

交互式教学在量子信息课程中应用的进展研究

吴田宜 东 晨 党可征 冉 阳 周子超
(国防科技大学信息通信学院, 湖北 武汉 430033)

摘 要 量子信息科学教学既存在基础概念原理抽象、符号系统复杂的教学难点, 又面临多学科融合交叉带来的知识体系庞杂, 实验操作繁复、实验成本高昂等实际问题。近年来, 量子游戏、虚拟仿真实验等交互式教学策略引起了广泛的关注, 它们能够引导学生形成自驱式沉浸学习以提升学习效果, 也能降低实物实验成本, 适合应对量子信息课程教学的现状问题。本文先分析虚拟仿真实验、量子游戏等交互式教学在量子信息课程教学中的需求, 再通过大量资料总结其在量子信息课程中的应用现状, 最后结合“量子信息技术及应用”的授课和调查情况, 介绍如何将交互式教学资源融入课程教学, 为后续的教学实践和应用推广提供思路。

关键词 量子信息课程; 交互式教学; 量子游戏; 虚拟仿真实验

RESEARCH ON THE PROGRESS OF INTERACTIVE TEACHING IN QUANTUM INFORMATION COURSE

WU Tianyi DONG Chen DANG Kezheng RAN Yang ZHOU Zichao

(Institute of Information and Communication, National University of Defense Technology, Wuhan, Hubei 430033)

Abstract In the teaching process, quantum information science faces issues such as the abstraction of fundamental concepts and principles, the complexity of the symbolic system, and the extensive knowledge system brought about by the integration and intersection of multiple disciplines. There is a need for experimental verification, but this is accompanied by complex operations and high experimental costs. In recent years, interactive teaching strategies such as quantum games and virtual simulation experiments have attracted widespread attention. They can guide students to engage in self-driven immersive learning to enhance learning outcomes and also reduce the costs of physical experiments, making them suitable for addressing current issues in the teaching of quantum information courses. This paper first analyzes the demand for interactive teaching methods like virtual simulation experiments and quantum games in the teaching of quantum information courses, then summarizes their current application status in these courses through extensive information. Finally, combining the teaching and survey situation of the team's course "Quantum Information Technology and Its Applications," the paper integrates the surveyed interactive teaching resources into teaching design and application,

收稿日期: 2024-10-16

基金项目: 国防科技大学信息通信学院教育教学研究重点课题(JY23A002); 国防科技大学信息通信学院教育教学研究一般课题(JY23B006)。

通信作者: 吴田宜, wtywzs@126.com。

引文格式: 吴田宜, 东晨, 党可征, 等. 交互式教学在量子信息课程中应用的进展研究[J]. 物理与工程, 2025, 35(3): 23-30.

Cite this article: WU T Y, DONG C, DANG K Z, et al. research on the progress of interactive teaching in quantum information course[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(3): 23-30. (in Chinese)

providing ideas for subsequent teaching practices and the promotion of applications.

Key words quantum information course; interactive teaching; quantum game; virtual simulation experiments

一百年前的第一次量子革命始于对黑体辐射实验的理论解释,引发了光量子、波粒二象性等相关概念的提出与分析,并逐步构建出量子力学用以解释微观世界的现象。近 20 年来,随着技术创新带来的小型化趋势,设备的加工制造已经逐渐深入到纳米尺度。这一趋势也引发了量子信息科学(量子力学与信息科学的交叉产物)的发展,人们开始利用量子力学原理操控微观世界的粒子进行信息传递、计算和测量。而这些量子信息的应用也推动着信息科学也从“经典”走向“量子”,迎来了现阶段的第二次量子革命^[1-2]。

量子信息三大方向:量子通信、量子计算和量子精密测量在近 20 年来表现出的迅猛发展速度和巨大的市场应用潜力,吸引着各国加快完善量子信息产业的发展建设。我国也同步推进量子信息科技的发展和布局。2024 年 7 月 23 日,教育部高等教育司在《关于开展 2024 年度普通高等学校本科专业设置工作的通知》中明确“要着力优化同新发展格局相适应的专业结构和人才培养结构,支持高校面向集成电路、人工智能、量子科技、……关键领域布局相关专业,有的放矢培养国家战略人才和急需紧缺人才”^①。在第二次量子革命的背景下,亟须结合量子信息科学的特点,针对性地设计和应用合适的教学方法,大力提升教学效果,为量子科技领域培育高素质人才。

1 虚拟仿真实验、量子游戏在量子信息课程教学中的应用需求与发展

目前,开展量子信息科学教学仍有诸多困难限制,其中比较突出的有:

(1) 量子信息科学与量子力学具有部分共同的基础概念原理、符号体系,在开展量子信息教学时同样面临概念原理抽象、符号使用复杂的问题。

(2) 量子信息科学是量子物理、信息科学、光学等多学科的交叉科学,学科之间相互关联,知识体系错综复杂,初学者难以理清其中的逻辑关系。

(3) 量子信息科学是实践性质很强的学科,很多原理和应用建立在实验工作的基础上,但使用相

关器件设备(如超导单光子探测器、时间相关单光子计数器等)的成本普遍较高,部分器件脆弱易损毁,操作复杂,难以面向所有学生一对一开展实验。

在量子信息教学中采用形象直观的互动教学视频动画、虚拟仿真实验是解决上述问题的有效的途径之一。视频动画、虚拟仿真实验具有精美的画面、与理论紧密对应的过程演示以及精心设计的关卡或考验。以采用交互式的形式能够引导学生自主学习,反复加深他们对晦涩概念、原理的理解,进而沉浸式投入对拟真实物的操作和对实验现象的分析思考,在潜移默化中完成对知识目标的迁移内化,在设计的虚拟场景中解决问题,增进对学生能力目标的培养。

国家也在大力推广虚拟仿真一类交互式教学的课程和平台建设。2018 年教育部通过虚拟仿真实验教学项目建设工作推进现代信息技术融入实验教学^②,并上线了“实验空间”虚拟仿真实验教学平台。近年来《虚拟现实与行业应用融合发展行动计划(2022—2026 年)》^③、《元宇宙产业创新发展三年行动计划(2023—2025 年)》^④等政策发布,均强调要在教育培训行业深化虚拟现实的深度融合,建设虚拟现实课堂、实验室与虚拟仿真实训基地,打造支持自主探究、协作学习的沉浸式新课堂。

国外也在采用交互式工具、虚拟仿真实验、游戏等形式向大众普及量子信息科学。由芬兰 Turku 大学和 Turku 研究团队发起的量子游戏创作赛(Quantum Game Jam, QGJ),自 2014 年起每年

① 教育部. 教育部高等教育司关于开展 2024 年度普通高等学校本科专业设置工作的通知. 教高司函〔2024〕7 号, 2024-07-12.

② 教育部. 教育部关于开展国家虚拟仿真实验教学项目建设工作的通知. 教高〔2018〕5 号, 2018-06-05.

③ 工业和信息化部, 教育部, 文化和旅游部, 国家广播电视总局, 国家体育总局. 关于印发《虚拟现实与行业应用融合发展行动计划(2022—2026 年)》的通知. 工信部联电子〔2022〕148 号, 2022-10-28.

④ 工业和信息化部办公厅, 教育部办公厅, 文化和旅游部办公厅, 国务院国资委办公厅, 广电总局办公厅. 关于印发《元宇宙产业创新发展三年行动计划(2023—2025 年)》的通知. 工信厅联科〔2023〕49 号, 2023-08-29.

举办 1 次,旨在为公众创造基于量子物理和量子科技的教育游戏^[3]。非营利组织 Quantum AI Foundation 和 Qworld 也自 2021 年起每年举办量子游戏黑客马拉松 (QGH, Quantum Games Hackathon)^①,面向全球鼓励开发者创造量子信息主题的开源游戏。欧盟量子旗舰计划在 2021 年发起全民量子技术教育项目 (QuTE4E, Quantum Technology Education for Everyone),旨在提高公众对量子技术的认知,其中开发的量子游戏、可视化交互工具等在 Italian Quantum Week 项目中广受欢迎^[4]。美国也加大开发量子游戏、交互式工具等的投入,美国国家科学基金在 2023 年资助 Pittsburgh 大学约 50 万美元以开发辅助学生掌握量子信息科学的交互式学习指导工具 QuILTs^②;资助 Texas 大学约 20 万美元以开发 QubitVR,用于消除大学生对量子信息科学基础概念的误解,结合学生反馈数据形成自适应的辅助教学^③。

2 典型虚拟仿真实验、量子游戏在量子信息课程教学中的应用现状

2.1 基于编程仿真、虚拟仿真实验的量子信息教学应用

2019 年以前,中国科学技术大学陈巍教授团队在“量子信息与安全导论”本科课程实验中通过校企联合,采用 3D 建模 1:1 搭建基于纠缠光源系统的虚拟实验室,引导学生在虚拟实验室中开展量子光学实验^[5]。2020 年获批建设量子信息科学专业后,该专业学生在必修课程“量子信息科学专业基础实验”中开展量子纠缠、量子保密通信以及量子计算等实验,在虚拟仿真环境下学习量子保密通信,观测计算实验中的成码率、误码率。

北京航空航天大学^[6]和河北电力大学^[7]面对信息、通信类专业本科生,针对量子密钥分发的教学内容,在课程中分别设计了基于 Python 的 BB84 协议、E91 协议仿真实验和以 MATLAB 为仿真实验平台开展的高斯调制、离散调制连续变量量子密钥分发协议仿真实验。引导学生熟悉量子密钥分发协议,为量子密码的研究和创新实验教学提供重要支撑。

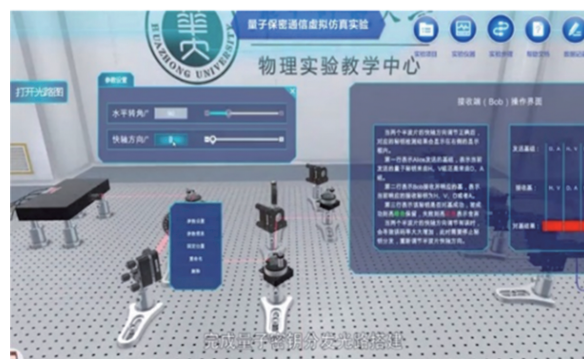
除了面向量子信息课程开展基于编程、虚拟仿真实验的教学以外,部分高校则依托国家、省部

的虚拟仿真实验教学平台,结合上传的虚拟仿真实验系统开展在线教学。

华中师范大学在实验空间上线“量子密钥分发虚拟仿真实验”^④“量子保密通信虚拟仿真实验”^⑤(图 1)。该实验采用 3D 虚拟仿真实验的形式分步引导学生掌握量子密钥分发 BB84 协议及其实现方法。操作过程还会提供辅助的提示和测



(a)



(b)

图 1 华中师范大学量子仿真实验

(a) 2019 年“量子密钥分发虚拟仿真实验”; (b) 2021 年“量子保密通信虚拟仿真实验”

① Quantum AI Foundation. Results of the Quantum Games Hackathon 2023. <https://www.qaif.org/contests/quantum-games-hackathon>

② U. S. National Science Foundation. Preparing Students for the Second Quantum Revolution Using Research-Validated Learning Tools. Award Abstract # 2309260, https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=2309260.

③ U. S. National Science Foundation. Collaborative Research: Advancing Quantum Education by Adaptively Addressing Misconceptions in Virtual Reality. Award Abstract # 2302818, https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=2302818&HistoricalAwards=false.

④ 李高翔. 量子密钥分发虚拟仿真实验. <https://www.ilab-x.com/details/page?id=4297&isView=true>.

⑤ 吴青林. 量子保密通信虚拟仿真实验. <https://www.ilab-x.com/details/page?id=6127&isView=true>.

试的题目。杭州师范大学于2019年在实验空间上线了“光量子的性质虚拟仿真实验”^①,课程围绕单光子的量子干涉性质、双光子的量子干涉性质、双光子量子纠缠态的性质等实验展开。

中国人民大学面向量子计算领域也于2021年在实验空间中上线“离子阱量子计算虚拟仿真实验教学系统”^②,采用“以探究为核心”的理念,构建中国复兴号科考站在火星修补纳米飞船进入量子世界的背景,以研究性、任务型、模块化的虚拟仿真实验引导学生自由搭建离子阱实验光、电路系统,模拟参数设置,实时获得效果反馈。

南京邮电大学于2023年在江苏省高等学校虚拟仿真实验教学共享平台上线“量子纠缠组网虚拟仿真实验”^③,通过虚拟仿真实验讲授量子纠缠系统、网络的基础理论知识、测试校准方法以及信息加密传输等内容。要求学生采用观察法、控制变量法和比较法,注重一人一解、自主设计,采用“形成性+过程性”的考核方式。

自推出虚拟仿真实验平台后,量子信息教学的虚拟仿真实验课程已广受学生欢迎,目前已经吸引数万学生在线开展实验,促进了学生对量子信息的理解。

国外同样开发了量子信息相关的光学实验仿真程序。波兰 Quantum Flytrap 公司自2020年开发了交互式、无代码的仿真光学实验室 Virtual Lab,通过模块化操作,直观地展现量子实验现象^[8]。该系统能够模拟量子计算的 Deutsch-Jozsa 算法、量子密码学、迈克耳孙干涉等实验,学生通过拖放图形界面的典型光学元件来虚拟实现纠缠光子的产生、操控以及包含量子比特的量子电路。

2021年美国 Texas 大学 Brian R. La Cour 等人发布了一款基于图形网络的虚拟量子光学实验室软件(VQOL, Virtual Quantum Optics Laboratory)^[9]。在本科生的量子计算入门课程、虚拟实验量子光学课程中,引导学生开展量子光学仿真实验,增强对量子概念和实验的理解。通过调查结果发现,学生普遍认为虚拟实验比传统实验室带来更好的研究体验。

2.2 基于企业开发的量子教学机开展虚实结合的量子信息教学应用

近年来国内多家量子科技企业,如问天、国仪、国盾、本源、图灵量子、量旋科技等面向量子计算、量子传感方向开发了虚拟仿真教学设备。以量旋科技和国仪量子的仿真教学设备为例,介绍

其在国内外高校量子信息课程中的应用。

北京理工大学自2020年在“量子精密测量技术”课程上借助量旋科技的核磁共振量子计算机、国仪量子的金刚石 N-V 色心量子计算教学机以及自研单光子计算成像仪器三个实验平台上开展近十个量子精密测量相关的实验^④;哈尔滨工业大学(深圳校区)于2023年4月将量旋科技3比特量子计算机应用于量子计算教学和演示^⑤。国外多所高校也已利用教学机开展应用。挪威 Oslo 大学自2021年起在计算机与信息技术专业硕士课程《量子信息技术》上将2比特量子计算机“双子座”和3比特量子计算机“三角座”引入课堂,实现“理论+实践”的教学模式,助力学生自主设计和运行量子电路,加深对量子算法知识的理解^⑥;2023年5月,澳大利亚 Western Australia 大学通过“双子座”和“三角座”,为学生提供具有量子控制设计能力的真实设备和交互体验,以提升他们的量子计算技能^⑦;2023年12月,墨西哥 Nacional Autónoma de México 大学^⑧和印度尼西亚 The Bandung Institute of Technology 学院^⑨也将“双子座”引入量子计算课程,配合使用量子编程

① 苏奇平. 光量子的性质虚拟仿真实验. <https://www.ilab-x.com/details/page?id=5234&isView=true>.

② 张威. 离子阱量子计算虚拟仿真实验教学系统. <https://www.ilab-x.com/details/page?id=6718&isView=true>.

③ 王琴. 量子纠缠组网虚拟仿真实验. <https://xnfx.njupt.edu.cn/exp/47.htm-l?type=>.

④ 量旋科技. 应用案例|北京理工大学:利用教学机量子计算机,将量子技术实践引入课堂. [2023-06-15], <https://www.spinq.cn/newsDetail/83a39f0a-7673-482b-8dcc-b933a5a9739c>.

⑤ 量旋科技. 应用案例|哈工大(深圳):理论教学+真机实验,凿开量子教育的围墙. [2023-11-03], <https://www.spinq.cn/newsDetail/71928e19-a3aa-402c-ba4d-8a10218ec770>.

⑥ 量旋科技. 应用案例|挪威奥斯陆城市大学:SpinQ 量子计算机助力量子教育、研究、科普“三位一体”发展. [2024-01-21], <https://www.spinq.cn/newsDetail/5590aa24-5e63-4729-b5e7-d2520fc53c14>.

⑦ 量旋科技. 应用案例|西澳大学:量旋桌面型量子计算机,助力百年名校打造真实量子教学交互体验. [2023-05-24], <https://www.spinq.cn/newsDetail/472237f3-a08d-429f-901c-87571ad749ba>.

⑧ 量旋科技. 应用案例|墨西哥国立自治大学:引进拉丁美洲首个量子计算设备,开启量子计算新篇章. [2023-12-14], <https://www.spinq.cn/newsDetail/c8cb91c2-efa7-4795-a614-fe64bffa39ac>.

⑨ 量旋科技. 应用案例|印度尼西亚万隆理工学院:引进印尼首台量子计算机,助力印尼技术研究创新. [2023-12-21], <https://www.spinq.cn/newsDetail/ed50640c-7c00-4e92-9a01-40dc0bdfec43>.

工具包 SpinQit, 采用虚实结合教学驱动的新模式, 让学生结合量子控制和算法的虚拟设计, 深入理解量子计算的“抽象概念”。

国仪量子的金刚石 NV 色心教学机同样在国内外量子教学中应用广泛。2019 年南京大学物理学院在“单电子固态量子计算实验”课程中, 借助国仪量子计算教学机引导学生深入理解量子力学、量子计算相关知识^①。同年深圳大学物理与光电学院的近代物理必修课中, 基于同款量子计算教学机开设实验课程“量子操控与量子计算”^②。上海大学理学院量子人工智能科学技术研究中心、华中师范大学、天津大学理学院、同济大学等自 2020 年起, 也纷纷依托同款量子计算教学机开设了“量子信息技术基础”“金刚石 NV 色心量子计算实验”等量子计算实验课程。同济大学量子计算课程中的“量子计算实验”更是于 2022 年入选教育部“课程思政案例库”。该教学机也已在美国 State of New York 大学、澳大利亚 Queensland 大学、Macquarie 大学等海外高校完成交付, 逐步开展教学应用^③。

2.3 基于量子游戏的量子信息教学应用

芬兰 Aalto 大学的 Laura Piispanen 将量子游戏定义为: “通过可感知的方式引入量子物理理论、量子技术或量子计算, 通过科学目的连接到量子物理或使用量子技术的游戏。”^④因此, 量子游戏的设计理念, 就是让学习者通过可感知的方式在体验过程中潜移默化完成对量子物理、量子信息的学习。在政策的引导下, 国外的大学、公益组织热衷于采用游戏创作比赛 (如知名的 QGJ、QGH 等) 的形式推广量子游戏, 目前已有超过 270 款量子游戏^[3], 依托于量子游戏创作大赛 QGJ、QuTE4E 项目的平台进行推广, 以实现公众的量子物理、量子信息的教学普及, 这里仅结合已面向高校开展教学应用的游戏进行介绍。

2016 年, 由 P. Migdal 等人开发的开源益智类量子游戏 Quantum Game with Photons, 是一款具有 34 个关卡和可自行设计实验的沙盒模式游戏^[9]。玩家将借助平面镜、反射镜、挡光板、分光镜等设计一系列路径, 引导模拟光源发出的具有偏振态的光子被探测器接收, 达成具有一定要求的探测结果。通过游戏可以培养学生/玩家熟悉纠缠、叠加、干涉、测量等量子信息中的基础概

念, 该游戏被《量子时代》杂志评选为游戏化量子理论的首选^⑤。

2017 年, 美国 Nebraska 大学的 Parakh 提出了一种基于项目的游戏化教学范式 QuaSim, 旨在提高理工科专业本科生量子教学的效率和质量^[10]。QuaSim 将学生置于计算机生成的虚拟环境中, 以第一视角射击类游戏的形式, 将量子密码学的知识内容设计为各个关卡, 引导学生去解决设定的一些实际量子密码问题。

2.4 基于交互式仿真工具、动觉活动的量子信息教学应用

2013 年起, 英国 St Andrews 大学的 Kohnle 等人基于 Html5 和 Flash 仿真平台开发了量子力学可视化项目 QuVis^⑥, 旨在为量子物理、量子信息的教学提供交互式的动画模拟, 增进对量子基础概念的深入理解, 操作界面如图 2 所示。至 2021 年, 团队逐渐增加量子信息学的相关内容: 单光子干涉、量子纠缠、量子密码学。其中包括采用偏振单光子或者自旋 1/2 粒子作为量子比特进行展示的量子密钥分发协议实验流程。

2019—2020 年, 奥地利 Innsbruck 大学的 Andrea Lopez-Incera 提出基于动觉活动的教学方法, 引导学生以做游戏的方式去模拟量子系统演变的过程, 去感受量子纠缠、叠加、测量等原理^[11-12]。学生在活动中分饰量子和研究人員 (观测者), 饰演量子的学生采用不同的动作形式和规则来表演不同的量子编码态, 饰演研究人員的学生则通过动作及变化来推断相应的量子态在测量

① 国仪量子. 南京大学依托国仪量子教学机开设量子计算实验课程. [2019-11-01], <https://www.instrument.com.cn/news/20191101/515996.shtml>.

② 国仪量子. 深圳大学金刚石量子计算教学机实验课程正式开课. [2021-06-24], <https://ibook.antpedia.com/x/632181.html>.

③ 国仪量子. 国仪量子量子计算装置交付美澳发达国家. [2021-12-16], <https://zhuanlan.zhihu.com/p/446305597>.

④ PIISPANEN L, PFAFFHAUSER M, WOOTTON J. et al. Defining Quantum Games. arXiv preprint, 2022, arXiv: 2206.00089.

⑤ LEIFER M S. Gamifying quantum theory. Chapman University Digital Commons, 2017, https://digitalcommons.chapman.edu/scs_articles/541/.

⑥ University of St Andrews. QuVis: the Quantum Mechanics Visualisation Project. <https://www.st-andrews.ac.uk/physics/qu-vis/flash.html>.

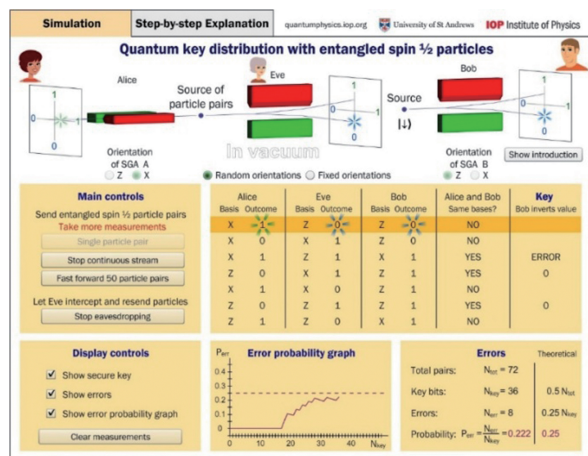


图2 基于自旋 $1/2$ 粒子的 BB84 协议量子密钥分发仿真

条件下的随机行为。通过该活动还可以讨论演示退相干和在量子密码学中的应用。

3 虚拟仿真、交互式工具在量子信息课程教学中的教学设计应用

新兴的第二量子革命推动了面向大众的量子教育、量子科普。然而,具有抽象概念、复杂符号表示的量子信息学科天然令人望而生畏,无疑增加了推广教学科普的难度。虚拟实验、量子游戏、交互式教学工具,能以学习者更容易接受、更容易通过交互形成沉浸投入的形式促进自主学习,在推广科普和教学的过程中广受欢迎。同时也吸引了大批科研工作者、游戏开发者的协力投入开发,近年来不断涌现优秀的创作成果,形成丰硕的交互式教学资源,助力量子信息科学的教学、科普工作。

从事量子信息相关教学科研工作的笔者及团队,所授课程“量子信息技术及其应用”,是一门以量子密码/通信及其安全性分析、应用作为主体,将量子计算、量子传感/精密测量及其应用作为拓展内容的课程,也在不断寻求合适的教学方法手段应对量子信息科学教学中面临的原理理解困难、多学科知识关联逻辑复杂、实验成本高昂、实践操作难度大等问题。通过广泛的公开资料收集和与游戏工具的尝试,虚拟实验、量子游戏、交互式教学工具等的应用确实是能够助力量子信息科学课程“化抽象为具体”“化复杂为简单”“融理论于实践”的教学方法手段。

同时,近两个学期量子信息课程开课,我们针对实验教学活动中常用的 MATLAB 编程仿真实验、虚拟仿真实验、实物操作实验,通过问卷调查的方式详细了解了两个班次共 86 名大二、大三年级以电子信息专业、计算机专业为主的本科学生在以往实验课程中采用过的方式以及对本课程采取相应教学方式的意向。问卷调查的结果如图 3 所示。

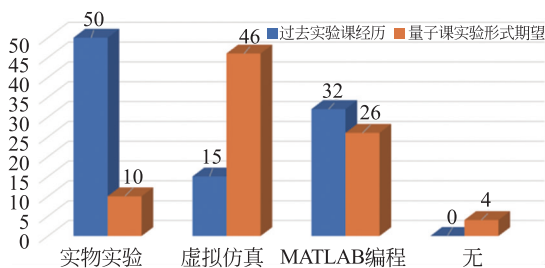


图3 实验课教学方式调查问卷结果

从图 3 中可以看出,86 名学生上过的理工科基础课、专业课均有采用不同形式的教学方式开展实验教学,其中依据实验指导书和实物进行操作实验的最多,达到 50 人,MATLAB 编程也是常用的实验教学方式,而采用虚拟仿真实验则最少,可见虚拟仿真实验在过去的实验课程中采用较少。

而从学生期望的实验教学方式来看,有 53% (46 名) 的学生反而更倾向于采用虚拟仿真的形式,一部分可能来源于有体验经历的学生对这种实验方式的认可,一部分可能来源于对这种未体验的实验方式的好奇;MATLAB 编程作为常用的实验教学方式,依然有 30% (26 名) 的学生延续了对这一方式的认可和习惯;相比之下,实物实验的选择人数变得很少,可能是学生对过往实物实验开展的不满意,也可能是对开展量子信息相关的实物实验缺乏信心;最后也有对开展实验完全失去兴趣的 4 名学生,没有对任何一种实验形式做出选择。

可以看出,大多数学生对于采用虚拟仿真实验的教学方式表现出了兴趣。除了实验课程教学外,理论授课部分同样也可以将量子游戏、互动视频动画资源融入应用。笔者综合近年来开展量子信息课程的授课内容以及已调研的虚拟仿真、量子游戏等丰富的线上教学资源,考虑选取合适的交互式量子教学资源融入对应教学内容的教学实施中,如表 1 所示。

表 1 交互式量子教学资源对“量子信息技术及其应用”教学内容的适配

交互式量子资源	资源来源	获取成本	运用形式	适配课程内容
动觉活动的演练	线上论文指导流程	无	课上依据论文描述的流程和动作要求,分组展开实践	量子态、量子纠缠的概念、演化与编码
QuVis	线上动画下载演示	无	课上引导学生结合协议、原理对动画进行交互式操作	BB84 协议原理、量子纠缠、叠加态、量子干涉、布洛赫球等
Quantum Game with Photons	线上直接操作	无	作为课后资源,提供给学生进行交互式操作游戏	叠加态、熟悉简单的光学器件组成与操作
VQOL	线上直接操作	无	课上课后结合协议、原理对器件模块进行交互式组合操作	BB84 协议原理、纠缠态、贝尔不等式测量、HOM 干涉等
Virtual Lab	线上直接操作	无	课上课后结合协议、原理对器件模块进行交互式组合操作	量子逻辑门、量子态的操作与测量、双光子干涉等
QuaSim	暂未获取来源	/	作为课后资源,提供给学生进行交互式操作游戏	叠加态、纠缠、干涉、测量等
“量子保密通信虚拟仿真实验”	iLab-X 实验空间	无	组织学生自行注册,课后结合实验操作指导步骤完成实验全流程	熟悉 BB84 协议原理及其系统组成
“离子阱量子计算虚拟仿真实验教学系统”	iLab-X 实验空间	无	组织学生自行注册,课后结合实验操作指导步骤完成实验全流程	熟悉量子计算逻辑门、量子比特等基础概念、离子阱量子计算组成与操作

可以看到,大部分教学资源都可以通过线上直接获取或直接操作,基本上可以完全覆盖量子密码/量子通信、量子计算中的所有基础概念、协议原理以及相应的光学系统实现。因此,可以充分利用交互式量子教学资源,采用“线上线下相结合”“理实结合”“虚实结合”等多种教学模式,将虚拟现实、量子游戏等融入后续课程的授课中,更好地以学生为中心,通过调动学生的学习兴趣,形成内驱力,自觉自主融入对量子信息科学相关方向的学习和探究中。

同时也要看到,“量子信息技术及其应用”课程涉及的量子传感/精密测量内容,目前并没有找到合适的交互式虚拟仿真、量子游戏资源提供教学支撑,后续一方面可以继续从量子游戏创作大赛 QGJ、QuTE4E 项目的平台中搜寻合适的资源;另一方面国内企业如国盛量子,已经能够提供商用的量子测量演示机^①,也可以参考基于企业开发的量子教学机的方式来开展相应的虚实结合教学。

4 结语

相较于传统的理论讲授、编程仿真、实物实

验,游戏、虚拟仿真实验凭借其对关卡内容的巧妙设计、精美的画面制作以及容易满足的成就感,是助力量子信息科学“走下神坛,进入公众”的更有力的教学和科普方式。因此,在第二次量子革命和各国推动量子教育、量子科普的背景下,需要充分挖掘和尝试以项目平台、创作大赛形成的量子游戏、虚拟仿真实验等交互式量子教学资源,通过合适的教学设计来应对量子信息课程教学中的难点,形成对教学效果的提升。

参 考 文 献

- [1] DOWLING J P, MILBURN G J. Quantum technology: The second quantum revolution[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2003, 361: 1655-1674.
- [2] 郭光灿. 颠覆:迎接第二次量子革命[M]. 北京:科学出版社,2022.
GUO G C. Disruption: Embracing the second Quantum revolution[M]. Beijing: Science Press, 2022.
- [3] PIISPANEN L, ANTILA D, SKULT N. Online Quantum Game Jam[C]. Proceedings of the 7th International Confer-

^① 国盛量子. 量子测量演示机. <https://www.gshqt.com/proshow/23.html>.

- ence on Game Jams, Hackathons and Game Creation Events (ICGJ 23). Association for Computing Machinery, New York, USA, 2023, 18-27.
- [4] FALETIC S, BITZENBAUER P, BONDANI M, et al. Contributions from Pilot Projects in Quantum Technology Education as Support Action to Quantum Flagship[DB/OL]. arXiv preprint, 2023, arXiv: 2303.07055
- [5] 陈巍, 银振强, 韩正甫, 等. 网络空间安全本科量子信息教学实践[J]. 网络与信息安全学报, 2019, 5(3): 81-88.
CHEN W, YIN Z Q, HAN Z F, et al. Quantum information course for the undergraduate students of cyber security[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2019, 5(3): 81-88. (in Chinese)
- [6] 尚涛, 刘建伟, 张国锋, 等. 量子密码课程教学实践[J]. 计算机教育, 2023(3): 9-13.
SHANG T, LIU J W, ZHANG G F, et al. Quantum cryptography course teaching practice[J]. Computer Education, 2023(3): 9-13. (in Chinese)
- [7] 赵丽娟, 尹丽星, 徐志钊. 量子通信中量子密钥分发教学仿真实验设计[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(8): 141-145.
ZHAO L J, YIN L X, XU Z N. Design of quantum key distribution teaching simulation experiment in quantum communication[J]. Experimental Technology and Manage-
- ment, 2022, 39(8): 141-145. (in Chinese)
- [8] MIGDAL P, JANKIEWICZ K, GRABARZ P, et al. Visualizing quantum mechanics in an interactive simulation—Virtual Lab by Quantum Flytrap[J]. Optical Engineering, 2022, 61(8): 081808.
- [9] LA COUR B R, MAYNARD M, SHROFF P, et al. The Virtual Quantum Optics Laboratory[C]. 2022 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE), Broomfield, CO, USA, 2022, 677-687.
- [10] PARAKH A, SUBRAMANIAM M, OSTLER E. QuaSim: A virtual quantum cryptography educator[C]. 2017 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT), Lincoln, New York, USA, 2017: 600-605.
- [11] LOPEZ-INCERA A, DUR W. Entangle me! A game to demonstrate the principles of quantum mechanics[J]. American Journal of Physics, 2019, 87(2): 95-101.
- [12] LOPEZ-INCERA A, DUR W, HARTMANN A. Encrypt me! A game-based approach to Bell inequalities and quantum cryptography[J]. European Journal of Physics, 2020, 41(6): 065702.

(上接第 22 页)

学中的动量平移么正变换与经典力学中的伽利略变换相对应, 揭示出动量平移么正变换就是量子力学满足伽利略相对性原理的变换形式。这种探究有利于学生深入思考量子力学和经典物理的对应关系, 帮助学生搭建从经典到量子思维跃迁的桥梁, 锻炼了学生的逻辑思维能力, 使教学过程更富有启发性。

参 考 文 献

- [1] 费恩曼, 莱顿, 桑兹. 费恩曼物理学讲义第 1 卷[M]. 新千年版. 郑永令, 华宏鸣, 吴子仪, 等, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 2013.
FEYNMAN R P, LEIGHTON R B, SANDS M. The Feynman lectures on physics Vol. 1[M]. New Millennium Edition. Translated by ZHENG Y L, HUA H M, WU Z Y, et al. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2013. (translated into Chinese)
- [2] 爱因斯坦. 狭义与广义相对论浅说[M]. 杨润殷, 译. 北京: 北
- 京大学出版社, 2006.
EINSTEIN A. A brief overview of special and general relativity[M]. Translated by YANG R Y. Beijing: Peking University Press, 2006. (translated into Chinese)
- [3] 曾谨言. 量子力学[M]. 5 版. 北京: 科学出版社, 2013.
ZENG J Y. Quantum mechanics[M]. 5th ed. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)
- [4] 钱伯初. 量子力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
QIAN B C. Quantum mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [5] 周世勋, 陈灏, 肖江. 量子力学教程[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2022.
ZHOU S X, CHEN H, XIAO J. Introduction to quantum mechanics[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2022. (in Chinese)
- [6] 李梧龄. 组合希尔伯特空间和代数——量子力学的数学基础[J]. 自然杂志, 1987, (6): 9-14.
LI W L. Combinatorial Hilbert space and Algebra—The mathematical foundations of quantum mechanics[J]. Nature Magazine, 1987, (6): 9-14. (in Chinese)