

量子信息教育进展研究

贺晨, 刘娟, 董洋瑞, 刘维琪, 彭进业
(西北大学信息科学与技术学院, 陕西西安 710127)

摘要:量子信息技术飞速发展,逐渐成为目前最炙手可热的新兴技术之一。由于量子计算的超高速并行计算能力,通用量子计算机一旦问世,未来计算机性能将有质的飞跃,当前最优秀的公钥算法 RSA 加密算法也将不再难以破解。国内外各大科技公司正争相进行量子计算机的研发工作,多国政府也在积极发展量子教育和量子技术产业。随之,相关领域的人才缺口问题日渐突出,再加上量子信息作为交叉学科带来的学习困难,其教育工作也成为各高校、政府和企业热切关注的问题。为支持量子信息教学工作的发展,针对目前国内外量子信息学科的课堂教学改革方案,基于仿真平台、在线教学、教学游戏等教学辅助工具的教学方法进行了调查和研究,并对当前和未来的工作进行了总结和展望。

关键词:量子信息;教学改革;量子教育;课堂教学;教学辅助工具

中图分类号:TP39;G640

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2022)03-0139-06

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2022.03.023

Research on Progress of Quantum Information Education

HE Chen, LIU Juan, DONG Yang-ru, LIU Wei-qi, PENG Jin-ye

(School of Information Science and Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: With the rapid development of quantum information technology, it has gradually become one of the hottest emerging technologies. Due to the ultra-high-speed parallel computing capability of quantum computing, once universal quantum computers come out, the performance of computers in the future will have a qualitative leap, and the current best RSA encryption algorithm will no longer be difficult to crack. Major domestic and foreign technology companies are competing for research and development of quantum computers, and governments of many countries are also actively developing quantum education and quantum technology industries. As a result, the shortage of relevant technical talents has gradually emerged, coupled with the learning difficulties caused by quantum information as an interdisciplinary subject, quantum information education has become an issue of great concern for universities, governments, and enterprises. For the development and support of quantum information teaching, the classroom instruction reform plans of quantum information and the teaching methods based on auxiliary teaching tools such as simulation platforms, online tutorials, and teaching games, have been investigated and researched. And the current and future work has been analyzed and summarized.

Key words: quantum information; educational reform; quantum education; classroom instruction; auxiliary teaching tool

0 引言

量子信息是出现在传统信息科学和量子物理学十字路口的一门新兴学科,其知识体系涵盖量子力学、计算机科学、通信工程和密码学等多个学科。目前的研究方向主要包括量子保密通信、量子计算和量子测量等。量子保密通信主要利用量子的叠加和纠缠两大特性对信息进行加密传输,由量子力学的测不准原理和不可克隆原理提供通信过程中对窃听和攻击的天然防御,主要分为量子隐形传态和量子密钥分发两个具体方向;量子计算具有强大的并行计算能力,能够对当前最优的经典算法提供惊人的指数加速或二次加速,为

众多需要大规模复杂计算的领域提供了解决方案;量子精密测量基于量子态对环境高度敏感的特性,有着极富前景的应用,例如精确计时、水下定位、引力波探测、高分辨率检测等,如何利用量子资源突破标准量子极限测量精度是这一领域当前的关键问题。

目前,国内外量子信息技术正在蓬勃发展,量子计算机的研发也逐渐成为全球关注的热点之一。国际各大科技巨头,例如谷歌、IBM 和微软等公司正在进行一场关于量子计算的竞赛;不少高校、科研机构也在积极参与量子计算的研究当中;世界多国政府也在大力推动量子科技的发展。美国是最早也是最积极进行量

收稿日期:2021-03-23

修回日期:2021-07-26

基金项目:国家自然科学基金项目(62001383)

作者简介:贺晨(1983-),男,博士,教授,研究方向为信号处理、量子计算等。

子科技发展的国家之一。2019 年,美国政府发布了未来工业发展计划,将量子信息技术和其他四项关键技术作为未来技术和工业发展的“基础设施”。与此同时,英国、德国和荷兰等欧洲国家也相继颁布量子领域的发展规划。日本韩国相对起步较晚,但基于本身的技术积累,同样在量子信息领域发展迅猛^[1]。中国同样高度重视量子信息科技的发展与布局。党的十九大报告中指出,“墨子、大飞机等重大科技成果相继问世”,仅近 8 年来,量子信息相关成果就 3 次获得国家自然科学一等奖^[2],在 2021 年最新提出的中国国民经济和社会发展“十四五”规划中,也分别指出要加强量子信息等原创性引领性科技攻关,以及前瞻谋划量子信息等未来产业。除了国家层面,北京、上海、合肥、济南等地也围绕量子科技产业助力发展。百度、阿里巴巴、腾讯等国内互联网巨头及华为、中兴等科技公司也多方面积极加大布局,为发展量子科技开辟“国家队”以外的新路径^[3]。

量子信息技术的飞速发展,自然而然催生出了对相应人才的迫切需求。据《纽约时报》统计,全球只有 1 000 名左右研究人员认为自己了解此项技术。而在量子计算领域,国际竞争日益激烈,通用量子计算机一旦问世,理论上讲就能破解全球各国政府和公司保护内部敏感信息的加密措施^[4],人才短缺问题将上升到国家安全层面。

欧盟于 2018 年正式启动总经费高达 10 亿欧元的量子技术旗舰计划^[5]。2020 年 3 月,量子技术旗舰计划成员向欧洲委员会正式提交了战略研究议程(SRA)文件,其中提出,为了量子技术长期地可持续发展,必须有欧洲量子教育的大力支持,提倡全欧推广覆盖高中教育、大学教育和产业工人培训的量子教育项目^[6]。2019 年《美国国家量子计划法案》颁布,授权在未来 5~10 年内投资 12 亿美元,从标准制定、资金投入、机构设置等方面采取措施,以推动基础研究、技术应用和人才培养。

据《量子计算报告》,目前全球仅有 91 所大学从事量子计算活动,且都没有提供量子计算专业学位,只设置了相关选修课程^[7]。毋庸置疑,各大高校是供应量子信息人才的中坚力量。量子信息的人才缺口,向国内外各高校以及教育平台提出了加速培养专业人才的重大挑战。该文针对量子信息教学目前的进展做了详细的分析与总结。

1 课堂教学体系

1.1 实例具体化

传统的大学物理教学主要以力学、热学、光学和电磁学等经典物理为主要内容,而造就现代人类科学技

术辉煌的量子理论和量子技术等现代物理内容较少。在新时代新工科教育建设的大背景下,2019 年,哈尔滨工业大学的张子静等人^[8]提出了“新时代新工科大学物理教学体系”改革,在原本传统的大学物理课程中加入量子通信等前沿技术,使得大学物理教学更加贴近现代技术发展。因为大学物理一般作为工科专业本科生的基础课程,作者认为教学方法应当更注重基本概念和主要的工作原理,放弃复杂的计算和推导,通过具体的例子形象地讲解量子通信的过程。

量子信息科学作为一门交叉学科,其基础知识涵盖量子力学、信息科学、代数等多个领域,学习门槛较高,学生理解有一定的困难。对此,许多学者提到在课堂中通过实例去解释量子系统的思想,将抽象的内容更形象化。

2011 年,西安电子科技大学的李阳阳教授等人^[9]曾在探讨量子计算智能教学时提出,将教学内容划分为理论型和实践型,对于理论型内容,应当以具体实例引导教学,让量子计算更形象化;对于实践型内容,则强调实际操作,授课内容贴近本学科的热点问题和技术前沿。将理论与实践教学相结合,进而培养学生的科研素养和实践能力。文献[10]中同样提到了实例具体化的观点,作者在教学实践中发现,量子信息领域的论文和专著等对于概念和原理的描述较为抽象,更适合具有良好数学物理背景的人阅读。他认为对于一些晦涩难懂的物理量或是狄拉克符号,可以用具体的数字举例表示;对于量子通信中的各个协议,则可以用一些具体的量子态为例演示整个协议的过程。多在教学过程中加入一些通俗易懂的例子或例题,能够帮助学生更好地理解量子信息的基本知识,降低学习难度。

1.2 动觉活动

源自戏剧的角色扮演越来越多地出现在了科学技术专业的教学中^[11],并且已经有一些文献^[12-14]具体说明了动觉活动(Kinesthetic Activities)在物理教学中的不同应用。动觉活动教学被定义为“任何使学生切实参与学习过程的活动”,通常是基于课堂的简短活动,可能只涉及少数学生(例如对部分学生进行排序),也可能是每个人(例如要求整个班级链接为一棵人类二叉树)。这一教学方式提供了对物理概念的直接说明,可以让学生更容易创建有助于理解的意象图式,同时增强学生学习的动力和兴趣。

2019 年,奥地利学者 López-Incera 提出基于动觉活动的教学方法^[15-16],让学生以做游戏的方式去模拟量子系统演变的过程,通过一个量子比特说明量子力学的一些基本原理,从而让学生更深刻地理解教学内容。在量子信息和量子力学等领域,实验通常较为复杂,且往往在需要昂贵设备和工具的实验室中进行,而

这样一种基于游戏的教学方式,在省去实际实验中过高的经济成本的同时,学生可以得到与真实实验室同样的结果。学生们在这个游戏中可以亲身体验并发现量子世界中一些抽象的特性。游戏规定,由学生们分别扮演粒子和科研人员的角色。“粒子”根据既定规则去进行表演,量子态由站立的方向表示;“科研人员”则负责观察“粒子”的表现,进一步收集和分析观察得到的数据,最后揭示出量子力学的基本规则和性质。图1为量子密钥分配的BB84协议中,四个偏振态的表示规则。

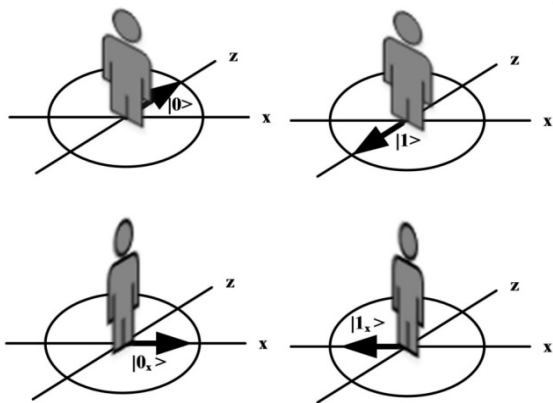


图1 BB84协议中四个偏振态的游戏表示规则

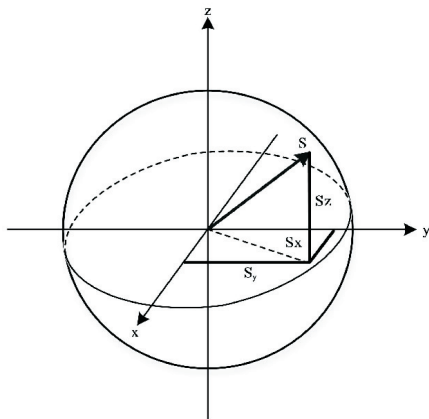


图2 Bloch球体上表示的向量S

此外,美国杜肯大学的 Corcovilo 则以两级系统中量子投影测量的规则为基础,提出^[17]用一个竞争性的双人游戏去模拟量子投影测量的教学方法。游戏目标是使用最少的测量次数,猜测从给定集合中秘密选择的量子态。如图2,利用 Bloch 球体描述单量子比特的状态,由单位实向量 S 表示。测量结果的 Bloch 向量形式如图3所示,当测量方向为 m 时,测量结果与 S 和 m 之间的角度以及 S 在 m 上的投影有关。量子测量的随机性通过 20 面的骰子或是其他经典的随机数发生器 (RNG) 模拟。骰子通常用于演示统计力学和量子力学中的随机过程。这里使用骰子可以使学生积极参与产生量子数据的过程,而不是依靠看不见的计算机代码来完成这一功能,并且,骰子也会减慢这个过程,

给学生时间思考,并强调单次量子测量的重要性。相较于狄拉克旋量表示法,Corcovilo 选择了 Bloch 向量形式是由于它的几何联系,且对于初学者来说更习惯向量形式。而自旋量是量子力学的专业描述,它可以直接扩展到具有两个以上基态的系统,此项游戏中模拟的测量结果同样可以使用狄拉克旋量符号来描述。

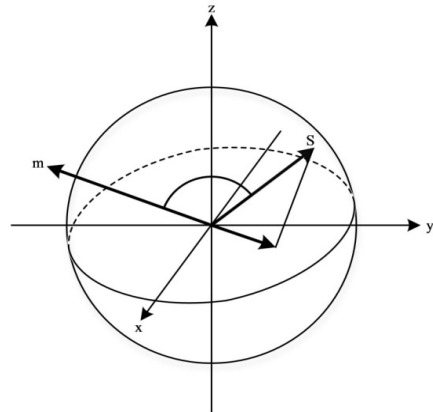


图3 测量方向为 m 的测量结果

1.3 教学模式

当前,量子信息教学模式中同样存在一些问题。其一,由于量子信息的交叉学科性质及其未在高校设置专门学科专业的原因,时常出现教师与学生本身专业背景不同的情况,导致师生之间难以找到契合点。其二,量子信息作为新兴学科,缺少成熟规范的教学体系。在这样的背景下,高校教育工作者们对教学模式、方法等内容提出了许多新的想法。

2020年,黑龙江大学的张可佳等人^[18]探讨了一些具体的教学策略。他们认为课堂中可以当场提出一些问题,师生解答,从而提高学生的课堂参与度,引导学生自主发现问题;也可以将科研问题带进课堂,让学生提前适应科研学习节奏,早日找到方向和切入点;课后,针对每个学生的特点分配不同任务,向老师单独反馈,让学生科研更加高效,避免个别学生在集体汇报中混水摸鱼的情况。2018年,长春理工大学的王晓茜等人^[19]针对本校的《量子信息物理》课程,从教学内容、方法和考核三个方面做出了分析和总结,提出了板书、多媒体、科普视频三者结合,再加以专业实验的教学方法。在授课中用板书和多媒体授课,适当加入一些科普视频,具有趣味性,更能激发学生的学习兴趣、开阔学生的视野,另外结合专业实验,实验的理论部分则在课堂讲授。他们还提出了丰富的课程考核内容和方式。对于期末考试,可以适当加大自主学习内容的卷面分值,避免这部分内容只在平时成绩中体现,从而学生不够重视的情况发生。此外,为了让学生更好吸收单个知识点的内容,他们提出让学生分成小组,分别对某一专题进行讨论学习并且设计相关问题,最终将讨

论结果以 PPT 形式讲解,从而提高学生的学习积极性。

2 教学辅助工具

传统教学方式主要依靠教师在课堂上的讲授,随着新时代新技术层出不穷,教学手段也逐渐向着新的方向发展。目前,选择使用相关工具去辅助教学的高校教师越来越多,面向社会大众的教学平台也接踵而至。作为新兴学科的代表之一,量子信息教学领域同样表现出这样的趋势。目前,国内外量子信息教育工具有教学仿真平台、在线教程、严肃游戏(教学游戏)等类型。

2.1 教学仿真平台

随着仿真技术的迅速发展以及仿真软件的普及,利用计算机模拟平台来辅助教学的优势日益显著,它改变了信息科学传统的教学方法和教学模式,大大推动了教育水平的发展。目前量子信息有多种实验体系,但大多成本很高,无法实际部署供高校大量学生进行教学实验,同时量子通信过程中存在许多不理想的因素,导致传统的课堂教学中存在很多问题,包括理论脱离实际、缺少实践环节、教学方法单一、教学气氛沉闷等。考虑到量子力学基础知识的抽象复杂、枯燥乏味,且无法提供足够的实际实验环境的特点,用仿真软件模拟实验环境就成为了非常适合辅助教学的一种策略。

2015年,波兰 AGH 科技大学的几位学者提出了一个基于量子集成开发环境 QuIDE 的课程概念^[20],其思想是将理论知识与在 QuIDE 模拟器^[21]上进行的实践课程相结合,课程内容包含量子门、量子比特和一系列诸如 Deutsch 和 Bernstein-Vazirani 问题、Grover 搜索、Shor 素因数分解、量子隐形传态和量子密集编码等算法。由于彼时 IBM 等各大量子科技巨头的模拟量子计算平台还未公布,并没有既符合教学要求又可以提供图形用户界面的模拟软件可供使用,因此他们开发了这一基于 GUI 的 QuIDE 模拟器。该软件提供了代码编辑和图形化构建电路两种方式,兼具灵活性和操作方便性。

作为目前最热门的可连接真实量子计算物理机的量子计算平台之一,IBM 模拟量子计算平台 IBM Quantum Experience (IBM QX) 具有优良的用户体验、功能丰富的量子计算实验模块以及强大的量子计算模拟机和物理机,除大量量子计算爱好者之外,IBM QX 同样受到许多高校教师的青睐。文献[22]介绍了美国佩斯大学研究生量子计算课程的教学经验,该课程涵盖量子计算电路、量子算法、量子计算的数学模型、量子纠错和量子密码学等领域,包括理论部分和基于

IBM QX 平台的项目实践部分。在此实践课程中,学生需要使用量子计算汇编语言(QASM)和 Python 开发项目,包括量子计算基本实验、算法优化、解决实际问题等主题,最后运行在 IBM QX 的模拟器或实际物理机上。

同样采取 IBM QX 平台作为教辅工具的还有西班牙马德里的 Carrascal 等人。考虑到没有物理学背景的计算机专业本科生去学习量子计算课程,他们提出的教学方法是借助经典面向对象编程简单地模拟量子系统,以此让学生深刻理解量子计算的基本概念,然后让学生在 IBM QX 平台上构建和测试量子电路,课程最后还可以视具体学习情况讲解量子隐形传态、量子相位估计、Grover 和 Shor 等重要量子算法^[23]。关于模拟平台的选择,他们对多个现有的量子编程环境进行了定性和定量分析,包括 Qiskit、Cirq、PyQuil、Q# 和 ProjectQ,最终结果表明 IBM QX 平台更适用于教学应用。学生可以先在 IBM Composer 上实践测试电路,然后利用其基于 Python 的量子编程环境 Qiskit 构建量子电路,一步步深化理解量子计算。

除上述主要用于量子计算模拟实验的仿真平台外,还有一些专业人员、高校或科研机构则在积极投入量子通信实验的教学仿真软件开发。

在新工科教学思想的指导下,部分高校已经将量子信息课程内容渗透到工科专业的本科生中。2019年,中国科学技术大学的陈巍教授等人提出^[24]将本来比较偏向于理论的量子信息,改变得更适合工科专业的学生去学习,注重实践能力的培养,在课程实验部分采取了虚实结合的方法来解决教学实验资源短缺的问题,尽可能在教学效果和教学成本之间取得平衡。对于量子密钥分发的实验内容,让学生基于熟悉的 C 语言、Matlab 和 Python 等工具编写仿真程序,再对密钥率等参数进行计算,加深对协议的理解,同时通过调整仿真模型的系统参数,理解实际系统和理论模型之间的区别与联系。针对纠缠、叠加和测量等物理特性丰富但设备昂贵的实验,作者尝试校企合作,开发了 3D 虚拟仿真软件,尽可能贴近真实器件,让学生有实际操作量子光学实验的体验感。

此外,英国圣安德鲁斯大学的 Kohnle 等人开发了一个名为 QuVis 的量子力学可视化项目^[25-26],旨在为量子力学的学习和教学开发交互式模拟系统。作为 QuVis 项目的一部分,Kohnle 等人于 2017 年开发了一套针对量子密码学的仿真系统^[27],使用三种不同的协议演示了量子密钥分发的基本原理,并使用偏振单光子或自旋 1/2 粒子作为量子比特的物理实现。美中不足的是,此类模拟仅在于演示 QKD 的基本原理,从而显示的只是理想情况,若要更贴近实际实验,则需要进

一步考虑光源或器件的不完美。

2.2 在线教程

作为上述美国佩斯大学量子计算课程的学生, Westfall 等人分享了学习经验并提出一个教学方案。文献[28]中,他们提出用抽认卡(flashcard)^[29]记忆关键概念加上交互式在线课程的教学方案。该抽认卡使用对时间敏感的算法帮助学生记忆一些基本概念,从而更好更快地理解量子计算。文献[30]中则介绍了教学方案中的交互式教程部分,该教程包含了量子位、叠加、纠缠、Shor 算法、Grover 算法以及它们如何使用量子计算协同工作等五个主题的视频课程和测试部分。作者认为,与经典计算机相比,量子计算提供更快的计算速度和更好的结果,其基本基础是量子力学,但并不需要完全掌握量子力学或物理学即可在量子计算机上进行编程,对于量子计算机程序员来说,理解亚原子和原子世界的一小部分特性足以。为了学习的高效性,此教程最大程度地精简背景知识介绍,忽略 Grover 和 Shor 算法的提出时间等内容,这样,先导课程只约为一个小时,从而避免学生因为过多枯燥复杂的内容失去兴趣的情况发生。该项目部署在更偏向于教育性质的 Udemy 平台,当学生每完成一个模块的学习,即可得到由 10 个简短问题组成的测试内容。

同样致力于量子领域交互式在线教程开发的还有美国学者 Singh 等人,他们从 2006 年起就一直以学生学习量子力学的困难研究为指导,致力于开发一套量子交互式学习教程(QuILT)。此教程使用基于询问的学习方法,向学生询问一系列指导性问题,努力弥补学习量子力学过程中定量和定性之间的差异。教师可以将 QuILT 用作课堂教学工具或作为课后作业。文献[31]介绍了 QuILT 中量子密钥分发的部分,即 QKD QuILT。学生在此教程中首先了解基本的背景知识,然后学习一些具有理论安全性或实际安全性的 QKD 协议,其中还包含测试部分,学生在传统性地学习基本概念之后,可依次进行预测试、后测试、延后测试等。

2.3 严肃游戏

严肃游戏(Serious Game)属于电子竞技游戏,De Freitas 将其描述为以教育为主要目标的游戏^[32],具体指以教授知识技巧、提供专业训练和模拟为主要内容的游戏,目前已广泛应用于教育、医学、科研、培训、军事、工业等诸多领域。这种基于严肃游戏的教学方法通过设计和分析模拟游戏以支持正式的教育或培训,确保学生学习乐趣和动机,凸显教育价值。

美国的 Parakh 等人于 2017 年提出了^[33]一个基于项目的游戏化教学模式,改变了传统的课堂教学模式,开发出一款名为 QuaSim 的量子密码学游戏,将传统的课堂授课转化为基于软件项目的虚拟环境,以此来

交互式地教授学生课程内容。此游戏模拟现实世界,将学生直接置于通过计算机生成的虚拟环境中,提供多种角色以及多种学习模式,引导学生去解决系统设定的一些实际通信问题。在问题解决环节,系统支持团队竞赛,最终可能会产生最优或次优解,在某些情况下也无法找到解决方案。玩家进入游戏之后,初始界面有神谕、偏振、叠加、测量四个选项可供选择,若点击“神谕”,系统将根据玩家以前在游戏中的成就和所选择的角色,引导玩家朝着合适的方向前进,而选择偏振、叠加和测量三者之一将会传送到对应的学习模块中。游戏以玩家的第一视角用射击类游戏的形式,设计用于学习和理解量子密码学内容的各个关卡,画面精美、内容丰富,确保了学习的趣味性。

作为量子巨头之一的 IBM 则在 2018 年推出了世界上第一个开源的量子计算棋盘游戏 Entanglion^[34],它是一个两量子比特的双人模拟游戏,向玩家介绍了量子比特、量子态、量子门、叠加、纠缠、测量和误差等概念,以及构建真正的量子计算机所涉及的各种软硬件。它以一种轻松、独特的方式传达了复杂的技术概念,在游戏评估阶段即受到测试人员的广泛欢迎。

3 结束语

在当前新工科的教育思想指引下,需要各教育工作者勇于打破传统教学理念、推陈出新、善用教学工具增加学生学习的趣味性。量子信息作为新兴学科,在高校中仍属于物理学、网络安全、密码学或是计算机等专业的课程内容之一,还未单独成立专业学科。而随着量子技术日益发展,未来的人才需求会与日俱增。为良好应对人才缺口,各高校需要完善量子信息教学体系,加强量子技术人才输出。

可以看到,许多教学人员、研究人员和企业都在致力于发展量子信息的教育事业。无论是以教师讲授为主的课堂教学模式的革新,亦或是借助在线教程、模拟平台、严肃游戏等辅助教学工具,相较于传统一成不变的教学方式,都有着不错的提升效果。未来的工作中,依旧需要更多课堂教学方式、教材选择、考核方式等多方面的教学体系改革提升;在教辅工具方面,也依旧需要更多能吸引学生学习兴趣、针对不同专业学生背景精简课程内容、教学效果良好的在线课程;更多用户体验感良好、性能优秀、更贴近实际实验环境的模拟仿真系统;更多趣味性、界面优美、能让学生深刻记忆课程概念的教学游戏。

参考文献:

- [1] 王思婷. 一文带你了解量子计算产业化商业化仍是长路漫漫[EB/OL]. (2019 - 09 - 30). <https://www.qianzhan>.

- com/analyst/detail/220/190929-cc412f9e.html.
- [2] 潘建伟. 更好推进我国量子科技发展[J]. 红旗文稿, 2020(23):9-12.
- [3] 徐莉莎. 量子小知识[N/OL]. 四川日报, 2020. <https://epaper.scdaily.cn/shtml/scrb/20201116/245383.shtml>.
- [4] 腾讯科技. 全球科技媒体头条|全球量子计算人才仅约1000人 缺口严重[EB/OL]. (2018-10-23). <https://tech.qq.com/a/20181023/008462.htm>.
- [5] European Commission. Quantum Flagship Kickoff | Shaping Europe's digital future [EB/OL] (2018). <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/events/quantum-flagship-kickoff>.
- [6] QUANTUM FLAGSHIP. The Quantum Flagship officially presents the Strategic Research Agenda to the European Commission[EB/OL] (2020-03-03). <https://qt.eu/about-quantum-flagship/newsroom/the-quantum-flagship-officially-presents-the-strategic-research-agenda-to-the-european-commission/>.
- [7] 杨夏, 张辉. 量子计算行业教育的发展[J]. 自然杂志, 2020, 42(4):331-339.
- [8] 张子静, 王晓鸥, 霍雷, 等. 大学物理教学改革——量子通信教学浅析[J]. 大学物理, 2019, 38(8):54-58.
- [9] 李阳阳, 尚荣华, 焦李成. 量子计算智能导论教学探索[J]. 计算机教育, 2011(15):55-57.
- [10] 彭永刚. 本科生量子信息教学几点体会[J]. 物理与工程, 2012, 22(3):1-4.
- [11] MCSHARRY G, JONES S. Role-play in science teaching and learning[J]. School Science Review, 2000, 82(298):73-82.
- [12] WOLFMAN S A, BATES R A. Kinesthetic learning in the classroom[J]. Journal of Computing Sciences in Colleges, 2005, 21(1):203-206.
- [13] SINGH V. The electron runaround: understanding electric circuit basics through a classroom activity [J]. The Physics Teacher, 2010, 48(5):309-311.
- [14] BRUUN J, CHRISTIANSEN F V. Kinesthetic activities in physics instruction: Image schematic justification and design based on didactic situations[J]. arXiv:1410.4602, 2014.
- [15] LOPEZ-INCERA A, HARTMANN A, DUER W. Encrypt me! a game-based approach to bell inequalities and quantum cryptography[J]. European Journal of Physics, 2020, 41(6):065702.
- [16] LOPEZ-INCERA A, DUER W. Entangle me! a game to demonstrate the principles of quantum mechanics[J]. American Journal of Physics, 2019, 87(2):95-101.
- [17] CORCOVILOS T A. A simple game simulating quantum measurements of qubits [J]. American Journal of Physics, 2018, 86(7):510-517.
- [18] 张可佳, 张龙, 唐孝敏. 基于科教一体思想的量子密码教学思考[J]. 黑龙江教育:高教研究与评估, 2020(8):17-19.
- [19] 王晓茜, 苟立丹, 冯玉玲, 等. 《量子信息物理》课程教学改革的研究[J]. 教育现代化, 2018, 5(32):62-63.
- [20] RYCERZ K, PATRZYK J, PATRZYK L, et al. Teaching quantum computing with the QuIDE simulator[C]//International conference on computational science, ICCS 2015 computational science at the gates of nature. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2015:1724-1733.
- [21] PATRZYK J, PATRZYK B, RYCERZ K, et al. Towards a novel environment for simulation of quantum computing[J]. Computer Science, 2015, 16(1):103-129.
- [22] TAPPERT C C, FRANK R I, BARABASI I, et al. Experience teaching quantum computing[M]. Myrtle Beach, SC: Association Supporting Computer Users in Education, 2019:46-60.
- [23] CARRASCAL G, DEL BARRIO A A, BOTELLA G. First experiences of teaching quantum computing[J]. The Journal of Supercomputing, 2021, 77(3):2770-2799.
- [24] 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.
- [25] KOHNLE A, BOZHINOVA I, BROWNE D, et al. A new introductory quantum mechanics curriculum [J]. European Journal of Physics, 2013, 35(1):015001.
- [26] KOHNLE A, BAILY C, CAMPBELL A, et al. Enhancing student learning of two-level quantum systems with interactive simulations [J]. American Journal of Physics, 2015, 83(6):560-566.
- [27] KOHNLE A, RIZZOLI A. Interactive simulations for quantum key distribution [J]. European Journal of Physics, 2017, 38(3):035403.
- [28] WESTFALL L, LEIDER A. Teaching quantum computing [C]//Proceedings of the future technologies conference. Cham: Springer, 2018:63-80.
- [29] DAMIEN E. Anki - powerful, intelligent flashcards [EB/OL] (2002) [2021-01-18]. <https://apps.ankiweb.net/>.
- [30] SABOL D, LEIDER A, WESTFALL L, et al. Teaching quantum computing with videos [DB/OL]. 2019. https://research.library.fordham.edu/cs_facultypubs/1.
- [31] DEVORE S, SINGH C. Interactive learning tutorial on quantum key distribution [J]. Physical Review Physics Education Research, 2020, 16(1):010126.
- [32] DE FREITAS S. Learning in immersive worlds: a review of game-based learning [R]. Bristol: Joint Information Systems Committee, 2006.
- [33] PARAKH A, SUBRAMANIAM M, OSTLER E. QuaSim: a virtual quantum cryptography educator [C]//2017 IEEE international conference on electro information technology (EIT). New York, NY: IEEE, 2017:600-605.
- [34] WEISZ J D, ASHOORI M, ASHKTORAB Z. Entanglion: a board game for teaching the principles of quantum computing [M]//Proceedings of the 2018 annual symposium on computer-human interaction in play (Chi Play 2018). New York: Assoc Computing Machinery, 2018:523-534.