

91

# 浙江大学

## 物理实验报告

实验名称：抛体运动的照相法研究

指导教师：郑远

信箱号：29



## 【实验目的】

1. 掌握多次曝光法的拍摄技术
2. 掌握照相机的使用和照片的冲印技术
3. 学会使用表差法处理实验数据

## 【实验原理】（电学、光学画出原理图）

### 1. 多次曝光法拍摄物体运动轨迹

在同一张底片上，按一定时间间隔连续地对运动物体进行多次曝光，可得到物体运动轨迹的一连串中间的瞬时影像，该方法称为多次曝光法照相。

本实验使用频闪摄影仪参与拍摄，将运动物体放在黑暗背景中，打开照相机快门，以一系列等时间间隔的多次闪光进行拍摄。

### 2. 设运动物体的位置

#### 2. 抛体运动方程

设运动物体的位置在水平方向用横坐标  $x$  表示，竖直方向用纵坐标  $y$  表示。则纵坐标  $y$  与时间  $t$  满足函数关系：

$$y = C_0 + V_0 t + \frac{1}{2!} a_0 t^2 + \frac{1}{3!} b_0 t^3 + \dots + \frac{m_0}{n!} t^n \quad \text{----- ①}$$

如果求得式中各个系数  $C_0, V_0, a_0, \dots$  则方程式可求出。方法：

(1) 求  $C_0$ ：作  $y-t$  图，当  $t=0$  时， $y=C_0$

(2) 求  $V_0$ ：将①式对  $t$  求导数，得  $y' = V_0 + a_0 t + \frac{1}{2} b_0 t^2 + \dots + \frac{m_0}{(n-1)!} t^{n-1}$

然后，作  $y'-t$  图，当  $t=0$  时， $y'=V_0$

(3) 求  $a_0$ ：将①式对  $t$  求二阶导数得  $y'' = a_0 + b_0 t + \dots + \frac{m_0}{(n-2)!} t^{n-2}$

然后，作  $y''-t$  图，当  $t=0$  时， $y''=a_0$

这样再求导一次，就可以求出一个系数，一直下去，则方程式就可以求出。

由于高速摄影两次曝光的时间间隔  $\Delta t$  很短，相对抛体运动的速度变化来说，可看作  $\Delta t \rightarrow 0$ 。所以， $\frac{\Delta y}{\Delta t}$  就可以看作是二阶导数， $\frac{\Delta^2 y}{\Delta t^2}$  可看作是二阶导数，如果把  $\Delta t$  当作单位时间  $1T$ 。即  $\Delta t = 1T$ ，则  $y$  的一阶导数即为  $y' = \Delta y$ ， $y$  的二阶导数即为  $y'' = \Delta(\Delta y)$

### 3. 表差法处理数据方法

表差法是对表格数据中相邻两行数据不断做差计算，再对差值进行做差求值，直到  $n$  次差值相等为止，得到一个  $n$  次多项式（实验公式），这就是表差法。

在小球运动轨迹照片上，设立坐标，列表记录  $(y, t)$  的测量数据，表中  $t$  的单位为  $T$ ，即单位时间（两次曝光之间的时间间隔），它由相机决定，本实验为  $5s$ 。作  $y-t$  图，即求得  $y_0 = C_0$ 。

对表中相邻两数值求差，即可得到该时间间隔内的物体平均速度，也可以近似地看作是

在该时间间隔中点的瞬时速度： $V_{n \pm} = \frac{y_{n+1} - y_n}{\Delta t} = y_{n+1} - y_n$

这里  $\Delta t = 1T$  即单位时间

将各速度值  $V_{n \pm}$  再列在表中，作  $v-t$  图，当  $t=0$  时，即可求得  $y' = V_0$ 。再对其做差，如果差值相等，则求得方程。如果差值不相等，则应继续进行以上步骤，求差值至  $n$  次表差值相等。最后可得运动方程为  $n$  次多项式。

如果  $n$  次差值仍不相等，则说明运动方程不是  $n$  次多项式



## 【实验内容】（重点说明）

1. 用频闪照相法拍摄抛体运动多点轨迹

2. 将拍摄的底片在暗室中进行冲印放大

(1) 负片冲洗

先则量一下显影液的温度，室温即可，往显影罐中均匀注入药水，并开始计时，倒完后马上拿起罐子不断摇动，使药水充分接触胶片，然后每隔1min搅动10s左右，直至显影结束。一般室温下显影时间为8min左右，显影后将显影液倒出，将清水注入显影罐，不断摇晃1min，再将清水倒去。再将定影液倒入显影罐，不断搅动，定影10min，取出浸入清水中约10min，风干即可。

(2) 放大与曝光

① 底片放置：按照底片规格，选择合适的底片夹，把底片的片段对好底片夹的窗孔，再夹在底片夹里

② 调节焦距：把放大机尺板放在底板上，打开放大机开关，放大镜头光圈，转动对焦旋钮，找到清晰的位置

③ 放大倍率调节：调整放大尺寸，按住放大影像升降片，轻轻推动机身，调到所需放大尺寸

④ 曝光：调好放大倍率、焦距和光圈，开启放大机光源，进行曝光，一般曝光时间为5~8s

(3) 相纸冲洗

将相纸放入显影液显影，直到图像从相纸上显现出来为止，然后将相纸水洗后马上放入定影液定影，时间约为5min；最后将相纸再水洗后晾干即可。

3. 表差法处理实验数据

根据实验所得数据：

(1) 制作水平方向运动的  $x-t$  图， $v_x-t$  图

(2) 制作垂直方向运动的  $y-t$  图， $v_y-t$  图， $a_y-t$  图

(3) 从图中求出各方程的系数，并写出钢球水平和垂直方向的运动方程

(4) 计算重力加速度  $g$ ，并与本地区的重力加速度比较，求百分误差，写出测量结果表达式

## 【实验器材及注意事项】

1. 实验器材

照相机  
频闪摄影仪  
放大机  
闪光灯  
发射架  
方格架

2. 注意事项：

① 胶卷在没经过冲洗之前，不能在亮室打开，即使打开也看不到任何影像，如果此时打开暗盒，会使前期拍摄毁于一旦

② 底片放置时一定要把乳剂面夹在下面，否则图像就反了

③ 变更放大机放大倍率后，要再调节焦距，

④ 相片冲洗时，显影每隔1min就搅动10s左右，直至显影结束

⑤ 不能将显影液或定影液倒入水槽，以免污染环境



## 数据处理与结果】 抛体运动实验结果记录表

$t/T$	位置 $x/cm$	$V_{x\pm} = x_{n+1} - x_n$	位置 $y/cm$	$V_{y\pm} = y_{n+1} - y_n$	$a_n = V_{y\pm} - V_{y\pm}$
0	$x_0 = 1.3$		$y_0 = 25.3$	$V_{0.5} = 5.2$	$a_1 = -1.5$
1	$x_1 = 8.0$	$V_{0.5} = 6.7$	$y_1 = 30.5$	$V_{1.5} = 3.7$	$a_2 = -1.6$
2	$x_2 = 14.6$	$V_{1.5} = 6.6$	$y_2 = 34.2$	$V_{2.5} = 2.1$	$a_3 = -1.6$
3	$x_3 = 21.3$	$V_{2.5} = 6.7$	$y_3 = 36.3$	$V_{3.5} = 0.5$	$a_4 = -1.9$
4	$x_4 = 28.0$	$V_{3.5} = 6.7$	$y_4 = 36.8$	$V_{4.5} = -1.4$	$a_5 = -1.6$
5	$x_5 = 34.8$	$V_{4.5} = 6.8$	$y_5 = 35.4$	$V_{5.5} = -3.0$	$a_6 = -1.6$
6	$x_6 = 41.5$	$V_{5.5} = 6.7$	$y_6 = 32.4$	$V_{6.5} = -4.6$	$a_7 = -1.6$
7	$x_7 = 48.2$	$V_{6.5} = 6.7$	$y_7 = 27.8$	$V_{7.5} = -6.2$	$a_8 = -1.5$
8	$x_8 = 55.0$	$V_{7.5} = 6.8$	$y_8 = 21.6$	$V_{8.5} = -7.7$	$a_9 = -1.8$
9	$x_9 = 61.8$	$V_{8.5} = 6.8$	$y_9 = 13.9$	$V_{9.5} = -9.5$	$\bar{a} = -1.6$
10	$x_{10} = 68.5$	$V_{9.5} = 6.7$	$y_{10} = 4.4$		

其中  $T = \frac{1}{24} s$ .

作  $x-t$ ,  $V_x-t$ ,  $y-t$ ,  $V_y-t$ ,  $a_y-t$  图, 见附页。由  $x-t$  图得  $x_0 = 1.2 cm$ ,  $V_x-t$  图得  $V_{x0} = 6.7 cm/T$ .  
则水平方向分运动方程为:  $x = 1.2 + 6.7t$

由  $y-t$  图可得  $y_0 = 25.3 cm$ ,  $V_y-t$  图得  $V_{y0} = 5.3 cm/T$ ,  $a_y-t$  图得  $a_y = -1.60 cm/T^2$   
则竖直方向分运动方程为:  $y = 25.3 + 5.3t - \frac{1}{2} \times 1.60 t^2$

注意上式  $x, y$  中  $t$  均以  $T$  为单位.

测得重力加速度值为  $a_y = \frac{1.60 cm}{T^2} = 921.6 cm/s^2$

与杭州地区重力加速度  $g = 979 cm/s^2$  比较, 相对误差

$$E = \frac{979 - 921.6}{979} = 5.9\%$$

不确定度计算: 由测量方法知  $a_y = \frac{V_{y\pm} - V_{y\pm}}{T} = \frac{1}{T} \left( \frac{y_{n+1} - y_n}{T} - \frac{y_n - y_{n-1}}{T} \right) = \frac{y_{n+1} - 2y_n + y_{n-1}}{T^2} = \frac{y''}{T^2}$ .

由于实验中  $T$  的不确定度未知, 在此仅计算  $y''$  的不确定度

① A 类分量 由判断  $y$  值读数不佳等因素引起的  $y$  值 A 类不确定度为

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n(n-1)}} = 0.044 cm.$$

② B 类分量 厘米方格纸坐标, 其误差限为  $0.05 cm$ , 并可视其服从正态分布, 这一原因造成的  $y$ :

测量误差限值为

$$\Delta y_i = 0.05 / 3 = 0.017 cm.$$

因而 B 类不确定度为

$$u_B = \sqrt{\Delta y_i^2} = 0.029 cm$$

∴  $y''$  的合成不确定度为

$$\Delta y' = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 0.053 cm.$$

则

$$\Delta a_y = \frac{\Delta y'}{T^2} = 3.9 cm/s^2 = 0.4 m/s^2$$

则

$$a_y = (922 \pm 31) cm/s^2 = (9.2 \pm 0.4) m/s^2$$



## 【误差分析】

请详细分析——

本实验的相对误差为 5.9%.

误差来源分析:

1. 小球运动时除重力外, 还受空气阻力影响
2. 相片上格子较小, 仅靠肉眼去读数误差过大
3. 频闪仪频闪的时间间隔误差
4. 网格线存在误差, 如坐标轴分布不均匀等.

## 【实验心得及思考题】

- 实验心得: ① 本次实验让我们接触到了照片冲印技术, 冲印的过程完全在黑暗中进行. 其中在曝光时要注意曝光时间、焦距以及放大倍率, 从而提高相片的清晰度. 显影定影时要每隔一段时间搅动相片, 使其能够完全浸入在显影液与定影液中. 同时在整个过程中还应轻拿轻放, 避免破坏成像.
- ② 通过 ~~抛体~~ 本实验更加深入对瞬时速度、平均速度的理解.
- ③ 通过对数据的处理, 掌握了表差法来处理数据.

思考题: 1. 表差法是对表格数据中相邻两行数据不断做差, 再对差值进行做差求值, 直到  $n$  次差值为相等为止, 得到一个  $n$  次多项式, 其优点在于充分利用实验数据, 缺点在于结果易受单一数据影响, 且操作较麻烦. 逐差法是将数据等间隔相减后取其逐差平均值, 其优点在于误差小, 但缺点在于所处理的数据一般呈线性关系, 不可以得到因变量与自变量的  $n$  次关系式.

2. ① 减小测量时间间隔  $T$ , 使  $\Delta y$  接近  $y'$ ,  $\Delta(\Delta y)$  接近  $y''$ , 减小误差.

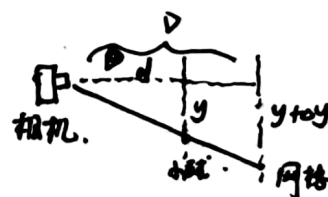
② 选择体积更小的钢球, 以减小空气阻力的影响

③ 调整网格坐标, 使之更加准确.

④ 由投影关系  $\frac{y+\Delta y}{D} = \frac{y}{d}$

$$\Rightarrow \frac{\Delta y}{y} = \frac{D-d}{d} = \frac{D}{d} - 1$$

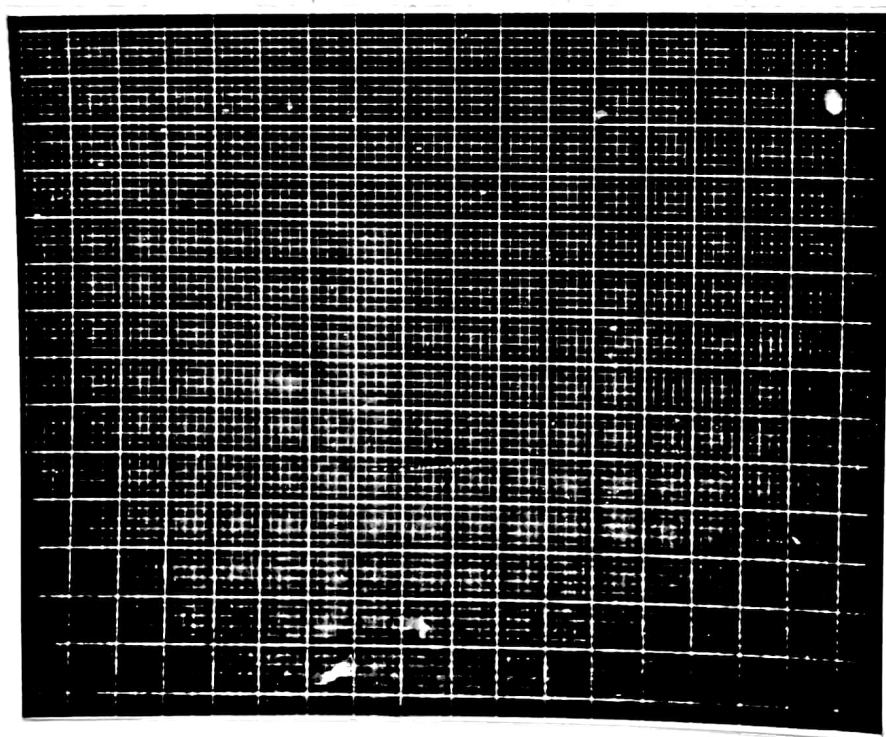
为了减少  $\Delta y$  的系统误差, 应减小  $D$ , 增加  $d$ .



【数据记录及草表】

抛体运动实验结果记录表

$t/T$  位置  $x/cm$   $V_{n+1/2} = x_{n+1} - x_n$  位置  $y/cm$   $V_{n+1/2} = y_{n+1} - y_n$   $a_n = V_{n+1/2} - V_{n-1/2}$

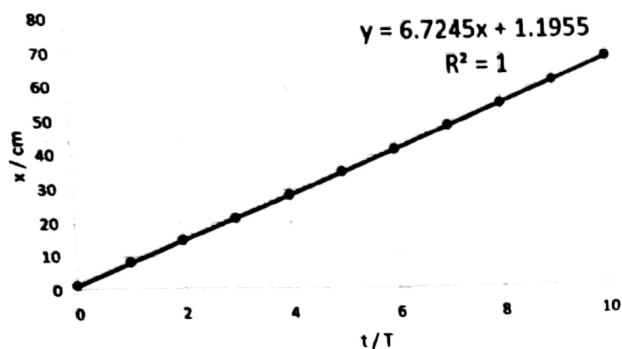


质量很好

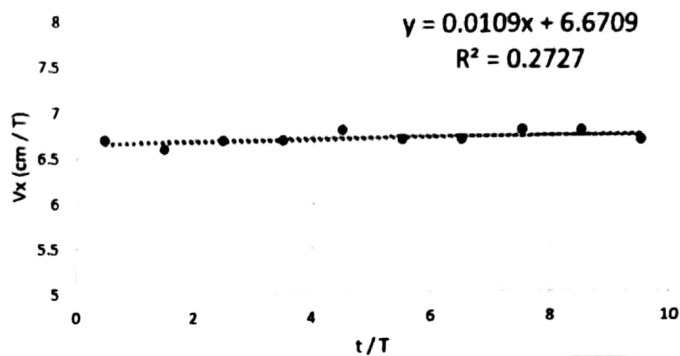
教师签字: 童彦轩



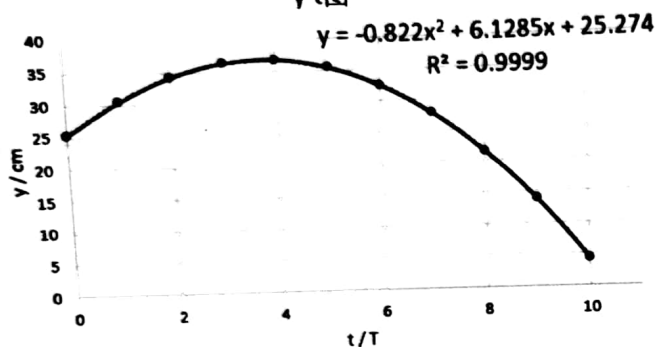
x-t图



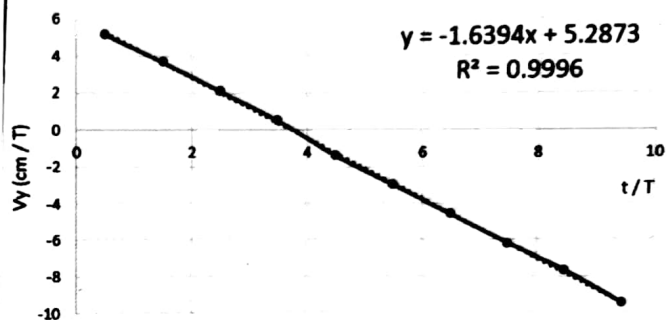
Vx-t图



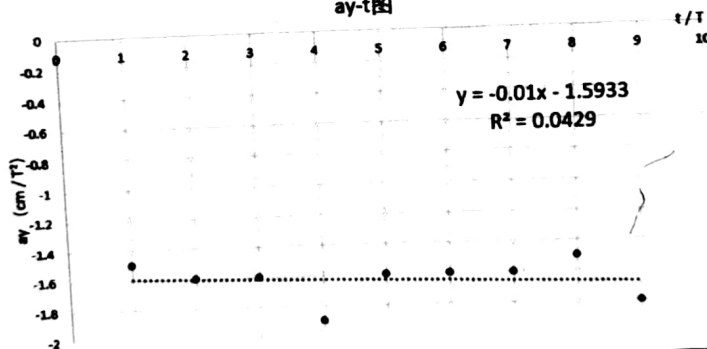
y-t图



Vy-t图



ay-t图



数据点之间不要连线——



扫描全能王 创建