

ZKY-PMB0100
高速摄影动力学实验平台
《实验指导及操作说明书》

ZKY2.769.003SS

四川世纪中科光电技术有限公司

地址：四川省成都市经济技术开发区(龙泉驿区)南二路 309 号 邮编：610100

电话：(028) 61430706 61430729 网址：WWW.ZKY.CN E-mail：ZKY@ZKY.CN

2020-10-23

目录

1	仪器组成	1
2	概述	2
3	性能特性	2
4	实验目的	2
4.1	单摆运动	2
4.2	平抛运动	2
4.3	弹簧振子简谐运动	2
4.4	动量守恒定律	2
4.5	自由落体运动	2
5	实验原理	2
5.1	瞬时速度近似	2
5.2	匀加速直线运动	3
5.3	曲线运动的分解	3
5.4	动量守恒定律	3
5.5	简谐运动（振动）	3
6	仪器介绍	3
7	实验内容与步骤	4
7.1	镜头畸变校正	4
7.2	单摆实验	4
7.3	平抛实验	5
7.4	简谐振动实验	7
7.5	动量守恒实验	8
7.6	自由落体实验	9
8	维护和修理	9
9	制造厂商和地址	9
附录 1:	相机画面的定标	10
附录 2:	简单故障排除	11

高速摄影动力学实验平台

1 仪器组成

高速摄影动力学实验平台由拍摄背屏、运动小球、各类小球固定、发射装置、摄像头、补光灯等组成。配套有视频录制、分析软件。

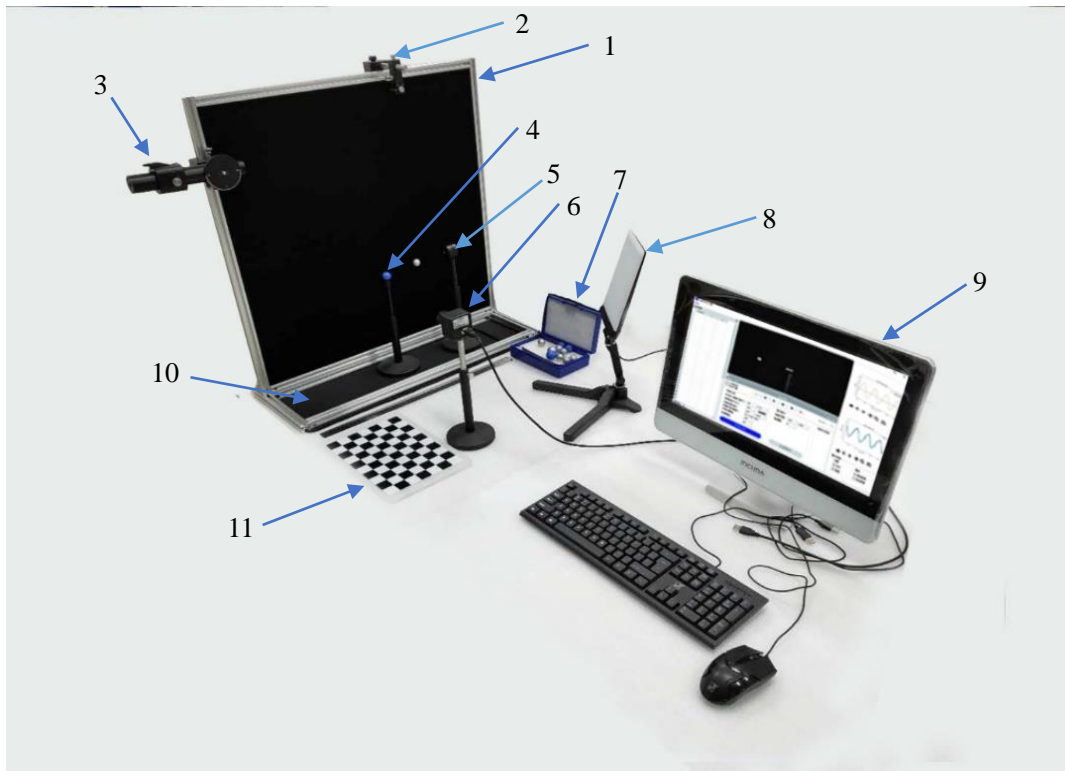


图 1 高速摄影动力学实验平台（图片仅供参考）

表 1 高速摄影实验平台套件清单

序号	编码	名称	备注
1	PA0015	高速摄影背屏	
2	PA0016	悬挂支架	
3	PA0013	平抛发射器	含有辅助读数重垂线，放置于力学测试组件收纳盒中
4		小球支架	由调节底座和直杆组成的可微调机构
5	PA0012	释放装置	由释放装置和一个调节机构组成
6		高速相机	安装于相机调节机构上
7	PA0014	力学测试组件收纳盒	
8	BD0004	补光灯	
9		计算机	
10		桌垫	
11		标定板	
12	BG0001	软件适配器	图中未显示
13		光盘	需要软件适配器才能使用
14		50 cm 钢尺	图中未显示

2 概述

人类对物体运动的研究可以追溯到古希腊时期，到 17 世纪，牛顿定律揭示了力与运动的关系，在此基础上，进一步发展出了动力学这一物理学分支。动力学的基本内容包括质点动力学、质点系动力学、刚体动力学、达朗贝尔原理等。

动力学是物理学和天文学的基础，也是许多工程学科的基础，通常是物理初学者最先学习的内容。在本系列实验中，可以直观地观测到匀加速直线运动、曲线运动、周期运动等典型运动的运动过程，深刻认识它们的运动特征，学会运动的分解与合成，并通过测量重力加速度进一步加深对运动学公式与牛顿定律的认识。此外，本系列实验还对与牛顿定律紧密结合的动量守恒定律进行了验证。在实验中，可以直接观测物体碰撞前后的情况，测量其碰撞前后的速度，并验证动量守恒定律，加深理解。

本实验平台还可以通过设计新的运动用于验证不同的动力学定律。

3 性能特性

准确定标的情况下：

速度测量范围：0~3 m/s

速度测量相对误差：优于±5%

加速度测量相对误差：优于±5%

4 实验目的

4.1 单摆运动

观测单摆的运动过程与轨迹，计算单摆周期

测量重力加速度

4.2 平抛运动

观测平抛运动过程与轨迹

将平抛运动分解为水平方向和竖直方向的运动

测量平抛运动的初速度

4.3 弹簧振子简谐运动

观测弹簧振子的运动过程，测量振动周期

测量弹簧的劲度系数

4.4 动量守恒定律

观测碰撞过程，测量碰撞前后物体的速度

验证动量守恒定律

4.5 自由落体运动

测量自由下落物体速度与时间的关系

测量重力加速度

5 实验原理

5.1 瞬时速度近似

小球在运动过程中，在一段距离中，小球的平均速度可以表示为：

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

当时间间隔 Δt 或位移 Δs 取极限时：

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

在本实验中，由于拍照帧率 f 极高（每两帧间隔时间 $< 1/100$ s），可看作 $\Delta t \rightarrow 0$ ，故可以使用中心差分法求得的瞬时速度代替真实瞬时速度。

$$v = (r_{n+\frac{1}{2}} - r_{n-\frac{1}{2}})f \quad (3)$$

其中 v 为质点在第 n 帧时的瞬时速度, r_n 为质点在第 n 帧时的位移, $r_{n+\frac{1}{2}}$ 和 $r_{n-\frac{1}{2}}$ 通过线性插值计算得到。

5.2 匀加速直线运动

物体运动过程中, 其速度的变化量与发生这一变化所用时间的比值称为加速度。若一物体沿直线运动, 且在运动的过程中加速度保持不变, 则称这一物体在做匀加速直线运动。它的加速度为某一个定值 a , 当这个定值恒为零时就变为匀速直线运动或静止。其中速度与时间的关系可以用公式 (4) 表示:

$$v = v_0 + at \quad (4)$$

其中, v_0 为初速度。将速度对时间积分, 即可得到位移与时间的关系:

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \quad (5)$$

在自由落体过程中, 其加速度 a 即为重力加速度 g 。根据公式 (3) 和 (5) 即可以求解出重力加速度。

5.3 曲线运动的分解

曲线运动通常可以被分解为水平运动和竖直运动, 将研究复杂的曲线运动简化为研究两个直线运动。曲线运动的速度可以看作物体在水平方向和竖直方向上的速度的合成, 分解后的运动速度和位移随时间的变化关系分别满足式 (1) 和式 (2)。其合速度大小和方向可用式 (6)、(7) 表示

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (6)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{v_y}{v_x}\right) \quad (7)$$

5.4 动量守恒定律

动量守恒定律是物理学中最基本的定律之一, 但在经典力学范畴内, 动量守恒定律可以看作是牛顿定律的推论。

两个物体在碰撞过程中, 它们发生的形变不断变化, 因此它们之间的相互作用力是变力, 取其平均值, 对两小球分别使用动量定理:

$$Ft = m_1 v_1' - m_1 v_1 \quad (8)$$

$$F't = m_2 v_2' - m_2 v_2 \quad (9)$$

$$F = -F' \quad (10)$$

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2' \quad (11)$$

其中, m 为质量, v 为速度, 下标代表小球 1 和小球 2, 上标代表碰撞后的状态。

式 (11) 即为动量守恒定律, 通过式 (3) 获得碰撞前后两小球的速度, 代入式 (11), 即可验证动量守恒定律。

5.5 简谐运动(振动)

小角单摆和弹簧振子的运动均可以看作简谐运动, 它们的运动过程通常用式 (12) 描述。

$$x = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (12)$$

其中 A 为振幅, ω 为角频率, T 为周期, 其满足 $\omega = 2\pi/T$, x 为质点位移, φ 为初始相位。

一般简谐运动周期为:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (13)$$

其中 m 为振子质量, k 为振动系统的回复力系数。当振动系统为单摆时 $k = mg/l$, 其中 l 为单摆摆长, 当振动系统为弹簧振子时 k 即为弹簧的劲度系数。

通过式 (3) 求得简谐运动的速度——时间关系图, 从图中获得运动周期, 将周期和质量代入式 (13), 即可计算出重力加速度或弹簧的劲度系数。

6 仪器介绍

本产品执行标准号为: Q/9151011206008316XG•64

仪器正常工作条件:

- 1) 温度: $0^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$;
- 2) 相对湿度: $\leq 90\%\text{RH}$;
- 3) 大气压强: $86\text{kPa}\sim 106\text{kPa}$;
- 4) 电源: $\sim 220\text{ V}/50\text{ Hz}$

仪器组成如图 1 及表 1。主要工作部分可分为拍摄背景、运动物体、录像及分析系统。

拍摄背景与运动物体

其中拍摄背景为黑色, 运动物体采用了白色金属球和蓝色尼龙球。通常运动小球和背景的对比度越高, 识别效果越好。为了去除干扰, 小球的支架、释放装置(内置电磁铁)、弹簧也全部都定义为黑色, 以减少识别干扰。

高速相机

本产品采用了 330 fps 高帧率相机。可以清晰抓拍到运动的物体, 同时配合有补光灯, 可以在拍摄过程中有效去除实验室灯光频闪引起的画面闪烁。

分析系统

本产品配套有特定的分析软件系统, 能够分析出单小球运动和双小球(一蓝一白)运动的坐标与时间的关系, 可进一步计算出小球的运动速度与加速并进行显示。

7 实验内容与步骤

7.1 镜头畸变校正

软件在安装后第一次使用时, 需要对镜头做畸变校正, 使图像中的关系能与现实坐标的对应关系为线性关系(也即二者仅存在等比缩放的关系)。安装好软件及摄像头, 确保能通过软件打开摄像头即可。保持环境光线明亮, 调节镜头, 将镜头对焦至约 40 cm 的位置(可先用钢尺量好距离, 再对焦, 注意这个位置可以在实验中适当调整, 画面在当前分辨率下清晰即可)。准备好标定板。

在软件中打开相机后, 选择相机标定。手持标定板, 距离镜头约 40 cm 处(焦距附近), 拍摄 10-15 张照片, 为了保证拍摄效果, 曝光调至自动。注意保持拍摄画面能够完整拍摄到清晰的标定板(无反光且黑白分明, 边缘清晰)。点击开始校正按钮完成校正。

观察校正后的画面, 将钢尺置于画面中不同位置, 观察钢尺是否有明显变形, 如果有, 则重复以上步骤重新进行校正。

注意校正结束后, 如果需要对焦, 则不应该调节镜头, 而应该移动相机位置。每次调节镜头后, 都建议重新进行标定。

7.2 单摆实验

通过对单摆运动的数据采集, 可以直观观测单摆的运动曲线, 建立单摆运动方程, 分析单摆摆长、摆球质量、摆动角度对单摆运动的影响。利用单摆周期公式, 可以测量出当地的重力加速度。

通过软件打开摄像头后, 打开补光灯, 调节摄像头曝光参数, 使小球和背景有较高的对比度。适当移动补光灯的位置, 使背景为暗色, 且小球在视场中的各个位置均没有特别高光的情况。

将细绳用螺钉固定在小球上, 悬挂于背景板顶部支架, 悬挂时, 调节摆长并测量, 使小球位于背景区域中心位置附近。在辅助线悬挂位置(单摆悬挂点附近)悬挂重垂线, 调节单摆悬挂位置, 使两线所成平面与背景板平行(也可通过钢尺测量摆线与背屏的距离是否处处相等来判断)。放置好电磁铁, 接通电源。将单摆拉至一定高度, 吸至电磁铁上(注意保持摆线与背屏平行)。

适当调节摄像头位置, 使小球位于视场内, 且镜头中轴线与背景板尽量垂直(可在软件画面右下角打开十字辅助线帮助调节), 此时摄像头的成像面与背景板平行。

调节补光灯的位置, 使画面中小球正面清晰可见, 且除小球外的其他物体和场景较暗。如果没有提前标定像素坐标和实际坐标的比例尺关系, 可将钢尺竖直或水平安放于画面中, 如果因像素问题导致钢尺刻度不清晰, 可以适当将摄像头的位置调近或使用标定板代替钢尺(标定板的格子边长为固定 25 mm)。(注: 钢尺所在的平面选为小球靠近相机一侧的竖直切面, 其具体原因可参考附录 1。)录制一段视频后, 可将钢尺或标定板移开, 以防干扰实验。断开电磁铁开关, 使单摆自由摆动。

录制约 30 秒单摆视频后, 停止录像并开始分析。打开视频, 选择小球开始运动的帧数作为起始帧(也可任意选择小球运动过程中的某一帧作为起始帧), 选择一定的运动时长后的帧数作为结束帧。在界面中拖动红框, 框选小球的运动范围, 并在钢尺或标定板上选择一部分范围, 测量其像素长度(在图中使用鼠标大致测量, 单位 px)和实际长度(直接读数单位 mm), 将其输入参数框中, 并计算出其比例为 $q\text{ px/mm}$ 。

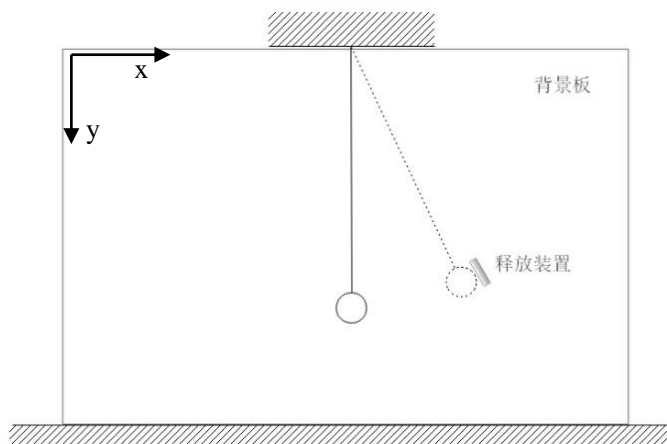


图 4 单摆实验安装示意图

点击开始分析视频，调节灰度阈值，使其尽量能识别出整个小球，但同时其他干扰越少越好。调整好后，点击开始分析。分析结束后，关闭分析窗口，将会自动生成小球坐标数据以及位移图、速度图。可在图表中分析或选择导出数据后进行分析。

注：尽量保证摄像头拍摄到的画面与背景板平行，如果想使用单摆周期公式尽量准确计算重力加速度，则在实验过程中应当注意单摆近似简谐振动的条件。

摆球吸在电磁铁上以后，注意使小球球心与摆线在同一直线上，避免在摆动过程中小球出现抖动。

数据记录与处理

分析导出的原始数据表格，如下表所示，从选择的分析区域的第一帧开始，分别记录了每一帧的帧数、小球的 x、y 坐标。根据摄像头帧率 f ，可得每两帧间隔时间为 $1/f$ ，再根据像素坐标与真实坐标的比例关系，即可将时间单位以及位移单位转换为标准单位(时间从帧转换为 s，1 秒= f 帧，长度从 px 转换为 mm，1 mm = q px)。

时间 (帧)	x 坐标(px)	y 坐标(px)
1		
2		
...		

查看小球的 x 坐标，找到三次或更多的最大值的行数 (帧数)，也可在位移图中直接找到两次最大值，计算出单摆的平均周期：

$$T = \frac{1}{n-1} (f_n - f_1) \Delta h \quad (7.2.1)$$

其中 n 为选择的 x 坐标大值的次数， f_n 、 f_1 分别为第 n 次和第一次 x 最大值所对应的帧数， Δh 为相邻两帧的时间间隔，取 $1/f$ 。此处亦可采用离散傅立叶变换获得频率，再求倒数获得周期。

将摆长和周期代入以下公式，计算出重力加速度，并对比当地重力加速度值 g' ，计算相对误差。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (7.2.2)$$

$$g = \frac{4\pi^2 L}{T^2} \quad (7.2.3)$$

$$\eta = \frac{g - g'}{g'} \times 100\% \quad (7.2.4)$$

注：寻找单摆周期更简单的办法是对位移图作傅立叶变换，将时域信号转换为频域信号，得到幅度最大处的频率 f ，周期即为 $1/f$ 。

7.3 平抛实验

通过对变速运动的拍摄，分析其运动轨迹，可以直观的理解牛顿第二定律，也可对复杂运动的运动方式进行分析。平抛运动是一种非常典型的匀加速运动，使用高速摄影对平抛运动进行记录，可以重复观看其运动轨迹，加深理解运动的合成与分解。

如图 5 所示，平抛发射器固定在背景板上，调节好平抛发射器的高度，将小球放入发射器中，拉动发射栓。摄像头位于背景板的正前方，补光灯置于摄像头后方，打开软件录制界面，适当调节摄像头位置使其视场区域内均为背景板内的部分。

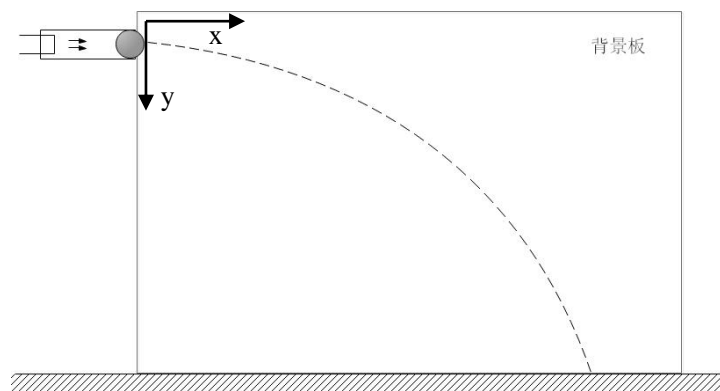


图 5 平抛运动实验示意图

摄像头刚打开的短时间内，其帧率并不稳定，等待软件显示帧率稳定后，再进行视频录制，以保证每两帧的时间间隔尽可能一致。如果没有提前标定像素坐标和实际坐标的比例尺关系，可将钢尺或标定板竖直或水平安放于画面中一段时间，具体方法可参考实验 7.2。（钢尺安放位置参考附录 1）

在视频录制界面点击开始录像按钮以录制视频，按下平抛发射器开关，发射小球。录制好视频后，框选小球的运动范围，并测量小球像素直径和实际直径的比例（采用实验 7.2 中的钢尺或标定板测量法更加准确），将其输入至参数框中，然后开始分析。将分析得到的小球时间——坐标信息以及相关绘图保存导出留作数据分析。调节平抛发射器的发射力度，重复以上步骤，研究不同初速度下的平抛运动。

注：尽量保证摄像头拍摄到的画面与背景板平行。

由于相机在采集图像的过程中，每一帧的时间间隔会有微小的波动，如果小球下落的速度很快，将会造成计算速度误差偏大，因此建议尽量拍摄小球刚开始运动的时候。

数据记录与处理

分析导出的原始数据表格如下，从选择的分析区域的第一帧开始，分别记录了帧数、小球的 x 、 y 坐标。再根据相机的帧率 f ，可得每两帧间隔时间为 $1/f$ ，再根据像素坐标与真实坐标的比例关系，即可将时间单位以及位移单位转换为标准单位。

时间（帧）	x 坐标(px)	y 坐标(px)
1		
2		
...		

同时分析软件会自动绘制出其相应的图，方便观察与分析。

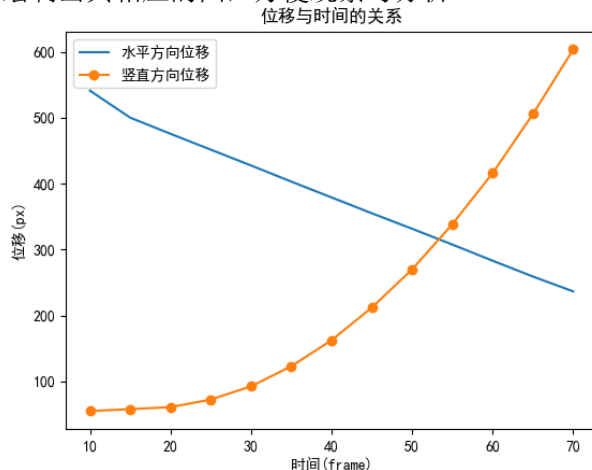


图 6 测量平抛运动示例（注意本示例小球的水平运动方向与图 5 定义方

向相反，具体情况视平抛发射器的安装于屏幕左右而定）

7.4 简谐振动实验

通过对弹簧简谐振子的拍摄，分析其运动轨迹，可以直观地观测简谐振动，也可对复杂运动的运动方式进行分析。

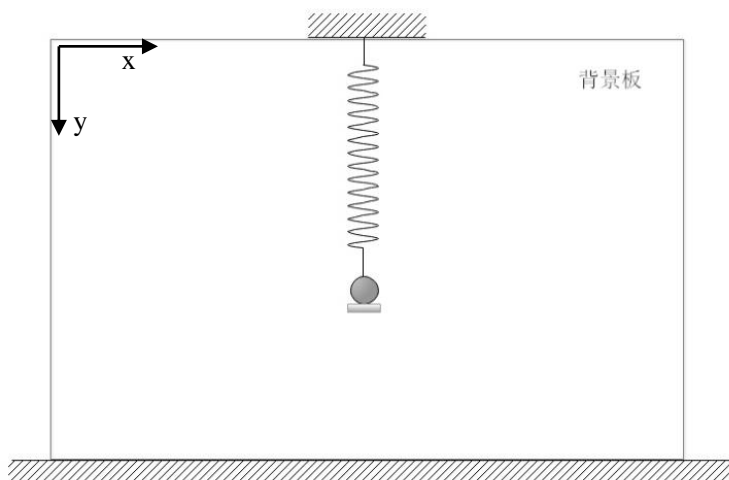


图 7 弹簧振子实验示意图

在实验开始前，先使用天秤（自备）测量弹簧与小球总质量 m 。使用钢尺测量弹簧挂上小球后小球质心的位置，更换不同小球后，再次测量弹簧与小球总质量 m' ，以及弹簧挂上小球后，小球质心的位置，依据胡克定律和当地可查重力加速度，计算出弹簧劲度系数 k 。

如图 7 所示，将弹簧悬挂于背景板上方夹持装置上，将电磁铁置于小球正下方，拉动小球吸在电磁铁上。然后释放小球，录制简谐运动视频并开始分析。可在图表中处理数据或选择导出数据后进行处理。

注：弹簧的初始振幅不宜过大，否则向上回弹的位置可能超过弹簧收缩的最短位置。为了较好的实验效果，通常推荐的初始振幅在 4 cm 左右，可根据弹簧的劲度系数选择合适的振幅。

数据记录与处理

根据实验 7.2 中的方法做好单位转换。

查看小球的 y 坐标，找到三次或更多的最大值的行数（帧数），计算出弹簧振子的平均周期 T 和振幅 A ：

$$T = \frac{1}{n-1} (f_n - f_1) \Delta h \quad (7.4.1)$$

$$A = \frac{1}{2(n-1)} \left(\sum_{i=0}^n y_{\max}^i - \sum_{i=0}^n y_{\min}^i \right) \quad (7.4.2)$$

其中 n 为选择 y 坐标极大值的次数， y_{\max}^i 为对应的第 i 次的 y 的最大值， y_{\min}^i 对应的第 i 次的 y 的最小值， f_n 和 f_1 分别为第 n 次和第 1 次 y 最大值所对应的帧数， Δh 为帧间时间间隔取 $1/f$ ，其中 f 为帧率。

对位移图数据按简谐振动方程进行拟合得到其运动方程：

$$y = A \cos(\omega t + \varphi) + C \quad (7.4.3)$$

根据弹簧振子周期公式计算出弹簧的劲度系数 k ：

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (7.4.4)$$

$$k = \frac{4\pi^2 m}{T^2} \quad (7.4.5)$$

可与根据胡克定律计算得到的劲度系数对比，分析本实验相对拉力计所测劲度系数的相对误差。

$$\eta = \frac{k - k'}{k'} \times 100\% \quad (7.4.6)$$

其中 k' 为拉力计所测弹簧的劲度系数。

7.5 动量守恒实验

准备白色和蓝色小球各一个，称量其质量并记录。

如图 8 所示，选择蓝色小球作为被撞小球，将其安放于小球支架上。将白色撞击小球悬挂于屏幕顶部支架（单摆），调节二者位置，使两小球刚好在平行于背景屏幕的面内等高接触。

此时在顶部支架安放辅助重垂线（带有金属悬挂环的重垂小球），使其处于被撞小球和撞击小球组成的平面内。拉动撞击小球，使其吸于释放装置上，调节其位置，使其位于辅助重垂线和被撞小球所在的平面内。位置安装好后，将辅助重垂线取下。

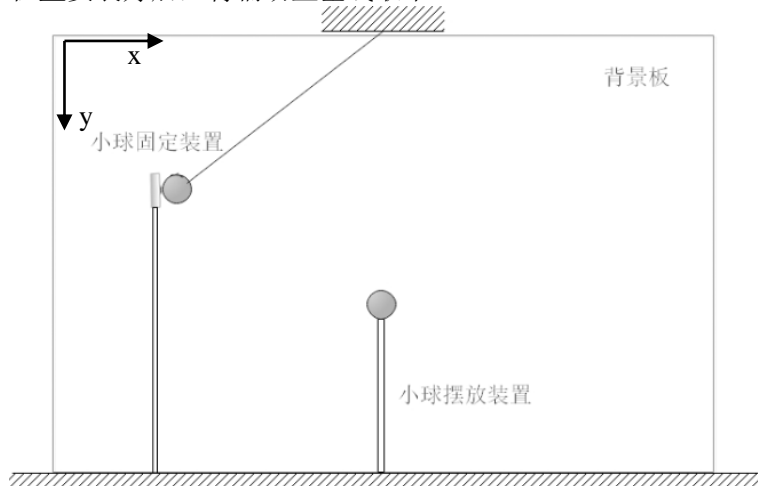


图 8 动量守恒实验示意图（图中装置为示意图，小球固定装置对应小球释放装置，小球摆放装置对应小球支架）

将摄像头连接到电脑，打开补光灯后打开软件，打开相机后，将曝光调到较低的值（能拍摄到小球的最低值，为防止拍摄过程曝光时间波动过大，不能勾选自动），其他相机参数使用默认值。适当调节摄像头位置，使小球位于视场内，且镜头中轴线与背景板尽量垂直，此时摄像头的成像面与背景板平行。

释放小球，录制碰撞视频后开始分析。打开视频，选择白色小球开始运动的帧数作为起始帧，选择一定的运动时长后（碰撞结束且蓝色小球离开视野区前）的帧数作为结束帧。框选小球的运动范围，并测量任一小球的像素直径和实际直径，将其输入参数框中（可参考实验 7.2 中的方法）。点击开始分析视频，调节灰度阈值，使其尽量能识别出小球，但同时其他干扰越少越好。调整好后，点击开始分析。分析结束后，关闭分析窗口，将会自动生成小球坐标数据以及数据图，表格中前两栏为白色小球，后两栏为蓝色小球。可在图表中分析或选择导出数据后进行分析。

注：尽量保持两小球的运动平面与背景板平行。撞击小球应当选择质量与被撞小球接近的小球（质量差异太大会导致无法测量到大质量小球碰撞前后的速度变化）。两小球的颜色应当不同。尽量使小球摆到最低点时能与支架上的小球在平行背景板的平面内发生水平对心碰撞。

数据记录与处理

在碰撞瞬间前后极短时间内，两小球均可看作仅在水平方向运动，因此，在验证动量守恒时仅需要计算水平方向上的动量即可。

根据实验 7.2 中的方法做好单位转换。

将两小球的 $t-x$ 坐标图绘制于一张图上。选择二者最近的点作为碰撞点（此时两球的 x 坐标的差值的绝对值最小）。取碰撞前后三个点分别计算两小球碰撞前后的速度（如果两小球没有水平碰撞，蓝色小球会和支架产生相互作用（尽量保证对心水平碰撞可以减小此影响），因此选择碰撞后速度点时，可根据实际情况决定是否选择离碰撞点稍远一两帧）。

$$v_b = \frac{x_{i+1} - x_{i-2}}{\Delta h} \quad (7.5.1)$$

$$v_a = \frac{x_{i+2} - x_{i+1}}{\Delta h} \quad (7.5.2)$$

其中 v_b 为碰撞前的速度， v_a 为碰撞后的速度， x_i 为碰撞点处的 x 坐标， $i+1$ 为视频中下一帧， $i-1$ 为视频中上一帧， Δh 为帧间时间间隔，其值为视频帧率的倒数。计算完成后，以 1 和 2 上标区分蓝

色小球和白色小球，再分别计算两小球在碰撞前后（ p_b 和 p_a ）的总动量：

$$p_b = m^1 v_b^1 + m^2 v_b^2 \quad (7.5.3)$$

$$p_a = m^1 v_a^1 + m^2 v_a^2 \quad (7.5.4)$$

计算碰撞前后的总动量相对误差，判断小球碰撞过程是否却是守恒。

$$\eta_p = \frac{p_a - p_b}{p_b} \times 100\% \quad (7.5.5)$$

7.6 自由落体实验

将释放装置（电磁铁）连同支撑杆从底座上取下，然后将直杆固定于顶部支架上（注意电磁铁方向朝下）。将小球吸于释放装置上。释放小球，录制自由落体视频后开始分析。

注：由于相机在采集图像的过程中，每一帧的时间间隔会有微小的波动，如果小球下落的速度很快，将会造成计算速度计算误差偏大，因此建议尽量拍摄小球刚开始运动的时候（小球在相机画面内开始释放最佳），如果需要更高的测量准确性，建议按 7.2 中的方法使用钢尺或标定板进行定标。

数据记录与处理

使用实验 7.2 中的方法进行坐标转换。按照中心差分法，计算出小球每一帧的速度。

$$v_i = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2\Delta h} \quad (7.6.1)$$

其中 δh 为帧间间隔时间，取 $1/f$ ， v_i 为第 i 帧的速度， y_i 为第 i 帧的 y 坐标， y_{i+1} 为时间轴上向下一帧的小球 y 坐标， y_{i-1} 为时间轴上向前一帧的小球 y 坐标。绘制速度与时间的关系图（分析软件中已经直接绘制），选取直线上的点或使用拟合的方法，求取其斜率，即为重力加速度。计算所测得的重力加速度与当地参考值的相对误差。

$$\eta = \frac{g - g'}{g'} \times 100\% \quad (7.6.2)$$

其中， g' 为当地重力加速度参考值。

8 维护和修理

产品应贮存在干燥、通风、无腐蚀性气体、无强日晒、无强电磁场的室内。

若实验结果出现异常或较大误差，请确认是否按照本实验说明书要求的实验步骤进行实验。

若发现其他疑难故障请参考附录 2 或和厂家联系。

9 制造厂商和地址

厂商名称：四川世纪中科光电技术有限公司

地址：四川省成都市经济技术开发区(龙泉驿区)南二路 309 号

邮编：610100

附录 1：相机画面的定标

通过给摄像画面定标，可以获得像素距离和实际距离的比例大小。只有定标之后，才能将捕捉到的小球坐标单位转换为标准长度单位。

通常情况下，像素与实际长度的比例尺可以通过以下两种方式来确定。

1. 使小用球的直径。

小球在摄像头画面中的成像是一个圆。设小球的直径为 d mm，画面中的圆的直径为 d' px，于是定标比例尺为： $\text{mm:px}=d:d'$ 。

事实上，小球的直径可以使用游标卡尺较为精确的测量得到，但画面中的圆往往并非标准的球的投影。由于越靠近边缘，小球表面的法线和摄像头中轴线的夹角也就越大，反射进镜头的光也就越少。因此，摄像头画面中的圆往往会比小球的投影要小，结果会使比例尺偏大。

此种标定方法在精度要求不高的情况下可以简单快速的进行定标。

2. 使用钢尺或标定板进行标定

由于使用小球直径直接进行标定，会出现如上一小节所述的问题。因此，使用钢尺或标定板这样的平面进行标定更加准确。

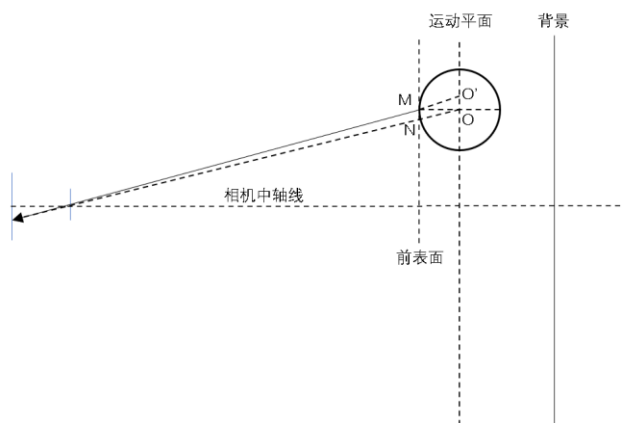


图 a.1.1 相机拍摄小球时的成像情况

如图 a.1.1 所示，在图像识别的过程中， N 点是小球图像中的中心点，因此需要在 N 点所在的竖直平面进行定标。但 N 点由于镜头角度的问题，会因为小球的位置不同而在球面上发生变化。因此，直接在 N 点所在平面进行定标是难以完成的。

由于本实验采用的相机，其镜头角度对小球的成像在一定范围内影响较小，也即小球的中心总是在 M 点附近，因此可以选择图 a.1.1 中所示的前表面作为标定面（靠近相机一端的竖直切面），这样定标仍然有一定的误差（可能会导致比例尺偏小），但所引起的误差将远比将定标面选在运动平面上（导致比例尺偏大）要小，此处引起的误差在自由落体、平抛运动等对位置—时间信息非常敏感的实验中表现较为明显。

如要避免选择前表面所带来的定标误差，可以适当增加摄像头的拍摄距离，这样在小球的运动过程中 N 点将会更加接近 M 点。

附录 2：简单故障排除

故障现象	解决办法
平抛发射器发射栓卡住	适当调松板机的紧固螺栓
电磁铁无磁性	电磁铁连接电缆有断点，检查导线，并将断开处焊好即可
视频无法录制	等待帧率稳定即可，如一直无法稳定，可关闭不用的程序释放更多的计算机运行资源。