

大学物理加入量子计算前沿的教学改革

朱行宇 王桂英

(宿州学院机械与电子工程学院, 安徽 宿州 234000)

摘 要 量子力学作为大学物理课程的重要组成部分,在帮助学生了解与掌握现代物理知识方面发挥着不可替代作用。然而,由于目前教材对于量子力学重视有限,造成学生对这部分内容兴趣低、学习效果差等问题。本文在量子力学教学过程中加入量子力学衍生出的一种新兴技术——量子计算,首先介绍量子计算所用到的量子力学三个基本原理与特征,然后说明实现量子计算所需的条件,最后展示国内外在该领域的前沿进展。通过这样的讲授,不仅能有效提升学生对大学物理的学习兴趣与学习效果,而且可以丰富学生的科技知识。

关键词 大学物理;量子计算;量子比特;量子霸权

TEACHING REFORM OF COLLEGE PHYSICS JOINING THE FRONTIER OF QUANTUM COMPUTING

ZHU Xingyu WANG Guiying

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Suzhou University, Suzhou, Anhui 234000)

Abstract As an important part of college physics courses, quantum mechanics plays an irreplaceable role in students' understanding and mastering of modern physics knowledge. However, due to the limited attention paid to quantum mechanics in the current textbooks, students are not interested in this part of the content, and learning effect is poor. In this paper, an emerging technology derived from quantum mechanics-quantum computing is added to the teaching process of quantum mechanics. Firstly, it introduces the three basic principles and features of quantum mechanics used in quantum computing, then explains the conditions required to realize quantum computing, and finally shows the cutting-edge progress in this field. Through such lectures, it not only effectively enhances students' interest and learning effect in college physics, but also enriches students' scientific and technological knowledge.

Key words college physics; quantum computing; qubit; quantum supremacy

对工科专业而言,大学物理是一门非常重要的专业基础课,在培养专业型人才方面拥有独特的作用。目前大学物理教学内容主要包括:力学、热学、电磁学、光学、相对论和量子力学。其中量子力学作为现代物理学的两大支柱之一,对人们探索自然本质,掌握世界规律,以及推动社会变革发展都产生了重要影响。然而,在实际教学过程

中,无论是教材内容安排上,还是课时安排上,对量子力学这部分内容都存在“浅尝辄止”的问题,这也造成了学生普遍反映这部分内容学习效果差,不明白学量子力学究竟有什么用。因此,对量子力学这部分内容进行教学改革是急需解决的一个问题。

在科技快速发展的今天,量子力学也在飞速

收稿日期:2022-02-24;修回日期:2022-04-05

基金项目:安徽省高校自然科学研究项目(KJ2021A1107);宿州学院课程思政建设研究项目(2020kcszyjxm260)。

作者简介:朱行宇,男,讲师,主要从事大学物理教学和固态量子信息的研究工作。zxy@ahszu.edu.cn。

引文格式:朱行宇,王桂英.大学物理加入量子计算前沿的教学改革[J].物理与工程,2022,32(5):52-56.

Cite this article: ZHU X Y, WANG G Y. Teaching reform of college physics joining the frontier of quantum computing[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(5): 52-56. (in Chinese)

发展,其与信息学交叉融合形成了一门新兴的学科——量子信息,主要包括量子计算、量子通信和量子精密测量三大部分,这些前沿科技也开始逐步走进大众视野^[1]。与此同时,我校电子、电气、机械、通信等专业学生均反映在量子力学教学过程中增加量子物理前沿科技内容的迫切需求。而作为教学工作者,则需要不断思考与探索如何将前沿科技融入教学当中,提升教学效果,真正做到教书育人。

宿州学院机械与电子工程学院大学物理教研室,根据“新工科”建设需求,对大学物理开展了教学改革,探索将一些物理前沿科技内容引入大学物理课程教学中。一方面有利于学生丰富科学知识,了解物理前沿进展,激发学习热情;另一方面,理论联系实际,让学生看到学有所用,增强实践能力;此外在介绍中国科技日新月异的过程中,增强学生民族自豪感与爱国之情。本文将探讨在量子力学教学部分,增加量子计算这一前沿内容,提升大学物理的教学效果。

1 量子力学教学现状分析

量子力学是大学物理课程中的重要一部分内容,教学内容主要包括:量子的起源(黑体辐射、光电效应、氢原子理论等),物质波,不确定关系,波函数,薛定谔方程以及定态例子等^[2-4]。就教学内容而言,仅仅讲述了从量子力学的起源到初步建立,与上世纪大学物理教学基本要求相比,基本没有变化。就课时安排而言,主要集中在薛定谔方程的导出,和利用定态薛定谔方程求解势阱、谐振子等问题,而这部分涉及的计算推导较多。

在实际教学过程中,主要面向工科专业大一一年级的学生,学生普遍反映量子力学这部分学习比较困难,效果也不理想。首先是因为相对于经典物理而言,这部分内容本身就比较抽象,涉及专业物理知识较多,非物理专业学生在理解上就稍显吃力。其次是因为这部分全部是理论上的教学,缺乏与实际应用的联系,学生就会产生量子力学没有实际应用价值的误解,从而失去学习的兴趣。

针对上述问题,我们在量子力学教学过程中加入介绍量子计算这一前沿内容,让学生看到量子力学的丰富内涵,在感受量子科技飞速进步的同时,激发他们的学习与科研热情,拓展他们的知

识面,提升大学物理中量子力学部分的教学效果。

2 量子计算教学内容安排

量子计算是一种遵循量子力学基本规律对量子信息单元进行调控的新型计算模式,得益于量子力学的量子态叠加原理、测量导致的量子坍缩、以及量子纠缠现象,在计算某些特定问题方面,相比于传统经典计算机,将展现出绝对的优势。由于这部分内容需要学生掌握量子力学的相关知识,将其安排在量子力学课程的最后。同时在教学过程中,侧重于基本概念、工作原理与特征、前沿进展方面的讲解,避免复杂公式的推导与计算,旨在让学生看到量子力学的实际用途,激发学习与探索的兴趣,从而改变这部分教学效果不理想现状。

由于量子计算相关内容还没有编入现有大学物理教材中,而专门讲述量子计算的教材又比较少,因此我们在此节详细介绍教学思路与内容,首先是量子计算的概述,其次是量子计算的基本原理与特征,然后是实现量子计算需要满足的条件,最后介绍量子计算最新进展。

2.1 量子计算概述

1946年,人们发明了第一台计算机,随着晶体管、集成电路的技术的不断发展,形成了以半导体芯片为核心的现代信息技术,对人们生产生活方式产生了深远影响。英特尔创始人之一戈登·摩尔(Gordon Moore)就曾预言:集成电路上可容纳晶体管数目大约每经过18个月便会增加一倍,这也被称为“摩尔定律”,它在某种意义上揭示了信息技术进步的速度。随着晶体管尺寸的越做越小,集成电路芯片的集成度也越来越高,时至今日,最新的半导体芯片工艺已达到5nm,更先进的3nm工艺也即将量产。此时晶体管中电子的量子效应已逐渐显示,这势必影响集成电路芯片的正常工作,也意味着“摩尔定律”终将被打破。

为了解决上述问题,一种很自然的想法就是:能否利用这种量子性质来进行计算呢?1982年,美国著名物理学家查德·费曼(Richard Feynman)在一次公开演讲中提出利用量子体系来实现计算的想法。随后1985年,英国物理学家戴维·多伊奇(David Deutsch)提出了量子图灵机模型。在1994年,美国计算机学家彼得·威廉·秀尔(Peter Williston Shor)提出了量子质因数分解

的算法。于是量子计算机的概念诞生了,并且在理论上是切实可行的,吸引了一大批高校、公司、研究机构从事这方面的研究。

量子计算具有计算速度快、信息处理强的优势,对于一些经典计算机无法处理的问题,例如目前使用的 RSA 加密,用量子计算机则可以轻松解决。量子计算之所以能够具备强大的信息处理能力,主要是由于量子力学的量子态叠加原理、测量导致的量子坍缩、以及量子纠缠现象,下面我们将详细介绍这三个量子基本原理与特征。

2.2 量子计算基本原理与特征

1) 量子态叠加原理

在经典计算中,使用“0”或“1”来表示体系的状态,我们称之为比特(bit)。类似地,在量子计算中,使用量子比特(qubit)来表示量子所处的状态,即“ $|0\rangle$ ”或“ $|1\rangle$ ”。与经典比特不同的是,量子比特的表示多了一个狄拉克算符“ $|\rangle$ ”,其表示在量子计算中,量子比特不仅只有“ $|0\rangle$ ”或“ $|1\rangle$ ”两种状态,而是这两种状态的任意线性叠加,换句话说也就是量子比特具有无穷多个状态,对应的状态叫叠加态

$$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle \quad (1)$$

其中, $|\psi\rangle$ 表示量子的状态, $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 为一组正交基态, a 和 b 是叠加态中的系数,通常为复数,满足 $|a|^2 + |b|^2 = 1$ 。

用一个偏振光的具体例子来说明量子态叠加原理,在光学部分已经学过,让一束自然光经过起偏器可以形成偏振光,令水平偏振(0°)和垂直偏振(90°)作为描述量子态的一组正交基态,分别用 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 表示。根据量子态叠加原理,其他所有角度的偏振光都可以用 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 的线性叠加表示出来,例如 45° 和 135° 的偏振光分别为

$$|+\rangle = \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

$$|-\rangle = \frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

总结量子态叠加原理就是,如果选定量子比特的两个正交基态,那么这两个基态的任意线性叠加都是量子比特可能出现的状态。

2) 测量导致的量子坍缩

对经典比特进行测量时,测量结果由比特的状态所决定,如果比特为“0”,那么测量结果就是“0”。但在进行量子测量时,情况就变得有所不同,如果对量子叠加态进行测量,那么结果就会发

生突变,可能是 $|0\rangle$ 态,也可能是 $|1\rangle$ 态,我们把测量导致的突变称为量子坍缩。所以对于量子比特,我们无法通过单次测量来获取它的信息,只能通过多次测量来得到 $|0\rangle$ 态的概率 $|a|^2$, $|1\rangle$ 态的概率 $|b|^2$ 。

再次以偏振光为例,令一束偏振光通过一个偏振片,如果偏振光与偏振片的方向一致,那么偏振光就会完全通过;如果偏振光与偏振片的方向垂直,那么偏振光就会完全通不过。如果令偏振光与偏振片之间的夹角为 45° ,根据马吕斯定律,偏振光则有 $1/2$ 的概率通过,有 $1/2$ 的概率通不过。

总结测量导致的量子坍缩就是:对量子叠加态进行测量时,量子态会坍缩到其中一个基态。

3) 量子纠缠现象

前面讲量子态叠加原理考虑的是一个量子比特,现在将量子态叠加原理推广到多个量子比特。对于两个量子比特 A 和 B,总共有四种基本的状态,分别是 $|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$, $|11\rangle$ 。我们考虑 $|00\rangle$ 和 $|11\rangle$ 两种状态等概率的叠加,表示为

$$|\psi_{AB}\rangle = \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

当对这样一个量子态进行测量时,单独考虑 A 或 B,它们有一半的概率处于 $|0\rangle$ 态,有一半的概率处于 $|1\rangle$ 态。但将 A 和 B 放在一起考虑时,却发现它们出现的状态总是保持一致,即当 A 处于 $|0\rangle$ 态时, B 也处于 $|0\rangle$ 态;当 A 处于 $|1\rangle$ 态时, B 也处于 $|1\rangle$ 态。这就是量子纠缠现象。

总结量子纠缠现象就是:对于多个量子比特构成的纠缠态,每个量子比特的状态不能单独确定,只能描述整体的状态。

2.3 实现量子计算的条件

在了解量子计算基本原理与特征之后,实现量子计算的一种通用模型是量子线路模型。如图 1 所示,首先将量子比特制备到初态上,然后进行一系列的幺正操作,最后对量子比特进行测量。在

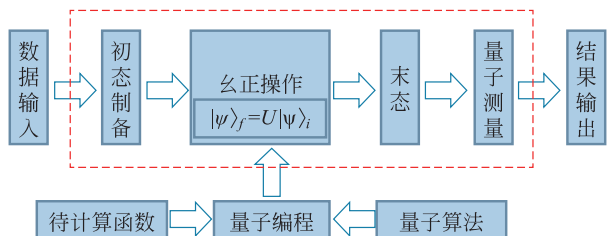


图1 量子计算机工作原理图

量子计算的物理实现上,多种物理体系被提出,目前公认最有可能的方案有:离子阱,腔量子电动力学,线性光学,核磁共振,金刚石 NV 色心,超导 Josephson 结等^[5]。这些方案中哪种方案最终能脱颖而出,现在还很难说,因为每种体系都有各自的优势与擅长的领域。

对于实现量子计算的物理体系,美国 IBM 公司戴维·迪文森佐(David DiVincenzo)研究员提出了其需满足的若干条件,也被称为 DiVincenzo 判据^[6]:(1)要有良好定义的两态系统作为量子比特;(2)量子比特可以初始化;(3)量子比特能够进行普适逻辑门操作;(4)量子比特的状态可以读取与测量;(5)量子比特要有较长的相干时间;(6)静止量子比特与飞行量子比特之间可以相互耦合;(7)飞行量子比特能够准确传送到不同位置。目前关于量子计算的物理体系都是围绕上述 7 点进行研究。

3 国内外量子计算前沿进展

对于实现量子计算机大致可分为三个阶段:第一个阶段是“量子霸权”阶段,即证明在某些特定问题方面,专用量子计算机的能力超越经典计算机,实现量子霸权需要对约 50 个量子比特进行操作。第二个阶段是实用化量子模拟机阶段,此时能够对上万个量子比特进行操作,将应用于新材料设计、量子化学、药物研发和机器学习等方面。第三个阶段是通用量子计算机阶段,即操控上亿个量子比特进行可容错量子计算,在密码破解、人工智能和大数据搜索等方面发挥不可替代的作用。

为了完成上述三个目标,在第二次信息革命中占得先机,世界各国政府、高校、科研机构以及公司都投入大量的人力物力开展量子计算机的研究。其中谷歌公司 AI 量子实验室于 2019 年在 *Nature* 杂志上率先宣布实现了“量子霸权”^[7]。他们利用超导电路量子体系,构造了一个包含 53 量子比特的平面四方量子处理器“悬铃木”。然后,他们进行了一个叫做随机线路取样的实验,发现对于一个量子线路取样一百万次,“悬铃木”花费的时间是 200 秒,而用当时最强的超级计算机“顶点”完成同样的任务需要一万年。这项轰动性的成果标志着量子计算机第一个阶段的实现。

次年,中国科学技术大学的潘建伟院士团队

在 *Science* 杂志上宣布,成功在光学体系中构建了 76 光子的量子计算原型机“九章”,在执行高斯玻色取样任务时,花 200 秒采集到 5000 万个样本,而用当时最强超级计算机“富岳”执行同样任务,则需要 6 亿年,这是一百万亿倍的优势^[8]。随后,潘建伟院士团队接连取得突破,利用超导电路体系,实现了 62 量子比特的超导量子计算原型机“祖冲之号”。不久,“九章二号”和“祖冲之二号”也相继研制成功,标志着我国成为唯一在两种量子体系上实现“量子霸权”的国家。

4 学生学习效果分析与建议

根据我校对大学物理课程的教学调研发现,对于量子力学部分,学生普遍反映学习兴趣低和学习效果不理想。我们在 20 级学生教学过程中尝试加入量子前沿科技内容,经过一年教学改革,学生普遍反映良好。如图 2 所示,我们对同专业 18 级,19 级和 20 级学生就学习效果进行调研与统计,其中 20 级开始实施教学改革。一方面,在量子力学部分学习完成之后进行测验,这里所有班级学生使用难度相似的试卷,发现 20 级学生平均分数有所提高。另一方面,就对量子力学和量子科技前沿感兴趣程度进行问卷调查,0~100 分表示感兴趣程度线性递增,结果表明通过教学改革,学生对量子力学和量子科技的兴趣与关注度明显提高。

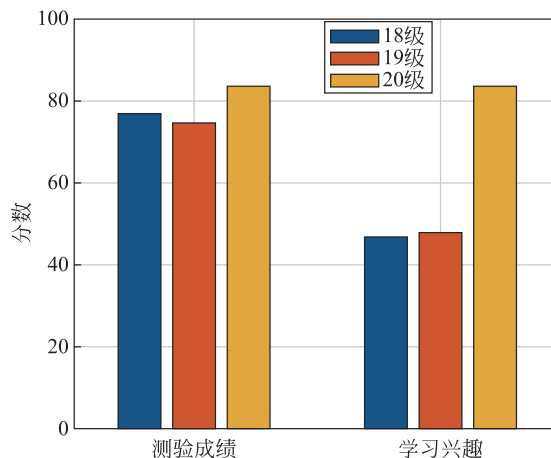


图2 学习效果统计表

此外,为保证结果的准确与可靠,我们对 20 级与 18 级学生,20 级与 19 级学生的期末考试成绩分别进行两个独立样本均值的 t 检验,使用

式(5)计算 t 值,结果如下表 1 所示。

$$t = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (5)$$

根据表 1 结果,可以认为在 1% 的显著性水平下,20 级学生的期末考试成绩相对于 18 级、19 级具有显著差异,表明在量子力学的课程教学中加入量子计算等前沿内容,可以激发学生学习热情,促进对量子力学的学习。

表 1 学生期末成绩

Panel A					
变量	观测值	均值	标准差	t 值	p 值
20 级学生	120	83.30	12.50	4.88	<0.001
18 级学生	126	76.75	7.88		
Panel B					
20 级学生	120	83.30	12.50	5.77	<0.001
19 级学生	127	74.44	11.55		

由于量子计算是量子力学与信息学结合形成的新技术,目前大学物理教材中还没有这一部分内容。因此一方面我们将量子力学部分在原有基础上增加 1 课时(9 课时),并在最后使用 2 个课时介绍量子力学的应用——量子计算。另一方面我们在教学改革过程中,有针对性地量子计算给学生进行通俗易懂的讲解,避免复杂公式的推导计算,使学生更加容易接受与理解。

首先,我们对量子力学基础内容进行讲授,涵盖量子的起源,物质波,不确定关系,波函数,定态薛定谔方程等,让学生对量子世界有一个初步的认识。

其次,将量子计算引入教学之中,在讲明白量子比特这一概念之后,重点阐述进行量子计算所依靠的三个基本原理与特征,量子态叠加原理,测量导致的量子坍缩,以及量子纠缠现象,让学生明白量子计算究竟是怎么回事。

然后,介绍国内外关于量子计算的研究进展,以谷歌公司的“悬铃木”和中国科学技术大学的“九章”为例,展示量子计算相对于经典计算的优越性。虽然目前量子计算处于第一阶段“量子霸权”阶段,但未来可期。

此外,本文作者在承担大学物理课程教学的同时,也从事量子信息领域的研究工作,我们将积

极利用学校实验资源,让学生参与到量子信息的相关实验中来,做到科教结合。这样不但可以让学生看到量子力学的实际应用,增强大学物理课程的学习效果;也可以让学生了解当前量子前沿,为以后从事相关研究和工作打下坚实基础。

5 结语

在“新工科”建设背景下,对大学物理课程改革进行积极探索,是培养国家战略工程需求新工科人才的重要一环。其中量子力学作为现代物理的重要部分,诞生了一大批先进的现代信息技术,但在历年教学调研中发现这部分学习效果欠佳。我们将量子计算这一量子前沿科技融入量子力学教学过程中,受到学生一致好评,有效提升了教学效果。通过量子力学基础知识与量子前沿科技的结合教学,一方面有效增强了学生的学习兴趣,看到量子力学与实际应用的紧密结合;另一方面提升了学生的知识与能力,了解量子科技的前沿动态与实验。特别是在了解中国在量子信息领域取得的一系列先进成果过程中,潜移默化培养学生的爱国之情,激发报国之志。

参 考 文 献

- [1] 郭光灿. 量子信息技术研究现状与未来[J]. 中国科学:信息科学, 2020, 50(9): 1395-1406.
GUO G C. Research status and future of quantum information technology[J]. Scientia Sinica (Informationis), 50(9): 1395-1406. (in Chinese)
- [2] 祝之光. 物理学[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2018.
- [3] 马文蔚, 周雨青. 物理学教程[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- [4] 赵凯华, 罗蔚茵. 新概念物理教程[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [5] LADD T D, JELEZKO F, LAFLAMME R, et al. Quantum computers[J]. Nature, 2010, 464(7285): 45-53.
- [6] DIVINCENZO D P. The physical implementation of quantum computation[J]. Fortschritte der Physik: Progress of Physics, 2000, 48(9-11): 771-783.
- [7] ARUTE F, ARYA K, BABUSH R, et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor[J]. Nature, 2019, 574(7779): 505-510.
- [8] ZHONG H S, WANG H, DENG Y H, et al. Quantum computational advantage using photons[J]. Science, 2020, 370(6523): 1460-1463.