

全球量子计算发展态势分析*

王立娜^{*,1} 唐川^{1,2} 田倩飞^{1,2} 张娟¹ 徐婧^{1,2}

(1. 中国科学院成都文献情报中心新一代信息技术战略研究中心,成都 610041;
2. 中国科学院大学经济与管理学院图书情报与档案管理系,北京 100190)

摘要:作为一项重要的颠覆性技术,量子计算的高速并行计算模式或将引发一场信息技术新革命,已成为世界各国抢占经济、军事、安全、科研等领域全方位优势的战略制高点。构建实用化的通用量子计算机已被称为“21世纪的太空竞赛”。本文回顾了近年来美、欧、日等主要国家和地区在量子计算方面的战略规划和项目部署,分析了量子计算技术的发展现状、面临的技术风险、未来发展趋势及产业应用动向。最后,对我国量子计算技术的发展提出了建议。

关键词:量子计算;战略规划;发展态势

中图分类号:G35 文献标识码:A doi:10.16507/j.issn.1006-6055.2019.10.016

Analysis on the Development Strategies and Trends of Quantum Computing*

WANG Lina^{*,1} TANG Chuan^{1,2} TIAN Qianfei^{1,2} ZHANG Juan¹ XU Jing^{1,2}

(1. Center for Strategic Study on New Generation Information Technology, Chengdu Library
and Information Center, CAS, Chengdu 610041, China;
2. Department of Library, Information and Archives Management, School of Economics and
Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Quantum computing is a disruptive technology with high-speed parallel computing capabilities. This will lead to a new revolution in information technology. Hence, quantum computing has become a new commanding height in strategic competition, including the fields of economy, military, security and scientific research. The construction of the general-purpose quantum computers has been called "the space race of the 21st century". In this paper, we review recent strategic planning and project deployment of quantum computing in the United States, Europe, Japan and other major countries and regions. Then, the development status, challenges, trends and industrial application of quantum computing are analyzed. Finally, the corresponding suggestions in China were discussed.

Key words: quantum computing; strategy; development trend

量子计算是一种遵循量子力学规律进行高速运算、存储、处理信息的新型计算。与传统计算机相比,量子计算机具有天然的量子并行计算能力,存储能力强,运算速度快,将带来现有计算能力质

的飞跃。在新一轮信息科技革命和产业革命的背景下,量子计算已成为世界各国抢占经济、军事、安全、科研等领域全方位优势的战略制高点。为抢先获得“量子优势(quantum supremacy)”,掌握

* 中国科学院青年创新促进会(2019175),四川省软科学研究计划(2018ZR0078),成都市科技项目(2017-RK00-00275-ZF)资助

** 通讯作者, E-mail: wangln@clas.ac.cn; Tel: 028-85235075

技术制高点、标准制定权和舆论主导权,美国和欧盟等发达国家和地区已将量子计算发展提升到国家战略高度,纷纷部署一系列的体系化量子计算发展举措,联合政府、学术界、产业界等诸多利益相关者协同解决量子计算技术的发展障碍。在此背景下,本文对全球量子计算发展态势进行了剖析和讨论,并对我国未来发展提出了建议。

1 主要国家和地区量子计算战略规划与项目部署

1.1 美国

美国是最早将量子信息技术列入国家战略、国防与安全研发计划的国家,对量子计算研究给予长期和广泛的支持,美国国家科学基金会(National Science Foundation, NSF)、国防部、能源部(Department of Energy, DOE)、国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)等机构均部署了项目研发工作。早在2002年,美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)就制定了《量子信息科学与技术规划》,2015年发布的《国家战略性计算计划》更将量子计算列为维持和增强美国高性能计算能力的核心工作。美国国家科学技术委员会(National Science and Technology Council, NSTC)于2016年发布《推进量子信息科学发展:美国的挑战与机遇》报告,指出了美国面临的挑战与应对措施,以及美国主要联邦政府机构的重点部署方向。2018年,美国陆续发布了《量子信息科学国家战略概述》《国家量子计划法案》,进一步整合政府、工业界和学术界的资源,通过统一的国家量子战略和全面的量子科技政策推动量子技术发展,确保美国在量子信息技术领域具有领先优势。2019年,美国持续落实以往战

略部署,设立量子计算研究项目,陆军研究办公室与国安局于2019年5月联合资助捕获离子量子计算系统研究。

1.1.1 国家量子计划法案

2018年6月28日,美国众议院科学委员会通过《国家量子计划法案》,提出由总统发起未来10年国家量子行动计划,加速和协调公私量子科学研究、标准制定和人才培养,使美国具备相对中国和欧洲的领先优势。2018年12月21日,美国总统特朗普正式签署《国家量子计划法案》,开启量子领域的“登月计划”,主要内容如表1所示^[1]。

表1 美国《国家量子计划法案》主要内容

Tab.1 Main contents of the US National Quantum Initiative Act

主要内容	具体行动
发起10年量子行动计划	设定量子行动计划的目标、优先事项和指标,加速美国量子信息科学和技术应用的发展。此计划分两期5年执行,斥资12.75亿美元,其中NIST获资4亿美元,NSF获资2.5亿美元,DOE获资6.25亿美元
成立国家量子协调办公室	监督机构间的事务协调,提供战略规划支持,充当利益相关方的中心联络点,开展公共宣传,促进商业化应用
成立量子信息科学委员会	协调美国联邦机构的量子信息科学和技术研究及教育活动
成立国家量子计划咨询委员会	评估量子信息技术的发展现状和趋势、国家量子计划的实施进度及调整的必要性

1.1.2 美国NSF量子计算相关资助项目

2014年以来,美国NSF资助量子计算项目共计145项(检索标准为项目名称中含有量子计算研究关键词,检索日期为2019年2月20日),资助总额约6382万美元,量子计算项目的数量与获资额度年度变化趋势如图1所示。可见,2014—2017年美国NSF资助的量子计算项目的经费额度呈现出稳步增长态势,2018年起项目数量和资助额度快速上升。相比2017年,2018年的资助项目数量增长了1.90倍,项目资助额度增长了1.65倍,这与美国2018年陆续推出的量子技术

发展战略和行动计划密不可分。这些项目主要通过 NSF 数理科学部物理科学处、计算机与信息科学及工程学部计算与通信基础处、工程科学部电子通信和网络系统处、数理科学部化学科学处、数理科学部材料研究处等机构来资助。

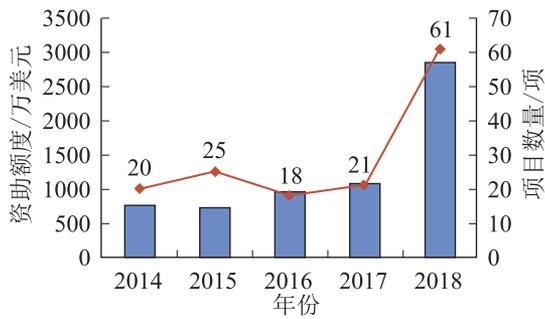


图1 2014—2018年美国NSF资助的量子计算项目数量与资助额度变化趋势

Fig. 1 The trends of NSF awards in quantum computing between 2014-2018

从项目的获资机构分布来看,美国NSF在2014—2018年间共资助65家研究机构开展量子计算研究,这65家研究机构由63家高校和2家企业组成,其中获资项目数量为4项以上的机构9家,获资项目数量为2~3项的机构28家。表2给出了2014—2018年美国NSF资助的量子计算项目主要承担机构及其获资项目数量与获资额度。麻省理工学院的获资项目数量(11项)和项目获资额度(728.01万美元)均最高,主要研究内容涉及芯片级量子信息处理器、超导量子比特、量子算法、拓扑量子计算、量子模拟等。在获资项目数量方面,马里兰大学、加州大学圣芭芭拉分校、威斯康星大学麦迪逊分校次之,获资项目数量分别为8项、7项、6项。在获资项目额度方面,马里兰大学、斯坦福大学、芝加哥大学、哥伦比亚大学、威斯康星大学麦迪逊分校、加州大学圣芭芭拉分校依次位列第二位至第七位,这6所高校的获资项目额度均超过200万美元。其他项目获资额度

表2 2014—2018年美国NSF资助的量子计算项目主要承担机构相关情况

Tab. 2 The research institutions of NSF awards in quantum computing between 2014-2018

承担机构	获资项目数量/项	获资项目额度/万美元
麻省理工学院	11	728.01
马里兰大学	8	466.70
加州大学圣芭芭拉分校	7	207.48
威斯康星大学麦迪逊分校	6	234.88
普林斯顿大学	4	131.37
德克萨斯州农工大学	4	96.67
芝加哥大学	4	269.83
罗彻斯特大学	4	169.70
南加州大学	4	128.09
科罗拉多矿业学院	3	156.39
达特茅斯学院	3	95.18
乔治亚理工学院	3	68.18
哈佛大学	3	94.11
宾夕法尼亚州立大学	3	127.83
普渡大学	3	160.00
斯坦福大学	3	380.00
伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校	3	56.94
新墨西哥大学	3	48.50
加州理工学院	2	130.00
哥伦比亚大学	2	235.22
杜克大学	2	152.00
乔治城大学	2	44.08
约翰霍普金斯大学	2	31.57
路易斯安那州立大学	2	49.83
西北大学	2	68.49
QC Ware公司	2	164.54
罗彻斯特理工学院	2	53.92
波士顿大学	2	93.88
亚利桑那大学	2	57.00
加州大学圣地亚哥分校	2	46.02
特拉华大学	2	130.00
密歇根大学安娜堡分校	2	53.40
宾夕法尼亚大学	2	125.00
德克萨斯大学奥斯汀分校	2	145.00
弗吉尼亚大学	2	60.53
华盛顿大学	2	67.80
弗吉尼亚联邦大学	2	57.73
加州大学伯克利分校	1	120.00
科罗拉多大学博尔德分校	1	100.00
弗吉尼亚理工大学	1	100.00

超过100万美元的研究机构包括罗彻斯特大学、QC Ware公司、普渡大学、杜克大学、德克萨斯大学奥斯汀分校、普林斯顿大学等15所高校和企业。其中,加州大学伯克利分校、科罗拉多大学博

尔德分校、弗吉尼亚理工大学的表现比较突出,虽然获资项目数量仅为1项,但获资额度却依次达120万美元、100万美元和100万美元。

1.2 欧洲

作为量子理论的发源地,欧洲一直高度重视量子信息技术对国家经济安全的影响,积极投入研发资源,大力发展相关技术。2016年以来,欧盟委员会陆续发布《量子宣言》、“量子技术旗舰计划”,旨在未来十年内投资10亿欧元重点推动通信、计算、模拟、传感和计量、基础科学五大主要量子技术领域发展,建立极具竞争力的欧洲量子产业,确保欧洲在未来全球产业蓝图中的领导地位。英国已将量子技术提升到国家战略高度,“创新英国”组织(Innovate UK)和工程与自然科学研究理事会(Engineering and Physical Sciences Research Council, EPSRC)于2015年3月发布《国家量子技术战略》,提出了未来30年量子技术研究和商业应用的重点领域和前景。Innovate UK于2015年10月发布《英国量子技术路线图》,分析了量子计算机、量子传感器和量子通信等各项量子技术可能的商业化时间和发展路线。2016年11月,英国政府科学办公室(Government Office for Science, GOS)发布《量子时代的技术机遇》报告,指出了英国量子技术未来应用及商业化的五大发展方向。此外,英国一直高度重视量子信息技术的基础研究,近年来正逐步向基础研究和产业应用并重转变。2019年7月,英国EPSRC投资9400万英镑推动量子计算等技术的研究与应用。2018年9月,德国联邦教育与研究部(Federal Ministry of Education and Research, BMBF)发布《量子技术:从基础到市场》联邦政府框架计划,提出将在2018—2022年内投入6.5亿欧元,重点开展量子卫星、量子计算、量子测量等技术研

究^[2]。2019年,德国与美国加强量子计算研究合作,弗劳恩霍夫协会和IBM宣布联合研发量子计算机。法国总统马克龙于2018年5月与澳大利亚总理签署了谅解备忘录,联合成立硅量子计算合资公司,尝试开发量子硅集成电路并进行商业化,以在量子计算硬件的商业化上成为全球参与者。

1.2.1 量子技术旗舰计划

2016年4月,欧盟宣布将投入10亿欧元开展量子技术旗舰计划,力争在第二次量子革命中抢占先机,并为此成立了一个由12位学术界专家和12位业界专家组成的独立高级督导委员会,负责制定量子技术旗舰计划的战略研究议程、实施模式和治理模式。该委员会相继于2017年2月和9月发布中期报告和最终研究报告,就战略研究议程、实施模式和治理模式提出了具体建议^[3,4],指出量子计算的短期(3年)发展目标是开发并展示容错路线,以制造具备超过50个量子位的量子处理器;中期(6年)发展目标是开发出具备量子纠错功能或鲁棒量子位的量子处理器,且优于物理量子位;长期(10年)发展目标是开发可实现量子加速并超越经典计算机的量子算法。

2018年10月,欧盟理事会正式启动总经费高达10亿欧元的量子技术旗舰计划,主要开展量子通信、量子计算、量子模拟、量子计量和传感、基础科学5大领域研究,旨在欧洲建设一个量子网络,通过量子通信网络连接起所有的量子计算机、模拟器与传感器。2018年10月至2021年9月为量子技术旗舰计划初始阶段,将通过“地平线2020计划”拨出1.32亿欧元^[5]。2021年以后,预期将再资助130个项目,以覆盖从基础研究到产业化的整条量子价值链,并将研究人员与量子技术产业汇集到一起。

1.2.2 欧盟 H2020 计划中的量子计算项目

作为欧盟实施创新政策的重要资金工具,“地平线 2020 (H2020)”计划大力资助德国、英国、法国、瑞士、瑞典、意大利等国探索量子计算的创新发展路径,通过欧洲研究理事会 (European Research Council, ERC)、未来和新兴技术 (Future and Emerging Technologies, FET) 行动计划部署多项研究项目,主要研究方向涵盖捕获离子量子计算、超导量子计算、光子量子计算、半导体量子计

算、量子模拟器等主流量子计算技术。下面将主要介绍一些欧盟 H2020 计划资助的量子计算重点项目,如表 3 所示。

1.2.3 英国工程与自然科学研究理事会和“创新英国”的量子计算项目

作为国家科技创新战略政策的重要落实机构,英国 EPSRC 和 Innovate UK 推出了一系列量子计算研究行动,其中 EPSRC 资助的量子计算重点项目如表 4 所示。

表 3 欧盟 H2020 计划资助的量子计算重点项目

Tab.3 Key projects of quantum computing funded by EU H2020

项目名称	时段/年	资助经费/万欧元	承担国家
基于捕获离子的先进量子计算	2018—2021	958.80	奥地利、德国、法国、英国、瑞士
可编程原子大规模量子模拟	2018—2021	925.75	德国、法国、奥地利、意大利、英国、瑞士
量子级联激光频率梳中的量子模拟与纠缠工程	2018—2021	933.56	意大利、瑞士、德国、法国
开放式超导量子计算机	2018—2021	1033.44	德国、瑞士、瑞典、西班牙、芬兰
微波驱动离子阱量子计算	2018—2021	236.33	保加利亚、德国、英国、以色列
光子量子模拟	2018—2021	299.98	法国、意大利、英国、德国、葡萄牙
可扩展的稀土离子量子计算节点	2018—2021	299.03	德国、瑞典、丹麦、西班牙、法国
MOS 基量子信息技术	2016—2019	397.34	法国、英国、丹麦、瑞士、意大利、芬兰
用于多体动力学的类比量子模拟器	2015—2017	200.05	德国、法国、意大利、奥地利
光子量子计算	2015—2020	200.94	英国
碳纳米管量子电路	2015—2020	199.86	英国
量子光学工程	2015—2020	197.81	英国

表 4 英国 EPSRC 资助的量子计算重点项目

Tab.4 Key projects of quantum computing funded by EPSRC

项目名称	承担机构	时段/年	资助经费/万英镑
超导量子处理器的编译与电路布局优化	牛津大学	2018—2019	14.66
超导量子电路的修正	伦敦大学	2018—2019	220.68
利用分子自旋拓展量子计算	曼彻斯特大学、 牛津大学	2018—2021	23.43 6.50
量子算法及应用	布里斯托大学	2018—2021	46.85
有机量子集成器件	帝国理工学院	2018—2021	32.31
鲁棒离子阱量子逻辑的最优控制	帝国理工学院	2017—2021	111.07
量子电子器件模拟	格拉斯哥大学	2017—2018	10.08
英国超导量子技术	伦敦大学	2016—2019	271.10
量子计算理论	牛津大学、 伦敦大学学院	2016—2019	32.04 30.06
量子光子集成电路	布里斯托大学	2016—2019	457.49
为紧急量子计算机创建供应链	萨塞克斯大学、 牛津大学、 南安普顿大学	2016—2019	31.17 30.31 15.06

1.3 日本

日本政府和科技界一贯重视量子信息领域的研发攻关,近年来将量子技术视为本国占据一定优势的高新科技领域进行重点引导和发展。日本政府在2016年1月《第五期科学技术基本计划》中把量子技术认定为创造新价值的核心基础技术。2016年3月起,日本文部科学省基础前沿研究会下属的量子科技委员会开始调研和探讨量子技术的推进措施;同一时期,日本科学技术振兴机构将“实现对量子状态的高度控制,开拓新的物理特性和信息科学前沿”作为2016年度战略性创造研究的重点。4月,国立研究开发法人“量子科学研究开发机构”成立,合并了放射医学综合研究所与原子能研发机构的一部分,以统一推进量子技术研发。2017年2月13日,日本文部科学省基础前沿研究会下属的量子科技委员会发表了《关于量子科学技术的最新推动方向》

报告,提出了日本未来在该领域应重点发展量子信息处理和通信、量子测量、传感器和影像技术、最尖端光电和激光技术^[6]。

2018年3月,日本文部省发布量子飞跃旗舰计划,旨在通过光量子科学技术等研究解决国家重要经济和社会问题^[7]。量子飞跃旗舰计划主要包括量子信息处理、量子测量和传感、下一代激光技术三大技术领域,每个技术领域均有2项旗舰项目和1项基础研究项目。旗舰项目每年将获得3~4亿日元(约1800~2400万人民币)的经费,基础研究项目每年将获得2000~3000万日元(约120~180万人民币)的经费。其中,量子信息处理领域以研发对经济、社会有重要影响的通用型量子计算机为目标(表5),实现超越经典计算机的量子模拟或量子计算机,现已开展的研究项目如表6所示。

表5 量子飞跃旗舰计划中量子信息处理领域的各阶段研究目标

Tab.5 Research objectives of quantum information processing in Q-LEAP

量子信息处理领域	5年内	5年后	10年后
冷原子、分子体系	模拟现实的物质状态,捕捉原子,探究缺陷影响和相互作用,研发冷原子的高度控制技术	开发多体电动力学模拟器原型机,开始应用验证	相干量子退火和量子化学计算原型机,开展云计算服务
超导量子比特	研发量子比特的高度集成技术和高质量量子比特技术,为量子计算机的应用奠定基础	通过量子计算原型机验证量子优越性,供用户在实际使用中开展优越性验证工作	10年后改进量子计算原型机,开始应用验证和云计算服务
基础研究主题	软件(含量子信息理论、中间设备、应用程序等);半导体量子比特;离子阱;其他(以光逻辑门方式和拓扑学为基础的研究、不同要素的集成技术等)		

表6 量子飞跃旗舰计划中量子信息处理领域已开展的研究项目

Tab.6 Research projects of quantum information processing in Q-LEAP

类别	项目名称	承担机构
旗舰项目	超导量子计算机的研究与开发	理化学研究所新兴物质科学中心、东京大学、产业技术综合研究所、东芝、MDR、NEC、NTT、QunaSys等
基础研究	基于阿秒纳米范围时空光控制的冷却原子量子模拟器的开发及其在量子计算中的应用	自然科学研究机构分子科学研究所
	具有冷却离子的多自由度复合量子模拟器	大阪大学基础工学研究所
	以架构为中心的量子软件理论与实践	国立信息学研究所
	量子计算机高速仿真环境的构建及量子软件的开发	京都大学
	利用大规模集成电路实现基于硅量子比特的量子计算机	国家先进工业科学技术研究所
	量子软件	庆应义塾大学

1.4 中国

我国也高度重视量子计算技术的研究,将其列入了国家发展规划,推出一系列相关发展计划和政策,力争在量子计算领域取得重大突破。2010年,中国科学技术大学获得了一项“超级973”项目“固态量子芯片信息处理单元的研究”,旨在支持半导体量子计算研究,开发固态量子芯片。2016年7月,国务院印发《“十三五”国家科技创新规划》,将量子计算列入面向2030年的科技创新重大项目,重点研制通用量子计算原型机和实用化量子模拟机^[8]。为贯彻执行此创新规划,我国科技部门就量子计算研究部署了相应的国家科技计划项目。其中,科技部国家重点研发计划于2016年设立了量子调控与量子信息重点专项,2016—2018年间资助了一系列的量子计算研究项目,具体的项目名称和承担机构见表7所示。《国家自然科学基金“十三五”发展规划》指出重点支持量子信息技术的物理基础与新型量子器件等研究,大力推动量子计算等重大交叉领域的研究,主要研究包括可扩展性的固态物理体系量子计算与模拟、新型量子计算模型和量子计

算机体系结构^[9]。2017年,国家自然科学基金委设立了“准二维体系中的高温超导态和拓扑超导态的探索”重大项目,旨在研究马约拉那费米子的操控、编织或融合,探索在量子计算中的可能应用;2018年设立“微结构材料中声子的调控及其在超导量子芯片中的应用”重大项目,拟通过声微结构材料的能带设计和剪裁,实现对声子模式、拓扑态声场的操纵,并应用于声子-超导量子芯片混合系统中。

2 量子计算研究现状与趋势

2.1 量子计算技术的发展现状

随着指导半导体行业发展节奏的摩尔定律走向终结,以大规模集成电路为基础的经典计算机面临着性能提升瓶颈。作为一种借助量子力学理论改进的计算模型,量子计算可超越经典计算机实现指数级的计算速度。近20多年来,量子计算取得了诸多突破性进展,其巨大的经济安全价值引发了政府、学术界和产业界极大的关注力度。但是,目前量子计算尚处于技术攻关和原型样机研制验证的早期发展阶段,性能超越经典计算的实用量子计算机仍有很长的路要走。

表7 国家重点研发计划资助的量子计算项目

Tab. 7 Quantum computing project funded by National Key R&D program

资助时间/年	项目名称	承担机构
2016	基于人造规范势与光晶格中超冷原子气体的量子模拟	中国科学院物理研究所
	基于超冷原子气体的量子模拟	山西大学
	半导体量子芯片	中国科学技术大学
	超导量子芯片中多比特相干操控及可扩展量子模拟	南京大学
	离子阱量子计算	清华大学
2017	面向量子混合系统的量子模拟	中国科学技术大学
	固态量子存储器	中国科学技术大学
	基于光晶格超冷量子气体的量子模拟	山西大学
	具有量子纠错和存储功能的多超导量子比特集成系统	中国科学技术大学
2018	生物体系量子计算通用软件平台及示范应用	吉林大学
	拓扑超导等关联体系的量子态	北京大学
	量子程序设计理论、方法与工具	中国科学院软件研究所
	半导体复合量子结构的量子输运机理及量子器件研究	中国科学院半导体所

量子计算机主要由量子硬件与量子软件两部分组成。其中,量子硬件主要包括量子计算模拟器、量子门、量子处理器等,量子软件主要包括量子计算机操作系统、量子语言及编译器、量子应用软件与算法等。量子比特是量子信息的基本存储单元,任意的两态量子体系都可成为量子信息的载体,如二能级原子、分子或离子,超导约瑟夫森结,光子偏振态,电子能级或自旋,非阿贝尔任意子等。基于量子比特的表征载体的不同,量子计算机主要包括超导、离子阱、光量子、金刚石色心、拓扑、半导体量子点、中性原子等不同技术路线,每种技术路线各有优劣势,其中离子阱量子计算和超导量子计算已经步入商用。由于量子系统非常脆弱,极易受材料杂质、环境温度等影响引发退相干效应,致使量子比特失效,所以量子计算机中用于纠错的备份比特数量要显著多于经典计算机。为修正误差和维持稳定性,每个逻辑量子比特都由数个到数千个“物理”量子比特组成。逻辑量子比特的制造和集成能力决定着量子计算机的发展阶段。此外,量子比特的可扩展性、长相干性、鲁棒性是实现量子计算的重要条件。谷歌、IBM、英特尔、微软等大型科技公司和牛津大学、马里兰大学、斯坦福大学、新南威尔士大学等知名高校均在这一领域积极探索。

1) 离子阱量子计算

离子阱体系是最早尝试实现量子计算的物理体系。离子阱技术相较于其他技术路线而言最大的优势就是稳定,它拥有最好的逻辑门保真度。离子阱技术具有较长的相干时间(可达10分钟),有最高的制备和读出量子比特的效率。离子阱方法有待解决的问题是能储存多条离子链的离子阱在实验上很难实现,离子的自发辐

射、激光的相位和强度波动均会导致消相干^[10]。

离子阱量子计算在关键领域商用进程和成本方面都优于超导量子计算。由美国马里兰大学和杜克大学两位物理学家于2015年创立的IonQ公司是量子计算领域离子阱技术的坚定探索者。2018年12月, IonQ公司研制出新型离子阱量子计算机,拥有160个存储量子比特和79个处理量子比特,刷新了谷歌Bristlecone处理器72量子比特的记录,成为市场上首台能在单个原子上存储信息的系统^[11]。牛津大学也花费了很大精力在离子阱量子比特路线上,并在2016年8月开发出精度高达99.9%的单量子比特逻辑门和双比特量子位逻辑门,实现了里程碑式的突破。2018年7月,澳大利亚悉尼大学牵头展示了世界首个基于离子阱的量子化学模拟,提供了一种利用量子计算机研究分子化学键和化学反应的方法^[12]。2017年11月,美国NIST与马里兰大学联合成立的联合量子研究所利用离子阱制作了由53个量子比特组成的模拟器,可以模拟传统计算机无法运算的复杂量子多体问题^[13]。

2) 超导量子计算

超导量子计算是目前的主流实验方案,其核心器件是超导约瑟夫森结。超导量子电路在设计、制备和测量等方面与现有的集成电路技术具有较高的兼容性,对量子比特的能级与耦合可以实现非常灵活的设计与控制,极具规模化的潜力。

目前,超导量子计算是发展最快最好的一种固体量子计算方案,谷歌、IBM、英特尔等商业巨头都已经率先将目光投向了超导量子计算机,该领域的竞争也日趋白热化。谷歌于2019年10月率先推出一款由铝、铜、硅晶片和超导体等材料组成的54量子比特数的量子芯片,名为“悬铃木”(Sycamore),芯片展开测试结果则标志着量

子计算机在解决一个随机采样任务上超越了经典计算机,实现量子优势^[14]。2019年1月,IBM发布一款据称可“商用”的量子计算机,这款名为“IBM Q 系统1”的量子计算机能操纵20个超导量子比特,具有表现稳定、结构紧凑等特性,实用性大为增强^[15]。Intel在2018年1月举办的国际消费电子展上,发布了一款代号为“Tangle Lake”、具有49个量子比特的超导量子测试芯片^[16]。

此外,中国科学技术大学也是超导量子计算当前的领导者之一。2018年2月,继IBM后中科院量子信息与量子科技创新研究院与阿里云宣布,发布11比特的云接入超导量子计算服务^[17]。2019年5月,中国科学技术大学联合中国科学院物理研究所开创性地将超导量子比特应用到量子随机行走研究中,为未来多体物理现象的模拟和通用量子计算研究奠定了重要基础^[18]。

3) 拓扑量子计算

拓扑量子计算的核心思想是将量子比特编码成物质拓扑态。拓扑光子学具有不需要强磁场的优点,拓扑量子计算具有本质上高相干性,满足可扩展量子计算机的基本要求。但是,有关拓扑量子计算的实验仍然处于起步阶段。

2016年11月,微软表示将着手量子计算工程样机研发,采用的是“拓扑量子计算”方案。微软相信拓扑量子比特能够更好地应对电噪声等因素的干扰,更具实用性和稳定性。2017年11月,一支由澳大利亚悉尼大学、微软、美国斯坦福大学的研究人员组成的研究团队对大规模量子计算的必要组件进行了小型化处理,这项研究成为了拓扑绝缘体的首个实际应用。2018年9月,澳大利亚皇家墨尔本理工大学与意大利米兰理工大学和瑞士苏黎世联邦理工学院研究人员共

同开发了一种可处理量子信息的拓扑光子芯片,为可扩展量子计算机奠定了强大的基础^[19]。

4) 半导体量子计算

半导体量子芯片完全基于传统半导体工艺,更容易达到要求的量子比特数目,只要科学家能在实验室里实现样品芯片,其大规模工业生产理论上讲就不存在问题,这是它大大超越其它量子计算方案的优势所在。而且,硅量子比特比超导量子比特更稳定。然而,硅基量子比特的效率远远不及那些基于离子和超导体的竞争者。

Intel公司在量子计算机研制方面也选择了硅量子点技术。2016年12月,Intel宣布开发出将量子计算机需要的超纯硅附着在传统微电子工业标准晶圆上的技术,首创基于硅制造量子比特的全新量子计算机研发方案。2018年1月,Intel研制出首台采用传统计算机硅芯片制造技术的量子计算机。这意味着,在争相建造实用型量子计算机的竞赛中,硅基量子计算机的竞争力会逐步提升。同月,德国康斯坦茨大学与美国普林斯顿大学及马里兰大学的物理学家合作开发出了—种基于硅双量子位的稳定量子门^[20]。2019年1月,澳大利亚新南威尔士大学开发出了全球首款3D原子级硅量子芯片架构,朝着大规模量子计算机迈出了重要一步^[21];5月,该校研究人员又取得了一项里程碑式的研究突破,首次通过保真度基准测试展示了两个量子比特门的平均保真度为98%,证明了硅是一种高保真度、全尺寸、容错量子计算的可行平台,非常适合扩展到通用量子计算所需的大量量子比特^[22]。目前,中国本源量子公司已与中国科学技术大学合作研发出第一代半导体二比特量子芯片—玄微。

5) 金刚石量子计算

钻石空位方案与其他量子计算机实现方案

相比,最大的优势是能够在常温下运行。2017年4月,维也纳科技大学的研究人员首次通过量子物理学技术成功地将各种钻石缺陷耦合,他们通过数十亿钻石中的氮空位与微波场共同配合来读出和制备出钻石量子态,这对于未来新的量子计算应用的开发有着至关重要的作用。2019年4月,国仪量子(合肥)技术有限公司与无锡量子感知研究所联合发布了新产品“金刚石量子计算教学机”,这是全球首款面向大众的量子计算演示装置^[23]。

6) 光量子计算

光量子计算机主要以光子的偏振自由度、角动量为量子比特,通过对光子的量子操控及测量来实现量子计算。光量子计算具有相干时间长、单光子操控容易且精度高等重要优点。光量子计算经历了早期的理论与基本原理验证、简单少数几个量子比特操作的实验演示阶段,正在迈向具有一定计算复杂度的高性能光量子处理器原型机研发新阶段。目前芯片上集成的光学量子计算芯片效率极低,计算速率依赖于光子源的亮度。

2019年4月,丹麦哥本哈根大学混合量子网络中心研究人员取得了控制芯片中光信号技术的重大飞跃,开发出一种可发射携带量子信息的光子的纳米组件^[24]。该组件尺寸仅为人类头发的十分之一,数千个组件可以集成在同一芯片中,并最终扩展到量子计算机或量子互联网所需的规模。这项研究成果将丹麦推为量子技术竞赛的领头羊。2017年5月,中科大潘建伟教授等首次实现十光子纠缠操纵的基础上,利用高品质量子点单光子源构建了用于玻色取样的多光子可编程量子计算原型机,首次展示了超越早期传统计算机的量子计算能力^[25]。该团队通过调控

六个光子的偏振、路径和轨道角动量,于2018年又实现18个光量子比特的纠缠,打破了所有物理体系中最大纠缠态制备的世界纪录^[26]。2018年8月,中国军事科学院、国防科技大学、中山大学、北京大学和英国布里斯托尔大学等机构联合利用硅基光波导芯片集成技术,开发出面向通用量子计算的核心光量子芯片^[27]。该芯片集成了超过200个光量子器件,具有稳定性高和可快速配置等优点,能实现不同的量子信息处理应用。

2.2 量子计算面临的技术挑战

美国国家科学院于2018年12月发布的量子计算研究报告指出,目前许多研究已研制出用于原理验证的小型量子计算机,刺激了大量私营投资跟进。然而,研制和使用量子计算机仍面临若干技术风险,如下所示^[28]。

1) 量子位不能从本质上隔离噪声。传统计算机和量子计算机的主要区别之一是如何处理系统中微小干扰噪声。传统计算机的“位”是0或1,允许很大的噪声边际,可通过抑制输入端的噪声污染实现无噪声输出。但量子位是0和1的任意组合,不能轻易地隔离物理电路中的噪声,创建量子位操作时的小错误或者物理系统中的杂散信号均会导致量子计算错误。因此,错误率是最重要的量子计算机设计参数之一,且低错误率一直很难实现。即使在2018年,已经出现5个或者更多个量子位系统,其错误率也超过几个百分点。

2) 量子纠错技术不成熟,无法实现无误差的量子计算。虽然物理量子位的操作对噪声很敏感,但是可以在量子计算机中运行量子纠错来校正量子计算。如果没有量子纠错,像肖尔算法这样复杂的程序就不太可能在量子计算机上准确运行。但是执行量子纠错需要更多的量子位,使

得计算机的开销增大,这虽然对于无错误的量子计算至关重要,但短时间内难以适用。

3)无法有效将大数据加载到量子计算中。虽然量子计算机可以使用较少的量子位表示大量的数据,但是目前尚无成熟方法来实现。对于大量数据输入的问题,创建输入量子态所需要的时间会占据大部分计算时间,使量子计算的优势大大降低。

4)量子算法的设计具有挑战性。可利用量子特性的量子算法需要全新的设计原则,目前面临巨大挑战。

5)量子计算机需要新的软件堆栈。由于量子程序不同于经典计算机程序,需要进一步研究和开发相应的软件堆栈,这方面的工作缺乏有效进展。

2.3 量子计算的未来发展趋势

2.3.1 未来5年的量子计算机发展动向

2018年3月,日本野村综合研究所在其官网对量子计算机未来5年的发展动向进行了展望和预测^[29]。

1)2017年以前:量子退火计算机的出现及应用研究。

2)2018—2022年:黎明期。基于量子退火计算机的人工智能应用研究取得进展以及“量子优势”实现,面向自动驾驶汽车的图像识别、面向缓堵的路线优化、面向消费者的广告分发、组合优化问题等一批研究成果将出现。

3)2024年以后:发展期,致力于通用量子计算机的实现。超导量子计算机很容易受到环境噪声的影响,难以维持稳定的量子态。尤其是,随着用于计算的量子比特数的增加,错误的发生率也会增加,而实现通用量子计算机必需同时具备很高的计算能力和容错率,这仍需大量的研究。

2.3.2 未来25年的量子计算发展动向

波士顿咨询公司(Boston Consulting Group, BCG)于2018年5月发布了《即将来临的量子计算飞跃》报告,对量子计算技术的发展现状与潜在应用进行了分析^[30]。

到2030年,量子计算应用的市场规模预计将达到500多亿美元,其中制药行业可达200亿美元,化学和材料等科技密集型产业可达70亿美元。前提条件是逻辑量子比特的集成制造能力达到基础量子计算所需的最低要求。

BCG将量子计算的可扩展性进行了“等效摩尔定律”(物理量子比特集成数目约每两年翻一番)分析,预计量子计算机将经历三个发展阶段走向成熟。

1)2018—2028年,将研发出可进行低复杂度量子模拟的初代非通用量子计算机,满足特定应用和研发需求。

2)2028—2039年,量子计算机的逻辑量子比特数量将扩展到50多个,实现“量子优势”,在特定应用中更快速地执行基于某些算法,创造巨大的市场价值。

3)2031—2042年,量子计算机将实现商业应用,执行高级量子模拟、搜索和优化等计算任务,相比传统计算机具有显著的优势。预计2030年后,量子计算的发展速度将显著提升。

2.4 量子计算的应用现状

虽然通用量子计算机仍需数十年发展成熟,但初代非通用量子计算机仍可以利用有限的量子计算功能实现一些特定的行业应用,例如化学领域中相对简单的分子建模和专业优化问题。IBM和微软均已开发量子计算社区、量子计算模拟器和其他易于使用的工具。随着量子算法和云端量子处理器应用的发展,开发者逐步将其整

合到软件解决方案中,与经典算法结合起来实现混合计算^[31]。

世界上第一家量子计算公司 D-Wave 已将量子计算机用于解决离散优化、采样、材料科学和机器学习问题,促进科学、工程、医疗保健、优化、财务分析、物流和国防等方面的突破,其中优化问题存在于系统设计、任务规划、航空公司调度、财务分析、网络搜索和癌症放射治疗等领域。D-Wave 的量子计算机上已经构建了 150 多个早期应用程序,正被诸多世界组织和机构使用,包括洛克希德马丁公司、Google 公司、美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)、南加州大学、高校空间研究协会、洛斯阿拉莫斯国家实验室、橡树岭国家实验室、大众汽车公司等^[32]。其中,洛克希德马丁公司于 2010 年底成为第一个 D-Wave 客户,所采用的 D-Wave 量子计算机不断升级,以突破量子计算的界限并应用最新技术解决客户面临的现实问题,从

设计救生新药到即时调试数百万行软件代码。由 Google、NASA、高校空间研究协会联合成立的量子人工智能实验室于 2013 年开始采购 D-Wave 量子计算系统,Google 专注于如何构建更准确的语音识别、网络搜索、蛋白质折叠模型,NASA 专注于优化任务算法,显著改进空中交通管制、自治、机器人、导航和通信、系统诊断、模式识别以及任务规划和调度。D-Wave 量子计算机的其他典型应用案例详见表 8 所示。

此外,德国 HQS 量子模拟公司和 Merck KGaA 公司于 2019 年 6 月宣布开展为期三年的合作,旨在专注于量子计算机上量子化学应用软件的应用和商业化,使用最终的量子模拟软件加速客户的研究和开发过程,并扩大对化学和物理相互作用的理解,从而产生更好的产品和工艺^[33]。美国空军研究实验室于 2016 年 5 月授予 IBM750 万美元以获取 IBM Q System 的远程访问许可,这是一台大约 20 ~ 50 个量子比特的量子计算

表 8 D-Wave 公司的量子计算系统应用案例

Tab. 8 D-Wave's quantum computing system application case

应用领域	应用组织和机构	应用方向
优化	罗斯威尔公园 癌症研究所	将量子退火的首个应用系统用于调强放疗的子束强度优化,以便提供足够的辐射来杀死癌细胞同时避免附近的非癌细胞受到严重影响
	Booz Allen Hamilton 公司	用于解决卫星优化问题,以在卫星改变位置时确保一组卫星实现大部分区域的覆盖
	大众汽车集团	用于计算交通流量,具体使用北京的 10000 辆出租车的的历史数据编制了一套算法来优化出租车在该市的出行时间
机器学习	Recruit Communications 公司	将量子计算应用于营销、广告和通信,首个项目是优化网络广告与客户的匹配效率
	QxBranch 公司	将量子计算与神经网络技术相结合可以改善大选预测结果,已用于模拟 2016 年美国大选
	洛斯阿拉莫斯 国家实验室	安装 D-Wave 系统开展快速响应项目,如基于 2429 个面部图像,通过矩阵分解的方式使用无监督的机器学习方法分析大型数据集
	1QBit 公司 美国国家航空航天局	开发了一种使用 D-Wave 2000Q 系统进行强化学习的方法 在生成的无监督学习环境中对图像数据集进行了 D-Wave 2X 系统的训练
材料模拟	洛斯阿拉莫斯 国家实验室	通过使用基于图的方法进行量子分子动力学模拟,探索了 D-Wave 上的图分区/聚类方法
	大众汽车集团	使用 D-Wave 系统模拟电子结构特性,寻找先进材料
	D-Wave D-Wave	实现了材料模拟方面的突破,展示了 D-Wave 系统上的大规模可编程量子模拟 实现了首次大规模物质拓扑状态的量子模拟,模拟了 2016 年诺贝尔奖背后的现象

机^[34]。华为于2018年10月宣布推出HiQ云量子计算仿真平台,该平台可支持量子电路,其具有至少42个量子比特用于全幅度仿真,多达81个量子比特用于单幅度仿真或169个量子比特用于低深度单幅度仿真;还支持量子纠错仿真的特殊功能,以及允许对混合经典量子算法进行直观编程的功能。

3 启示与建议

量子计算可显著提高计算效率,在解决一系列金融、安全、医疗、先进材料开发等重要问题时可能比传统计算机快百万倍以上,对人类社会的革命性影响将远超经典计算,具有深远的战略价值。基于国内外量子计算发展态势分析及我国的发展情况,本文为我国在相关领域的工作提出以下建议。

1) 制定国家量子计算技术战略。鉴于量子计算技术潜在的颠覆性影响,美国、欧盟、英国已将量子技术上升到国家战略高度,部署一系列的重要研究计划和发展举措来抢夺“量子优势”。我国也应颁布专门的量子技术国家战略,从顶层设计层面开始制定科学化、体系化的量子计算技术发展举措,明确量子计算技术的研发布局、优先发展领域、研究机遇和关键挑战,进而凝聚整体科技竞争力,进一步提高在全球量子计算行业中的影响力。

2) 构建量子计算技术创新生态系统。为了获得全球量子计算竞争的领先优势,美国和欧盟等国家和地区均高度重视加强和协调公私量子计算研究力量,全方位加速量子计算的研发与应用。我国也应构建涵盖政府、学术界、产业界、投融资机构等所有相关利益者在内的量子计算技术创新生态系统,共同开展不同技术路线下的量

子计算机研究,克服量子计算关键技术的发展障碍,促进先进量子计算研究成果的商业化应用;大力支持量子计算相关高端设备的自主研发,扭转依赖进口的被动局面;加强国际交流合作,并在合作中掌握关键核心技术。

3) 培养专业的量子计算技术人才。科技和人才是国家最重要的战略资源。我国应制定量子计算技术领域的人才教育计划,培养博士、硕士、本科等多层次的量子计算技术人才,并在小学、初中和高中等早期教育阶段提前普及量子计算技术基础教育;通过量子计算技术研究资助和成果激励措施来吸引和留住国内外的顶尖研究人员;鼓励产业界与学术界携手培养多元化的量子计算人才;对在量子计算领域做出突出贡献的卓越青年科学家给予特殊扶持。

致谢:中国科学技术大学郭国平教授和霍永恒教授、电子科技大学邓光伟特聘研究员对本文提出了宝贵的意见与建议,谨致谢忱!

参考文献

- [1] U. S. House Committee on Science, Space, and Technology. Congressional Science Committee Leaders Introduce Bill to Advance Quantum Science [EB/OL]. (2018-12-21). https://science.house.gov/sites/republicans.science.house.gov/files/documents/HR6227NationalQuantumInitiativeAct_0.pdf.
- [2] BMBF. Quantentechnologien-von den Grundlagen zum Markt [EB/OL]. (2018-09-26). https://www.bmbf.de/upload_filestore/pub/Quantentechnologien.pdf.
- [3] European Commission. Intermediate Report from the Quantum Flagship High-Level expert group

- [EB/OL]. (2017-02-06). <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/intermediate-report-quantum-flagship-high-level-expert-group>.
- [4] European Commission. Quantum Flagship High-Level expert group publishes the final report [EB/OL]. (2017-09-18). <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/quantum-flagship-high-level-expert-group-publishes-final-report>.
- [5] European Commission. Quantum Technologies Flagship kicks off with first 20 projects [EB/OL]. (2018-10-29). http://europa.eu/rapid/press-release_IP-18-6205_en.htm.
- [6] 日本文部科学省: 科学技術? 學術審議会-量子科学技術委員会. 量子科学技術(光? 量子技術)の新たな推進方策について、[EB/OL]. (2017-02-13). http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu17/010/houkoku/1382234.htm.
Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology. New promotion measures for quantum science and technology (optical quantum technology) [EB/OL]. (2017-02-13). http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu17/010/houkoku/1382234.htm.
- [7] 文部科学省. 光? 量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)について、[EB/OL]. (2018-03-30). http://www.mext.go.jp/b_menu/boshu/detail/1402996.htm.
Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology. About the Quantum Leap Flagship Program (Q-LEAP) [EB/OL]. (2018-03-30). http://www.mext.go.jp/b_menu/boshu/detail/1402996.htm.
- [8] 国务院. 国务院关于印发“十三五”国家科技创新规划的通知 [EB/OL]. (2017-10-02). http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-08/08/content_5098072.htm.
- State Council. Notice of the State Council on the issuance of the "13th Five-Year Plan" for National Science, Technology and Innovation [EB/OL]. (2017-10-02). http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-08/08/content_5098072.htm.
- [9] 国家自然科学基金. 国家自然科学基金“十三五”发展规划 [EB/OL]. (2016-06-16). <http://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab405/info50064.htm>.
NSFC. The 13th Five-Year Plan of the National Natural Science Foundation of China [EB/OL]. (2016-06-16). <http://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab405/info50064.htm>.
- [10] 薛飞, 杜江峰, 周先意, 韩荣典. 量子计算的物理实现[J]. 物理, 2004, 33(10): 728-733.
Xue F, Du J F, Zhou X Y, et al. Physical implementations of quantum computation [J]. 物理, 2004, 33(10): 728-733.
- [11] IonQ. IonQ harnesses single-atom qubits to build the world's most powerful quantum computer [EB/OL]. (2018-12-11). <https://ionq.co/news/december-11-2018>.
- [12] HEMPEL C, CHRISTINE M, JONATHAN R, et al. Quantum Chemistry Calculations on a Trapped-Ion Quantum Simulator [J]. Physical Review X, 2018, 8(3): 031022-1-22.
- [13] ZHANG J, PAGANO G, HESS P, et al. Observation of a many-body dynamical phase transition with a 53-qubit quantum simulator [J]. Nature, 2017, 551: 601-604.
- [14] ARUTE F, ARYA K, BABBUSH R, et al. Quan-

- tum supremacy using a programmable superconducting processor [J]. *Nature*, 2019, 574: 505-510.
- [15] IBM. IBM Unveils World's First Integrated Quantum Computing System for Commercial Use [EB/OL]. (2019-01-08). <https://newsroom.ibm.com/2019-01-08-IBM-Unveils-Worlds-First-Integrated-Quantum-Computing-System-for-Commercial-Use>.
- [16] Intel. Intel Delivers 17-Qubit Superconducting Chip with Advanced Packaging to QuTech [EB/OL]. (2019-10-10). <https://newsroom.intel.com/news/intel-delivers-17-qubit-superconducting-chip-advanced-packaging-quitech/#gs.g5nc2b>.
- [17] 新华网. 中科院阿里云联合发布 11 比特云接入超导量子计算服务 [EB/OL]. (2018-02-23). http://www.xinhuanet.com/tech/2018-02/23/c_1122442280.htm.
Xinhua net. Chinese Academy of Sciences Aliyun released 11-bit cloud access superconducting quantum computing service [EB/OL]. (2018-02-23). http://www.xinhuanet.com/tech/2018-02/23/c_1122442280.htm.
- [18] 中国科学技术大学. 超导量子计算在强关联纠缠体系的量子随机行走实验研究中取得重要进展 [EB/OL]. (2019-05-05). <https://www.ustc.edu.cn/2019/0505/c15852a380008/page.htm>.
USTC. Superconducting quantum computing made important progress in the experimental study of quantum random walk in strongly correlated entangled systems [EB/OL]. (2019-05-05). <https://www.ustc.edu.cn/2019/0505/c15852a380008/page.htm>.
- [19] TAMBASCO J-L, CORRIELLI G, CHAPMAN R J, et al. Quantum interference of topological states of light [J]. *Science Advances*, 2018, 4(9): 3187.
- [20] ZAJAC D M, SIGILLITO A J, RUSS M, et al. Quantum CNOT Gate for Spins in Silicon [J]. *Science*, 2018, 359(6374): 439-442.
- [21] MATTHIAS K, JORIS G K, PRASANNA P, et al. Spin read-out in atomic qubits in an all-epitaxial three-dimensional transistor [J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14: 137-140.
- [22] HUANG W, YANG C H, CHAN K W, et al. Fidelity benchmarks for two-qubit gates in silicon [J]. *Nature*, 2019, 569: 532-536.
- [23] 新华网. 全球首款面向大众的量子计算教学机在无锡问世 [EB/OL]. (2019-04-17). http://www.js.xinhuanet.com/2019-04/17/c_1124375997.htm.
Xinhua net. The world's first quantum computing teaching machine for the general public launched in Wuxi [EB/OL]. (2019-04-17). http://www.js.xinhuanet.com/2019-04/17/c_1124375997.htm.
- [24] PAPON C, ZHOU X Y, THYRRESTRUP H, et al. Nanomechanical single-photon routing [J]. *Optica*, 2019, 6(4): 524-530.
- [25] WANG H, HE Y, LI Y, et al. High-efficiency multiphoton boson sampling [J]. *Nature Photon*, 2017, 11: 361-365.
- [26] WANG X L, LUO Y H, HUANG H L, et al. 18-Qubit Entanglement with Six Photons' Three Degrees of Freedom [J]. *Physical Review Letters*. 2018, 120: 260502.
- [27] QIANG X, ZHOU X, WANG J, et al. Large-scale

- silicon quantum photonics implementing arbitrary two-qubit processing [J]. *Nature Photon*, 2018, 12:534-539.
- [28] National Academies of Sciences Engineering and Medicine. Quantum Computing: Progress and Prospects [EB/OL]. (2018-12-04). <https://www.nap.edu/catalog/25196/quantum-computing-progress-and-prospects>.
- [29] NRI. 「ITロードマップ2018年版」をとりまとめ [EB/OL]. (2018-12-04). http://www.nri.com/Home/jp/news/2018/180308_1.aspx.
- [30] 智东西. 波士顿咨询量子计算重磅报告:2030年将爆发 [EB/OL]. (2018-05-10). https://mp.weixin.qq.com/s/Z_rhgyZOczbURz7PDmfJiw.
Zhidongxi. BCG: The Coming Quantum Leap in Computing [EB/OL]. (2018-05-10). https://mp.weixin.qq.com/s/Z_rhgyZOczbURz7PDmfJiw.
- [31] BCG. The Next Decade in Quantum Computing—and How to Play [EB/OL]. (2018-11-15). <https://www.bcg.com/publications/2018/next-decade-quantum-computing-how-play.aspx>.
- [32] D-Wave. Quantum computing applications [EB/OL]. (2019-06-27). <https://www.dwavesys.com/quantum-computing/applications>.
- [33] Merck KGaA. Merck KGaA, Darmstadt, Germany, and HQS Quantum Simulations Cooperate in Quantum Computing [EB/OL]. (2019-06-04). <https://www.emdgroup.com/en/news/quantum-computing-04-06-2019.html>.
- [34] DOD. U. S. Air Force Research Laboratory (AFRL) Awards IBM \$7.5 Million Contract for IBM Q System Access [EB/OL]. (2019-05-01). <https://dod.defense.gov/News/Contracts/Contract-View/Article/1831787/>.