

将物理知识融入数学方法：细推物理 润物无声 ——“数学物理方法”课程思政案例剖析

陈 聪 杨海彬 姚 琨 孙嘉庆

(海军工程大学基础部物理教研室, 湖北 武汉 430033)

摘 要 思政元素的挖掘和思政案例的建设是开展课程思政的基础工作之一。为丰富“数学物理方法”课程思政元素, 尝试从将物理知识融入数学方法的角度深度挖掘课程思政教育内容。分别从利用物理原理推导数学方法、借助物理现象求解数学方程、结合物理规律理解数学条件等方面给出三个教学案例, 详细介绍了教学案例的背景、内容、施训方法及思政效果。分析表明在“数学物理方法”课程教学中, 可以有意识地强化物理和数学的融合, 开展有特色的课程思政教育教学, 提高育人效果。

关键词 课程思政; 数学物理方法; 思政元素; 思政案例

BLENDING PHYSICAL KNOWLEDGE INTO MATHEMATICAL METHODS TEACHING AND DEVELOPING CURRICULUM IDEOLOGICAL AND POLITICAL EDUCATION IN THE COURSE OF MATHEMATICAL PHYSICAL METHODS

CHEN Cong YANG Haibing YAO Kun SUN Jiaqing

(Department of Basic Courses, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033)

Abstract The excavation of ideological and political elements and the construction of ideological and political teaching cases is one of the basic works of curriculum ideological and political education. In order to enrich the ideological and political elements of Mathematical Physics Methods, this paper attempts to explore the contents of ideological and political education from the angle of blending physical knowledge into mathematical methods. Three teaching cases have been given from the aspects of using physical principles to derive mathematical methods, solving mathematical equations based on physical phenomena, and understanding mathematical conditions by means of physical laws. And the background, contents, training methods and ideological and political effects of these teaching cases have been introduced in detail as well. The analysis shows that the deep integration of physics and mathematics can promote the development of ideological and political education with characteristics, and thus

收稿日期: 2022-03-09

基金项目: 学校教学研究立项“新时代课程思政视角下的《数学物理方法》课程建设”资助。

通信作者: 陈聪, 海军工程大学物理教研室教授, 384791656@qq.com。

引文格式: 陈聪, 杨海彬, 姚琨, 等. 将物理知识融入数学方法: 细推物理 润物无声——“数学物理方法”课程思政案例剖析[J]. 物理与工程, 2024, 34(2): 92-97.

Cite this article: CHEN C, YANG H B, YAO K, et al. Blending physical knowledge into mathematical methods teaching and developing curriculum ideological and political education in the course of Mathematical Physical Methods[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(2): 92-97. (in Chinese)

the value guidance of ideological and political education in the course of Mathematical Physics Methods can be realized.

Key words curriculum ideological and political education; mathematical physics methods; ideological and political education elements; teaching cases of ideological and political education

自2016年12月7日,习近平总书记在全国高校思想政治工作会议上的讲话中指出,高等学校“要坚持把立德树人作为中心环节,把思想政治工作贯穿教育教学全过程,实现全程育人、全方位育人”^[1]以来,课程思政已经引起了各领域教育专家和广大高校教师的高度关注,各种课程思政教学改革如雨后春笋,方兴未艾^[2-5]。作为一门经典的物理学专业基础课程,笔者所教授的“数学物理方法”课程也不例外,大量教师精心设计教学内容、恰当选择教学方法,融入思政元素开展课程思政,努力把知识传授、能力培养与价值引领统一起来,成效显著。

思政元素的挖掘和思政案例的建设是开展课程思政的基础工作之一。“数学物理方法”主要讲授复变函数及数学物理方程相关知识,为后续四大力学等理论物理课程的学习提供必要的数学基础和工具,复变函数部分主要学习解析函数的微积分性质、幂级数展开、留数、积分变换等内容,数学物理方程则包括定解问题的建立及行波法、分离变量法、格林函数法、积分变换法等解法,特殊函数部分主要学习勒让德函数及贝塞尔函数相关知识,因此思政元素的挖掘主要围绕数学哲学、数学美学、数学人文、数学精神、数学发展历史、数学方法应用等方面展开^[6-10]。

笔者认为,“数学物理方法”课程的核心是学习解决物理问题的数学方法,表面上看数学是表达物理问题和物理规律的语言,数学方法是解决物理问题的途径和手段,但实际上不仅物理学的发展推动了数学的进步^[11],而且一些数学方法还可以借助直观的物理图像来获得。在讲授数学方法过程中融入物理知识的应用,不仅能帮助学生掌握专业的数学知识,还能够从数学、物理认知客观世界的殊途同归中感受到客观规律的美、感受到科学方法的多样性,从而培养学生的辩证唯物主义世界观、逻辑思维、科学精神和创新意识,实现全方位育人的目标。

本文基于此,尝试给出几个物理知识融入数

学方法的案例,以丰富“数学物理方法”课程思政元素,并给出教学实践思路,在“细推物理”中,达到“润物无声”的课程思政效果。

1 冲量定理与 Duhamel 原理

1.1 Duhamel 原理的给出

在“数学物理方法”课程教学中,完成无界弦自由振动的 d'Alembert 公式的学习后,学生就开始接触无界弦或杆的纯强迫振动初值问题(Cauchy 问题),如

$$\begin{cases} u_{tt} - a^2 u_{xx} = f(x, t), -\infty < x < \infty, t > 0 \\ u|_{t=0} = 0 \\ u_t|_{t=0} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

和无界弦自由振动问题相比,泛定方程出现了非齐次项。显然把泛定方程齐次化,是解此定解问题的一个合理的思路^[12]。一般教材这时会直接给出 Duhamel 原理(齐次化原理),即

$$\begin{cases} w_{tt} - a^2 w_{xx} = 0, -\infty < x < \infty, t > \tau \\ w|_{t=\tau} = 0 \\ w_t|_{t=\tau} = f(x, \tau) \end{cases} \quad (2)$$

其中, τ 为参数。则前述纯强迫振动问题(1)的解为

$$u(x, t) = \int_0^t w(x, t; \tau) d\tau \quad (3)$$

事实上齐次化原理给出了求解双曲型及抛物型非齐次线性偏微分方程初值及初边值问题的基本思路和方法。但目前教材中一般就具体的定解问题给出此原理,然后将式(3)代回原定解问题式(1)中进行解的正确性的验证,而不会利用牛顿-莱布尼茨微积分理论严格的对其进行推导。由于缺乏对 Duhamel 原理来龙去脉的了解,导致学生“知其然不知其所以然”,教学效果不佳。

1.2 利用冲量原理推导

实际上,以一维无界弦的横振动为例,在物理

学最基本的原理之一——叠加原理的基础上,运用大学物理课程中的冲量定理(合外力的冲量等于物体动量的变化量),可以较为容易的推导出 Duhamel 原理。

(1) 由叠加原理,从时间域上对力的作用过程进行分割,对力的作用效果进行求和。

$0 \rightarrow t$ 时间段内持续力 $f(x, t)$ 的作用效果 $u(x, t)$ 等同于前后相继的多个时间间隔 $\tau \rightarrow \tau + \Delta\tau$ 上力的作用效果 $v(x, t; \tau)$ 的和,即

$$u(x, t) = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \sum v(x, t; \tau) \quad (4)$$

(2) 由冲量原理, $\tau \rightarrow \tau + \Delta\tau$ 上力的作用效果是给系统一定的冲量,带来动量的变化量。

考虑 $\Delta\tau \rightarrow 0$, 可视该时间间隔上 $f(x, t; \tau)$ 为恒力, 在质量不变的情况下, 考虑 $f(x, t; \tau)$ 的物理含义, 可带来速度的变化量为 $f(x, t; \tau)\Delta\tau$ 。

(3) 从作用效果等效的角度, 将 $\tau \rightarrow \tau + \Delta\tau$ 时间段上力的作用等效为 τ 时刻的瞬时作用效果, 则(2)中的速度改变量可视为是 τ 时刻获得的(成为 $\tau \rightarrow \tau + \Delta\tau$ 这个过程的初始条件), 而在 $\Delta\tau$ 的其他时间则没有力的作用($\tau \rightarrow \tau + \Delta\tau$ 这个过程的泛定方程成为齐次的)。因此 $v(x, t; \tau)$ 应满足如下定解问题

$$\begin{cases} v_{tt} - a^2 v_{xx} = 0, & -\infty < x < \infty, \tau + \Delta\tau > t > \tau \\ v|_{t=\tau} = 0 \\ v_t|_{t=\tau} = f(x, t; \tau)\Delta\tau \end{cases} \quad (5)$$

令 $v(x, t; \tau) = w(x, t; \tau)\Delta\tau$, 并代入式(5), 可得到 $w(x, t; \tau)$ 满足式(2), 再将 $w(x, t; \tau)$ 代入式(4), 即得式(3)。

上述(1)~(3)步对于已学过“大学物理”的本科生来讲, 物理思想明确, 物理图像清晰, 物理过程严谨, 易于理解和接受。带领学生一起完成这个推导过程, 不仅掌握了知识, 锻炼了思维, 更重要的是, 基于物理学原理可以分析得到一个基本的数学规律, 不免让学生惊叹于神奇的科学美, 深切感受到客观世界“真理”的唯一性和通往“真理”途径的多样性, 促使其唯物主义世界观的形成以及科学精神和创新意识的加强。

2 点电荷电场与狄氏格林函数

格林函数法是偏微分方程的常用解法之一,

也是本门课程的教学重点。狄氏问题的求解归根到底在于求出相应问题的狄氏格林函数。一般来说, 格林函数的求解并非易事, 特别是场域边界复杂的情况下。但物理思想的引入和物理原理的应用, 可以减少数学运算的工作量, 还可以得到形式比较简单且正确的格林函数的表达式。举两个教学案例加以说明。

例 1 三维泊松方程的基本解

无界空间中的格林函数 G 又称为相应方程的基本解, 应满足方程

$$\nabla^2 G(M, M_0) = -\delta(x - x_0, y - y_0, z - z_0) \quad (6)$$

格林函数法的教学往往在分离变量法之后进行, 因此式(6)的求解可以在球坐标系中采用分离变量法来进行。如果将点 $M_0(x_0, y_0, z_0)$ 取为球坐标系的原点, 则由于三维空间无界、 G 的分布与方向无关, 式(6)转化为

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dG}{dr} \right) = -\delta(r) \quad (7)$$

$r \neq 0$ 时, 解常微分方程 $\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dG}{dr} \right) = 0$, 可得 $G = -C \frac{1}{r}$, 其中 C 为待定系数。

$r = 0$ 时, 则将式(7)在以原点为球心、 ϵ 为半径的小球体内积分, 由 $\delta(r)$ 函数的性质, 可得待定系数 $C = -\frac{1}{4\pi}$ 。所以最终得到三维泊松方程的基本解

$$G(M, M_0) = \frac{1}{4\pi r} \quad (8)$$

其中, r 表示点 $M(x, y, z)$ 到 M_0 的距离。

上述解法中包含了之前所学的诸多知识点, 如球坐标系中的分离变量、 $\delta(r)$ 函数的性质、常微分方程的求解等等, 特别是当 $r = 0$ 时, 由于 $\delta(r)$ 函数的性质而不得不采取的体积分, 往往是笔者经常强调需要学生多加体会的地方。

从数学解题技巧训练及知识点综合运用角度来看, 显然上述解法是学生必须要掌握的。但如果我们的教学仅止步于此, 则会无形中淡化学生对格林函数物理含义的理解, 从而影响学生对格林函数法的学习和应用。

事实上, 分析一个学生熟悉的物理现象可以直观的获得式(6)的解。考虑一个位于 $M_0(x_0, y_0, z_0)$

点、带电量为 ϵ_0 的正的点电荷。由静电场高斯定理的微分形式可得该点电荷的电场强度满足

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{\epsilon_0}{\epsilon_0} \delta(x - x_0, y - y_0, z - z_0) \\ &= \delta(x - x_0, y - y_0, z - z_0)\end{aligned}\quad (9)$$

再由电场强度和标量电位之间的负梯度关系

$$\mathbf{E} = -\nabla U \quad (10)$$

可得该点电荷的标量电位应满足

$$\nabla^2 U(M) = -\delta(x - x_0, y - y_0, z - z_0) \quad (11)$$

显然式(11)与式(6)为同一个方程。而在大学物理课程中学生已经知道,在现有理论体系及符号规定之下,实验已经证明该正的点电荷在 $M(x, y, z)$ 处产生的标量电位为

$$U(M) = \frac{1}{4\pi r} \quad (12)$$

r 含义同前,因此式(12)为式(11)的解,同样式(7)的解应为式(8)。通过这样一个补充分析,学生自然明白了三维泊松方程基本解 G (无界空间中的格林函数)的物理含义——一定边界条件下位于 M_0 的点源在 M 点产生的场分布,进而对狄氏积分公式也就有了更深的理解,同时还为有界空间中的狄氏格林函数的求解奠定了基础,见下例。

例 2 镜像法求上半空间的狄氏格林函数

上半空间的狄氏格林函数应满足下述定解问题

$$\begin{cases} \nabla^2 G(M, M_0) = -\delta(x - x_0, y - y_0, z - z_0), \\ z > 0 \\ G|_{z=0} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式(13)可以用本征函数展开法进行求解,一般情况下可得到一个无穷项求和形式的解。求解过程相对繁琐,且所得格林函数形式复杂,导致实际应用受限。再加上式(13)并不是训练本征函数展开法的典型问题,所以该问题的求解往往采用物理中的“镜像法”来进行。

有了例 1 的基础,学生不难分析出式(13)对应的物理问题,即将一无限大接地导体板置于 $z=0$ 平面,并将带电量为 ϵ_0 的正的点电荷置于上半空间的 $M_0(x_0, y_0, z_0)$ 点处,此时上半空间中的标量电位分布即待求格林函数 G 。

上述接地导体板存在时点电荷的电场分布问

题是静电学中静电感应部分的一个典型问题,在大学物理课程中一般都进行过详细讨论和学习^[13]。根据静电感应相关规律可知,空间中的电位分布是由 M_0 点处的正点电荷和导体板上的感应电荷共同产生的,且分布在导体板表面的感应电荷所产生的电位可以用该正的点电荷的“镜像电荷”所产生的电位来等效——这就是“镜像法”的基本思想。具体实施时,可将镜像电荷置于正的点电荷关于接地导体板的镜像点 $M'(x_0, y_0, -z_0)$ 处,再根据导体板接地时其上任意点标量电位为 0 的条件确定出镜像电荷的电荷量为 $-\epsilon_0$ 。由此很快可以得到式(13)的解应为

$$G(M, M_0) = \frac{1}{4\pi r} - \frac{1}{4\pi r'}, \quad z > 0 \quad (14)$$

其中, r' 表示点 $M(x, y, z)$ 到镜像点 M' 的距离。

尽管借助物理原理及物理方法,非常直观地得到了上半空间的狄氏格林函数,但初学者往往还会心存疑惑,式(14)真的是式(13)的解吗?为打消学生的疑惑,加深学生对数物融合的认识,接下来,我们可以再回到数学方法的应用上。利用数学上线性方程所满足的叠加原理,定解问题式(13)的解可以写为

$$G(M, M_0) = g(M, M_0) + f(M, M_0), \quad z > 0 \quad (15)$$

其中, $g(M, M_0)$ 、 $f(M, M_0)$ 分别满足下述两个定解问题,即

$$\nabla^2 g(M, M_0) = -\delta(x - x_0, y - y_0, z - z_0) \quad (16-1)$$

$$\begin{cases} \nabla^2 f(M, M_0) = 0, & z > 0 \\ f|_{z=0} = -g|_{z=0} \end{cases} \quad (16-2)$$

式(16-1)的解为例 1 中的基本解,即 $g(M, M_0) = \frac{1}{4\pi r}$ 。在此基础上式(16-2)可改写为

$$\begin{cases} \nabla^2 f(M, M_0) = 0, & z > 0 \\ f|_{z=0} = -\frac{1}{4\pi r} \Big|_{z=0} \end{cases} \quad (17)$$

此时可请学生根据所学知识,自行写出位于 $M'(x_0, y_0, -z_0)$ 处、电荷量为 $-\epsilon_0$ 的点电荷在上半空间所产生的标量电位分布所满足的定解问题,即式(17),自然得到其解为 $f(M, M_0) = \frac{1}{4\pi r'}$ 。 $g(M, M_0)$ 和 $f(M, M_0)$ 相加即式(14),由此又结合数学方法的运用,验证了所求上半空间狄氏格

林函数的正确性。

物理图像和物理规律的恰当引入,无疑使复杂问题的求解更为直观,对于非数学专业的学生来讲,更利于他们专注于数学方法的本质而不仅仅只关注表面繁琐复杂的理论推导和数学证明。另外在教学过程中数学方法与物理知识的交叉运用、相互印证,也能使课堂教学内容更富有张力,学生的抽象思维能力、创新思维能力都得到锻炼。

3 热力学第二定律与第三类边界条件

“数学物理方法”课程的一个重要的教学目标是掌握把物理问题正确地“翻译”成数学语言的方法,也就是根据物理问题,写出相应的定解问题,这是用数学方法解决物理问题的第一步。

定解问题包括泛定方程和初始条件及边界条件,初始条件反映了物理系统的初始状态,边界条件则是系统边界上发生的物理过程的描述。在这部分的教学中,通常是借助几个典型过程,如杆的振动、杆的导热过程,给出第一类、第二类和第三类边界条件的一般形式,如第三类齐次边界条件可写为^[14]

第三类: $\alpha u + \beta u_x|_{x=0} = 0, \alpha' u + \beta' u_x|_{x=L} = 0$
其中, $\alpha, \beta, \alpha', \beta'$ 为常数。单纯从数学上来看,第三类边界条件中的系数是无限制条件的。但实际情况呢?在学完分离变量法后,可以带领学生从两个方面进行分析^[15]。

(1) 从物理学原理出发,可分析得到 u 与 u_n (u 在边界面外法线方向上的导数)前面的系数应该同号。以放置在 x 轴上 $0-L$ 上的一维杆的导热问题为例,若左端点 $x=0$ 放置在温度为 0 的空间中自由冷却,则由牛顿冷却定律可得 $\alpha u + \beta u_x|_{x=0} = 0$ 且 α, β 异号;若右端点 $x=L$ 放置在温度为 0 的空间中自由冷却,则由牛顿冷却定律可得 $\alpha' u + \beta' u_x|_{x=L} = 0$ 且 α', β' 同号。产生这个现象的根源在于热传导现象应符合热力学第二定律,即热量只能自动的从高温物体流向低温物体而不能反其道而行之,这是大自然的一个基本规律,只要是一个真实的热传导现象,就一定满足这个定律。边界上所发生的热传导现象也符合这个规律,因此边界条件中的系数是有正负的。

那么数学方法是否支持这种自然界客观规律的不可违背性呢?也就是说有没有可能边界条件

不满足物理学原理的定解问题也是有解的呢?

(2) 从数学方法出发,假设定解问题中的第三类边界条件不符合(1)中所述要求,仍然用分离变量法进行求解。很快就会发现,分离变量后所得的本征值问题无解,因此原定解问题无解。反过来,若边界条件符合(1)中所述要求,则对应的本征值问题有解,且解(本征函数)有无穷多个。

也就是说,对于真实存在的客观规律,数学方法和物理规律是高度一致的,这无疑能让学生感受到大自然和谐之美、科学世界神奇之美的冲击,从而激发出对未知世界强烈的好奇心,增强其探索未知、追求真理的责任感和使命感。

4 结语

数学物理方法是应用数学基础知识解决实际问题的方法,它是连接数学理论与物理问题的桥梁,因此笔者认为“数学物理方法”课程思政可在借鉴其他数学课程做法的基础上,有意识强化物理和数学的融合,开展有特色的课程思政教育教学。近几年来,笔者所在的课程教学团队从利用物理原理推导数学方法、借助物理现象求解数学方程、结合物理规律理解数学条件等角度入手,针对性的选取教学内容,开展教学案例建设,并将之用于教学实践,取得了较好的实践效果。学生普遍反映,采用数物融合的教学方法,起到了激发学习兴趣、深化内容理解、强化思维训练的作用,有效提升了课程教学效果。

本文选取了三个教学案例,详细介绍了将物理知识融入数学方法、深度挖掘课程思政教育内容的想法和做法。通过分析教学案例的背景、内容、施训方法及思政效果,表明该方法不仅有助于帮助学生深度理解知识,训练科学思维,还能引导学生感受客观规律的美、感受科学方法的多样性,从而培养学生的辩证唯物主义世界观、科学精神和创新意识,激发学生探索未知、追求真理、勇攀科学高峰的责任感和使命感,充分发挥“数学物理方法”课程的育人功能。

参 考 文 献

- [1] 习近平. 把思想政治工作贯穿教育教学全过程开创我国高等教育事业发展新局面[N]. 人民日报, 2016年12月09日(001).
- [2] 单洁, 卢光跃, 田巧娣. 基于课程思政的教学设计研究与探索

- [J]. 高教学刊, 2021(5): 189-192.
- SHAN J, LU G Y, TIAN Q D. Research and exploration of teaching design based on ideological and political education [J]. Journal of Higher Education, 2021(5): 189-192. (in Chinese)
- [3] 白亚乡, 汪静. 在物理教学中引入“思政”课程的研究与实践 [J]. 教育教学论坛, 2019 (44): 158-159.
- BAI Y X, WANG J. Study and practice on introducing “Ideological and Political” course in the physics teaching [J]. Education Teaching Forum, 2019(44): 158-159. (in Chinese)
- [4] 陈恒雷, 吴钊峰, 凌海秋. 融入“思政教育”的物理类通识教育课程建设 [J]. 教育教学论坛, 2020, 2 (9): 42-44.
- CHEN H L, WU Z F, LING H Q. Construction of physical general education course with ideological education [J]. Education Teaching Forum, 2020, 2(9): 42-44. (in Chinese)
- [5] 杨威, 陈怀琛, 刘三阳. 大学数学类课程思政探索与实践——以西安电子科技大学线性代数教学为例 [J]. 大学教育, 2020(3): 76-79.
- YANG W, CHEN H C, LIU S Y. Exploration and practice of ideological and political work in college mathematics courses [J]. University Education, 2020(3): 76-79. (in Chinese)
- [6] 高红亚. “数学分析”中课程思政若干案例 [J]. 保定学院学报, 2020, 33 (5): 112-116.
- GAO H Y. Some cases of ideological and political education through all courses in the course of “Mathematical Analysis” [J]. Journal of Baoding University, 2020, 33(5): 112-116. (in Chinese)
- [7] 杜晓宁.《高等数学》课程思政教学改革探讨 [J]. 教育现代化, 2019, 6(52): 60-61, 74.
- DU X N. Probe into the reform of ideological and political education in higher mathematics [J]. Education Modernization, 2019, 6(52): 60-61, 74. (in Chinese)
- [8] 刘大莲, 曹彩霞, 刘佳. 高等数学课程思政探索及经典案例分析 [J]. 北京联合大学学报, 2021, 35(3): 33-38.
- LIU D L, CAO C X, LIU J. Exploration and classical case analysis on the ideological and political education in advanced mathematics [J]. Journal of Beijing Union University, 2021, 35(3): 33-38. (in Chinese)
- [9] 郑苏娟, 陈璐, 嵇敏. 融于理工科拔尖创新人才培养体系中的思政元素——以河海大学大禹学院《工科数学分析》思政教育改革为例 [J]. 大学数学, 2020, 36(6): 35-40.
- ZHENG S J, CHEN L, JI M. The thought and politics elements in the system of the cultivation of innovative talents in science and engineering [J]. College Mathematics, 2020, 36(6): 35-40. (in Chinese)
- [10] 吴国春, 张映辉, 肖长国. 探讨“数学分析”课程思政教学策略——发掘课程思政元素, 构建科学教学体系 [J]. 教育教学论坛, 2021(22): 129-133.
- WU G C, ZHANG Y H, XIAO C G. Study on the teaching strategies of curriculum ideological and political education in the course of Mathematical Analysis: Discovering the ideological and political elements in the course and constructing a scientific teaching system [J]. Education Teaching Forum, 2021(22): 129-133. (in Chinese)
- [11] 梁昆森. 数学物理方法 [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [12] 谷超豪, 李大潜, 陈恕行. 数学物理方法 [M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [13] 康颖. 大学物理(上册) [M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2019.
- [14] 姚端正. 数学物理方法 [M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2020.
- [15] 吴崇试. 关于数学物理方法课程的若干问答(续 1) [J]. 大学物理, 2011, 30(6): 1-3.
- WU C S. Some questions and answers on the course of mathematical physics methods (continued 1) [J]. College Physics, 2011, 30(6): 1-3. (in Chinese)
- (上接第 91 页)
- KANG X P, HE Z, ZHAO L M, et al. Cultivating students' innovation ability in the physics experiment of college and university [J]. Journal of Science of Teachers' College and University, 2018, 38(8): 93-95, 99. (in Chinese)
- [6] 黄丽, 刘伟龙, 赵海发, 等. “同向同行”的大学物理实验课程思政教学设计与探索 [J]. 物理与工程, 2019, 29(Z1): 37-39.
- HUANG L, LIU W L, ZHAO H F, et al. Design and exploration of ideological teaching in college physics experiment course [J]. Physics and Engineering, 2019, 29(Z1): 37-39. (in Chinese)
- [7] 师玉荣, 马君. 物理实验类通识课程教学模式的探索与实践——以“探究物理现象”为例 [J]. 物理实验, 2021, 41(10): 50-54.
- SHI Y R, MA J. Teaching mode of physics experiment general courses—Take exploring physical phenomena as an example [J]. Physics Experimentation, 2021, 41(10): 50-54. (in Chinese)
- [8] 李鹏. “大学物理实验”课程教学改革策略探索 [J]. 教育教学论坛, 2021, 10: 65-68.
- LI P. Exploration on the teaching reform strategy of the course of college physics experiment [J]. Education Teaching Forum, 2021, 10: 65-68. (in Chinese)
- [9] 柴志方, 胡炳文, 陈廷芳, 等. 大学物理实验 [M]. 高等教育出版社, 2022.
- [10] VOIGTLÄNDER B. Scanning Probe Microscopy: Atomic Force Microscopy and Scanning Tunneling Microscopy [M]. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2015: 9.
- [11] LI Q, XUE C, LIU J P, et al. Measurements of the gravitational constant using two independent methods [J]. Nature, 2018, 560: 582-588.