

国际量子计算战略布局比较分析^{*}

田倩飞^{*,1,2} 唐 川^{1,2} 王立娜¹

(1. 中国科学院成都文献情报中心, 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 100049)

摘 要:本文首先定性调研了美国、欧盟、英国、日本等主要国家和地区的量子计算相关战略与路线图,比较分析了各国/地区的代表性战略与路线图目标,以及获资项目的研发重点等。接着,总结各国/地区针对量子计算发展的政策措施特点,如:成立新机构以高度统筹研发活动与管理协调工作;建立研究中心并强调跨学科研究与长期基础研究支持;制定路线图目标与时限,持续监测进展并评估成效;培养面向未来的专业量子从业人员;推进国际合作,并重视国家安全维护等。最后,从制定国家量子计算技术战略、成立新机构以统筹管理和开展评估、培养跨学科的量子计算技术人才等多方面,为我国量子计算发展提出启示建议。

关键词:量子计算;战略布局;美国;欧盟;路线图

DOI:10.16507/j.issn.1006-6055.2020.02.002

Comparative Analysis of International Quantum Computing Strategies Layout^{*}

TIAN Qianfei^{*,1,2} TANG Chuan^{1,2} WANG Lina¹

(1. Chengdu Library of Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

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

Abstract: In this paper, quantum computing strategies and roadmaps of the United States, the European Union, the United Kingdom, and Japan are investigated qualitatively. The objectives of representative strategies and roadmaps as well as the research and development focus of the projects are analyzed. Then, the policy characteristics of each country for the development of quantum computing are summarized, such as, establishing new institutes to manage research and development activities; establishing new centers and emphasizing cross-discipline research; developing roadmaps and timelines, monitoring progress and evaluating results; cultivating future-oriented professional quantum researchers; promoting international cooperation and paying attention to national security. Finally, from the aspects of strategy formulation, establishment of new institutions and personnel training, inspirations and suggestions are put forward for the development of quantum computing in China.

Keywords: Quantum Computing; Strategies Layout; United States; European Union; Roadmaps

量子计算是一种遵循量子力学规律、调控量子信息单元进行计算的新型计算模式,拥有经典计算技术难以企及的并行计算能力,有望成为满足未来计算需求、加速科技创新的新引擎^[1]。在

^{*} 中国科学院文献情报能力建设专项(Y9290001),中国科学院战略研究与决策支持系统建设专项(GHJ-ZLZX-2020-31-1)

^{**} E-mail: tqf@clas.ac.cn

历经 20 世纪 90 年代前的理论探索时期、20 世纪 90 年代的编码算法研究时期后,量子计算研究迈向了 21 世纪以来的技术验证、原理样机研制和实际应用探索阶段。未来,量子计算可用于人工智能、药物开发、量子化学、新材料设计以及复杂优化调度等多个领域方向^[2],对各国科技创新、产业发展乃至经济社会的诸多方面带来颠覆性影响。

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)”,掌握技术制高点、标准制定权和舆论主导权,全球主要发达国家/地区已将量子计算发展提升到国家战略高度,纷纷发布量子信息科技战略,部署一系列体系化的量子计算发展举措,指导政府、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。本文重点剖析美国、欧盟、英国、日本的量子计算相关战略、路线图与项目等,并对我国量子计算发展提出启示建议。

1 国际量子计算战略部署概览

1.1 美国立法保障量子信息科学发展

美国是最早将量子信息技术列入国家战略、国防和安全研发计划的国家。早在 20 世纪 90 年代中期,美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)以及国防部(Department of Defense, DOD)即围绕量子信息科学召开研讨会。2015 年,量子信息科学成为《国家战略计算计划》(第 13702 号总统行政令)中的关键部分^[3]。2016 年 7 月,美国国家科学技术顾问委员会(National Science and Technology Council, NSTC)发布《推进量子信息科学:国家的

挑战与机遇》报告,指出量子计算能有效推动化学、材料科学和粒子物理的发展,未来有望颠覆人工智能等诸多科学领域^[4]。2018 年 6 月,美国众议院科学委员会通过《国家量子法案》,计划在 10 年内拨给能源部(Department of Energy, DOE)、NIST 和国家科学基金会(National Science Foundation, NSF)12.75 亿美元,全力推动量子科学发展,“制造量子计算机”是其三大目标之一^[5]。2018 年 9 月, NSTC 发布《量子信息科学国家战略概述》,系统总结了量子信息科学带来的挑战、机遇,以及美国为维持和扩大在量子信息科学领域的领导地位应做出的努力^[6]。2019 年 8 月,特朗普签署第 13885 号总统行政令,成立“国家量子计划咨询委员会”以负责评估量子计算等技术的趋势和发展状况^[7]。2020 年 2 月,美国白宫国家量子协调办公室发布《美国量子网络战略远景》报告^[8],提出将量子计算机和其他量子设备连接成庞大的量子互联网,重点应用于国家和金融安全、患者隐私、药物发现、新材料的设计和制造,以及宇宙科学等技术领域。

1.2 欧盟 10 亿欧元资助量子旗舰计划

欧洲高度重视量子信息技术对国家安全、经济发展等方面的影响,投入大量资源以发展相关技术。2005 年,欧盟第七框架计划发布《欧洲量子科学技术计划》和《欧洲量子信息处理与通信计划》,这是继欧洲核子中心、航天技术之后,在量子信息技术领域发起的新一轮大规模国际合作^[9]。

2016 年 4 月,欧盟针对量子技术旗舰计划投资 10 亿欧元,力争在第二次量子革命中抢占先机^[10]。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,旨在为欧洲建设一个量子网络,用于连接量子计算机、模拟器与传感器^[11]。

1.3 英国发布量子技术战略与路线图

英国高度重视量子信息科学的基础研究,近年来,正逐步转变为基础研究和商业应用并重。2013 年,英国政府针对“国家量子技术计划”(第一阶段 2014—2019 年)投资 2.7 亿英镑,并成立量子技术战略顾问委员会。2015 年,创新英国(Innovate UK)、英国工程与物理科学研究理事会(Engineering and Physical Sciences Research Council, EPSRC)发布《国家量子技术战略》和《英国量子技术路线图》,旨在十年内逐步将量子系统组件、量子通信、量子传感器、量子原子钟、量子增强影像等一大批量子信息技术实现商业化应用,并在二十年内实现量子计算的商业化^[12]。2018 年,英国政府针对“国家量子技术计划”(第二阶段 2020—2024 年)投资 3.15 亿英镑,支持新建一个国家量子计算中心,以及其他 4 个量子中心(其中量子计算和模拟中心由牛津大学领导)^[13]。2019 年 6 月,英国时任首相宣布投资 1.53 亿英镑发展量子计算技术^[14]。

1.4 日本发布量子飞跃旗舰计划

日本于 2001 年起布局并重点研发量子技术。2017 年 2 月,日本量子科技委员会发表了名为《关于量子科学技术的最新推动方向》的中期报告,指出日本学者在超导量子比特、自旋量子比特等事关量子计算的关键性技术方面提出了具有原创性的理论;应发挥日本在物理学、材料学方面的长期优势,在超导量子比特、自旋量子比特的集成化方面,重点发展与电子回路设计、格式化、过程化相关的半导体技术和光技术;将量子计算应用于实现最优化组合,如物联网时代物流和资源的

配比、人工智能方面的信息处理等^[15]。2018 年,日本文部省发布“量子飞跃旗舰计划”,10 年总投资达 200 亿日元,支持量子模拟与计算、量子传感、超短脉冲激光器等三大关键方向。其中,“量子模拟与计算”项目以研发通用型量子计算机为目标^[16]。

2 国际量子计算路线图与项目比较分析

2.1 量子计算相关计划/路线图比较

美国、欧盟、英国和日本都投入大量经费发展量子信息科学,本文选取上一节提及的各国/地区量子计算相关的重要战略与路线图——即美国《国家量子法案》、欧盟量子技术旗舰计划、《英国量子技术路线图》、日本量子飞跃旗舰计划,开展路线图目标比较(表 1)。在量子计算领域,欧盟、日本的 3 年或 5 年短期目标关注于提升量子比特的容错性以及开发数十位量子比特的处理器,中期目标是开发量子计算机原型;美、欧、英、日的 10 年或更长期目标均是制造出实际可用的量子计算机,并开展应用验证及云计算服务等。

2.2 量子计算重要研发项目与推进计划比较

美国有诸多机构支持《国家量子法案》的量子计算相关科研项目。DOE、NSF 等通过新建跨学科量子信息科学研究中心、量子跃迁挑战研究所等来支持《国家量子法案》的实施,特别强调跨学科人才汇集与生态系统构建,项目执行期通常为 3~5 年(表 2),在量子计算领域的具体研发内容涉及:面向下一代量子计算机的软硬件开发、利用量子计算解释暗物质与黑洞等宇宙现象、量子计算系统开发与概念验证、量子计算机的软件栈、量子模拟的算法与体系结构等。美国 NIST 着重开展量子信息科学方面的基础研究,DARPA 与

表 1 各国/地区量子计算相关计划/路线图比较

Tab. 1 Comparison of Quantum Computing Initiatives/Roadmaps

国家/地区	计划/路线图名称	发布年	资助总金额	量子计算相关目标	目标年
美国	国家量子法案	2018	12.75 亿美元	制造量子计算机	10 年
欧盟	量子技术旗舰计划	2018	10 亿欧元	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	3 年
				开发出的量子处理器具备量子纠错功能或鲁棒量子位,且优于物理量子位	6 年
				将能实现量子加速并超越经典计算机的量子算法投入实际使用	10 年
英国	量子技术路线图	2015	-	解决量子计算机中的重要棘手问题(年度市场价值:1000 万~1 亿英镑)	5~25 年
				提供针对高价值问题的量子云计算服务(年度市场价值:1000 万~1 亿英镑)	10~20 年
				实现高性能、低功耗的家庭计算(年度市场价值:超过 1 亿英镑)	20~25 年
日本	量子飞跃旗舰计划	2018	约 200 亿日元	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	5 年内
				研发量子比特的高度集成化技术和高品质量子比特技术,为量子计算机的应用奠定基础	
				开发多体电动力学模拟器原型机,并开始应用验证	
				通过量子计算机原型机验证量子优越性,并提交给用户在实际使用中开展优越性的验证工作	5 年后
				研制相干量子退火和量子化学计算机的原型机,开展云计算服务	
				改进量子计算机的原型机,开始应用验证和云计算服务	10 年后
				基础研究: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 2 美国 DOE/NSF 资助的量子计算重要项目与计划¹⁾

Tab. 2 Quantum Computing Plans and Projects Supported by US DOE/NSF¹⁾

资助机构	发布年	资助金额 (项目/新建机构数)	研究内容	执行期
DOE	2018	2.18 亿美元 (85 个项目)	关注量子信息科学研究,旨在为下一代计算与信息处理以及其他创新性技术奠定基础,例如,面向下一代量子计算机的软硬件开发、具备特定量子特性的新材料开发与表征、利用量子计算与信息处理研究和解释暗物质与黑洞等宇宙现象等	2~5 年不等
	2020	6.25 亿美元 (2~5 个跨学科量子信息科学研究中心)	将建立 2~5 个跨学科量子信息科学研究中心,汇集来自美国各大学、国家实验室、研究院、政府机构和私营部门的人才,为下一代量子信息科学家和工程师提供培训和合作机会,帮助美国建立一个全面的生态系统,推动计算、通信、传感等方面的量子技术进步	5 年
NSF	2018	3100 万美元 (8 个工程类应用研究项目、25 个基础研究项目)	工程类应用研究项目致力于促进量子信息科学与工程的前沿研究,探索超越单个器件与组件开发的综合性方案,以实现可扩展的量子通信系统;基础研究项目专注于创新性方法、实验演示和变革性进展,帮助实现量子传感、量子通信、量子计算和量子模拟领域的系统开发与概念验证。	3 年
	2019	9400 万美元 (15~25 个概念项目、1~3 个挑战研究所项目)	重点从跨学科研究、人才培养、研究协调和社区参与、协同伙伴关系和基础设施发展四方面开展活动。其中,跨学科研究将资助 4 个研究方向:远程安全通信的量子网络、量子计算机的软件栈、量子模拟的算法与体系结构和平台、量子传感。	1 年(概念项目)、5 年(挑战研究所项目)

1) 仅列出支持《国家量子法案》的部分重要项目与计划。

IARPA 则重点开展相关定向应用研究。

2018 年 10 月,欧盟量子旗舰计划为首批项目提供约 4000 万欧元资助,项目执行期均为 3 年(表 3)。AQTION 与 OpenSuperQ 项目负责研发量子计算机,分别采用离子路线以及超导路线,量子比特为 50 位和 100 位;PASQuanS 与 Qumbs 项目则负责研究量子模拟、编程以及应用。

EPSRC 是英国科技创新战略政策的重要落实机构,其资助的量子计算重点项目如表 4 所示。

2018 年 3 月,日本量子飞跃旗舰计划针对“量子计算”领域资助了 1 个旗舰项目与 6 个基础研究项目(表 5)。其中,由日本理化学研究所等承担的旗舰项目获得近 4 亿日元以研究和开发超导量子计算机;基础研究重点研究冷却原子量

表 3 首批获欧盟量子旗舰计划资助的 4 个量子计算项目¹⁾

Tab. 3 First Round of Four Quantum Computing Projects Supported by EU¹⁾

主研机构	参与国	资助金额 /万欧元	研究内容
奥地利因斯布鲁克大学	奥地利、德国、法国、英国、瑞士	958.8	基于离子阱的先进量子计算(AQTION):侧重于离子阱量子计算机的可扩展性、可用性和适用性研究,旨在开发一个完全连接的 50 量子比特量子计算机,通过强大的软硬件堆栈实现复杂算法的远程执行,利用离子穿梭在处理器之间引入远程连接,利用光互联在量子处理器之间建立远程操作,为大规模和容错量子计算铺平道路
德国萨尔布吕肯大学	德国、瑞士、瑞典、西班牙、芬兰	1033.4	开放式超导量子计算机(OpenSuperQ):开发一个高达 100 个量子比特的全栈量子计算系统,并在中央站点为外部用户提供可持续的服务,执行量子化学模拟及与优化和机器学习相关的问题。平面传输类型的超导量子位处理器作为该系统的核心,将与控制芯片一起集成在定制的低温系统中。系统将配备面向应用的集成控制软件和硬件
德国马普研究所	德国、法国、奥地利、意大利、英国、瑞士	925.8	可编程原子大规模量子模拟(PASQuanS):在最先进的基于原子和离子的量子模拟平台基础上,通过改进控制方法,使这些量子模拟器完全可编程,将这些平台扩展到大于 1000 个原子/离子,解决基础科学、材料开发、量子化学和工业中高度重要的现实问题
意大利国家研究委员会	意大利、瑞士、德国、法国	933.6	量子级联激光频率梳中的量子模拟与纠缠工程(Qombs):创建光学晶格超冷原子量子模拟器,研究载波传输量子动态效应和传感

1)4 个项目的发布年均均为 2018 年,执行期均为 3 年。

表 4 英国 EPSRC 资助的量子计算重点项目

Tab. 4 Quantum Computing Projects Supported by UK EPSRC

承担机构	资助金额/万英镑	项目名称	执行期
牛津大学	14.66	超导量子处理器的编译与电路布局优化	2018—2019
伦敦大学	220.68	超导量子电路的修正	2018—2019
曼彻斯特大学、牛津大学	29.93	利用分子自旋拓展量子计算(SUQMO)	2018—2021
布里斯托大学	46.85	量子算法及应用(QuantAlgo)	2018—2021
帝国理工学院	32.31	有机量子集成器件(ORQUID)	2018—2021
帝国理工学院	111.07	鲁棒离子阱量子逻辑的最优控制	2017—2021
格拉斯哥大学	10.08	量子电子器件模拟(QUANTDEVMOD)	2017—2018
伦敦大学	271.11	英国超导量子技术	2016—2019
牛津大学、伦敦大学学院	62.10	量子计算理论	2016—2019
布里斯托大学	457.49	量子光子集成电路(QuPIC)	2016—2019
萨塞克斯大学、牛津大学、南安普顿大学	76.54	为紧急量子计算机创建供应链(ESCHER)	2016—2019

表 5 获日本量子飞跃旗舰计划资助的“量子计算”领域 7 个项目¹⁾

Tab.5 Seven Quantum Computing Projects Supported by Japan Quantum Leap Initiative¹⁾

承担机构	资助金额(项目数)	研究内容
理化学研究所(RIKEN)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	3~4 亿日元 (1 个旗舰项目)	超导量子计算机的研究与开发
自然科学研究机构分子科学研究所		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
大阪大学基础工学研究所		具有冷却离子的多自由度复合量子模拟器
国立信息学研究所	2000~3000 万日元 (6 个基础研究项目)	以架构为中心的量子软件理论与实践
京都大学		量子计算机高速仿真环境的构建及量子软件的开发
国家先进工业科学技术研究所		用大规模集成电路实现基于硅量子比特的量子计算机
庆应义塾大学		量子软件

1)7 个项目的发布年都是 2018 年。

子模拟器、复合量子模拟器、量子软件等。

3 主要国家/地区量子计算发展政策措施特点

通过对美国《推进量子信息科学:国家的挑战与机遇》《国家量子法案》《量子信息科学国家战略概述》、欧盟量子技术旗舰计划、英国《国家量子技术战略》、日本量子飞跃旗舰计划等政策措施、实施模式、行动建议的比较,总结出 5 条政策措施特点。

3.1 成立新机构以高度统筹研发活动与管理协调工作

2018 年 6 月,白宫科技政策办公室(Office of Science and Technology Policy,OSTP)在国家科学技术委员会下设立量子信息科学小组委员会,负责在量子技术上协调形成国家级议事日程,帮助衔接联邦政府内的量子技术工作;2019 年 3 月,成立白宫国家量子协调办公室,以统一政府间的联邦研发活动;同年 9 月,特朗普签署行政令建立国家量子计划咨询委员会,负责对量子科学发展进行定期的独立评估及其他与该量子倡议相关的管理与协调工作。

2016 年,欧盟量子旗舰计划筹备伊始,即成

立了一个由 12 位学术界专家和 12 位业界专家组成的独立的高级督导委员会,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具体建议。

3.2 建立研究中心并强调跨学科研究与长期基础研究支持

为支持美国《国家量子法案》的实施,DOE 将设立 2~5 个跨学科量子信息科学研究中心,致力于开展基础研究,以加速量子信息科学和技术成果突破;NSF 将向高等教育机构或合法非营利的组织机构拨款成立 5 个“量子研究和教育多学科中心”,并建立 1~3 个“量子跃迁挑战研究所”;NIST 则支持基础的量子信息科学和技术研究,制定推进量子应用商业发展所必需的指标和标准。

2013 年,英国政府出台资助金额达 2.7 亿英镑的“国家量子技术计划”,由 17 家大学和 132 家公司组成了英国国家量子技术网络中心,下设量子传感与测量中心、量子传感与成像中心、量子计算与模拟中心、量子通信中心等,并通过新建的博士培训中心培养高级人才。2018 年 9 月,英国宣布将在 5 年内为英国的 4 个量子中心提供

8000 万英镑,包括:量子增强成像中心、量子计算和模拟中心、量子传感和计量中心、以及量子通信中心。

3.3 制定路线图目标与时限,持续监测进展并评估成效

欧盟量子技术旗舰计划、《英国量子技术路线图》、日本量子飞跃旗舰计划等战略均对量子计算科研制定了明确的目标与时限(短、中、长期)。美国与欧盟还特别强调持续密切监测量子领域科学进展,通过指标评估科研投资成效。

3.4 培养面向未来的专业量子从业人员

各个国家/地区的量子战略均强调对量子专业人员的教育与培养。美国《量子信息科学国家战略概述》建议在早期阶段(包括小学、初中和高中)即提供量子科学教育;鼓励行业和学术界创建融合、跨行业的多元化人力资源发展策略,以满足国家量子信息科学发展的需求。欧盟量子技术旗舰计划指出,由于量子技术交叉融合了物理学、工程、计算机科学及相关领域的研究,培训成功的“量子工程师”或是更普遍的具备量子意识的劳动力应成为旗舰计划的重大目标之一。英国《国家量子技术战略》强调支持量子科技人才的培养,以满足未来产业的需求;支持人才和创新思想在学术界、产业界和政府机构间的自由流动。日本量子飞跃旗舰计划指出应当培养从基础物理到系统开发等多层次人才、跨领域研究人才以及引领开放创新的人才。

3.5 推进国际合作,并重视国家安全维护

美国《量子信息科学国家战略概述》建议与志同道合的行业界和政府合作伙伴加强国际合作;确定他国的优势和重点领域、差距和机会,以便从技术和政策角度更好地了解不断演变的国际量子信息科学格局;同时强调要跟踪监测不断

发展的量子信息科学对安全的影响,确保现有技术分类和出口管制的兼容应用,保护知识产权以及与国家安全相关的应用。欧盟量子技术旗舰计划鼓励在科学层面开展国际合作,但与企业的合作应予以一定限制。英国《国家量子技术战略》建议通过国际合作推进英国的量子技术产业。日本量子飞跃旗舰计划拟加强国际性的开放研究交流并积极与海外研究团体构建研究网络。

4 对我国的启示

4.1 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,系统化地部署一系列重要研究计划和发展举措来抢夺“量子优势”。建议我国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,制定量子计算技术研发路线图,明确优先发展领域、发展目标、关键挑战和时间节点。开展“先谋后动”的战略性高技术研发,有效组织国内核心力量,给足时间解决中长期挑战,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。

4.2 成立新机构以统筹管理和开展评估

成立若干新机构,分别负责协调国家量子计算技术战略的议事日程,统筹政府机构间的研发活动,加强政府、业界、学界的沟通合作,持续监测量子计算领域科学进展,确定他国的优势和重点领域、差距和机会,有针对性地开展量子计算国际合作,确定指标来评估国家安全风险与研发投资成效,制定政策严控关键核心技术研发的信息披露(包括论文、专利、进展新闻等),重视知识产权保护。在量子计算机工程实现目标方面,据

弃以论文作为科研人员考核导向的做法。

4.3 培养跨学科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。量子计算研发不仅需要物理学家,更需要材料、计算机、工程等领域的跨学科人才,以共同解决量子计算机工程实现所需的仪器设备、关键材料、算法软件等。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。

参考文献

- [1] 赛迪智库电子信息研究所. 量子计算发展白皮书 2019[EB/OL]. (2019-9-17). <http://www.cb-dio.com/image/site2/20190917/f42853157e261eeace8318.pdf>.
- CCIDWISE. Quantum Computing Development Whitepaper 2019[EB/OL]. (2019-9-17). <http://www.cb-dio.com/image/site2/20190917/f42853157e261eeace8318.pdf>.
- [2] 翁文康. 量子计算:突破摩尔定律,开启算力新时代[EB/OL]. (2018-12-1). <https://www-file.huawei.com/-/media/corporate/pdf/publications/communicate/81/05-cn.pdf>.
- WENG Wenkang. Quantum Computing: Beyond Moore Law, Ushering Computing New Era [EB/OL]. (2018-12-1). [nicate/81/05-cn.pdf.](https://www-file.huawei.com/-/media/corporate/pdf/publications/commu-</p></div><div data-bbox=)

- [3] Congressional Research Service (CRS). Quantum Information Science-Applications, Global Research and Development, and Policy Considerations[EB/OL]. (2019-11-1). <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R45409>.
- [4] National Science and Technology Council (NSTC). Advancing Quantum Information Science: National Challenges and Opportunities[EB/OL]. (2016-7-22). https://www.whitehouse.gov/sites/whitehouse.gov/files/images/Quantum_Info_Sci_Report_2016_07_22%20final.pdf.
- [5] 115th Congress. National Quantum Initiative Act [EB/OL]. (2018-12-21). <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/6227>.
- [6] National Science and Technology Council (NSTC). National Strategic Overview for Quantum Information Science [EB/OL]. (2018-9-16). <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2018/09/National-Strategic-Overview-for-Quantum-Information-Science.pdf>.
- [7] The White House. Executive Order on Establishing the National Quantum Initiative Advisory Committee[EB/OL]. (2019-8-30). <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/executive-order-establishing-national-quantum-initiative-advisory-committee/>.
- [8] The White House National Quantum Coordination Office. A Strategic Vision For America's Quantum Networks [EB/OL]. (2020-2-1). <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2017/12/A-Strategic-Vision-for-Americas-Quantum-Networks-Feb-2020.pdf>.
- [9] 中国科学技术大学. 量子通信产业化前景[EB/

OL]. (2014-12-25). http://www.kepu.net.cn/gb/special/quantum_communication/mysteries/201412/t20141225_8332.html.

University of Science and Technology of China. The Prospect of the Industrialization of Quantum Communication[EB/OL]. (2014-12-25). http://www.kepu.net.cn/gb/special/quantum_communication/mysteries/201412/t20141225_8332.html.

[10] European Commission. European Commission will launch 1 billion quantum technologies flagship [EB/OL]. (2016-5-17). <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/european-commission-will-launch-eu1-billion-quantum-technologies-flagship>.

[11] European Commission. Quantum Technologies Flagship Kicks off with First 20 Projects [EB/OL]. (2018-6-20). http://europa.eu/rapid/press-release_IP-18-6205_en.htm.

[12] 量子客. 2018 年全球量子计算领域研发概况 [EB/OL]. (2018-3-25). <https://www.qtumist.com/post/3825>.

Qtumist. Overview of Global Quantum Computing Research and Development 2018 [EB/OL]. (2018-3-25). <https://www.qtumist.com/post/3825>.

[13] 中国科学院科技战略咨询研究院. 英国和德国大力推动量子技术研发 [EB/OL]. (2019-1-11). http://www.casisd.cn/zkcg/ydkb/kjqykb/2019/kjqykb201901/201901/t20190111_5228057.html.

CASISD. UK and Germany Push for Quantum Technology Research and Development [EB/OL]. (2019-1-11). http://www.casisd.cn/zkcg/ydkb/kjqykb/2019/kjqykb201901/201901/t20190111_5228057.html.

[14] 田倩飞. 英国政府 1.5 亿英镑推进量子技术商业化 [EB/OL]. (2019-7-8). <https://www.secrss.com/articles/12063>.

TIAN Qianfei. UK Government 150 Millon Pounds Boosts Commercialisation of Quantum Technology. [EB/OL]. (2019-7-8). <https://www.secrss.com/articles/12063>.

[15] 中国科学院科技战略咨询研究院 (CASISD). 日本前瞻未来量子科学技术的重点发展方向 [EB/OL]. (2017-6-30). http://www.casisd.cn/zkcg/ydkb/kjqykb/2017/201704/201706/t20170630_4820452.html.

CASISD. The Key Development Direction of Quantum Science and Technology in Japan's Future [EB/OL]. (2017-6-30). http://www.casisd.cn/zkcg/ydkb/kjqykb/2017/201704/201706/t20170630_4820452.html.

[16] 中国科学院科技战略咨询研究院 (CASISD). 日本文部省发布量子飞跃旗舰计划 [EB/OL]. (2018-6-12). http://www.casisd.cn/zkcg/ydkb/kjqykb/2018/201806/201806/t20180612_5025170.html.

CASISD. Japan's Ministry of Culture and Culture Launches Quantum Leap Flagship Program [EB/OL]. (2018-6-12). http://www.casisd.cn/zkcg/ydkb/kjqykb/2018/201806/201806/t20180612_5025170.html.

作者贡献说明

田倩飞:设计文章框架结构, 撰写初稿, 修改并定稿;

唐川:重点提供第 1 和第 4 部分材料与观点;

王立娜:重点提供第 2 部分材料。