

离子阱量子计算机的发展现状与趋势

饶欣欣¹ 李卓瑛¹ 宋 潇¹ 朱 峰^{1,2} 刘海燕^{1,2} 崔恩楠³

高子鐔³ 刘梦媛³ 黄毛毛³ 韩 琢³ 邱道文^{3,4} 周卓俊^{*,3} 罗 乐^{*,1,2,5}

(1. 中山大学物理与天文学院, 珠海 519082; 2. 中山大学深圳研究院量子信息技术中心, 深圳 518087;

3. 广东启科量子信息技术研究院有限公司, 广州 510700; 4. 中山大学计算机学院, 广州 510006;

5. 国开启科量子技术(北京)有限公司, 北京 100089)

摘 要:量子计算机是基于微观体系的量子力学性质——叠加性和纠缠性,对信息进行逻辑运算、存储传输的新型计算装置。通过运行基于量子硬件的量子算法,量子计算机解决某些复杂数学问题的速度和效率可大幅度超越经典计算机,对未来科技发展和国家战略竞争起着至关重要的作用。离子阱是通用量子计算机的主流技术之一,同时也对量子物理学的发展发挥过关键作用。本文围绕离子阱量子计算机的发展现状与趋势展开论述。首先回顾离子阱量子计算发展历史;接着介绍离子阱关键技术现状以及趋势;然后重点介绍分布式离子阱量子计算机,分析离子-光子纠缠、分布式量子计算,以及基于离子阱量子计算机的量子互联网络等技术前沿;并介绍了离子阱量子计算产业发展,包括核心专利、研究机构、企业与融资、市场与生态等;最后,对离子阱量子计算机科研和产业发展提出政策建议。

关键词:离子阱;量子计算机;分布式量子计算;量子互联网络;离子-光子纠缠

DOI:10.16507/j.issn.1006-6055.2022.02.003

Development and Trend of Trapped Ion Quantum Computers

RAO Xinxin¹ LI Zhuoying¹ SONG Xiao¹ ZHU Feng^{1,2} LIU Haiyan^{1,2}

CUI Ennan³ GAO Zixin³ LIU Mengyuan³ HUANG Maomao³ HAN Zhuo³

QIU Daowen^{3,4} ZHOU Zhuojun^{*,3} LUO Le^{*,1,2,5}

(1. School of Physics and Astronomy, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, China;

2. Center of Quantum Information Technology, Shenzhen Research Institute of Sun Yat-Sen University, Shenzhen 518087, China; 3. Guangdong QUDOOR H-Bar Lab Co, Ltd., Guangzhou 510700, China;

4. School of Computer Science and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China;

5. QUDOOR Co, Ltd. Beijing 100089, China)

Abstract: Quantum computer is a new type of physical device for the operation, storage and processing of quantum information, which is based on quantum properties, such as superposition and entanglement. By running quantum algorithms based on quantum hardware, quantum computers are capable to solve certain complex computational problems much faster and more efficiently than classical computers. Hence, quantum computers play a crucial role in the future science and technology development, international strategic competition and other aspects. Trapped ion is one of the main physical

* E-mail: zjzhou@qudoor.cn

* * E-mail: luole5@mail.sysu.edu.cn

platforms to construct quantum computer. This paper introduces the development and trends of trapped ion quantum computers. Firstly, by reviewing the historical development of trapped ion quantum computing, this paper reviewed the principle, status, and trend of trapped ion quantum computers. Then, the paper focuses on the research frontier of distributed trapped ion quantum computer, and analyzes technical topics, such as ion-photon entanglement, distributed quantum computing, and quantum internet based on trapped-ions. Further, the development of the industry of trapped ion quantum computing is discussed, including core patents, research institutions, enterprises, and financing, as well as marketing and ecology. Finally, the paper provides suggestions for scientific research and industrial development of trapped ion quantum computers.

Keywords: Ion Trap; Quantum Computer; Distributed Quantum Computing; Quantum Internet; Ion-Photon Entanglement

20 世纪末,量子力学结合信息科学产生出一门新兴学科——量子信息。它促进了量子力学在信息社会中的应用,对人类社会的生产生活产生了巨大影响,能促进传统的信息科学产生革命性变化,包括由物理规律保证的通信安全性以及计算效率的指数级提高。一些著名的例子包括量子 Shor 算法^[1]对质因数分解的加速、Grover 算法用于量子搜索^[2]、量子隐形传态作为安全通信的手段等。

近年来,量子信息发展的重点领域是研发大规模的量子计算体系,以囚禁离子、超导 Josephson 结、分子核磁共振、半导体量子点、氮空穴(Nitrogen-Vacancy, NV)色心等为代表的量子信息处理的物理单元,逐步实现高保真度的量子态制备、量子门操作和量子态探测等测控手段,为实现大规模的实用化量子信息处理奠定坚实基础。其中,超导和囚禁离子两种物理系统的各项指标最好、成熟度最高,最有希望在短期内实现量子容错计算和规模可扩展的体系。尤其是基于囚禁离子的离子阱系统是世界上唯一一种具有超长相干时间(分钟级),在量子态制备、量子态操作(单比特和两比特)、量子态测量等关键参数全面超过量子容错计算阈值的物理系统^[3,4],并且有天然的光子发射能力,具备将计算单元互联形成量子网络的潜力。

2018 年 12 月,美国科学院院士、美国联合量

子研究所 Chirs Monroe 教授的初创公司 IonQ 开发出了当时世界上最强大的量子计算机。他们利用半导体材料上的微加工离子阱囚禁了 160 个镱(Yb)离子量子比特,对其中 79 个比特的单量子门操作保真度达到 99%,对其中 11 个比特实现了任意的两两量子门且保真度达到 98%,并随后实现了对水分子能谱的量子模拟。他们对比了囚禁离子系统和 IBM 超导量子系统的计算性能和速度,结果表明:运行相同的已知经典算法时, IonQ 囚禁镱离子量子计算机在计算准确性、量子比特之间的连通性、相干时间内门操作数量等方面都实现了对 IBM 超导计算机的全方位超越。科学界预计,未来只要囚禁离子量子计算克服原子物理实验系统复杂的弱点,在扩展性上不断进步,就可以实现相对于经典计算机的量子计算优势,并在体现量子计算优势的量子体积(Quantum Volume)这一指标上遥遥领先其他技术路线。

解决离子阱量子计算的扩展性问题,比较容易实现的一条途径是实现模块化的分布式量子计算。分布式量子计算基本构架是通过制备纠缠态连接各个节点来完成量子算法。其特点是每个网络节点内集成了一定量的量子比特,通过光子作为信息传递媒介将不同节点内的量子比特纠缠起来。本文在回顾离子阱量子计算发展现状的基础上,重点阐述分布式离子阱量子计算机相关前沿技术,以及基于离子阱量子计算机的量子互联网

络;然后介绍离子阱量子计算的产业与市场;最后对离子阱量子计算机产业的发展提出政策建议。

1 离子阱量子计算机技术回顾及现状

1.1 离子阱量子计算机发展历史回顾

1982 年,理查德·费曼提出了利用量子物理体系实现量子模拟的想法,即量子计算的早期概念。费曼的观点启发了人们的对量子计算的研究。1985 年,牛津大学的 David Deutsch 建立了量子图灵机的模型,提出建立一个通用量子计算机就是构造一系列量子逻辑门所组成的逻辑网络。1992 年,Deutsch 教授和剑桥大学的 Jozsa 教授提出了 D-J 量子算法。接着在 1994 年,Peter Shor 提出了著名的 Shor 算法。这些量子算法的接连问世,显示了量子计算算法相对于经典计算的优越性,引起了学术界和工业界的重视与投入,推动了量子计算的研发进程^[5]。

在实验研究方面。1953 年,德国物理学家 Wolfgang Paul 提出并被实验实现了的射频保罗阱,可以有效地实现离子囚禁。1959 年,另一位德国物理学家 Hans Dehmelt 利用变化磁场实现了电子的囚禁,并将它命名为彭宁阱。保罗阱和彭宁阱是最常用的两种离子阱,两位科学家也因为“离子阱技术的发展”而获得了 1989 年诺贝尔物理学奖。

1995 年 Ignacio Cirac 和 Peter Zoller 提出了在离子阱系统可实现控制非门 CNOT Gate 的方案^[6,7]。这是最早提出的利用离子阱实现量子计算的理论方案。Cirac-Zoller 门通过将离子制备到振动基态(0 声子态),然后操纵激光聚焦到离子上,来实现对单离子的么正变换和多离子的逻辑门操作。同年 Chris Monroe 和他的博士后导师 David Wineland 就在实验上利用单个 Be⁺ 离子的

内态和声子态的耦合,实现了 CNOT 逻辑门操作^[8]。这是 David Wineland 在 2012 年获得诺贝尔物理学奖时获得表彰的重要学术成果之一。2003 年奥地利 Blatt 实验小组实现了两个钙离子之间的纠缠,并制备了 CNOT 门。在这期间 Klaus Mølmer 和 Anders Sørensen 在 1999 年首次提出了一种不需要将离子冷却到振动基态的两离子激光操控纠缠方案,称之为 M-S Gate,并成为目前离子阱量子计算中最为常用的逻辑门实现方式^[9]。

最近十年,离子阱量子计算机的工程化、商用化技术得到飞速发展。2017 年,马里兰大学已经在离子阱系统中实现了 53 量子比特的量子模拟,与其关联密切的量子技术初创公司 IonQ 也于 2018 年 12 月声明已经成功囚禁住 160 个量子比特,并且可以对 79 个 Qubit 进行单量子比特操作,实现了最多 11 个量子比特的两两纠缠^[10]。离子阱量子计算的另一行业领先公司 Honeywell 公司在 2020 年先后实现了 64 和 128 量子体积,平均单量子比特门保真度为 99.97%,双量子比特门保真度为 99.54%。IonQ 不甘示弱,同期宣布在 32 量子比特离子阱量子计算机上实现了超预期 400 万量子体积,并发布基于 32 量子比特量子计算机的云编程平台。2021 年 IonQ 在纽约证卷交易所上市,成为世界第一个成功上市的量子计算初创企业,这展现了金融科技界对离子阱技术的关注和支持。

1.2 离子阱量子计算技术现状与趋势

量子计算作为当前及未来科技的主战场之一,受到各行各业的瞩目。目前,能满足量子计算系统 DiVincenzo 标准的只有超导电路和离子阱技术^[11]。然而,超导路线在逻辑门保真度和相干时间方面存在短板,比特的物理布线工艺难度大且会随着比特数增加越发困难。离子阱量子计算路

线在物理比特质量和逻辑门保真度等方面具有相当优势,同时具备室温条件工作的优点。

离子阱技术的原理是利用电磁场使离子被限制并悬浮在自由空间中。量子比特存储在每个离子的原子能级中,通过耦合能级与阱中离子的集体运动模式,量子信息可在离子之间进行交互^[12]。与其他物理体系相比,离子阱系统最大的优势在于有高保真度的逻辑门运算、量子比特的相干时间足够长,并且具备最高的量子态制备和读出效率:牛津大学在 2016 年实现了保真度分别为 99.9% 的两量子比特门和 99.9934% 的单量子比特门。但离子阱量子计算技术目前仍面临一些困难,如可扩展性较差、电场噪声导致的消相干问题等^[13]。

近年来,许多企业开始开展大规模离子阱量子计算机的研发,并在工程化技术上不断取得新的进展。2018 年 12 月,IonQ 公司推出了一个离子阱体系量子计算机原型系统^[14];工业巨头霍尼韦尔宣布进军量子计算领域,采用离子阱技术实现量子计算^[15];在国内,量子计算初创公司启科量子于 2020 年启动了可扩展分布式离子阱量子计算机“天算 1 号”的研发,目标是通过分布式量子计算的方法最终实现量子体积一亿以上的百比特离子阱量子计算机^[16]。

量子计算机的计算能力取决于可操纵的量子比特数目,因此扩展可操纵的量子比特是当前离子阱量子计算机的主要发展趋势。图 1 是 IonQ 公司预期在未来七年内可操纵离子量子比特的增长趋势。目前在单离子阱计算架构中,离子阱量子计算的发展充分利用半导体、光电产业的先进工艺,将激光光源、离子阱芯片、探测器等集成化小型化,增强系统的鲁棒性和稳定性,在低温环境下有效降低环境噪声的影响,以多种技术手段提

高量子逻辑门操作的速度和保真度,不断扩展物理量子比特的数量,以低开销的少量量子比特实现量子纠错,大幅提升系统可操纵量子比特^[17]。但是对于单离子阱计算架构,如果更多离子被添加到同一囚禁区域中,高速和高保真度的量子比特逻辑门越来越难以实现。为解决单阱架构的可扩展性问题,早在 2002 年,量子电荷耦合器件(Quantum Charge Coupled Device, QCCD)的可扩展分布式架构就被提出^[18]。QCCD 系统由多个模块化囚禁离子系统组成,每个模块包含适量可操纵离子量子比特。为了让模块间的离子产生纠缠,不同模块之间可以通过电场控制输运离子,或者是通过与离子纠缠的光子互联来实现信息传递。这种 QCCD 器件的架构被广泛研究并用于指导基于离子阱的硬件设计。未来可以通过部署小型模块化的离子阱量子计算机作为计算节点,继而通过光子互联组成节点间的量子网络,发展分布式量子算法^[19]。

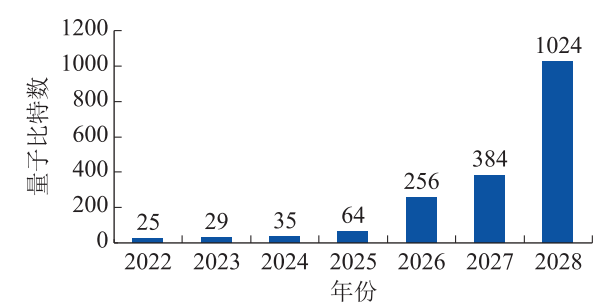


图 1 可操纵的离子量子比特的预期增长^[20]

Fig. 1 The Expected Growth of Controllable Ion Qubits^[20]

2 分布式离子阱量子计算现状与趋势

2.1 分布式量子计算关键技术

在新兴的量子科技产业里,以量子密钥分发(Quantum Key Distribution, QKD)为代表的量子保密通信网络类似经典语音通信网络;以量子计算

机为代表的量子互联网对应经典互联网,已被以美国为代表的发达国家提上议事日程^[21]。量子互联网的理论基础是量子纠缠理论,是由众多量子计算机作为终端(量子计算机)和节点(量子中继器)、众多光纤作为链路的一种分布式量子网络^[22]。IonQ 创始人 Monroe 教授在 2008 年提出的可扩展分布式离子阱量子计算机设想在 2010 年有了具体实施的技术路径^[23],包括:在两个相距遥远的离子比特之间产生纠缠和量子逻辑门操作的量子协议,将协议用于构建可扩展的原子-光子型量子网络;收集离子自发辐射光子在实现大规模量子网络中的关键技术;反射光学和光学腔提高自发辐射光子的收集效率的技术;探索可扩展的、高效的原子-光子型量子网络技术应用落地。

离子-光子纠缠技术作为分布式量子计算的关键技术,其量子网络模型如图 2 所示。离子阱作为量子计算的单元,通过激光激发原子,令原子自发辐射光子,光子携带信息在光纤中传输。激光、微波等操控手段使离子和光子发生纠缠,所有节点执行同一种离子-光子纠缠协议,该协议基于离子能级进行定义,并取决于光子数的有无、光子偏振、光子频率及光子发射时间等多种因素。离子和光子间形成量子纠缠后,依据量子协议将各个节点的离子纠缠起来,实现远程节点或终端的连接和数据传输^[24,25]。通过测量提取量子态相关信息,此时量子状态发生坍缩,具体过程如下:2 个节点之间的离子-离子纠缠过程有 2 个离子和 2 个光子参与,写出的总波函数包括 4 个参量,经过数学变换(类似量子隐形传态的原理,实际上是做纠缠交换(Entanglement Swap)),总波函数能以 4 个贝尔态(Bell States)作为基矢构造出来。通过量子干涉(Quantum Interference)方法测量贝尔

态,确定光子-光子的纠缠状态,使量子状态(总波函数)坍缩,确定离子-离子纠缠状态,实现测量过

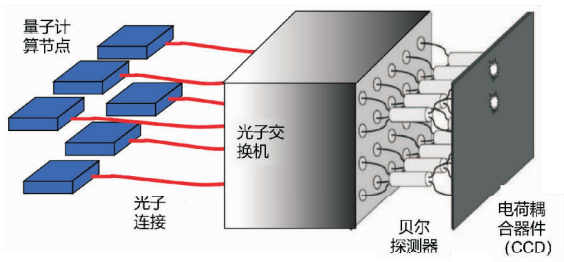


图 2 离子-光子型量子网络示意图^[39]

Fig. 2 Ion-photon Quantum Network Schematic^[39]程并提取相关信息。

图 3 展示了构成离子-光子型量子网络的基本单元,它是用 50/50 光束分束器(Beamsplitter)实现的一种量子干涉方法。基于囚禁离子和自发辐射光子这两种量子比特来构建分布式大规模量子信息处理器具有光明的前景。物质量子比特和光子量子比特是分布式量子计算的基本物理单元^[24,25]。前者存在于许多物理系统中,比如离子阱、冷原子/原子蒸气、金刚石氮空位、量子点等等。其中离子阱系统依靠离子之间的库伦相互作用,可以实现几个甚至几十个离子之间的量子态纠缠。考虑到离子阱系统具有存储寿命长、相干时间长的特点,离子阱量子计算机非常适合用于分布式量子计算,并进一步作为量子网络的中继

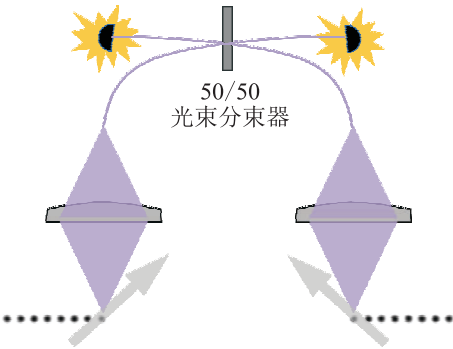


图 3 构成离子-光子型量子网络的基本单元示意图^[28]

Fig. 3 Basic Unit of Ion-photon Quantum Network^[28]

节点,相当于经典网络的服务器,具有数据处理、计算、路由、交换等功能^[26]。另一方面,光子量子比特目前已经用于量子密钥分发、量子通信、量子密码学等领域。光子以光纤网络为媒介,非常适合远距离传输,实现“光子互联”,缺点是难以固定地、长时间地存储^[27]。结合这两种量子比特的优劣,以离子阱量子计算机作为节点,通过光子互联,构建离子-光子型的量子网络势在必行。

2.2 分布式量子计算机技术现状

分布式量子计算是量子计算和分布式计算的有机统一。在这种计算模式下,可设计出一系列新颖的分布式量子算法,比经典分布式计算更具优势,可以将一个需要大量量子比特进行处理的问题分解成多个只需要少量量子比特来计算的问题,然后用多台量子计算机分布式地并行计算,未来许多量子计算的应用可能都会基于分布式计算的计算模式。1999 年, J. I. Cirac 等^[29]从计算过程中产生噪声或者信道中包含噪声的角度给出了一种分布式量子计算的优势;2013 年, R. Beals 等^[30]提出并行寻址量子内存的算法为分布式量子计算提供了一定基础;2016 年, S. Bravyi 等^[31]证明通过分布式量子计算和一定的经典复杂性处理可以实现 n 个量子位的量子电路模拟 $n + k$ 个量子位的量子电路;2017 年, K. Li 等^[32]提出了一种分布式量子相位算法来估计相位,其时间复杂性比通常的量子相位估计有指数级提高;2020 年, T. Peng 等^[33]通过分布式量子计算给出了一种在小规模量子计算机上模拟大规模量子电路的方法;2021 年, J. Avron 等^[34]将量子算法中的 Oracle 分解成多个子 Oracle 从而实现分布式量子计算,达到降低单个量子处理器规模和量子电路深度的目的。分布式量子计算机的研究从保真度和可扩展性两大方面展开。在保真度方面,研究

者已经在多个物理系统中成功产生了两个邻近节点之间的纠缠,通过原理性实验证明了节点之间量子信息传输的可行性,如 2 个囚禁离子系统之间、2 个中性原子系统之间或者 2 个 NV 色心系统之间,但保真度基本处于 70% ~ 90% 范围。虽然可以确定地传送一个量子态,但由于单个光子的收集和探测效率有限,节点之间的远程纠缠产生是预报性的。为了实现分布式量子计算,远程纠缠的产生速率应尽可能快于任一节点该物理系统的退相干时间或远程的离子-离子纠缠态退相干时间。为了在容错水平上运行一个可扩展的量子网络,即使有完美的节点内量子逻辑门,资源需求也取决于远程纠缠的平均产生时间和相干时间之比。只有该比值小于 1,图 3 的基本单元才能在系统退相干之前执行完一个逻辑门操作。2015 年, D. Hucul 等^[35]首次在基于图 3 的实验平台上实现了小于 1 的比值。远程纠缠的产生速率除了和物理系统的内在属性有关,还和离子-光子型量子网络的传输效率或传输损耗有紧密联系。总传输效率取决于光学系统收集离子发射的光子的效率和包括光纤耦合在内的整个光学系统的传输效率的乘积^[36]。目前,奥地利 Innsbruck 大学已经实现了相距 50 公里的离子-光子纠缠,保真度超过 90%,而离子-离子纠缠只能在几米距离内产生,速率是每秒 182 个,保真度可达 94%。

在光子收集效率方面,目前有两种增强型光收集方式:用高数值孔径 (Numerical Aperture, NA) 的物镜收集和基于光腔的增强型光收集。2009 年,美国马里兰大学首次检验图 3 这种基本单元之时,自由空间的单原子显微物镜的 NA 只有 0.23^[20];到 2014 年,精心设计物镜的 NA 提升至 0.6,可以收集 10% 的自发辐射光子^[30];2021 年,中山大学罗乐团队创造性地设计了一种抛物

面阱,自发辐射光子的收集效率达到 54%,预计使用这种阱的离子-离子纠缠的产生速率将比使用 10% 收集方式的产生速率提高 29 倍^[37]。另一种方式是将离子阱与光腔集成并利用帕塞尔(Purcell)效应实现增强型光收集。2012 年,J. D. Sterk、罗乐等^[38,39]利用光腔方法将单离子自发辐射发光的收集效率提升至 24%,是其离子阱系统物镜收集效率的 600 倍。

离子发射的光频率一般在紫外波段。为了适应远距离的光纤传输,需要使用非线性频率转换的方法将紫外光转换至通信频段,这一物理实现被称为量子接口(Quantum Interface)^[40]。2016 年,中科大郭光灿课题组设计出了一套基于光腔和非线性光学原理的通用型量子接口,保真度为 89.6%,兼容离子阱量子计算系统和固态量子计算体系^[41]。为了避免本地节点的量子通信接口和其用于存储量子信息的离子产生串扰(Crosstalk),有人提出用不同种类的离子分别作为接口和存储功能的方案,并实验验证了可行性,这种方案具有更高的可靠性和存储能力。

在可扩展性方面,最早的离子阱使用四杆阱、环形阱等结构,随后出现了刀片阱、针阱。这些势阱的尺寸比较大,结构不利于扩展和集成以组建大规模的量子网络。随着传统的硅基微纳加工技术日臻成熟,人们开发出了芯片阱(又称表面阱)^[42,43]。美国桑蒂亚国家实验室、佐治亚理工学院针对可扩展的量子信息处理器,研制出一套芯片阱微加工技术^[44],制造出了接近即插即用的理想芯片阱,演示了离子链稳定地囚禁和传输以及单量子比特门操作。这种芯片阱可以集成高数值孔径的微透镜,提高了离子发射的荧光的收集效率。

2.3 分布式量子计算机发展趋势

未来的分布式量子计算将通过量子网络的形

式实现。目前的量子密钥分发所传递的不是量子比特,而是巧妙构建成的一次性量子随机数,即量子密钥。而未来的量子通信更重要的是传输处于叠加态纠缠态的量子比特信息^[45]。这些信息将由节点上的量子计算机产生,通过量子信道中的飞行比特与远处另一台量子计算机的飞行比特完全连接纠缠,把两台远程量子计算机纠缠在一起。随着节点数的增加,越来越多的量子计算机加入网络,便可以将整个量子网络视作一台超大、有超多量子比特位数的量子计算机。这样一来,网络的任意一个节点都可以连接输入和探测终端,每个节点都可以利用整个网络所有量子计算机来运行量子算法,并在终端读出结果。

利用光子携带量子比特信息的想法为量子网络的构想奠定了基础。未来由分布式量子计算机构建的量子网络除了信息会是以量子比特的形式传递,其信息也需要通过量子计算机来处理。对于经典网络,所有的信息处理设备,包括中继器、交换机等等都是利用经典计算机芯片来实现信息处理的。类似地,未来量子网络也需要对应的量子中继器、量子交换机。这些特殊量子设备的实现也需要小型量子计算机作为基础,因此量子计算机地实现是发展量子网络的必要工作。

如果要实现基于分布式量子计算机的量子网络,还需要具备以下关键技术。首先是具有一定算力的通用量子计算机,以保障量子节点的高效运转;其次是基于量子态的长时间量子存储,即,在进行网络协同运算前需要把各个节点量子计算机中的量子比特进行纠缠,从纠缠开始直到最后读取结果,整个过程中不能发生量子退相干;最后还需要一些类似于经典网络协议的量子网络通信协议,用以保障节点能正确地联系在一起。

2.4 基于离子阱的量子互联网

量子网络利用量子力学奇特的物理性质,在

量子计算、量子通信以及量子传感等领域带来了新的机遇和挑战,由众多能够产生量子相干和纠缠的节点和通道组成。实现量子网络首先要实现量子互联,即把量子态以可逆方式从一个物理系统转变到另一个物理系统。未来的离子阱量子计算机即是该量子互联网中的节点,用于实现对量子信息的存储以及处理。量子链接可以通过单个光子和离子的相互作用,实现节点之间的量子隐形传态(Quantum Teleportation)^[46]。另外,单个离子阱中,随着比特数的增加,比特间的串扰问题也会变得严重,且量子门操作的时间会增加。这极大限制了单个离子阱量子计算机的比特数,其成本以及制造难度也会升级。但是通过光子实现不同量子计算机之间的纠缠,原则上可以无限扩展量子比特位数,将分布的离子阱量子计算机扩展成量子计算机群^[47]。目前全球主要国家/地区都在参与构造第一代实用化的量子互联网的竞争,2020 年,美国发布了量子互联网白皮书^[48],欧洲也在对大规模的量子互联网技术进行积极的研发。

3 离子阱量子计算机产业现状与趋势

3.1 核心专利分布

全球各国在量子计算、量子计算机领域相互竞争,都希望在专利布局上能抢占先机。公司和科研机构纷纷入场。本文以((trapped ion) OR TACD _ ALL: (trapped ion)) AND ((quantum computing) OR TACD _ ALL: (quantum computing))为检索式,在智慧牙全球专利数据库进行检索。检索时段确定为 1980—2021 年。本次检索日期为 2021 年 11 月 15 日,得到相关专利共计约 7100 条,经过人工清洗,最终得到 6175 条专利。由图 4 可知,近年来全球离子阱量子计算机相关的专利申请量呈波动上升趋势。

从主要的专利申请国家/地区/组织来看,美国占有优势,我国排在第四(图 5)。这是由于美国在离子阱技术方面的研究起步较早,日本也紧跟其后,开展了大量研究。美国主要以高校、科技企业、科研机构合作研究为主。我国专利则更多来自高校和科研机构,相关研究工作和知识产权

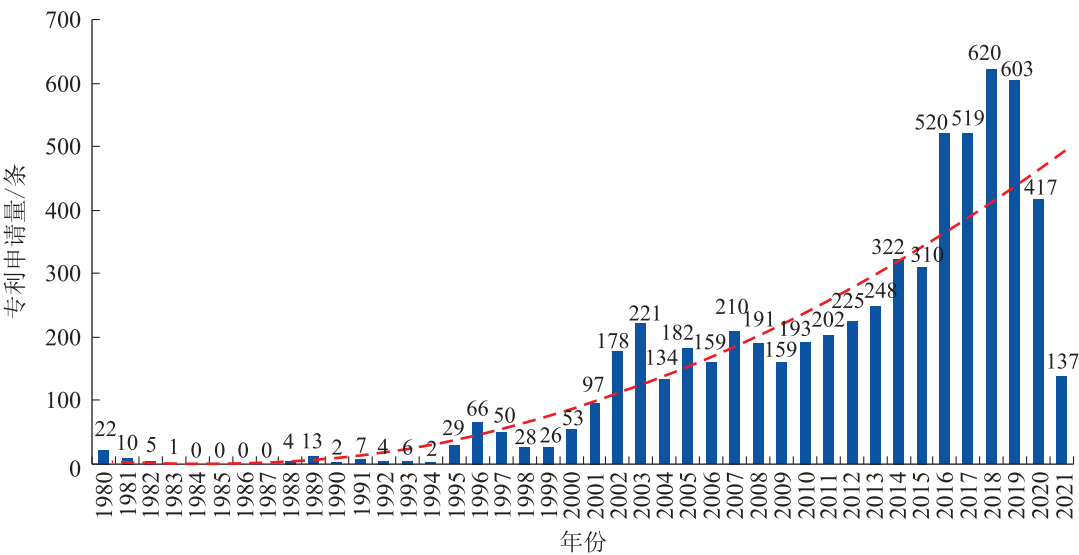


图 4 全球离子阱量子计算专利申请趋势(1980—2021)

Fig. 4 Global Trends in Ion Trap Quantum Computing Patents (1980-2021)

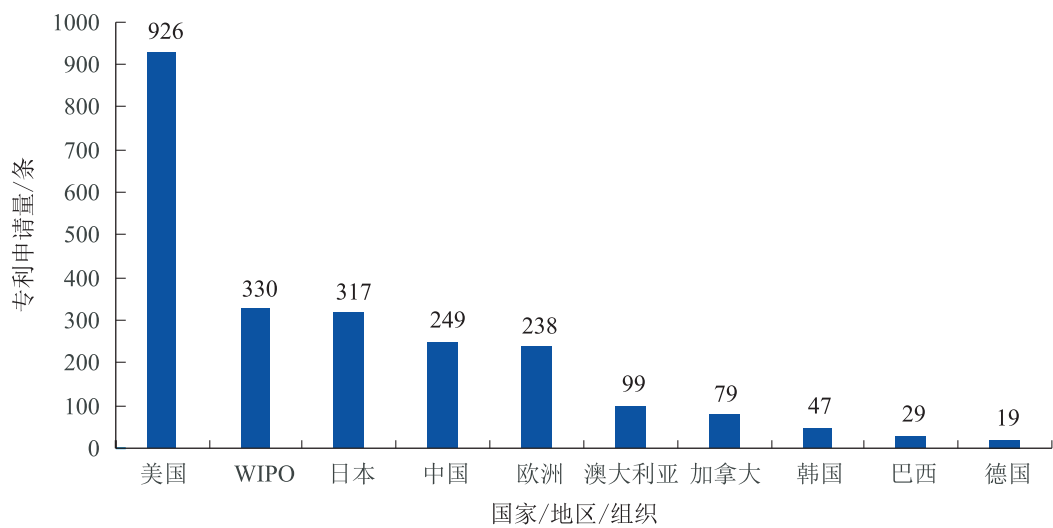


图 5 离子阱量子计算主要国家/地区/组织专利申请量

布局还处于初级阶段。从专利数量较多的公司或机构来看,排名靠前的有英特尔、联信、谷歌、宽腾矽、IonQ、霍尼韦尔、微软等,这些公司或机构的专利申请总量约占总申请量的 30%。

表 1 主要离子阱量子计算机企业研发情况

Tab. 1 Research and Development of Major Ion Trap Quantum Computer Enterprises

3.2 科研机构与企业

从量子计算的物理实现要求和当今技术发展来看,目前主流技术路线是以超导电路和离子阱技术搭建的量子计算机系统,另外还有约 8 种技术路线。离子阱技术方面,国内外主要研发机构有桑蒂亚实验室、美国国家标准技术研究院、麻省理工学院、清华大学、中山大学、中科大、国防科大等。企业也正在成为离子阱技术研发的主力,主要有美国的 IonQ 和 Honeywell HQS (Honeywell Quantum solution)、奥地利的 AQT (Alpine Quantum Technologies)、法国的 Atos 以及中国的启科量子(表 1)。

2018 年 12 月,IonQ 实现 79 位处理量子比特和 160 位存储量子比特^[50];2020 年 6 月,霍尼韦尔推出了 64 量子体积的量子计算机^[51];2020 年 8 月,启科量子正式启动“天算 1 号”离子阱量子计算机项目,预计 2023 年实现分布式的百比特量

序号	名称	国别	成立年份	主要进展
1	IonQ	美国	2016	2018 年 12 月,成功建造两台基于离子阱的量子计算机 ^[50]
2	Honeywell HQS	美国	2014	2020 年 9 月,发布 128 量子体积量子计算机 ^[51]
3	AQT	奥地利	2018	2021 年 6 月,推出具有产品成熟度的离子阱量子计算机演示机器 ^[52]
4	Atos 量子	法国	2016	2018 年 7 月,成功开发量子学习机器,并向多个国家成功售卖 ^[53]
5	启科量子	中国	2019	5 比特分布式量子计算机的工程化开发 ^[16]

子计算机(量子体积达到亿级),并在此基础上进一步研发分布式千比特量子计算机^[16]。未来,将有越来越多的企业加入离子阱技术路线,量子科技企业不仅会花巨资用于量子计算机的底层物理研究,还需要更多的研发人员进行硬件和软件开发,以支持未来量子互联网的建设。

3.3 融资情况

随着离子阱技术突破与工程化的成熟,越来越多的投资者参与在这场颠覆性科技赛道中,使得量子计算逐渐进入公众视野。但是离子阱技术门槛高,研发资金需求大。目前全球主要离子阱技术公司的资金情况如下:

1) IonQ: IonQ 是量子计算领域的领导者,是全球首家上市的量子计算初创公司,其上市的交易总额为 6.5 亿美元,其中包括主要机构投资者参与的 3.5 亿美元的私募股权投资^[54]。

2) 霍尼韦尔: 霍尼韦尔是一家营业额达 300 多亿美元的高科技制造企业。2021 年 12 月,由霍尼韦尔量子解决方案公司(HQS)和剑桥量子公司(CQC)合并成立 Quantinuum 公司^[55], HQS 基于离子阱技术打造了最高性能量子硬件,CQC 是软件、网络安全和帮助优化量子计算硬件的算法领域的全球领导者。

3) Alpine Quantum Technologies: AQT 是由因斯布鲁克大学和奥地利科学院的三位物理学家最近共同创立的。2019 年 8 月,AQT 从奥地利科研促进署和因斯布鲁克大学融资 1000 万欧元^[56]。

4) 启科量子: 启科量子正式成立于 2019 年,总部位于北京。在量子计算、量子通信领域均拥有自主核心技术与产品开发能力,公司致力于发展基于离子阱的千比特分布式量子计算机。2021 年 1 月,启科量子进行了天使轮融资,融资金额 5000 万元人民币,投资机构包括中关村发展前沿基金和中关村金种子基金^[57]。

据光子盒在 2021 年 11 月 17 日的报道,纽交所上市的量子计算公司 IonQ 市值突破 50 亿美元^[58]。据不完全统计,目前全球有 16 家上市公司从事量子计算研究。这 16 家上市公司分别是

亚马逊、Archer Materials、霍尼韦尔、IBM、Intel、微软、阿里巴巴、Atos Quantum Lab、百度、谷歌、SHI Cryogenics、腾讯、Quantum Computing Incorporated、IonQ、鸿海以及国盾量子。

3.4 市场与生态

虽然近年来许多公司投入量子计算这个前沿领域,但目前量子计算技术仍处于起步阶段,成熟的商业化产品还非常少。当然,随着全球对量子计算领域在技术和资金上的不断投入,量子计算突破现阶段的重点难点,实现成熟化的量子计算产业链只是时间问题。

据估计,2025 年全球量子计算产业规模将达到 27.5 亿美元。随着技术水平不断的提升和应用场景不断的丰富,预计市场规模将 30% 左右的增速持续上涨,到 2030 年达到 156.7 亿美元。未来,如果量子纠错等关键核心技术得到突破,市场规模将实现爆发性增长,为用户释放更大的价值,2035 年,预计有可能达到 538.3 亿美元^[59]。

随着量子技术的发展,量子计算在量子模拟、量子优化、人工智能等方面已经让投资者看到未来的曙光。2019 年 9 月,华为公司发布的量子化学应用云服务 HiQ 2.0 模拟器^[60],已成功模拟乙烯(C₂H₄)、氨气(NH₃)、甲硅烷(SiH₄)等分子基态能量。2019 年 10 月,福特汽车与微软进行合作^[61],模拟多达 5000 辆车在繁忙路段行驶的场景,当每个车辆可使用 10 种不同的路线选择时,微软量子算法给出所有车辆同时请求穿越大城市繁忙路段的最快路线推荐,使整体拥堵减少了 73%。2020 年 9 月,谷歌宣布与滑铁卢大学、大众汽车公司联合推出 Tensor-Flow Quantum^[62],可将量子计算与机器学习结合在一起,训练量子模型。

随着量子计算产业的发展,上下游公司的发

展势头也不可小觑。与离子阱量子计算最相关的产业包括光电子器件与软件编程。在广东省光电子器件企业就有上万家,发展离子阱量子计算硬件的产业链完善。离子阱量子计算机需要对量子计算软件进行全栈开发,从量子底层模拟、集成开发环境 IDE、量子算法、量子操作系统等多方面入手,这为众多软件企业提供了量子软件全栈开发服务的市场。

4 启示与建议

由企业主导的离子阱量子计算机全栈式开发热潮正在兴起,中国急需在该领域拥有自主核心技术和综合产品研发能力。分布式离子阱量子计算机体现了量子通信与量子计算融合发展的思路,是目前国际量子科技竞争的重要前沿领域。国内离子阱量子计算的产学研单位,急需着眼长远,聚焦聚力,加快推进科学研究,促进技术迭代更新。为此,本文提出以下建议:一要抓紧量子计算发展的窗口期,吸纳海外高端优秀人才,把国内高端优秀人才用起来,并给予有力的政策支持。二要加快离子阱量子计算机研制进度,尽快实现工程化。美国已经布局离子阱量子计算机,并不断迭代优化,正在向千比特进军。中国作为科技创新强国,若在量子计算机的研究发展上抓紧布局,未来在与西方国家的量子计算科技竞争中将有更多话语权。国内部分科研和企业已具有良好的产业基础,需集中精力,加快基础器件及整机研制步伐,力争 2025 年完成千比特离子阱量子计算机工程样机研制。三要进一步加强企业、与高校等科研院所间的深度合作,推动研究成果进行快速的产业转化。高校等科研院所具有较强的科学研究能力,而企业具有先进的工程技术和产业化优势。通过两者的深度

合作,产学研共建,可实现优势互补。四要把离子阱量子计算机与光电产业进行统筹规划,部分器件研发实现专题对接。离子阱量子计算机要立足于国内光电产业和信创产业,进行自主发展。五要推动创新人才培养机制,实施企业-大学联合人才培养策略,设立新型研发机构与协同创新平台。

参考文献

- [1] SHOR P W. Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring [C]. In Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science , IEEE, 1994: 124-134.
- [2] GROVER L K. A Fast Quantum Mechanical Algorithm for Database Search[C]. In Proceedings of the Twenty-eighth Annual ACM Symposium on Theory of Computing, 1996: 212-219.
- [3] SCHMIDT-KALER F, HAFFNER H, RIEBE M, et al. Realization of the Cirac - Zoller Controlled-NOT Quantum Gate [J]. Nature, 2003, 422 (6930): 408-410.
- [4] AMINI J, DENISON D, DORET S C, et al. Plug-and-play Planar Ion Traps for Scalable Quantum Computation and Simulation[C]. APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics Meeting Abstracts. 2011, 42: OPE. 11.
- [5] COLIN D B, JOHN C, ROBERT M C, et al. Trapped-ion Quantum Computing: Progress and Challenges [J]. Applied Physics Reviews 2019, (6), 021314 .
- [6] CIRAC J I, ZOLLER P. Quantum Computations with Cold Trapped Ions [J]. Physical Review Letters, 1995, 74 (20): 4091.

- [7] CIRAC J I, Zoller P, KIMBLE H J, et al. Quantum State Transfer and Entanglement Distribution among Distant Nodes in a Quantum Network[J]. Physical Review Letters, 1997, 78(16): 3221.
- [8] MONROE C, MEEKHOF D, KING B, et al. Demonstration of a Fundamental Quantum Logic Gate[J]. Physical Review Letters, 1995, 75(25): 4714.
- [9] SØRENSEN A, MØLMER, K. Multi-particle Entanglement of Hot Trapped Ions [J]. Physical Review Letters. 1999, 82(9): 1835.
- [10] WRIGHT K, BECK K. M, et al. Benchmarking an 11-qubit Quantum Computer [J]. Nature Communications. 2019, 29(10): 5464.
- [11] DAVID P D. The Physical Implementation of Quantum Computation [J]. Fortschritte Der Physik, 2000, 48(9-11): 771-783.
- [12] AMINI J M, UYS H, WESENBERG J H, et al. Toward Scalable Ion Traps for Quantum Information Processing [J]. New Journal of Physics, 2010, 12(3): 033031.
- [13] MERRILL J T, VOLIN C, LANDGREN D, et al. Demonstration of Integrated Microscale Optics in Surface-electrode Ion Traps [J]. New Journal of Physics, 2011, 13(10): 103005.
- [14] IonQ. IonQ Harnesses Single-atom Qubits to Build the World's Most Powerful Quantum Computer [EB/OL]. (2018-12-11). <https://ionq.com/news/december-11-2018#appendix>.
- [15] Honeywell. Our First-generation Ion Traps Emerge [EB/OL]. (2018-11-17). <https://www.honeywell.com/us/en/news/2018/11/our-first-generation-ion-traps-emerge>.
- [16] 启科量子. 分布式离子阱量子计算机 AbarQ-1 工程机 [EB/OL]. (2021-07-09). <https://mp.weixin.qq.com/s/VcRDNIy0bzGIAxi2-VfGNQ>
- [17] HUCUL D, INLEK I V, VITTORINI G, et al. Modular Entanglement of Atomic Qubits using Photons and Phonons [J]. Nature Physics, 2015, 11(1): 37-42.
- [18] WINFRIED K, HENSINGER. Quantum Computer Based on Shuttling Trapped Ions [J]. Nature, 2021, 592: 190-191.
- [19] INLEK I V, CROCKER C, LICHTMAN M, et al. Multispecies Trapped-ion Node for Quantum Networking [J]. Physical Review Letters, 2017, 118(25): 250502.
- [20] IonQ. Scaling IonQ's Quantum Computers: The Roadmap [EB/OL]. (2020-12-09). <https://ionq.com/posts/December-09-2020-scaling-quantum-computer-roadmap>.
- [21] U. S. Department of Energy. U. S. Department of Energy Unveils Blueprint for the Quantum Internet at 'Launch to the Future: Quantum Internet' Event [EB/OL]. (2020-07-23). <https://www.energy.gov/articles/us-department-energy-unveils-blueprint-quantum-internet-launch-future-quantum-internet>.
- [22] WEHNER S, ELKOUSS D, HANSON R. Quantum Internet: A Vision for the Road Ahead [J]. Science, 2018, 362: 303.
- [23] DUAN L M, MONROE C. Quantum Networks with Trapped Ions [J]. REVIEWS OF MODERN PHYSICS, Vol. 8, 2010: 1220-1222.
- [24] BARRETT M D, CHIAVERINI J, SCHAEZT T, et al. Deterministic Quantum Teleportation of Atomic Qubits [J]. Nature, 2004, 429(6993): 737-739.
- [25] OLMSCHENK S, MATSUKEVICH D N, MAUNZ

- P, et al. Quantum Teleportation Between Distant Matter Qubits [J]. Science, 2009, 323 (5913) : 486-489.
- [26] NÖLLEKE C, NEUZNER A, REISERER A, et al. Efficient Teleportation Between Remote Single-atom Quantum Memories [J]. Physical Review Letters, 2013, 110(14) :140403.
- [27] MAUNZ P, OLMSCHENK S, HAYES D, et al. Heralded Quantum Gate Between Remote Quantum Memories[J]. Physical Review Letters, 2009, 102(25) :250502.
- [28] KENNETH R B, JUNGSANG K, MONROE C. Co-designing a Scalable Quantum Computer with Trapped Atomic Ions [J]. npj Quantum Information, 2016, 2, 16034.
- [29] CIRAC J I, EKERT A K, HUELGA S F, et al. Distributed Quantum Computation over Noisy Channels[J]. Physical. Review. Applied, 1999, 59:4249.
- [30] BEALS R, BRIERLEY S, GRAY O, et al. Efficient Distributed Quantum Computing [J]. Proceeding of Royal Society A, 2013, 469: 20120686.
- [31] BRAVYI S, SMITH G, SMOLIN J A. Trading Classical and Quantum Computational Resources [J]. Physical. Review. X, 2016, 6:021043.
- [32] LI K, QIU D W, LI L, et al. Application of Distributed Semi-quantum Computing Model in Phase Estimation [J]. Information Processing Letters, 2017, 120:23-29.
- [33] PENG T, HARROW A. W, OZOLS M, et al. Simulating Large Quantum Circuits on a Small Quantum Computer[J]. Physical Review Letters, 2020, 125 :150504.
- [34] AVRON J, CASPER O, ROZEN I. Quantum Advantage and Noise Reduction in Distribute Quantum Computing [J]. Physical. Review. Applied, 2021, 104 :052404.
- [35] HUCUL D, INLEK I V, VITTORINI G, et al. Modular Rntanglement of Atomic Qubits Using Photons and Phonons[J]. Nature Physics, 2015, 11(1) :37-42.
- [36] FURUSAWA A, SØRENSEN J L, BRAUNSTEIN S L, et al. Unconditional Quantum Teleportation [J]. science, 1998, 282(5389) :706-709.
- [37] WANG Z, WANG B R, MA Q L, et al. Design of a Novel Monolithic Parabolic-mirror Ion-Trap to Precisely Align the RF Null Point with the Optical Focus [Preprint]. arXiv preprint arXiv: 2004.08845, 2020.
- [38] STERK J D, LUO L, Manning T A, et al. Photon Collection from a Trapped Ion-cavity System[J]. Physical Review Applied, 2012, 85(6) :062308.
- [39] LUO L, HAYES D, MANNING T A, et al. Protocols and Techniques for a Scalable Atom – Photon Quantum Network [J]. Fortschritte der Physik, 2009, 57(11-12) :1133-1152.
- [40] WANG J, HUANG Y F, ZHANG C, et al. Universal Photonic Quantum Interface for a Quantum Network[J]. Physical Review Applied, 2018, 10(5) :054036.
- [41] ZHOU Z Y, LI Y, DING D S, et al. Orbital Angular Momentum Photonic Quantum Interface [J]. Light: Science & Applications, 2016, 5(1) : 16019.
- [42] MONROE C, KIM J. Scaling the Ion Trap Quantum Processor [J]. Science, 2013, 339 (6124) :1164-1169.

- [43] MERRILL J T, VOLIN C, LANDGREN D, et al. Demonstration of Integrated Microscale Optics in Surface-electrode Ion Traps [J]. New Journal of Physics, 2011, 13(10): 103005.
- [44] MOEHRING D L, HIGHSTRETE C, STICK D, et al. Design, Fabrication and Experimental Demonstration of Junction Surface Ion Traps [J]. New Journal of Physics, 2011: 075018.
- [45] KRUTYANSKIY V, MERANER M, SCHUPP J, et al. Light-matter Entanglement Over 50 km of Optical Fibre [J]. npj Quantum Information, 2019, 5(1): 1-5.
- [46] WAN Y, KIENZLER D, ERICKSON S, et al. Quantum Gate Teleportation Between Separated Qubits in a Trapped-ion Processor [Preprint]. arXiv preprint arXiv:1902.02891v2, 2019.
- [47] QIA. QIA establishes the first entanglement-based quantum network. [EB/OL]. (2021-04-15). <https://quantum-internet.team/2021/04/15/qia-establishes-the-first-entanglement-based-quantum-network/>
- [48] U. S. Department of Energy. U. S. Department of Energy Unveils Blueprint for the Quantum Internet at ‘Launch to the Future: Quantum Internet’ Event [EB/OL]. (2020-07-23). <https://www.energy.gov/articles/us-department-energy-unveils-blueprint-quantum-internet-launch-future-quantum-internet>.
- [49] The Nobel Prize. The Nobel Prize in Physics 1989: The Traps of Paul and Dehmelt [EB/OL]. (1989-10-12). <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1989/9747-the-traps-of-paul-and-dehmelt/>.
- [50] IonQ. IonQ Breaks Records for Quantum Computing Performance [EB/OL]. (2018-12-11). <https://ionq.com/news/december-11-2018>.
- [51] Honeywell. Achieving Quantum Volume 128 on the Honeywell Quantum Computer [EB/OL]. (2020-09). <https://www.honeywell.com/us/en/news/2020/09/achieving-quantum-volume-128-on-the-honeywell-quantum-computer>.
- [52] AQT. New Publication: “The Smallest Quantum Computer Yet” [EB/OL]. (2021-06). <https://www.aqt.eu/smallest-qc/>.
- [53] Atos. Atos announces its new quantum simulator [EB/OL]. (2018-07-03). https://atos.net/en/2018/press-release_2018_07_03/atos-announces-new-quantum-simulator.
- [54] IonQ. IonQ Becomes First Publicly Traded, Pure-Play Quantum Computing Company; Closes Business Combination with dMY Technology Group III. [EB/OL]. (2021-10-01). <https://ionq.com/news/october-01-2021-ionq-listed-on-nyse>.
- [55] Honeywell. Things to Know about Quantinuum [EB/OL]. (2021-11). <https://www.honeywell.com/us/en/news/2021/11/things-to-know-about-quantinuum>.
- [56] AQT. NEW INVESTORS TO SUPPORT AQT [EB/OL]. (2019-8). <https://www.aqt.eu/new-investors/>.
- [57] 中国网. 启科量子获 5000 万元天使轮融资 将建立结合量子计算和通信的量子网络 [EB/OL]. (2021-1-19). http://science.china.com.cn/2021-01/19/content_41433456.htm.
- [58] IonQ. IonQ 公布上市后首份财报, 市值已突破 50 亿美元 [EB/OL] (2021-11-17) <https://www.globesci.com>

mp.weixin.qq.com/s/11Ayzs5aDU7r1z-wQcK2pw.

[59] 网易. 2021 量子创新指数及全球量子产业前瞻报告 [EB/OL]. (2021-12-14). https://www.163.com/dy/article/GR4STP5505148U1A_pdy11y.html.

[60] 华为. 华为 HiQ 2.0 新特性与应用 [EB/OL]. (2019-09-22). <https://e.huawei.com/cn/material/event/HC/9c3834a304de4238be12a90aadc68a6c>.

[61] Ford. MASS NAVIGATION: HOW FORD IS EXPLORING THE QUANTUM WORLD WITH MICROSOFT TO HELP REDUCE CONGESTION [EB/OL]. (2019-12-10). <https://media.ford.com/content/fordmedia/fna/us/en/news/2019/12/10/ford-exploring-quantum-world-with-microsoft.html>.

[62] Waterloo of University. New Software Combines Quantum and Classical Machine Learning [EB/OL]. (2020-03-09). <https://uwaterloo.ca/news/news/new-software-combines-quantum-and-classical-machine-learning>.

作者贡献说明

饶欣欣:撰写第 1 章;
李卓瑛:撰写第 2.1 小节;
宋 潇:撰写第 2.2 小节;
朱 峰:撰写第 2.3 小节;
刘海燕:撰写第 3.2 小节;

崔恩楠:协助撰写第 1 章;
高子鐔:协助撰写第 1 章及第 2.1 小节;
刘梦媛:撰写第 3.1 小节;
黄毛毛:撰写第 2.4 小节;
韩 琢:撰写第 3.3 及 3.4 小节;
邱道文:协助撰写第 2 章;
周卓俊:撰写第 4 章,总体内容修改;
罗 乐:撰写摘要、引言部分,总体内容修改。

作者简介



周卓俊:广东启科量子信息技术研究院有限公司副院长、量子计算科研合作与知识产权负责人;曾参与“十四五”全军共用信息系统装备预先研究项目“多点位量子传感电磁背景监测技术”、广东省科技厅粤港澳联合创新项目“量子锁相测量磁异常”、重庆市自然科学基金项目“离子阱量子计算模拟机”等,累计申请量子计算相关专利超 40 项。



罗 乐:中山大学物理与天文学院教授博导,中山大学深圳研究院量子信息技术中心主任,研究领域及成果包括:在物质的第六种物态“费米凝聚态”的实现、首个基于硅工艺的离子阱量子计算芯片、首个隐私保护的量子随机数等;发表五十多篇学术论文。