

教育技术应用

# 用智能手机 App Video Physics 研究竖直平面内的圆周运动

李云天 程敏熙

(华南师范大学物理与电信工程学院 广东 广州 510006)

(收稿日期:2019-07-24)

**摘要:**本实验用智能手机 App Video Physics 追踪小球在竖直平面内做圆周运动的情况,研究了不同质量的小球从同一高度静止释放到达最低点的速度关系,研究了从不同高度静止释放小球的速度与运动轨迹之间的关系,计算了小球在圆形轨道上运动时的向心力、角速度,以及当小球与圆形轨道等高静止释放时小球的脱离点速度。

**关键词:**智能手机 Video Physics 视频分析 竖直平面内的圆周运动

Video Physics 是一款具有视频分析功能的智能手机 App(目前只有 ios 版本),此款 App 具有轨迹追踪、视频分析的功能,结合手机 App Vernier Graphical Analysis 4 可以对导出数据进行定量分析<sup>[1]</sup>。

本实验用手机 App Video Physics 和 Vernier Graphical Analysis 4 研究了小球在竖直平面内做圆周运动的情况,并分析了小球的速度和运动轨迹之间的关系。

## 1 实验原理

### 1.1 计算小球在圆形轨道上运动时对应的向心力以及角速度

由向心力计算公式、角速度与线速度的关系式

$$F_{\text{向}} = m \frac{v^2}{r} \quad (1)$$

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (2)$$

可以计算出小球在圆形轨道上运动时对应的向心力和角速度。

### 1.2 不同质量的小球从同一高度静止释放到达最低点的速度关系

由动能定理得

$$mgh - fs = \frac{1}{2} m v_m^2 \quad (3)$$

可知,由同一高度  $h$  静止释放,如果不同小球所受的空气阻力以及轨道摩擦力  $f$  近似相等,则到达圆形轨道最低点时的速度相等。

### 1.3 小球从不同高度静止释放 运动轨迹不同

如图 1 所示,我们对在做圆周运动的小球进行受力分析,受到轨道弹力  $N$ ,切向摩擦力  $f$  和小球自身的重力  $mg$ ,正交分解并结合牛顿第二定律可知,在径向方向上有

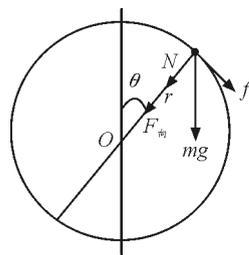


图 1 在竖直平面内做圆周运动的小球受力分析

$$mg \cos \theta + N = m \frac{v^2}{r}$$

当小球恰能运动到最高点则满足  $\theta = 0, N = 0$ ,此时可得临界速度为

$$v_c = \sqrt{gr}$$

当到达最高点的速度大于或等于  $\sqrt{gr}$  时,小球可以做完整的圆周运动。

作者简介:李云天(1996-),男,在读硕士研究生,研究方向为学科教学(物理)。

通讯作者:程敏熙(1962-),男,博士,副教授,研究方向为光电技术与系统、物理实验设计。

若小球不能做完整的圆周运动,则在脱离时刻  $N=0$ ,有临界速度为

$$v_c = \sqrt{gr \cos \theta}$$

并且可得

$$mg \cos \theta = m \frac{v_c^2}{r}$$

当  $v < v_c$  时,小球将脱离轨道作斜抛运动<sup>[2,3]</sup>; 而当  $\theta > 90^\circ$  时,小球不会脱离轨道,将沿着轨道返回.

#### 1.4 由与圆形轨道等高的位置静止释放时小球的脱离点速度

设脱离点速度为  $v$ ,静止释放高度为  $h$ ,当  $h=2r$  时,由动能定理得

$$mgr(1 - \cos \theta) = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4)$$

且有

$$mg \cos \theta = m \frac{v^2}{r} \quad (5)$$

联立式(4)、(5)可得,小球的脱离点速度为

$$v = \sqrt{\frac{2}{3}gr} \quad (6)$$

## 2 实验仪器及步骤

### 2.1 实验仪器

本实验的主要仪器有 iPad、手机支架、小米 9 智能手机、两个质量不等的小球 ( $m_1=42.2 \text{ g}$ ,  $m_2=33.2 \text{ g}$ )、自制过山车轨道模型(第一个圆的直径为 14.82 cm)、刻度尺(20.00 cm)、圆柱体重物,其中刻度尺起定标作用,圆柱体重物用于稳定装置.

### 2.2 实验步骤

#### 2.2.1 视频导入及分析

打开 iPad 上的 Video Physics 软件,点击左上方的“+”,即可当场拍摄需要分析的视频或上传已经拍摄好的视频片段,其中需要说明的是 iPad 拍摄所得视频的帧率、清晰度较低,对实验结果的误差影响较大,本实验改用具有 60 帧 4K 高清录像功能的小米 9 手机进行录像,再将视频导入 iPad 中进行处理,视频导入后会进入如图 2 所示的界面,点击上方的“Origin & Scale”,即可进行坐标轴以及标尺的设定.点击两个标尺定位圆选择画面中刻度尺的两端,然后点击并拖动原点定位圆设定坐标原点,并且

可以通过旋转来设定坐标轴的方位.

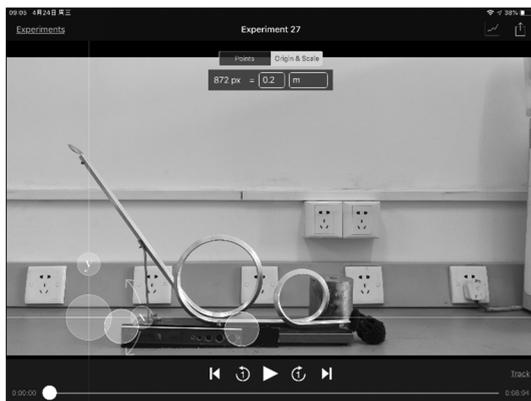


图 2 Video Physics 定标界面

设定完毕后,点击“Points”进入图 3 所示的界面,选择下方的逐帧播放按钮直到想要进行视频分析的画面,然后点击并拖动目标定位圆,使其中心与需要追踪的小球中心重合,点击“Track”便可以自动追踪小球的运动情况,由于小球的运动速度过快,需要逐次轻点目标定位圆逐帧地记录下小球的位置.

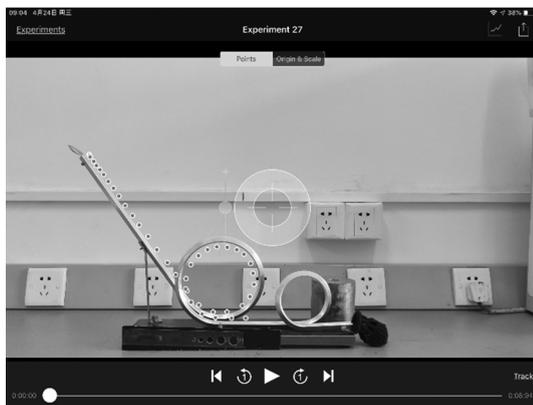


图 3 Video Physics 定点界面

#### 2.2.2 数据输出与数据分析

上述操作结束后,点击图 3 右上方的“数据输出”按钮,将数据文件以 .amb1 格式输出并导入与 Video Physics 软件配对的数据分析软件 Vernier Graphical Analysis 4 中,点击右上角的视图选项可以切换成多图界面,表格界面、图表并存界面,点击  $x$  轴坐标选项或者  $y$  轴坐标选项可以更改坐标轴从而得到不同的图像.点击视图选项切换至表格界面,点击最右一列的“...”选项,添加合速度的新计算栏,名称为“ $v$ ”,单位为“m/s”,精度保留 4 位小数,插入相应表达式之后点击应用,则可以得到合速度

的数据,如图4所示。

点击视图选项切换至表格界面,切换y轴坐标,即可描绘出“v-t”图像,如图5所示,可以直观显示出小球的合速度变化情况,拖动十字交叉点击曲线上的点,即可读取对应时刻的合速度大小。

时间 (s)	X (m)	Y (m)	X velocity (m/s)	Y velocity (m/s)	Manual
1	4.88	0.03	0.20	0.00	0
2	4.90	0.03	0.20	0.21	0.02
3	4.91	0.03	0.20	0.24	0.05
4	4.93	0.03	0.20	0.28	0.10
5	4.95	0.04	0.20	0.3	0.17
6	4.96	0.04	0.20	0.3	0.25
7	4.98	0.04	0.20	0.28	0.4294
8	5.00	0.05	0.27	0.30	0.5157
9	5.01	0.05	0.28	0.35	0.6064
10	5.03	0.06	0.28	0.40	0.7056
11	5.05	0.07	0.28	0.50	0.8262
12	5.06	0.08	0.27	0.56	0.9390
13	5.08	0.09	0.27	0.64	1.0520
14	5.10	0.10	0.27	0.74	1.2230
15	5.11	0.11	0.18	0.83	1.3570
16	5.13	0.13	0.17	0.85	1.3853
17	5.15	0.14	0.15	0.88	1.4560

图4 表格界面

而实验得到的最高点速度为

$$v_{\min} = 0.9297 \text{ m/s} > 0.8516 \text{ m/s}$$

能通过最高点. 实际与理论相符.

### 3.2 验证不同质量的小球从同一高度静止释放到达最低点的速度相等

将两个质量不同的小球从最高点静止释放,按前面所述视频分析步骤进行分析,得出两个小球的“v-t”图,分别读取两个小球的最高速度,即最低点速度,  $v_1 = 1.6575 \text{ m/s}$ ; 同理可得,  $v_2 = 1.6648 \text{ m/s}$ , 相对误差为0.4%, 大致可得  $v_1 = v_2$ . 因此, 可得质量不等的两个小球从同一高度静止释放, 运动到最低点的速度大致相等, 跟小球质量无关.

### 3.3 从不同高度静止释放小球会有不同的运动轨迹

选取4个不同的高度静止释放小球, 得到了图6所示的4种不同的运动轨迹, 当高度较高, 进入圆形轨道的初速度较大时, 轨迹为完整的圆, 如图6(a)所示; 当高度逐渐降低, 初速度减小时, 小球只能做部分的圆周运动, 到达某一高度后会脱离轨道斜抛出去, 且初速度越小, 抛出点越低, 如图6(b)、(c)所示; 当高度降低至某一程度, 小球不能到达半径为R的高度, 沿着轨道返回, 如图6(d)所示.

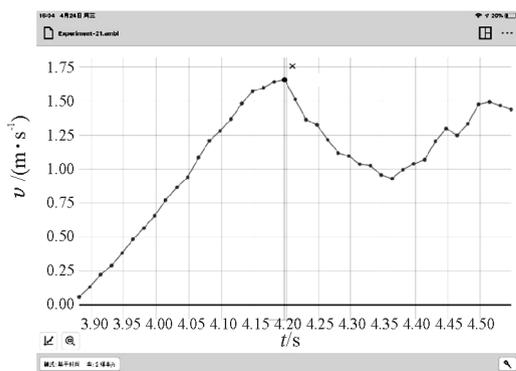


图5 合速度与时间的关系

## 3 实验验证

### 3.1 计算小球在圆形轨道上运动时的向心力与角速度

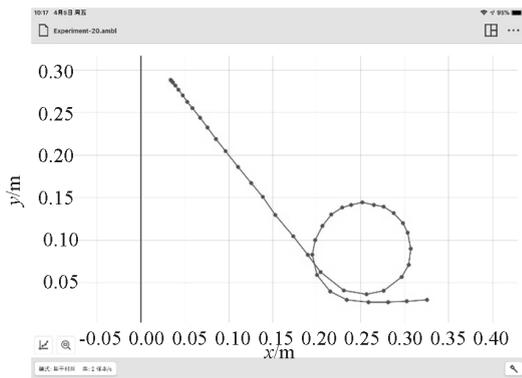
利用软件的数据读取功能, 读取最低点和最高点对应的速度分别为  $v_{\max} = 1.6575 \text{ m/s}$ ,  $v_{\min} = 0.9297 \text{ m/s}$ , 代入式(1)、(2), 其中小球质量为  $42.2 \text{ g}$ ,  $r = 0.0741 \text{ m}$ , 可得表1.

表1 小球达到最高点、最低点时的向心力和角速度

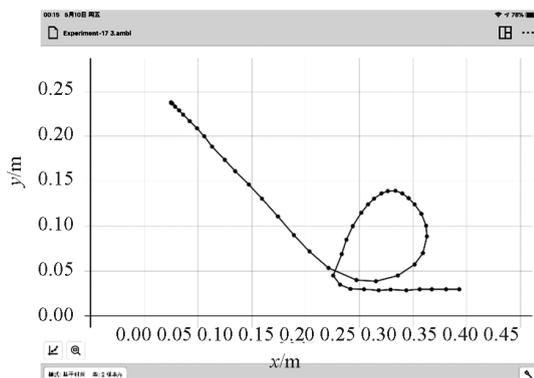
位置	$v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$F_{\text{向}} / \text{N}$	$\omega / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$
最低点	1.6575	1.5646	22.3684
最高点	0.9297	0.4922	12.5466

计算得出恰能通过最高点的临界速度为

$$\sqrt{gr} = 0.8516 \text{ m/s}$$



(a)  $h = 0.2900 \text{ m}$



(b)  $h = 0.2400 \text{ m}$

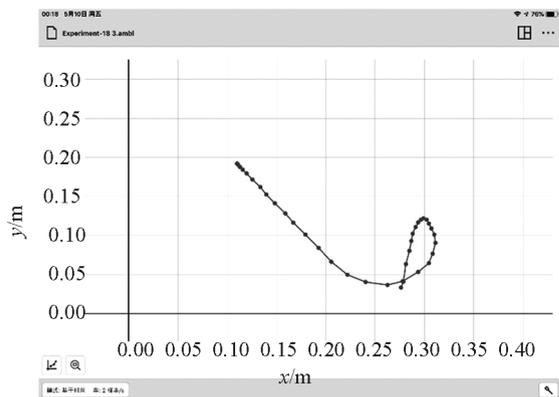
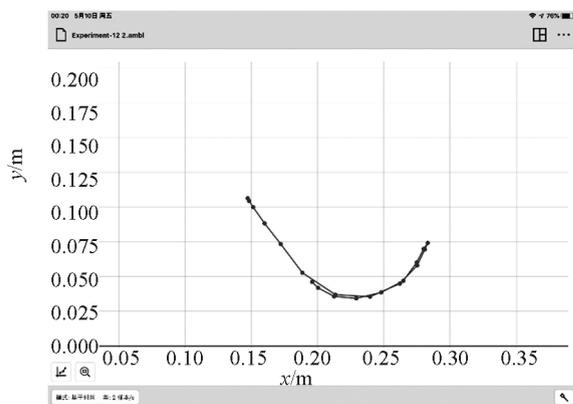
(c)  $h = 0.190\ 0\ \text{m}$ (d)  $h = 0.110\ 0\ \text{m}$ 

图6 不同高度静止释放小球的运动轨迹图像

为了进一步验证小球脱离轨道做斜抛运动时式

$$mg \cos \theta = m \frac{v_c^2}{r}$$

是否成立,分别选取两个不同的高度静止释放小球,其中  $h_1 > h_2$ 。根据小球脱离轨道做斜抛运动过程中水平速度  $v_x$  不变,我们将水平速度  $v_x$  开始保持不变的时刻定为脱离时刻,由此得到小球的精确脱离位置。

通过 Vernier Graphical Analysis 4 软件分析,得到如表 2 所示的两种不同静止释放高度下小球脱离轨道时刻对应  $v_x, v, \cos \theta, mg \cos \theta, m \frac{v^2}{r}$ , 其中

$$\cos \theta = \frac{v_x}{v}, m = 42.2\ \text{g}, g = 9.788\ \text{m/s}^2 (\text{广州地区}).$$

表 2 不同高度静止释放时小球脱离时刻对应的物理量

$h$	$v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\cos \theta$	$mg \cos \theta / \text{N}$	$\frac{mv^2}{r} / \text{N}$	$\eta / \%$
$h_1$	0.767 4	0.810 5	0.335 4	0.334 8	0.2
$h_2$	0.624 7	0.540 3	0.222 2	0.2232	0.5

从表 2 中可知,  $mg \cos \theta$  与  $m \frac{v^2}{r}$  大致相等,理论

与实际大致相符。

### 3.4 计算与圆形轨道等高位置静止释放时小球的脱离点速度

将小球从与圆形轨道等高的位置静止释放,根据前面所述的实验步骤,同理可得小球的脱离点速度为  $v_c = 0.704\ 5\ \text{m/s}$ ,并与通过式(6)计算的理论值  $0.694\ 9\ \text{m/s}$  作比较,相对误差为  $1.4\%$ ,大致相等。

## 4 小结

Video Physics 是一款具有追踪目标物体,可以实时显示目标物体位置,记录物体的速度,描绘物体运动图像等功能的智能手机 App。本实验用该 App 研究了在竖直平面内的圆周运动,定量地分析了不同质量小球在同一高度静止释放到达圆形轨道最低点的速度关系和小球从不同高度静止释放过程中的速度与运动轨迹的关系,并计算出小球在圆形轨道上运动时的向心力、角速度,以及小球从与圆形轨道等高位置静止释放时小球的脱离点速度。

运用 Video Physics App 可以使小球在竖直平面内的运动情况更加直观地呈现给学生,为课堂教学带来了便利,加上智能手机便于携带、使用率高的优势,如果将该 App 灵活运用到课堂教学中,有利于培养学生的科学思维和科学探究能力,激发学生的学习热情和兴趣,从而助力于培养学生的物理学科核心素养。

## 参考文献

- 周勇,郑丹. 运用智能手机探究物体的运动规律[J]. 物理教学,2019,41(01):77 ~ 78
- 陈玺君. 竖直平面内“轻绳模型”的运动规律研究[J]. 物理通报,2018(01):48 ~ 52
- 尚金红,董国武. 竖直平面内圆周运动的轨道脱离问题[J]. 物理通报,2014(S2):60 ~ 62
- 李宁,丁庆红,肖伟华. 一个竖直面轻绳模型圆周运动问题的深入分析[J]. 物理教师,2019,40(05):89 ~ 91
- 曾蓓,程敏熙. 利用 Tracker 软件研究自由落体运动教学及不同小球的下落与弹跳过程[J]. 物理教师,2018,39(12):75 ~ 78
- 张振. 巧用智能手机做物理实验[J]. 物理通报,2013(11):72 ~ 75
- Loo Kang Wee, Kim Kia Tan, Tze Kwang Leong and Ching Tan. Using Tracker to understand ‘toss up’ and free fall motion: a case study[J]. Physics Education,

2015(04),50

8 Pablo Aguilar Marín, Mario Chavez Bacilio and Segundo Jáuregui Rosas. Using analog instruments in Tracker

video based experiments to understand the phenomena of electricity and magnetism in physics education[J]. European Journal of Physics, 2018(03),39

## Research Circular Motion in Vertical Plane Using Smartphone App Video Physics

Li Yuntian Cheng Minxi

(School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006)

**Abstract:** The circular motion in a vertical plane of the ball was tracked by a smartphone App "Video Physics". The velocity at the lowest point of the balls of different masses and the relationship between the velocity and the path in different height were obtained. Moreover, the centripetal force, angular velocity of the ball in the circular orbit and the detached point when the ball was released at the same height as the circular orbit was calculated.

**Key words:** smartphone; video physics; video analysis; circular motion in a vertical plane

(上接第 93 页)

中,当小球落下,阻挡上面的红色激光束时,光线受阻,此时自动计时开始,到小球下落到阻挡下面的红色激光束时,计时停止.光电计时器通过光电传感器测得的小球下落距离和激光器测得的时间,直接输出小球全程的下落速度.再设定上、下两个激光发射器的高度差为半程距离,同上方法测出小球半程的下落速度.比较判断小球下落是否为匀速.

#### 4 结束语

改进的粘滞系数测定仪装置,用光电传感器能

够准确记录小球整个匀速下落过程中的距离和时间,通过光电计时器直接转换为速度,学生通过操作可直接分析实验误差.

其显著效果在于:测量调节更精准,计算更精确、便捷,从而提高实验教学效率.

#### 参考文献

- 1 李书光,胡青松,令坦.学物理实验[M].北京:清华大学出版社,2008.130~131
- 2 陶红艳,余成波.传感器与现代检测技术[M].北京:清华大学出版社,2009.85~86

## Improvement on Viscosity Coefficient Measuring Instrument by Falling Ball Method

Du Ning Zhang Xuan

(Basic Teaching Department of Tangshan University, Tangshan, Hebei 063000)

**Abstract:** In order to solve many defects such as low adjustment accuracy and trivial measurement calculation in the use of the falling ball viscosity coefficient tester for teaching, we have improved the tester device. By adding a photoelectric sensor and a photoelectric timer, it makes it easier to accurately adjust and measure to improve the efficiency of experimental teaching.

**Key words:** viscosity coefficient; photoelectric sensor; photoelectric timer