

PhET仿真分析物块在圆弧面和竖直面内的圆周运动

郭春羽^{1*}, 何兴伟^{2*}

¹汶上县第一中学, 山东 济宁

²丽水学院光电工程系, 浙江 丽水

收稿日期: 2025年10月22日; 录用日期: 2025年12月1日; 发布日期: 2025年12月10日

摘要

本文利用PhET仿真的能量滑板竞技场模块, 形象直观地模拟了物块沿斜面下滑并受限于半圆弧轨道在竖直面内做圆周运动, 并定量分析了物块在斜面上不同高度 h 下滑后, 其上升高度 d 与 h 的关系。结果表明, 模拟结果与理论结果高度相符, 验证了理论结果的正确性。发现当物块下滑高度 h 与圆弧轨道半径 R 之间满足关系 $h = 1.75R$ 时, 物块的落地点恰好位于半圆弧轨道的最底端。PhET仿真的应用, 不仅激发了学生的学习热情, 还会使学生发现并验证该临界条件, 帮助学生建立直观的物理情景, 教学效果良好。

关键词

PhET, 圆周运动, 斜面, 竖直面

Analysis of Circular Motion of a Block on Arc and Vertical Planes via PhET Simulation

Chunyu Guo^{1*}, Xingwei He^{2*}

¹Wenshang County No.1 Middle School, Jining Shandong

²Department of Optoelectronic Engineering, Lishui University, Lishui Zhejiang

Received: October 22, 2025; accepted: December 1, 2025; published: December 10, 2025

Abstract

This paper uses the PhET simulation's Energy Skate Park module to vividly and intuitively simulate

*通讯作者。

文章引用: 郭春羽, 何兴伟. PhET 仿真分析物块在圆弧面和竖直面内的圆周运动[J]. 创新教育研究, 2025, 13(12): 231-237. DOI: 10.12677/ces.2025.1312954

a block sliding down an inclined plane and constrained to move in circular motion along a semicircular track in a vertical plane. It quantitatively analyzes the relationship between the block's ascent height d and its sliding height h on the inclined plane. The results show that the simulation results are highly consistent with theoretical results, verifying the correctness of the theory. It was found that when the block's sliding height h and the radius R of the circular track satisfy a certain relationship, the block lands exactly at the lowest point of the semicircular track. The application of the PhET simulation not only stimulates students' enthusiasm for learning but also allows them to discover and verify this critical condition, helping students build an intuitive understanding of the physical scenario and achieving good teaching effects.

Keywords

PhET, Circular Motion, Inclined Plane, Vertical Plane

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 背景介绍

竖直面内的变速圆周运动问题一般比较复杂,它是变速圆周运动中的一个难点。一般情况下,学生对竖直面内圆周运动的物理情景的建立比较困难,进而会影响对后续问题的深入分析。本文利用了一种 PhET (Physics Education Technology) 仿真软件[1] [2]来帮助学生建立复杂运动的物理情景。该软件可以模拟物体的各种复杂运动过程,使学生形象直观地观察到物体的运动情况,从而建立起良好的物理情景,激发学生的研究兴趣,也会使教学效果得到提升。PhET 是用于教学的非盈利互动式在线仿真模拟平台,旨在引导学生从科学家的角度进行探究,其设计准则来自于对学生如何学习的研究以及对仿真程序的测试[1]-[4]。在物理教学中,若对其做一些应用和开发[5]-[10],将会收到良好的教学效果。物理过程在实际发生时的某一些物理条件是很难控制的,比如实验中的摩擦力,在实际实验操作中无法或者很难做到使其为零。而该仿真软件通过一些参数的设置就可以轻松地创造出物理条件,因此该仿真软件在这些方面存在明显的优势。本文以一种典型的斜面-竖直面内的变速圆周运动模型为例,讲解 PhET 仿真软件模拟物块运动的情况,分析物块从不同高度下滑的运动规律,并与理论结果进行对比,验证理论结果的正确性。

2. 一种典型的斜面-竖直面内的圆周运动

本文以图 1 所示的典型的竖直面内的变速圆周运动模型为例。该模型是由斜面和半圆弧面组成,斜面和圆弧面轨道处于同一竖直面内且光滑。若物块沿斜面从不同高度 h 处由静止滑下,则物块下滑后会做什么规律的运动?经分析后,可得出下面几个重要的理论结果。

物块在该轨道上运动,运动过程中只有重力做功,所以机械能守恒。根据机械能守恒定律和匀速圆周运动规律,可以分析出物块沿斜面从不同高度(h)处由静止下滑后,在半圆弧面上的运动规律、上升高度 d 与竖直面内圆弧轨道半径 R 等的关系[11],具体如下:

(1) 当 $0 < h \leq R$ 时,物块将沿着圆弧面升至最高点 A 点,见图 2,最高点不高于 1/4 圆弧处(即 B 点,当且仅当 $h = R$ 时,物块恰好达到最高点 B 点),且在最高点处速度为零。物块到达最高点之后再沿着圆弧面原路返回。整个过程中动能和势能之间相互转化,满足机械能守恒定律。可得出最高点的高度为 $d_1 = h$ 。

(2) 当 $R < h < 2.5R$ 时, 物块沿着圆弧面上升至最高点 C 点, 见图 3, 之后将脱离圆弧轨道做斜抛运动。最高点会超过 1/4 圆弧(B 点), 但不能通过圆弧最高点 D 点。在脱离轨道点 C 点, 物块受到的支持力为零 ($F_{NC} = 0$), 速度不为零。由关系 $h = \left(1 + \frac{3}{2} \sin \beta\right) R$, 可知, C 点速度为 $v_C = \sqrt{gR \sin \beta} = \sqrt{\frac{2}{3} g(h - R)}$, C 点高度为 $d_2 = R + R \sin \beta = \frac{1}{3}(R + 2h)$ 。

(3) 当 $2.5R \leq h$ 时, 物块通过圆弧最高点 D 点(见图 3)后做平抛运动。由动能定理, 物块在最高点处做平抛运动的初速度为 $v_D = \sqrt{2g(h - 2R)}$ 。假设斜面与圆弧面轨道之间有水平面足够长轨道相连, 则物块的落地点距 D 点的水平距离为 $x = 2\sqrt{2R(h - 2R)}$ 。

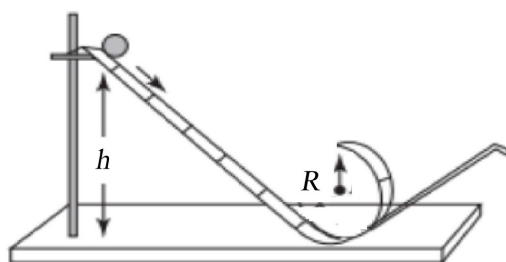


Figure 1. A typical model of circular motion in the vertical plane
图 1. 一种典型的竖直面内的圆周运动模型

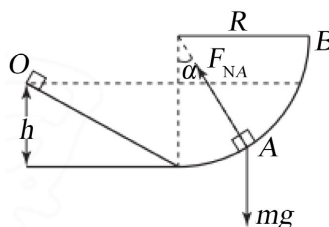


Figure 2. Motion of the block in conclusion (1)
图 2. 结论(1)中物块的运动情况

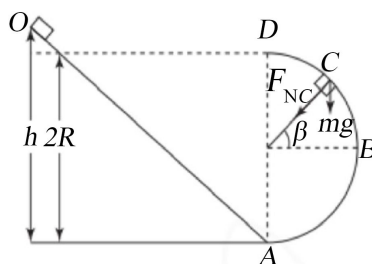


Figure 3. Motion of the block in conclusion (2)
图 3. 结论(2)中物块的运动情况

3. PhET 仿真实验及结果分析

本文采用了 PhET 软件中的能量滑板竞技场模块(如图 4 左侧所示)对上述圆周运动做了模拟实验, 并对各种理论结果做了验证。软件模块需选择与该圆周运动条件相符且计算方便的参数。方格选择大小为 $1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ 的显示栅格, 通过直尺按钮可以测量得出位移, 速度表盘显示速度。物块可以选择可脱离轨道的滑板, 运动过程中摩擦力参数设置为零。

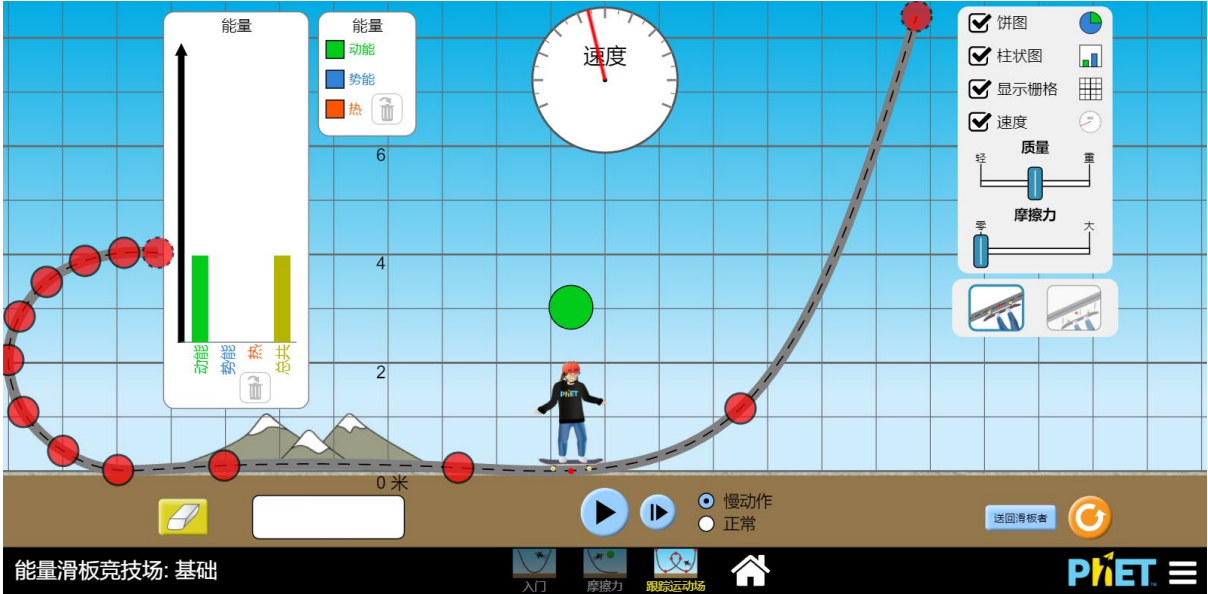


Figure 4. Energy skate park operation interface
图 4. 能量滑板竞技场操作界面

3.1. 构建仿真实验轨道

构建轨道如图 4，半圆弧半径 $R = 2.0\text{ m}$ ，水平轨道 8.0 m ，斜面高度 8.0 m 以上。在轨道上静止释放滑板，可记录其上升高度 h 和速度。

3.2. 模拟实验 1 及结果分析

将滑板从斜面高度 h ($0 < h \leq R$, $R = 2\text{ m}$) 处由静止释放，可以观察到，滑板下滑后沿半圆弧轨道上滑至某最高点，然后原路返回。当 h 在 $0 < h \leq R$ 范围内取不同值时，测量滑板上升的最高高度值 d_1 ，记入表 1，估算相对误差值 $\delta = \frac{|\text{实验值} - \text{理论值}|}{\text{理论值}}\%$ 。

Table 1. The maximum height d_1 reached and the corresponding relative error values δ when the skateboard slides down from rest at different ramp heights h ($0 < h \leq R$, $R = 2\text{ m}$)

表 1. 滑板在不同的斜面高度 h ($0 < h \leq R$, $R = 2\text{ m}$) 处由静止下滑时，上升的最大高度 d_1 及对应的相对误差 δ 值

斜面高度 h/m	最大高度 d_1/m		$\delta/\%$
	实验值	理论值	
1.0	1.00	1.00	0.00
1.5	1.50	1.50	0.00
2.0	2.00	2.00	0.00

由表 1，滑板在不同斜面高度处由静止下滑时，滑板沿着圆弧面最高可以上升到与出发点同一高度处，即 $d_1 = h$ 。之后，滑板沿着圆弧面返回，返回至出发点后再重复之前的运动过程，表明机械能守恒。

3.3. 模拟实验 2 及结果分析

将滑板分别从不同的斜面高度 h ($R < h < 2.5R$, $R = 2\text{ m}$) 处由静止释放。滑板下滑后沿半圆弧轨道上

升, 上升高度超过了 $1/4$ 圆弧, 但不会超过圆弧轨道最高点。滑板沿圆弧轨道上升至某点后以某一速度脱离轨道, 之后做斜抛运动。滑板刚好脱离轨道时, 测量其高度值 d_2 和脱离轨道速度值 v_c , 记入表 2 中, 计算对应的理论值和相对误差值。

Table 2. Height d_2 , speed v_c , and relative error δ of the skateboard when it leaves the track after sliding from rest at different ramp heights h . $R < h < 2.5R$, $R = 2$ m

表 2. 滑板从不同的斜面高度 h ($R < h < 2.5R$, $R = 2$ m) 处由静止下滑时, 滑板脱离轨道时的高度 d_2 、速度 v_c 、以及相对误差 δ 值

斜面高度 h/m	脱离轨道高度 d_2/m		$\delta/\%$	脱离速度 v_c (m/s)		$\delta/\%$
	实验值	理论值		实验值	理论值	
3.0	2.65	2.67	0.75	2.55	2.56	0.39
3.5	2.98	3.00	0.67	3.23	3.13	3.19
4.0	3.38	3.33	1.50	3.45	3.61	4.42

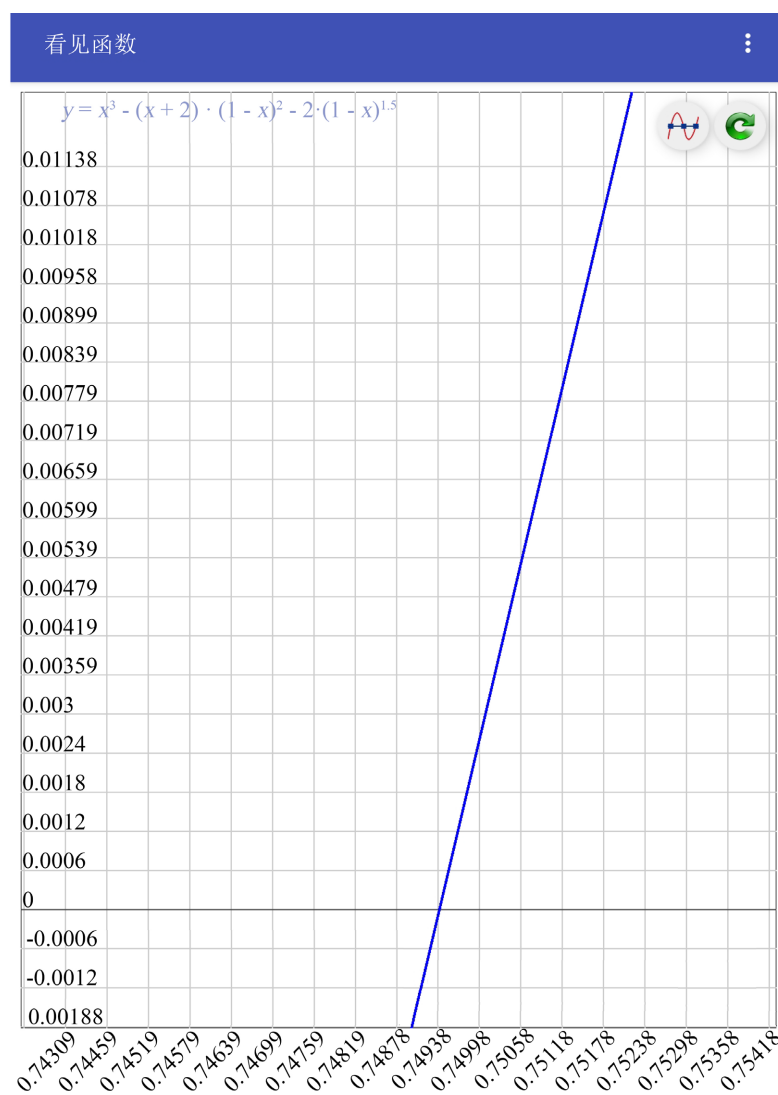


Figure 5. Function graph and solution results

图 5. 函数图像与求解结果

实验发现, 当滑板下滑高度处于 $R < h < 2.5R$ 范围时, 落地点可能在半圆弧轨道上, 也可能在水平轨道上, 当 $h = 3.5 \text{ m}$ 时, 落地点恰好在半圆弧面的最低点(图 3 A 点)。对以上临界位置我们作以下理论证明。滑板脱离轨道后, 做初速度大小为 v_c ($0 < v_c^2 < gR$), 初速度方向为与水平面呈 $\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right)$ 角度的斜抛运动。竖直方向上, 滑板做竖直上抛运动: $-d_2 = v_c \cos \beta t - \frac{1}{2}gt^2 = -(R + R \sin \beta)$ 。利用二次函数求根公式可解得:

$$t = \frac{1}{g} \left[\sqrt{gR \sin \beta} \sqrt{1 - \sin^2 \beta} + \sqrt{gR \sin \beta (1 - \sin^2 \beta) + 2g(R + R \sin \beta)} \right]$$

水平方向上, 滑板做匀速直线运动: $x = v_c \sin \beta \cdot t = R \cos \beta$ 。时间 t 代入上式, 可得:

$$R \cos \beta = \sqrt{gR \sin \beta} \sin \beta \cdot \frac{1}{g} \left[\sqrt{gR \sin \beta} \cos \beta + \sqrt{gR \sin \beta \cos^2 \beta + 2gR(1 + \sin \beta)} \right]$$

化简得: $\cos^6 \beta = (\cos^2 \beta + 2)(1 - \cos^2 \beta)^2 + 2(1 - \cos^2 \beta)^{\frac{3}{2}}$ 。

令 $x = \cos^2 \beta \in [0, 1]$, 上式变形为: $f(x) = x^3 - (x + 2)(1 - x)^2 - 2(1 - x)^{\frac{3}{2}}$ 。利用看见函数手机 app, 得到图像如图 5。

当 $f(x) = 0$ 时, 解函数可得, $x = \cos^2 \beta = 0.74938$ 。进而根据 $\sin \beta = \sqrt{1 - \cos^2 \beta} = \frac{2}{3} \left(\frac{h}{R} - 1 \right)$, 最终求得 $\frac{h}{R} = 1.75025 \approx 1.75$ 。即当 $h \approx 1.75R = 3.50 \text{ m}$, 滑板恰好能够经过圆弧面最低点。继而可知, 当 $R < h < 1.75R$ 时, 滑板脱离圆弧面后, 最终落在圆弧面上; 当 $1.75R < h < 2.50R$ 时, 滑板脱离圆弧面后, 最终落在水平面上。

3.4. 模拟实验 3 及结果分析

Table 3. The speed v_d of the skateboard when it leaves the track, the horizontal distance x between the landing point of the skateboard and the highest point of the circular track, and the relative error values when the skateboard slides down from rest at different ramp heights h , $h \geq 2.5R$, $R = 2 \text{ m}$

表 3. 滑板从不同的斜面高度 h ($h \geq 2.5R$, $R = 2 \text{ m}$) 处由静止下滑时, 滑板脱离轨道时的速度 v_d 、滑板落地点与圆弧轨道最高点之间的水平距离 x , 以及相对误差 δ 值

斜面高度 h/m	水平距离 x/m		$\delta / \%$	最高点速度 v_d (m/s)		$\delta / \%$
	实验值	理论值		实验值	理论值	
5.0	3.99	4.00	0.25	4.50	4.43	1.58
6.0	5.75	5.66	1.59	6.15	6.26	1.75
8.0	8.00	8.00	0	8.88	8.85	0.34

将滑板分别从不同的斜面高度 h ($h \geq 2.5R$, $R = 2 \text{ m}$) 处由静止释放。可观察到, 滑板沿半圆轨道可上升至其最高点, 之后做平抛运动。测量滑板脱离轨道时的速度 v_d , 滑板做平抛运动后落地点与圆弧轨道最高点之间的水平距离 x , 记入表 3, 计算理论值和相对误差值。

实验与理论表明, 仿真实验很准确地演示了以上变速圆周运动的物理过程, 验证了理论结果的正确性。由模拟实验 2 可知, 从该模拟实验中发现滑块落地点的临界位置。PhET 仿真软件形象、直观地呈现出物理过程, 帮助学生建立起深刻的物理情景, 发现该临界条件。

4. 结论

本文通过 PhET 的能量滑板竞技场模块, 模拟竖直面内的圆周运动, 形象、直观地展示了物体从不同高度处由静止下滑时不同的物理情景, 可以激发学生学习、探究物理问题的兴趣, 帮助建立深刻的物理情景, 提升教学效果。当滑板下滑高度 h 与圆弧轨道半径 R 之间满足关系 $h=1.75R$ 时, 滑板会脱离圆弧面做斜抛运动, 且落地点恰好为圆弧面最低点。

仿真实验中的运动轨道图采用手动绘制, 高度和速度读数存在误差。为减少误差, 可以基于 PhET 的程序开发功能, 构造精确半径的圆弧和斜面, 跟踪显示质点的高度、速度等物理量, 改进之后的方法会使得操作更方便。当需要考虑摩擦力时, 该仿真没有定量的数据, 无法计算脱离速度, 具有局限性。可以定性的判断出, 存在摩擦力, 由于能量损失, 在相同角度 θ 处, 速度更小, 超过四分之一圆弧, 物体脱离的位置比光滑时要提前。动态仿真效果可参见附录视频。

参考文献

- [1] https://phet.colorado.edu/zh_CN/simulations/filter?type=html.prototype
- [2] https://phet.colorado.edu/zh_CN/simulations/energy-skate-park-basics/about
- [3] 韩薇. PhET 仿真实验辅助高中物理建模教学的案例研究[D]: [硕士学位论文]. 银川: 宁夏大学, 2021.
- [4] 梁广星. 探究 PhET 仿真实验在物理实验教学中的应用[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广州大学, 2019.
- [5] 夏敏. 互动式教学主体的 PhET 计划在物理教学中的应用[J]. 物理通报, 2014(10): 5-8.
- [6] 徐果. PHET 仿真实验与物理课堂的融合初探[J]. 国际教育论坛, 2020, 2(12): 64-65.
- [7] 肖美霖. PhET 互动仿真实验软件与科学实验教学[J]. 中国信息技术教育, 2010(11): 81.
- [8] 张秀英. 关于 PHET 互动式仿真模拟实验的应用研究[J]. 山西教育(教学), 2015(1): 46-47.
- [9] 魏亚军. 基于 PhET 的“双星与多星系统”创新教学设计[J]. 物理教学, 2018, 40(1): 16-18, 28.
- [10] 韩薇, 杨晓梅. PhET 互动仿真模型平台在高中物理建模教学中的应用[J]. 物理教学探讨, 2020, 38(3): 67-69, 72.
- [11] 何思维. 对“竖直面圆周运动”的再认识[J]. 高中数理化, 2021(17): 39-41.

附录

动态演示效果可参阅本文的仿真视频文件《高中物理 0013 PhET 仿真对斜面 - 竖直面内圆周运动问题的分析.mp4》(链接: https://pan.baidu.com/s/1muN-V59i6_yUjb6CeU_DEg 提取码: fzs2)。