

量子计算产业化国内外发展态势分析*

汪晶晶** 杨宏 雷根 张弛

(中国电子技术标准化研究院,北京 100007)

摘要:随着量子计算技术理论研究的突破与发展,量子计算正在从实验室走向产业化。如何抓住量子计算产业化机遇,积极应对量子计算产业化进程中的挑战,成为当前我国亟待解决的重大科技问题。本文首先概述了国内外量子计算产业的发展现状,介绍了以量子芯片、基础软件、应用服务为主体的产业链雏形。其次分析了量子计算产业化发展趋势与面临的挑战,认为产业发展势头良好且潜力巨大,但尚存在商业模式不明朗、行业不规范等问题。最后针对我国量子计算产业的发展短板,提出了相关的建议与对策:1)加强国家统筹,为产业发展提供制度保障;2)借鉴国外先进经验,完善相关合作机制;3)充分关注行业经济,创建完整生态系统;4)加强核心器件和关键技术攻关;5)正确宣传教育,警惕产业泡沫的出现。

关键词:量子计算;技术路线;产业化;趋势;建议

DOI:10.16507/j.issn.1006-6055.2022.03.005

Analysis of Domestic and International Development Trend of Quantum Computing Industrialization*

WANG Jingjing** YANG Hong LEI Gen ZHANG Chi

(China Electronics Standardization Institute, Beijing 100007, China)

Abstract: With the breakthrough and development of quantum computing technology theory, quantum computing is moving from laboratory to industrialization. How to seize the opportunity of quantum computing industrialization and actively respond to the challenges in the process of quantum computing industrialization has become a major scientific and technological problem urgently to be solved in China. This paper first summarized the state-of-the-art quantum industry home and abroad, and introduced the prototype of the industrial chain which consists of quantum chip, basic software and application service. Secondly, the development trend and challenges of quantum computing industrialization were analyzed. The industry has a good momentum of development and is of great potential, but there are still problems such as unclear business pattern and industry irregularity. Finally, in view of the shortcomings of the development of China's quantum computing industry, relevant suggestions and countermeasures are put forward: 1) strengthen national overall planning to provide institutional guarantees for industrial development; 2) learn from advanced foreign experience and improve relevant cooperation mechanism; 3) fully focus on the industry economy and create a complete ecosystem; 4) strengthen research on core devices and key technologies; 5) correct publicity and education, and be vigilant the emergence of industrial bubbles.

Keywords: Quantum Computing; Technical Route; Industrialization; Trend; Recommendation

* 国家重点研发计划“先进计算等数字技术创新应用及安全保障前沿技术国际标准研究”(2021YFF0601802)

** E-mail: wangjj@cesi.cn; Tel: 010-64102793

量子计算是直接利用叠加和纠缠等量子力学现象对数据进行运算的一门科学,由 Yuri Manin 和 Richard Feynman 于 1982 年首次提出^[1],能够突破摩尔定律瓶颈,在特定测试案例上表现出超越经典计算机的计算能力。量子计算经历了由科研机构主导的基础理论探索和编码算法研究阶段,目前已进入由产业和学术界共同合作的工程实验验证和原理样机攻关阶段。IBM、谷歌、微软等科技巨头陆续开始布局量子计算产业发展^[2]。国内华为、阿里巴巴、百度、腾讯等企业也开始积极筹备,但还处于观望阶段。虽然各国对于量子计算的研究还不太成熟,但对小规模量子计算机的实用化研究已经初具雏形。随着量子计算技术的发展,未来将会产生一系列重要的商业应用,从而带来利润丰厚的市场机会,在国家科技竞争、产业创新升级、国防和经济建设等领域具有重要战略意义。

当前全球量子计算产业化发展迅速,各个国家/地区之间的竞争日趋激烈。美国于 2020 年 7 月推出《推进与中国进行管理战略竞争的政策》,采取联盟的方式与中国开展关于包括量子计算在内的新兴科技竞争^[3];欧盟委员会于 2018 年 10 月发起量子技术旗舰计划,计划投资 10 亿欧元,为建立世界级的欧洲量子产业奠定基础,确保欧洲在未来全球产业蓝图中的领导地位^[4];澳大利亚联邦科学与工业研究组织于 2020 年 5 月发布《量子技术路线图》,通过聚焦量子产业发展、建设量子基础设施以及加强国际合作,预计在 2040 年通过量子技术产业化为全球创造 860 亿美元的商业价值^[5];英国政府科学办公室于 2016 年 11 月发布《量子技术:时代机会》的报告,提出重视原子钟、量子成像、量子传感和测量、量子计算和模拟以及量子通信五大量子应用领域,以保证英

国的领先地位^[6]。习近平在中央政治局第二十四次集体学习时强调,要充分认识推动量子科技发展的重要性和紧迫性,深刻认识推进量子科技发展重大意义,加强量子科技发展战略谋划和系统布局^[7]。如何抓住量子计算产业化机遇,积极应对量子计算产业化进程中的挑战,成为当前我国亟需解决的问题。

在此背景下,本文重点综述了量子计算产业链发展现状和主要国家/地区量子计算产业情况,分析了国内外量子计算产业化发展态势,并提出了我国发展量子计算产业的建议。

1 量子计算产业概述

尽管量子计算技术仍处于初级研究阶段,但是量子计算产业发展势头较好,生态不断壮大,已出现了量子计算产业链雏形,如图 1 所示。上游主要为量子芯片,为量子计算机提供底层计算资源;中游为基础软件,主要面向开发人员,为量子计算和量子机器学习算法提供软件开发环境、量子编程框架和量子算法库;下游为应用服务,主要面向用户,根据特定的场景和应用需求,提供数据分析工具、材料设计等应用服务。

1.1 量子芯片

量子芯片是量子计算机的核心部件之一,目前其实现的技术路线主要有两种:电学路线和光学路线,如图 2 所示。电学路线也称固态器件路线,多用于产业界,主流企业多在超导和半导体方面进行研究;光学路线主要包括离子阱和光量子,多用于科研界;除此之外,也有少数企业专注于拓扑和中性原子等其他技术路线。代表性企业和研究机构如表 1 所示。

在多种技术路线中,超导量子电路可设计性强、易扩展,是现阶段量子芯片制备最成熟的技术

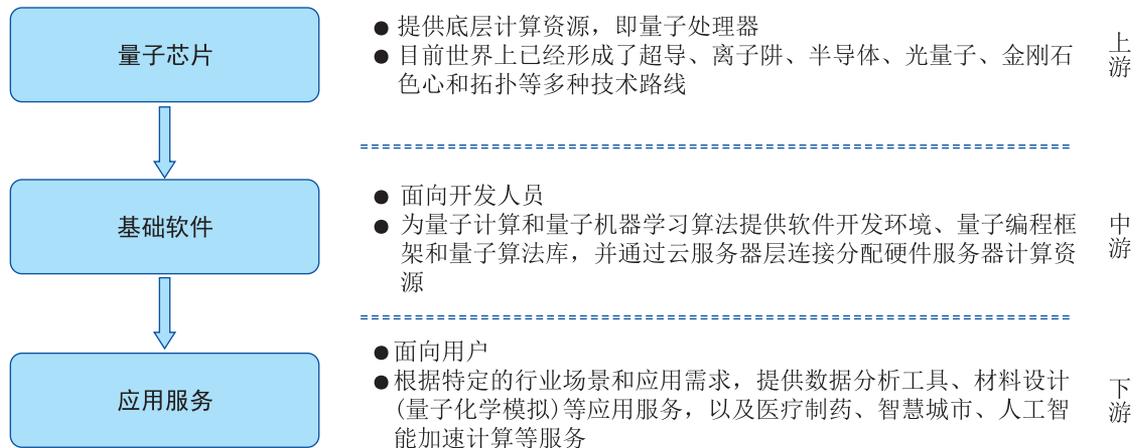


图 1 量子计算产业链

Fig. 1 Industrial Chain of Quantum Computing

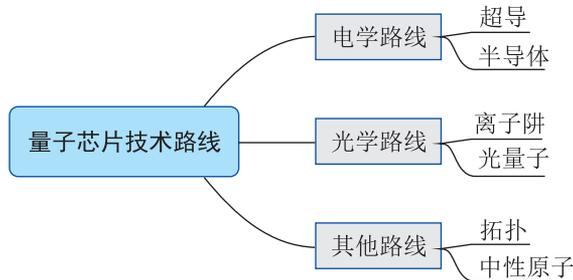


图 2 量子芯片技术路线

Fig. 2 Technical Routes of Quantum Computing

之一。半导体路线与超导路线相比保真度不足，但具有可容错和可拓展两大优势，并与现有半导体芯片工艺兼容，同样得到了较为广泛的关注。离子阱路线不需要超导、半导体系统的极低温环境，且量子比特品质高，但其体积大、可扩展性差。拓扑路线的控制精度较高、无需大规模纠错、抗干扰能力强，且相干时间可无限延长，与超导、半导、离子阱等技术路线相比，还处于初始发展阶段，但随着技术的突破将大幅度提高量子计算的效率。

在技术路线的选择上，谷歌、IBM、Rigetti 等公司主攻超导路线，代表成果为谷歌 2018 年发布的 72 比特量子处理器。英特尔和本源量子主攻超导路线，同时也注重半导体方向。在超导路线上，本源量子 24 比特超导量子芯片对标英特尔

2017—2018 年的水平，差距约为 3 年。在半导体路线上，本源量子 2 比特半导体计算机“悟本”对标英特尔 2018 年的水平，差距约为 2~3 年。霍尼韦尔、IonQ 主攻离子阱方向，代表成果为 IonQ 2020 年发布的 32 比特 QV400 离子阱量子计算机。微软专注于拓扑路线，尚处于研究阶段。目前超导和离子阱路线较为领先，多种技术路线尚未收敛，没有一种路线完全实现量子计算实用化。

在量子优越性方面，国际上谷歌于 2019 年通过超导路线研制完成量子计算原型机“悬铃木”并宣布实现量子优越性；一年后中国科学技术大学采用光学路线研制量子计算原型机“九章”并实现量子优越性，其速度比“悬铃木”快一百亿倍。谷歌主要利用“随机线路采样”这一特定任务实现了量子优越性，而中国科学技术大学利用 100 个高效单光子探测器进行高斯玻色采样，弥补了“悬铃木”依赖样本数量的技术漏洞。总体上看，我国已经具备了在量子优越性方面的科技实力和创新能力。

1.2 基础软件

1.2.1 量子云平台

量子云平台通过经典计算机模拟量子芯片，

表 1 量子芯片主要技术路径代表高校和研究机构

Tab. 1 Representative Universities and Research Institute in Main Technical Routes of Quantum Chips

技术路线	代表机构	相关进展		
电学路线	国外	谷歌	2019 年,研制完成量子计算原型机“悬铃木”(Sycamore),同年宣布实现量子优越性 ^[8]	
		IBM	2019—2021 年,依次研制出一台拥有 53、65、127 个量子比特的超导量子计算机	
		英特尔	2018 年初,推出 49Q 超导量子测试芯片“Tangle Lake”	
		NEC	计划于 2023 年实现“可伸缩超导量子退火机”的商业化	
		D-Wave	2020 年底,发布 5000 量子比特的商用计算平台	
	国内	本源量子	2020 年—2021 年,先后发布超导量子芯片夸父 KF C6-130(6 比特)、夸父 KF C24-100(24 比特)	
		中国科学技术大学	2021 年,先后研制出可编程超导量子计算原型机“祖冲之号”(62 比特)和“祖冲之二号”(66 比特)	
		南方科技大学	2021 年初,在超导量子线路系统中实现快速高保真度的两比特量子门操作	
		浙江大学	2021 年,研制出专用量子芯片“莫干 1 号”、通用量子芯片“天目 1 号”	
		英特尔	2019 年,推出量子低温晶圆探针测试工具,加速硅量子比特测试过程	
半导体	国外	SQC	2020 年,实现硅原子双量子比特 99.99% 的超高保真度 ^[9]	
		新南威尔士大学	2022 年,通过离子注入硅,在电子和两个磷原子组成的三量子比特系统上实现单量子比特 99.95% 和双量子比特 99.37% 的保真度 ^[10]	
	国内	日本理化研究所	2022 年,使用硅/硅锗合金量子点的双电子系统,实现单量子比特 99.84% 和双量子比特 99.51% 的保真度 ^[11]	
		代尔夫特理工大学	2022 年,实现单量子比特保 99.87%、双量子比特 99.65% 的保真度 ^[12]	
		本源量子	2021 年,推出二代硅基自旋二比特量子芯片玄微 XW S2-200	
光学路线	国外	霍尼韦尔	2020 年,推出量子体积为 128 的离子阱量子计算机	
		IonQ	2020 年,推出拥有 32 个“完美的”量子比特、量子体积预计超 400 万的量子计算机	
	国内	清华大学	2015 年,金奇奂课题组首次在离子阱系统中实现嵌入式量子模拟器	
		启科量子	2021 年开始研制百比特分布式离子阱量子计算机“天算 1 号”	
	国防科技大学	2021 年,实现 100 个离子的稳定“囚禁”,能实现离子在阱中的运输和等间距排列		
	光量子	国外	日本国立情报学研究所	2019 年,发布用光学器件构成的量子退火机 Coherent Ising Machine
PsiQuantum		2021 年开始计划研发 100 万比特的光量子计算机		
其他路线	拓扑	国外	微软	2020 年推出制作拓扑计算机的新材料,但尚未实现真正的拓扑计算机
		国内	-	-
	中性原子	国外	Pasqal	致力于研发基于中性原子技术的第一代 100 + 量子比特处理器
		国内	中国科学技术大学	2020 年开发了 71 个格点的超冷原子光晶格量子模拟器

在虚拟环境下进行量子算法演绎,能够在量子算法成熟后反向促进专用量子芯片的设计。量子计算云平台具有两个主要优势,一方面,用户可以在云端的量子处理器上运行自定义量子线路代码,不仅能够了解处理器的性能、技术瓶颈等特性,还能够为下一代处理器开发积累经验;另

一方面,通过经典计算机模拟量子芯片的工作原理和运行逻辑,可以率先进行量子算法和软件的开发、验证。

国外主要量子云平台主要包括 IBM 开发的 Q Experience^[14]、微软的 Azure Quantum^[15]和亚马逊的 Braket^[16]。其中,Q Experience 于 2016 年开

始为用户提供 5 量子位计算机进行算法或实验模拟; Azure Quantum 可与多种硬件配套使用; Braket 可在 D-Wave、IonQ 和 Rigetti 系统的量子处理器上运行算法。

国内量子云平台的代表企业主要有阿里巴巴、华为和本源量子等。阿里巴巴分别于 2018 年和 2020 年推出量子模拟器“太章”和“太章 2.0”^[17], 并与中科院联合发布了量子计算云平台, 提供 11 比特云接入超导量子计算服务; 2018 年, 华为发布了量子云平台“HiQ”^[18], 能够实现云上全振幅模拟 40 量子比特、单振幅模拟最大 144 量子比特; 本源量子自主研发的超导量子计算云平台^[19]于 2020 年正式上线, 该云平台基于本源量子自主研发的超导量子计算机悟源, 并搭载 6 比特超导量子处理器夸父 KF C6-130, 成为国内唯一一个向普通用户提供真实量子计算服务的量子云平台; 此外, 清华大学在核磁共振量子云平台方面进行了相关研究^[20]。

1.2.2 语言处理系统

语言处理系统包括量子编程语言和量子计算开发工具, 是开发人员和计算引擎之间的中介和桥梁, 能够将量子程序和电路编译成硬件控制方案, 用于结果分析和反馈等。量子编程语言通过发送指令并从量子计算机接收输出, 来达到与量子计算机交流的目的; 量子计算开发工具则为开发人员提供必要开发组件。

在量子编程语言方面, 国际上主要有微软的 Q# 和苏黎世联邦理工学院的 Silq, 国内主要有本源量子推出的面向过程、命令式的量子编程语言 QRunes。其中, Q# 是一种全栈量子编程语言, 仅用于描述量子芯片上发生的操作。而 Silq 比 Q# 更加简洁, 不再局限于硬件层面, 而是基于人的思维方式, 更易理解。国内的 QRunes 采用了量

子计算语言与经典计算语言相结合的方式, 其中与量子计算相关的部分用量子代码实现量子比特和量子逻辑门的操作, 而与结果展示等经典计算相关的过程则由经典语言实现。

在量子开发工具方面, 国际上的代表开发工具有 Rigetti 的 Forest、IBM 的 Qiskit、微软的量子开发工具包 (Quantum Development Kit, QDK)、Xanadu 的 Strawberry Fields 等。其中 Forest 包含用于量子计算的工具套件, 包括编程语言、开发工具和示例算法, 是世界上第一个用于量子/经典计算的全栈编程和执行环境。国内企业本源量子于 2018 年研发了量子软件开发套件 QPanda, 可以实现量子软件的编写、测试等一系列操作。中国科学院软件研究所 2019 年发布了量子程序设计平台 isQ, 该平台包括量子程序设计、编译、模拟、分析与验证等系列工具, 已上线的功能主要包括编译器、模拟器、模型检测工具、定理证明器四部分。

1.2.3 量子操作系统

量子计算机通过操作系统将相同的量子软件在不同类型的量子计算硬件上运行, 大大简化了量子计算机的使用, 现阶段国内外都有已实现的量子操作系统。国外方面, 量子操作系统主要有英国量子软件公司 Riverlane 2020 年推出的 Deltaflow OS 和奥地利公司 Parity QC 推出的 Parity OS。其中 Deltaflow OS 是世界上首款用于量子计算机的高性能通用量子计算操作系统, 能够实现软件和硬件交互, 使量子计算机的性能提高多个数量级。国内方面, 本源量子于 2021 年 2 月发布了中国首款国产量子操作系统“本源司南”, 具有量子资源系统化管理、量子计算任务并行化执行、量子芯片自动化校准等功能, 并兼容超导量子处理器、半导体量子处理器、离子阱量

子处理器等多种量子计算系统。

1.2.4 量子算法理论

量子算法融入了量子力学特征,如量子相干性、叠加性、并行性、纠缠性等,大大提升计算效率,自成体系构建出一种新的计算模式。经典的量子计算算法主要分为两类:质因数分解算法(Shor算法)、无序搜索算法(Grover算法)。目前其推进速度远超量子处理器的研发速度。

1985年Deutsch提出了第一个量子算法^[21],标志着量子算法理论的诞生。1992年,David Deutsch和Richard Jozsa提出了第一个有指数级加速的量子算法Deutsch-Jozsa算法^[22]。1994年,Shor算法被提出^[23],该算法具有多项式复杂度,使量子计算机可轻易破解基于公开密钥加密的算法。1995年出现了相位估计算法,该算法后来成为多个量子算法的基本模块。1996年,Grover提出量子搜索算法^[24],对于数据搜索可二次方加速。同年,Suzuki、Trotter和Lloyd提出量子动力学模拟算法(哈密顿量模拟),相对于经典算法,具有潜在指数加速。以上算法出现于量子计算算法理论发展的早期阶段,建立了量子计算的基本数学模型。2009年和2011年,解线性方程组量子算法(Harrow-Hassidim-Lloyd, HHL)和量子神经网络(Quantum Neural Network, QNN)分别被提出,并广泛应用于量子机器学习中。2013年哈佛量子化学团队提出变分量子特征值求解算法(Variational-Quantum-Eigensolver, VQE),从此进入了量子计算的嘈杂中型量子(Noisy Intermediate-Scale Quantum, NISQ)新时代。2014年,Edward Farhi、Jeffrey Goldstone、Sam Gutmann提出量子近似优化算法(Quantum Approximate Optimization Algorithm, QAOA),用于求解组合优化问题。

1.3 应用服务

量子计算具有经典计算无法比拟的优势,在特定领域能够解决经典计算无法解决的问题,在量子化学、量子人工智能、量子优化等方面具有广阔的应用前景。

1.3.1 量子化学

量子化学是量子模拟最有前途的应用之一,旨在解决应用量子力学的基本原理和方法研究化学问题。国外方面,IBM在2017年初启动了“IBM Q”项目,可在超导量子设备上实现一种可以模拟真实分子、高效精确地计算出小分子电子最低能态的量子算法,并利用该算法成功模拟了迄今为止量子计算机所能模拟的最大分子——氢化铍(BeH₂)^[25]。谷歌在2020年首次实现使用量子计算机模拟化学反应,即使用Sycamore处理器模拟由两个氮原子和两个氢原子组成的二氮烯分子异构化(图3)^[26]。

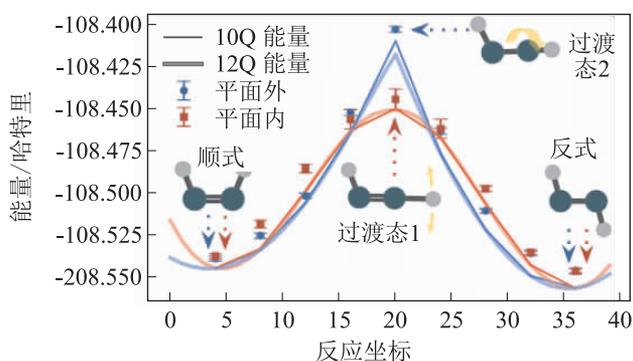


图3 Sycamore处理器模拟分子过程^[26]

Fig. 3 Process of Molecular Simulation by Processor Sycamore^[26]

国内方面,本源量子于2019年9月发布化学应用软件Chemiq,可用于模拟计算化学分子在不同键长下对应的能量。本源量子与瀚海博兴根据量子化学算法进行抗体亲和力改造、空间位阻改造等实现抗体优化,并根据结构模拟、实验再验证等实现多株抗体之间的有效配对,共同开发

出一系列特异性识别病毒的胶体金试剂盒——新冠病毒抗原免疫直检试剂盒、抗原抗体混检试剂盒等产品。2019 年 9 月,华为发布量子化学应用云服务 HiQ 2.0 模拟器,作为国内首个一站式量子化学应用云服务,已成功模拟乙烯(C_2H_4)、氨气(NH_3)、甲硅烷(SiH_4)等分子基态能量。

1.3.2 量子人工智能

量子计算和人工智能都是当今新兴技术,对社会产生了革命性的影响。量子人工智能利用量子计算原理进行计算的机器学习算法,能够在短时间内完成数据分析,为下一代人工智能提供了解决方案。

在交通领域,谷歌与滑铁卢大学、大众汽车共同发布了量子机器学习软件框架 TensorFlow Quantum(TFQ),该框架允许研究人员联合使用 Cirq 和 TensorFlow 的功能。在金融领域,IBM 与西班牙银行机构 CaixaBank 合作实施量子算法项目,基于实际数据,使用量子机器学习算法评估了两个专门为该项目创建的投资组合(抵押投资组合和国库券投资组合)的金融风险。在手写数字识别方面,本源量子将经典算法与量子算法相结合,利用 QPanda 量子计算编程框架和 VQNET 量子机器学习框架实现 QNN 量子神经网络,为后续量子算法加速计算机视觉量子化处理提供了可能。

1.3.3 量子优化

组合优化是指在有限的可行解集中寻找最优(或次优)解,在工业上有着广泛的应用,如路由规划、网络流量分配等。然而随着运算规模的增加,其计算复杂度迅速增加,使得传统计算机在时间和计算资源有限的情况下难以解决组合优化问题。量子计算可以极大地提高计算效率,从而提高物流运输、航空旅行、交通管制、金

融资产管理、网络基础设施等领域的运营效率。例如,在航空领域,空客公司发起了一项竞赛,利用量子计算解决各种飞机设计和操作问题,包括翼盒设计优化,计算流体动力学等。D-Wave 和南加大-洛克希德·马丁量子计算中心合作,使用量子退火机模拟先进战机飞行姿态,改进军用飞机设计模型。此外,D-Wave 为大众汽车公司的交通管理系统提供驱动,能够实时计算出单独最快行驶路线。

2 量子计算产业发展趋势与挑战

2.1 量子计算产业化趋势

1)量子计算产业发展势头良好,但关键技术有待进一步突破

近二十年来,量子计算产业发展势头较好。1988 年,IBM、牛津、伯克利、斯坦福和麻省理工学院研制的量子计算机量子比特数只有 2;到 2019 年,从事量子计算研究的新兴公司 Rigetti 发布了容量为 128 比特的计算系统,量子比特数迭代速度明显加快。此外,量子芯片、基础软件、应用服务等方面都研发出了相应产品,产业总体发展十分迅速。

但在全球范围内,量子计算整体上仍处于基础理论研究和原型产品研发验证阶段,关键技术有待进一步突破。一方面,大规模通用量子计算机存在发展瓶颈,量子计算的物理实现存在多种可选技术路线,但目前尚没有任何一种体系能够实现量子计算机实用化,大规模通用量子计算机仍面临着延长量子相干保持时间、实现更多粒子的量子纠缠,以及制备高精度量子态等挑战。另一方面,现有量子算法性能需要进一步改善,增强实用性,并亟需开发新的量子算法,以促进量子计算技术成熟化,为量子计算产业化发展提供

理论基础。

2) 量子计算市场规模发展潜力巨大

量子计算虽然仍处于技术探索时期,但目前已有初步应用案例,其应用前景广泛,能够从根本解决药物发现、人工智能、路由规划等多领域的复杂问题。因此,量子计算的市场规模发展潜力巨大。据 Research and Markets 的数据,2019 年量子计算市场价值为 5.071 亿美元,预计 2020—2030 年的复合年增长率为 56%,到 2030 年达到 649.883 亿美元。波士顿咨询(BCG)发布的报告预测,在不考虑量子纠错算法的进展情况下,保守估计到 2035 年全球量子计算应用市场规模将达到近 20 亿美元,2050 年暴涨到 2600 多亿美元;若量子计算技术迭代速度超出预期,乐观估计 2035 年市场规模可突破 600 亿美元,2050 年则有望飙升至 2950 亿美元(图 4)^[27]。

3) 我国量子计算产业化发展迅速,但仍处于跟跑阶段

我国在量子计算产业化方面发展迅速,并取得了部分突破。例如,国内量子操作系统虽

然实现时间比国外稍晚,但发展速度较快,并在某些性能上超越了国外现有量子操作系统,解决了已有产品无法管理量子资源、不能并行处理多量子计算任务、缺少自动化校准量子芯片等功能缺陷。

但是鉴于我国进入量子计算领域的时间较晚,与欧美等国还存在较大的差距,要想实现一个真正可商用的量子计算系统,还面临巨大的挑战。与美国相比,我国还未形成企业、高校与科研机构分工协作、共同发展的组织结构,各机构之间的合作有待加强。除此之外,量子计算产业化的高风险使得传统行业多持观望态度,初期市场规模和用户群体十分有限。同时我国相关领域的人才也相对匮乏,需要进一步巩固人才培养机制,扩大专业人员队伍,激发科研人员的创新潜力,为我国量子计算的发展提供人才动力。

2.2 量子计算产业化挑战

1) 市场尚在培育阶段,商业模式不明朗

目前量子计算的许多应用尚在规划与试验阶段,未正式落地,应用前景尚不完全清晰,形成

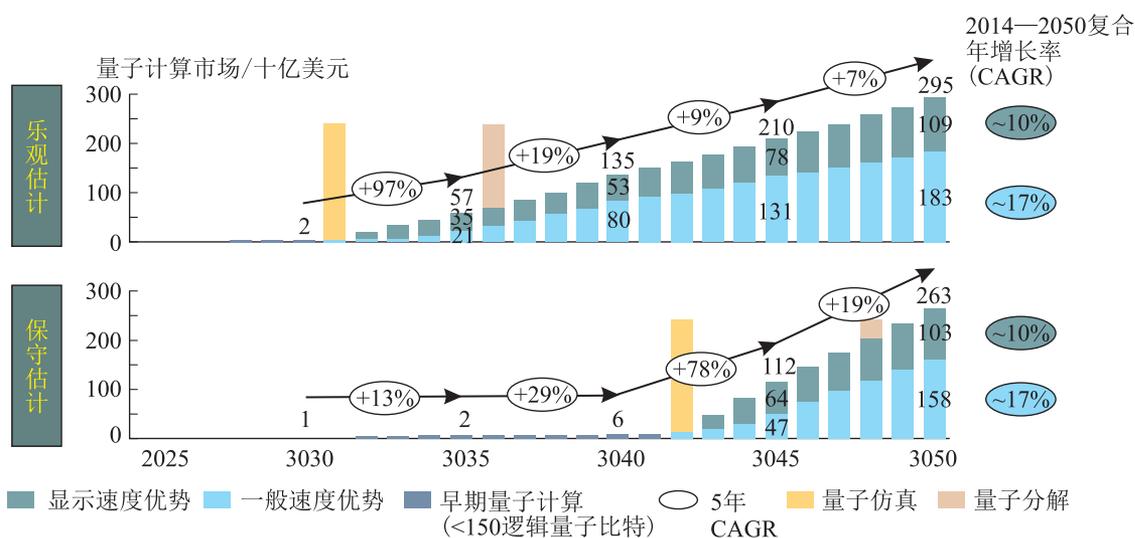


图 4 量子计算市场增长速度^[27]

Fig. 4 Quantum Computing Market Growth Speed^[27]

完整的产业链还需要一定时间。一方面,我国量子科技产业化还处在非常初级的阶段,市场化机制尚未形成,主要依靠国家政策推动,在系统销售、软件销售等方面发展欠缺,缺少成熟的商业模式和商业机会。另一方面,量子计算机研发和使用成本高,采用超导等路线的量子计算机对运行环境要求严苛,难以大规模推向市场。

2) 标准体系尚未建立,行业缺乏规范引导

量子计算作为新兴技术领域,目前处于技术研究与产业探索的初级阶段,技术方向在业界还未统一,标准化需求尚不明确,已立项的国际标准提案只有 ISO/IEC 4879《信息技术 量子计算术语和词汇》一项,缺乏系统性标准建设。量子计算市场培育期环境复杂,缺乏科学评价准则,各大企业和科研机构产业研究各行其是,在数据操作、量子编程语言、应用接口方面无统一标准规范,影响未来行业的发展。

3) 我国量子计算产业链多个环节薄弱,并行突破存在一定难度

与国外相比,我国在量子计算产业链的多个环节发展较为滞后。在量子芯片方面,我国产业化起步较晚,很多技术路线尚在探索阶段。而谷歌、IBM、英特尔等企业在量子计算领域布局多年,资金、人才投入巨大,对量子计算成果转化和加速发展助力明显,研究领域涉及多个技术路径。例如,谷歌于 2019 年宣布实现了量子霸权,霍尼韦尔的量子计算机实现了 128 量子体积。我国量子计算产业近 3 年刚刚起步,主要以本源量子为代表,虽然在超导和半导体路线方面实现了一定突破,但在拓扑、中性原子等冷门技术路线上尚未产生产业成果。在量子基础软件方面,我国量子编程语言种类较少,应用程度不高;且我国量子算法理论发展较晚,目前还处于起步阶

段,在技术和产业研究中基本采用国外先进的量子计算算法,自主研发能力欠缺,仍属于技术跟随者。

由此可见,我国量子计算产业链多个环节发展薄弱,同时突破困难较大,距形成完整产业链还有较大差距。

3 我国量子计算产业化发展建议

3.1 加强国家统筹,提供制度保障

目前量子科技已写入国家层面的发展战略中,各地政府均加大创新投入,采取专项引导基金等措施,鼓励中小型企业积极参与技术研发。然而各地政府的支持较为分散,未能集中资金支持重点项目发展。因此,建议加强国家统筹,整合各地资源,集中力量突破重点关键问题,发挥政府支持的最大作用。另一方面,我国量子计算从学术界向产业界转化的力度还有待加强,需要在产业界、学术界和政府之间开展强有力的合作,将研究机构与产业界联系起来,促进技术、人才、产品、市场等要素的有效沟通,技术突破与产业化并行,以推动早期商业化进程,集中精力解决还处于早期发展阶段的量子产业相关痛点。因此,建议提供相关协作制度保障,构筑高校、科研院所和企业相互配合、优势互补的发展模式,为各个部门的交流与合作提供平台与公共服务,促进各部门协同发展,使得技术发展与工程实践相互激励,共同进步。

3.2 借鉴先进经验,完善合作机制

欧美等发达国家十分强调量子科技的同盟构建,例如美国的量子经济发展联盟(QED-C)、德国的量子技术与应用联盟(Qutac)。产业联盟从行业协会的角度,极大地促成了公司之间的合作。而我国各个企业之间的发展较为独立,还存

在很大的合作空间。在此背景下,建议学习这些国家的产业化路径,借鉴先进发展经验,加强企业之间的合作,打破垄断,聚集产业力量,强强联合,进而取得与国外科技巨头竞争的优势。

3.3 关注行业经济,创建生态系统

谷歌、IBM 等国外企业争相布局自己的量子生态系统,如 IBM Q Network 已囊括多个行业的 100 多个组织,涵盖航空、汽车、金融、能源、保险、材料和电子等领域,产品贯穿量子芯片、基础软件、应用服务等产业链上下游。建议我国立足现有产业成果,发挥龙头企业优势,根据经济发展对量子计算的需求,建立完整量子计算生态体系,促进量子计算技术在经济层面的应用,共同推进量子计算商业化。

3.4 加强核心器件和关键技术攻关

量子计算产业发展的重点在于核心器件与关键技术的发展。如 1.1 节所述,相比于国际先进水平,我国还存在 2~3 年的差距,存在技术短板。加强核心器件和关键技术攻关,在关键领域实现自主可控,对于保障产业链供应链安全、增强我国科技应对国际风险挑战的能力至关重要。建议加强基础研究和探索,在基础层面实现核心技术突破,从而提高量子科技理论研究成果向实用化、工程化转化的速度和效率。

3.5 正确宣传教育,警惕产业泡沫

随着量子技术的发展,量子计算的热度不断增加,出现了许多虚假报道和不实宣传。不少企业以量子科技为噱头,利用量子概念夸大宣传,对量子计算产业发展无益。这一方面是由于公众对量子科技了解不够,缺乏有效的科学普及。另一方面,一些企业利用量子计算的热度,借机介入资本,影响产业发展环境,抢占市场和资源,不利于真正的量子产业发展。因此,建议加强正

确的宣传教育,普及量子计算知识,引导整个社会对量子科技的正确认识,同时进一步完善人才培养制度,重点培养急需紧缺研究方向的高科技专业人才,为真正的量子产业发展提供人才保障。此外,需要加强政策引导,规范行业运营制度,树立良好风气,引导企业脚踏实地健康发展,警惕产业泡沫的出现。

参考文献

- [1] FEYNMAN R P. Simulating Physics with Computers[J]. International Journal of Theoretical Physics, 1982, 21: 467-488.
- [2] 冯晓辉. 2019 年量子计算发展白皮书(上)[N]. 中国计算机报, 2019-10-21(8).
- [3] Congress. STRATEGIC Act, S. 687, 117th Cong [EB/OL]. (2020-03-10) [2021-05-21]. <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/senate-bill/687/text>.
- [4] European Commission. European Commission will Launch 1 Billion Quantum Technologies flagship [EB/OL]. (2021-03-09) [2021-05-21]. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/european-commission-will-launch-eu1-billion-quantum-technologies-flagship>
- [5] CSIRO. Growing Australia's Quantum Technology Industry [EB/OL]. [2021-05-21]. <https://www.csiro.au/en/work-with-us/services/consultancy-strategic-advice-services/CSIRO-futures/Futures-reports/Quantum>.
- [6] Government Office for Science. The Quantum Age: Technological Opportunities [EB/OL]. (2016-11-03) [2021-05-21]. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/564946/gs-16-18-

- quantum-technologies-report. pdf.
- [7]新华社. 习近平主持中央政治局第二十四次集体学习并讲话 [EB/OL]. (2020-10-17) [2021-05-21]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-10/17/content_5552011.htm.
- [8]ARUTE F, ARYA K, BABBUSH R, et al. Quantum Supremacy Using a Programmable Superconducting Processor [J]. *Nature*, 2019, 574(7779): 505-510.
- [9]KRANZ L, GORMAN S K, THORGRIMSSON B, et al. Exploiting a Single - crystal Environment to Minimize the Charge Noise on Qubits in Silicon [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32: 2003361.
- [10]MADZIK M T, ASAAD S, YOUSRY A. et al. Precision Tomography of a Three-qubit Donor Quantum Processor in Silicon [J]. *Nature*, 2022, 601: 348-353.
- [11]NOIRI A, TAKEDA K, NAKAJIMA T, et al. Fast Universal Quantum Gate above the Fault-tolerance Threshold in Silicon [J]. *Nature*, 2022, 601: 338-342.
- [12]XUE Xiao, RUSS M, SAMKHARADZE N, et al. Quantum Logic with Spin Qubits Crossing the Surface Code Threshold [J]. *Nature*, 2022, 601: 343-347.
- [13]ZHONG Hansen, WANG Hui, DENG Yuhao, et al. Quantum Computational Advantage Using Photons [J]. *Science*, 2020, 370: 1460-1463.
- [14]IBM. IBM Quantum [EB/OL]. [2022-04-15]. <https://quantum-computing.ibm.com>.
- [15]Microsoft. Azure Quantum [EB/OL]. [2022-04-15]. <https://azure.microsoft.com/en-us/services/quantum>.
- [16]Amazon. Amazon Braket [EB/OL]. [2022-04-15]. <https://aws.amazon.com/braket>.
- [17]达摩院. 阿里巴巴开源首个大规模量子模拟平台, 量子引擎“太章 2.0”开放 [EB/OL]. (2020-12-27) [2022-04-15]. <https://damo.alibaba.com/events/81>.
- [18]华为. 华为发布量子计算模拟器 HiQ 云服务平台 [EB/OL]. (2018-10-12) [2022-04-15]. <https://www.huawei.com/cn/news/2018/10/huawei-hiq-cloud-service-platform>.
- [19]本源量子. 本源量子云平台 [EB/OL]. [2022-04-15]. <http://qcloud.originqc.com.cn/>.
- [20]XIN Tao, HUANG Shilin, LU Sirui, et al. NMRCloudQ: A Quantum Cloud Experience on a Nuclear Magnetic Resonance Quantum Computer [J]. *Science Bulletin*, 2018, 63(1): 17-23.
- [21]DEUTSCH D. Quantum Theory, the Church-turing Principle and the Universal Quantum Computer [J]. *Proceedings of the Royal Society A Mathematical Physical & Engineering Sciences*, 1985, 400(1818): 97-117.
- [22]DEUTSCH D, JOZSA R. Rapid Solution of Problems by Quantum Computation [J]. *Proceedings of the Royal Society A Mathematical*, 1992, 439(1907): 553-558.
- [23]SHOR P. Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring [C]. *Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science. IEEE*, 1994: 124-134.
- [24]GROVER L K. Quantum Mechanics Helps in Searching for a Needle in a Haystack [J]. *Physical Review Letters*, 1997, 79(2): 325-328.
- [25]KANDALA A, MEZZACAPO A, TEMME K, et al. Hardware-efficient Variational Quantum Eigensolver for Small Molecules and Quantum

- Magnets[J]. Nature, 2017, 549(7671): 242-246.
- [26] Google AI Quantum and Collaborators. Hartree-fock on a Superconducting Qubit Quantum Computer[J]. Science. 2020; 369(6507): 1084-1089.
- [27] THAKER A, ADAM S. The Coming Quantum Leap in Computing [EB/OL]. (2018-05-16) [2022-02-21]. <https://www.bcg.com/publications/2018/coming-quantum-leap-computing>.

杨宏: 文章整体把控及建议;

雷根: 文章修改;

张弛: 产业调研与资料收集。

作者简介



汪晶晶: 助理工程师; ISO/IEC JTC 1/WG 14(量子计算工作组)注册国际专家, 国际技术报告《信息技术量子计算概述》主编辑, 参与国家标准制定 10 余项;

主要研究方向: 量子计算、物联网、标准化。

作者贡献说明

汪晶晶: 文章撰写及修改;

WIPO 公布 2022 全球创新指数百强科技集群

2022 年 9 月 14 日,世界知识产权组织(WIPO)预先公布了《全球创新指数 2022》(GII 2020)全球百强科技(S&T)集群,研究分析了科技活动最密集的地区,结果显示,全球 5 大科技集群中(日本 1 个、中国 2 个、韩国 1 个、美国 1 个),4 个位于东亚。

东京-横滨继续领跑百强科技集群,其次是中国深圳-香港-广州、中国北京,韩国首尔和美国圣何塞-旧金山。Top10 中,与去年入选城市群基本一致,但上海和苏州已合并为一个集群。中国集群的科技产出增幅最大,增幅中位数达到 13.9%。高收入经济体集群的增长速度普遍低于中等收入经济体集群。

中国百强科技集群数量已与美国不相上下,百强科技集群高度集中在北美、欧洲和亚洲三个地区,尤其是美国和中国。中国首次上榜的集群数量与美国一样多,各有 21 个。德国(10 个)紧随其后,其中科隆和慕尼黑是最大的两个集群。日本有 5 个,东京-横滨和大阪-神户-京都也进入前十。

曼谷、布宜诺斯艾利斯、开罗、吉隆坡和墨西哥城是百强名单之外中等收入经济体的领先科技集群。百强名单之外的 123 个集群中,美国有 23 个,中国和德国各 13 个,法国和英国各 10 个。

百强集群的科技强度:创新集群的科技强度指的是其专利和科学出版物的总量除以人口的份额,旨在利用地理空间来估计潜在的人均水平。英国剑桥和荷兰/比利时的埃因霍温是科技密集度最高的集群,其次是韩国大田、美国圣何塞-旧金山和英国牛津。瑞典隆德-马尔默、斯德哥尔摩和哥德堡的整体表现强劲。圣何塞-旧金山在 GII 科技集群和科技强度排名中均进入前五。许多欧洲和美国的集群显示出比亚洲更密集的科技活动。科技强度 Top25 中,美国 7 个、德国 5 个,瑞士和瑞典各有 3 个,中国仅北京进入 Top 25,排名第 23。与 2021 年集群排名相同,在专利活动推动创新集群产出的情况下科技强度更高,Top25 集群中,有 20 个集群的大部分产出来自专利。

赵颖会(四川大学)编译自

https://www.wipo.int/export/sites/www/pressroom/en/documents/2022gii_clusters_chapter.pdf