

扭摆法测转动惯量的粘性阻力研究^{*}

王 博 杨 坤

(石河子大学理学院;石河子大学生态物理重点实验室 新疆 石河子 832003)

路彦冬

(石河子大学后勤管理处教室管理服务中心 新疆 石河子 832003)

(收稿日期:2016-09-14)

摘 要:针对扭摆法测物体转动惯量系统误差较大的缺点,提出了实验中 3 种塑料圆柱选取周期值 $N = 5$,并采取 3 组周期平均值,从而最大程度上降低系统误差.发现当 N 不是很大时,粘性阻力对转动惯量起主要作用,此时转动惯量的大小与空气的接触面积大小有很大关系.增加空气接触面积,非线性阻尼效果增强.表面积 S 越大,转动惯量理论值 I 和实验值 I' 之间的差异就越大,不确定度也随之变大,非线性阻尼导致的实验值与理论值之间的差异越来越明显.

关键词:转动惯量 扭摆法 粘性阻力

转动惯量是刚体转动时惯性大小的量度,是表明刚体特性的一个物理量.刚体转动惯量除了与物体质量有关外,还与转轴位置和质量分布有关.对于形状简单、质量分布均匀的刚体的转动惯量可以通过计算获得.在工程实践中常常需要知道一些形状复杂、质量分布不均匀的刚体转动惯量的大小,例如机械部件,电动机转子,飞机螺旋桨和枪炮的弹丸等.其有着重要的物理意义,在科学实验、工程技术、仪表等工业领域也是一个重要参量^[1~3].为此需要通过实验进行精确测量,在实验室中一般采用扭摆法来测量物体的转动惯量,但该方法带来的系统误差较大.

本文针对扭摆法测物体转动惯量系统误差较大的缺点,在扭摆的实验操作处理方面提出了行之有效的方法.测量时发现前几个周期值与中间值比较时偏大,故选取中间周期值 $N = 5$.且为了避免误差反弹现象降低摆动周期的偶然误差,选取了 3 种塑料圆柱的 3 组周期平均值.实验中发现当 N 不是很大时,粘性阻力对转动惯量起主要作用,此时转动惯量的大小就与空气的接触面积大小有很大关系.增加空气接触面积,非线性阻尼效果增强. S 越大,转动惯量理论值 I 和实验值 I' 之间的差异就越大,不

确定度也随之变大,非线性阻尼导致的实验值与理论值之间的差异越来越明显.

1 刚体转动惯量原理

使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做往返扭转运动^[4~6].根据胡克定律,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 为弹簧的扭转常量.依据转动定律

$$M = I\beta \quad (2)$$

其中, I 为物体绕转轴的转动惯量, β 为角加速度.忽略轴承的摩擦阻力矩,由式(1)、式(2)得

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{K}{I}\theta = 0$$

设 $\omega^2 = \frac{K}{I}$,则

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \omega^2\theta = 0 \quad (3)$$

上述方程表示扭摆运动具有角简谐振动的特性^[7~9],角加速度与角位移成正比,且方向相反,此方程的解为

$$\theta = A\cos(\omega t + \varphi) \quad (4)$$

^{*} 石河子大学教改项目的课题,项目编号:2004CB619302

作者简介:王博(1982-),女,硕士,高级实验师,主要从事金属材料 and 物理实验研究工作.

通讯作者:杨坤(1982-),女,硕士,讲师,主要从事物理教学及研究工作.

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

$$T=\frac{2\pi}{\omega}=2\pi\sqrt{\frac{I}{K}}$$

(5)

2 转动惯量的粘性阻力研究

周期测量时的第一个周期值因为有角加速度的

原因导致这个值偏大,所以要剔除. 当 N 足够大时,发现前几个周期值与中间值比较时偏大,故在选取周期时,可从中间值开始计算. 在选取周期数测量时出现误差反弹现象,这也暴露出周期选择有一定的适用性. 为了获得更精确的实验值,选取周期数 $N=5$,在一定程度上弱化了系统误差.

表 1 3 种塑料圆柱($N=5$) 的 3 组周期平均值

次数 $N=5$	1	2	3	平均值
塑料圆柱 1	1.010 8	1.010 8	1.010 9	1.011 1
	1.011 1	1.011 0	1.011 1	
	1.011 2	1.011 0	1.011 1	
	1.011 3	1.011 1	1.011 3	
	1.011 3	1.011 2	1.011 3	
塑料圆柱 2	1.225 5	1.225 5	1.225 5	1.225 8
	1.225 7	1.225 7	1.225 8	
	1.225 8	1.225 8	1.225 7	
	1.226 0	1.225 9	1.226 0	
	1.225 9	1.226 1	1.226 0	
塑料圆柱 3	1.230 4	1.230 4	1.230 4	1.230 6
	1.230 5	1.230 5	1.230 4	
	1.230 6	1.230 7	1.230 6	
	1.230 7	1.230 7	1.230 7	
	1.230 9	1.230 8	1.230 9	

因为摆动周期分布具有偶然性,为了减少偶然误差,在实验过程中选取多次测量是非常可取的办

法. 本文记录了 3 种塑料圆柱的 3 组周期值,然后再取平均值,在一定程度上减少了实验误差.

表 2 转动惯量实验数据处理

物体名称	质量 / kg	尺寸 / 10^{-2} m	S/ 10^{-2} m ²	T/ s	转动惯量理论值 / 10^{-4} kg · m ²	转动惯量实验值 / 10^{-4} kg · m ²	相对不确定度 / 10^{-3}
载物盘	/	/		$\overline{T_0}=0.732\ 5$	$I_0'=4.929$	$I_0=\frac{I_1'\overline{T_0}^2}{T_1^2-\overline{T_0}^2}=4.963\ 8$	5.647 4
塑料圆柱 1	$\overline{m_1}=0.358\ 2$	$\overline{D_1}=10.019\ 3$	158.538 0	$\overline{T_1}=1.011\ 1$	$I_1'=\frac{1}{8}\overline{m_1}\overline{D_1}^2=4.4950$	$I_1=\frac{K_1\overline{T_1}^2}{4\pi^2}-I_0=4.4950$	8.509 7
塑料圆柱 2	$\overline{m_2}=0.710\ 6$	$\overline{D_2}=10.004\ 0$	313.154 0	$\overline{T_2}=1.225\ 8$	$I_2'=\frac{1}{8}\overline{m_2}\overline{D_2}^2=8.890\ 0$	$I_2=\frac{K_2\overline{T_2}^2}{4\pi^2}-I_0=8.863\ 1$	11.075 8
塑料圆柱 3	$\overline{m_3}=0.717\ 0$	$\overline{D_3}=10.010\ 7$	316.171 7	$\overline{T_3}=1.230\ 6$	$I_3'=\frac{1}{8}\overline{m_3}\overline{D_3}^2=8.981\ 7$	$I_3=\frac{K_3\overline{T_3}^2}{4\pi^2}-I_0=8.945\ 6$	11.127 5

当 N 很大时压差对转动惯量的影响很大. 当 N 不是很大时,粘性阻力起主要作用. 此时转动惯量的大小就与空气的接触面积大小有很大的关系. 增加空气接触面积,非线性阻尼效果增强.

由图 1 可以看到, S 越大,转动惯量理论值 I 和实验值 I' 之间的差异就越大,不确定度也随之变大;此时的非线性阻尼导致的实验值与理论值之间的差异越来越明显.

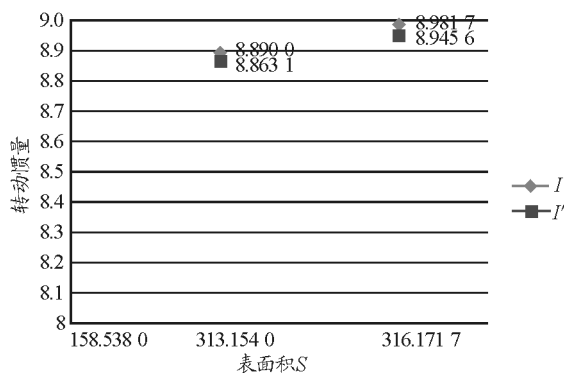


图 1 表面积 S 与转动惯量理论值 I 和实验值 I' 关系图

在实验过程中通过分析无量纲化的动力学方程,还可以通过以下操作减小实验测量误差:将挡光杆完全放入光电传感器中,并且处于居中位置,不能太靠上也不能太靠下;静止时遮光杆处于遮光位置;扭摆安装时旋转制动旋钮,不能扭动物体;多次实验操作时尽量保证初始摆角相同约为 90° ;实验需处于封闭和安静状态下操作。

3 结语

本文针对 HLD-TH-II 型转动惯量组合测试仪测量过程中带来的系统误差处理方面提出了行之有效的方法. 实验中 3 种塑料圆柱选取周期值 $N=5$, 并采取 3 组周期平均值. 本文发现当 N 不是很大

时,粘性阻力对转动惯量起主要作用,此时转动惯量的大小就与空气的接触面积大小有很大关系. 增加空气接触面积,非线性阻尼效果增强. S 越大,转动惯量理论值 I 和实验值 I' 之间的差异就越大,不确定度也随之变大,此时的非线性阻尼导致的实验值与理论值之间的差异越来越明显.

参 考 文 献

- 1 李晓萍,任常愚,尹向宝. 大学物理学. 北京:机械工业出版社,2009. 50 ~ 60
- 2 张晓琳,张烈山,姜广利,等. 基于复合扭摆运动的飞行器转动惯量测量方法研究. 航天制造技术,2011,12(6): 19 ~ 22
- 3 马亚林,陈建新. 扭摆法测物体转动惯量的不确定度分析. 大学物理实验,2011,24(1):93 ~ 96
- 4 陈永华. 扭摆法测转动惯量实验系统的智能化改进. 实验科学与技术,2007,5(2):23 ~ 26
- 5 陈永华,朱国全,唐亚民. 对“用刚体转动仪测刚体转动惯量”实验的改进. 物理通报,2001(11):36 ~ 38
- 6 汤照,张宜虎. 扭摆法测转动惯量的系统误差与实验改进. 工科物理,2000,10(1):33 ~ 36
- 7 丁慎训,张连芳. 物理实验教程(第 2 版). 北京:清华大学出版社,2003
- 8 张三慧. 大学基础物理学(下册). 北京:清华大学出版社,2003
- 9 陈信义. 大学物理教程. 北京:清华大学出版社,2005. 60

Study on Measurement of Inertia Viscous Drag by Torsion Pendulum Method

Wang Bo Yang Kun

(College of Science, Shihezi University Key Laboratory of Ecophysics and Department of Physics, Shihezi, Xinjiang 832003)

Lu Yandong

(Classroom Management Service Center in Logistics Management Office, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003)

Abstract: For biggish defect of systematical error rotational inertia using torsion pendulum method, three Plastic cylinder chooses the periodic quantity $N=5$ and Average value of the three groups, The system error is reduced to the maximum extent. It is found that the viscous resistance plays a major role in the moment of inertia when the n is not very large, the size of the moment of inertia is greatly related to the contact area of the air. Increasing the contact area of the air, the nonlinear damping effect is enhanced. The greater S value, the greater the difference between the theoretical I and experimental I' values, the uncertainty is also increasing, and the difference between the experimental and theoretical values is more and more obvious.

Key Words: rotational inertia; torsion pendulum; viscous resistance