

用阿特伍德机精确测量重力加速度

陈学鹏¹ 姜博浩¹ 侯天驰¹ 朱容齐¹ 王晓峰²

(¹ 武汉大学物理科学与技术学院; ² 武汉大学物理国家级实验教学示范中心, 湖北 武汉 430072)

摘 要 阿特伍德机是普通物理力学部分的一个常见模型, 涉及刚体定轴转动过程中转动角速度、角加速度等物理量的相关计算。本文利用 PASCO 转动传感器搭建了一个简单的阿特伍德机装置, 在考虑到滑轮转动惯量对实验影响的情况下测出重力加速度为 $g = 9.618 \pm 0.051 \text{ m/s}^2$, 之后本文进一步考虑转动轴承摩擦力矩的影响, 使用改变装置释放条件的方式对摩擦力矩进行修正, 测得重力加速度为 $g = 9.791 \pm 0.028 \text{ m/s}^2$ 。搭建的装置和实验方法具有通用性, 可作为大学物理实验的内容提高学生实践动手能力和理实结合能力。

关键词 阿特伍德机; 重力加速度; 转动惯量; 摩擦力矩; 空气阻力

ACCURATE MEASUREMENT OF GRAVITATIONAL ACCELERATION USING ATWOOD MACHINE

CHEN Xuepeng¹ JIANG Bohao¹ HOU Tianchi¹ ZHU Rongqi¹ WANG Xiaofeng²

(¹ School of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072;

² National Demonstration Center for Experimental Physics Education, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072)

Abstract Atwood machine is a common model of general physical mechanics, which involves the calculation of physical quantities such as rotational angular velocity and angular acceleration in the process of rigid body fixed axis rotation. In this paper, a simple Atwood machine device is built by using Pasco rotation sensor. Considering the influence of pulley moment of inertia on the experiment, the gravity acceleration is measured as $g = 9.618 \pm 0.051 \text{ m/s}^2$. After that, this paper further considers the influence of rotating bearing friction torque, and modifies the friction torque by changing the release conditions of the device. Then, the gravity acceleration is measured as $g = 9.791 \pm 0.028 \text{ m/s}^2$. The devices and experimental methods are universal, and can be used as the content of college physics experiments to improve students' practical ability and the ability to combine theory with practice.

Key words Atwood machine; gravitational acceleration; moment of inertia; friction moment; air resistance

阿特伍德机 (Atwood's machine), 是由英国牧师、数学家兼物理学家的乔治·阿特伍德 1784

年在《关于物体的直线运动和转动》一文中提出的用于测量加速度及验证运动定律的机械。阿特伍

收稿日期: 2022-07-15

基金项目: 武汉大学教育教学改革建设引导专项-武大通识 3.0(2020-ybts-08)。

通讯作者: 王晓峰, 男, 副教授, 主要从事普通物理、物理实验教学工作, tulatin_wang@whu.edu.cn。

引文格式: 陈学鹏, 姜博浩, 侯天驰, 等. 用阿特伍德机精确测量重力加速度[J]. 物理与工程, 2023, 33(1): 95-100, 106.

Cite this article: CHEN X P, JIANG B H, HOU T C, et al. Accurate measurement of gravitational acceleration using Atwood machine [J]. Physics and Engineering, 2023, 33(1): 95-100, 106. (in Chinese)

德机的简要结构通常为—根轻绳绕过定滑轮,在轻绳的两端各挂—重物。装置的理论分析涉及力矩、加速度、角加速度、转动惯量等物理量。因为重力矩与重力加速度有关,所以如果能够精确测定加速度或角加速度,阿特伍德机也可以用来测定重力加速度,但目前国内普通物理实验室开设的阿特伍德机相关的力学实验还较少。在为数不多的阿特伍德机测量重力加速度的文献中,通常忽略了滑轮及其联动装置的转动惯量、空气阻力或滑轮摩擦力矩(如文献[1]忽略了摩擦力矩但考虑了空气阻力的影响)中的一个或几个对实验结果的影响,测量精度不高。

我们利用 PASCO 转动传感器和配套滑轮搭建阿特伍德机,通过 PASCO 传感器配套的 Capstone 软件可测量出滑轮转过的角度随时间的变化 $\theta(t)$,借助 Capstone 软件自动计算出角速度 $\omega(t)$,可以很方便地在一次实验中测量大量数据并对测得数据进行分析。为准确测定重力加速度,需要考虑滑轮转轴的摩擦力矩和空气阻力的影响。在实验中,我们首先忽略这两个因素仅仅考虑转动惯量,重点讨论数据处理方法以及忽略引起系统误差的数量级;之后再考虑对这两个因素的修正。从数量级的分析可以看出,对于我们所用的装置,摩擦力矩的影响是主要的,空气阻力的影响是次要的。通过本实验的探究,我们希望完善阿特伍德机测量重力加速度或其他力学参量的数据处理方法和实验步骤,为将阿特伍德机实验引入普通物理实验教学提供参考。

1 实验原理

我们首先忽略滑轮转轴的摩擦力矩和空气阻力的影响。设滑轮转动惯量为 I ,半径为 R ,绳上右侧拉力大小为 T_1 ,左侧拉力大小为 T_2 ,重力加速度大小为 g 。设左端砝码质量大于右端砝码质量 $m_1 > m_2$,则加速度 a 方向如图所示。

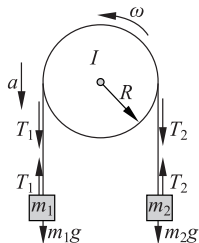


图1 阿特伍德机原理图

对 m_1 、 m_2 ,由牛顿第二定律

$$\begin{aligned} m_1 a &= m_1 g - T_1 \\ m_2 a &= T_2 - m_2 g \end{aligned} \quad (1)$$

对滑轮,忽略轮轴上的摩擦力矩,由刚体转动定理

$$(T_1 - T_2)R = I\alpha \quad (2)$$

设轮绳不打滑,轻绳无伸长。角加速度大小 α 和加速度大小 a 关系如下

$$\alpha R = a \quad (3)$$

考虑到传感器配套的 Capstone 软件可从一次实验的大量数据中自动计算出角速度随时间的变化 $\omega(t)$,我们将上几式联立并整理得

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{g/R}{I/R^2 + (m_1 + m_2)} (m_2 - m_1) \quad (4)$$

从上式可以看出,当 m_1 、 m_2 均确定时,角加速度大小 α 为常数,可由对 $\omega(t)$ 曲线进行直线拟合得到。

从式(4)还可以看出,当 $m_1 + m_2$ (砝码质量和)是定值时,角加速度 α 与 $m_1 - m_2$ (砝码质量差)成正比。实验中,通过固定砝码质量和 $m_1 + m_2$,改变砝码质量差 $m_1 - m_2$,测得多组角加速度 α ,直线拟合可得斜率 k 为

$$k = \frac{g/R}{I/R^2 + (m_1 + m_2)} \quad (5)$$

式(5)中隐藏着另一个线性关系

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{g/R} (m_1 + m_2) + \frac{I/R^2}{g/R} \quad (6)$$

在这种情况下,改变砝码质量和 $m_1 + m_2$,再用之前的方法得到对应斜率 k ,斜率的倒数 $1/k$ 同样与砝码质量和 $m_1 + m_2$ 满足线性关系。通过直线拟合求得斜率 R/g 进而得到重力加速度 g ,由截距还可得到转动惯量 I 。

综上,在忽略摩擦力矩和空气阻力的情况下,结合 PASCO 转动传感器这一新型光电测量装置的特点,我们从阿特伍德机基本理论公式出发得到了三次直线拟合计算重力加速度和转动惯量的数据处理方式。

2 实验装置与步骤

实验装置包括:底座、支架、砝码及砝码盘、细绳、转动传感器组成的阿特伍德机主体(图2);PASCO 850 接口及电脑组成数据采集处理系统。同时我们将实验装置进一步改进:因为实际运动过程中,两端的绳长变化,导致装置两端的质量差并不恒定,于是在砝码盘的底端用同样的轻绳连接^[4],简单分析可知,这时在运动过程中两端的质

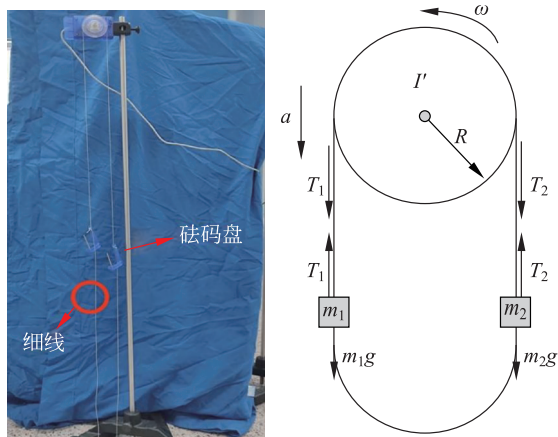


图2 阿特伍德机装置及原理图

量差恒定,不被绳重影响。

实验时装置整体置于水平面上,通过水平仪调节底座水平,支架竖直固定。转动传感器固定于支架上,通过 PASCO 通用接口连接到电脑,细绳两端砝码盘上放置不同质量的砝码,待砝码稳定静止后释放砝码,由于砝码质量不一,在重力作用下,质量重的砝码加速下落,质量轻的砝码加速上升,滑轮加速旋转,PASCO 终端将记录角度随时间的变化并在系统中输出角速度随时间变化的图像。具体实验步骤如下:

(1) 正确组装好实验装置,调整好水平及竖直的位置关系;

(2) 使用 PASCO 软件,调整好转动传感器的连接,选择采样率为 50Hz,开始记录数据;

(3) 固定砝码质量和 $m_1 + m_2$ 为 510g,令砝码质量差 $m_1 - m_2$ 为 10g,从静止状态释放砝码,砝码加速运动,测量角速度 $\omega(t)$,利用 Capstone 软件拟合得出角加速度 α_1 ,其次递增 10g 质量差,测量 6~7 次 α_i ,记录数据于表格;

(4) 令质量和 $m_1 + m_2$ 减少 40g,重复步骤 3。

3 数据处理与结果分析

本部分实验数据见表 1,表 1 中的标题行为质量和、标题列为质量差,表中数据是不同砝码质量和 $m_1 + m_2$ 和不同砝码质量差 $m_1 - m_2$ 下由 Capstone 软件拟合得到滑轮角加速度值。

表 1 中数据除标题列外的每一列,都是质量和 $m_1 + m_2$ 固定,在不同质量差 $m_1 - m_2$ 下的角加速度,对每一列按公式(4)进行直线拟合,得到对应斜率 k ,我们将质量和及对应斜率列在表 2。

表 2 中斜率 k 的倒数 $1/k$ 与质量和 $m_1 + m_2$ 满足公式(6)中的线性关系,直线拟合(见图 3)得到的斜率为 R/g ,其中 R 为滑轮半径, g 为重力加速度。

滑轮直径通过调整改装后的游标卡尺测量的结果见表 3。计算可以得到直径的平均值为 47.84mm,不确定度为 0.024mm,考虑到改装引起的误差,粗略估计直径的最终不确定度为 0.05mm。

我们在 Excel 软件中用 linest 函数结合公式(6)进行直线拟合,该函数同时可给出斜率和截

表1 质量和、质量差及其对应的角加速度

质量和/g 质量差/g	110.0	150.0	190.0	230.0	270.0	310.0	350.0	390.0	430.0	470.0	510.0
10.0	28.0	20.8	30.8	16.6	11.0	9.53	8.53	7.86	7.30	6.73	6.23
20.0	62.0	45.9	48.0	37.0	26.0	22.4	19.5	18.4	16.4	14.9	13.8
30.0	96.1	71.1	64.3	57.0	40.5	35.4	31.4	28.3	25.5	23.6	21.5
40.0	131	95.4	77.8	77.1	54.6	48.0	42.7	38.6	34.4	31.8	29.6
50.0	166	123	82.6	97.6	69.5	60.1	53.8	48.6	43.8	40.5	37.0
60.0	202	149	99.3	117	84.9	73.5	64.9	58.1	53.1	48.7	45.0
70.0	—	—	—	—	98.1	85.4	76.4	68.3	63.2	57.5	—

表2 质量和及其对应斜率

质量和/kg	0.110	0.150	0.190	0.230	0.270	0.310	0.350	0.390	0.430	0.470	0.510
对应斜率 k	3.4769	2.5620	2.0111	1.7097	1.4575	1.2661	1.1314	1.0037	0.9264	0.8456	0.7759

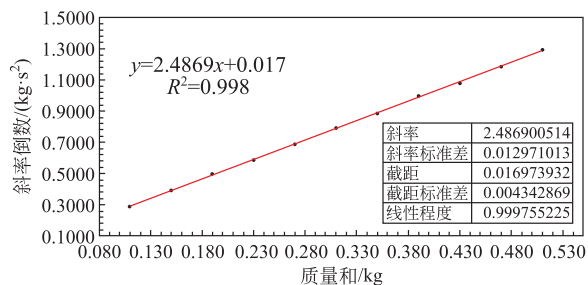


图3 直线拟合得到公式(6)中的斜率和截距

表3 滑轮直径的测量数据

次数	1	2	3	4	5	6
直径/mm	47.80	47.84	47.85	47.86	47.83	47.87

距的标准差,可估算重力加速度 g 的相对不确定度为

$$\delta_g = \sqrt{\delta_R^2 + \delta_{R/g}^2} = 0.00532 \quad (7)$$

最后算得的重力加速度结果为

$$g = 9.618 \pm 0.051 \text{ m/s}^2 \quad (8)$$

可以看出,上述结果相比当地重力加速度 $g = 9.7936 \text{ m/s}^2$ 是偏小的。

结合公式(6)还可计算滑轮(含转轴及轴承)的等效转动惯量

$$I = (3.9 \pm 1.0) \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (9)$$

滑轮质量约 7.0g,设质量全部集中在边沿时估算 I 值为 $4.05 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。可见,尽管转动惯量测量结果相对不确定度比重力加速度的相对不确定度大,但数量级与估算值相符。

4 修正轴承摩擦力矩的影响

在上面的讨论中,我们没有考虑轴承摩擦力矩和空气阻力的影响,主要探究了适合装置的实验测量与数据处理方式。接下来我们将进一步考虑摩擦力矩和空气阻力的影响。对于质量为 m_1 和 m_2 的砝码在运动过程中受到的空气阻力,我们可以根据空气阻力公式进行数量级的估计^[4]

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho S v^2 \quad (10)$$

其中, C 为空气阻力系数,与物体的特征面积例如迎风面积 S 、物体光滑程度和整体形状有关,通常可通过实验测定,一般的平面体取 1; ρ 为空气密度,正常的干燥空气可取 1.293 g/L ; v 为质量块与空气的相对运动速度;最大运动角速度约为

70 rad/s , 半径 $R = 23.9 \text{ mm}$, 迎风面积约为 4 cm^2 , 质量取为 200 g , 由此可估算空气阻力引起的重力加速度的偏离 g_f 为

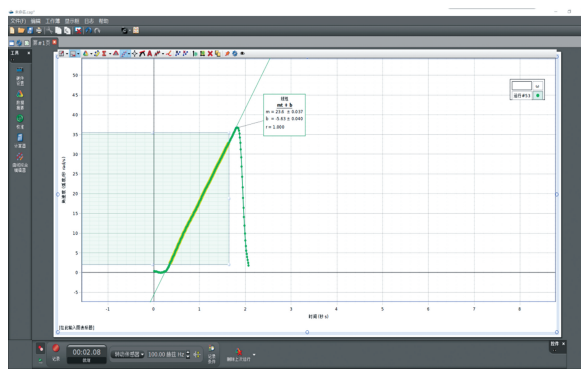
$$g_f = 0.00362 \text{ m/s}^2 \quad (11)$$

可见其对测量结果的影响在小数点后第三位,在目前的实验精度下面我们暂不考虑。

下面考虑轴承摩擦力矩的影响,摩擦力矩通常与转轴负载和转动角速度相关^[2,3],可以写为

$$M = M_T + M_\omega \quad (12)$$

其中, M 为总的摩擦力矩, M_T 与 M_ω 分别为由负载影响的摩擦力矩与由角速度影响的摩擦力矩。通常的研究策略是找到适合特定结构轴承的摩擦力矩经验公式,通过实验测定经验公式中的待定系数,然后代入理论公式分析。我们观察到之前实验中 PASCO Capstone 软件输出的角速度随时间变化曲线 $\omega(t)$ 为一直线(见图 4),说明由角速度引起的摩擦力矩在我们的实验中可忽略。即便如此,确定负载和摩擦力矩的关系仍然比较困难。能否不从这个方向入手,而是直接从实验原理出发,探讨对摩擦力矩进行修正?

图4 PASCO Capstone 软件截图
(横坐标为时间,纵坐标为角速度)

考虑摩擦力矩的影响(图 5),之前公式(1)~公式(3)将变为

$$\begin{aligned} m_1 a &= m_1 g - T_1 \\ m_2 a &= T_2 - m_2 g \\ (T_1 - T_2)R - M &= I\alpha \text{ (滑轮逆时针)} \\ aR &= a \end{aligned} \quad (13)$$

其中, M 为转轴轴承转动中产生的摩擦力矩,这里取绝对值,考虑到摩擦力矩阻碍转动的作用效果,前面加负号(选取与前面忽略摩擦力矩实验中滑

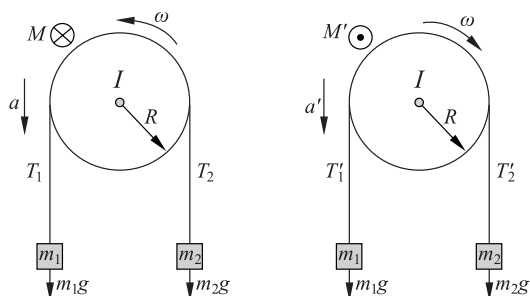


图5 滑轮逆时针转动和顺时针转动的情况

轮逆时针转动对应的垂直纸面向外的角速度方向为正方向)。

如果能另外列出等式,其中摩擦力矩前面的符号为正,则可能存在可以抵消的情况。摩擦力矩方向总是与角速度方向相反,如果我们令 m_1 、 m_2 都不变,而滑轮顺时针旋转导致角速度反向,此种情况下有

$$\begin{aligned} m_1 \alpha' &= m_1 g - T'_1 \\ m_2 \alpha' &= T'_2 - m_2 g \\ (T'_1 - T'_2)R + M' &= I \alpha' \text{ (滑轮顺时针)} \\ \alpha' R &= a' \end{aligned} \quad (14)$$

其中, T'_1 、 T'_2 、 M' 分别为滑轮顺时针转动时绳子张力与摩擦力矩,均为绝对值。由于角速度的反向,摩擦力矩前的符号变为加号,进而导致角加速度不同,加速度亦不同,绳子张力和摩擦力矩都会有微小变化,我们用带撇的符号表示。

在不考虑摩擦力矩的情况下,滑轮顺时针、逆时针转动时,角加速度应该相等。我们在实验中发现,在固定质量和 $m_1 + m_2$ 时,不同方向转动的角加速度大小相差不大,说明摩擦力矩 M 的变化比较小,即可认为

$$M \approx M' \quad (15)$$

综合式(13)~式(15)消去 M 和 M' ,得到

$$\begin{aligned} 2(m_1 - m_2)gR - (m_1 + m_2)(\alpha + \alpha')R^2 \\ = I(\alpha + \alpha') \end{aligned} \quad (16)$$

不考虑摩擦力矩时的公式(4)可以变成类似的形式

$$(m_1 - m_2)gR - (m_1 + m_2)\alpha R^2 = I\alpha \quad (17)$$

可以看出,用逆时针和顺时针转动角加速度的平均值 $(\alpha + \alpha')/2$ 代替忽略摩擦力矩的公式中的 α 后,可沿用之前的数据处理方式,并且能在测量中消除轴承摩擦力矩的影响。

在上述处理过程中,空气阻力的影响亦被减

弱。由于速度大小的不同,空气阻力 f 在两种情况(正、逆时针转动)下的大小不绝对相同,故 f 与 f' 的大小不一定完全一样,但是两者至少在同一量级,写出考虑空气阻力的牛顿第二定律

$$\begin{aligned} T_1 - T_2 &= (m_1 - m_2)g - 2f - (m_1 + m_2)a \\ T'_1 - T'_2 &= (m_1 - m_2)g + 2f' - (m_1 + m_2)a' \end{aligned} \quad (18)$$

在两式相加时, f 和 f' 因符号相反同样可抵消了大部分影响。

上述消除摩擦力矩影响的思路在实验操作中可以很方便地实现:在忽略摩擦力矩的实验中,两边质量不同的砝码通常是从静止开始释放,此时重的砝码 m_1 下降、轻的砝码 m_2 上升;如果我们改变初始释放条件,将轻的砝码 m_2 先快速向下拉动,之后迅速释放,则 m_2 将先减速下降,后加速上升。也就是说,通过上述方式改变初始释放条件即可达到滑轮在一次实验中沿两个不同方向转动。综上,我们从理论和实验方法上,提出了对摩擦力矩进行修正、并且与之前数据处理完全兼容的思路,对减小空气阻力的影响也同样有效。

图6为本部分实验其中一步的软件截图,图中展示的数据包含了9次重复测量。如图所示,斜向下的曲线为测量过程,我们实验中的装置高度1.2m,一次测量过程用时1s左右,砝码块运动距离约为50cm;斜向上的曲线为拉动过程,手动的拉动过程中可能会有数据的波动和轮绳的相对滑动,但拉动过程的数据不用于计算。

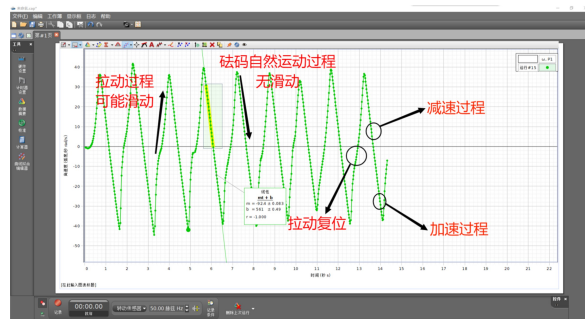


图6 改变初始释放条件时 PASCO Capstone 软件测量结果截图(横坐标为时间,纵坐标为角速度)

5 最终结果

考虑摩擦力矩影响时,实验得到的加速阶段和减速阶段角加速度的平均值 $(\alpha + \alpha')/2$ 与质量

和、质量差的表格见表4。考虑到砝码块标称质量与实际质量的细微差别,我们对实际质量和与质量差通过每次使用砝码的标号计算得到,实际质量和、标称质量和与拟合得到斜率的倒数的对应关系见表5。

对表5数据进行直线拟合,计算得到重力加速度为

$$g = 9.791 \pm 0.028 \text{m/s}^2 \tag{19}$$

由于增加了数据组数(表2的11组增加到表5的13组),同时用实际质量和代替了标称质量和,不确定度有所下降。对于数据处理中用到的质量差,我们也用实际值代替了表4中标称值。但因为每次用的砝码片不完全相同,对应某一标称质量差的各次实验中,实际质量差并不严格一致,因此此部分数据并未在表中列出。表5中斜率倒数 $1/k$ 是由实际质量差拟合得到。

本部分中,在考虑到摩擦力矩影响的实验中,我们通过改变实验初始释放条件以达到减小摩擦阻力矩影响的目的,避免了查找或推导具体摩擦阻力矩公式,也避免了对摩擦力矩相关参数的测定,空气阻力的影响同样也被减弱了,得到了较为准确的重力加速度值。武汉当地重力加速度为

$g = 9.7936 \text{ m/s}^2$,我们的最终实验结果为 $g = 9.791 \pm 0.028 \text{ m/s}^2$,测量值与当地标准值相符。

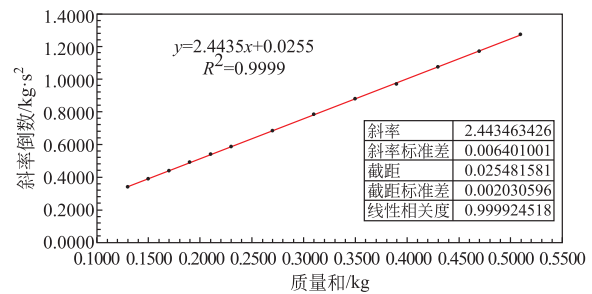


图7 考虑摩擦力矩后直线拟合得到公式(6)中的斜率和截距

6 结语

在阿特伍德机精确测量重力加速度的实验中,我们完成了以下几方面工作:

首先,我们基于PASCO转动传感器搭建了实验装置。在忽略摩擦力矩的情况下,通过优化测量和数据处理方式(三次直线拟合),测出重力加速度 $g = 9.618 \pm 0.051 \text{m/s}^2$,同时粗略测出滑轮及转轴转动惯量 I ,提出并完善了数据处理方法,为用阿特伍德机精确测量重力加速度打下了基础。

表4 质量和(标称)、质量差(标称)与对应的角加速度

理想质量差/g	理想质量和/g												
	130.0	150.0	170.0	190.0	210.0	230.0	270.0	310.0	350.0	390.0	430.0	470.0	510.0
10.0	29.20	25.35	22.50	20.65	19.05	17.55	15.50	12.90	10.60	9.45	9.95	8.67	7.98
20.0	58.75	50.95	45.40	41.00	37.15	34.70	29.85	25.50	23.65	20.65	19.00	17.35	15.65
30.0	88.15	76.60	68.30	61.35	55.05	51.45	44.10	38.70	34.70	31.40	27.65	25.70	23.05
40.0	117.50	102.75	90.75	82.20	76.20	68.45	58.45	50.80	45.80	40.95	36.95	34.30	31.05
50.0	146.50	127.50	113.50	102.20	93.05	85.60	73.10	63.80	56.75	51.60	46.75	42.90	39.25
60.0	175.50	154.00	136.50	122.50	111.50	103.25	87.10	76.35	67.75	61.95	56.65	52.10	47.20
70.0	204.50	180.00	159.50	142.50	129.50	119.00	101.65	89.10	79.40	72.30	65.90	60.50	55.35

表5 标称质量和、实际质量和及其对应斜率

理想质量和/kg	0.1300	0.1500	0.1700	0.1900	0.2100	0.2300	0.2700	0.3100	0.3500	0.3900	0.4300	0.4700	0.5100
实际质量和/kg	0.12982	0.14985	0.16980	0.18975	0.20992	0.22978	0.26972	0.30970	0.34957	0.38951	0.42966	0.46960	0.50945
对应斜率倒数 1/k	0.3415	0.3890	0.4388	0.4925	0.5414	0.5872	0.6850	0.7845	0.8803	0.9720	1.0748	1.1702	1.2742

的视觉效果的影响,理论分析与实验结果一致,合理解释了复虹的形成机理及影响因素。

参 考 文 献

- [1] HULST H C. Light scattering by small particles[M]. New York: Dover Publications, 1981.
- [2] ALEXANDER H. Rainbows in nature: Recent advances in observation and theory[J]. European Journal of Physics, 2016, 37(6): 1-1.
- [3] LAVEN P. Supernumerary arcs of rainbows: Young's theory of interference[J]. Applied optics, 2017, 56(19): 104-112.
- [4] OUELLETT P E. Supernumerary bows: interference theory with the zero wavefront as a basic element[J]. Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision, 2019, 36(7): 1162-1172.
- [5] OUELLETTE P E. Supernumerary bows: caustics of a refractive sphere and analysis of the relative overall Gouy phase shift of supernumerary rays [J]. Applied optics, 2019, 58(3): 712-722.
- [6] LAVEN P. Simulation of rainbows, coronas and glories using Mie theory and the Debye series[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2004, 89(1-4): 257-269.
- [7] 韩凯, 许晓军. 基于散射模型的霓虹现象研究[J]. 激光与红外, 2016, 46(3): 334-339.
HAN K, XU X J. Study of the rainbow and secondary rain-

bow based on the scattering model[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(3): 334-339. (in Chinese)

- [8] FRASER A B. Why can the supernumerary bows be seen in a rain shower[J]. Journal of the Optical Society of America, 1983, 73(12): 1626.
- [9] SHAN X, XIAHOU C K, CONNOR J N L. Rainbows, supernumerary rainbows and interference effects in the angular scattering of chemical reactions: an investigation using Heisenberg's S matrix programme[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2018, 20(2): 819-836.
- [10] XIAHOU C K, SHAN X, CONNOR J N L. Rainbows, supernumerary rainbows and interference effects in the angular scattering of chemical reactions: Effect of varying the modulus of the S matrix in the context of Heisenberg's S matrix programme[J]. Physica Scripta, 2019, 94(6).
- [11] 余虹. 彩虹与色散[J]. 物理与工程, 2017, 27(2): 22-25.
YU H. Rainbow and dispersion[J]. Physics and Engineering, 2017, 27(2): 22+25. (in Chinese)
- [12] Kim. A Perfect Rainbow[DB/OL]. 2018. 9. 12. <https://writinginnorthnorfolk.com/2018/09/12/a-perfect-rainbow/>.
- [13] WALKER J D. Multiple rainbows from single drops of water and other liquids[J]. American Journal of Physics, 1976, 44(5): 421-433.
- [14] CIE (1932). Commission internationale de l'Eclairage proceedings[C]. Cambridge: Cambridge University Press, 1931.

(上接第 100 页)

其次,在考虑摩擦力矩的情况下,我们利用摩擦力矩方向与角速度方向相反的特点,在不需要摩擦力矩的具体表达式或者数值的情况下,通过改变实验初始释放条件对摩擦力矩进行修正,同时对装置在进行改进,精确了质量测量,得到了比较精确的结果,即重力加速度 $g = 9.791 \pm 0.028 \text{ m/s}^2$, 简明有效地对摩擦力矩与空气阻力进行了修正,在有限的实验条件下,将阿特伍德机测量重力加速度精度显著提高。

总体而言,本实验将经典阿特伍德机实验与现代光电测量仪器巧妙结合,通过优化测量和数据处理方式、改变实验初始释放条件等手段精确测得了重力加速度 g , 测量精度几乎达到 PASCO 装置的极限。本实验可作为普通物理实验在高校中开展,以提高学生理论实际结合能力。希望本文的讨论对相关物理实验教学与理论教学有一定的参考意义。

参 考 文 献

- [1] 赵力杰, 付博洋, 梁子明, 等. 基于改进型阿特伍德机的重力加速度测量[J]. 大学物理实验, 2021, 34(3): 76-79.
ZHAO L J, FU B Y, LIANG Z M, et al. Measurement of gravity acceleration based on Atwood machine[J]. Physical Experiment of College, 2021, 34(3): 76-79. (in Chinese)
- [2] 张葵, 李建华, 等. 球轴承摩擦力矩的分析计算[J]. 轴承, 2001(1): 8-11.
ZHANG K, LI J H. Analyzing calculation for friction moment of ball bearing[J]. BEARING, 2001(1): 8-11. (in Chinese)
- [3] 王玲, 黄克威, 杨昆元. C7046112 轴承摩擦力矩的研究[J]. 摩擦学学报, 1993, 13(1): 68-72.
WANG L, HUANG K W, YANG K Y. Study on friction torque of C7046112 bearing[J]. TRIBOLOG, 1993, 13(1): 68-72. (in Chinese)
- [4] JOHNSON G O. Making Atwood's machine "work"[J]. Physics Teacher, 2001, 39(3): 154-158.