

用光电门测物体加速度的两类偏差分析*

罗 章

(湖南师范大学附属中学 湖南 长沙 410006)

(收稿日期:2020-06-08)

摘要:光电门是高中物理实验中常用来测量物体瞬时速度的仪器,其原理是用一段位移内的平均速度来近似代替物体的瞬时速度,进而可以测物体运动的加速度.这种代替有时过于粗糙,将造成加速度测量的偏差甚至错误.文章就时间的不精确和位移的不精确展开讨论,分析了两类偏差的成因.

关键词:光电门 加速度 时间 位移 偏差

研究物体的运动时,除了使用打点计时器计时外,还常用到数字计时器.数字计时器常与气垫导轨配合使用.计时系统的工作要借助于光源和光敏管(俗称光电门).光源与光敏管相对,它射出的光使光敏管感光.当滑块经过时,其上的遮光条把光遮住,与光敏管相连的电子电路自动记录遮光时间的长短,通过数码屏幕显示出来.根据遮光条的宽度和遮光时间,可以算出滑块经过时的速度^[1,2].因为这样的计时系统可以测出0.001 s的时间,并且能直接以数字显示,所以又叫数字毫秒计.

测出物体经过光电门时的速度,进而可以测定物体的加速度.人教版高中物理实验教科书必修1第一章第5节问题与练习题4如下.

【例1】为测定气垫导轨上滑块的加速度,滑块上安装了宽度为3.0 cm的遮光板.滑块在牵引力作用下先后通过两个光电门,配套的数字毫秒计记录了遮光板通过第一个光电门的时间为 $\Delta t_1 = 0.29$ s,通过第二个光电门的时间为 $\Delta t_2 = 0.11$ s,遮光板从开始遮住第一个光电门到开始遮住第二个光电门的时间为 $\Delta t = 3.57$ s,求滑块的加速度.

解析:普通高中课程标准实验教科书物理必修1教师教学用书给出

滑块通过第一个光电门的平均速度为

$$v_1 = \frac{d}{\Delta t_1} = \frac{3.0}{0.29} \text{ cm/s} \approx 10.3 \text{ cm/s}$$

通过第二个光电门的平均速度为

$$v_2 = \frac{d}{\Delta t_2} = \frac{3.0}{0.11} \text{ cm/s} \approx 27.3 \text{ cm/s}$$

则滑块的加速度

$$a = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t} = \frac{27.3 - 10.3}{3.57} \text{ cm/s}^2 \approx 4.76 \text{ cm/s}^2$$

评价:以上解法将滑块通过光电门的平均速度处理为瞬时速度,再利用加速度定义求出了加速度值.

1 由时间的不精确所带来的偏差

注意到 Δt_1 和 Δt_2 都较小,符合瞬时速度定义: $v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t}$.但是,对于匀变速直线运动,平均速度是这段时间的中间时刻的瞬时速度,设题给滑块做匀加速直线运动,能否求出其真实加速度呢?

设滑块从瞬时速度为 v_1 到瞬时速度为 v_2 所经历的时间为 $\Delta t'$

$$\Delta t' = \Delta t - \frac{\Delta t_1}{2} + \frac{\Delta t_2}{2} = 3.48 \text{ s}$$

滑块的真实加速度为 a'

$$a' = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t'} \approx 4.88 \text{ cm/s}^2$$

得到的滑块真实加速度 a' 略大于 a ,形成偏差的原因是“将遮光板通过光电门的平均速度看作遮光板前缘通过光电门时的瞬时速度”.对于 a' 大于 a ,可以通过图1来理解.取遮光板开始遮住第一个光电门为 $t=0$ 时刻,图中 $0 \sim t_2$ 内遮光板通过第一个光电门,时间为 Δt_1 ; $t_3 \sim t_5$ 内遮光板通过第二个光电门,时间为 Δt_2 . t_1 是 $0 \sim t_2$ 的时间中点, t_4 是 $t_3 \sim t_5$ 的时间中点.

* 湖南师大附中教育科学“十三五”规划重点课题“物理创新拔尖型学生多元培养实践研究”阶段性研究成果,课题编号:FZJK19A13

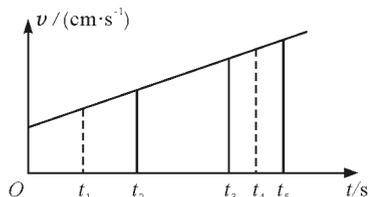


图1 滑块运动“速度-时间”图像

滑块匀加速通过两个光电门,可知

$$\Delta t_1 > \Delta t_2$$

而 $0 \sim t_3$ 表示时间 Δt , $t_1 \sim t_4$ 表示时间 $\Delta t'$, 则

$$\Delta t' = \Delta t - \frac{\Delta t_1}{2} + \frac{\Delta t_2}{2} < \Delta t$$

加速度真实值公式为

$$a' = \frac{\frac{d}{\Delta t_2} - \frac{d}{\Delta t_1}}{\Delta t - \frac{\Delta t_1}{2} + \frac{\Delta t_2}{2}}$$

注意到 a 与 a' 相差不大,若为粗略计算,所求的滑块加速度 a 为 4.76 cm/s^2 是完全可以的.但时间间隔 $\Delta t'$ 和 Δt 差别较大,却忽视其差别,机械地套用 Δt 来计算,就会导致错误.

【例2】如图2所示,为了测定气垫导轨上滑块的加速度,滑块上安装了宽度 d 为 3.0 cm 的遮光板.滑块向右匀加速直线运动依次通过两个光电门A和B.光电门上的黑点处有极细的激光束,当遮光板挡住激光束时开始计时,不遮挡激光束时停止计时.现记录了遮光板通过第一个光电门所用的时间为 $\Delta t_1 = 0.3 \text{ s}$,通过第二个光电门所用的时间为 $\Delta t_2 = 0.10 \text{ s}$,光电门从第一次计时结束到第二次计时开始经历的时间为 0.30 s ,则滑块的加速度应为()

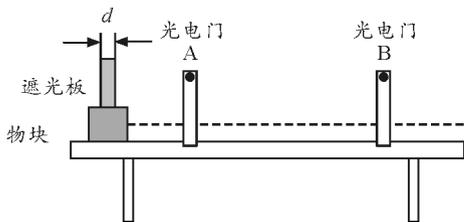


图2 测定气垫导轨上滑块的加速度

- A. 0.67 m/s^2 B. 0.14 m/s^2
C. 0.40 m/s^2 D. 0.22 m/s^2

错解:滑块通过第一个光电门的平均速度为

$$v_1 = \frac{d}{\Delta t_1} = \frac{3.0}{0.3} \text{ cm/s} = 10 \text{ cm/s}$$

通过第二个光电门的平均速度为

$$v_2 = \frac{d}{\Delta t_2} = \frac{3.0}{0.1} \text{ cm/s} = 30 \text{ cm/s}$$

则滑块的加速度

$$a = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t} = \frac{30 - 10}{0.3} \text{ cm/s}^2 \approx 66.7 \text{ cm/s}^2 = 0.67 \text{ m/s}^2$$

选 A.

解析:光电门从第一次计时结束到第二次计时开始经历的时间为 $\Delta t = 0.30 \text{ s}$,滑块从瞬时速度为 v_1 到瞬时速度为 v_2 所经历的时间为

$$\Delta t' = \Delta t + \frac{\Delta t_1}{2} + \frac{\Delta t_2}{2} = 0.5 \text{ s}$$

滑块的加速度

$$a = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t} = \frac{30 - 10}{0.5} \text{ cm/s}^2 = 0.4 \text{ m/s}^2$$

正确答案选 C.

评价:因题给光电门从第一次计时结束到第二次计时开始经历的时间为 0.30 s ,若从第一个光电门开始计时到第二次计时开始,所经历的时间就为 0.60 s ,再按例1方式求解其加速度为

$$a'' = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t} = \frac{30 - 10}{0.6} \text{ cm/s}^2 \approx 0.33 \text{ m/s}^2$$

无论是错解中的 0.67 m/s^2 还是 0.33 m/s^2 均与真实加速度 0.4 m/s^2 相差甚远.究其原因,两题中 Δt_1 与 Δt_2 相差无几,但例2中 Δt 值不满足远大于通过光电门时间.

2 由位移的不精确所带来的偏差

若已知两个光电门之间的距离,遮光板通过光电门得到的平均速度依然为中间时刻瞬时速度,在用速度位移公式 $v^2 - v_0^2 = 2ax$ 计算加速度时会由位移的不精确带来偏差.

【例3】为测定气垫导轨上滑块的加速度,滑块上安装了宽度为 d 的遮光板.滑块在牵引力作用下做匀加速运动,先后通过两个固定在导轨上相距为 L 的光电门.配套数字毫秒计记录了遮光板通过第一个光电门的时间为 Δt_1 ,通过第二个光电门的时间为 Δt_2 .将遮光板通过光电门的平均速度作为遮光板前沿通过光电门时的瞬时速度.请回答:

(1) 加速度的表达式为 $a = \underline{\hspace{2cm}}$.

(2) 如果操作方法正确无误,用上述方法测得的加速度的值 $\underline{\hspace{2cm}}$ (选填“大于”“等于”或“小于”)加速度的真实值.

解析:(1) 遮光板两次通过光电门的平均速度分别是 $v_1 = \frac{d}{\Delta t_1}$ 和 $v_2 = \frac{d}{\Delta t_2}$,据题给条件,得加速度

$$a = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2L} = \frac{d^2}{2L} \left(\frac{1}{\Delta t_2^2} - \frac{1}{\Delta t_1^2} \right)$$

(2) 由于遮光板通过光电门的平均速度等于通过光电门过程时间中点的瞬时速度, 所以第(1)小题用 $a = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2x}$ 计算加速度时, v_1 和 v_2 对应图 1 中的 t_1 和 t_4 时刻, 若此过程中遮光板的位移大小为 L_1 , 则加速度的真实值为 $a_{\text{真}} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2L_1}$.

为便于分析, 在图 1 中标出字母 A, B, ..., G, 如图 3 所示. 图 3 中梯形 OABC 与 GDEF 的面积均等于遮光板的宽度 d ; 梯形 OADG 的面积等于两光电门间距离 L . H 和 J 两个时刻遮光板的瞬时速度分别等于 v_1 和 v_2 . 若用 S_1 和 S_2 表示梯形 OAIH 与 GDKJ 的面积, 则 $L_1 = L - S_1 + S_2$.

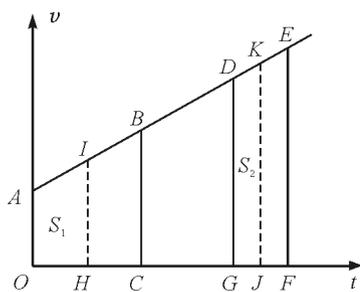


图 3 滑块运动“速度-时间”图像

分别过 I 和 K 作横轴的平行线 PQ 和 MN , 如图 4 所示. 由几何关系知, 矩形 $OPQC$ 与梯形 $OABC$ 的面积相等, 矩形 $GMNF$ 与梯形 $GDEF$ 的面积相等. 它们均等于遮光板的宽度 d . 用 ΔS_1 和 ΔS_2 分别表示三角形 API 和 DMK 的面积, 则

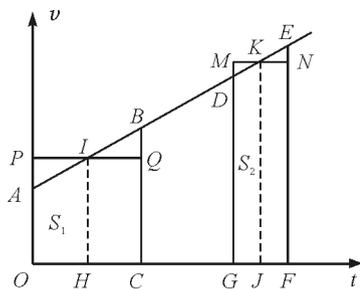


图 4 滑块运动“速度-时间”图像中的矩形和梯形

$$S_1 = \frac{d}{2} - \Delta S_1 \quad S_2 = \frac{d}{2} - \Delta S_2$$

代入 $L_1 = L - S_1 + S_2$ 得

$$L_1 = L + (\Delta S_1 - \Delta S_2)$$

由于 ΔS_1 和 ΔS_2 也分别表示三角形 IQB 和 KNE 的面积. 因为遮光板做加速运动, 三角形 KNE 的面积小于 IQB 的面积, 则在图 4 中 $\Delta S_2 < \Delta S_1$, 所以 $L_1 = L + (\Delta S_1 - \Delta S_2) > L$, 进而

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2L} > \frac{v_2^2 - v_1^2}{2L_1}$$

即 $a > a_{\text{真}}$, 则第(2)小题答案为“大于”.

3 属于哪一类偏差问题的鉴别

在解决具体问题时, 需要鉴别属于哪一类偏差.

【例 4】图 5 为测量物块与水平桌面之间动摩擦因数的实验装置示意图, 细线平行于桌面, 物块和遮光板的总质量为 M , 重物的质量为 m , 遮光板的宽度为 d . 让物块从光电门 A 的左侧由静止释放. 配套数字毫秒计记录了遮光板通过光电门 A 和 B 所用的时间分别为 t_1 和 t_2 , 遮光板从开始遮住第一个光电门到开始遮住第二个光电门的时间为 Δt . 求物块与水平桌面之间的动摩擦因数.

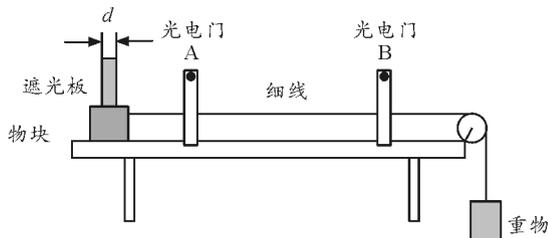


图 5 测量动摩擦因数实验装置示意图

解析: 滑块运动的加速度为

$$a = \frac{\frac{d}{t_2} - \frac{d}{t_1}}{\Delta t - \frac{t_1}{2} + \frac{t_2}{2}} = \frac{2d(t_1 - t_2)}{t_1 t_2 (2\Delta t + t_2 - t_1)}$$

设细线的拉力为 T , 物块与水平桌面之间的动摩擦因数为 μ , 分别以物块(包括遮光板)和重物为研究对象, 根据牛顿第二定律有

$$T - \mu Mg = Ma \quad mg - T = ma$$

联立得

$$\mu = \frac{m}{M} - (1 + \frac{m}{M}) \frac{2d(t_1 - t_2)}{t_1 t_2 (2\Delta t + t_2 - t_1) g}$$

评价: 不考虑由时间不精确带来的偏差所得加速度应为

$$a' = \frac{\frac{d}{t_2} - \frac{d}{t_1}}{\Delta t} = \frac{d(t_1 - t_2)}{t_1 t_2 \Delta t}$$

由前述知 $a' < a$, 本题如若用 a' , 则测得的动摩擦因数将小于真实值. 这属于由时间的不精确而带来了偏差.

【例 5】某实验小组利用图 6 所示实验装置测量重力加速度. 小钢球的直径为 d , 由静止释放自由下落过程中, 计时装置测出小钢球通过光电门时间为 t . 刚释放时钢球球心到光电门间的距离为 h , 小钢球所受空气阻力可忽略不计. 若取 $\frac{d}{t}$ 为小钢球通过光

分子间存在引力实验的改进

王 彪

(珠海市湾仔中学 广东 珠海 519000)

(收稿日期:2020-11-05)

摘要:“分子引力”实验是初中物理“分子运动论”教学中的一个重要的验证性演示实验.传统的演示实验存在着实验现象不明显,成功率不高,不便于学生观察等缺陷.利用甘油能增加液体膜韧性的特点,利用液体膜拉动吸管运动可以让学生很直观地观察到分子间的引力,降低学生对于微观现象的理解难度.

关键词:分子间存在引力 改进 甘油 液体膜 拉动

分子间引力属于微观范畴,在现实生活中不易观察到,学生理解难度较大,所以“分子引力”是初中物理“分子运动论”教学中的一个必要的验证性演示实验.传统的演示实验如图1所示,将两个铅柱的底部削平、削干净,然后紧紧地压在一起,两个铅柱就会结合起来,甚至下面吊一个重物都不能把它们拉开.



图1 验证分子之间有引力

多年的教学经验表明,在实际教学当中验证分子之间有引力的演示实验的成功率不高,主要原因有:

(1) 铅柱的表面很难削平、削干净,在含有杂质或异物的铅柱两表面分子间距离过大,引力太小;

(2) 实验中如果手稍有抖动就会导致实验失败.人教版教材中也介绍了如图2所示的把干净的玻璃板吊在弹簧测力计的下面^[1],使玻璃板水平接触水面,然后稍稍用力向上拉玻璃板,让学生观察到当玻璃板离开水面时弹簧测力计的示数增大,进而证明分子间存在引力.



图2 人教版演示实验

但是在实际实验过程中也存在以下问题:

光电门的瞬时速度,测得的重力加速度比真实值偏大还是偏小?

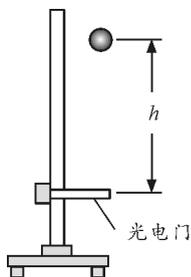


图6 测量重力加速度实验装置

解析:题给 $\frac{d}{t}$ 为小钢球通过光电门的平均速度,

也是中间时刻瞬时速度,可得 $g_{\text{测}} = \frac{d^2}{2ht^2}$. 小钢球经过光电门的中间时刻时球心还没到达光电门处,这将带来偏差.令 $v = \frac{d}{t}$,则球心达到光电门时的速度 $v' > v$,

$g_{\text{真}} = \frac{v'^2}{2h} > g_{\text{测}}$,从而测得的重力加速度比真实值偏小.本题属于由位移的不精确而带来了偏差.

总之,光电门及与其配合使用的小球或遮光板都有一定的宽度,此时不能视为质点.最能代表光电门精确位置的是光电门的发光孔所在的位置,最能代表小球或遮光板位置的是小球球心或遮光板的前缘.这两类位置间的差异可能造成由时间的不精确或位移的不精确带来的偏差.解决这类有关问题的偏差时,需要认真鉴别,再作出准确判断.

参考文献

- 1 沈蔡林.关于遮光条宽度对加速度测量值的影响的理论和实验探究.物理教师,2015(9):47~49
- 2 周春池,朱柏树.挖掘教材习题潜能,发展学生思维能力——以用光电门测量加速度为例.物理教师,2016(10):84~87