

匀加速运动与碰撞

(2022.3)

实验要求：

1. 实验预习

必须在来上课前完成预习思考题，否则没有预习成绩。

预习思考题不要提前一周以上做，否则成绩不会正确显示。

2. 实验操作

(1) 讲课结束前禁止打开、调节实验仪器；实验开始前了解注意事项，爱护实验设备，轻拿轻放，注意人身安全及实验仪器安全；

(3) 维护课堂秩序，实验室内禁止喧哗、吃食物、穿拖鞋；

(4) 如实记录实验数据，编造、篡改实验数据一经发现判零分。

(5) 实验数据经指导老师签字，完成出门测思考题，并整理好实验设备后方可离开。

3. 实验数据

本实验要求当堂独立完成实验并提交数据，不需要回去写报告，但要求做数据处理。要求掌握用气垫导轨测量平均速度、瞬时速度、及加速度的方法，并研究斜面上的匀加速运动和三种一维碰撞的运动规律，当堂用计算机软件算出碰撞实验的结果。

4. 数据经老师签字后完成出门测思考题。

5. 下一周来交数据处理结果和思考题 2（数据处理包含（a）对 $v^2 - 2s$ 用作图法或最小二乘法求 a ，并计算 g ；（b）三种碰撞的结果。）

伽利略（Galileo, 1564–1642）是历史上第一个对自由落体运动进行定量研究的科学家。2002年美国《物理世界》杂志评出的“十大最美丽的物理实验”中，伽利略的自由落体实验和斜面上的加速实验双双入选。为了将匀加速运动和自由落体运动相联系起来，他提出了加速度的概念和重力加速度所起的作用，并指出物体沿斜面的运动与物体垂直下落的运动具有相似的特征，这两个实验成为力学史上具有里程碑意义的实验。

“碰撞”在物理学中表现为两粒子或物体间极短的相互作用。碰撞前后的参与物都会发生速度、动量或能量的改变。1666年，荷兰物理学家、天文学家、数学家惠更斯（C.Huygens, 1629-1695）向英国皇家学会提交报告，定义了动量为质量和速度矢量的乘积，并完善地分析了物体之间的碰撞问题：发现在不受外力条件时，物体碰撞前后总动量守恒，即动量守恒定律。这是自然界中最重要最普遍的守恒定律之一，既适用于低速运动物体，也适用于高速运动物体，既适用于宏观物体，例如天舟一号和天宫二号的对接，也适用于微观粒子，例如卢瑟福散射。在生活中，飞机的着陆、打台球、锤锻、打桩、火车厢挂钩的连接、汽车的碰撞星级测试，都与碰撞过程息息相关。

本实验的目的是利用气垫导轨气垫技术精确地测定物体的平均速度、瞬时速度、加速度以及当地的重力加速度，通过物体沿斜面自由下滑运动来研究匀变速运动的规律，研究一维碰撞的三种情况，验证动量守恒和能量守恒定律。定量研究动量损失和能量损失在工程技术中有重要意义。同时通过实验还可提高误差分析的能力。

实验原理

1. 平均速度和瞬时速度的测量

作直线运动的物体在 Δt 时间内的位移为 Δs ，则物体在 Δt 时间内平均速度为

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1)$$

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时，平均速度趋近于一个极限，即物体在该点的瞬时速度。我们用 v 来表示瞬时速度，

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (2)$$

实际上直接用上式测量某点的瞬时速度是很困难的，一般在一定误差范围内，用极短的 Δt 内的平均速度代替瞬时速度，而 Δs 则可以由物体上固定的 U 型挡光片通过光电门时的挡光宽度获得。

2. 匀变速直线运动

若滑块受一恒力，它将作匀变速直线运动，可采用在导轨一端加一滑轮，通过滑轮悬一重物在滑块上，也可以把气垫导轨一端垫高成一斜面来实现。采用前者可改变外力，不但可测得加速度，

还可以验证牛顿第二定律。采用后者，因在测量过程中受外界干扰较小，测量误差较小，在测量加速度的基础上，还可以测量当地的重力加速度。匀变速运动方程如下：

$$v = v_0 + at \quad (3)$$

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \quad (4)$$

$$v^2 = v_0^2 + 2as \quad (5)$$

在斜面上物体从同一位置由静止开始下滑，若测得不同位置处的速度为 v_1, v_2, v_3, \dots ，相应的时间为 t_1, t_2, t_3, \dots ，以 t 为横坐标， v 为纵坐标作 $v-t$ 图，如果图线是一条直线，证明物体作匀加速直线运动，图线的斜率为加速度 a ，截距为 v_0 。同样把 v_1, v_2, v_3, \dots 对应处的 s_1, s_2, s_3, \dots 测出，作 $\frac{s}{t}-t$ 图和 v^2-s 图，若图线是直线，则物体作匀加速直线运动，斜率分别为 $\frac{1}{2}a$ 和 $2a$ ，截距分别为 v_0 和 v_0^2 。

3. 重力加速度的测定

如图 4.1.1-1 所示， h 为垫块的高度， L 为斜面长，滑块沿斜面下滑的加速度为

$$a = g \sin \theta = g \frac{h}{L} \quad (6)$$

$$g = \frac{a}{h} L \quad (7)$$

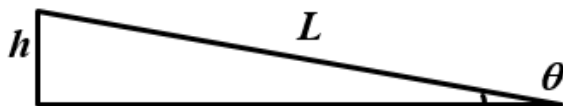


图 1. 导轨垫起的斜面

4. 碰撞中守恒定律的研究

如果一个力学系统所受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，即

$$\sum m_i v_i = \text{恒量} \quad (8)$$

实验中用两个质量分别为 m_1 、 m_2 的滑块来碰撞（图 4.1.2-1），若忽略气流阻力，根据动量守恒有

$$m_1 v_{10} + m_2 v_{20} = m_1 v_1 + m_2 v_2 \quad (9)$$

对于完全弹性碰撞，要求两个滑行器的碰撞面有用弹性良好的弹簧组成的缓冲器，我们可用钢

圈作完全弹性碰撞器；对于完全非弹性碰撞，碰撞面可用尼龙搭扣、橡皮泥或油灰；一般非弹性碰撞用一般金属如合金、铁等，无论哪种碰撞面，必须保证是对心碰撞。

当两滑块在水平的导轨上作对心碰撞时，忽略气流阻力，且不受他任何水平方向外力的影响，因此这两个滑块组成的力学系统在水平方向动量守恒。由于滑块作一维运动，式（2）中矢量 \mathbf{v} 可改成标量 v ， v 的方向由正负号决定，若与所选取的坐标轴方向相同则取正号，反之，则取负号。

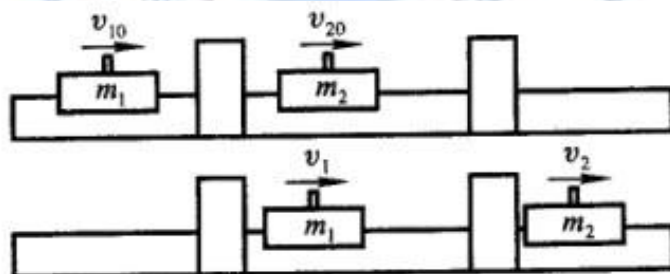


图 2. 碰撞实验示意图

(1) 完全弹性碰撞

完全弹性碰撞的标志是碰撞前后动量守恒，动能也守恒，即

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

$$\frac{1}{2} m_1 v_{10}^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{20}^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \quad (11)$$

由（3）、（4）两式可解得碰撞后的速度为

$$v_1 = \frac{(m_1 - m_2)v_{10} + 2m_2 v_{20}}{m_1 + m_2} \quad (12)$$

$$v_2 = \frac{(m_2 - m_1)v_{20} + 2m_1 v_{10}}{m_1 + m_2} \quad (13)$$

如果 $v_{20}=0$ ，则有

$$v_1 = \frac{(m_1 - m_2)v_{10}}{m_1 + m_2} \quad (14)$$

$$v_2 = \frac{2m_1 v_{10}}{m_1 + m_2} \quad (15)$$

动量损失率为

$$\frac{\Delta p}{p_0} = \frac{p_0 - p_1}{p_0} = \frac{m_1 v_{10} - (m_1 v_1 + m_2 v_2)}{m_1 v_{10}} \quad (16)$$

能量损失率为

$$\frac{\Delta E}{E_0} = \frac{E_0 - E_1}{E_0} = \frac{\frac{1}{2}m_1v_{10}^2 - (\frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2)}{\frac{1}{2}m_1v_{10}^2} \quad (17)$$

理论上，动量损失和能量损失都为零，但在实验中，由于空气阻力和气垫导轨本身的原因，不可能完全为零，但在一定误差范围内可认为是守恒的。

(2) 完全非弹性碰撞

碰撞后，二滑块粘在一起以同一速度运动，即为完全非弹性碰撞。在完全非弹性碰撞中，系统动量守恒，动能不守恒。

$$m_1v_{10} + m_2v_{20} = (m_1 + m_2)v \quad (18)$$

在实验中，让 $v_{20}=0$ ，则有

$$m_1v_{10} = (m_1 + m_2)v \quad (19)$$

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

动量损失率

$$\frac{\Delta p}{p_0} = 1 - \frac{(m_1 + m_2)v}{m_1v_{10}} \quad (21)$$

动能损失率

$$\frac{\Delta E}{E_0} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \quad (22)$$

(3) 一般非弹性碰撞

一般情况下，碰撞后，一部分机械能将转变为其他形式的能量，机械能守恒在此情况已不适用。牛顿总结实验结果并提出碰撞定律：碰撞后两物体的分离速度 $v_2 - v_1$ 与碰撞前两物体的接近速度成正比，比值称为恢复系数，即

$$e = \frac{v_2 - v_1}{v_{10} - v_{20}} \quad (23)$$

恢复系数 e 由碰撞物体的质料决定。 e 值由实验测定，一般情况下 $0 < e < 1$ ，当 $e=1$ 时，为完全弹性碰撞； $e=0$ 时，为完全非弹性碰撞。

5. 验证牛顿第二定律

设运动物体的总质量为 $m_{\text{总}}$ ，作用力为 F ，假设其他耗散力如摩擦力、空气阻力、气垫粘滞力

可忽略不计，这时牛顿第二定律可表示为

$$F = m_{\text{总}} a \quad (24)$$

若保持 $m_{\text{总}}$ 不变，改变 F ， F/a 应为一常量，即 F 增大， a 同时增大； F 减小， a 同时减小。若保持 F 不变，改变 $m_{\text{总}}$ ，则 $m_{\text{总}} a$ 应为一常量，即增加 $m_{\text{总}}$ ， a 即减小。因此，只要在实验中满足上述条件，即可验证牛顿第二定律。

实验内容

1. 基础实验：匀变速运动中速度与加速度的测量

- (1) 先将气垫导轨调平，然后在一端单脚螺丝下置一垫块，使导轨成一斜面。
- (2) 在滑块上装 U 型挡光片，在导轨上置好光电门，打开计时装置。
- (3) 使滑块从距光电门 $s=20.0\text{cm}$ 处自然下滑，作初速度为零的匀加速运动，记下挡光时间 Δt ，重复三次。
- (4) 改变 s ，重复上述测量。
- (5) 测量 Δs ，垫块高 h 及斜面长 L 。
- (6) 用坐标纸作 $v^2 - 2s$ 曲线或最小二乘法求 a ，并计算 g 。

2. 提升实验：研究三种碰撞状态下的守恒定律

- (1) 取两滑块 m_1 、 m_2 ，且 $m_1 > m_2$ ，用物理天平称 m_1 、 m_2 的质量（包括挡光片）。将两滑块分别装上弹簧钢圈，滑块 m_2 置于两光电门之间（两光电门距离不可太远），使其静止，用 m_1 碰 m_2 ，分别记下 m_1 通过第一个光电门的时间 Δt_1 和经过第二个光电门的时间 Δt_2 ，以及 m_2 通过第二个光电门的时间 Δt_3 ，重复五次，记录所测数据，数据表格自拟，计算 $\frac{\Delta p}{p}$ 、 $\frac{\Delta E}{E}$ 、 e 。
- (2) 分别在两滑块上换上尼龙搭扣，重复上述测量和计算。
- (3) 分别在两滑块上换上金属碰撞器，重复上述测量和计算。

3. 进阶实验：验证牛顿第二定律

使导轨处于水平状态，用细线将砝码盘通过滑轮与滑块相连。若滑块质量为 m_0 ，砝码盘和盘中砝码的质量为 m_n ，滑轮等效质量 m_e （约为 0.30g ），砝码盘、盘中砝码和滑块上的砝码的总质量为 m ，则此时牛顿第二定律方程为

$$F_n = m_n g = (m_0 + m + m_e) a_n \quad (25)$$

改变 F_n ，使 m_n 分别为 5.00g 、 10.00g 、 15.00g 、 20.00g 、 25.00g 时（每次剩余砝码要放在滑块上），测量

在不同力的作用下，通过光电门的瞬时速度 v_n ，再由 $v_n^2 = 2a_n s$ ，求出 a_n 。

作 $F_n - a_n$ 曲线，由斜率求出物体的总质量。

4. **高阶实验：**试用手机视频拍摄滑块在气垫导轨上的运动，并用软件 Tracker 软件进行研究与分析。

思考题

1. 气垫导轨调平的判断标准是什么？
2. 气垫未调平对 v 、 a 的测量结果有何影响？
3. 恢复系数 e 的大小取决于哪些因素？

附录 气垫技术

气垫是我国最近几十年发展起来的一门新技术，由于气垫能极大地减小物体之间的摩擦，使物体作近似无摩擦运动，因此在机械、纺织、运输等工业领域都得到了广泛的应用。利用气垫技术制造的气垫船、气垫输送线、空气轴承等，可以减小机械摩擦，从而提高速度和机械效率，延长使用寿命。

在物理实验中采用气垫技术，可使物体在气垫导轨上运动，由于气垫可以把物体托浮起来，使运动的接触摩擦大大减小，从而可以进行一些较精确的定量研究以及验证某些物理规律。

气垫导轨是一个一端封闭的中空长直导轨，导轨表面有很多小气孔，压缩空气从小孔中喷出，在滑块和导轨间产生 0.05~0.20mm 厚的空气层，即气垫，依靠这层气垫和大气的压差将滑块托起，使滑块在气轨上作近似无摩擦的运动。全套设备包括导轨、气源、计时系统三大部分，下面分别介绍它们的原理和结构。

1. 导轨

导轨采用角铝合金型材，为了加强刚性，不易变形，将角铝合金型材固定在工字钢上。导轨长度在 1.2~2.0m 之间，导轨面宽为 40mm，上面钻有两排等距离排列的小孔，孔距约为 20~25mm，孔径 0.5~0.9mm，在供气量充足的条件下，孔径越大，喷气量也越大，因此浮重和浮高性能也越好。

2. 气源

气源是向气垫导轨管腔内输送压缩空气的设备。要求气源有气流量大、供气稳定、噪音小、能连续工作的特点，一般气源有空气压缩机、专用小型气源（或吸尘器）和高压风机等。一般实验室宜采用小型气源或高压风机。专用小型气源的价格便宜、移动方便，适于单机工作。气垫导轨的进气口用橡皮管和气源相连，进入导轨内的压缩空气，由导轨表面上的小孔喷出，从而托浮起滑块，托起的高度一般在 0.1mm 以上。专用小型气源电动机转速较高，容易发热，不能长时间连续开机。

3. 计时系统

目前气垫导轨的计时系统主要有数字毫秒计和电脑计数器。光电门由光电元件（发光二极管）和小聚光灯泡组成。安装方式有门式结构和单边式结构。门式结构是把光敏二极管和小灯泡通过一门式框架横跨在导轨两侧，这种结构在制造安装时都很方便。缺点是有时挡光后会把手光电门碰倒，撞在导轨上造成划痕，影响导轨精度和使用寿命。单边式结构是把光电门安装在导轨一侧带刻度的滑尺上，光敏二极管和小灯泡是上下安装，这种结构比较合理，便于测量。

数字毫秒计（或多用数字测试仪、多通道计数器等）是一种精密的电子计时仪器，如图 4.1.1-2 所示。被测信号由传感器输入控制电路。石英振荡器作为信号源不断产生标准时基信号输入控制电路。两者输入后由控制电路发出指令，由液晶数码管显示数据。计时过程是：当滑块上的挡光片前缘刚挡光时，光电门就输出一个光电脉冲，使控制电路发出一个启动信号，打开计数器的门，时钟脉冲开始进入计数器，使它不停地计数，当挡光片再次挡光时，光电门（或另一光电门）又输出一个光电脉冲，使控制器发出一个止动信号，关闭计数器的门，计数器停止计数。所计的脉冲数通过寄存器和译码器，最后在显示器上直接显示出时间。电脑计数器的结构和面板如图 4.1.1-3 所示。

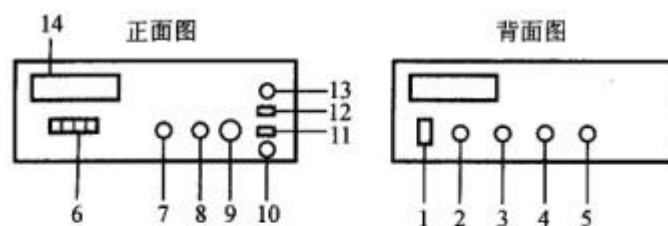


图 4.1.1-2 数字毫秒计的面板图

1—电源插口；2—保险丝；3、4—四心插口分别用线连接两个光电门；5—二心插座，接机械触点；6—时基脉冲选频按键分 10 ms、1 ms、0.1 ms 三挡，供选择测量精度之用；7—手动清“0”钮；8—开关，选择手动、自动清“0”方式；9—延时旋钮，调整清“0”延迟时间；10—电源开关；11—开关，选择计时方式；12—控制开关，选择“机控”、“光控”两种控制方式；13—指示灯；14—数码管

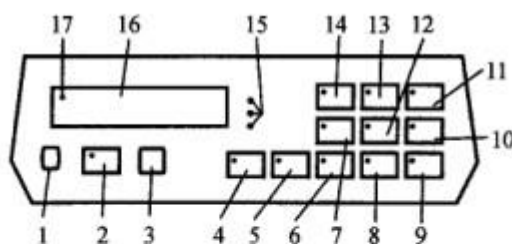


图 4.1.1-3 电脑计数器面板图

1—电信号输入插口；2—电信号衰减键；3—时标输出/时标选择；4—上下位功能选择键；5—光电门数输入键；6—加速度测量键；7—光电计数键；8—测加速度键；9—测周期键；10—测转速键；11—测电信号周期键；12—双光电输入计时键；13—计时键；14—测频键；15—测量单位显示；16—数字显示屏；17—溢出指示

4. 气垫导轨的调平

仪器在开箱后，安装完毕，由于运输、安装会使导轨的平直度发生变化，一定要按说明书重新

调整导轨的准确度。在每次使用前，必须重新对气垫导轨进行调平，使导轨的纵、横两个方向都处于水平。常使用静态调平和动态调平两种方法。

(1) 静态调平法

打开气源，将压缩空气送入导轨，将滑块轻轻置于导轨上，使滑块在导轨上自由滑动。滑块运动的方向，是导轨低的一端，可调节导轨一端的单个底脚螺丝，直到滑块不动或有微小滑动，但无一定的方向为止，则可认为气轨已调平。横向水平调节一般要求不高，用眼睛观测滑块底部两侧气隙是否相同，如果倾斜，可调节气轨一端的双底脚螺丝，直到滑块两侧气隙高度相同。

(2) 动态调平法

在导轨中部相隔一定距离放置两个光电门，轻轻推动装有 U 型挡光片的滑块，观察滑块上挡光片经过光电门时计时器是否计时，如果计时器显示出计时数字，表明仪器正常，否则，应检查挡光片是否挡光，光电门的光敏二极管和小灯泡发的光是否对准，以及仪器选择挡、量程等是否正常等。

轻轻推一下滑块，测出滑块通过两光电门的时间 Δt_1 和 Δt_2 ，由于空气阻力的存在，经过第二个光电门的时间 Δt_2 总是略大于经过第一个光电门的时间 Δt_1 。 Δt_2 与 Δt_1 相差多少才被认为气垫导轨是水平的呢？我们可以通过计算得到有关数据。

当滑块速度不太大时，空气阻力与滑块速度 v 有如下关系

$$F = -bv \quad (26)$$

式中 b 为阻尼常数。根据牛顿第二定律，有

$$F = ma = -bv \quad (27)$$

式中 m 为滑块质量。由上式得

$$a = -\frac{b}{m}v \quad (28)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{b}{m}v \quad (29)$$

$$\frac{dv}{ds}v = -\frac{b}{m}v \quad (30)$$

$$\int_{v_1}^{v_2} dv = -\frac{b}{m} \int_0^s ds \quad (31)$$

$$v_1 - v_2 = \frac{b}{m}s \quad (32)$$

式中 v_1 、 v_2 为滑块通过两个光电门时的速度， s 为两个光电门之间的距离。如果两光电门距离 $s=50.0\text{cm}$ ，滑块质量 $m=250\text{g}$ ，阻尼常数 $b=4\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ ，则

$$v_1 - v_2 = 0.8\text{cm/s}$$

若挡光片上从第一次挡光到第二次挡光的宽度 $\Delta s=1\text{cm}$ ，设滑块通过第一光电门时的速度 $v_1=40\text{cm/s}$ ，则当滑块通过第二个光电门时，速度损失约为 2%。由此可推得，如滑块通过两光电门的时间在 30ms 以内，且通过两光电门的时间差小于 1ms；或时间在 30~50ms 之间，相差小于 2ms；时间在 50~100ms 之间时，相差小于 5ms，则可以认为气垫导轨处于纵向水平状态。

5. 使用气垫导轨时的注意事项

(1) 小型专用气源功率小，电机容易发热，连续使用时间不宜太长，实验中不进行测量时要把气源关掉，以免烧坏电机。

(2) 气轨表面要常用酒精棉球轻擦，不要在导轨表面加压以防止导轨变形及划伤，保证气轨表面的清洁度和光滑度，不用时加防尘罩。

(3) 导轨的滑块内表面经过精密加工，配合密切，使用时要轻拿轻放，切勿使滑块跌落。导轨不通气时不要将滑块在导轨上滑动，以免磨损。

国家级实验教学示范中心

中国科学技术大学物理实验教学中心

中华人民共和国教育部