

气轨法验证动量守恒定律实验中影响因素的探讨

欧阳建伟

(深圳市翠园中学 广东 深圳 518001)

(收稿日期:2020-08-24)

摘要:动量守恒定律是最早发现的一条守恒定律,也是自然界中最重要、最普遍的客观规律之一.在用气垫导轨来验证动量守恒实验过程中发现光电门位置,以及两滑块的质量,导轨调平等因素对实验的结果有不小的影响,从实验测量的角度分析这些因素对实验的影响,测量结果表明在 $S_2 > 7$ cm 时,动量损失率和能量损失率随着两光电门之间距离的增大而有所减小.选择两光电门之间距离为 10 ~ 20 cm,滑块质量 m_1 略大于或等于 m_2 时,有不错的实验效果.

关键词:动量守恒定律 气垫导轨 光电门 光电计时器

在用气垫导轨来验证动量守恒实验过程中发现光电门位置,以及两滑块的质量,导轨调平等因素对实验的结果有不小的影响,为此,有不少学者进行了一些研究.陈皓等从气垫层的内摩擦力、平均速度代替瞬时速度以及气垫导轨调平等方面对实验中容易出现系统误差的几个方面进行了分析^[1].邹力勋认为在气垫导轨实验中主要有光电门结构稳定性以及光路安排、滑块速度、气压等几方面的影响^[2].但这些因素在验证动量守恒定律实验时,对测量结果的影响如何,以及如何选择实验条件,这些条件在实验中如何去满足,则需要进行实验来研究.本文以验证动量守恒定律为例,从实验测量的角度分析这些

因素对实验的影响,这一研究对用气垫导轨验证动量守恒定律实验具有一定的指导意义.

1 实验原理

如果一个力学系统所受的合外力为零或在某方向上的合外力为零,则该力学系统总动量守恒或在某方向上守恒^[3].如图1所示,设滑块1和2的质量分别为 m_1 和 m_2 ,碰撞前两个滑块的速度分别为 v_{10} 和 v_{20} ,碰撞后的速度分别为 v_1 和 v_2 ,则根据动量守恒定律有

$$m_1 v_{10} + m_2 v_{20} = m_1 v_1 + m_2 v_2 \quad (1)$$

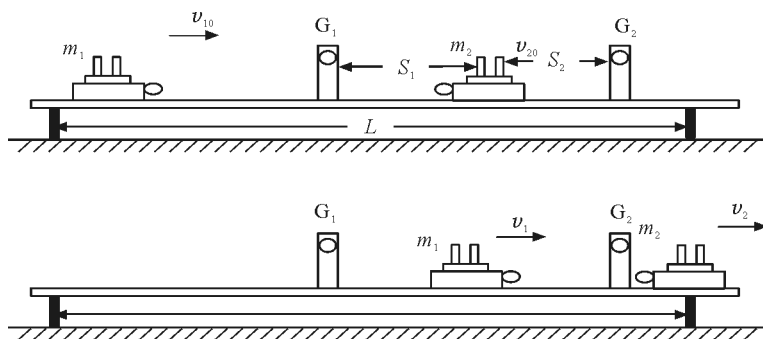


图1 验证动量守恒定律实验原理示意图

1.1 完全弹性碰撞

完全弹性碰撞是一种理想的碰撞,其特点是碰

撞前后不仅系统的动量守恒,且机械能也守恒.如果在两个滑块的相碰端都安装上弹性的缓冲弹簧,则

滑块之间发生对心碰撞时,有

$$\frac{1}{2}m_1v_{10}^2 + \frac{1}{2}m_2v_{20}^2 = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 \quad (2)$$

如果令 $v_{20} = 0$, 则动量损失率 P 为

$$P = \frac{\Delta p}{p_0} = \frac{p_0 - p_1}{p_0} = \frac{m_1v_{10} - (m_1v_1 + m_2v_2)}{m_1v_{10}} \quad (3)$$

动能损失率 E 为

$$E = \frac{\Delta E}{E_0} = \frac{E_0 - E_1}{E_0} = \frac{\frac{1}{2}m_1v_{10}^2 - \left(\frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2\right)}{\frac{1}{2}m_1v_{10}^2} \quad (4)$$

理论上,完全弹性碰撞的动量损失和能量损失都为零.但在实验过程中,由于空气阻力和气垫导轨本身的原因,是不可能完全为零.

1.2 完全非弹性碰撞

如果两个滑块碰撞后,以同一速度运动而不分开,就称为完全非弹性碰撞.其特点是:碰撞前后系统的动量守恒,但机械能不守恒,实验室中为了较好地实现完全非弹性碰撞,可以在滑块相碰端装上尼龙搭扣或放置黄油.则有

$$m_1v_{10} + m_2v_{20} = (m_1 + m_2)v \quad (5)$$

在实验中,让 $v_{20} = 0$, 则动量损失率 P 为

$$P = \frac{\Delta p}{p_0} = 1 - \frac{(m_1 + m_2)v}{m_1v_{10}} \quad (6)$$

动能损失率 E 为

$$E = \frac{\Delta E}{E_0} = 1 - \frac{(m_1 + m_2)v^2}{m_1v_{10}^2} \quad (7)$$

1.3 碰撞恢复系数

牛顿曾提出“弹性恢复系数”的概念,一般称为恢复系数,用 e 表示,其定义为:对于材料一定的两物体,碰撞后分开的相对速度与碰撞之前接近的相对速度成正比^[4].碰撞前接近时的相对速度为 $v_{10} - v_{20}$,碰撞后分离时的相对速度 $v_2 - v_1$,于是就有

$$e = \frac{v_2 - v_1}{v_{10} - v_{20}} \quad (8)$$

恢复系数 e 由碰撞物体的材质决定, e 值可由实验来测定,滑块上的碰撞弹簧是钢制的, e 值在 $0.95 \sim 0.98$,虽然它接近 1,但是其差异也是明显的,因此,

在实际的气垫导轨上是不能实现理想的完全弹性碰撞的.

2 测量仪器及测量过程

2.1 测量仪器

气垫导轨(L-QG-T-2000/5.8),计时计数测速仪(MUJ-5C),滑块,尼龙搭扣,配重块,挡光片,光电门,游标卡尺,数字天平等.

2.2 测量过程

(1) 完全弹性碰撞

接通电源,并将导轨调至水平,取两滑块 m_1 和 m_2 ,并给两滑块都装上宽度为 3 cm 的 U 型挡光片^[5],再给两滑块分别安装上弹簧钢圈,并用电子秤称出 m_1 和 m_2 的质量(包括挡光片及碰簧),将滑块 m_2 置于两光电门的中间,并使其静止,再将另一个滑块 m_1 放在光电门 G_1 的外侧,用一外力使滑块 m_1 朝滑块 m_2 方向运动并与 m_2 做对心碰撞,分别记下 m_1 通过两个光电门的时间 Δt_0 和 Δt_1 ,以及 m_2 通过第二个光电门的时间 Δt_2 ,重复实验 5 次,记录所测数据,计算 E 和 P ,并分析误差产生的原因.

(2) 完全非弹性碰撞

导轨调平后,对于两个滑块 m_1 和 m_2 ,只需要给滑块 m_1 安装上宽度为 3 cm 的 U 型挡光片,而滑块 m_2 不需要安装挡光片^[6],再将两滑块碰撞的一端分别安装上尼龙搭扣,用电子秤称出 m_1, m_2 的质量(包括挡光片及尼龙搭扣),将滑块 m_2 置于两光电门之间,使其静止,将另一个滑块 m_1 放在光电门 G_1 的外侧,用一外力使滑块 m_1 朝滑块 m_2 方向运动并与 m_2 做对心碰撞,分别记下滑块 m_1 通过光电门的时间 Δt_0 ,以及 m_1, m_2 粘在一起后通过第二个光电门的时间 Δt_2 ,重复实验 5 次,记录所测数据,计算 E, P ,并分析误差产生的原因.

3 测量结果与分析

3.1 完全弹性碰撞实验中两光电门间的距离对测量的影响

在验证完全弹性碰撞的实验中,测量得 $m_1 = 331.72 \text{ g}, m_2 = 174.21 \text{ g}$,挡光片的宽度为 0.03 m .

因为两滑块自身有一定的长度,两滑块上的两光电门之间最小距离为 34 cm,而本次实验需要两滑块所载的挡光片在碰撞时应在两光电门之间的距离内方能进行有效测量.实验时保持 m_2 位置不变,设滑

块 m_2 上的挡光片后沿距光电门 G_2 的距离为 S_2 ,通过移动光电门 G_2 的位置来改变两光电门的距离,并以此来探究其对实验测量结果的影响.实验测量结果如表 1 所示.

表 1 当滑块 $m_1 > m_2$ 时两光电门之间的距离变化对测量结果的影响

| 物理量 S_2/cm | $\Delta t_0/\text{s}$ | $\Delta t_1/\text{s}$ | $\Delta t_2/\text{s}$ | E | P | e |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------|-----------|----------|
| 0.5 | 0.033 92 | 0.106 62 | 0.031 84 | 0.302 76 | 0.122 38 | 0.747 19 |
| 1 | 0.037 07 | 0.116 94 | 0.032 38 | 0.211 19 | 0.081 76 | 0.827 84 |
| 2 | 0.036 25 | 0.119 68 | 0.029 41 | 0.110 39 | 0.049 79 | 0.929 68 |
| 3 | 0.040 63 | 0.132 53 | 0.032 37 | 0.078 62 | 0.034 25 | 0.948 61 |
| 4 | 0.032 61 | 0.108 19 | 0.026 47 | 0.112 08 | 0.051 59 | 0.930 55 |
| 5 | 0.039 45 | 0.128 30 | 0.030 34 | 0.017 55 | 0.009 66 | 0.992 78 |
| 6 | 0.036 18 | 0.116 02 | 0.027 71 | 0.007 46 | 0.002 46 | 0.993 82 |
| 7 | 0.042 52 | 0.134 39 | 0.032 56 | 0.004 28 | -0.002 21 | 0.989 51 |
| 10 | 0.041 25 | 0.128 98 | 0.031 60 | 0.002 82 | -0.005 36 | 0.985 56 |
| 15 | 0.042 40 | 0.130 23 | 0.032 53 | 0.001 79 | -0.010 09 | 0.977 83 |
| 20 | 0.039 22 | 0.126 01 | 0.030 04 | 0.079 33 | 0.003 09 | 0.994 35 |

从表 1 中可以看出,除部分数据点存在实验操作误差外,碰撞系数均较高,说明两滑块的碰撞也是比较接近完全弹性碰撞.在 $S_2 > 7$ cm 时,动量损失率和能量损失率随着两光电门之间距离的增大而有所减小.但在实验中我们发现,当 $S_2 < 2$ cm,即 m_2 上的挡光片离光电门 G_2 非常近时,例如当 S_2 为 0.5 cm 时,动量损失率超过 12%,能量损失率则超过 30%,此时实验误差已经非常大,通过反复观察实验过程,发现两个碰簧在碰撞的极短时间内是处于压缩并接触状态的,而此时滑块 m_2 上的挡光片如果初始就离光电门 G_2 非常近,就相当于在碰撞的瞬间就已经开始计时,而并不是实验原理所要求的碰撞完后开始计时.这就导致测量出的 Δt_2 变小,实验误差变大.而当 S_2 比较大时,发现实验误差又有所增大,有时还会出现动量损失为负值的情况,除了部分实验过程中出现操作上的失误外,我们认为还有可能的原因是导轨中后段局部存在弯曲不平直的原因而导致的.

随着两光电门之间距离的变化, m_2 在两光电门

之间位置也在发生变化,即碰撞点相对于时间测量点也在随之改变.那么 m_2 在两光电门之间位置的不同对测量结果有没有影响呢?为此我们设计实验,让两光电门间距离为 55 cm 不变,使刚好可以碰撞的点距 G_1 光电门的距离 S_1 等于 5 cm,通过改变滑块 m_2 在两光电门之间的位置来探究其对测量结果的影响.得出的实验结论与上个实验是基本一致的.所以在实验过程中,需要选择合适的光电门之间的距离以及滑块的位置.实验中,选择两光电门之间的距离为 45 cm, S_2 等于 6 cm 左右时,实验误差已经比较小,在误差允许范围内,可以认为完全弹性碰撞实验得以实现.

3.2 完全弹性碰撞实验中两滑块质量变化对测量的影响

我们认为两滑块质量的不同可能也会对实验的测量造成一定的影响,为了验证我们的猜想,我们在上一个实验的基础上,令 $m_1 = 331.72$ g,两光电门之间的距离为 45 cm, S_2 等于 6 cm,通过改变滑块 m_2 的质量,测量其结果如表 2 所示.

表2 当滑块质量 $m_1 > m_2$ 时 m_2 质量的变化对测量结果的影响

| 物理量 m_2 / kg | $\Delta t_0 / \text{s}$ | $\Delta t_1 / \text{s}$ | $\Delta t_2 / \text{s}$ | E | P | e |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|-----------|---------|
| 0.174 21 | 0.033 33 | 0.107 50 | 0.025 51 | 0.007 37 | 0.003 79 | 0.996 5 |
| 0.224 10 | 0.041 13 | 0.203 13 | 0.034 63 | 0.006 02 | -0.004 85 | 0.985 2 |
| 0.273 94 | 0.035 90 | 0.291 63 | 0.033 28 | 0.023 88 | -0.013 99 | 0.929 4 |
| 0.331 72 | 0.032 66 | 5.863 40 | 0.032 81 | 0.009 09 | -0.000 99 | 0.989 9 |

为了探究当滑块 $m_1 < m_2$ 时的实验情况,令 $m_2 = 334.05 \text{ g}$,两光电门之间的距离为 40 cm , S_2 等

于 6 cm ,通过改变滑块 m_1 的质量,测量结果如表 3 所示.

表3 当滑块质量 $m_1 < m_2$ 时 m_1 质量的变化对测量结果的影响

| 物理量 m_1 / kg | $\Delta t_0 / \text{s}$ | $\Delta t_1 / \text{s}$ | $\Delta t_2 / \text{s}$ | E | P | e |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|-----------|---------|
| 0.176 88 | 0.034 13 | 0.111 85 | 0.049 52 | 0.009 78 | 0.003 51 | 0.994 4 |
| 0.226 81 | 0.031 63 | 0.170 67 | 0.039 25 | 0.009 19 | -0.001 56 | 0.991 2 |

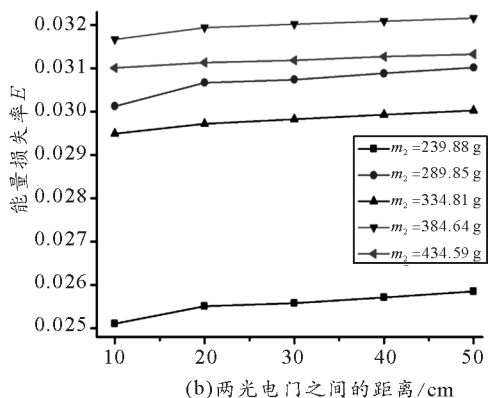
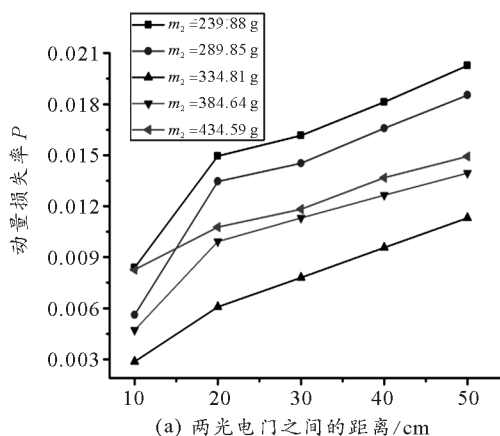
从表 2 和表 3 中可以看出,随着滑块质量的改变,实验结果没有很明显的变化,而且实验误差也都不大,在误差允许范围内,可以认为两物体发生了完全弹性碰撞.值得注意的是,当 $m_1 = m_2 = 331.72 \text{ g}$ 时,两滑块碰撞后,滑块 m_1 的速度几乎为零,相当于彼此交换了速度.为了实验的精确性,建议在验证动量守恒实验中,选择滑块 m_1 的质量略大于滑块 m_2 时,有不错的实验效果.

3.3 完全非弹性碰撞中光电门位置及滑块质量对测量的影响

在对完全弹性碰撞实验的影响因素进行探讨之后,我们想到对完全非弹性碰撞实验中这些因素是

否也一样影响着实验呢?之前的实验中研究光电门位置时是通过改变光电门的距离,在完全非弹性碰撞实验中,只有一个滑块上的挡光片需要遮光计时,为此我们设计实验,取 6 个光电门在导轨每隔 10 cm 的位置安装一个.为方便读数应依次安装在两台计时器上,将滑块 m_2 放置在第一、二个光电门之间,测得滑块 $m_1 = 334.72 \text{ g}$ 保持不变,通过改变滑块 m_2 的质量进行实验,从而来探究光电门的位置及滑块质量对测量结果的影响.

动量损失率 P 、能量损失率 E 随两光电门之间距离变化的实验结果如图 2 图所示.

图2 动量损失率 P 、能量损失率 E 随两光电门之间距离变化的关系图

从图 2 中可以看出,在完全非弹性碰撞实验中动量损失率随着两光电门之间距离的增大有着近乎线性增大趋势,当选择两光电门间的距离为 10 cm

时,动量损失率基本都在 0.6% 以下,而当两光电门间的距离为 50 cm 时,动量损失率则达到 1.5% 左右.而能量损失率则随两光电门间的距离的改变而

变化不是太大. 因此我们认为在实验过程中, 需要选择合适的两光电门的距离.

动量损失率 P 、能量损失率 E 随滑块 m_2 质量变化的实验结果如图3所示. 从图3可以看出, 当 $m_1 > m_2$ 时, 动量的损失率随着滑块 m_2 质量的增大有所减小的趋势; 而在 $m_1 < m_2$ 时, 动量的损失率则随滑块 m_2 质量的增大有所增大的趋势. 能量损失率也随滑

块 m_2 质量的增大有所增大. 值得注意的是, 当 m_1 相对 m_2 比较小时, 能量损失率比较小; 当滑块质量 $m_1 = m_2$ 时, 动量的损失率比起 m_2 质量为其他值的时候要小. 综上, 我们认为在完全非弹性碰撞实验中需要选择合适的光电门距离以及合适的两滑块的质量. 实验中, 选择两光电门之间距离为 $10 \sim 20$ cm, 滑块 m_1 略大于或等于 m_2 时, 可以有不错的实验效果.

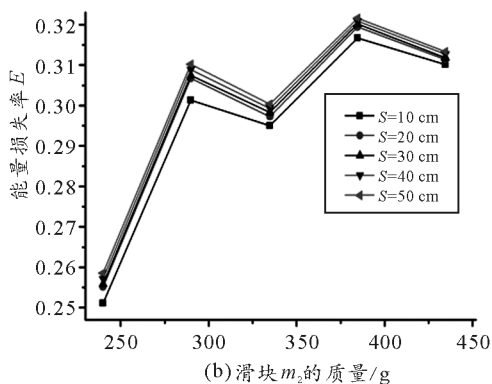
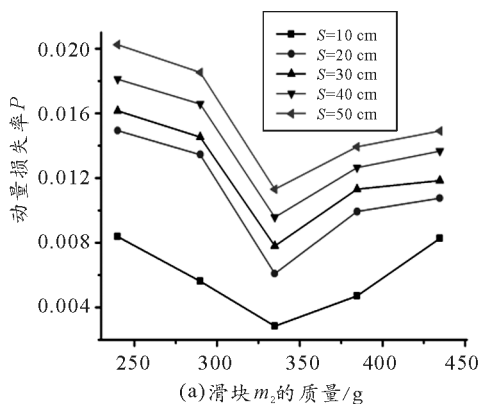


图3 动量损失率 P 、能量损失率 E 随滑块 m_2 质量变化的关系图

4 结论

本实验研究了两光电门之间的距离和滑块质量的不同在验证动量守恒中的完全弹性碰撞和完全非弹性碰撞两种碰撞类型实验中的影响.

从总体来看, 在验证完全弹性碰撞实验中, 当 $S_2 < 6$ cm 时, 误差随两光电门之间距离的增大而有所减小, 当 $S_2 < 2$ cm, 即 m_2 上的挡光片离光电门 G_2 非常近时, 实验误差非常大. 对于 S_1 距离的探讨同样有相似的结论, 其根本原因是此时碰撞过程已经不在计时区内了. 随着滑块质量的改变, 实验结果没有很明显的变化, 而且实验误差也都都不大, 我们认为在这个实验中, 需要选择合适的光电门之间的距离以及滑块的位置. 选择两光电门之间的距离为 45 cm, S_2 为 6 cm 左右, 选择滑块 m_1 的质量略大于滑块 m_2 时, 有不错的实验效果.

在验证完全非弹性碰撞实验中, 动量损失率随两光电门之间距离的增大有所增大的趋势, 而动能损失率则变化不大. 当 $m_1 > m_2$ 时, 动量的损失率随着滑块 m_2 质量的增大有所减小的趋势; 而在 $m_1 < m_2$ 时, 动量的损失率则随滑块 m_2 质量的增大

有所增大的趋势. 能量损失率也随滑块 m_2 质量有所增大. 我们认为在完全非弹性碰撞实验中需要选择合适的光电门距离以及合适的两滑块的质量. 实验中, 选择两光电门之间距离为 $10 \sim 20$ cm, 滑块 m_1 略大于或等于 m_2 时, 可以有不错的实验效果. 这些实验结果将对用气垫导轨来验证动量守恒定律实验提供参考.

参考文献

- 1 陈皓, 杨梅, 魏海光. 气垫导轨上碰撞实验的误差分析及修正[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2012, 30(2): 208 ~ 211
- 2 邹力勋. 在气轨实验中光电门引起的计时随机误差[J]. 物理实验, 1982, 2(3): 105 ~ 107
- 3 吴泳华, 霍剑青, 浦其荣. 大学物理实验(第一册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005. 118 ~ 121
- 4 漆安慎, 杜婵英. 普通物理学教程·力学(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005. 138 ~ 139
- 5 欧阳建伟, 李川, 李丰果. 斜轨法测量重力加速度影响因素的探讨[J]. 大学物理实验, 2016(05): 100 ~ 102
- 6 龚镇雄. 气轨上的物理实验[M]. 北京: 北京大学出版社, 1982. 43 ~ 44