

新工科背景下基于大学物理数值仿真的创新型人才培养

王 辉¹ 覃 琅² 谢 东¹ 吴 平¹ 朱 浩¹

(¹ 西南交通大学物理科学与技术学院, 四川 成都 610031;

² 西南交通大学力学与航空航天学院, 四川 成都 610031)

摘 要 本文通过在大学物理教学中引入基于数值仿真的科学研究方法, 创新大学物理教学内容和教学模式, 以深化学生对物理基本概念的理解, 培养学生的创新意识和创新思维。在教学过程中, 结合大学物理典型知识点设计数值仿真研究案例, 并通过实践教学的方式, 引导学生积极参与数值仿真实验, 深入探索物理现象的规律和原理。通过科学、系统地引入基于数值仿真的研究方法, 创新了大学物理的教学内容和教学模式, 有效提升了学生的科学素养和创新能力, 充分发挥了新工科背景下物理基础课程在创新人才培养中的地位和作用。

关键词 创新人才培养; 大学物理; 数值仿真; MATLAB

INNOVATIVE TALENT CULTIVATION BASED ON COLLEGE PHYSICS NUMERICAL SIMULATION IN THE CONTEXT OF NEW ENGINEERING EDUCATION

WANG Hui¹ QIN Lang² XIE Dong¹ WU Ping¹ ZHU Hao¹

(¹ School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031;

² School of Mechanics and Aerospace Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031)

Abstract This article introduces a scientific research method based on numerical simulation in college physics teaching, innovates the content and teaching mode of college physics, deepens students' understanding of basic concepts in physics, cultivates their innovative consciousness and thinking. In the teaching process, numerical simulation research cases are designed based on typical knowledge points of college physics, and through practical teaching, students are guided to actively participate in numerical simulation experiments, deeply explore the laws and principles of physical phenomena. By scientifically and systematically introducing research methods based on numerical simulation, the teaching content and mode of college physics have been innovated, effectively enhancing students' scientific literacy and innovation ability. The position and role of physics basic courses in cultivating innovative talents under the background of New Engineering Education have been fully utilized.

Key words Cultivation of innovative talents; College physics; Numerical simulation; Matlab

收稿日期: 2023-09-24

基金项目: 西南交通大学党委教师工作部(教师发展中心)教师发展专题项目研究成果; 2022 年西南交通大学高水平育人课程教学改革项目(一流本科课程建设专项); 西南交通大学校级本科教育教学研究与改革项目(项目编号: 20220318, 20240319); 2022 高等学校教学研究项目(DWJZW202230xn)资助。

通信作者: 王辉, 西南交通大学物理科学与技术学院副教授, wanghui@swjtu.edu.cn。

引文格式: 王辉, 覃琅, 谢东, 等. 新工科背景下基于大学物理数值仿真的创新型人才培养[J]. 物理与工程, 2024, 34(4): 76-81.

Cite this article: WANG H, QIN L, XIE D, et al. Innovative talent cultivation based on college physics numerical simulation in the context of new engineering education[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(4): 76-81. (in Chinese)

当今,世界新一轮科技革命和产业变革正处于蓄势待发、快速迭代的关键阶段。2017年2月以来,教育部积极推进“新工科”建设,“新工科”这一概念的提出获得了广泛共识,先后形成了“复旦共识”“天大行动”和“北京指南”。新工科教育改革中最重要的内涵是“高等教育应注重激发学生的创新意识、创新思维”^[1]。大学物理课程作为全国高等学校理工科本科生必修的一门自然科学基础课程,为学生毕业达成度提供了重要支撑,在培养学生“科学素养”和“创新意识”方面具有不可替代的作用,因此大学物理课程的教学改革是高校对创新人才培养改革的重点环节^[2]。

长期以来,大学物理课程教学的课堂讲授和考评模式较为单一、固化,特别是缺乏针对性的教学内容、教学方法和实践环节,同时由于大学物理课程中存在大量的物理公式和物理概念,使得学生感到“物理难懂、学着没劲”,因此无法调动学生学习的主动性和进行思考的积极性,学生的创新潜质更是难以激发。上述问题是高等学校大学物理教学中的共性问题,因此处在自然科学基础教育核心地位的大学物理课程教学的改革势在必行^[2]。近年来,如何通过大学物理课程的教学改革培养学生的创新意识一直是我们教学改革实践的重点目标。

经过近年的大学物理教学改革实践,我们基于线上线下混合教学模式,在大学物理教学中形成了一种“在线学习+课堂总结讨论+课外研究实践”的完整教学体系^[3],其中“课外研究实践”环节是该教学体系中的关键一环,通过该环节的设计有效弥补了传统大学物理教学中学生“实践环节”的缺失。根据大学物理教学内容及教学进度,在教学过程中科学、系统地引入基于数值分析(主要选用 Matlab 仿真软件)的研究型学习,在教师的引导下,指导学生开展研究实践。Matlab 是美国 MathWorks 公司开发的一套数值计算和可视化软件,具有强大的运算能力和丰富的作图功能,同时该软件又易学易懂,已成为了科技人员从事科学研究和工程计算的重要工具,因此大学物理课程作为培养未来基础拔尖人才和工程技术人员的重要基础课程有必要结合课程内容让学生接触这一工具,这是基于物理基础课程培养学生创新

意识的“突破点”之一^[4-7]。

近年来,我们在大学物理普通教学班(大班)和拔尖班(小班)中均成功实践了基于数值仿真的“课外研究实践”模式,教学班学生全员参与研究实践。研究实践的题目由教师发布或学生自选,教师引导学生通过物理建模,对实际物理问题进行定量描述;通过图像技术,对物理过程进行直观表现。教学改革实践证明,在大学物理课程中引入基于数值仿真的研究型学习是完全可行的,学生的接受程度很高。实践证明,基于数值仿真的“课外研究实践”有助于将学生从繁杂的公式和运算中解放出来,而把精力放在对物理概念和问题的思考、研究上,提高了学生的学习兴趣以及解决问题的能力,点燃了学生创新意识和创新思维的“星星之火”,为学生后续进一步发展“开窗口、留接口”,为创新人才培养带来了强大动力和重要技术支撑。

1 教学改革思路及措施

在大学物理教学改革实践中始终秉承以“学生发展为中心,能力培养为导向”的教育理念,通过大学物理教学中引入基于数值仿真的研究实践提升教学内容的高阶性和挑战度,引导学生实践知识探究、思辨与拓展。通过研究实践使学生掌握数值模拟的科学研究方法,掌握一种“科研级别”的解决分析问题的工具,拓宽学生视野,提升学生分析问题和解决问题的能力,促进知识、能力、素质三者的有机结合。

在教学实践中,学期初由任课教师和助教对学生进行 Matlab 软件的简要介绍,通常会指导学生从例如抛物线作图、指数函数等简单的问题开始仿真,并在整个教学过程中与学生保持沟通。根据教学内容和进度在超星平台上向学生发布数值仿真实践题目。实践题目可由教师设计发布,也可由学生依据学习内容自行设定。实践题目涵盖了大学物理课程中的力学、热学、电磁学、振动波动、波动光学以及近代物理的重要基本概念和典型物理问题。实践环节学生全员参与,并计入平时成绩。学生在超星平台上提交实践作业(含建模、编程及相关分析讨论),由教师或助教进行批阅。学期中和学期末教师组织学生进行实践项目的展示、交流,师生现场点评、讨论。

2 数值仿真选题举例

2.1 模拟物理过程

追击问题是运动学中较为综合且具有实际意义的问题,它往往涉及两个及以上物体的运动过程。下面我们以“导弹追击目标”的选题为例,基于 Matlab 仿真求解追击问题的数值解。

选题 1 如图 1 所示,假设现从坐标原点向位于其正东北方 20km 处的目标发射自动追踪导弹,导弹飞行方向始终对准目标,目标以 200km/h 的速度沿正东北方向逃逸,导弹速度大小为 600km/h,其最大射程为 50km,试问,导弹能否在射程内成功击中目标并求解出相遇点的坐标、导弹飞行时间和路程。

建模分析:建立直角坐标系,某时刻导弹和目标的空间位置如图 1 所示。

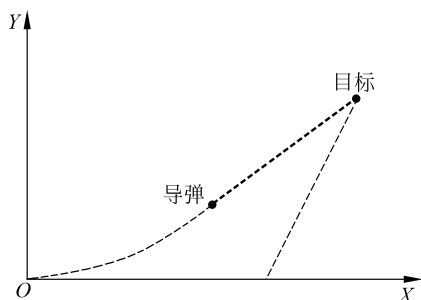


图 1 某时刻导弹和目标的位置

设导弹相对 O 点的坐标为 $(x(t), y(t))$, 目标相对 O 点的坐标为 $(\varphi(t), \psi(t))$, 设目标运动速度大小为 v , 导弹运动速度大小为 $3v$, 根据导弹始终瞄准目标飞行这一条件可建立如下数学模型

$$\sqrt{\left(\frac{dx(t)}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt}\right)^2} = 3v \quad (1)$$

$$\frac{\varphi(t) - x(t)}{\psi(t) - y(t)} = \frac{dy}{dx} \quad (2)$$

联立解得

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{3v(\varphi(t) - x(t))}{\sqrt{(\varphi(t) - x(t))^2 + (\psi(t) - y(t))^2}} \quad (3)$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{3v(\psi(t) - y(t))}{\sqrt{(\varphi(t) - x(t))^2 + (\psi(t) - y(t))^2}} \quad (4)$$

求解该微分方程组即可得到导弹运动方程,从而得到相遇点坐标。对于此类复杂的微分方程组,可以利用 Matlab 中 ode45 函数求解该微分方程组的近似解,并通过图像直观地展示出导弹和目标的运动。通过 Matlab 求解,得到该追击问题的求解结果为:导弹飞行 28.63 千米后击中目标,飞行时间为 171.80 秒,相遇点的坐标为 (26.74, 6.75)。导弹和目标的相遇点示意图如图 2 所示。

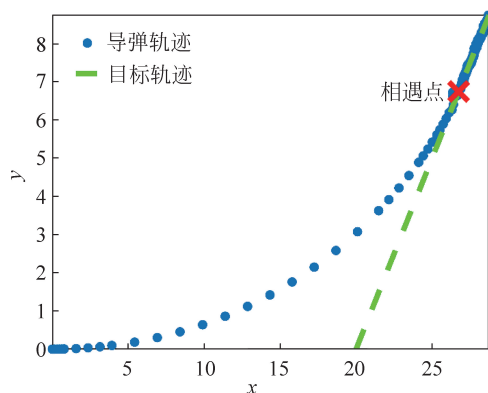


图 2 导弹和目标相遇示意图

2.2 复杂的微积分计算

数学的微积分方法广泛应用在大学物理和其他理工专业课程的复杂问题分析中,是大学物理课程中重要的数学工具。大学物理课程从运动学开始,就引入了数学的微积分应用,这样的数学演绎推理方法,在大学物理课程的学习中十分常见,这也是大学物理与中学物理的区别之一。因此,应用微积分解决实际问题物理教学中的基本训练。但是,在研究某些物理问题时,我们常常会面临一些复杂的微积分计算,此时借助 Matlab 软件可以帮助学生避开复杂的数学运算而将注意力集中在物理问题本身。

选题 2 1859 年,英国物理学家麦克斯韦通过理想气体导出了麦克斯韦速率分布律。以氢气分子为例,在室温为 300K 时,试求:(1)氢气分子在 $v_p \sim 1.01v_p$ 速率区间出现的概率;(2)氢气分子在 $3 \times 10^3 \sim 3 \times 10^4$ m/s, $3 \times 10^4 \sim 3 \times 10^8$ m/s 两个速率区间出现的概率。

建模分析:麦克斯韦速率分布函数的表达式为^[8]

$$dW = \frac{dN}{N} = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} v^2 dv \quad (5)$$

其物理含义为在速率 v 附近单位速率区间内分子出现的概率。

最概然速率 v_p 的定义为

$$v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}} \quad (6)$$

其中, k 为玻尔兹曼常量, T 为热力学温度, m 为氢气分子的质量。在室温 300K 下, 计算得到氢气分子的最概然速率为 $1.58 \times 10^3 \text{ m/s}$ 。

本题的关键在于计算某一区间的定积分, 一般情况下无解析解, 但是利用 Matlab 写入被积函数后, 就可完成积分运算。通过 Matlab 计算得到, 室温下, 氢气分子在 $v_p \sim 1.01v_p$ 速率区间出现的概率为 8.3×10^{-3} ; 氢气分子在 $3 \times 10^3 \text{ m/s} \sim 3 \times 10^4 \text{ m/s}$ 的速率区间, 其出现的概率已经降低到 4.06×10^{-156} ; 在 $3 \times 10^4 \sim 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 的速率区间, 其出现的概率更是降低到 0。计算结果告诉我们, 氢气分子速率高于 3×10^4 的概率非常小, 实际上是不会发生的^[5,9]。本选题, 利用 Matlab 完成了复杂的微积分运算, 可以帮助学生加深对麦克斯韦速率分布律作为统计规律的物理意义的理解。

2.3 真实情境下物理问题的仿真

简谐振动是研究振动现象的重要物理模型, 它是一种理想的无阻尼线性系统的固有振动。在许多实际问题中, 阻尼的影响不容忽视。例如, 大学物理振动与波动章节的阻尼振动就是这一类问题。

选题 3 利用 Matlab 计算和作图功能, 模拟阻尼振动这一物理现象。

建模分析: 实际振动问题中由于阻尼的存在, 如果没有外来能量的补充, 那么系统振动的振幅总要随时间逐渐减小, 最后停止下来, 这样的振动称为阻尼振动, 也称为减幅振动。考虑了阻尼力的振动系统的振动方程可写为^[8]

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0 \quad (7)$$

其中, β 称为阻尼系数。在欠阻尼情况下, 即 $\beta < \omega_0$ 的情况下, 该方程的解为

$$x = A e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

其中, A 和 φ 是由初始条件决定的积分常量, $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ 。

利用 Matlab 仿真, 可以得到欠阻尼情况下位

移随时间的变化曲线, 如图 3 所示。图 3 直观、清晰地展示了阻尼振动这一物理过程。从图 3 我们可以清晰、直观地观察到在欠阻尼情况下, 阻尼使得振动周期变长, 振动变慢, 有助于帮助学生了解阻尼振动的特点。

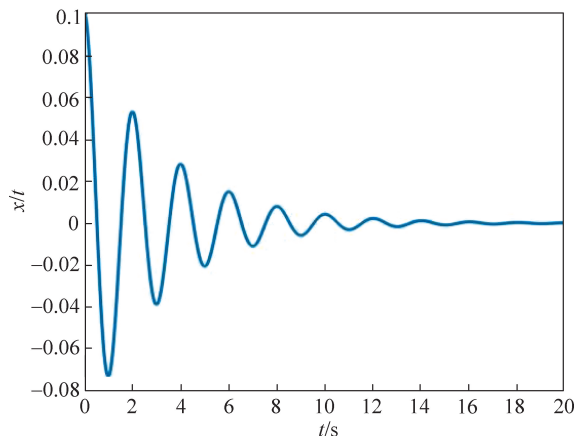


图 3 欠阻尼情况下位移随时间的变化曲线 ($\beta < \omega_0$)

2.4 物理图像的再现

干涉现象是波的特征之一。光是电磁波, 其波动性质可以从光的干涉现象得到证实。在大学物理教学中, 我们对干涉型光学元件的研究方法一般是: 观察光干涉的实验装置—产生干涉的两束光的光程差—干涉的明暗纹条件—干涉条纹宽度(或间距)—条纹特征—条纹随实验装置参数的变化分析。讨论光学元件干涉条纹的特征及其变化是大学物理波动光学教学的重点内容之一。学生通常需要计算光程差的变化, 进而判断干涉条纹图像的变化, 这一物理图像理解起来比较抽象。

选题 4 对于牛顿环干涉条纹及其变化这一较为复杂的物理图像, 我们可以通过 Matlab 仿真使其图像化, 进而研究干涉条纹的特征及其变化规律, 从而更直观地反映光学元件的工作原理和光学特性。

建模分析: 牛顿环干涉是一种经典的光学干涉现象, 其实验装置的结构示意图如图 4 所示。

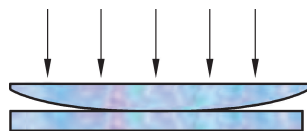


图 4 牛顿环装置示意图

在一平面玻璃上置一曲率半径很大的平凸透镜,使二者之间形成一盆状介质层,用单色平行光垂直入射,可得到等厚干涉条纹。对于在介质层上、下表面反射的干涉光线,其光程差为^[8]

$$\Delta = 2ne + \frac{\lambda}{2} \quad (9)$$

明暗纹条件为

$$\Delta = 2ne + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} k\lambda & (k=1,2,3\cdots) \text{ (明纹)} \\ (2k+1)\frac{\lambda}{2} & (k=0,1,2,3\cdots) \text{ (暗纹)} \end{cases} \quad (10)$$

通过光程差的变化来讨论牛顿环干涉条纹的变化对学生而言比较抽象,我们借助 Matlab 强大的图像功能,可以使得该物理图像得到清晰、直观地呈现。

通过 Matlab 仿真,得到了牛顿环的演示动画,如图 5 所示。该演示动画可以直观演示牛顿环干涉条纹的特点,以及动态展示在不同的入射光波长、曲率半径、薄膜厚度情况下,牛顿环干涉条纹的变化,有助于学生避开抽象的公式推导,直观观察牛顿环干涉条件的特点及其变化规律,欣赏物理之美。

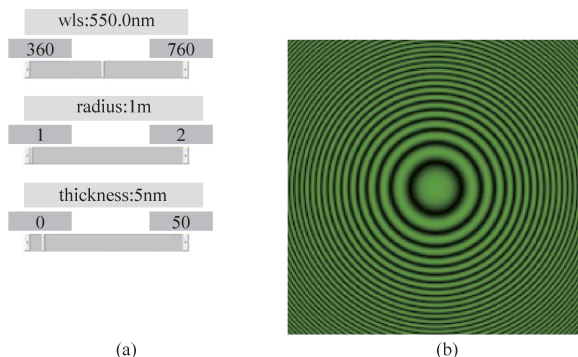


图 5 牛顿环演示动画

(a) 控制条; (b) 牛顿环干涉条纹

3 教学改革成果及应用

近年来,我们在大学物理教学中持续开展基于数值仿真的研究型学习的教学改革实践,面向的教学班既包括茅以升和拔尖班等小班,也包括普通班的大班教学。教学班的学生

来自学校不同的理工科专业,包括电气、机械、材料、物理、测绘、工力、通信、生医等,受益学生近千人。

这一教学改革模式得到国内同行专家和学生的一致认可。我们的教学改革经验在全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会上推广,获得了教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会、中国物理学会物理教学委员会联合颁发的“优秀报告奖”。教学成果“构筑‘学生为中心,能力为导向’的《大学物理》教学体系与人才培养新模式”获得西南交通大学教学成果奖一等奖。学生在项目学习报告中写道:“这样一个探究过程十分有意思,尽管很难,但却让我学到很多课本外的东西,学会了如何对一个问题进行研究分析,这无疑对我以后的学术生涯有着莫大的帮助”;学生在学校教务网评价上写道:“课程形式多样,小课题的完成让我又掌握了一门新的知识”“老师布置的小课题作业,既加深了学生对知识的理解,也提高了学生的编程能力与自学能力”等。

目前,我们已基本建成基于 Matlab 数值仿真的大学物理案例资源库,内容涵盖了力学、电磁学、热学、振动波动、波动光学、近代物理的主要知识点。本文由于篇幅有限,未展示所选案例的编程代码。后续该资源库内容将不断地丰富、完善,并计划在全国范围内推广应用该资源库,为国内同行和学生从事大学物理数值仿真工作提供案例参考。

近年来,通过开展基于数值仿真的研究型教学改革实践,对新工科背景下创新型人才培养新途径进行了有益探索。我们为学生点燃了创新意识 and 创新思维的“星星之火”,学生也向我们展示了他们无限的创新潜力,促进了师生“教学相长”。我们欣喜地看到,学生对基本概念和基本规律的理解和掌握、创新意识和创新思维、知识的拓展与转移能力、解决实际问题的能力以及协作交流能力都有了可喜的提高,知识、能力、素质三者得到了协调发展。

参 考 文 献

- [1] 陈强. 新工科背景下物理基础课教学的地位和作用[J]. 中国大学教学, 2019, 5: 34-37.
- [2] 李宏荣, 王小力, 田蓬勃, 等. 以创新人才培养为目标的大学生

- 物理教学改革[J]. 中国大学教学, 2013, 8: 19-21.
- [3] 王辉, 吴平, 朱浩, 等. 基于“金课”建设的“大学物理”线上线下混合教学实践[J]. 大学物理, 2021, 40(3): 51-55.
- WANG H, WU P, ZHU H, et al. Practice of online and of-fline blending-learning mode of college physics based on the construction of golden course[J]. College Physics, 2021, 40(3): 51-55. (in Chinese)
- [4] 马涛. Matlab 版大学物理[M]. 杭州: 浙江工商大学出版社, 2011.
- [5] 胡盘新, 钟季康. 在大学物理教材中引入计算机数值解的尝试[J]. 物理与工程, 2006, 16(2): 47-50.
- [6] 王辉, 朱浩, 樊代和, 等. 传输矩阵法在大学物理波动光学教学中的应用[J]. 物理与工程, 2019, 29(5): 118-122.
- WANG H, ZHU H, FAN D H, et al. Application of transfer matrix method in the teaching of wave optics in college physics[J]. Physics and Engineering, 2019, 29 (5): 118-122. (in Chinese)
- [7] 谭志光, 孙利平, 王胜杰, 等. 基于计算思维的大学物理模型教法——以理想气体分子速率分布律为例[J]. 物理与工程, 2022, 32(6): 75-79.
- TAN Z G, SUN L P, WANG S J, et al. A Model teaching method based on computational thinking in college physics teaching—Taking the molecular speed distribution law of ideal gas as an example[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(6): 75-79. (in Chinese)
- [8] 张晓, 王莉. 大学物理学 下册[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2018.
- [9] 崔砚生, 邓新元, 李列明. 大学物理学要义与释疑 上册[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2019.