

基于 NuSEP 虚仿平台的研究式项目设计与光学课程教学创新

张尚剑¹ 时梦凡¹ 朱峻峰¹ 吴胤锋¹ 赵玉华¹ 张雅丽¹ 顾 晨²

(¹ 电子科技大学光电科学与工程学院, 四川 成都 611731; ² 清华大学物理系, 北京 100084)

摘 要 本文介绍了基于 NuSEP 虚仿平台, 通过研究式项目设计和沉浸式实验探究, 践行以学生为中心的教学创新; 我们以迈克尔逊干涉绝对重力仪虚拟仿真项目为例, 利用 NuSEP 虚拟仿真平台演示迈克尔逊干涉绝对重力仪的工作原理、测量方法和计算过程, 虚拟仿真实验有效解决了课堂教学与实验教学在场地、台套数和时间的受限问题, 实现了任何学生、任何时候、任何地点均可自己动手做实验; 有效支持国家级一流本科课程《物理光学》和校级研究生精品课程《光学原理》的教学改革和课程建设。

关键词 物理光学; 光学原理; 迈克尔逊干涉仪; 绝对重力仪; 虚仿实验

DESIGN OF RESEARCH-BASED PROJECTS BASED ON THE NUSEP PLATFORM AND TEACHING INNOVATION IN OPTICS COURSES

ZHANG Shangjian¹ SHI Mengfan¹ ZHU Junfeng¹ WU Yinfeng¹ ZHAO Yuhua¹ ZHANG Yali¹ GU Chen²

(¹ School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731;

² Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract This paper introduces a student-learning-centered teaching innovation which is basing on the NuSEP simulation imitation platform through research-based project design and immersive experimental exploration. Taking the Michelson interferometer-based absolute gravimeter as an example, we demonstrate the working principle, measurement method and calculation process of the Michelson interference absolute gravimeter by utilizing the NuSEP virtual simulation platform, which effectively addresses the limitations of traditional classroom and laboratory teaching in terms of space, equipment availability, and time constraints. It has enabled any student to conduct experiments at any time and from any place. This platform effectively supports the teaching innovations of the national first-class undergraduate course “Physical Optics” and the graduate elite course “Principles of Optics” in our university.

Key words physical optics; principle of optics; Michelson interferometer; absolute gravimeter; virtual experiment

1 研究式项目设计背景

波动光学课程中, 光的干涉是非常重要的现

象, 迈克尔逊干涉仪是利用分振幅法产生双光束以实现干涉的精密的光学仪器。一束入射光经过分光镜分为两束后各自被对应的平面镜反射回来, 因为这两束光频率相同、振动方向相同且相位

收稿日期: 2024-11-11

基金项目: 四川省高等教育人才培养质量和教学改革项目(JG2024-0221); 电子科技大学研究生教研教改项目(YJSBGK202507)。

通信作者: 张尚剑, sjzhang@uestc.edu.cn。

引文格式: 张尚剑, 时梦凡, 朱峻峰, 等. 基于 NuSEP 虚仿平台的研究式项目设计与光学课程教学创新[J]. 物理与工程, 2025, 35(4): 120-125.

Cite this article: ZHANG S J, SHI M F, ZHU J F, et al. Design of research-based projects based on the NuSEP platform and teaching innovation in optics courses[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(4): 120-125. (in Chinese)

差恒定(即满足干涉条件),所以能够发生干涉。干涉中两束光的不同光程可以通过调节干涉臂长度以及改变介质的折射率来实现,从而能够形成不同的干涉图样。

由于迈克尔逊干涉仪的高精度和复杂性,确实存在一些挑战,使其不太适合直接搬到教室进行常规教学展示。因此,我们与清华大学合作,利用现代信息技术,基于 NuSEP 虚仿平台,创建虚拟的迈克尔逊干涉绝对重力仪实验环境。学生可以在计算机上模拟实验过程,观察干涉现象,并学习相关的理论知识,利用沉浸式虚拟实验测量重力常数。这种方法不仅避免了实体仪器的搬运问题,还可以提供更安全、更灵活的学习体验。

2 研究式项目设计案例

绝对重力仪是直接测量地表重力加速度 g 的精密计量仪器^[1-2],精确的重力值对大地测量、地球物理和精密计量等具有十分重要的意义^[3-5]。目前国际上研制的开展绝对测量的绝对重力仪主要分为基于激光干涉的绝对重力仪和基于原子干涉的绝对重力仪^[1,5]。迈克尔逊干涉绝对重力仪是一种基于激光干涉的绝对重力仪,它通过使用铷(或铯)原子频标作为测量时间的标准,高稳定度的激光作为测量长度的标准,高分辨率的时间间隔测量仪测量微小时间段和长周期弹簧悬挂参考棱镜来隔离地面震动,利用落体在高真空中多次下落测量多点位的方法实现精确的重力值的测量^[6]。

2.1 原理分析

迈克尔逊干涉绝对重力仪是一种基于分振幅法产生双光束干涉以实现重力加速度 g 测量的装置,它通过测量落体在真空中自由下落的加速度来得到当地的重力加速度,其结构示意图如图 1 所示^[7],它主要由激光源、真空腔、分光镜、角锥棱镜(落体)、参考反射镜、光电探测器组成。来自激光源的光在分光镜处被分为两路强度相等的反射光 1 和透射光 2,作为参考路的透射光 2 在经过分光镜后继续沿水平方向传播;作为测量路的反射光 1 通过分光镜后光束垂直向上传播,被自由下落的角锥棱镜反射到参考棱镜中,被反射后再经过分光镜与参考路合光,两路光叠加产生干涉^[8]。设入射光的波长为 λ_0 ,两路光的光程差为 δ ,条纹阶数为 k ,则有

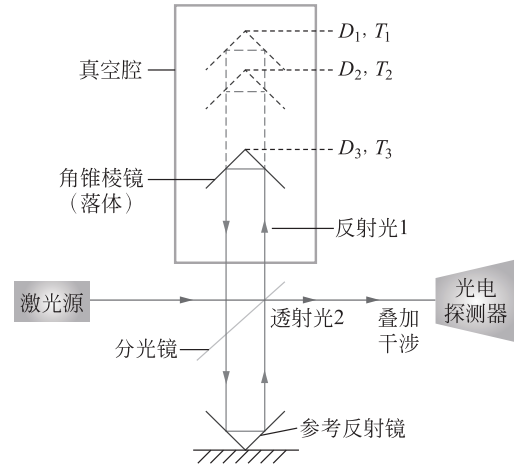


图1 迈克尔逊干涉绝对重力仪结构示意图

$$\delta = \begin{cases} k\lambda_0 (\text{亮纹}) \\ \left(k + \frac{1}{2}\right)\lambda_0 (\text{暗纹}) \end{cases}, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1)$$

当自由下落的角锥棱镜相对于参考棱镜移动 $\lambda_0/2$ 的距离时,光程差改变 λ_0 ,干涉条纹信号发生一个整周期的变化,该变化由光电探测器采集转换成电信号,通过数据采集卡传输至信号处理系统中^[1];结合原子钟的时钟信号,可以获得条纹光强为零的位置($D_n, n=1, 2, 3, \dots$)及其对应的时刻($T_n, n=1, 2, 3, \dots$)。

设角锥棱镜下落距离为 z ,下落时间为 t ,则其下落距离随时间的变化关系 $z(t)$ 可以表示为

$$z(t) = z_0 + v_0 t + \frac{1}{2} g_0 t^2 \quad (2)$$

其中, z_0 为第一个观测点的位置, v_0 为落体在此处的初始速度, g_0 为此处的重力加速度。由于角锥棱镜在真空中下落 $\lambda_0/2$ 的距离时,光程差改变 λ_0 ,从而引起干涉条纹光强的变化,且该变化由光电探测器将光强转变为数字信号,因此我们可以获得图 2 展示的干涉条纹随时间的变化关系和光强波谷对应的时刻 $t_i (i=0, 1, 2, \dots, n-1)$ 。由于物体位置改变 $\lambda_0/2$ 时,对应时间间隔为 $t_{i+1} - t_i (i=0, 1, 2, \dots, n-2)$,记 t_0 为第一个观测时间点,对应位置为 z_0 ,则可以获得 n 个“时间-位移”数据点(t_i, z_i)。将这些数据点采用如下展示的最小二乘法进行拟合

$$\begin{bmatrix} z_0 \\ z_1 \\ \vdots \\ z_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & t_0 & t_0^2 \\ 1 & t_1 & t_1^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_{n-1} & t_{n-1}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_0 \\ v_0 \\ \frac{1}{2} g_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

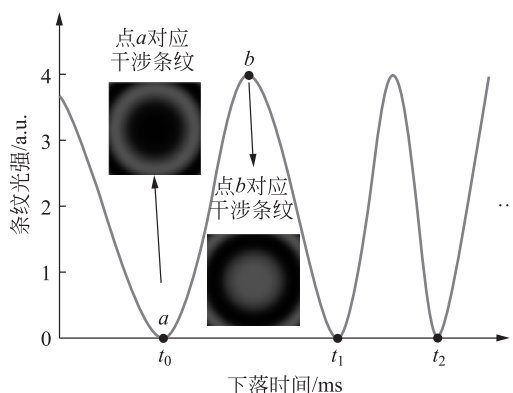


图2 干涉条纹光强随物体下落时间变化关系

即可获得该处重力加速度 g_0 。

2.2 虚仿平台

本实例采用的虚仿平台是清华大学 HTML5 技术数值仿真物理实验系统 Numerical Simulation of Experimental Physics (NuSEP)^[9-11], 图 3 展示的是迈克尔逊干涉绝对重力仪的仿真结构。

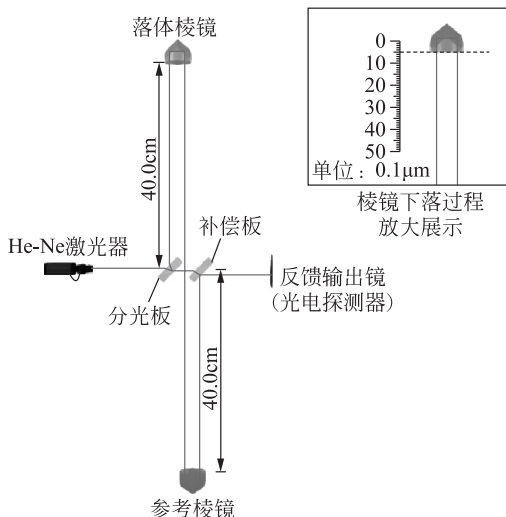


图3 迈克尔逊干涉绝对重力仪仿真结构

迈克尔逊干涉绝对重力仪的仿真结构由 He-Ne 激光器、分光板、补偿板、落体棱镜、参考棱镜、反馈输出镜(光电探测器)构成, 右上角放大部分展示的是落体棱镜的下落过程。随着物体下落距离 z 的变化, 透射光与反射光的光程差 δ 也会发生变化, 从而引起图 2 中展示的干涉条纹亮暗变化。

迈克尔逊干涉绝对重力仪的系统仿真分为“运动参量”和“地理参量”两种模式, 两种模式提供的光源波长 λ_0 均为 660nm。在“运动参量”模

式中, 可以对待测的重力加速度 g 进行预设, 运行仿真程序可测得干涉条纹光强随物体下落时间的变化关系曲线, 从中读取光强波谷对应“时间-位移”数据点, 再用最小二乘法对其拟合得到重力加速度 g^* , 对比拟合结果与预设的实际重力加速度是否吻合; 在“地理参量”中, 选择不同的星球, 及地球上不同纬度、不同海拔的位置可以直接获得其重力加速度。此外, 两种模式都可以对棱镜自由下落时长进行预设, 但下落时长不同只对测得光强波谷对应“时间-位移”数据点的数量有影响, 对其测试结果无影响。



图4 仿真模式

(a) “运动参量”模式; (b) “地理参量”模式

2.3 仿真实例

我们通过在仿真系统中进行不同的实验来模拟迈克尔逊干涉绝对重力仪的重力测试, 理解其工作原理、测量方法和计算过程。实验的仿真结果还可以与预设的实际值对比, 来验证仿真结果的准确性。

首先, 我们使用“运动参量”模式, 通过对单个给定实际重力加速度的位置仿真测量为例, 介绍迈克尔逊干涉绝对重力仪的工作过程。在仿真程序中预设实际重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, 仿真过程中, 随着落体棱镜的下落, 系统自动将生成图 2 展示的干涉条纹光强随物体下落时间的变化关系曲线。规定该曲线的第一个光强波谷点对应下落位移为 $0 \mu\text{m}$ 的位置, 根据相邻两个波谷的位移差为

λ_0 , 时间差为棱镜下落 $\lambda_0/2$ 所需时间, 我们可以读取光强波谷对应的“时间-位移”数据点, 从而拟合出位移随时间的变化关系曲线, 进一步通过最小二乘法拟合得到重力加速度 g^* 。本组仿真实验使用 10 个“时间-位移”数据点来拟合重力加速度 g , 图 5 展示的是仿真得到的测试位移点及其拟合曲线对比, 由式(3)拟合得到重力加速度 $g^* = 9.801\text{m/s}^2$, 它与实际值较为接近。

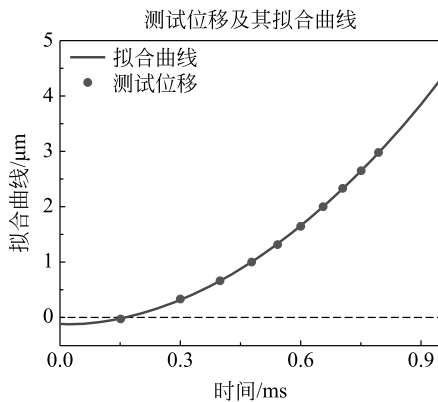


图 5 测试位移及其拟合曲线

为进一步理解迈克尔逊干涉绝对重力仪的工作过程, 我们增加了系统仿真的组数, 即对多个给定重力加速度实际值的位置进行仿真测试, 计算得到重力加速度的拟合值。仿真过程中, 给定重力加速度实际值的起止范围为 $8.0\text{m/s}^2 \sim 10.0\text{m/s}^2$, 相邻测试点间实际值之差为 0.1m/s^2 , 仿真总组数为 21 组, 每组仿真均使用 10 个“时间-位移”数据点对重力加速度进行拟合。计算得到重力加速度拟合值与实际值的对比如图 6 所示, 所有仿真组次拟合得到的重力加速度与实际值基本吻合, 说明了仿真结果的准确性。

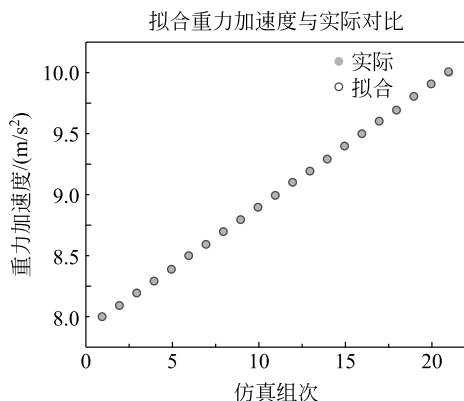


图 6 多组重力加速度拟合值与实际值对比

最后, 我们通过“地理参量”模式获得地球上同一纬度、不同海拔的位置的重力加速度的实际值, 通过仿真系统对这些位置进行测量得到重力加速度拟合值 g^* , 并将其与实际值 g 对比。图 7 展示的是北纬 30 度时, 海拔从 10 千米到 100 千米, 相邻点海拔间隔为 10 千米的十组重力加速度的拟合值与实际值的对比, 二者吻合良好, 进一步说明了仿真结果的准确性。

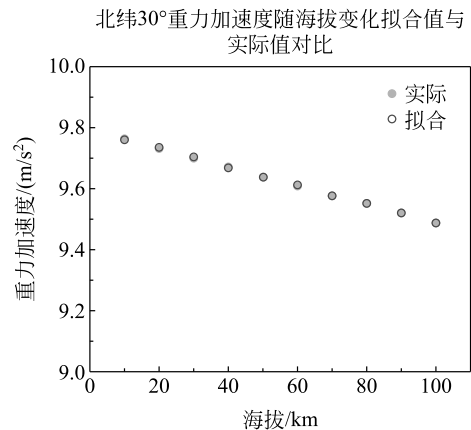


图 7 北纬 30 度不同海拔下重力加速度拟合值与实际值对比

2.4 误差分析

通过对仿真过程进行分析, 我们发现仿真系统中存在一些可能使得拟合结果与实际结果产生误差的原因。

首先, 拟合采用“时间-位移”数据点的数量不同会使得由最小二乘法拟合得到的重力加速度 g^* 不同。图 8 展示的是实际重力加速度 $g = 9.8\text{m/s}^2$ 时, 采用 5~15 个“时间-位移”数据点拟合得到的重力加速度 g^* 与实际重力加速度 g 的对比。当采用“时间-位移”数据点的数量不同时, 拟合所得结果将会产生偏差。

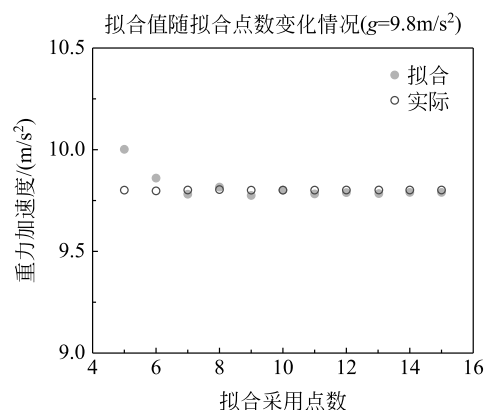


图 8 拟合结果随拟合点数变化情况

为衡量拟合重力加速度 g^* 与实际重力加速度 g 的偏差程度随拟合采用点数的变化关系,将以上拟合值与实际值代入均方根误差计算公式中,即

$$\text{RMSE} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^T (g_i^*/g_i - 1)^2}}{T} \quad (4)$$

式(4)中, g_i 表示的是重力加速度的实际值, g_i^* 为重力加速度的拟合值, T 为测量次数。由于对同一实际重力加速度进行多次仿真测量,得到落体位移与时间对应关系不会发生改变,即重力加速度拟合值不变,因此取 $T=1$,得到均方根误差随拟合采用点数的变化关系如图9所示。随着拟合采用点数的增大,均方根误差逐渐趋近于0,拟合得到重力加速度 g^* 趋于稳定,即提高拟合采用点数可以减小测试所误差。

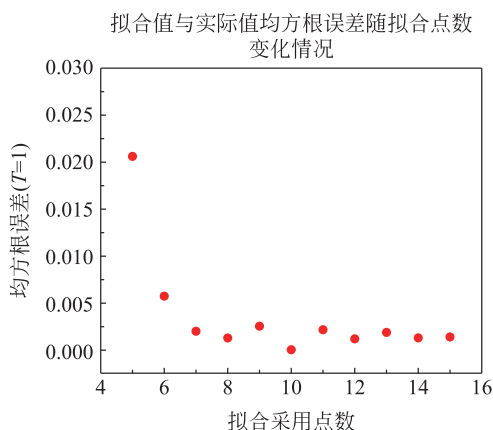


图9 均方根误差随拟合采用点数的变化关系

其次,仿真系统中的读数精度会对拟合得到的重力加速度 g^* 的结果产生影响。图10展示的是实际重力加速度 $g=9.8\text{m/s}^2$ 时条纹光强随时间变化的局部图形, t 时刻为条纹光强波谷点,点 a 、 b 和

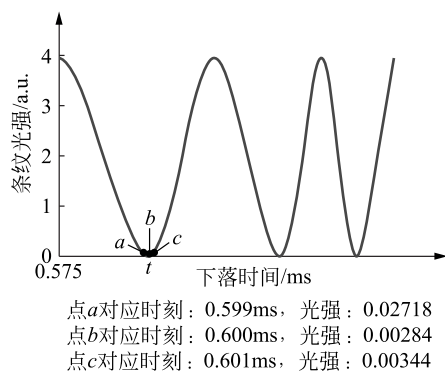


图10 $g=9.8\text{m/s}^2$ 时条纹光强随下落时间变化的局部图形

c 为仿真系统能读取到的离 t 时刻最近的三个位置。由于仿真系统时间最小精度仅为 0.001ms ,它无法准确读取 t 时刻对应的实际数值,这会对后续重力加速度的拟合结果造成影响。

3 结语

NuSEP 虚拟仿真平台解决了课堂教学与实验教学在场地、台套数和时间的受限问题,实现了任何学生、任何时候、任何地点均可自己动手做实验。学生不再畏惧需要精细调试的光学实验,更多地专注于背后的理论原理、推导过程和方法应用,更好地构筑波动光学知识体系。

近年来,我们在本科核心基础课“物理光学”和硕士学位课“光学原理”中以“构思、设计、实现和运作”为主线,打造了“问题式互动课堂、沉浸式探究授课、研究式项目设计”的三阶递升教学设计和“现象-问题-理论-方法-能力”的五环建构教学方法。教学过程中,我们采用启发式与讨论式相结合的互动教学模式,鼓励学生开放思维,积极创造,并最终完成了实验论文的撰写。这种教学方法不仅促进了学生的主动学习,还增强了他们对知识的深入理解。这一过程不仅锻炼了学生“问题发掘”与“自主创新”能力,还有效地将科研与教学相结合,实现了以研促学的目标。这一教学创新有效支撑了“物理光学”入选首批国家级一流本科课程和四川省高阶课程以及“光学原理”入选学校精品课程,为我校国家级一流专业-光电信息科学与工程专业和 A 类学科-光学工程的建设贡献了力量。

参 考 文 献

- [1] 吴书清, 李天初. 绝对重力仪的技术发展: 光学干涉和原子干涉[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 44-59.
WU S Q, LI T C. Technical Development of Absolute Gravimeter: Laser Interferometry and Atom Interferometry [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 44-59. (in Chinese)
- [2] YAO J M, WU K, GUO M Y, et al. An Ultralow-Frequency Active Vertical Vibration Isolator with Geometric Antispring Structure for Absolute Gravimetry [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(6): 2670-2677.
- [3] 吴书清. 基于自由落体原理的绝对重力仪关键技术的研究及应用[D]. 北京: 中国计量科学研究院, 2012.
WU S Q. The Research and Application of Absolute Gra-

- vimeter Based on Free-Fall Theory[D]. Beijing: National Institute of Metrology, China, 2012. (in Chinese)
- [4] LUO Q, CHEN L L, ZHANG H, et al. The effect due to imperfect optical surface of test mass in laser interferometry absolute gravimeters[J]. *Physica Scripta*, 2019, 94(12): 125007.
- [5] SHIOMI S. Rotational disturbance in laser-interferometric gravity gradiometry[J]. *Physica Scripta*, 2024, 99(6): 065015.
- [6] 刘达伦, 吴书清, 徐进义, 等. 绝对重力仪研究的最新进展[J]. *地球物理学进展*, 2004, 19(4): 739-742.
LIU D L, WU S Q, XU J Y, et al. The new evolution of Absolute Gravimeter [J]. *Progress in Geophysics*, 2004, 19(4): 739-742. (in Chinese)
- [7] 李春剑, 吴书清, 栗多武, 等. 光干涉绝对重力仪测量 A 类不确定度优化[J]. *光学精密工程*. 2021, 29(7): 1527-1538.
LI C J, WU S Q, SU D W, et al. Improvement method for type A uncertainty of interferometric gravimeter[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(7): 1527-1538. (in Chinese)
- [8] 叶玉堂, 张尚剑, 饶建珍. 光学教程[M]. 3 版, 北京: 清华大学出版社, 2024.
- YE Y T, ZHANG S J, RAO J Z. Optical Tutorial[M]. 3th ed. Beijing: Tsinghua Press, 2024. (in Chinese)
- [9] 胡其图, 何丽, 张小灵, 等. 信息技术与物理学基础课程的整合及其教学实践[J]. *物理与工程*, 2007, 17(1): 37-40.
HU Q T, HE L, ZHANG X L, et al. The integration between information technology and physics course teaching and its teaching application. [J]. *Physics and Engineering*, 2007, 17(1): 37-40. (in Chinese)
- [10] 柴康敏, 李翠莲, 钟菊花, 等. 基于 H5 的跨平台 3D 物理模拟和仿真实验 Web App 开发与教学实践[J]. *物理与工程*, 2018, S1(28):192.
CHAI K M, LI C L, ZHONG J H, et al. H5-Based Cross-Platform 3D Physics simulation and experiment Web App development and teaching practice[J]. *Physics and Engineering*, 2018, S1(28):192. (in Chinese)
- [11] 顾晨, 张留碗, 魏斌, 等. 清华大学 H5 数值仿真物理实验建设[J]. *物理与工程*, 2022, 32(4):125-130.
GU C, ZHANG L W, WEI B, et al. Construction of H5 numerical simulation experiment of physics in Tsinghua University[J]. *Physics and Engineering*, 2022, 32(4): 125-130. (in Chinese)
- (上接第 119 页)
- [5] 郭硕鸿. 电动力学[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2008: 130-135.
GUO S H. Electrodynamics[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2008: 130-135. (in Chinese)
- [6] 王振林. 现代电动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2022: 185-287.
WANG Z L. Modern electrodynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2022: 185-287. (in Chinese)
- [7] 徐亚东, 周航, 高雷. 信息技术优化教学方案 提升教学效果——以 COMSOL 在电磁学中的应用为例[J]. *物理通报*, 2019(12):22-24.
XV Y D, ZHOU H, GAO L. Information technology optimizes teaching programs and improves teaching effectiveness: a case study of COMSOL in electromagnetism [J]. *Physical Bulletin*, 2019(12): 22-24. (in Chinese)