

中美量子计算研发现状对比分析及启示^{*}

于杰平¹ 王 丽^{*,1,2}

(1. 中国科学院文献情报中心,北京 100190;2. 中国科学院大学经济与管理学院,北京 100049)

摘 要:量子计算在解决某些问题时的算力远超传统计算,兼具巨大的商业和军事应用潜力,是各国必争的战略领域。本文通过梳理和分析中美两国在量子计算领域的政策和研发现状来为我国推进量子计算发展提供参考。首先,分析了中美量子计算领域近期重要科技规划:美国重视战略部署和顶层设计,有效发挥国家战略科技力量优势;我国国家战略层面高度关注,科技计划支持力度逐步加大。其次,采用 LDA 主题模型对论文进行文本挖掘,对比分析中美量子计算领域的基础研究差异。再次,介绍了中美量子计算产业的最新进展:美国量子计算产业发展迅速,我国量子计算产业布局稍显薄弱。最后,为我国未来量子计算的创新发展提出了四点建议:加强顶层规划,引导量子计算快速发展;发挥优势方向的带动作用,评估未来关键技术问题予以重点布局;构建量子计算研发生态系统,促进量子计算产业发展;加强军民融合研究,保障国家安全。

关键词:量子计算;中美;科技规划;研发现状;LDA 主题模型;基础研究;军民融合

DOI:10.16507/j.issn.1006-6055.2021.11.002

Comparative Analyses and Enlightenment of the Current Status of Quantum Computing Research and Development in China and the United States^{*}

YU Jieping¹ WANG Li^{*,1,2}

(1. National Science Library, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The realization of quantum computing will create unparalleled computing capabilities, which will be much faster than classical computing when it comes to solving certain problems. Because the potential military and commercial applications of quantum computing could be nearly endless, it has become a strategic area for many countries. In this paper, comparative analyses were conducted in terms of policies and research and development (R&D) status in the field of quantum computing in China and the United States, aiming to provide reference for advancing the development of quantum computing in China. First of all, we analyzed the important scientific and technological planning of quantum computing in recent years; the United States attaches importance to strategic deployment and top-level design, and effectively leverages national strategic strengths in science and technology; quantum computing has attracted a high level of attention at the national strategic level in China, and support for relevant science and technology plans has been gradually increased. Furthermore, in the present study, LDA, i. e., Latent Dirichlet Allocation, topic model was utilized to conduct text mining based paper data, and we analyzed and compared differences between China and the United States in fundamental research on

^{*} 国家科技图书文献中心专项“情报研究体系管理与服务支撑系统建设”(2021XM59)

^{**} E-mail: wangli@mail.las.ac.cn

quantum computing. Then, we introduced the latest progress of quantum computing industry in China and the United States; the quantum computing industry in the United States is developing rapidly, while slightly weak in China. Finally, some suggestions were put forward to advance the future innovative development of quantum computing in China; to strengthen top-level strategic planning to guide the rapid development of quantum computing; give play to the leading role of the superiority technology, evaluate key technical problems for the future, and to provide focused support for these key technical problems; to build a quantum computing R&D ecosystem, and to promote the development of quantum computing industry; advance research on military-civil fusion and ensure our national security.

Keywords: Quantum Computing; China and United States; Scientific and Technological Planning; Research and Development Status; LDA Topic Model; Fundamental Research; Military-civil Fusion

量子计算的概念最早始于 20 世纪 80 年代, 物理学家保罗·贝尼奥夫 (Paul Benioff) 在 1980 年完整描述了图灵机模型并证明了可逆量子计算的理论可行性^[1], 奠定了量子计算的基础; 物理学家理查德·费曼 (Richard Feynman) 于 1982 年在保罗·贝尼奥夫的基础上提出了通用量子模拟器。20 世纪 90 年代初, 美国贝尔实验室的皮特·休尔 (Peter Shor) 和洛夫·格罗弗 (Luv Grover) 分别于 1994 年和 1996 年提出量子分解算法 (Shor 算法) 和量子搜索算法 (Grover 算法), 量子计算开始引起学术界和国防部门的重视。

量子计算是指利用量子态特性 (如量子叠加或纠缠) 进行计算, 是量子信息科学的一个分支, 执行量子计算的设备被称为量子计算机。美国已经将量子信息科技上升到国家战略层面, 高度重视量子计算的发展, 我国正在加强量子信息科技发展的战略谋划和系统布局。

1 中美量子计算领域重要科技规划

1.1 美国量子计算领域近期规划

1) 重视战略部署和顶层设计

特朗普政府制定量子信息科学国家战略, 量子计算备受重视。2018 年 9 月, 美国国家科学技术委员会 (National Science and Technology Council, NSTC) 发布《量子信息科学国家总体战略》^[2], 将量子计算看作未来十年量子信息领域

的重要技术机会。2018 年 12 月, 时任总统特朗普签署《国家量子计划法案》^[3], 为促进量子计算等技术发展保驾护航。2019 年以来, 美国《国防授权法案》(National Defense Authorization Act, NDAA) 持续引导和规划量子信息战略实施, 其中 NDAA 2021^[4] 要求国防部 (Department of Defense, DoD) 发展量子计算潜在优势。2020 年 2 月, 国家量子协调办公室 (National Quantum Coordination Office, NQCO) 发布《美国量子网络战略愿景》^[5], 提出包括量子计算在内的 6 个重点研究领域; 同年 10 月, NQCO 发布《量子前沿报告》^[6], 在量子模拟、量子精密测量、量子纠缠等 8 个前沿领域提出关键研究问题, 该报告是美国量子信息科学发展的重要路线图。

拜登政府将量子计算视作美国未来科技不可或缺的一部分。2021 年 3 月, 白宫发布的《国家安全临时战略指南》^[7], 强调量子计算等新兴技术有望改变各国之间的经济和军事平衡。拜登在上任后的首次新闻发布会上强调了量子计算对美国未来竞争力的重要性。2021 年 5 月, 美韩总统发表联合声明^[8], 希望在量子计算等量子技术领域开展联合研究和专家交流。2021 年 3 月, 美国国会提交《量子网络基础设施法案 2021》《科学技术的量子用户扩展法案》两项法案^[9,10], 其中包含加强量子计算研发。

2) 有效发挥国家战略科技力量优势

美国政府建立有效协调机制,并相继成立量子信息科学小组委员会(Subcommittee on Quantum Information Science, SCQIS)、国家量子协调办公室、量子科学经济和安全小组委员会(Economic and Security Implications of Quantum Science, ESIX)、国家量子计划咨询委员会(National Quantum Initiative Advisory Committee, NQIAC)等多个组织,来支持、协调、监督和评估量子信息研发活动。国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)、国家科学基金会(National Science Foundation, NSF)、能源部(Department of Energy, DoE)、国防部等是美国量子信息领域的主要战略科技力量,积极推动量子计算发展。2020 年,DoE 新建五个国家量子信息科学研究中心,研发重点涉及量子纠错、量子相干、中性原子、囚禁离子、超导电路、拓扑材料等量子计算发展的关键方向。国防部高级研究计划局希望通过开发与经典系统结合的嘈杂中型量子系统来取得量子计算的早期胜利;近期启动量子基准项目,旨在为大型量子计算机提出有效的衡量标准。NSF 建立量子计算方向的量子跃迁研究所,旨在设计先进的大型量子计算机,为现有和未来的量子计算平台开发有效的算法。NIST 成立量子经济发展联盟(Quantum Economic Development Consortium, QEDC),以提升美国在量子计算等新兴量子产业方面的领导地位。

1.2 中国量子计算领域近期规划

1) 国家战略层面高度关注

我国领导人高度关注量子计算。习近平总书记在 2018 年新年贺词中强调^[11],量子计算机研制成功是一项科技创新、重大工程。2021 年 5 月 28 日,习近平总书记在两院院士大会上多次强调

量子信息的重要性^[12],肯定了 76 个光子的量子计算原型机“九章”、62 量子比特可编程超导量子计算原型机“祖冲之号”成功问世等量子计算领域的重大基础研究任务。

在国家政策层面,我国关于量子计算的相关政策主要在综合性战略规划中出现。2016 年 8 月,国务院印发“十三五”国家科技创新规划的通知^[13],要求相关部门和机构面向 2030 年启动部署新的重大科技项目,力争在量子通信与量子计算等重点方向率先突破。2016 年 11 月,国务院关于印发“十三五”国家战略性新兴产业发展规划的通知^[14],要求相关部门和机构在信息网络领域统筹布局量子芯片、量子编程、量子软件以及相关材料和装置制备关键技术研发,推动量子计算机的物理实现和量子仿真应用。2017 年 8 月,科技部、中央军委科学技术委员会联合编制《“十三五”科技军民融合发展专项规划》^[15],积极推动量子通信与量子计算机等新一轮军民融合重大科技项目论证与实施。2018 年 1 月,国务院印发关于全面加强基础科学研究的若干意见,要求加快实施量子通信与量子计算机等“科技创新 2030—重大项目”。2019 年 12 月,国务院印发《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》^[16],面向量子信息等加快培育布局一批未来产业。2021 年 3 月,《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》^[17]在强化国家战略科技力量、发展壮大战略性新兴产业、打造数字经济新优势等多个方面对量子信息发展进行了相关部署。

2) 科技计划支持力度逐步加大

在重大科技计划方面,我国量子计算的相关项目主要出现在量子信息专项计划中。2016 年,科技部设立国家重点研发计划“量子调控与量子

信息”重点专项。2016—2019 年,该重点专项围绕关联电子体系、小量子体系、人工带隙体系、量子通信、量子计算与模拟、量子精密测量等 6 个方面的研究任务共支持 87 个研究项目。2018 年,国家自然科学基金委启动“微结构材料中声子的调控及其在超导量子芯片中的应用”“量子色动力学的相结构和新颖拓扑效应研究”重大项目;2020 年,启动“第二代量子体系的构筑和操控”重大研究计划。2017 年,我国开始筹建量子信息科学国家实验室,1 月,国家发改委和科技部联合批复了合肥综合性国家科学中心建设方案,将创建量子信息科学国家实验室作为合肥综合性国家科学中心的重要基石和科技创新的“一号工程”,并由安徽省与中国科学院合作、中国科学技术大学具体承办。

2 中美量子计算领域基础研究现状分析

从查德·费曼提出量子模拟器^[18]、大卫·道勒(David Deutsch)和理查德·约饶(Richard Jozsa)提出道勒-约饶量子算法^[19]、到经典的量子分解算法(Shor 算法)^[20]、量子比特^[21]的提出,再到量子优越性的证明^[22,23],这些开创性或突破性进展都在研究论文中有迹可循,让量子计算科技在开放的学术环境中不断进步。因此,本文以量子计算相关的研究论文作为基础研究现状分析的数据基础。以 Web of Science SCIE 为数据源,检索到相关期刊论文 48201 篇(截至 2021 年 6 月 1 日)。采用 LDA 主题模型对论文进行文本挖掘,对比分析中美量子计算领域的基础研究差异。检索式为:TS = ((quantum* -comput* or qubit* or quantum* -bit* or (quantum-information* and comput*) or quantum-algorithm* or quantum-

processor* or quantum-circuit* or quantum-logic-circuit* or quantum-dot-circuit* or quantum-gate* or quantum-logic-gate* or (Shor near/1 algorithm) or (Grover near/1 algorithm) or (Deutsch-Jozsa near/1 algorithm) or quantum-adiabatic-algorithm or topological-quantum or quantum-turing or quantum-dot-computer or (quantum-system near/1 simulat*) or (quantum near/0 simulat*)) or ((((trapped-ion or superconduct* or (neutral-atom near/1 optical-lattice) or nuclear-spin* or trapped-atom* or (electron* near/0 spin)) near/0 quantum) or (quantum-dot or quantum-annealing or josephson-junction or quantum-dot or quantum-well or quantum-wire* or optical-quantum or Bose-Einstein-condensate or quantum-island* or superconduct* -quantum*) or (quantum-entanglement or quantum-coherence or quantum-superposition* or quantum-state* or quantum-gate*)) and comput*)))。

2.1 中美量子计算研究趋势对比

中国、美国在量子计算领域的研究论文发文量处于全球领先地位(图 1)。中国在量子计算领域的研究论文发文量排名第二,仅次于美国,并在 2010 年首次超越美国,2011 年与美国持平,此后除 2016 年落后于美国外,年发文量持续领先美国。这离不开我国自 2010 年以来对量子计算的持续研发投入,以及相关政策支持。

2.2 中美量子计算研究方向对比

基于量子计算基础研究论文数据进行文本挖掘,识别量子计算领域主要研究主题,结合定性调研对当前热点研究方向进行判断和分析。目前量子计算领域的主要研究方向有:量子算法、量子计算模型(如量子逻辑门、单比特测量、绝热量子计

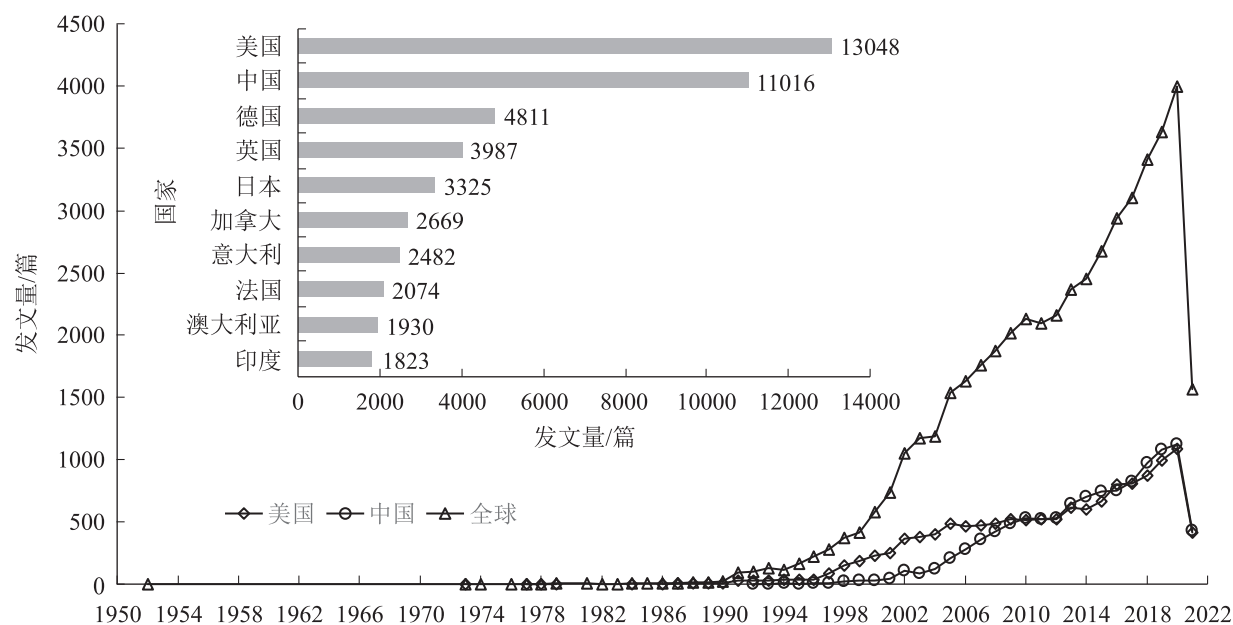


图 1 中美量子计算研究论文产出趋势对比(1952—2021)

Fig. 1 Comparison of Trends in Quantum Computing Papers between China and the United States(1952-2021)

算、拓扑量子计算等)、量子计算机的物理实现(如离子阱、超导、光、量子点、金刚石色心等)等。近年来量子计算领域飞速发展,但仍面临量子比特数量少、相干时间短、出错率高等诸多挑战。

对比分析中美两国的研究主题可看出(图2),我国在量子纠缠、量子退相干、超导量子计算、量子传输协议、光量子计算、(后)量子密码、量子图像处理等研究主题上较美国占有优势,尤其是在量子传输协议研究主题上优势突出,与我国在量子通信领域的优势相吻合;在其他研究主题上与美国存在一定差距:实现量子计算的量子算法,量子计算主流模型(量子逻辑门、拓扑量子计算、量子态测量等),量子计算机的其它物理实现(离子阱量子计算、基于自旋的量子计算(电子自旋、核自旋、金刚石色心)、约瑟夫森器件、量子点制备等),量子计算机的核心问题量子纠错,量子计算相关理论(拓扑量子场论和其它相关理论等),以及量子计算发展与挑战等。

2.3 中美量子计算主要研发机构对比

在量子计算发文量排名前二十的研发机构

中,美国机构有七个,中国机构有三个,如图3所示。

美国机构的研究主题主要集中在量子算法、拓扑量子计算、基于自旋的量子计算、超导量子计算等。其中麻省理工学院在量子算法主题上的论文较多,哈佛大学和马里兰大学在基于自旋的量子计算主题上的论文较多,加州大学圣巴巴拉分校和密歇根大学分别在拓扑量子计算、超导量子计算主题上的论文较多。

中国机构的研究主题主要集中在拓扑量子计算、量子传输协议、光量子计算、超导量子计算、基于自旋的量子计算等。其中,中国科学院在拓扑量子计算、量子传输协议、超导量子计算等主题上的论文较多,中国科学技术大学在光量子计算、基于自旋的量子计算、量子传输协议、超导量子计算等主题上的论文较多。中国科学院和中国科学技术大学是我国量子计算领域的主要研发力量,在一些整体稍弱的研究主题上如拓扑量子计算,机构研发力量较强。

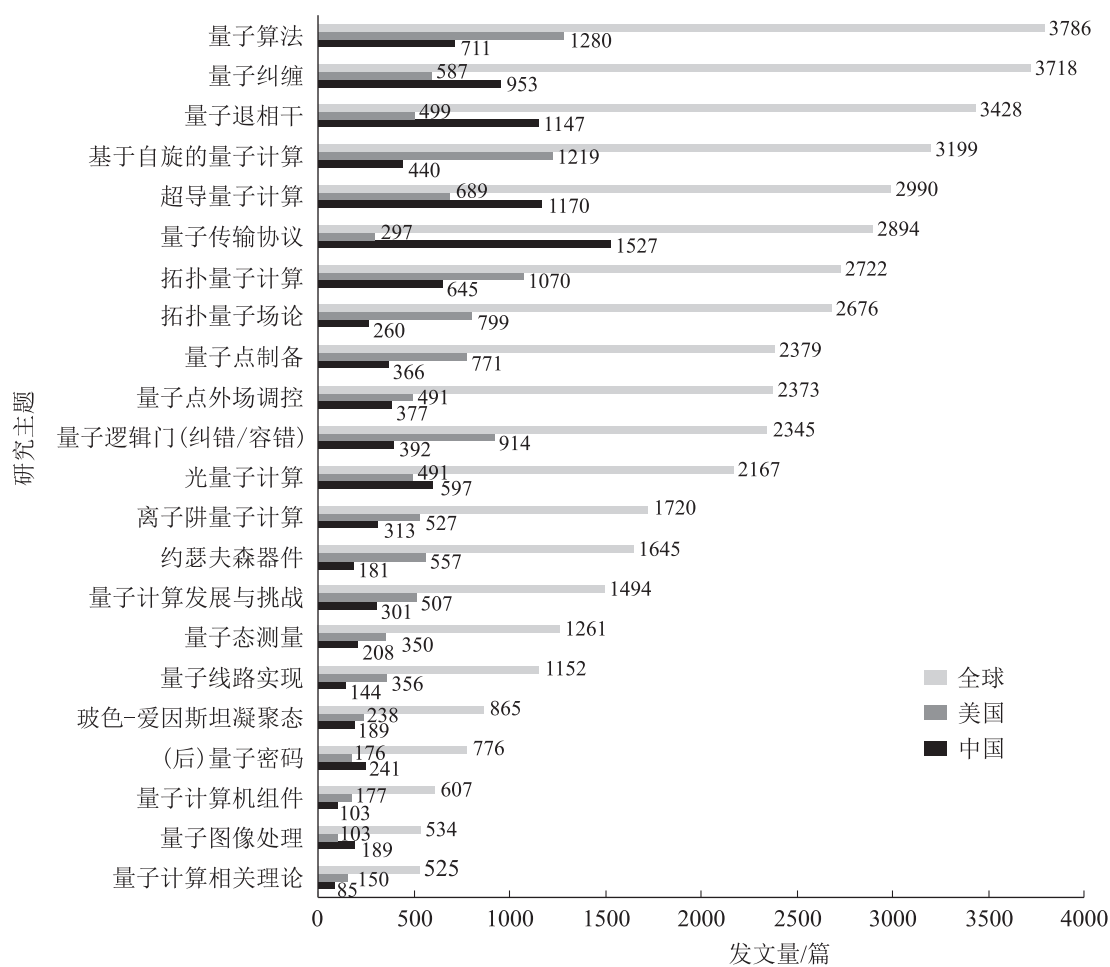


图2 中美量子计算研究主题对比(1952—2021 年)

Fig. 2 Comparison of Quantum Computing Research Topics between China and the United States(1952-2021)

3 中美量子计算产业的最新进展

3.1 美国

以谷歌、国际商业机器公司 (International Business Machines Corporation, IBM)、IonQ 公司、英特尔等为代表的企业纷纷进军量子计算,这使美国量子计算产业发展迅速。

谷歌、IBM 主要致力于超导量子计算。2019 年 10 月,谷歌量子人工智能实验室研制出 54 量子比特的可编程超导 Sycamore 处理器,宣称实现了“量子霸权”^[23]。2020—2021 年,谷歌利用超导量子计算机 (Sycamore 处理器) 陆续完成了全球首次最大规模的化学反应模拟^[24]、量子近似优

化算法^[25]。2020 年 9 月,IBM 发布 65 量子比特的 Hummingbird 处理器;同月,发布《量子技术发展路线图》^[26],计划在 2021—2023 年分别推出 127、433、1121 量子比特的处理器,目标是推出超过百万量子比特的处理器。

IonQ 公司和霍尼韦尔重点探索囚禁离子量子计算。其中,IonQ 公司是囚禁离子量子计算路径的领军者,2020 年 10 月,公布 32 量子比特的量子计算机系统^[27]。霍尼韦尔在商用量子计算机系统上多次创造了量子体积记录,2021 年 3 月,推出量子体积达 512 的商用量子计算机 H1 (10 量子比特)^[28]。

英特尔重点研发基于硅自旋量子比特的商

科学院物理研究所等协同研发出世界首台超越早期经典计算机的光量子计算原型机(基于 10 光子纠缠操纵);在超导体系,该团队自主研发了 10 比特超导量子电路样品。

4 对我国量子计算未来创新发展的启示

1)加强顶层规划,引导量子计算快速发展

美国高度重视量子信息科技,多举措促进量子计算等领域发展。而在我国,虽然量子信息科技已引起国家层面的高度关注,但相关政策是随综合性战略规划出现,作为国际战略必争领域缺乏专门的顶层战略规划。此外,我国主要通过制定重点研发计划、筹建量子信息科学国家实验室等举措促进量子信息科技发展,侧重支持量子通信领域,对量子计算的支持相对薄弱。

在量子计算领域我国需要制定系统性研发路线图,突出我国优势技术方向,整合国内分散的研发力量和资源,指导我国量子计算有效、持续、快速地发展。

2)发挥优势方向的带动作用,评估未来关键技术问题予以重点布局

得益于量子通信优势,我国在量子纠缠、量子退相干、量子传输协议、光量子计算等领域有着一定的优势,对主流的超导量子计算的攻关优势也较为显著,但是在量子算法、量子计算模型(如量子逻辑门、拓扑量子计算等)、量子比特的物理实现(如离子阱、量子点、金刚石色心等)、量子计算机的核心问题——量子纠错等研究方向与美国相比稍显落后。

我国量子通信领域居世界领先地位,带动了光量子计算的发展。未来我国需要:继续发挥在量子科技领域的相关优势以驱动我国量子计算

整体发展;合理评估量子计算领域的未来技术方向,寻找最有价值的实现路径进行重点攻关,理清实现这些技术的挑战和可行性,避免夸大;针对量子计算领域的关键共性技术如量子纠错等瓶颈技术,进行重点布局、协同攻关以寻求突破。

3)构建量子计算研发生态系统,促进量子计算产业发展

美国政府与各联邦机构有力推动了量子技术研发生态系统的形成与发展,以 IBM、谷歌、IonQ 公司、英特尔等为代表的企业使美国的量子产业发展如火如荼。我国量子计算还处于产业化的早期,代表性企业仅有“本源量子”一家。

为此,我国应该:(1)依托新型举国体制,加大支持优势战略科技力量的创新研发,整合优化量子计算领域的科技资源配置,调动民企投资量子计算研发的积极性,为学术研究人员提供与政府部门和产业界合作的机会,逐步形成健康的量子计算研发生态系统;(2)通过扶持初创企业、成立产业界-学术界联盟、培育地方生态系统等促进研发成果的转移转化;(3)营造公平的竞争环境,重视知识产权保护,在权衡国家安全利益的基础上鼓励国际合作,支持企业通过海外技术并购、参股、合作等方式弥补技术短板;(4)制定多样化的政策,提供或建设先进的量子科研基础设施,创造开放、包容、公平的科研环境,吸引、驻留、发展量子计算领域世界各地的优秀人才和研发团队。

4)加强军民融合研究,保障国家安全

量子计算结合量子密钥是极具颠覆性的军民两用技术,涉及国家和社会安全。2021 年 10 月,美国国土安全部(Department of Homeland Security, DHS)发布后量子密码路线图^[31],认为需要为“向后量子密码过渡”做好准备,以保护当前

及未来仍然敏感的数据和设施。

我国在量子密钥及后量子密码研发方向处于世界领先水平,需要继续探索量子密钥与量子计算相结合的研究领域,同时加强后量子密码的研究和规划,以对抗未来可能存在的风险。相关研究需要评估量子计算对关键安全基础设施的潜在风险以及未来应用的迁移成本。

数据可用性声明

支撑本研究的科学数据已在中国科学院科学数据银行 (Science Data Bank) ScienceDB 平台公开发布,访问地址为 <https://www.doi.org/10.11922/sciencedb.j00053.00010> 或 <http://resolve.pid21.cn/31253.11.sciencedb.j00053.00010>。

参考文献

- [1] JAYSHRIH. How Benioff Paul's Quantum Computing Theory Formed the Foundation of Quantum Computers? [EB/OL]. (2020-01-10) [2021-08-16]. <http://www.yourtechstory.com/2020/01/10/benioff-paul-quantum-computing-theory/>.
- [2] NSTC. National Strategic Overview for Quantum Information Science [R/OL]. (2018-09-24) [2021-08-16]. https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2020/10/2018_NSTC_National_Strategic_Overview_QIS.pdf.
- [3] House-Science, Space, and Technology; Senate-Commerce, Science, and Transportation. H. R. 6227-National Quantum Initiative Act [EB/OL]. (2018-12-21) [2021-08-16]. <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/6227/text>.
- [4] House-Armed Services. H. R. 6395-William M.

(Mac) Thornberry National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2021 [EB/OL]. (2021-01-01) [2021-08-16]. <https://www.congress.gov/bill/116th-congress/house-bill/6395/text>.

- [5] NQCO. A Strategic Vision for America's Quantum Networks [R/OL]. (2020-02-07) [2021-08-16]. <https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2021/01/A-Strategic-Vision-for-Americas-Quantum-Networks-Feb-2020.pdf>.
- [6] NQCO. Quantum Frontiers Report [R/OL]. (2020-10-07) [2021-08-16]. <https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2020/10/QuantumFrontiers.pdf>.
- [7] BIDEN, J. Interim National Security Strategic Guidance [R/OL]. (2021-03-03) [2021-08-16]. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/03/NSC-1v2.pdf>.
- [8] The White House. U. S. -ROK Leaders' Joint Statement [EB/OL]. (2021-05-21) [2021-08-16]. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/05/21/u-s-rok-leaders-joint-statement/>.
- [9] House-Science, Space, and Technology. H. R. 1866-Quantum Network Infrastructure Act of 2021 [EB/OL]. (2021-03-11) [2021-08-16]. <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/1866/titles>.
- [10] House-Science, Space, and Technology. H. R. 1837-QUEST Act of 2021 [EB/OL]. (2021-03-11) [2021-08-16]. <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/1837/text>.
- [11] 新华社. 国家主席习近平发表二〇一八年新年贺词 [EB/OL]. (2017-12-31) [2021-08-16]. <http://www.gov.cn/xinwen/2017-12/31/>

- content_5252083. htm.
- [12] 习近平. 在中国科学院第二十次院士大会、中国工程院第十五次院士大会、中国科协第十次全国代表大会上的讲话[EB/OL]. (2021-05-28) [2021-08-16]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1701009847590037191&wfr=spider&for=pc>.
- [13] 国务院. “十三五”国家科技创新规划的通知[EB/OL]. (2016-08-08) [2021-08-16]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-08/08/content_5098072.htm.
- [14] 国务院. “十三五”国家战略性新兴产业发展规划[EB/OL]. (2016-12-19) [2021-08-16]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-12/19/content_5150090.htm.
- [15] 科技部;中央军委科学技术委员会. “十三五”科技军民融合发展专项规划[EB/OL]. (2017-08-24) [2021-08-16]. http://www.most.gov.cn/xxgk/xinxifenlei/fdzdgnr/qtwj/qtwj2017/201708/t20170824_134588.html.
- [16] 新华社. 长江三角洲区域一体化发展规划纲要[EB/OL]. (2019-12-01) [2021-08-16]. http://www.gov.cn/zhengce/2019-12/01/content_5457442.htm.
- [17] 新华社. 中华人民共和国国民经济和社会发展的第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. (2021-03-12) [2021-08-16]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
- [18] FEYNMAN R P. Simulating Physics with Computers [J]. International Journal of Theoretical Physics, 1982, 21(6/7): 467-488.
- [19] DEUTSCH D, JOZSA R. Rapid Solution of Problems by Quantum Computation [J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A-Mathematical Physical and Engineering Sciences, 1992, 439(1907): 553-558.
- [20] SHOR P W. Algorithms for Quantum Computation-Discrete Logarithms and Factoring [C]. Goldwasser S. Annual Symposium on Foundations of Computer Science. Santa Fe, NM: Ieee Comp Soc, Tech Comm Math Fdn Comp, 1994: 124-134.
- [21] SCHUMACHER B. Quantum Coding[J]. Physical Review A, 1995, 51(4): 2738-2747.
- [22] ZHONG Hansen, WANG Hui, et al. Quantum Computational Advantage Using Photons [J]. Science, 370(6523): 1460-1463.
- [23] FRANK A, KUNAL A, RYAN B, et al. Quantum Supremacy Using a Programmable Superconducting Processor [J]. Nature, 2019, 574(779): 505-510.
- [24] Google AI Quantum and Collaborators, FRANK A, KUNAL A, et al. Hartree-Fock on a Superconducting Qubit Quantum Computer[J]. Science, 2020, 369(6507): 1084-1089.
- [25] HARRIGAN M P, SUNG K J, MATTHEW N, et al. Quantum Approximate Optimization of Non-Planar Graph Problems on a Planar Superconducting Processor[J]. Nature Physics, 2021, 17(3): 332-336.
- [26] IBM. IBM's Roadmap for Scaling Quantum Technology [EB/OL]. (2020-09-15) [2021-08-16]. <https://www.ibm.com/blogs/research/2020/09/ibm-quantum-roadmap/>.
- [27] IONQ. IonQ Unveils World's Most Powerful Quantum Computer [EB/OL]. (2020-10-01) [2021-08-16]. <https://ionq.com/news/october-01-2020-most-powerful-quantum-computer>.
- [28] HONEYWELL. Honeywell Sets New Record for

Quantum Computing Performance [EB/OL]. (2021-03) [2021-08-16]. <https://www.honeywell.com/us/en/news/2021/03/honeywell-sets-new-record-for-quantum-computing-performance>.

[29] INTEL. Intel Introduces ‘Horse Ridge’ to Enable Commercially Viable Quantum Computers [EB/OL]. (2019-12-09) [2021-08-16]. <https://newsroom.intel.com/news/intel-introduces-horse-ridge-enable-commercially-viable-quantum-computers/#gs.8kjkik>.

[30] MAURIZIO D P E. Intel Horse Ridge II Brings Quantum Computing a Step Closer to Commercial Reality [EB/OL]. (2021-03-18) [2021-08-16]. <https://www.eetasia.com/intel-horse-ridge-ii-brings-quantum-computing-a-step-closer-to-commercial-reality/>.

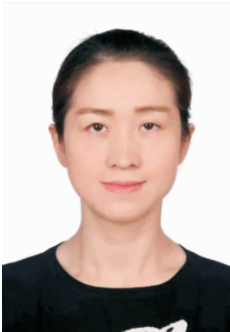
[31] DHS; NIST. Post-Quantum Cryptography. [EB/OL]. (2021-10-4) [2021-10-08]. <https://www.dhs.gov/quantum>.

作者贡献说明

于杰平:收集、整理资料,撰写文章初稿,设计文章框架;

王 丽:分析论文数据,指导文章框架设计,修改论文。

作者简介



王 丽:副研究馆员;硕导;主要研究方向:情报学理论与应用,主要从事信息领域及相关前沿科技领域的战略情报研究工作,先后承担科技部、中国科学院、文献情报中心等 20 余项的研究课题,发表相关论文 20 余篇,出版专著 2 部。

美国半导体产业发展历程及衰落原因

美智库信息技术与创新基金会(ITIF)于 2021 年 11 月发布题为《每况愈下? 为保持生物制药竞争力,美国必须从其半导体产业错误中吸取教训》(*Going, Going, Gone? To Stay Competitive in Biopharmaceuticals, America Must Learn From Its Semiconductor Mistakes*)的报告。报告剖析了美半导体产业的发展历程和衰落原因,认为美国开创了半导体产业,但却在过去 30 年间逐步丧失了 70% 的半导体制造能力。

美国半导体产业的发展历程主要分为四个阶段。1) 开创和领导阶段(1947—1970s 前半期):美国贝尔实验室于 1947 年首次发明晶体管,至 1972 年,美国已占据全球半导体产量的 60% 和消费量的 57% ;2) 失去领导地位阶段(1970s 后半期):面对日本企业(如,富士通、日本电气、日立、三菱电机等)的激烈竞争,美国半导体产业竞争力逐步衰弱,各类芯片的全球市场份额下降至不足 40% ;3) 复苏阶段(1980s):依靠美国产业界和政府联合成立的半导体制造技术战略联盟(SEMATECH)和研发税收抵免等有效政策激励措施,美国超越日本,重新夺回全球半导体设备市场份额领导地位;4) 整体衰落阶段(1990s 以来):虽然美国在半导体研发和创新方面仍保有优势,但其全球生产份额已由 1990 年的 37% 下降至 2021 年的 12% ,如果不实施有效的政策干预,2030 年这一比值或将下降至 10% 。

造成美国半导体产业生产能力下降和尖端芯片研发滞后的主要原因是美国自身政策的忽视和失误,以及不断加剧的外国竞争,具体包括三点。1) 外国政府的投资激励措施:相较于美国,外国政府实施了更为有力的投资优惠政策,例如美国半导体晶圆厂的 10 年总体拥有成本要比大多数国家高出 25% ~ 50% ;2) 外国的创新重商主义:一些国家(如日本)利用不公平的贸易和经济政策补贴半导体企业;3) 美国创新体系和研发投资政策的失误:其中最根本的失误是美国政府研发投资强度的减弱,1978—2018 年的 40 年间,美国政府在半导体研发方面的投资仅增长了 1% ,约占 GDP 的 0.03% ,而私人投资已稳步增长至 GDP 的 0.19% 。

冯志刚、张志强(中国科学院成都文献情报中心)编译自
<https://itif.org/publications/2021/11/22/going-going-gone-stay-competitive-biopharmaceuticals-america-must-learn-its>