

理工科大学物理课程中量子物理教学的多层次设计 ——基于《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2023 版)

刘世勇 袁晓忠 胡其图

(上海交通大学物理与天文学院, 上海 200240)

摘 要 教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会最新公布的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2023 版)量子物理部分增加了态叠加原理、力学量与算符、全同粒子、定态微扰等内容作为必修内容,如何将这些内容与原有大学物理课程架构有机结合是当前教学研究中的重要问题。本文在考虑量子力学基本理论框架和大学物理课程学时实际情况的基础上,对量子物理的教学内容进行优化设计,提出少课时、标准课时和较多课时这三种情况下的教学内容方案。

关键词 量子力学基本原理;大学物理;教学内容设计

A MULTI-LEVEL DESIGN FOR QUANTUM PHYSICS TEACHING IN UNIVERSITY PHYSICS COURSES FOR SCIENCE AND ENGINEERING MAJORS: BASED ON THE BASIC REQUIREMENTS FOR TEACHING UNIVERSITY PHYSICS COURSES FOR SCIENCE AND ENGINEERING MAJORS (2023 EDITION)

LIU Shiyong YUAN Xiaozhong HU Qitu

(School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract Recently, the Teaching Steering Committee for University Physics Course of the Ministry of Education released *the Fundamental Requirements for University Physics Course in Science and Engineering* (2023 Edition), adding essential topics—including the superposition principle, physical quantities and operators, identical particles, and stationary perturbation theory—to the quantum physics section of university physics course. Integrating these additions coherently with the existing course structure represents a critical challenge in current pedagogical research. This paper presents an optimized design for the content of quantum physics section, accounting for both the fundamental theoretical framework of quantum me-

收稿日期: 2025-08-29

基金项目: 本论文为教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会 2022 年立项的优秀结题研究项目成果。

通信作者: 刘世勇, liusy@sjtu.edu.cn。

引文格式: 刘世勇, 袁晓忠, 胡其图. 理工科大学物理课程中量子物理教学的多层次设计——基于《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2023 版)[J]. 物理与工程, 2025, 35(4): 126-132.

Cite this article: LIU S Y, YUAN X Z, HU Q T. A multi-level design for quantum physics teaching in university physics courses for science and engineering majors: Based on the basic requirements for teaching university physics courses for science and engineering majors (2023 edition)[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(4): 126-132. (in Chinese)

chanics and practical constraints on class hours. We propose tailored content frameworks for three scenarios: courses with limited, standard, and increased class hours.

Key words fundamental principles of quantum mechanics; university physics; content design

现代社会的技术成就深刻依赖于量子力学,解释和预测材料性质、理解半导体器件(如集成电路中的核心元件)的工作原理、化学物质的合成与分解等都离不开这一基础性理论。特别是自 20 世纪 80 年代以来,融合量子特性与信息科学的量子信息学科,在通信、计算与精密测量等领域展现出超越传统技术的独特优势^[1]。

然而,当前高等学校理工科基础必修课“大学物理”中的量子物理教学普遍存在教学内容偏少的问题。以 2010 版《理工科类大学物理课程教学基本要求》为例^[2],其量子物理部分主要聚焦于微观粒子的波粒二象性与能量量子化概念,未涉及力学量算符表示、量子测量导致波函数坍缩、态叠加原理等量子力学基本原理方面的内容。

过于浅显的教学内容不利于创新型本科人才的培养,无法使学生对量子计算和量子通信等前沿技术有深刻的理解,也不利于学生全面掌握现代科学技术的发展趋势。如何通过合理的课时分配,在非物理类理工科专业学生修读的大学物理课程中增加量子物理的教学内容是当前大学物理教学亟需解决的问题。教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会于 2023 年公布了新的《理工科类大学物理课程教学基本要求》^[3](简称《基本要求》),增加了态叠加原理、力学量与算符、对易关系、全同粒子、定态非简并微扰等内容^[4],然而如何结合现有学时,将这些内容有机地融合到大学物理课程教学中,是当前教学需要解决的问题。

在大学物理课程中深入讲授量子力学基本原理,还需要考虑不同高校不同专业大学物理总课时的差异性。由于学期时间安排、人才培养目标等因素的不同,国内各高校大学物理课程开设的总学时也不尽相同。比较常见的是,大学物理总课时约为 128 课时(我们称为标准课时情形),也有的学校设计的大学物理课时比 128 课时少,约 100 课时(称为少课时情形),而有的培养计划对大学物理课程要求比较高,比如工科强基计划专业、工科的拔尖计划等,总的大学物理课时能达到

160 课时(称为较多课时情形)。本文在充分考虑国内大学物理课程课时数具体情况和非物理类理工科学生数学知识储备的基础上,在保证量子力学基本原理框架完整的前提下,结合 2023 版《基本要求》,设计三个层次(少课时、标准课时、较多课时)的量子物理教学内容,并介绍上海交通大学教学实践的经验。需要指出的是,虽然已有教材在大学物理课程框架下给出了完整讲授量子力学原理的解决方案^[5],然而在教学实践中仍需根据课时进行教学内容上的筛选。

1 传统大学物理课程中量子物理的教学内容

一般认为,量子力学是基于 5 个基本假设建立起来的:微观粒子状态由波函数来描述;用厄米算符来表示力学量;力学量的测量值为厄米算符的本征值,测得该值的概率等于状态波函数用算符本征波函数展开的系数的模平方;状态随时间演化遵循薛定谔方程;全同多粒子系统状态波函数应遵循全同性原理^[6,7]。这些假设围绕量子力学统计性这一基本属性展开,说明统计规律如何随时间演化、统计规律如何确定力学量的测量值及测得测量值的概率、全同多粒子统计规律的特殊性等问题。

然而,由于《基本要求》(2010 版)量子物理部分必修内容(如表 1 所示)强调物质的波粒二象性和能量量子化,未能完整覆盖上述量子力学中的 5 个假设,所以,当下流行教材对量子力学基本原理采取避而不谈的态度。教学实践中,由于大学物理中量子物理这部分内容与中学课程内容存在重复、课时偏少等情况,常常对量子物理教学内容简单一提,一带而过。事实上,正如文献[8]指出的那样,建立物质波粒二象性和量子化的概念,是从经典物理到量子物理过渡的重要阶梯而已,并非量子力学基本原理必须的,在 21 世纪的今天,我们完全可以在这阶梯的基础上,完整地讲授量子力学的基本原理,并在学时充裕时,还可进一步讲授基本原理的应用。

表 1 2010 版《基本要求》必修内容和大致学时安排

序号	模块	备注
1	黑体辐射、光电效应、康普顿散射	树立光的粒子性概念,约 3~4 学时,黑体辐射、光电效应为中学物理内容
2	戴维孙-革末实验、德布罗意的物质波假设	树立物质波动性的观点,约 2 学时,为中学物理内容
3	波函数及其概率解释	物质波动性的描述,约 1 学时
4	不确定关系	物质波动性的结果,约 1 学时,中学物理有所涉及
5	薛定谔方程	以自由粒子波函数为例,说明如何建立薛定谔方程,并导出在势函数不含时间自变量时的定态薛定谔方程,约 1 学时
6	一维无限深势阱	定态薛定谔方程的简单应用,导出微观粒子能量量子化概念,约 1 学时
7	一维势垒、隧道效应、电子隧道显微镜	定态薛定谔方程的简单应用,物质波动性的具体体现,约 1 学时
8	氢原子的能量和角动量子化	简单介绍氢原子定态薛定谔方程中的角量子数、磁量子数和主量子数等三个量子数,理解轨道角动量大小量子化和角动量投影量子化的概念,约 1 学时
9	电子的自旋及斯特恩-盖拉赫实验	介绍自旋的发现历程,阐述自旋角动量的性质,约 1 学时
10	泡利原理、原子壳层结构、元素周期表	介绍多电子原子的泡利不相容原理,并介绍多电子原子的壳层结构,约 1 学时

2 大学物理课程中量子物理教学内容的优化

显然,当前大学物理课程量子物理教学中,未涉及力学量用厄米算符表示和关于量子测量的假设,而且未完整讲述多粒子系统全同性原理。在《基本要求》(2023 版)中,则明确增加了态叠加原理、力学量与算符、全同粒子、定态微扰这些内容作为必修内容,为了将这些新增内容与量子力学基本原理的理论框架有机结合,我们根据课程学时多少,对大学物理课程中量子物理教学内容进行了优化设计。

2.1 少课时教学内容的优化设计

算符、算符本征值、力学量测量假设这些内容是量子力学理论框架的核心内容,在教学中增加这些内容显得尤为重要。当然,这些内容也是针对非物理类理工科大学生讲授大学物理量子物理部分的难点,因此,在教学内容设计中,要避免过于数学化使学生失去学习兴趣,又要告诉学生采用这样处理的原因,提升他们的学习兴趣。在考虑这些因素的前提下,基于核心内容提升

和讲授完整量子力学基本原理的思想,我们在表 2 中给出了少课时大学物理量子物理教学内容设计。

少课时量子物理部分优化后增加的内容包括三个方面。

(1) 位置坐标算符和动量算符的引入。在建立薛定谔方程前,基于不确定关系,指出量子力学中力学量用算符表示的必要性,力学量用算符表示的原则要基于力学量的平均值,并给出动量算符和位置坐标算符的具体形式。讲授薛定谔方程时可明确指出哈密顿算符的具体形式,并在导出定态薛定谔方程后引出算符的本征值和本征波函数的概念。

(2) 态叠加原理与测量。在讲述将定态薛定谔方程用于求解一维无限深势阱问题之后,阐述求解含时薛定谔方程初值问题的一般步骤,指出这一问题的解一般都需要将定态薛定谔方程的解进行线性组合,从而体现态叠加原理在量子物理中的重要性。基于初值问题线性叠加解可进一步解释量子力学关于量子测量的假设,使学生深刻理解测量值和平均值之间的关系。

表 2 少课时大学物理量子物理内容的优化设计

序号	模块	备注
1	德布罗意的物质波假设及实验证明	在简单介绍高中黑体辐射、光电效应部分结论的基础上,介绍德布罗意基于类比思想的物质波假设,以及戴维孙革末实验、电子单缝衍射、双缝衍射等实验验证,约 2 学时
2	波函数、波函数归一化及其概率解释	物质波动性的描述,可比较波函数与热学中分布函数的异同,约 1 学时
3	不确定关系	物质波动性的结果,这是后续阐述动量需要用算符表示的基础,约 1 学时
4	量子力学中的位置坐标算符和动量算符	给出位置坐标算符和动量算符的形式,并进一步给出哈密顿算符,约 1 学时
5	薛定谔方程	以自由粒子波函数为例,说明如何建立薛定谔方程,并导出在势函数不含时间自变量时的定态薛定谔方程,并明确指出,算符的本征值是力学量的测量值,约 1 学时
6	一维无限深势阱	定态薛定谔方程的简单应用,导出微观粒子能量量子化概念,约 1 学时
7	一维薛定谔方程的定解问题,量子力学关于测量的假设	基于一维无限深势阱解,阐述函数正交的概念,给出定态的概念,并以满足初始状态的解应是定态解叠加而给出态叠加原理,根据叠加态给出量子力学关于测量的假设,阐述测量值与平均值的关系,约 2 学时
8	一维势垒、隧道效应、电子隧道显微镜	定态薛定谔方程的简单应用,物质波动性的又一具体体现,约 1 学时
9	氢原子的能量和角动量量子化	简单介绍氢原子定态薛定谔方程中的角量子数、磁量子数和主量子数等三个量子数,理解轨道角动量大小量子化和角动量投影量子化的概念,约 1 学时
10	电子的自旋及斯特恩-盖拉赫实验	介绍自旋的发现历程,阐述自旋角动量的性质,约 1 学时
11	泡利原理、原子壳层结构、元素周期表	阐述全同量子波函数的不可分辨性和交换对称性,介绍多电子原子的泡利不相容原理,并介绍多电子原子的壳层结构,约 2 学时

(3) 全同粒子。增加全同粒子不可分辨性的介绍,指出多粒子波函数的交换对称性,并基于交换对称或反对称,阐述了费米子和玻色子的区别,使学生深刻理解泡利不相容原理。

这样的教学内容设计涵盖了量子力学的 5 个基本假设,所需学时约为 14 学时,大体上与表 1 所列现有教学内容所需学时相当,但已可使学生对量子物理的基本原理有了较为全面的认识。

这样的教学内容设计秉承了大学物理由浅入深、以小见大的传统。在“量子力学中的位置坐标算符和动量算符”部分,为了避免使用傅里叶变换等复杂的数学手段,可根据自由粒子波函数,定性地给出动量算符的定义,并说明该算符在一般情形也成立。在讲述“一维薛定谔方程的定解问题,量子力学关于测量的假设”部分之前,可描述一维无限深势阱定态薛定谔方程本征波函数的性质,从而阐明定态及波函数正交性的概念,同时引导

出“已知初始状态,如何确定任何时刻状态的问题”,从而便于推广到一般一维离散能级问题。

需要指出的是,为了避免过于数学化,上述课时较少时教学内容设计未能包括《基本要求》(2023 版)中要求必须讲解的一维谐振子和非简并定态微扰,也未能就力学量能同时确定的条件、角动量大小算符与角动量分量算符之间的关系等问题展开讨论。

2.2 标准课时教学内容的优化设计

基于进一步丰富应用的教学理念,为了覆盖《基本要求》(2023 版)所有必修内容,我们设计了标准课时量子物理教学内容,如图 1 所示,这些教学内容约需 22 课时。

在少课时的基础上,标准课时条件下增加的主要内容包括四个方面。

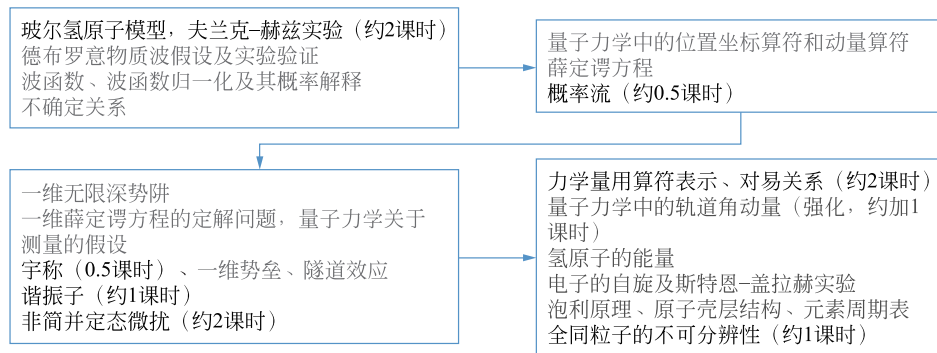


图1 标准课时条件下大学物理中量子物理教学内容的优化设计,深色部分为相对课时较少时增加的教学内容

(1) 氢原子能谱和玻尔氢原子理论。为后续介绍量子力学处理氢原子能量量子化问题打下基础。

(2) 概率流概念。在介绍薛定谔方程时,介绍概率流的概念,为后续一维势垒隧穿效应中定义透射率和反射率做好准备。

(3) 算符深入及微扰近似。在一维定态薛定谔方程的应用中增加宇称的概念,为详细求解一维方势垒问题打下基础。同时,增加谐振子问题的求解,使学生对量子力学中常用的模型有深入的理解。另外,一维薛定谔方程的应用还增加了非简并定态微扰理论,使学生了解量子力学中常用的近似方法。

(4) 对易关系和角动量算符。增加“力学量算符表示、对易关系”方面的内容,不仅介绍力学量算符厄密性、本征值实数性等问题,也介绍力学量能同时测定的条件,并给出准确的位置-动量不确定关系。这些内容为阐明量子力学对角动量大小、角动量分量以及它们之间关系打下坚实基础。

以上对标准课时条件下优化的教学内容,不仅涵盖量子力学基本假设,而且也覆盖2023年版《基本要求》中要求的必修内容。

需要指出的是,在实际教学内容的讲述上,应尽量避免烦琐的数学运算,力求明晰地呈现量子力学基本原理背后的物理内涵。例如,讲述谐振子的能量和波函数时,没有必要推导厄米多项式,而是简单给出即可,即便如此,也可根据已有的定态波函数正交性指出这些波函数之间的正交关系,也可根据已讲述的“态叠加原理与测量假设”,以谐振子为例来说明平均值与测量值的关系等。

2.3 较多课时教学内容的优化设计

随着人们对量子物理在理工科专业人才培养

里重要性认识的加强,有的学校或增加大学物理课程总学分以便详细讲授量子力学基本原理,或额外开设针对特定专业的量子物理课程。例如,上海交通大学自2020级起,对大学物理课程进行了改革,在原有大学物理课程的基础上,增加了32课时的大学物理[课程名称为《大学物理(3)》,开设在大学二年级第二学期],专门用于讲授量子力学的基本原理。文献[9]则介绍了南京邮电大学在集成电路科学与工程学院开设量子力学的教学情况。由于独立讲授量子力学课程有一些成熟的教材可供参考^[10-14],这里不再累述,我们聚焦于阐述在大学物理课程框架下开展多课时量子物理教学的内容设计。

基于知识体系内部应具有自洽性和外延则应成为专业学习夯实基础的理念,我们设计了较多课时的教学内容,如图2所示。相对标准课时增加的内容包括四个方面。

(1) 简并的概念。非简并定态微扰是《基本要求》(2023版)要求的必修内容,在课程内容中应阐述简并和非简并的概念,同时,对于微电子、材料等工科专业本科生,后续还需学习载流子统计等方面的知识,其中也涉及简并的概念。因此,当课时较多时,可以引入简并的概念,并对一维薛定谔方程本征值的简并和非简并问题展开讨论。

(2) 跃迁的概念。在介绍玻尔关于氢原子模型的假设时,提到能级间跃迁问题,众所周知,玻尔模型为半经典模型,诸如轨道半径等概念实际上是错误的,但跃迁这一概念却是量子力学中的重要概念,因此有必要阐述量子力学是如何处理跃迁的,而且在化工、材料、光学工程等工科专业本科生后续学习中,也将涉及能级跃迁这一概念。因此,当课时较多时,可以讲述非简并含时微扰,

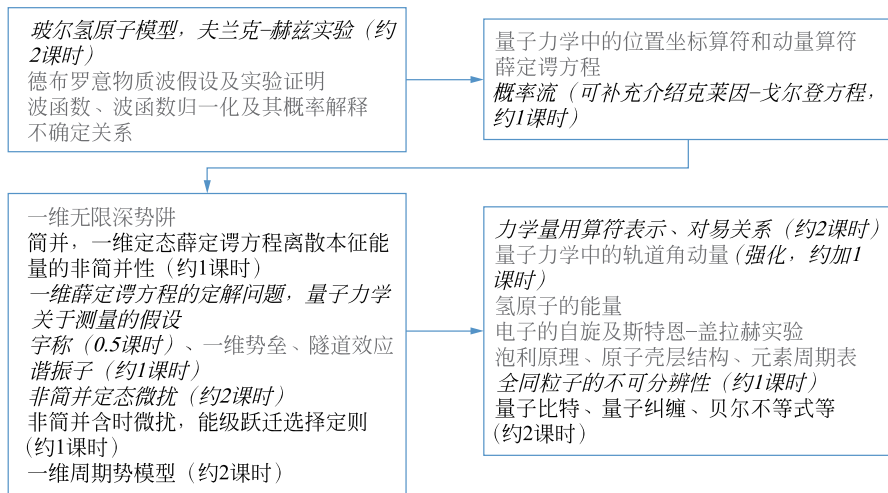


图2 较多课时大学物理中量子物理教学内容的优化设计

深色斜体部分为标准课时相对课时较少时增加的教学内容,而深色正体部分则是在标准课时的基础上增加的内容

阐述选择定则。

(3) 能带的概念。能带的观点是现代物理处理固体的重要思想,因此在多学时情况下,介绍一维周期势模型,使学生掌握能带的概念,为材料、化工等理工科专业学生的后续学习打下基础。

(4) 量子比特和量子纠缠。讲授量子比特、量子纠缠等基本概念和量子不可克隆定理,介绍量子物理在量子计算和量子通信中的应用,一方面可激发学生的学习兴趣,另一方面也可使学生掌握一定的量子信息方面的基础知识。

上述教学内容设计总计约需 30 课时。这些内容不仅覆盖量子力学基本假设,而且对原理的应用做了一定程度的展开,对学生后续学习起到支撑作用。

3 教学实践中的经验

上海交通大学自 2020 级起,对大学物理课程进行了改革,在大学二年级下学期增加了 32 课时的大学物理(3),专门用于讲授量子力学的基本原理。这一改革措施为在大学物理课程中较深入地讲授量子力学基本原理提供了课时上的保障。

我们在 2022 年春到 2025 年春进行了 4 轮教学实践。教学内容不仅包括上述标准课时的教学内容,还在自旋的描述、双态系统的动力学过程等方面有所拓展,课程的总评成绩由占比 40% 的平时成绩和占比 60% 的期末考试成绩两部分构成。统计 4 年参加期末考试的学生成绩表明[学生人

数在 1500 到 1800 人不等(每年有所差别)],期末卷面平均分能达到 74 分到 80 分,总评成绩平均分则可达 83 分到 87 分,而且卷面成绩 85 分及以上学生数占总人数的比例在 1/3 到 1/2 范围之内。这些指标都高于讲授力学、电磁学、热学、光学的大学物理(1)和大学物理(2)课程,显示学生学习效果较好,这一结果与上海交通大学非物理类理工科专业普遍开设诸如《线性代数》《数理方法》《概率与统计》等必修课程有一定的关系,学生能较为轻松地克服数学上的障碍。

需要指出的是,我们在教学中亦碰到教学内容与实际应用脱节、内容过于数学化等导致学生学习动力不足的问题。虽然量子物理在材料、微电子等方面已有广泛应用,但因这些应用都非常基础或高度集成,学生未能亲身体会,无法真切感受量子物理的重要性。同时,大学二年级第二学期,学生在各自专业里学习专业课程的压力大,额外开设两学分的大学物理课程增加了学生的学习负担,课程进程较长(一周一次课,每次 2 课时)导致学习效率不高。这些问题是后续教学实践需要解决的问题。

4 结语

基于教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会公布的 2023 年版《理工科类大学物理课程教学基本要求》,在考虑量子力学基本原理完整框架的前提下,结合目前大学物理课时的实际情况,

我们设计了少课时、标准课时和较多课时三个层次大学物理课程中量子物理教学内容,以期将这些内容有机地融合到大学物理课程中,为非物理类理工科专业学生后续学习打下坚实的基础。

需要指出的是,虽然学习量子物理这部分内容对数学基础有较高的要求,但该部分内容蕴含丰富的课程思政元素,用好这些元素,可很好地激发学生学习量子力学的内驱力。例如,中国“墨子号”量子卫星发射、“九章”量子计算机研制成功等事实表明,中国在量子领域锐意进取,奋起直追,已经走在了世界的前列。教学过程中增加量子力学发展史内容的讲述,可培养学生严谨的科学精神和创新的科学方法。另外,教学中还应强调微观和宏观世界的差异,充分发挥量子力学在培养学生完整世界观方面的重要作用。

参 考 文 献

- [1] 张卫平,周正威,苏晓龙. 量子信息专题简介[J]. 中国科学:信息科学, 2023, 53(10):2053-2054.
ZHANG W P, ZHOU Z W, SU X L. Introduction to quantum information special issue[J]. Science China Information Sciences, 2023, 53(10): 2053-2054. (in Chinese)
- [2] 教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导分委会. 理工科类大学物理课程教学基本要求 理工科类大学物理实验课程教学基本要求(2010年版)[M]. 北京:高等教育出版社,2010.
The Teaching Guidance Committee of Physics and Astronomy in higher Education institutions, Ministry of Education. Basic requirements for physics courses teaching in science and engineering universities basic requirements for physics experiment courses teaching in science and engineering universities (2010 edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010. (in Chinese)
- [3] 教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会. 理工科类大学物理课程教学基本要求 理工科类大学物理实验课程教学基本要求(2023年版)[M]. 北京:高等教育出版社,2023.
Teaching Guidance Committee for College Physics Courses in Higher Education Institutions of the Ministry of Education. Basic requirements for Physics teaching in Science and Engineering Universities (2023 edition)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2023. (in Chinese)
- [4] 贾瑜,王炜. 2023年版《理工科类大学物理课程教学基本要求》内容细化修订解读[J]. 物理与工程,2024,34(1):3-10.
JIA Y, WANG W. The Interpretation of the 2023 Edition of the Basic Requirements for Teaching of Physics Courses in Science and Engineering Universities[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(1): 3-10. (in Chinese)
- [5] 胡其图,刘世勇,李晟. 大学物理教程(AR版)(下册)[M]. 北京:人民邮电出版社,2024.
HU Q T, LIU S Y, LI S. College Physics Textbook (AR Edition), Volume II [M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2024. (in Chinese)
- [6] 周世勋,陈灏. 量子力学教程[M]. 3版. 北京:高等教育出版社,2022.
ZHOU S X, CHEN H. Quantum Mechanics Textbook [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2022. (in Chinese)
- [7] 尹浩,韩阳. 量子通信原理与技术[M]. 北京:电子工业出版社,2013.
YIN H, HAN Y. Principles and Technologies of Quantum Communications [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013. (in Chinese)
- [8] 盛嘉茂. 关于工科量子物理教学内容的讨论[J]. 大学物理, 2013,32(10):27-29.
SHENG J M. Discussion on Curricular Content of Quantum Physics in Engineering Education [J]. College Physics, 2013, 32(10):27-29. (in Chinese)
- [9] 邓丽城,陈德媛,郭艳艳. 新工科背景下量子力学教学内容优化研究[J]. 物理与工程,2023,33(2):88-92.
DENG L C, CHEN D Y, GUO Y Y. Research on optimization of teaching content of quantum mechanics in the context of new engineering[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(2): 88-92. (in Chinese)
- [10] 格里菲思. 量子力学概论[M]. 贾瑜,胡行,李玉晓,译. 北京:机械工业出版社,2009.
GRIFFITHS D J. Introduction to Quantum Mechanics (Translated Edition) [M]. Translated by JIA Y, HU X, LI Y X. Beijing: China Machine Press, 2009. (in Chinese)
- [11] 曾谨言. 量子力学导论[M]. 2版. 北京:北京大学出版社,1998.
ZENG J Y. Quantum Mechanics: Foundations [M]. 2nd ed. Beijing: Peking University Press, 1998. (in Chinese)
- [12] 卢文发. 量子力学与统计力学[M]. 上海:上海交通大学出版社,2013.
LU W F. Quantum Mechanics and Statistical Mechanics [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2013. (in Chinese)
- [13] 汤森德. 量子物理:学习现代物理的基本方法[M]. 陈植芸,译. 北京:高等教育出版社,2015.
TOWNSEND J S. Quantum physics: A fundamental approach to modern physics [M]. Translated by CHEN Z Y. Beijing: Higher Education Press, 2015. (in Chinese)
- [14] 吕智国. 量子物理[M]. 上海:上海交通大学出版社,2023.
LYU Z G. Quantum Physics [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2023. (in Chinese)