砝码质量  $m=2.513 \text{ kg}$ . 当环形液体槽中不添加待测液体时, 测得刚体的转动惯量  $J=4.012 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  和刚体绕轴转动时的角加速  $\beta=1.91 \text{ rad/s}^2$ ; 在环形液体槽加入蓖麻油, 将细线绕在半径  $r=35.20 \text{ mm}$  的线槽中, 测量刚体绕轴  $OO'$  转动时角位移  $\theta$  与  $t$  的变化关系(表1). 做出  $\omega-t$  关系曲线, 求得小球在待测液体中的收尾速度  $\omega_0$ (图2). 将各测量值代入式(18)即可求得待测液体的粘滞系数。

从上面的计算结果来看, 利用实验室已有的智能转动惯量仪改装而来的本实验装置在用于液体粘滞系数的测量时是可行的. 本设计的优点在于:

(1) 本实验基于实验室现有的仪器装置完成, 无需另行购买仪器;

(2) 学生需要依据设计自行搭建实验装置, 可充分锻炼学生的动手能力和解决问题的能力;

(3) 测量公式的推导涉及到质点动力学、刚体定轴转动的动力学以及流体力学的相关知识, 内容丰富, 可有效地锻炼学生的思维能力;

(4) 该设计可用于测量不透明液体的粘滞系

数,扩展了测量对象,同时还克服了落球法中秒表计时误差大的缺点,提高了测量精度.

### 3 结论

本文基于大学物理实验课常用的刚体转动惯量实验仪设计了一种测量液体粘滞系数的新方法,并依据设计制作了粘滞系数的测量装置.用该装置测量了蓖麻油的粘滞系数,测量结果与文献给出的结果一致,说明用该方法测量液体粘滞系数是可行的.本文利用智能转动惯量仪自带的光电计时装置,大大降低了计时误差,同时克服了实验数据少、可靠性差的缺点.利用本装置测量粘滞系数时,无须直接观察和测量小球在待测液体中的运动,因而可用于浑浊液体粘滞系数的测量.该实验作为学生创新实验,不仅能够帮助学生更加深刻的掌握刚体的定轴转动规律,加深学生对液体粘滞系数的理解,对于培养和提高学生的创新意识和实验能力大有益处.此外,该

实验涉及质点力学、刚体力学和流体力学的知识,内容十分丰富,是一个很好的本科综合性实验.

本文未考虑斯托克斯公式要求的“无限广延”条件,以及小球在环形液体槽中运动时涡流对小球运动的影响<sup>[5]</sup>,以上两点可作为学生实验后的进一步拓展.

### 参考文献

- 1 解忧,杨华平,庞绍芳,朱华泽,郭长立.新编大学物理实验.徐州:中国矿业大学出版社,2015.1~3
- 2 陈用,郑仲森.液体粘滞系数测量方法的改进.大学物理实验,2003,16(3):6~8
- 3 炎正馨,赵省贵,鱼海涛,张桂花.大学物理实验教程.西安:西北工业大学出版社,2013.317~322
- 4 王晶.蓖麻油粘滞系数与温度关系实验的研究.科技信息,2010(25):590
- 5 张进波.落球法测液体黏度的深入研究.物理通报,2016(2):17~19

## An Attempt to Develop A Design and Innovative University Physics Experiment

Zhu Huaze

(College of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Chang - an Street No. 199, Xi'an, Shanxi 710062;  
College of Science, Xi'an University of Science and Technology, Yanta Road No. 58, Xi'an, Shanxi 710054)

Sun Runguang

(College of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Chang - an Street No. 199, Xi'an, Shanxi 710062)

Zhang Pengli

(College of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Chang - an Street No. 199, Xi'an, Shanxi 710062;  
College of Science, Xi'an University of Science and Technology, Yanta Road No. 58, Xi'an, Shanxi 710054)

**Abstract:** To increase the proportion of the design and innovative experiment is not only the need of the reform of university physics experiment, but also the necessary requirement to cultivate the innovative ability of college students. In this paper, we design and set up an experimental device for measuring the liquid viscosity coefficient based on the rotating inertia experiment instrument, and made an example of measurement. The device not only avoids the manual stopwatch disadvantages of big errors, but also extend the measurement object. The design and construction of the device can be independently completed by students using laboratory equipment, which is suitable for setting up design experiment and innovative experiment.

**Key word:** design experiment; innovative experiment; rotating inertia; viscosity coefficient