

文章编号:1005-4642(2021)10-0029-04

## 利用视频追踪法测量运动的加速度

赵 霞,张增明

(中国科学技术大学 物理学院,安徽 合肥 230026)

**摘 要:**在居家环境中通过容易置备的器材搭建斜面,将普通 5 号电池作为待测对象,研究其在斜面上从静止开始的匀变速运动过程.通过手机拍摄视频,结合视频追踪软件 Tracker,拟合二次函数得到电池在不同斜面上运动的加速度值,并讨论斜面能够实现纯滚动的条件.构造对称斜面研究了电池沿上、下不同方向运动的加速度及能量损失特点.总结了居家实验课程的线上教学模式以及实验教学效果.

**关键词:**加速度;视频追踪法;居家实验;Tracker

**中图分类号:**O311

**文献标识码:**A

**DOI:**10.19655/j.cnki.1005-4642.2021.10.005

大学物理基础实验通常是指在实验室环境下采用专业的实验仪器完成相关实验内容的课程.疫情期间,在通过实验室完成实验较为困难的情况下,本着停课不停学,各高校积极开展线上教学<sup>[1-4]</sup>,利用居家条件指导学生开展各项物理实验.在非实验室环境下,力学实验比较容易完成.大学物理实验中,研究物体沿斜面运动的实验通常在气垫导轨上进行.本文选用常见的居家用品搭建实验装置,利用手机拍摄和视频追踪软件 Tracker<sup>[5]</sup>,研究了物体沿斜面的下滑过程,通过数据拟合,获得了物体运动的加速度,并讨论了物体下滑过程中纯滚动与滑动的临界条件.

### 1 实验原理和装置

#### 1.1 实验原理

伽利略指出,物体沿斜面运动与物体垂直下落的运动(自由落体)具有相似的特征.所以居家情况下,学生可以利用带有标准刻度的直尺垫在具有一定厚度的支撑物上构造斜面,并选择圆柱形或球形物体沿斜面滚下,从而构成简易的匀加速运动系统,如图 1 所示.若要获得物体的运动速度或加速度,需要知道该物体的运动时间和位移的关系.由于物体下滑的过程很快,所以在实验室里通常采用光电门获得其速度和加速度.

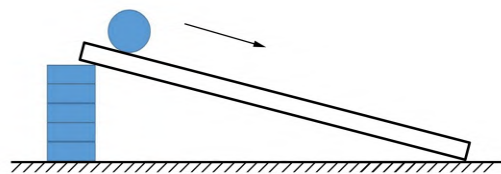


图 1 简易的匀加速运动系统

在非实验室的情况下,如何获得具体的时间和相应位移成为了该实验的难点.如前所述,居家环境下,直尺构造的斜面比较短,所以物体下滑的时间只有  $1 \sim 2$  s,即使使用手机中精度为  $0.01$  s 的秒表,也难以实现精确计时,因此时间误差非常大.但如果用手机拍摄物体的整个运动过程,再用特定的拆帧软件把视频逐帧地截图,这样就可以把视频拆分成图片.对于普通的智能手机,帧率能达到  $30 \text{ s}^{-1}$ ,也就是  $1$  s 的视频可以被拆成  $30$  张图,这样每张图对应的时间就可以得到:第 1 张图相当于  $0.033$  s 对应的位置,第 2 张图为  $0.066$  s,第 3 张图为  $0.099$  s,以此类推,这样就相当于获得了精度为  $0.033$  s 的计时器.如果在智能手机的正常拍摄模式下再结合慢动作的功能,比如  $4$  倍速拍摄模式,手机能达到  $120 \text{ s}^{-1}$  的分辨能力.

“第 11 届全国高等学校物理实验教学研讨会”论文

收稿日期:2021-07-09

作者简介:赵 霞(1973—),女,四川阆中人,中国科学技术大学物理学院副教授,博士,从事凝聚态物理研究. E-mail: xiazha@ustc.edu.cn



以华为 p30 手机为例,其慢动作能到 32 倍,相当于可以获得  $960\text{ s}^{-1}$  的帧率,即  $0.001\text{ s}$  精度的计时工具.而最近新上市的华为手机,更是能获得  $7\,680\text{ s}^{-1}$  的超高帧率.由此,拍摄视频后再结合视频拆帧软件,找到物体上某一特征位置到达某一刻度的帧,即可找到对应的时间,再根据标尺准确地读出其位置坐标,这样就可以获得物体在匀加速运动过程中的时间和位置的对应关系.再利用数值处理软件对其进行二次函数拟合,即可求得物体在斜面上运动的加速度.

引导学生学习、利用视频拆帧软件 Tracker 及数据处理软件对视频和数据进行分析,即可成功获得所需的物理量.

## 1.2 实验装置

实验器材主要由手机、手机支架、直尺、一元硬币若干、5 号电池等组成,如图 2 所示.

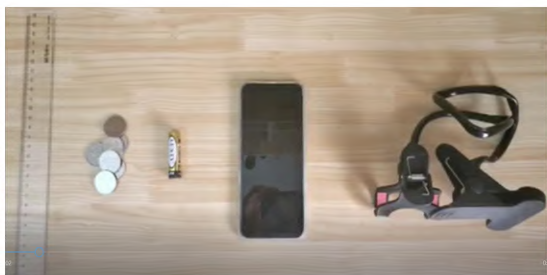


图 2 构成斜面运动的居家实验器材

## 1.3 软件

Tracker 软件是一款建立在 Java 代码库的物理影像分析和建模工具.通过该软件,可以直接将视频收集的空间数据转换到软件上显示.在定制时空坐标系统的基础上,通过追踪运动轨迹将视频的画面生成可以编辑的二维图.该软件内置了丰富的数据绘图工具、实验原理分析工具和函数建模工具,对二维运动、抛物线运动、二维碰撞等运动的视频均可进行实时质点追踪,记录位移、速度、加速度等数据.

## 2 实验步骤与内容

1) 用累计放大法选用直尺测量  $n$  枚硬币的总厚度,可以获得单枚硬币的厚度;

2) 将直尺零刻度线与硬币边缘对齐构造斜面,通过改变叠放的硬币数量,设置不同的斜面角

度,使待测电池从零刻度线位置沿斜面向下运动,并利用手机拍摄视频(推荐使用慢动作).实验中取 5 种不同的斜面倾角.拍摄中注意使手机与水平面尽可能平行.

3) 将视频文件导入电脑,利用 Tracker 软件追踪视频,分解拆帧,获得位移-时间对应关系,用数据处理软件进行二次函数拟合求出物体的加速度,并进行误差分析.

以上实验内容可作为基础实验部分对学生进行要求.

4) 假设重力加速度为  $g$ ,斜面倾角为  $\theta$ ,由于电池为滚动,根据纯滚动时摩擦系数的条件,用实验检验以上运动是否为纯滚动,并且解释相关的现象.

此部分内容可以作为提高实验部分对学生进行要求.

5) 用 2 把尺子构成 1 个对称斜面,使斜面的底边紧贴,在交界处用胶带粘住,防止 2 个尺子位置发生变化,测量电池在这种斜面运动的加速度并分析运动特点.

此部分内容可作为进阶实验部分对学生进行要求.

## 3 数据处理与分析

### 3.1 基础实验部分

利用累计放大法,采用精度为  $0.1\text{ cm}$  的直尺测得 10 枚硬币的厚度为  $1.88\text{ cm}$ ,因此每枚硬币的厚度为  $0.188\text{ cm}$ .斜面长度固定为  $15.50\text{ cm}$ .假设垫入  $n$  枚硬币,则对应的斜面倾角  $\theta = \arcsin\left(\frac{0.188n}{15.50}\right)$ .

本实验分别选取硬币数  $n=3,5,7,9,10$ .用前述的视频追踪法,让电池从直尺的零刻度以初速度为 0 向下滚动,拍摄视频并用 Tracker 软件拆帧,用二次函数拟合  $x-t$  关系.

图 3 所示为  $n=3$  的拟合追踪曲线,拟合函数为

$$x=0.072\,67t^2+0.028\,57t+0.001\,555,$$

由此可以得到此倾角下,电池运动的加速度  $a=0.145\,3\text{ m/s}^2$ .

5 种不同斜面倾角下测量出的加速度如表 1 所示.

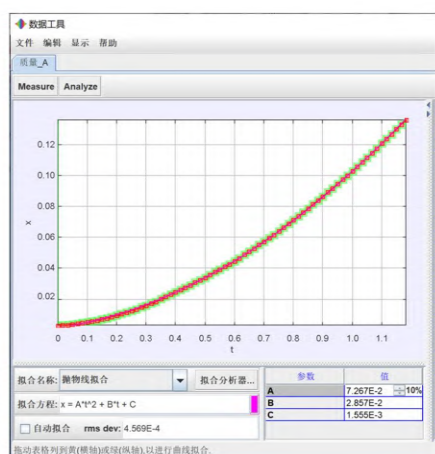
图 3 用 Tracker 软件分析  $n=3$  的斜面运动截图

表 1 电池在 5 种不同倾角斜面运动的加速度

$n$	$\theta/(^{\circ})$	$a_{\text{测}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	$a_c/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	$E_r$
3	2.085	0.145 3	0.237 6	38.9%
5	3.477	0.304 6	0.396 0	23.1%
7	4.870	0.407 6	0.554 4	26.5%
9	6.267	0.554 8	0.712 8	22.2%
10	6.967	0.641 2	0.792 0	19.0%

### 3.2 提高实验部分

若测量待测电池在纯滚动状态下的加速度,设重力加速度为  $g$ ,斜面倾角为  $\theta$ ,斜面摩擦系数为  $\mu$ ,如果将电池视为实心均匀圆柱体,质量为  $m$ ,半径为  $R$ ,则其转动惯量为

$$J = \frac{1}{2} mR^2, \quad (1)$$

以圆柱体圆心为参考点,由转动定律有

$$fR = J\beta, \quad (2)$$

若物体做纯滚动,应满足:

$$a_c = R\beta, \quad (3)$$

联立上式可得

$$a_c = \frac{2}{3} g \sin \theta. \quad (4)$$

表 1 中给出了各种斜面倾角下满足纯滚动条件的加速度的理论值  $a_c$ ,可以看出实验测得的加速度与理想纯滚动的加速度相差较大.若要满足纯滚动运动,在斜面上,由沿斜面与垂直斜面的受力分析有:

$$mg \sin \theta - f = ma_c, \quad (5)$$

$$N = mg \cos \theta, \quad (6)$$

$$f = \mu N, \quad (7)$$

由此可得,满足纯滚动条件的斜面最小摩擦系数应满足条件

$$\mu_{\min} \geq \frac{1}{3} \tan \theta. \quad (8)$$

如图 4 所示,在电池做理想纯滚动时,其所受重力  $G$  的分力与运动方向一致,故受到向后的静摩擦力,使柱体保持纯滚动状态.但由于实验所用的电池内部存在一定液体且质量分布不均匀,电池存在一定的范性形变,因此只能近似当作刚体.另外,直尺表面的刻度凸起以及电池侧壁的棱在与斜面接触时均会增加运动中的摩擦,故支持力与摩擦力的合力与重力形成 1 对力偶,柱体角加速度减小,产生了使质心加速度减小的滑动摩擦力,其中

$$f = \mu mg \cos \theta, \quad (9)$$

$$\mu = \frac{\frac{2}{3} g \sin \theta - a}{g \cos \theta}. \quad (10)$$

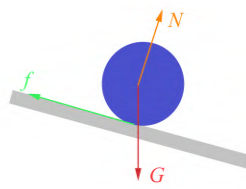


图 4 纯滚动静摩擦力的方向

由以上分析可知,增加斜面粗糙度或减小斜面倾角,均为获得纯滚动的方式.为了检验粗糙度对加速度的影响,选择 10 枚硬币的情况,在相同斜面倾角下改变斜面材质,即换用普通笔盒,将这 2 种粗糙斜面进行比较,结果如表 2 所示.

表 2 2 组实验中  $\theta, a, \mu$  的大小比较

斜面器材	$\theta/(^{\circ})$	$a/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	$\mu$
直尺	6.967	0.641 2	0.015 6
笔盒	6.967	0.572 6	0.022 6

可以看出粗糙表面上,柱体匀加速运动的加速度更小,这符合通常认知,也证实了摩擦力对此系统中柱体匀加速运动产生了影响.

### 3.3 进阶实验部分

历史上,伽利略曾经通过理想斜面实验和科学推理,得出了“力不是维持物体运动的原因”的

重要结论. 本文仍然利用直尺和硬币, 构造与著名实验类似的对称斜面, 使斜面的底边紧贴, 如图 5 所示, 测量了圆柱形物体在该斜面运动的加速度, 其中 2 个斜面均由 5 枚硬币叠成, 其倾角为  $\theta = 3.477^\circ$ .

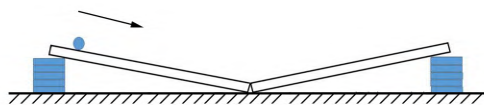


图 5 构造对称斜面

从一端释放柱体, 使用 Tracker 软件对全运动过程进行追踪, 得到如图 6 所示图像.

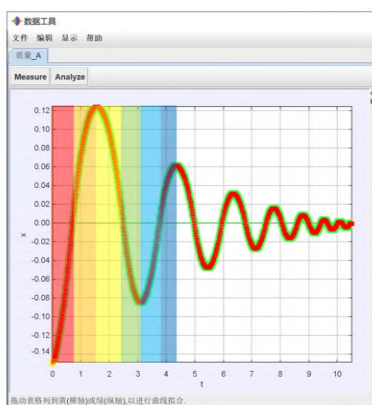


图 6 对称斜面上柱体运动的  $x-t$  截图

从追踪的  $x-t$  图像轨迹可以看出, 圆柱体在 2 个斜面上表现出加速度不断往复变化的运动, 在每个斜面上到达的最大高度  $H$  减小. 尝试对每个斜面上运动轨迹的二次函数进行拟合, 发现上行( $\uparrow$ )或下行( $\downarrow$ )运动都可以很好地进行拟合, 说明物体均在做匀变速运动, 由此得到了每个斜面上的加速度(共选取 6 段), 如表 3 所示.

表 3 对称斜面上运动的加速度、最大高度及能量损失

段数	$a_{\text{测}} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	$H/\text{m}$	$\eta$	$\eta_i / \eta_{i-1}$
1( $\downarrow$ )	0.307 4	0.151 9	100%	
2( $\uparrow$ )	0.357 6			
3( $\downarrow$ )	0.293 6	0.124 0	81.6%	81.6%
4( $\uparrow$ )	0.447 2			
5( $\downarrow$ )	0.366 6	0.083 2	54.9%	67.3%
6( $\uparrow$ )	0.367 4	0.061 3	40.4%	73.0%

由表 3 中可以看出, 不论待测物是下行还是上行, 加速度均小于理想的纯滚动加速度, 这与前

面的实验结果相符合, 表明运动中存在滑动摩擦力, 使物体做连滚带滑的运动. 拟合结果表明圆柱体上行加速度比下行时大, 这是由于沿斜面向下运动时, 阻力方向与加速度方向相反, 而沿斜面向上运动时, 阻力方向与加速度方向相同所致. 而由电池在往复运动过程中达到最大高度得到的能量变化( $\eta$ )可以看出, 由于摩擦力和空气阻力的存在, 电池上升的最大高度小于静止释放的高度, 动能在不断减小, 能量损失率大致为 30%, 直至最后停止运动.

#### 4 线上教学效果

力学实验是居家环境下最容易实现的一类实验, 所以在疫情期间, 选取本实验的学生人数最多. 当学生发现在没有气垫导轨、打点计时器等实验仪器的情况下, 也能利用手边的器材顺利地测量出加速度时, 大大提高了学生的学习兴趣. 通过线上讨论、视频答疑等形式进行交流, 有 700 多名学生充分利用居家器材, 不仅完成了各阶难度不同的实验, 还锻炼了动手能力, 并激发了学生的创造力, 也让学生学会使用视频追踪软件以及 Origin、Matlab 等数据处理软件, 激发了学生对居家实验的兴趣.

#### 5 结束语

本实验介绍了在居家环境下利用简单的器材, 结合手机和视频追踪软件测量物体匀变速运动的加速度的方法, 研究了纯滚动发生的条件, 通过构造对称斜面, 研究了运动中加速度变化的特点及能量损失情况. 实验中的误差主要来源于以下方面: 电池为非完全刚体, 电池被释放的初速度不完全为 0, 由于电池重力引起的尺面微小弯曲, 拍摄视频时手机未能完全平行于运动平面, 软件定标的误差, 等等. 利用视频追踪法进行居家实验, 具有可操作性和趣味性, 同时培养了学生的创新意识和能力.

#### 参考文献:

- [1] 张增明. 64 学时大学物理实验线上教学方案及其设计思路[J]. 物理与工程, 2020, 30(2): 7-10.
- [2] 王青. 识变、应变: 面向未来的在线大学物理教育[J]. 物理与工程, 2020, 30(2): 3-6.

(下转 49 页)



## Amplification method of ideological and political education in college physics experiment course

YE Chao

(National Physics Experimental Teaching Center, School of Physics Science and Technology,  
Soochow University, Suzhou 215006, China)

**Abstract:** College physics experiment is a basic experiment course for junior college students. Ideological and political education plays a guiding and shaping role in the follow-up experiment teaching. In the process of college physics experiment teaching, we explored the ways of ideological and political education of the course by touching the historical traces to establish the ideal responsibility, by the cultivation of basic ability to promote the cultivation of craftsmen, by the instrument development to build the cultural self-confidence, by strict management to cultivate the moral cultivation. By these ways, an amplification method was put forward that ideological and political education, which was presented by the big from the small in college physics experiment course. In addition, the requirements of ideological and political teachers, such as self-consciousness of ideological and political education, self-discipline of being a teacher and self-seeking of seeing the big from the small, were put forward.

**Key words:** ideological and political education; college physics experiment; amplification method  
[责任编辑:任德香]

(上接 32 页)

- [3] 唐艳妮,李雪琴,赵云芳,等. 疫情中的大学物理实验线上教学探索[J]. 物理实验, 2020, 40(5): 31-35.
- [4] 王旗,刘静,朱盼盼,等. 大学物理实验线上开设直

- 播课的尝试、探索与思考[J]. 物理实验, 2020, 40(5): 28-30.
- [5] Tracker 使用教程[EB/OL]. [2021-07-01]. <https://mp.weixin.qq.com/s/-a8uSKBsKjerr6jI3QmMMg>.

## Measuring the acceleration by video tracking method

ZHAO Xia, ZHANG Zeng-ming

(College of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** In the home environment, an inclined plane was built with easily prepared equipment. A common No. 5 battery was used as the test object to study its uniform variable speed movement process starting from static on the inclined plane. The acceleration values of the battery moving on different inclined planes were obtained by fitting the quadratic function with video shot by mobile phone and video tracking software Tracker. The experimental results were compared with the theory, and the conditions where the inclined planes could realize pure rolling were discussed. A symmetrical inclined plane was constructed to study the acceleration and energy loss characteristics of the battery moving in different directions. The online teaching mode and experimental teaching effect of home-based experimental course were summarized.

**Key words:** acceleration; video tracking method; home experiment; Tracker

[责任编辑:郭 伟]