

运用 Phyphox 测定重力加速度

16307100068 豆孟恒

摘要：本次实验利用 Phyphox 的单摆、声学秒表以及近距秒表工具，通过单摆法、重物坠地法、水滴法、长物体下坠法测定了当地的重力加速度，得到的结果为 $(9.6 \pm 0.3)m/s^2$ 、 $(9.53 \pm 0.07)m/s^2$ 、 $(9.7 \pm 0.3)m/s^2$ 、 $(13 \pm 10)m/s^2$ ，相对误差为1.9%、2.6%、1.3%、33.9%，除了受测量工具精度不足影响的长物体下坠法均得到了较为精确的结果。

关键词：Phyphox 重力加速度 单摆 自由落体

一、引言

近年来，随着技术的不断发展，智能手机逐渐成为人们日常生活中不可或缺的一部分，为了满足人们各个方面的需求，在智能手机上搭载了各种高精度、高灵敏度的传感器以实现对各种物理量的测量。

Phyphox 是德国亚琛工业大学基于传感器设计开发的物理实验手机软件，通过调用手机的内置传感器，包括加速度传感器、磁力传感器、陀螺仪、光传感器、压力传感器、麦克风以及 GPS 等，可根据手机的运动情况和周围环境进行相应的数据测量。^[1]

本次实验基于单摆和自由落体的运动规律，通用 Phyphox 的单摆、声学秒表以及近距秒表工具对当地的重力加速度进行了测量。

二、实验原理

1、单摆

单摆的运动方程是 $\ddot{\theta} + \frac{g}{l}\sin\theta = 0$ ，在小幅度摆动的情况下， $\sin\theta \approx \theta$ ，运动方程变为 $\ddot{\theta} + \frac{g}{l}\theta = 0$ ，由此得 $\omega^2 = \frac{g}{l}$ ，再由 $T = \frac{2\pi}{\omega}$ ，可得单摆运动周期与摆长 l 以及重力加速度 g 的关系 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ ，使用 Phyphox 的单摆功能可以直接测得单摆的运动周期 T ，改变摆长进行多次测量，通过取平均值或者作 $T \sim l$ 图进行拟合可以测得重力加速度 g 。

2、自由落体

自由落体的位移与时间关系为 $h = \frac{1}{2}gt^2$ ，通过不同方法测量得从不同高度下落的物体落地所需时间，取平均值或作 $h \sim t^2$ 图进行拟合即可得到重力加速度 g 。由于测量方法和装置的不同，具体的公式也有所不同。

三、实验装置及过程

1、单摆法测定重力加速度^[2]

实验装置：Phyphox 内置的单摆工具（最小分度值 0.01s，不确定度限值取为 0.01s）、卷尺（由于手机摇晃、难以贴紧等因素估读位数取 5mm）、绳子、纸筒（用于固定手机）。

实验装置的设置：寻找水平的挂杆，使用纸筒固定手机，在纸筒两侧穿过细绳后将装置悬挂于挂杆上，如下图：



图一 单摆法测定重力加速度的装置

组装固定实验装置后，打开 Phyphox 单摆工具，设置定时运行，启动延迟为 5s，实验时长 40s，测量单摆运动周期。由长至短地改变摆长，这样便于实验装置的设置，多次测量。由数据作 $T^2 \sim l$ 图，进行线性拟合，通过斜率得到重力加速度 g 。

2、重物坠地法测定重力加速度

实验装置：Phyphox 内置的声学秒表工具（最小分度值 0.001s，不确定度限值取为 0.001s）、卷尺（最小分度值为 1mm）、重物、直尺、重锤、书。

实验装置的设置：将直尺放置于桌上，部分长度伸出桌缘，用书本固定住直尺，将重物放置于直尺边缘，将手机靠近书本放置，如下图：



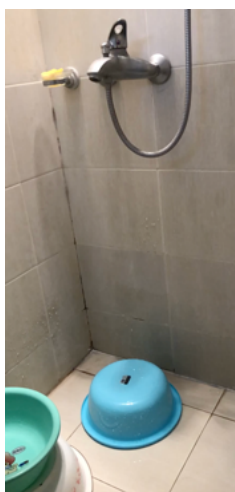
图二 重物坠地法测定重力加速度实验装置

设置完毕后，打开 Phyphox 声学秒表工具，设定阈值 0.2，最小时延 0.1s。使用重锤迅速敲击直尺末端，以此声响激发声学秒表开始计时，重物落地后产生的声响使声学秒表结束计时，由此获得下落时间。对相同高度测量三次取时间平均值，随后改变高度测量。根据数据作 $h \sim t^2$ 图，进行线性拟合，通过斜率得到重力加速度 g 。

3、水滴法测量重力加速度

实验装置：Phyphox 内置的声学秒表工具（最小分度值 0.001s，不确定度限值取为 0.001s）、卷尺（最小分度值 1mm，由于测量条件进行 1/2 估读）、脸盆若干、水龙头。

实验装置的设置：调节水龙头使其滴水，不断调节使得上一滴水滴落地后下一滴水滴刚好脱离水龙头开始自由下落。由于水龙头的流速较难控制，可以在将水龙头调至滴水状态后在其下方叠放脸盆以调整高度（此外脸盆可以放大水滴落地时发出的声音），以此达到满足实验进行的条件。满足条件后将手机放置于脸盆上即可。实验装置如下图：



图三 水滴法测定重力加速度实验装置

设置完毕后，打开 Phyphox 声学秒表工具，设定阈值 0.1，时延 0.1s，转至多任务面板，开始测量，水滴击打落地点的声音将会激发声学秒表计时，测量 10s 左右后结束测量，去除测量开始以及测量结束时的数据，取平均值即可得到自由落体下落时间。随后测量水滴落地点至水龙头的高度，代入公式后得到重力加速度。

4、长物体下落法测定重力加速度

实验装置：Phyphox 内置的近距离秒表（最小分度值 0.01s，但是能够分辨的最小时间间隔为 0.12s）、卷尺（最小分度值 1mm，由于测量条件限制 1/2 估读）、细长的物体。

实验装置的设置：将手机竖直放置靠近放置位置边缘，稳定固定即可，如下图所示：



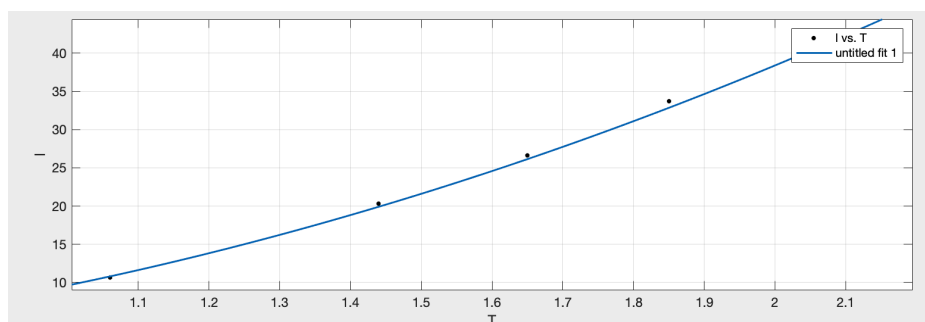
图四 长物体下落法测定重力加速度

设置完毕后，打开 Phyphox 近距秒表，设置触发下限为 0 厘米，触发上限为 100 厘米，随后将细长的物体下端紧贴手机感光器上端释放。当物体贴近手机感光器后，近距秒表开始计时，当物体远离感光器后，结束计时。由此可得到细长物体以初速度为 0 做自由落体运动掠过手机感光器的总时长，重复三次取平均值。此后测量物体的长度，代入 $h = \frac{1}{2}gt^2$ 即可得到重力加速度。

四、实验结果及分析

1、单摆法测定重力加速度

对测量得到的 $l \sim T$ 数据进行处理，所有 T 除以 2π ，随后用函数 $f(x) = ax^2$ 进行拟合，如图，直接得到 $g = (9.6 \pm 0.3)m/s^2$ ， $R^2 = 0.9958$ ，查阅资料得当地的重力加速度为 $g_0 = 9.783m/s^2$ ，相对误差为 $\eta = \frac{|g-g_0|}{g_0} = 1.9\%$ 。



图五 单摆法拟合图像

结果分析：由实验装置的实验图可见，由于采用了两个摆绳，作为重物的

手机质心不便测量以及挂杆的厚度等因素的影响，只能使用卷尺在装置一侧进行测量，摆长的数值有较大误差。卷尺的精度为5mm，对长度测量有1%左右的误差影响。

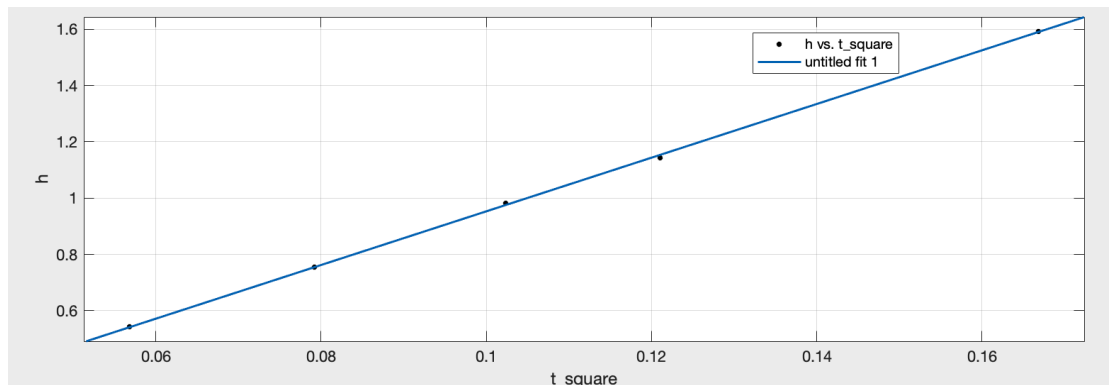
另外，在实验过程中发现，在单摆释放后，较早一段时间的周期偏大，会使最终的结果明显偏小，需等待一段时间系统稳定后才能得到正确的测量值。周期的偏大可能由于释放时的角度偏大的原因。

2、重物坠地法测定重力加速度

由于重物坠地点到手机处有一段距离，坠落的声音到达手机有一段时间，因此需要结合高度对测得的时间进行修正，减去声音传播的时间。

对修正得到的 $h \sim t^2$ 数据进行处理，所有 h 乘以2，随后用函数 $f(x) = ax$ 进行拟合，如图，直接得到 $g = (9.53 \pm 0.07)m/s^2$ ， $R^2 = 0.9997$ ，相对误差

$$\eta = \frac{|g - g_0|}{g_0} = 2.6\%$$



图六 重物坠地法拟合图像

结果分析：标准值并未落在测量值的范围内，说明有系统误差。该系统误差的主要来源在于支撑重物的直尺并非完全刚性，由于受重物的压力会向下弯曲，在使用锤子敲打直尺的过程中，直尺恢复形变给重物向上的弹力，造成了下落的延迟，使得时间的测量结果偏大，最终的测量结果偏小。除此以外的误差来源在于对高度测量的不确定性。

3、水滴法测定重力加速度

由于适合的水滴下落高度以及速率较难调整，故在设置好实验装置至恰好满足实验条件后仅进行了一次实验。

测得下落高度 $h = 0.8150m$ ，不确定度 $u(h) = \sqrt{2u_{B1}^2(h) + u_{B2}^2(h)} = 0.0007m$ 。

下落时间测量结果如图：



图七 水滴法时间测量结果

将测量数据导入电脑，在电脑中得到的数据有很高的精度，去除首尾几组数据后求得时间平均值 $\bar{t} = 0.41091s$ ，不确定度 $u(t) = \sqrt{u_A^2(t) + u_{B2}^2(h)} = 0.00013s$ 。

因此重力加速度 $g = \frac{2h}{t^2} = 9.6538m/s^2$ ，不确定度 $u(g) = g\sqrt{\left(\frac{h}{u(h)}\right)^2 + \left(2\frac{t}{u(t)}\right)^2} = 0.3m/s^2$ ，最终结果 $g = (9.7 \pm 0.3)m/s^2$ ，相对误差 $\eta = \frac{|g-g_0|}{g_0} = 1.3\%$ 。

结果分析：水滴法的时间测量结果较为精确，主要误差来源于对高度的测量。仔细观察可以发现水滴在流出水龙头后的一段距离内仍然与水龙头相连，断开后才进入严格的自由落体过程，因此对于高度的测量存在一定的误差。

4、长物体下坠法测定重力加速度

由于近距秒表的低测量精度（最低识别间隔仅为 0.12s），该方法仅选取单一高度测量三次以证明其可行性。

测量得物体长度 $h = 0.7110m$ ，不确定度 $u(h) = \sqrt{2u_{B1}^2(h) + u_{B2}^2(h)} = 0.0007m$ 。

测得平均下落时间 $0.33s$ ，不确定度 $u(t) = \sqrt{u_A^2(t) + u_{B2}^2(h)} = 0.12s$ 。

因此重力加速度 $g = \frac{2h}{t^2} = 13m/s^2$ ，不确定度 $g\sqrt{\left(\frac{h}{u(h)}\right)^2 + \left(2\frac{t}{u(t)}\right)^2} = 10m/s^2$ ，

最终结果 $g = (13 \pm 10)m/s^2$ ，相对误差 $\eta = \frac{|g-g_0|}{g_0} = 33.9\%$ 。

结果分析：时间的低测量精度带来了巨大误差，对该部分的改进方法只能是寻找能提供精度更高的测量设备，或者尽可能地增加坠落物体的长度以增加坠落时间从而减小测量精度的影响。另一方面，紧贴手机感光器释放的条件同样十分苛刻，不能够保证释放后立即触发近距秒表计时以及释放时物体初速度

为 0，改进方法是使用两台设备进行测量，将两台设备摆在不同的高度，测量出两台设备的高度差，由两个设备的测量时间间隔联立方程即可解出重力加速度，不需要 0 初速度释放。

五、实验结论

本次实验使用了单摆法、重物坠地法、水滴法、长物体下坠法测量了当地的重力加速度，结果分别为 $(9.6 \pm 0.3)m/s^2$ 、 $(9.53 \pm 0.07)m/s^2$ 、 $(9.7 \pm 0.3)m/s^2$ 、 $(13 \pm 10)m/s^2$ ，相对误差分别为1.9%、2.6%、1.3%、33.9%，前三种方法都得到了相对精确的结果，长物体下坠法由于实验装置的限制未能得到良好的结果

六、参考资料

- [1] 惠宇洁. 智能手机在物理实验教学中的应用探讨——以 Phyphox 软件为例[J]. 物理教学探讨, 2018, 036(007):70-72.
- [2] <https://Phyphox.org/experiment/pendulum/>