

利用运动拖影测量重力加速度

——对 2020 年江苏高考物理第 11 题的思考

徐展¹ 黄治海²

(1. 常州市教育科学研究院, 江苏 常州 213016; 2. 常州市第三中学, 江苏 常州 213000)

摘要: 2020 年江苏高考物理实验题第 11 题的图中手机拍摄的运动小球清晰而不存在拖影, 此与真实情境不符, 实际上利用单帧图片中的拖影长度即可方便地测得重力加速度.

关键词: 高考物理; 重力加速度; 运动拖影; 手机

1 问题的提出

例题. (2020 年江苏高考物理第 11 题) 疫情期间“停课不停学”, 小明同学在家自主开展实验探究. 用手机拍摄物体自由下落的视频, 得到分帧图片, 利用图片中小球的位置来测量当地的重力加速度, 实验装置如图 1 所示.

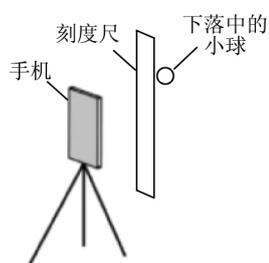


图 1

(1) 家中有乒乓球、小塑料球和小钢球, 其中最适合作为实验中下落物体的是_____.

(2) 下列主要操作步骤的正确顺序是_____. (填写各步骤前的序号)

① 把刻度尺竖直固定在墙上; ② 捏住小球, 从刻度尺旁静止释放; ③ 手机固定在三角架上, 调整好手机镜头的位置; ④ 打开手机摄像功能, 开始摄像.

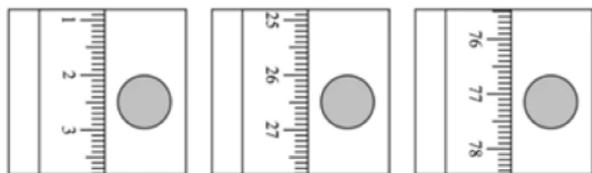


图 2

(3) 停止摄像, 从视频中截取 3 帧图片, 图片

中的小球和刻度如图 2 所示. 已知所截取的图片相邻两帧之间的时间间隔为 $\frac{1}{6}$ s, 刻度尺的分度值是 1 mm, 由此测得重力加速度为_____ m/s^2 .

(4) 在某次实验中, 小明释放小球时手稍有晃动, 视频显示小球下落时偏离了竖直方向. 从该视频中截取图片, _____ (选填“仍能”或“不能”) 用(3)问中的方法测出重力加速度.

笔者利用手机相机拍摄小钢球自由下落视频, 发现从视频截取图片中小钢球非常模糊, 考虑到手机相机拍摄视频的默认帧率为每秒 30 帧而使曝光时间较长, 因此使用相机高速拍摄功能得到每秒 120 帧模式和每秒 240 帧模式下钢球不同位置的分帧图片, 如图 3、图 4 所示. 究其原因, 曝光时间内物体会运动一定距离, 显现在画面上为运动模糊长度, 即存在运动拖影.^[1] 本文将讨论利用带运动拖影的单帧图片测量重力加速度的方法.

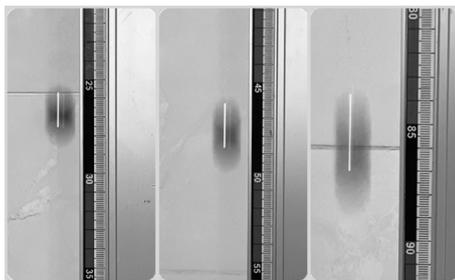


图 3 每秒 120 帧模式下钢球不同位置的分帧图片

基金项目: 本文为江苏省教育科学“十三五”规划 2020 年度课题“融创理念下的高中物理教学实践研究”的阶段研究成果[课题编号是 C-b/2020/02/05].

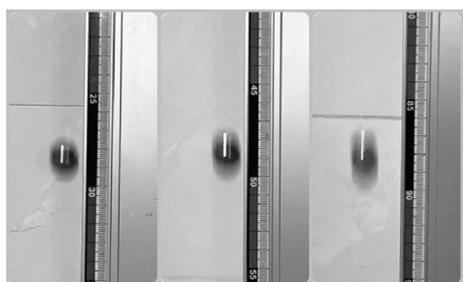


图 4 每秒 240 帧模式下钢球不同位置的分帧图片

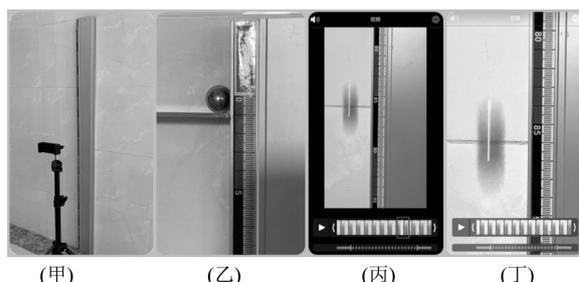


图 5 实验过程中的几个关键步骤

2 拖影法测量重力加速度

2.1 实验原理

参考人教版物理新教材必修 1 第 51 页第 4 题“估测照相机的曝光时间”处理方法,考虑到曝光时间极短,物体的平均速度近似等于瞬时速度.物体做自由落体运动,可以用速度与位移关系得到重力加速度,表达式如下:

$$g = \frac{d^2}{2h(\Delta t)^2},$$

式中 d 为物体运动的拖影长度,对照单帧画面中的标准米尺可得到; Δt 为每帧画面的曝光时间,拍摄时选用每秒 120 帧和每秒 240 帧两种模式,对应曝光时间为 $\frac{1}{120}$ s 和 $\frac{1}{240}$ s; h 为物体下落高度.

真实实验时,由于运动导致分帧图片中物体上下边缘非常模糊,因而物体运动拖影长度 d 测量困难.为此,选用钢球为下落物,同时在实验房间中只留一盏线度较小的灯,此灯在钢球上形成光点,由于曝光时间内光点随钢球一起运动而在分帧图片中形成亮线,实验中将亮线长度视作钢球的拖影长度 d .

2.2 操作步骤

根据新的实验原理,操作步骤调整为:

① 把刻度尺竖直固定在墙上,手机固定在三角架上,调整好手机镜头的位置,如图 5(甲)所示.

② 打开手机(笔者使用的是 iPhone 手机)相机,选取每秒 120 帧或每秒 240 帧的拍摄模式,开始摄像.

③ 将钢球上的亮点对齐零刻度处,同一位置由静止释放小球 3 次[用刻度尺水平托住钢球,快速将刻度尺水平抽出,可确保钢球静止下落,如图 5(乙)所示],手机在上中下 3 个不同高度拍摄钢球下落视频.

④ 停止摄像,逐帧播放视频,如图 5(丙)线框所示,每段视频选择 2 张单帧图片.

⑤ 放大单帧图片,如图 5(丁)所示,读出亮线上下边沿对应的刻度 h_1 、 h_2 ,作差可得到运动拖影长度 d ,下落高度统一取亮线上边沿对应的刻度 h_1 .将每个视频对应的数据记录在设计好的表格中,计算得重力加速度大小.

2.3 数据处理

实验数据如表 1、表 2 所示.

表 1 每秒 120 帧模式下拖影法测重力加速度

项目 位置	h_1 /cm	h_2 /cm	d /cm	Δt /s	$g/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
1-1	23.9	25.7	1.8	1/120	9.76
1-2	31.45	33.5	2.05	1/120	9.62
2-1	39.1	41.4	2.3	1/120	9.74
2-1	48.65	51.2	2.55	1/120	9.62
3-1	80.45	83.7	3.25	1/120	9.45
3-2	87.05	90.45	3.4	1/120	9.56
平均值					9.63

表 2 每秒 240 帧模式下拖影法测重力加速度

	h_1 /cm	h_2 /cm	d /cm	Δt /s	$g/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
1-1	27.8	28.76	0.96	1/240	9.55
1-2	36	37.1	1.1	1/240	9.68
2-1	40.5	41.65	1.15	1/240	9.40
2-2	50.2	51.5	1.3	1/240	9.70
3-1	86.7	88.4	1.7	1/240	9.60
3-2	91.8	93.55	1.75	1/240	9.61
平均值					9.59

利用手机中的指南针 APP 读出实验所在地纬度为 $31^{\circ}46'$,与人教版物理新教材必修 1 第 47 页表中上海纬度相近,因此取 g 真实值为 9.794 m/s^2 ,可见本实验误差并不大.

· 复习与考试 ·

非惯性系中简谐运动的周期求解

——基于机械能守恒的视角

杨振东

(广西师范大学物理科学与技术学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 能量法求解简谐运动的周期是物理竞赛中的常用方法, 其优势在于不依赖受力分析而通过系统的机械能守恒得到振动的圆频率与周期. 在两类特定的非惯性系中引入相应的惯性力势能, 使能量法得以沿用, 为求解非惯性系中的简谐运动周期提供了新的思路与方法.

关键词: 简谐运动; 周期; 非惯性系; 机械能守恒; 能量法

运动学规律、动力学特征及机械能守恒是探讨简谐运动的 3 个基本视角, 也是求解振动周期的 3 个典型路径. 其中, 利用机械能守恒求振动周期是物理竞赛中的典型方法(通常称能量法), 其优点在于不依赖受力分析而通过能量迅速得到简谐振动的动力学方程, 进而将体系的振动圆频率和周期表示出来.

1 能量法导出振动周期

例 1. 半径为 R 的半球形碗内壁, 一半径为 r ($r < R$) 的匀质小球做纯滚动, 往返过程中球心 C 始终在同一竖直平面内. 求其微小振动的周期.^[1]

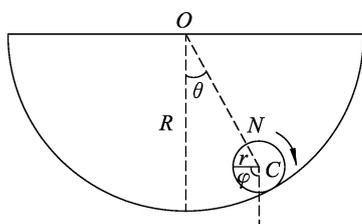


图 1 小球在碗内做纯滚动

解析: 因小球做纯滚动, 摩擦力不做功, 因此整个运动过程中系统机械能守恒, 即

$$mg(R-r)(1-\cos\theta) + \frac{1}{2}mv_c^2 + \frac{1}{2}I_C\dot{\varphi}^2 = E,$$

式中 v_c 、 I_C 分别为小球的质心速度及对质心的转动惯量, 其中 $I_C = mr^2$. 上式化简为

$$g(1-\cos\theta) + \frac{7}{10}(R-r)\dot{\theta}^2 = \frac{E}{m}.$$

两端对时间 t 求导, 整理得

$$\ddot{\theta} + \frac{5g}{7(R-r)}\sin\theta = 0.$$

在小角度近似下, 有 $\sin\theta \approx \theta$, 即 $\ddot{\theta} + \frac{5g}{7(R-r)}\theta = 0$.

对照简谐运动的动力学微分方程 $\ddot{x} + \omega^2 x = 0$

可知, 小球做简谐运动, 其圆频率 $\omega = \sqrt{\frac{5g}{7(R-r)}}$.

因而运动周期为

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{7(R-r)}{5g}}.$$

3 结束语

实践表明, 运动物体视频的分帧图片存在拖影, 且运动速度越快、曝光时间越长, 拖影越长. 利用运动拖影测速在生活实践中应用颇多, 如可基于单帧运动模糊图像计算车辆运动速度^[2]、拖影情况下快速飞行乒乓球体的实时识别与跟踪^[3]等.

随着智能手机的普及与手机摄像功能的提升, 一些运动学实验完全可以在居家环境中完成, 如人教版物理新教材必修 1 第 47 页做一做描述

的用手机传感器测自由落体加速度实验等, 就是让学生体验在真实情境中解决实际问题.

参考文献:

- 1 徐骋等. 基于成像拖尾效应的图像测速算法[J]. 上海航天, 2009, 26(4): 30-34.
- 2 章志成, 吴昊. 基于单帧运动模糊图像计算车辆运动速度的方法[J]. 鉴定实践, 2015, 78(1): 84-86.
- 3 杨华等. 拖影情况下快速飞行乒乓球体的实时识别与跟踪[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2014, 31(1): 47-51.

(收稿日期: 2020-07-13)