

教学案例

理工科类大学物理课程中的量子力学教学设计
——“一维谐振子”教学案例周可雅¹ 刘哲² 曹永印¹ 张宇¹(¹ 哈尔滨工业大学物理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;² 哈尔滨工程大学物理与光电学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要 一维谐振子的量子力学处理是一个具有基本重要性的问题,与一维无限深势阱的能量本征值分布不同,它的本征值是等间距分布的,这个处理可追溯到量子诞生之初的科学猜想,又在解释场与物质相互作用中起着基本作用。本文以“一维谐振子”为例,介绍了哈尔滨工业大学工科物理教学团队在量子力学部分的教学设计和实施策略。论文从科学思想、前沿理论、科技应用和中国元素等四个方面充分挖掘了课程思政育人素材,着眼于对学生科学思想的启迪和前沿科技的牵引,通过对“一维谐振子”的量子力学处理,让学生能够感受量子力学的科学价值和独特魅力。

关键词 大学物理;量子力学;一维谐振子;教学案例

TEACHING DESIGN OF QUANTUM MECHANICS IN PHYSICS
COURSES IN SCIENCE AND ENGINEERING UNIVERSITIES
—TAKE ONE-DIMENSIONAL HARMONIC OSCILLATOR AS AN EXAMPLEZHOU Keya¹ LIU Zhe² CAO Yongyin¹ ZHANG Yu¹(¹ School of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001;² School of Physics and Optoelectronics, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001)

Abstract The quantum mechanical treatment of the harmonic oscillator is a fundamentally important issue. Unlike the energy eigenvalue distribution of an infinitely deep potential well, its eigenvalues are evenly spaced. This treatment can be traced back to the scientific conjecture at the beginning of quantum birth and plays a fundamental role in explaining the interaction between fields and matter. This article takes the “one-dimensional harmonic oscillator” as an example to introduce the teaching design and implementation strategy of the engineering physics teaching team at Harbin Institute of Technology in the section of quantum mechanics. The paper fully explores the ideological and political education materials of the curriculum from

收稿日期: 2025-06-22

基金项目: 黑龙江省高等教育学会“2023 年高等教育研究课题”(23GJYBB055);2024 年度黑龙江省高等教育教学改革研究重点项目(SJGZB2024021)。

通信作者: 周可雅, zhoukeya@hit.edu.cn。

引文格式: 周可雅, 刘哲, 曹永印, 等. 理工科类大学物理课程中的量子力学教学设计——“一维谐振子”教学案例[J]. 物理与工程, 2025, 35(4): 248-255.

Cite this article: ZHOU K Y, LIU Z, CAO Y Y, et al. Teaching design of quantum mechanics in physics courses in science and engineering universities—Take one-dimensional harmonic oscillator as an example[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(4): 248-255. (in Chinese)

four aspects: scientific thinking, cutting-edge theories, technological applications, and Chinese elements. It focuses on inspiring students' scientific thinking and allows them to experience the scientific value and unique charm of quantum mechanics through the quantum mechanics treatment of the "one-dimensional harmonic oscillator".

Key words College Physics; Quantum mechanics; One-dimensional harmonic oscillator; Teaching case

近代物理学中的相对论和量子力学是 20 世纪的两大支柱,它们连同之前的经典物理理论成为国内外高等教育中物理基础课程教学的重要组成部分。在大学物理教学的基本框架中,量子物理绝非锦上添花的点缀,而是不可或缺的核心基础理论。近年来,随着科技的飞速发展和各学科的不断交融,量子物理的重要性愈发凸显,它不仅是理解微观世界的钥匙,更是推动众多理工科领域创新发展的关键动力^[1]。2023 年 8 月,由教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会编制的《理工科类大学物理课程教学基本要求(2023 年版)》(以下简称《基本要求》)由高等教育出版社正式出版^[2],成为指导新时期我国大学物理课程教育教学和改革创新的纲领性文件,其中变化最大的量子物理基础模块条目数从 14 条增加到 19 条,推荐学时从 20 学时增加到 30 学时^[3]。

在新版《基本要求》指出“强化现代”是 2023 年修订的一个重要内容,基础物理教学内容的现代化具体来讲是实现量子力学有关理论教学的落地^[4]。专家建议把经典物理优化后所节省出的学时加在近代物理(量子力学的基本原理)内容上面,力求让学生能够对量子力学基本理论的主要内容有一个较为完整的学习,达到基本理解量子力学理论的初步水平,从而改变原《基本要求》对量子力学仍停留在概念的讲解层次上的状况。在对课堂教学要求上,不再限于对基本概念或者基本规律的介绍层面,而是要求能够系统地讲授量子力学的基本概念和基本理论,能够利用量子力学的一些基本原理来解释实验现象并利用量子力学解决问题,从而更好地满足新工科建设对大学物理基础的需求。

笔者发现,近几年来量子物理相关的教学论文往往是从科学研究课题中牵引出来的项目式教学改革^[5],或者是针对教学中的一个具体问题进行的深入科学研究探索^[6],或者是较为宏观的对整个量子物理教学内容进行解析^[7],很少有论文

针对如何在理工科类大学物理课堂讲授量子物理的核心知识点提出建设性建议。在实际授课中,由于量子力学比较抽象,工科学生的理解可能会存在一些困难,这对老师都提出了更高的要求。此外,尽管新版《基本要求》建议把经典物理节省出的学时加在近代物理教学中,但在处理整个量子力学模块的教学安排还处于探索阶段,如何在单一知识点对课程内容进行取舍和设计也是需要讨论和论证的。因此,如何从教学实操的角度给广大教学一线的教师提供一个参考是很有必要的,这也是实现工科学生量子力学部分课程教学落地的关键。

1 教学设计总体思路

“一维谐振子”是理工科类大学物理课程教学中量子物理基础的重要组成部分,尽管在早期的非物理类理工学科大学物理课程教学基本要求中它被列为 B 类知识点^[8],但在 2023 年版的基本要求中它已经被明确列为 A 类知识点,并指出它属于需重点介绍的量子力学基本原理,是从经典物理到量子物理过渡的重要阶梯。从知识体系看,该教学内容是在讲授完“波函数”和“薛定谔方程”后,需要作为典型案例讲授的三种典型一维定态问题之一。从整个量子物理基础的知识完备性看,将三个一维定态问题讲授清楚,不但可以帮助学生理解波函数和薛定谔方程是量子力学状态描述的手段,也可以让学生建立与后续课程内容如“态叠加原理”和“力学量的算符表示”等核心知识点的初步联系,从而逐步洞悉量子力学的一般理论。为此,课程团队建议的教学重点以下有三个。

(1) 一维谐振子的求解过程。这是课程教学中阐明的第一个核心问题,既是教学重点也是教学难点。它包含“认识物理现象”“抽象物理模型”“分析物理方程”“求解物理方程”四个关键环节,

其中前三个环节在教学中至关重要,这也是物理学分析问题的基本方法;最后一个环节要求学生具备的较好的数学基础,教师在课堂中没有办法进行严格的数学推导,但定性分析是关键且重要的,稍后在教学流程安排中会详细说明。

(2) 一维谐振子的本征能量和本征波函数。这是本次教学活动的核心结论,要求教师能够明确给出本征能量的表达式,用解析法和图示法介绍一维谐振子本征波函数的空间分布,并给出其物理意义,分析能谱特点及其宇称性质,并与经典谐振子进行对比。

(3) 一维谐振子的零点能问题。这对于学生理解量子力学的基本原理极为重要,因此我们将其从第二个教学重点中单独剥离出来,有必要向学生重点介绍该结论的特性,并为本节内容的拓展知识埋下伏笔。

围绕三个教学重点,课程团队也设定了如下三个层面的教学目标。

(1) 知识传授层面,培养学生能够掌握一维谐振子的能量本征值、能量本征波函数和零点能。建议该教学目标以试卷形式进行考核评价。

(2) 能力培养层面,培养学生能够理解一维

谐振子的量子力学分析和求解方法。建议该教学目标以稍微灵活的形式考核评价。

(3) 价值引领层面,培养学生辩证的科学思维方法、创新思维能力。结合课程思政育人元素的融入,这一目标在前两个目标达成后水到渠成。

教学案例的总体设计思路见图1,左侧教学实施过程的“显性”主线一共分为8个步骤,基本对应于中心列的8个“教学内容”。同时,教学过程的“隐性”主线也被分为从“认识物理现象”到“联系实际应用”共7个环节,形成一个完整的“提出问题、分析问题、解决问题”的科学思维过程,教学设计和思政元素在图的右侧用黑色方框标出,并用黑色虚线和箭头对应到中间的“教学内容”,形成教学“暗线”。

2 教学流程安排与构想

环节1. 课前预习。

主要实施方案是要求学生提前预习功课,查阅相关资料,了解谐振子现象在经典力学、材料科学、光学、理论物理学、生物医学、艺术、前沿科技等相关研究领域和工科学科是如何体现的。具体

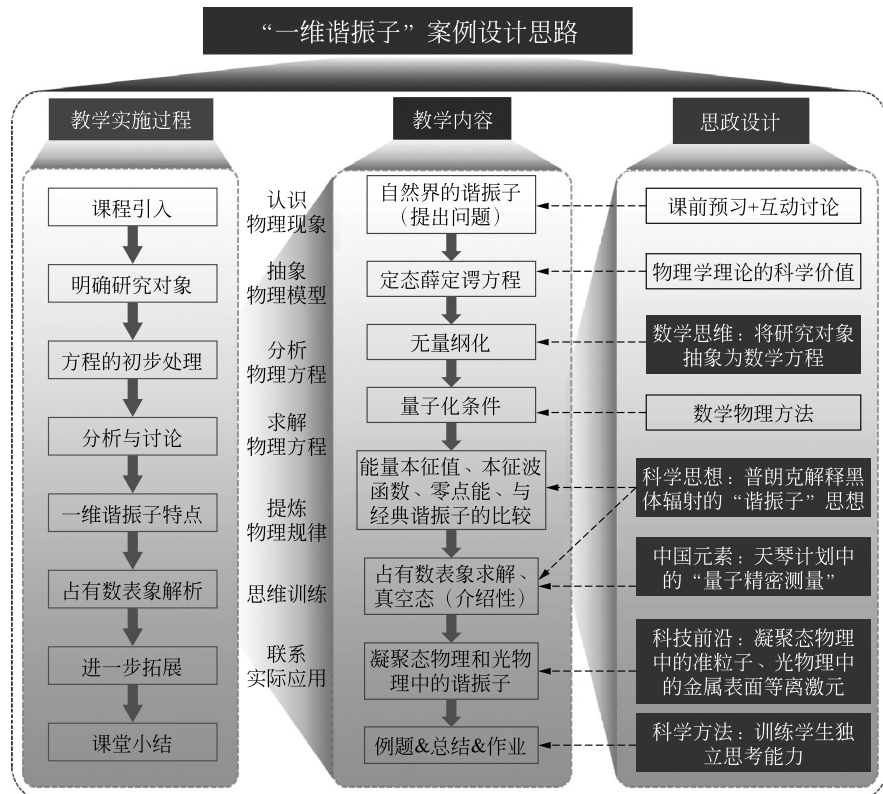


图1 “一维谐振子”案例设计思路

方法可以是借助于课程知识图谱的知识点学习,或者完成预学作业等方式不限^[9]。主要引导学生思考在不同应用场景中,谐振子问题有哪些共同点和不同点?哪些是经典的?哪些是量子的?鼓励学生根据课程内容提出有针对性的问题。

环节 2. 课堂导入。

主要的实施方案是让学生根据课前预习开展课堂讨论,调动学生分享观点的积极性。典型的主题讨论如经典力学中的弹簧振子、单摆、复摆等宏观运动;材料科学中声子、准粒子等概念;光学领域的金属表面等离子体、量子光学、量子信息等;理论物理学领域的粒子物理和高能物理、引力波问题;生物医学中的核磁共振技术;艺术领域的各种弦乐器的工作原理;前沿科技领域的量子测量、引力波探测等。具体的方法可以借助于课程知识图谱的问题图谱辅助开展课堂讨论,学生在课堂上讨论的新问题也可以补充进入课程知识图谱中,作为下一轮授课的参考^[9]。开展本环节的主要目的是从实际应用中引出课程的第一个重点内容。

环节 3. 建立模型。

在前两个授课环节的基础上,可以很自然的引出一维谐振子的薛定谔方程,这是传统工科物理教学的重要组成部分,具体的过程在几乎任一本教材中都有详细介绍,此处不再赘述。可以用如图 2(a)和(b)所示进行对比。图 2(a)是任意势在空间的分布,在其最低点附近,总可以等效为如图 2(b)所示的一维谐振子问题。本环节的主要目的是通过谐振子问题,培养学生将实际物理现象抽象为量子力学模型的能力,这种模型思维对提升学生的科学思维素养和创新能力至关重要。

建议授课时强调以下三个要素:

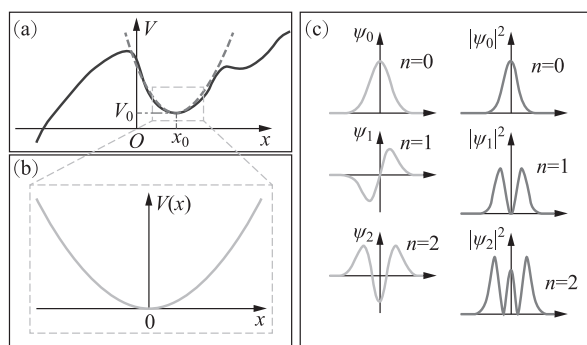


图 2 “一维谐振子”的基本物理模型

(a) 任意势; (b) 一维谐振子的势函数; (c) 一维谐振子问题的波函数及其模方

(1) 普遍性:自然界中广泛碰到简谐运动。在微观领域,任何体系在平衡位置附近的小振动,例如分子的振动,晶格的振动,原子核表面的振动,辐射场的振动等,在选择恰当的坐标以后,常常可以被分解为若干彼此独立的一维简谐运动。

(2) 价值性:一维简谐运动往往可以被作为复杂运动的初步近似,在其基础上进行各种改进。所以微观领域对一维谐振子的研究,无论在理论上还是应用上都是很重要的,可以引导学生与前面的课堂讨论建立联系。

(3) 历史性:一维谐振子的能量本征值问题,历史上首先为海森堡的矩阵力学所解决,后来狄拉克用算子代数的方法给出极其漂亮的解。普通物理阶段,主要从波动力学的角度对其进行处理。

在讲授时,可引导学生与经典弹簧振子的物理图像进行对比:如果 K 是弹簧的倔强系数,用于刻画简谐作用力的参数, m 是振子质量,则经典谐振子的自然频率为 $\omega_0 = \sqrt{K/m}$ 。在经典力学中,弹簧振子在空间坐标任意位置处的势能为:

$$V(x) = \frac{1}{2}Kx^2 = \frac{1}{2}m\omega_0^2x^2$$

通过与经典图像的类比,就可以得到如下所示的一维定态薛定谔方程:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2}{dx^2} + \frac{1}{2}m\omega_0^2x^2\right)\psi(x) = E\psi(x)$$

经过上述处理不仅帮助学生明确研究对象,也能够为后续的分析讨论做铺垫。

环节 4. 方程的初步处理

本环节的数学处理方法非常巧妙,通过将坐标和能量无量纲化,把物理问题变为一个较为纯粹的数学问题,具体如下:

$$\xi = \alpha x, \quad \alpha = \sqrt{\frac{m\omega_0}{\hbar}}, \quad \lambda = \frac{E}{\hbar\omega_0/2}$$

得到如下的微分方程(Weber 方程):

$$\frac{d^2\psi}{d\xi^2} + (\lambda - \xi^2)\psi = 0$$

从工科物理教学视角,该方程的处理必须是一个典型的物理问题而非单纯的数学问题,尤其是应尽量避免对微分方程进行直接积分求解,而是引导学生猜测其在 $\xi \rightarrow \pm\infty$ 时的渐进解,此时 λ 可忽略,从而得到其渐进解 $\psi(\xi) \rightarrow e^{\pm\frac{1}{2}\xi^2}$,考虑到波函数的条件,可舍弃上式中正号对应的平庸解,最终考虑如下形式的解:

$$\psi(\xi) = u(\xi) e^{-\frac{1}{2}\xi^2}$$

代入 Weber 方程, 可得函数 $u(\xi)$ 满足如下的 Hermite 方程:

$$\frac{d^2 u}{d\xi^2} - 2\xi \frac{du}{d\xi} + (\lambda - 1)u = 0$$

其求解过程可以不做要求, 但建议在课堂上与学生开展对 Weber 方程和 Hermite 方程的讨论, 典型论题如: “参数 α, λ, ξ 量纲分别是什么”, “为何要进行无量纲化”, “ $\xi \rightarrow 0$ 时的渐进解如何估计”, “渐进解的物理意义是什么”, “处理后的函数 $u(\xi)$ 受怎样的约束”, “无量纲化的方程如何求解”等。这些问题有助于帮助学生理解公式背后的物理图像, 培养工科学生的科学素养。

环节 5. 方程解的分析与讨论。

本环节需要引导学生理解 Hermite 方程解为有限项级数的条件, 从而给出当 $\lambda = 2n + 1$ 时方程解的形式:

$$u(\xi) = H_n(\xi) = (-1)^n e^{\xi^2} \frac{d^n}{d\xi^n} e^{-\xi^2}$$

展示其前几项为: $H_0(\xi) = 1, H_1(\xi) = 2\xi, H_2(\xi) = 4\xi^2 - 2, H_3(\xi) = 8\xi^3 - 12\xi, \dots$

此处教学建议是向学生强调量子化条件 $\lambda = 2n + 1$ 的来源, 讨论这是一个物理要求还是数学要求? 它具有怎样的物理意义? n 可能的取值为何不能是负数? 上述解的形式与波函数是怎样的关系?

环节 6. 总结一维谐振子的特点

该部分是要求学生掌握的重点内容, 主要涉及的要点如下:

(1) 能量本征值。根据量子化条件, 可以得到一维谐振子的能量取离散值如下:

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) \hbar \omega_0, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

(2) 能谱特点。

特点一: 能级均匀分布。即 $E_{n+1} - E_n = \hbar \omega_0$ 为常数, 可将其与无限深方势阱比较。

特点二: 存在零点能。即 $E_0 = \hbar \omega_0 / 2$ 。

(3) 能量本征波函数和宇称问题。

归一化的波函数为:

$$\psi_n(x) = A_n e^{-\alpha^2 x^2 / 2} H_n(\alpha x)$$

$$\text{其中 } A_n = \sqrt{\frac{\alpha}{\sqrt{\pi} 2^n n!}}, \alpha = \sqrt{\frac{m\omega_0}{\hbar}}.$$

本征波函数可以用图示法进行教学展示, 如图 2(c) 所示。工科教学中可以重点讲授该图对应的物理含义, 与波函数的概率诠释相结合, 巩固学生所学的前序知识。

宇称问题可以作为单独的补充知识进行阐述, 尝试引导学生对微观世界波函数对称性的初步理解, 建立与实际应用的联系。

(4) 与经典谐振子的比较。

可以用课堂讨论的形式, 引导学生将量子力学结论与经典谐振子进行比较, 参考如下图 3。图 3(a) 给出了 n 取 0, 1, 2, 3 时对应的波函数模方的空间分布, 引导学生结合波函数的概率诠释理解不同能量本征值对应的空间概率分布。图 3(b) 给出了 $n = 20$ 时的波函数模方的空间分布, 引导学生思考这样的量子物理图像与经典谐振子图像有何不同? 图中灰色虚线为经典谐振子的空间概率分布(可以由经典振动图像给出)。

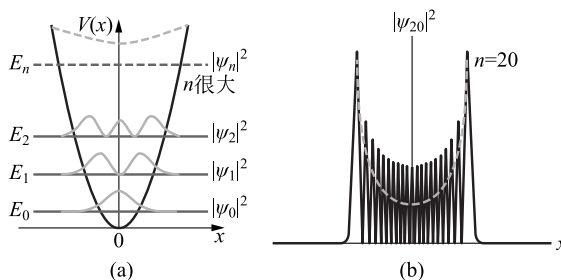


图 3 一维谐振子的波函数模方

(a) $n = 0, 1, 2$; (b) $n = 20$

综上, 经过 6 个环节的讲授, 学生就能够基本建立量子力学处理一维谐振子问题的基本方法, 也能够了解相应的结论, 并与经典谐振子进行类比分析。但如果仅仅是这样的课程, 对于某些工科专业的学生是明显不够的。这样就可以选择性进行后两个环节的知识拓展。

环节 7. 占有数表象求解。

上述波动力学讨论的是一个粒子的量子行为。量子场论认为: 在单模谐振腔中, 电场和磁场能够被简化为大量谐振子的位置和动量, 这些谐振子满足相同的物理, 从而可以在占有数表象下进行求解^[10]。通过二次量子化, 给出谐振子哈密顿量; 结合升降算符, 给出能量本征波函数。限于篇幅关系, 本论文对于占有数表象不做详细表述, 在课程思政元素融入部分再稍作讨论。

环节 8. 前沿科学中的谐振子。

工科物理教师可以根据授课对象选择不同的拓展内容,让学生能够真正认识到身边前沿科学中不仅拥有大量的谐振子问题,而且对其进行量子力学处理是非常必要且有价值的。在本论文的课程思政元素融入部分,将以凝聚态物理和光物理为例,介绍如何将前沿科学中的谐振子问题融入教学,拓宽学生的科研视野。

3 课程思政元素的融入途径

课程思政元素的融入在理工科类大学物理授课中有多种形式,在针对课程核心知识点的课程设计中,课程思政元素能够起到穿针引线的作用。在 2023 年的基本要求中建议:通过展示物理学史、重要物理思想和概念以及学科领域的产生背景和条件、物理学发展与人类社会进步的相互作用和关系、中国物理学的发展和技术突破等,使学生了解物理学与科技进步、社会发展之间的关系,了解物理学的思想体系和物理学的科学文化,培养与熏陶学生的科学精神、科学素养、科学审美及科学情操^[2]。

在图 1 的最右侧列,我们对本节内容的思政元素进行了设计。在课程引入环节,通过课前预习和互动讨论,引导学生了解自然界的谐振子现象,是将课程内容与人类社会建立联系;在建立模型环节,一维谐振子薛定谔方程的给出就体现了物理学固有的模型思维,体现了物理学解读自然界的思想方法;在处理薛定谔方程时的无量纲化、渐进解分析,体现了研究问题的数学思维;而 Hermite 方程的量子化条件,直接沿用了数学物理方法中的典型结论,对理工科类本科生后续数理课程的呼应,充分体现了量子物理对其学科领域的支撑作用。

此外,课程团队还提炼了科学思想、前沿理论、科技应用和中国元素等四个方面的课程思政育人素材,在讲授时可适时融入课程,提升思政育人成效。介绍如下:

1) 科学思想:完成谐振子量子力学处理的科学思想溯源

引导学生回顾早期量子论中黑体辐射问题的普朗克公式,物理学家认为:这样简单的公式与实验如此吻合,一定蕴藏着一个非常重要但尚未被

人们揭示出的科学原理。而普朗克的最初科学思想中就蕴含着对“谐振子”的猜测,这也就是后来大家所广为人知的“能量子”假说。

通过该思政元素的引入,能够让学生认识到本节课程的内容不仅仅是“求解薛定谔方程”的数学过程;更重要的一点,正是普朗克对黑体辐射“谐振子”问题的深度思考和大胆猜想促成了他的科学发现,也促成了量子力学理论的诞生。

2) 前沿理论:将谐振子与凝聚态物理和光物理科技前沿相结合

准粒子的概念,是 Landau 在他的流体量子理论中首先引入的,这是固体量子理论的重要概念,已逐渐发展为元激发物理。如果把固体中 N 个原子的 $3N$ 个振动自由度变换成 $3N$ 个近独立的简正振动,并把简正振动的激发量子看成一种“准粒子”——声子,这样就将有强相互作用的原子系统简化成“准粒子”系统(有时称“准粒子”理想气体),使问题大为简化,这里就给出并动用了“准粒子”的概念。类比凝聚态物理中的准粒子概念,在光物理研究中,光与金属微结构的相互作用能够激发电子的集体震荡,成为等离子体激发元,是光学和光子学领域很好的物理模型^[10]。

通过前沿理论的融入,能够让学生了解一维谐振子不只是一个简化的量子力学模型,它在过去的半个世纪以及现在,仍然对凝聚态物理和光学领域有着深远的影响,帮助科学家认识世界、改变世界。

3) 科技应用:将谐振子与场的量子化建立联系

谐振子在解释场与原子相互作用中起着基本作用。在单模谐振腔中,其中的电场和磁场能够被简化为一个简谐振子的位置和动量,从而自然而然的引出对光/电磁场的量子化讨论。甚至我们可以将这个理论推广应用于多模场,并应用于许多场与原子相互作用的理论描述。

通过科技应用的融入,让学生了解科研前沿,能够了解光、电磁场是可以用“谐振子”来描述的。场的量子化已经成为量子电动力学和量子光学领域的基本理论,这种描述方法已经给人类研究前沿科学和技术应用带来了极大的便利。

4) 中国元素:将谐振子与引力波探测建立联系

我国的天琴计划预期于 2035 年左右发射并部署边长约 17 万公里的等边三角形卫星星座,构

成一个引力波天文台——天琴。引力波的测量就是要尽可能的消除各种噪声的影响,其中由量子涨落引起的“量子噪声”是一个难以克服的科学难题。一维谐振子的量子理论指出:谐振子具有最低的基态能量 $\hbar\omega/2$,这种能量即使在绝对零度温度下也存在。正所谓“真空不空”,即使是无粒子存在的状态真空,其总零点能是所有可能电磁场模式零点能的和。量子真空不是空无一物,而是充满了量子涨落和虚粒子对的不断生成和湮灭。通过将课堂教学内容与中国元素相结合,激发学生的爱国热情和科研热情。

4 结语

综上,本案例针对理工科类大学物理课程中量子物理基础的核心知识点“一维谐振子”进行了课程设计,能够实现相关教学内容的层层递进,融入了课堂讨论、课程知识图谱辅助等多维教学方法。将课堂教学内容与生活中常见的物理现象建立联系,培养学生知行合一的能力和独立思考的科学态度,有效提高了课程的深度与广度;这种以学生为中心的课程设计,以问题为导向的展开方式,能够充分调动学生思考和学习的主动性。

本文的教学设计从内容上比较丰富,涉及量子物理基础、光物理、凝聚态物理、场论等多个领域的内容,如果教师在实际授课中面面俱到的话,在两个学时讲完是不可能的,效果也不会好,也偏离了本案例撰写的初衷。教学是一门取舍的艺术,对于工科物理教学而言,舍弃复杂的数学推导过程是必须要做的,这非常考察任课教师的教学基本功。对占有数表象的讲解务必点到即止,千万不能陷入理论物理的逻辑漩涡,这会把工科学子吓到。同时也建议巧设多维教学方法去吸引学生感悟物理学本身的魅力,引导学生发现课程内容的科学价值以及对科技前沿的支撑作用,这正是落实新版《基本要求》中“专业衔接”的实施途径。本论文设计了一个五分钟的短视频摘要,希望能够给广大老师提供一个教学参考。

本案例适合于面向我国高等学校各理工科类专业的《大学物理》课程中推广,也可以面向《文科物理》《工科大学物理(少学时)》等课程推广,教师可以根据课程深度的需求,进行相应内容删减和设计。本案例教学中采用的教学方法、教学思想

及思政元素能够为进行大学物理课程其他章节的教学设计提供思路。

致谢:感谢西安交通大学方爱平老师和黄永义老师在案例撰写阶段的讨论和中肯建议,感谢山东大学刘凤芹老师和大连海洋大学周丹老师的悉心指导。

参 考 文 献

- [1] 李嘉慧. 大学物理中的量子力学教学研究[D]. 大连理工大学, 2012.
LI J H. The study of quantum mechanics teaching in College Physics[D]. Dalian University of Technology, 2012.
- [2] 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[M]. 2023年版. 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. The basic requirements for teaching of physics courses in science and engineering universities[M]. 2023 edition. Beijing: Higher Education Press, 2023.
- [3] 张勇, 张乃波, 吴培文. 2023版与2010版《理工类大学物理课程教学基本要求》的比较与启示[J]. 物理与工程, 2024, 34(1): 73-79.
ZHANG Y, ZHANG N B, WU P W. Enlightenment from the comparison analysis of the 2023 edition to the 2010 edition of the basic requirements for teaching of physics courses in science and engineering universities[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(1): 73-79. (in Chinese)
- [4] 贾瑜, 王伟. 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] 张子静, 王晓鸥, 霍雷, 等. 大学物理教学改革——量子探测教学浅谈[J]. 物理与工程, 2020, 30(2): 65-68.
ZHANG Z J, WANG X O, HUO L, et al. The teaching reform of College Physics—A brief talk on quantum detection teaching[J]. Physics and Engineering, 2020, 30(2): 65-68. (in Chinese)
- [6] 王雯宇, 程茜, 梁淇玮, 等. 一维谐振子薛定谔方程含时演化非级数解析解[J]. 物理与工程, 2024, 34(4): 98-109.
WANG W Y, CHENG X, LIANG Q W, et al. The analytical non-series time evolution solution of one-dimensional oscillator Schrödinger equation[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(4): 98-109. (in Chinese)
- [7] 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 contents of quantum physics of

- engineering course[J]. College Physics, 2013, 32(10): 27-29. (in Chinese)
- [8] 非物理类理工科大学物理课程教学基本要求[J]. 物理与工程, 2006, (5): 1-8.
Basic Teaching Requirements for College Physics Courses in Non-Physics Engineering and Science Disciplines[J]. Physics and Engineering, 2006, (5): 1-8. (in Chinese)
- [9] 周可雅, 孟庆鑫, 曹永印, 等. 问题牵引式大学物理课程知识图谱探索与实践[J]. 大学物理, 2025, 44(1): 66-69, 75.
ZHOU K Y, MENG Q X, CAO Y Y, et al. Exploration and practice based on a problem driven knowledge graph of college physics[J]. College Physics, 2025, 44(1): 66-69, 75. (in Chinese)
- [10] 冯飞, 周可雅, 孙琼阁, 等, 译. 纳米量子光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2025.
FENG F, ZHOU K Y, SUN Q G, et al. trans. Nano and quantum Optics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2025. (in Chinese)
- (上接第 205 页)
- LIU R X, ZHU X W. College physics experiment tutorial[M]. Shaanxi: Northwestern Polytechnical University Press, 2018. (in Chinese)
- [6] 陈静. “BOPPPS+演示实验”的大学物理教学改革实践研究[J]. 物理与工程, 2024: 网络首发.
CHEN J. Research on the teaching reform practice of college physics with the mode of “BOPPPS+ Demonstration Experiment”[J]. Physics and Engineering, 2024: Online First. (in Chinese)
- [7] 何振辉. 新时代物理实验课程建设探索[J]. 物理与工程, 2024, 34(5): 74-81.
HE Z H. Exploration of the construction of physics experiment courses in the new era[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(5): 74-81. (in Chinese)
- [8] 何爽, 韩笑, 刘乃嘉, 等. 基于 5E 教学模式的大学物理实验教学设计的[J]. 创新教育研究, 2023, 11(8): 2378-2385.
HE S, HAN X, LIU N J, et al. Teaching design of college physics experiments based on the 5E teaching model[J]. Innovative Education Research, 2023, 11(8): 2378-2385. (in Chinese)
- [9] 王晓鸥, 张伶俐, 袁承勋, 等. 新工科背景下的大学物理课程建设与实践[J]. 大学物理, 2021, 40(4): 45-49.
WANG X O, ZHANG L L, YUAN C X, et al. Construction and practice of college physics courses under the background of emerging engineering education[J]. College Physics, 2021, 40(4): 45-49. (in Chinese)
- [10] 吴海娜, 杨广武, 公卫江, 等. 一流课程背景下大学物理课堂演示实验的实践及效果分析[J]. 大学物理实验, 2021, 34(3): 102-104.
WU H N, YANG G W, GONG W J, et al. Practice and effect analysis of classroom demonstration experiments in college physics under the background of first-class courses[J]. Physical Experiment of College, 2021, 34(3): 102-104. (in Chinese)
- [11] 吴秀芹, 赵月月. 基于“四突出”的 BOPPPS+教学模式研究[J]. 海军舰艇学报, 2022, 6.
WU X Q, ZHAO Y Y. Research on the BOPPPS+ teaching model based on the “four highlights”[J]. Journal of Naval Vessels, 2022, 6.