基于 AI 交互模拟的“万有引力定律”可视化教学实践

邹伟江，曲晓英
贵州民族大学，贵州 贵阳 550025

DOI: 10.61369/ETR.2026270028

摘　　要： 万有引力定律抽象且难以直观感知，是大学物理教学的难点。传统以理论讲授为主的模式缺乏交互性与个性化引导。本研究以认知负荷理论与双编码理论为指导，借助 PhET 模拟平台与 AI 编程工具，设计“参数驱动—探究发现—规律验证”三阶段可视化教学方案。学生通过实时调整质量与距离参数，自主发现引力与质量、距离的定量关系。实践表明该方案能有效激发探究兴趣，为抽象概念的可视化教学提供可迁移的实践路径。

关 键 词： AI 交互式模拟；万有引力定律；可视化教学；认知负荷理论；PhET

Visual Teaching Practice of the "Law of Universal Gravitation" Based on AI Interactive Simulation

Zou Weijiang, Qu Xiaoying
College of Sicence, Guizhou Minzu University, Guiyang, Guizhou 550025

Abstract: The Law of Universal Gravitation is abstract and difficult to perceive intuitively, posing a challenge in university physics teaching. Traditional lecture-based instruction lacks interactivity and personalized guidance. Guided by Cognitive Load Theory and Dual Coding Theory, this study designs a three-stage visualization teaching approach—"parameter-driven, inquiry-based discovery, and law validation"—using the PhET simulation platform and AI programming tools. By adjusting mass and distance parameters in real time, students independently discover the quantitative relationship between gravitational force, mass, and distance. Practice shows that this approach effectively stimulates inquiry interest and provides a transferable practical pathway for visualizing abstract concepts in physics.

Keywords: AI interactive simulation ; law of universal gravitation ; visualization teaching ; cognitive load theory ; PhET

引言

新工科建设背景下，大学物理教学愈发强调“以学生为中心”的教学理念，注重学生的物理核心素养与创新思维培养。万有引力定律以简洁的数学公式$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$概括了宇宙中一切物体之间的相互作用规律。然而，引力场不可见、比例关系偏离日常经验，成为教学难点。学生往往停留在机械记忆层面，难以建立起“质量→引力→加速度→轨道”的完整因果链条。

当前万有引力定律教学中，普遍存在三大痛点：知识抽象化：天体运动、引力相互作用等无法通过实物实验演示，仅依靠静态图片、文字讲解，学生难以建立直观认知；教学模式单一：以教师推导讲授为主，学生缺乏自主探究空间；学情适配不足：无法针对不同学生的知识薄弱点提供个性化指导。学生在万有引力定律的学习中往往面临“现象模糊”与“理解障碍”的双重难题。他们知道公式的形态，却不理解为什么距离的影响如此显著；他们能背诵“平方反比”的概念，却难以内化为直观的物理直觉。

近年来，AI交互式模拟技术借助实时物理引擎与智能交互算法，可将抽象原理转化为动态可视化，形成“会动的数字黑板书”[1]。参数驱动型的交互式模拟允许学生通过拖拽滑块、调整变量等操作，实时观察物理量的变化规律[2]。这种“所见即所得”的因果反馈机制，使学生在主动探索中建构知识，而非被动接受结论。已有研究表明，AI 可视化工具能有效构建多参数动态物理过程[3]，并为思维建模与个性化训练提供可能[4]，为物理教学的智能化转型提供了有益借鉴。

基于此，本研究聚焦“万有引力定律”的教学难点，提出以下核心问题：如何设计基于 AI 交互模拟的万有引力定律可视化教学方案？该方案在降低认知负荷、提升学生概念理解方面效果如何？

一、理论框架与设计原则

（一）认知负荷理论

认知负荷理论 (Cognitive Load Theory，CLT) 指出，工作记忆容量有限，当信息呈现方式使学习者在处理信息时产生过高的认知负荷时，学习效果便会受到抑制[5]。认知负荷分为三种类型：内在认知负荷（由学习材料本身的复杂性决定）、外在认知负荷（由不恰当的信息呈现方式引起）和关联认知负荷（促进图式建构

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

的认知加工）。万有引力定律的平方反比关系涉及变量间的非线性相互作用，其内在认知负荷天然较高。如果教学信息同时以多种低效方式呈现（如冗长的文字说明搭配复杂的静态图示），将进一步加剧外在认知负荷，挤占已有限的认知资源，阻碍学生进行深层的概念理解。

AI 交互式模拟的教学价值恰恰在于降低外在认知负荷。它通过动态可视化的方式，将抽象的数学关系转化为直观的图像变化，使学生无需在大脑中费力“翻译”公式含义，从而将更多认知资源释放出来，专注于因果关系的推理与规律的内在建构。

（二）双编码理论

双编码理论 (Dual Coding Theory，DCT) 由 Paivio 提出，强调人类的信息加工存在两个相对独立但又相互联系的通道，分别是言语通道和视觉通道[6]。当信息同时以言语和视觉两种形式呈现时，学习者能够在两个通道之间建立参照性联系，形成更为稳固和多元的表征。已有可视化教学研究借鉴该理论，提出可视化教学应遵循问题导向原则、信息组块原则、双通道原则、动态研究原则和学生主体原则[7]。

在万有引力定律的 AI 交互式模拟教学中，AI 工具同时提供了公式的数值呈现（言语通道）和轨道运动、引力矢量变化的动态演示（视觉通道），实现了多通道协同编码。学生在拖拽滑块改变质量或距离时，既能观察到引力数值的实时更新，又能看到天体轨道或引力矢量图的同步变化，两种信息通道相互印证、互为补充，大大增强了知识表征的稳固性。

（三）设计原则

基于上述理论框架，本研究确立以下四项教学设计原则：参数驱动原则：学生自主操控变量，主动建构规律；双通道协同原则：数值与动画并行呈现；渐进探究原则：从单一变量到双变量联动，再到综合应用，认知逐级进阶；思维外显原则：鼓励“假设—验证—修正”的认知循环，使推理过程可见。

二、AI 可视化教学设计

（一）教学工具选择

本研究选用两类 AI 可视化工具。PhET 交互式模拟平台（核心工具）由美国科罗拉多大学博尔德分校创立，是一个免费在线的数学、物理、化学、生物、地球科学模拟程序，目前已被全球用户使用18亿次[2]。该平台的核心特点在于高度互动性：其“Gravity Force Lab”模块专门用于探究万有引力定律，允许学生独立调节两个天体的质量和间距，并实时显示引力的大小与方向，实时观察结果和反馈，从而直观理解科学原理[2]。AI 编程辅助工具（补充手段），采用 Kimi K2模型生成 HTML 格式的动态可视化课件，用于课前引入动画与课后拓展演示（如卫星轨道对比、逃逸速度模拟）[8]。Deepseek 等 AI 工具还可辅助生成数据可视化图表，用于课堂数据分析环节。

（二）三阶段教学流程设计

第一阶段：情景创设与认知冲突。以 AI 动画展示太阳系行星轨道运行，画面中行星沿椭圆轨道平稳运行。随后教师提出假设性问题：“如果万有引力突然消失，宇宙会变成什么样子？”AI 随即生成“无引力宇宙”动画，所有天体沿直线飞散、轨道系统瓦解。通过强烈的视觉对比制造认知冲突，激发学生的探究动机：是什么维系着宇宙的秩序？在学生的疑问和讨论中，教师引出牛顿发现万有引力定律的历史背景，板书展示公式$F=G\frac{m_1m_2}{r^2}$，并指出本节课的核心任务：探究质量 m 与距离 r 究竟如何影响引力 F。

第二阶段：参数驱动探究。本阶段以 PhET “Gravity Force Lab”模拟器为探究平台。教师首先进行工具操作演示，向学生展示如何通过滑块调节两个天体的质量 m_1、m_2及它们之间的距离 r，并介绍模拟器中引力矢量图标的含义。随后，学生以2~3人小组形式进入自主探究环节，围绕两个递进的探究任务展开操作。

任务一（引力与距离关系探究）：固定质量（如 $m_1=m_2=100$kg），逐渐增大距离 r，观察引力数值 F 的变化趋势，操作过程中，学生将数据记录于表格中，完成 r，r^2，F 的对应关系记录（如表1所示）。

表1 引力与距离关系数据记录表。

距离 r(m)	距离平方 r^2(m^2)	引力 F(N)	Fr^2(N ·m^2)
2	4	6.67×10^{-8}	2.67×10^{-7}
3	9	2.96×10^{-8}	2.66×10^{-7}
4	16	1.67×10^{-8}	2.67×10^{-7}
5	25	1.07×10^{-8}	2.68×10^{-7}
6	36	7.39×10^{-9}	2.66×10^{-7}
7	49	5.47×10^{-9}	2.68×10^{-7}

学生发现 F 随 r 增大而减小，但非正比；教师引导学生用 Excel 绘制 F-r 散点图，直观感受曲线的陡峭下降趋势，再转换思路，尝试绘制 F-r^2 关系图。当学生发现 F 与 $1/r^2$ 呈现一条经过原点的直线时，平方反比关系自然显现。

任务二（引力与质量的关系探究）：固定距离 r（如 $r=5$m），依次改变 m_1 或 m_2，记录数据（见表2）。

表2 引力与质量关系数据记录表。

m_1(kg)	m_2(kg)	引力 F(N)	$F/(m_1m_2)$ ·(N/kg^2)
50	50	6.67×10^{-9}	2.67×10^{-12}
100	50	1.33×10^{-8}	2.66×10^{-12}
150	50	2.00×10^{-8}	2.67×10^{-12}
200	50	2.67×10^{-8}	2.67×10^{-12}
100	100	2.67×10^{-8}	2.67×10^{-12}
200	200	1.07×10^{-7}	2.68×10^{-12}

学生通过数据对比得出两个重要结论：其一，增大任何一个天体的质量，引力都会增大；其二，增大相同倍数时，引力增大的倍数恰好等于两球质量乘积增大的倍数。基于以上结论，学生尝试归纳引力的数学表达式：$F\propto m_1m_2$且$F\propto 1/r^2$，进而合成为 $F=G\cdot m_1m_2/r^2$。

第三阶段：总结应用与迁移拓展。小组分享数据，教师利用 AI 生成汇总分布图，提炼共性规律。随后用 AI 动画展示卫星绕地运动，解释“轨道半径越小，运动速度越大”的现象；演示“第二宇宙速度”下的抛物线轨迹，或验证开普勒三大定律与万有引力的一致性。将公式应用转化为生动的 α 动态场景，帮助学生在更广阔的天体运动语境中巩固对万有引力定律的理解。最后教师总结，强调科学规律的发现往往始于对现象的定量观察与因果推理，鼓励学生在今后的物理学习中保持探究意识。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

三、教学实施与效果评估

（一）实施对象与过程

选取某大学物理学院大一两个同专业班级，实验班（A 班，50人）采用 AI 交互式模拟可视化方案，对照班（B 班，51人）采用传统板书 + 插图讲授。两班前测物理基础无显著差异。实验班按三阶段流程授课，对照班按照常规方式完成相同内容。课后进行相同概念测试卷（含选择、情境应用、开放简答）及学习体验问卷。

（二）实验效果分析

概念理解测试：实验班平均得分为 84.6 分，对照班 72.3 分，差异显著。情境应用题上实验班优势尤为突出，能灵活运用质量—引力正比关系判断；对照班较多依赖公式机械回忆，缺乏灵活迁移。表明 AI 可视化教学有助于将公式知识迁移至具体情境。

学习兴趣与态度：实验班92% 认为模拟让物理课“更有趣”，87% 的学生表示“愿意在课后继续使用模拟器进行自主探究”。一位实验班学生在开放式问卷中写道：“以前只知道公式，现在真理解为什么距离变大一点，引力就变小那么多。”与之形成对比的是，对照班仅有56% 的学生表示“有兴趣”。

认知负荷感受：自编量表显示，对“平方反比关系”理解难度，实验班评分2.4分（5分制，越低越易），对照班为4.1分。AI 交互式模拟将抽象的比例关系转化为可视化的数据趋势图，显著降低了学生的内在认知负荷。一位实验班学生描述道：“当我把滑块从5拖到10，引力数字突然变得很小，我一下子就明白了距离的影响比我想象的大得多。”

（三）课堂观察

实验班学生参与度极高，各小组积极操作、讨论，课堂氛围活跃，自发产生有价值追问（如“若质量变为零会怎样”），协作学习质量高，讨论聚焦因果机制。对照班则呈现出较为典型的“教师讲、学生听”的被动学习状态，互动的频次明显较低，讨论多停留在“这道题怎么做”的浅层交流。

四、结论与反思

本研究围绕“万有引力定律”的教学难点，设计并实施了基于 AI 交互式模拟的可视化教学方案，获得以下结论：（1）AI 交互式模拟将抽象的平方反比关系转化为可实时操控的动态过程，实现“所见即所得”的因果反馈，显著降低认知负荷，帮助学生在“做中学”中自主建构规律。（2）参数驱动探究教学显著提升概念理解深度，尤其在情境迁移应用能力上效果突出，学生不仅“知道”公式，更“理解”其物理意义。（3）AI 可视化教学有效提升学生的学习兴趣与课堂参与度，推导学习模式从“听讲—记忆—练习”转向“探索—发现—验证”，唤醒学生主体能动性。

教学反思：在充分肯定 AI 可视化教学优势的同时，本研究也发现了若干需要警惕和改进之处。首先，需要避免“为了使用 AI 而使用 AI”的形式主义，技术应服务于教学目标。其次，合理分配探究与推导时间，避免理论讲解弱化。再次，AI 工具的选择应兼顾易用性与开放性，PhET 适合课堂探究的主工具，对于学有余力者可引导尝试 Manim 等编程引擎自行创建更复杂的物理模拟，实现分层差异化教学。

研究局限性：本研究存在若干局限性。首先，样本量有限，研究结论的普适性有待进一步验证。其次，干预周期较短（仅2课时），AI 可视化教学的长期效果（如知识保持率、学习策略迁移等）尚未得到充分评估。最后，本研究只使用了 PhET 和 Kimi K2两类工具，尚未系统比较不同 AI 工具的教学效果差异。

未来展望：其一，延长干预周期，开展多单元、多班级的追踪研究，评估 AI 可视化教学对学生物理学科核心素养发展的长期影响；其二，探索 AI 工具在不同物理概念（如电磁场、简谐振动、狭义相对论等）教学中的适用性；其三，研究 AI 可视化教学中教师的角色定位与教学策略优化。

在人工智能与教育深度融合的时代背景下，物理教学面临着从“知识传授”向“认知建构”的范式转型[9]。技术不会替代教师的专业判断与教学智慧，但善用技术的教师将能够为学生打开一扇通往物理世界本质的明亮窗口。

参考文献

[1] 灵光 AI 助手 . 科普动画生成功能上线：让复杂原理 " 动起来 "[EB/OL]. 中国日报网 ,2025.

[2]PhET Interactive Simulations. 万有引力定律交互式模拟 [EB/OL]. 科罗拉多大学博尔德分校 , https://phet.colorado.edu/zh_CN/.

[3] 马海霞 , 陈建 , 李华 . 生成式 AI 在大学物理可视化教学中的探索与实践 [J]. 物理与工程 ,2025,35(3):158-168.

[4] 张静 . 人工智能技术在物理教学中的应用创新案例 [EB/OL]. 中国日报网 ,2025.

[5]Sweller J. Cognitive Load Theory, Learning Difficulty,and Instructional Design[J]. Learning and Instruction,1994, 4(4):295-312.

[6]Paivio A. Mental Representations: A Dual Coding Approach[M]. Oxford:Oxford University Press,1986.

[7] 李建 , 王伟 . 基于 GeoGebra 的高中物理可视化教学研究 [J]. 物理教师 ,2024.

[8] 师说 AI.Kimi K2制作理科课堂互动课件实践 [J/OL]. 中国学科网 ,2025.

[9] 徐平 .AI 数智化赋能物理实验教学改革 [J]. 大学物理实验 ,2025.

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.