

恒力作用下动量定理 DIS 实验的研究

杨 阳 倪 敏 魏 莹 郭强友 杜晓贺

(上海师范大学数理学院 上海 200234)

(收稿日期:2019-02-24)

摘 要:通过对恒力作用下动量定理的 DIS 实验探究,分析影响该实验误差大小的 4 个因素,并分别从改进实验操作和摩擦系数定量修正实验两方面来减小实验误差,最后,利用落体法的原理设计出一种竖直方向上的动量定理验证实验,其操作简单,可在教学中使学生更加完整、简单地认识和了解动量定理。

关键词:DIS 实验 动量定理 摩擦系数 落体法

动量定理是高中物理一个重要的知识点,也是物理实验教学中必不可少的内容.本文对恒力作用下动量定理的 DIS 实验进行分析,得出影响实验误差大小的 4 个因素,并对实验的内容进行改进以减小这 4 个因素对实验造成的误差.定量计算导轨滚动摩擦系数后,采用引入滚动摩擦系数对实验数据进行修正的改进方法,不仅可以提高实验精度,也可简化实验步骤.对于实验拓展的内容,利用落体法的原理,设计出一种在竖直方向上验证恒力作用下动量定理的 DIS 实验,并对实验结果进行分析,讨论该方法的可行性,发现将其应用在教学中可向学生直观完整地展现动量定理的内容。

1 基本原理及误差分析

1.1 基本原理

动量定理的内容是:物体所受合力的冲量等于物体动量的变化,即 $Ft = m(v' - v)$. 实验原理如图 1 所示。

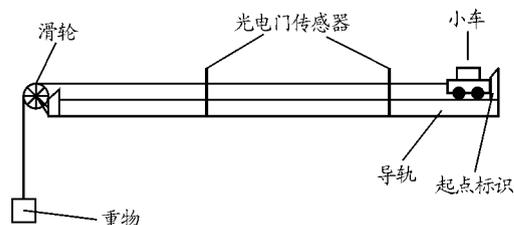


图 1 实验原理图

利用质量远小于小车的重物拉动小车在导轨上运动,此时拉力可以看作是小车所受到的恒力,使用光电门测速后自动计算小车经过两个光电门的时间,由此得到小车所受合力的冲量;由小车本身质量、光电门所记录的小车两次挡光时间和挡光片宽度,即可得到小车的动量变化。

1.2 误差分析

根据上述实验原理,动量定理公式可写为

$$m v_2 - m v_1 = I + f T_{12} + I' \quad (1)$$

式(1)中, m 是小车的质量, v_1 和 v_2 分别是小车通过两个光电门时的瞬时速度, I 是恒力在一段时间内给小车的冲量, f 是小车受到的滚动摩擦力, T_{12} 是小车经过两个光电门所需的时间, I' 是系统误差冲量^[1].实验相对误差为

$$\delta = \frac{I - \Delta p}{I + \Delta p} \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中 I 为小车所受冲量的大小, Δp 为小车的动量变化量.可根据公式(1)将式(2)改写为

$$\delta = \frac{f T_{12}}{m_1 g T_{12} + m(v_2 - v_1)} + \frac{I'}{m_1 g T_{12} + m(v_2 - v_1)} \quad (3)$$

根据上式,若要减小实验误差,就要将误差公式中的两项分别减小.对于式(3)中的第一项,可以将摩擦力减到最小或者消除摩擦力的影响,使得这一

作者简介:杨阳(1996-),女,在读硕士研究生.

通讯作者:倪敏(1960-),女,副教授,主要从事物理教育和物理实验研究.

项的大小近似为零.第二项中可以通过增大小沙桶 m_1 的质量,增大小车 m 的质量,增大小车通过两个光电门的速度差,增大小车通过两个光电门的时间来增大分母,使这一项的大小近似为零^[2].另外,还需固定导轨,增加系统的稳定性,以此来减小误差.

综上所述可得减小实验误差的方法为:(1)固定导轨;(2)增大小车的质量;(3)增大光电门之间的距离;(4)使小车在实验前进行受力平衡,消除摩擦力的影响.

2 改进方案

2.1 影响实验误差大小4个因素的改进方法及结果分析

表1 固定导轨前后,改变拉力 F

		m_1/kg	$\Delta p/(\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$I/(\text{N} \cdot \text{s})$	$\delta/\%$
不固定导轨	1	0.003 8	0.052 4	0.055 5	5.8
	2	0.004 3	0.057 0	0.062 8	9.7
	3	0.004 8	0.060 2	0.067 7	11.7
固定导轨	1	0.003 8	0.047 1	0.081 5	5.4
	2	0.004 3	0.054 4	0.058 7	7.6
	3	0.004 8	0.065 7	0.070 4	6.9

从表1数据可看出,导轨的固定度会给实验结果造成不确定误差,用固定的导轨实验后计算的误差相对较小且稳定.

2.1.2 增大小车质量

在固定导轨的基础上,逐渐增加小车质量^[4],采用同样的实验方法,记录当小车质量逐渐增加时的“冲量”与“动量变化”及其相对误差,拉力 $m_1 = 0.019 2 \text{ kg}$,实验结果如表2所示.

表2 增大小车质量

m/kg	$\Delta p/(\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$I/(\text{N} \cdot \text{s})$	$\delta/\%$
0.222 3	0.063 5	0.069 8	9.5
0.272 1	0.074 1	0.071 8	3.2
0.321 9	0.080 7	0.082 8	2.6
0.371 9	0.090 2	0.091 4	1.3
0.421 6	0.096 2	0.095 2	1.0

将宽度为 0.02 m 的“I”型挡光片固定于载有配重片的小车上,同时将两个光电门固定于力学导轨上并接入数据采集器,打开 DISLab“通用软件”,添加计算表格记录拉力、动量变化、冲量等,首先将导轨的一侧微微垫高,以保证小车在水平方向上所受到的合外力为恒力,随后改变小车配重片个数或拉力大小,进行动量定理的验证^[3].

2.1.1 固定导轨

在实验过程中,分别在力学导轨固定前后进行3次实验,小车质量

$$m = 0.323 8 \text{ kg}$$

观察实验误差的变化情况.实验结果如表1所示.

由表2数据分析可得,在拉力不变的情况下,当小车质量增大时,实验误差逐渐减小.

可见小车质量大小对实验结果的影响是比较显著的,并且小车的质量越大于小沙桶的质量,实验误差越小.因此,增大小车的质量有利于减小实验误差.

2.1.3 改变两光电门的间距

在减小了前两种误差因素对实验结果的影响后,通过改变两个光电门之间的距离,进而改变小车通过两个光电门的速度差及经过时间,采用同样的实验方法,记录当两光电门间距改变时的“冲量”与“动量变化”及其相对误差,小车质量

$$m = 0.421 6 \text{ kg}$$

拉力

$$m_1 = 0.019 2 \text{ kg}$$

实验结果如表3所示.

表3 两个光电门相距的长度

L/m	$\Delta p/(kg \cdot m \cdot s^{-1})$	$I/(N \cdot s)$	$\delta/\%$
0.1	0.041 7	0.042 3	1.4
0.2	0.074 7	0.075 2	0.7
0.3	0.115 6	0.118 3	2.3
0.4	0.139 7	0.144 1	3.1
0.45	0.154 5	0.159 8	3.4

其中 L 是两光电门之间的距离,从数据上可以看出,在本次实验使用的力学导轨上,0.1 ~ 0.3 m 是误差近似较小的范围,距离再增大后误差又会再次增大.虽然对于不同导轨而言,两光电门之间的最佳距离是不一样的,但根据误差分析可知,两光电门的间距仍然不能太小.若要使实验结果更为精确,可合理增大光电门之间的距离.

2.1.4 平衡摩擦力

在减小了前3种误差因素对实验结果的影响后,进一步平衡摩擦来减小实验误差^[5],调节轨道的倾斜程度,推动小车使其经过两光电门的时间近似相等,这时小车的受力近似视为平衡,在这种状态下按照动量定理 DIS 实验的内容进行实验,观察误差的变化情况并且分析小车在受力平衡时对于实验误差的影响,两光电门距离

$$L = 0.25 \text{ m}$$

小车的质量

$$m = 0.421 6 \text{ kg}$$

实验结果如表4所示.

表4 小车受力平衡(最佳方案选择)

m/kg	$\Delta p/(kg \cdot m \cdot s^{-1})$	$I/(N \cdot s)$	$\delta/\%$
0.005 7	0.051 2	0.050 6	1.2
0.008 1	0.065 1	0.064 4	1.1
0.011 3	0.078 1	0.077 4	0.9
0.015 0	0.087 0	0.086 5	0.6
0.018 2	0.098 2	0.099 2	1.0

由以上实验数据可知,当小车平衡摩擦力后,计算得出的误差比较之前实验结果要小,所以,摩擦力对实验结果的影响是非常大的.平衡摩擦力后,实验误差都趋向于稳定并且误差的数值也非常小.

本次的实验是实验的最佳方案.在本次实验中,两光电门间的最佳距离在 25 cm 处,小车的质量为 0.421 6 kg,远大于拉力大小,并且在平衡摩擦力后固定了力学导轨的位置.在此4个条件同时满足的情况下,恒力作用下动量定理 DIS 实验的误差将会减小并趋于稳定.

2.2 引入滚动摩擦系数进行数据修正

2.2.1 修正方法

小车在导轨上的运动可以看成无滑滚动,因此可采用引入滚动摩擦系数对实验数据修正的方法来减小实验误差.

首先,利用水准仪将轨道调整至水平状态,如图2所示.保证小车在水平方向上所受到的外力只有摩擦力.然后,使小车在水平导轨上运动,分别测出小车在水平方向上只受到摩擦力作用时通过两个光电门的瞬时速度大小后,利用公式

$$v_2 = v_1 + at$$

计算出小车在水平方向上的加速度大小.公式中 a 为小车的加速度大小, v_1 和 v_2 分别为小车依次通过两个光电门的瞬时速度, t 为小车经过两个光电门的时间.根据牛顿第二定律 $f = ma$ 可以计算出摩擦力 f 的大小,通过公式 $\mu = \frac{f}{mg}$ 得出导轨的滚动摩擦系数.公式中 f 为摩擦力, m 为小车的质量, g 为重力加速度.



图2 轨道调平

最后,将得到的平均滚动摩擦系数带入在水平导轨上测得的实验数据中,便可以达到修正误差的效果.

2.2.2 定量修正导轨滚动摩擦力实验数据与分析

根据上述实验原理,测得力学轨道滚动摩擦系数实验数据如表5所示.

表5 力学导轨滚动摩擦系数

$a/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	m/kg	f/N	μ
-0.100 9	0.071 8	-0.007 2	0.010 2
-0.101 6	0.071 8	-0.007 3	0.010 4
-0.108 4	0.071 8	-0.007 8	0.011 1
-0.107 4	0.221 6	-0.023 8	0.011 0
-0.106 2	0.221 6	-0.023 5	0.010 8
-0.108 4	0.221 6	-0.024 0	0.011 1
-0.108 9	0.422 1	-0.046 0	0.011 1
-0.106 1	0.422 1	-0.044 8	0.010 8
-0.108 5	0.422 1	-0.045 8	0.011 1

根据实验数据得出本实验导轨的平均滚动摩擦系数为 0.010 8(此时两光电门相距 0.25 m)。

实验中,小车受到的合外力大小

$$F = m_1 g - f$$

将表 5 所测得的平均滚动摩擦系数代入在水平导轨上测得的实验数据中,对小车在实验中所受合外力作用的冲量进行修正.修正结果如表 6 所示,小车的质量 $m = 0.422 \text{ kg}$ 。

修正后,实验误差处于 0.2% ~ 4.2% 之间.在误差允许的范围内,可以视小车在恒力作用下的一段时间内的冲量近似等于小车在这段时间内的动量变化量.这样的定量计算可使实验操作更加简单有效,使实验精度明显提高.同时,让学生运用已有的物理知识来解决实验问题,锻炼其科学思维与科学探究能力,并能有效地培养其物理核心素养。

因此,采用引入滚动摩擦系数对实验数据修正的方法来减小实验误差是有效可行的。

表6 滚动摩擦系数修正

	m_1/kg	F/N	$\Delta p/(\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$I/(\text{N} \cdot \text{s})$	$\delta/\%$
修正前	0.014 2	0.139 2	0.062 7	0.089 9	36
	0.017 0	0.166 6	0.073 1	0.095 8	27
	0.021 1	0.206 8	0.082 7	0.104 5	23
	0.024 2	0.237 2	0.087 4	0.108 0	21
修正后	0.014 2	0.094 5	0.062 7	0.061 0	2.8
	0.017 0	0.121 9	0.073 1	0.070 1	4.2
	0.021 1	0.162 1	0.082 7	0.081 9	1.0
	0.024 2	0.192 5	0.087 4	0.087 6	0.2

3 拓展实验——落体法验证动量定理

3.1 拓展实验原理

在恒力作用下动量定理的 DIS 实验是在力学导轨上进行的水平方向上的实验验证.小沙桶的质量需要远小于小车的质量才能看作小车所受到的是恒力.在实验中,由于小沙桶的晃动或者其质量没有远远小于小车质量,这些因素都会给实验带来误差。

当物体在做自由落体运动时,其受到自身的重力与空气阻力的影响.所受到空气阻力的大小和物体本身与空气的接触面积有关.若物体在下落过程中与空气的接触面积足够小,可以近似地将物体所受到的恒力视为物体自身的重力。

在实验操作中,可在塑料直尺上加一块挡光片充当自由下落的物体,实验原理如图 3 所示。

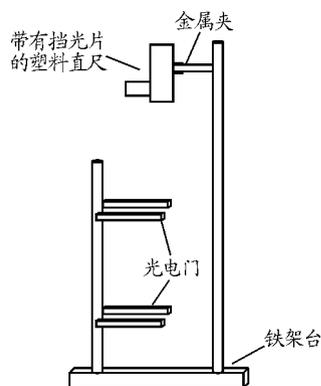


图3 落体法实验原理

首先,将挡光片与直尺紧紧粘贴在一起;其次,直尺在下落过程中与空气的接触面积非常小,由此

可忽略阻力的影响;最后,塑料直尺竖直下落时挡光片经过两个光电门,可计算其经过两个光电门时的瞬时速度.

落体法验证动量定理 DIS 实验中,直尺所受到的恒力就是直尺本身的重力.由测得的通过两个光电门的时间 T_{12} ,可计算出重力在这段时间内作用在直尺上的冲量大小;利用直尺分别经过两个光电门时的瞬时速度,得到直尺动量变化量.

3.2 实验结果及分析

根据上文中落体法验证动量定理的实验原理进行操作,挡光片与塑料直尺的质量 $m = 0.1638 \text{ kg}$,得到实验数据如表 7 所示.

表 7 落体法验证动量定理

$\Delta p / (\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$I / (\text{N} \cdot \text{s})$	$\delta / \%$
0.292 0	0.303 5	3.9
0.241 8	0.246 4	1.9
0.252 4	0.261 0	3.4
0.260 1	0.268 5	3.2
0.240 6	0.246 4	2.4

通过分析表 7 可得,实验误差范围在 $1.9\% \sim 3.9\%$.在误差允许的范围,可以近似认为直尺在下落过程中重力在一段时间内所产生的冲量大小等于直尺在这段时间内的动量变化量.

直尺受恒力作用过程中,有

$$m v_2 - m v_1 = I + f T_{12} \quad (4)$$

式(4)中, m 是直尺的质量, v_1 和 v_2 分别是直尺通过两个光电门时的瞬时速度, I 是直尺所受的重力在一段时间内产生的冲量, f 是直尺所受到的空气阻力, T_{12} 是挡光片经过两个光电门所需的时间.由式(4)可得,落体法进行动量定理 DIS 实验在误差上比利用力学导轨进行实验少一项系统冲量 I' ,并且空气阻力带来的影响也微乎其微.

虽然在本次实验中所得到的误差较小且稳定,但直尺受到的空气阻力所带来的误差影响是存在的,并且无法通过计算得出阻力的大小,故无法修正本次实验数据.在实验中,直尺是否竖直下落对实验影响是不可忽略的,若下落时直尺并非竖直状态,挡

光片的挡光距离则会发生改变,从而再次引入不可测量的实验误差.因此,在实验过程中,应认真调节带有挡光片的直尺,保证其下落过程一直保持竖直状态.

4 总结

通过理论分析与实验验证发现,在实验中应平衡摩擦力,固定力学导轨,合理增大两光电门间距,增大小车的质量.当这 4 个条件同时满足时,可以有效减小实验的相对误差.虽然在操作步骤上需要一定的时间,但是在减小误差的表现上却是非常完美的.

在平衡摩擦力方面,定量计算滚动摩擦系数的方法操作简单,只需将实验导轨利用水准仪调至水平后进行计算.这可以让学生逃离出繁琐的实验步骤,专注于实验本身所要验证的定理中,运用已有物理知识解决实际问题,做到活学活用,加深学生对知识点的理解.

落体法验证动量定理实验相对于力学导轨验证动量定理实验有着两大优势:

(1) 实验器材与实验操作简单明了,只需保证下落时直尺的竖直即可;

(2) 实验误差稳定,实验原理符合动量定理.由于阻力大小的不可测,使得该实验的误差无法进行减小或是修正.所以,落体法必定会存在一定的误差.落体法验证动量定理实验简化了步骤与器材,向学生直观地展现出了动量定理的内容,让学生更加完整、简单地了解并认识动量定理.

参考文献

- 1 盛海平. 运用数字化实验系统突破“动量定理”教学难点. 物理教学探讨, 2006, 24(17):53 ~ 55
- 2 陶萍萍. 恒力作用下动量定理实验的误差分析及实验改进. 物理教学, 2016, 38(03):26 ~ 28
- 3 朗威. DISLab V6.5 物理实验实例
- 4 马丽娜, 倪敏, 韩唯伟, 等. DIS 验证恒力做功的动能定理及其改进. 中学物理教学参考, 2015, 44(20):95 ~ 98
- 5 刘磊, 倪敏. 动能定理实验的 DIS 探究. 物理教学探讨, 2013, 31(01):54 ~ 55, 58