



研究与开发

量子计算云平台的技术演进与发展趋势

郝苑辰, 解宇恒, 唐建军

(中国电信股份有限公司研究院, 北京 102209)

摘要: 当前, 量子计算云平台以便捷、按需访问的方式, 有效依托经典网络提供量子计算服务, 成为量子计算能力输出的有效途径之一。探讨了量子计算云平台的架构、服务模式及全球发展动态, 分析指出平台当前面临用户实时体验不足、噪声与误差制约算法性能、量子编程标准化不足以及平台间资源共享与协作存在局限等主要挑战。因此, 明确了持续优化量子计算云平台的发展方向, 提出优化用户体验、加速噪声中等规模量子 (noisy intermediate-scale quantum, NISQ) 算法研发及提升编程框架兼容性和推动平台合作交流等建议, 为平台的深入发展提供重要支撑, 释放量子计算云平台的潜在优势, 以促进其在各行业的广泛应用与持续创新。

关键词: 量子计算; 云计算; 量子计算云平台; 混合量子经典云计算

中图分类号: TP391

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024240

Technical evolution and development trend of quantum computing cloud platform

HAO Yuanchen, XIE Yuheng, TANG Jianjun

Research Institute of China Telecom Co., Ltd., Beijing 102209, China

Abstract: Currently, quantum computing cloud platforms provide a convenient, on-demand mechanism for accessing quantum computing services, effectively utilizing classical networks to deliver these capabilities. A thorough analysis of the architecture, service models, and global development trends of quantum computing cloud platforms were conducted, identifying several critical challenges: insufficient real-time user experience, the adverse effects of noise and errors on algorithm performance, a lack of standardization in quantum programming, and limitations in resource sharing and collaboration among platforms. To address these challenges, a clear trajectory for the ongoing optimization of quantum computing cloud platforms was delineated. The strategic recommendations aimed at enhancing user experience, accelerating the research and development of NISQ algorithms, improving compatibility across programming frameworks, and fostering collaborative efforts between platforms were proposed. These recommendations are designed to provide substantial support for the further evolution of quantum computing cloud platforms, unlocking their

收稿日期: 2024-09-02; 修回日期: 2024-11-09

通信作者: 郝苑辰, haoyc@chinatelecom.cn

基金项目: 科技创新2030—“量子通信与量子计算机”重大项目 (No.2021ZD0301300)

Foundation Item: Science and Technology Innovation 2030 - Quantum Communication and Quantum Computer (No. 2021ZD0301300)

inherent advantages and facilitating their widespread application and continuous innovation across diverse sectors.

Key words: quantum computing, cloud computing, quantum computing cloud platform, hybrid quantum cloud computing

0 引言

量子计算利用量子力学中叠加和纠缠等特性, 通过其强大的并行计算能力, 突破经典算力极限, 推动了新一轮的信息科技革命, 如在密码学^[1-3]、组合优化^[4-6]、金融建模^[7-8]、分子模拟^[9-10]和机器学习^[11-15]等领域将提供高效解决方案。量子计算正处于“噪声中等规模量子(noisy intermediate-scale quantum, NISQ)计算”时代, 底层量子计算机拥有数十个至数百个量子比特, 不过量子比特仍然受噪声和误差的影响, 距离实现完全容错计算还有较长发展周期。很多国家已积极开展如混合量子—经典算法、量子应用等量子优势方面的初步探索, 持续挖掘量子计算技术的高潜力价值服务。

现阶段, 量子计算机受建造成本、维护难度及运行环境等因素限制, 优质的量子计算服务相对稀缺, 在云计算环境中进行托管, 以访问量子计算资源, 成为NISQ硬件时代实现量子优势的有效途径^[16-18]。量子云计算(quantum cloud computing, QCC)通过将量子计算的原理与云基础设施相结合, 有望显著缓解利用量子计算资源的障碍, 使研究人员和开发人员能够在不拘泥于量子硬件的情况下探索量子算法。因此, 对大多数潜在用户而言, 量子计算云平台可综合量子计算与云计算的优势, 提供用户接入实体量子计算机或模拟器的服务。当前, 全球约有20余家公司、高校及科研机构上线了量子计算云平台, 旨在把握风口切入市场, 持续拓展其影响力与应用边界。

1 量子计算云平台架构及服务模式

混合量子经典云计算(hybrid quantum cloud

computing, HQCC)架构^[19]融合了量子 and 经典计算资源, 是当前量子计算云服务的核心模式。HQCC具备分布式量子任务处理的潜力, 并在逐步向高性能计算(high-performance computing, HPC)和人工智能(artificial intelligence, AI)深度集成方向发展。该架构通过经典云服务接口API接收用户提交的量子电路, 将任务分配给量子处理器执行。混合量子经典云架构如图1所示。IBM Quantum Experience、亚马逊Braket和微软Azure Quantum等平台广泛应用此架构, 将大规模量子应用拆解为微服务^[20]和量子功能^[21], 以实现量子任务的批处理。HQCC架构通过经典云协调量子计算资源, 提升了任务效率和可用性, 在支持分布式计算的同时推动从批处理到交互式量子计算的过渡, 并为与HPC和AI的集成奠定了基础。

随着HQCC架构的不断演进, 量子计算云平台逐步发展为通过量子基础设施即服务(Q-IaaS)、量子平台即服务(Q-PaaS)、量子软件即服务(Q-SaaS)3种服务模式, 为用户提供直观、实例化的量子计算接入与算力服务^[22]。量子计算云平台服务类型与功能框架如图2所示, 应用服务为用户或管理人员提供云平台的操作界面; 平台服务包含量子功能(如图形化/代码编程开发、程序编译、程序调试、任务调度、量子比特校准等)和经典功能(如数据库、中间件等); 基础设施服务主要提供量子计算的物理和虚拟资源; 运营管理模块处理用户管理和平台运维等; 安全保障模块负责通用、Web及主机安全。借助这一框架, 量子计算云平台不仅可以实现量子计算资源的高效管理与分配, 还能够通过细化的服务模式满足用户不同层次

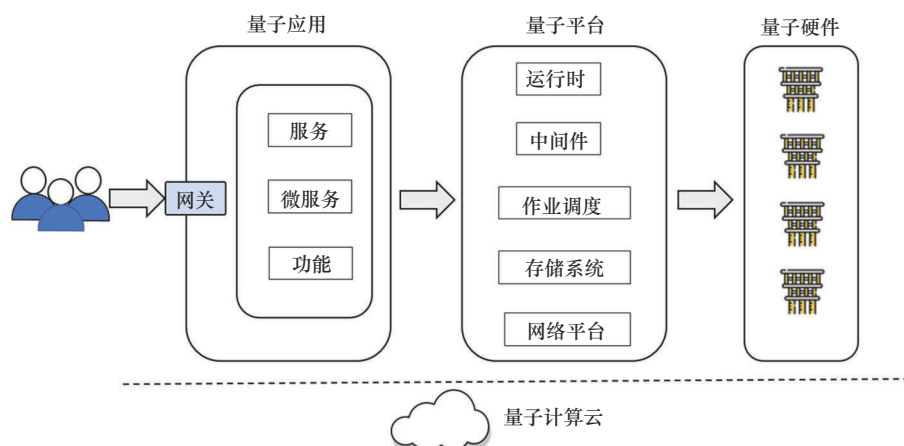


图1 混合量子经典云架构

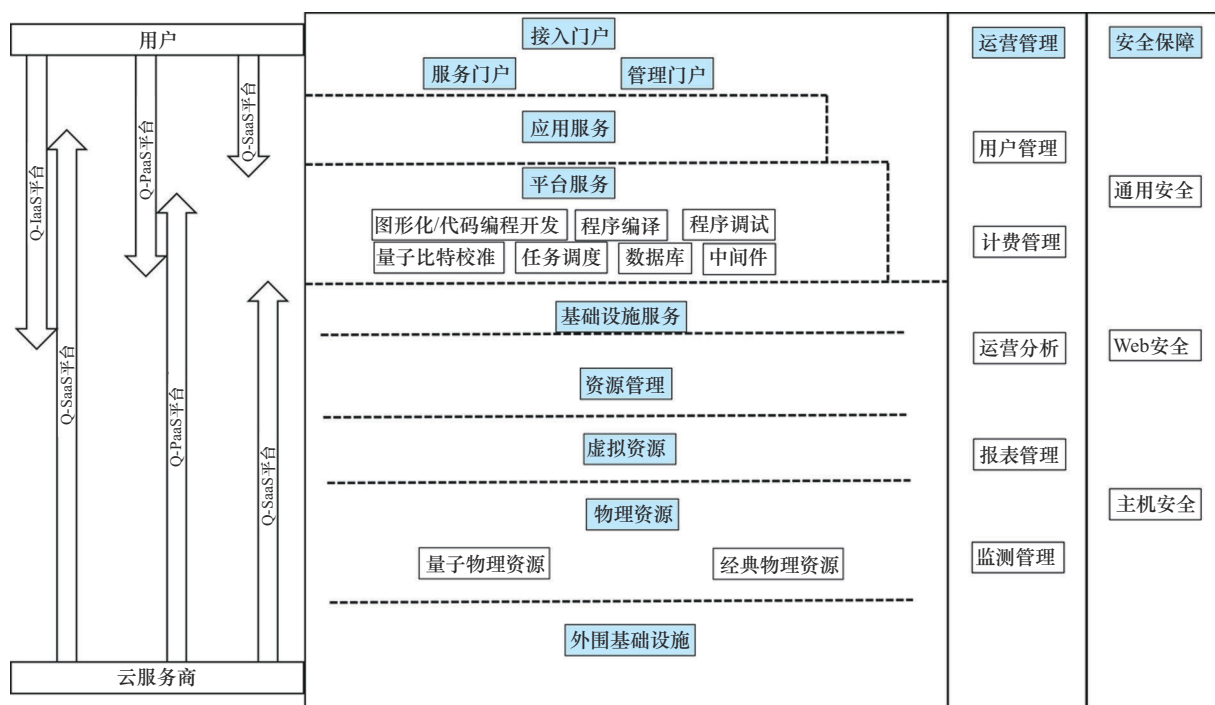


图2 量子计算云平台服务类型与功能框架

的需求，确保量子计算在云服务中的广泛可用性及安全性。

2 全球量子计算云平台发展趋势

全球量子计算云平台正处于快速发展阶段，如IBM、谷歌、微软等已布局多元化量子软硬件服务，推动量子计算从实验室向实际应用过渡。中国也正加大量子计算云的投入，相关平台建设逐步与国际接轨。根据研判，提升用户体验、统

一编程框架、增强NISQ算法的实际应用以及加强平台间开放合作，将是推动量子计算商业化和行业持续发展的关键。

2.1 国外量子计算云平台发展现状

近年来，全球主要量子科技巨头通过系统布局战略规划和研发项目，积极争夺“量子优势”，量子计算行业雏形得以显现。国外量子计算云平台发展现状对比见表1。

以IBM Quantum Experience为例，2023年推

表1 国外量子计算云平台发展现状对比

量子云平台	发布方	国家	发布时间	硬件技术	量子比特数/bit
IBM Quantum Experience	IBM	美国	2016年6月	超导	433、127、65、27、16、7、5
				超导	53、80、40
				离子阱	20 (AQT)
				中性原子	100+
QCS	Rigetti	美国	2018年9月	超导	40、80
Braket	亚马逊	美国	2019年12月	超导	40、80、8
				离子阱	11
				光量子	216
				离子阱	20、12、11
Azure Quantum	微软	美国	2019年11月	中性原子	100+
				超导	40、80、8
				量子退火	5 000+
					2 000+
Leap	D-Wave	加拿大	2018年10月	光量子	216
				光量子	8
Xanadu Cloud	Xanadu	加拿大	2020年9月	超导	5
				硅自旋	2
Quantum Inspire	Qutech	荷兰	2018年10月	超导	5
				硅自旋	2

出433量子比特的Osprey处理器和模块化扩展的133量子比特Heron处理器，结合扩展至全技术栈的Qiskit软件包，信息处理能力显著提升，系统的可扩展性增强^[23]。然而，由于处理器的差异性和复杂性，用户难以区分任务是否在线操作，导致实时感知能力较弱，影响直观体验。谷歌Sycamore70量子比特处理器通过优化量子比特的互联和耦合方式，提升了量子比特的相干时间和门操作速度，但用户在开发和用量子软件和算法时，仍须考虑不同硬件架构之间的适应和迁移能力。微软的Azure Quantum平台通过提供多种硬件选择和统一的开发环境，简化了用户量子程序的编写与迁移，帮助提升了量子编程框架的兼容性和通用性^[24]。亚马逊Braket通过Python SDK支持量子电路设计与多种硬件集成。但综合来看，量子编程框架的标准化仍未完善，在增加开发难度的同时制约了跨平台兼容性。此外，Rigetti与Azure Quantum合作推出的量子云服务RigettiQCS™，通过按需访问不同量子处理器，增强了开发者在不同应用场景中的灵活性与量子算

法验证能力^[25]。D-Wave则开展Leap量子云服务，实现商业化应用^[26]，进一步促进了量子计算技术的实际应用。这些发展表明，国外量子云平台在技术迭代和应用落地方面正在加速推进，未来的发展重点将集中在提升量子系统性能和扩展实际应用场景，推动量子计算向更广泛的商业化迈进。

2.2 国内量子计算云平台发展现状

国内量子计算云平台发展现状对比见表2。国内量子云平台在硬件自主性、编程环境和应用落地上同样取得显著进步。本源量子公司的本源量子云平台通过“本源悟空”72位超导量子芯片，展示了其在复杂算法中高效的求解速率，提升了平台计算资源的整体性能。然而，用户在实际操作中的实时感知能力仍有提升空间，反馈速度和交互体验有待进一步优化。华为的HiQ量子云平台提供多种开发环境，如HiQ Composer和JupyterLab^[27]，为用户带来灵活的量子编程选择，但由于不同平台使用的编程框架不一致，用户需要适应不同的开发工具，学习和迁移成本有所增



表2 国内量子计算云平台发展现状对比

名称	发布方	发布时间	硬件技术	量子比特数/bit
本源量子云	本源量子	2017年10月	超导	6、72
HiQ	华为	2018年10月	模拟器	
SpinQ	量旋科技	2020年10月	核磁共振	2、4、6
太元一号	浙江大学	2022年7月	超导	8
Quafu	北京量子信息科学研究院、中国科学院物理研究所、清华大学	2022年	超导	26
弧光量子云平台	弧光量子	2022年9月	超导	136、18、10
			离子阱	12
祖冲之号	中国科学院量子信息与量子科技创新研究院、科大国盾量子技术股份有限公司、弧光量子	2023年5月	超导	11
五岳	中国移动、北京玻色量子科技有限公司	2023年8月	超导	176
天衍	中国电信	2023年11月	光量子	20
			超导	100
				176

加。同时，浙江大学“太元一号”量子云平台支持并行调度。整体来看，这些平台在量子算法验证和初步落地方面有所突破，但仍缺乏广泛的实际应用场景。

弧光量子云平台和中国移动的“五岳”量子云平台通过集成多个量子硬件和开放量子算力资源，允许开发者根据需求选择处理器，并提供多样化的工具和API，增强了开发者进行量子算法调整和验证的便捷性。但平台间协同合作机制仍然有限，跨平台的资源共享与开放性不足。科大国盾量子同弧光量子联合发布“祖冲之号”量子计算云平台，展现了其在实现量子优越性方面的潜力；中国电信的“天衍”量子计算云平台通过超量混合云架构，实现了超算与量子计算任务的混合调度，并国产化从真机、操控系统到编译软件全链条，提升了用户体验，不过，仍需在编程框架标准化和增强开放性方面持续改进，以缩小用户在实时感知体验上的差距。以上发展现状说明，量子计算云平台在技术创新与实际应用方面正处于关键阶段，要实现量子计算的广泛商业化，各平台必须重点聚焦优化用户体验，推进编程框架标准化及增强跨平台协作与资源共享，推动技术向

更高层次发展。

此外，在量子计算蓬勃发展的浪潮中，电信运营商积极参与并推动领域的创新与合作，展现了其在全球量子生态系统中的关键角色。运营商通过构建量子云平台，致力于提升网络性能与安全通信，彰显了技术与市场需求的结合。例如，中国电信的“天衍”量子计算云平台展示了超量融合潜力，而中国移动与其他企业的合作则侧重于共同推进量子技术的实用化。与此同时，国际上，如日本NTT、韩国LG及德国Deutsche Telekom等电信公司，正在通过联合研发与资源共享，加速量子计算的应用落地。尽管电信运营商通过量子云平台展现了量子计算在提升网络性能和安全通信方面的潜力，但在用户体验、技术标准以及应用落地等方面面临的挑战，限制了量子技术的推广。因此，未来应着重提升用户体验、促进标准化与应用普及，并加强平台间协作与资源共享，以推动量子计算商业化和行业持续发展。

3 量子计算云平台核心能力对比分析

全球量子计算云平台正朝着多元化和技术深度融合的趋势发展，国内外各大企业在量子计算

技术路线、生态系统构建以及用户体验优化方面不断创新,显示出强劲的市场竞争力,不过仍然存在一些困难。图3展示了量子计算平台面临的挑战:用户即时感知能力不足、量子算法应用的局限性、量子编程标准化的欠缺以及开放云端合作的障碍,均制约了技术的广泛应用和商业化进程。本节将深入分析这些限制因素,以探讨其对量子计算云平台未来发展的深远影响。

(1) 当前量子云平台在用户实时操作感知方面存在显著瓶颈,主要体现为任务响应与系统反馈存在延迟,量子一经典混合计算资源调度效率

偏低,影响用户的直观操作体验。

以D-Wave公司推出的Leap™实时量子云服务为例,用户能够即时访问 Advantage 量子处理器和量子混合求解器。该服务通过量子机器指令(quantum machine instruction, QMI)的简化执行流程,旨在为用户提供接近实时的计算反馈。D-Wave 系统 QMI 执行概览如图4所示。D-Wave 的架构设计简化了用户操作流程并增强了任务调度的灵活性,使企业用户能够在实际应用中更高效地利用量子计算资源。然而,大多数量子云平台仍面临用户在发送任务时受到预设操作序列、资

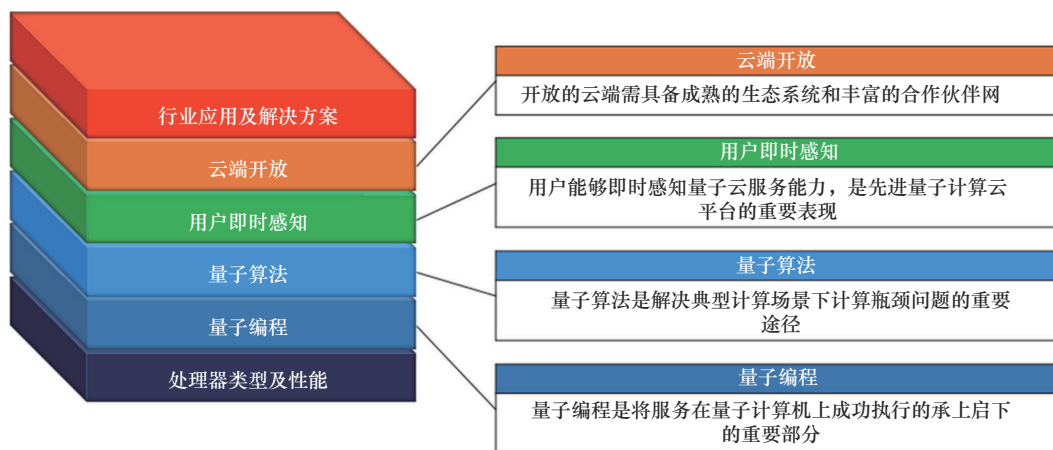


图3 量子计算云平台面临的挑战

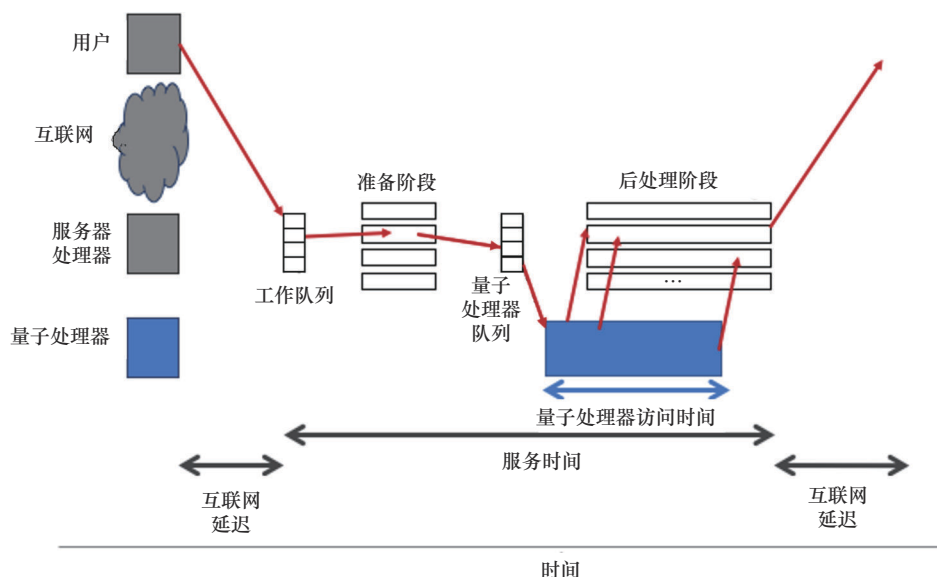


图4 D-Wave系统QMI执行概览



源调度策略和硬件性能等因素的制约，导致任务执行延迟。尤其在处理高频率并发任务时，反馈的滞后不仅降低了用户对量子计算潜在优势的认知和信任，同时也影响了量子云的性能表现。这些问题凸显出用户端与管理端双向驱动力的欠缺，后端计算任务往往依赖固定的操作序列而非实时响应，而由非计算因素引起的时延往往影响实验进程，动态定制需求未得到充分满足，难以满足市场对快速决策的需求。因此，量子云平台在实时反馈和资源调度方面应以提升用户体验和满足日益增长的高时效性需求为主要发展方向。

(2) 现阶段，量子算法在实际应用中受到明显限制，主要由于NISQ设备的噪声和误差限制了可实施的算法及其性能表现，需要同时在算法性能与容错代价之间进行综合考量。

当前，虽然量子算法（如Shor和Grover）在理论上展现优势，但由于NISQ设备的噪声和误差降低了计算精度，量子算法的设计与实际应用存在脱节，现实应用效果受限。以IBM推出的1121量子比特处理器Condor为例，尽管集成了Q-CTRL容错技术以提升硬件稳定性，但噪声干扰

仍然是阻碍高效量子计算的主要因素，限制了在真实场景中的算法性能。图5展示了IBM量子计算发展路线，流路线为软硬件开发指明了方向，旨在提升硬件可靠性和算法设计间的协同作用。这在一定程度上明确了量子算法在软硬件集成中的关键发展路径，但在面对现实应用场景时，量子算法仍需进一步优化，以应对硬件限制带来的挑战。一方面，基于这些技术的持续演进，量子算法在信号处理、网络优化和机器学习等的应用潜力有望加速实现；另一方面，尽管存在广泛的应用前景，由于技术瓶颈和应用针对性不足，这些潜力仍未得到充分发挥，且市场对量子技术的认识有限，应用过程中需要解决用户接受度和标准化问题。因此，加强针对现阶段实际落地场景的量子算法研究显得尤为迫切，需要进一步明确应用场景与条件，设计有效的算法范式，为解决现有算力紧张提供切实可行的解决方案，从而推动量子计算商业化和行业发展。

(3) 量子编程在量子计算应用的构建中扮演着不可或缺的角色，但相关技术瓶颈及互操作性不足，一定程度上阻碍了其实际市场应用。

随着量子计算的迅速发展，全球涌现多个

时间	2019年 (已实现)	2020年 (已实现)	2021年 (已实现)	2022年	2023年	2024年	2025年	2026年	2027年	2028年	2029年	2033年 以后
发展路径	在IBM云上运行量子电路	展示和原型化量子算法和应用	使用Qisikt Runtime运行量子程序的速度提高100倍	将动态电路带入Qisikt Runtime，以解锁更多计算	利用Qisikt Runtime的弹性计算和并行化增强应用	通过可扩展的弹性计算缓解来提高Qisikt Runtime的准确性	利用控制Qisikt Runtime的电路编制工具箱扩展量子应用	提高量子电路质量，允许7500个门	提高量子电路质量，允许 1×10^4 个门	提高量子电路质量，允许 1.5×10^4 个门	提高量子电路质量，允许 1×10^6 个门	以量子为中心的超级计算机将包含数千个逻辑量子位
模型开发					量子软件应用原型				量子软件应用			
算法开发	量子算法和应用模块（已实现） 机器学习 自然科学 优化				Quantum Serverless							
						智能协调	电路编制工具箱	电路库	智能编排			
内核开发	电路（已实现）		Qisikt Runtime（已实现）	动态电路	线程基元	误差抑制和缓解						
系统模块	Falcon 27量子比特（已实现）	Hummingbird 65量子比特（已实现）	Eagle 127量子比特（已实现）	Osprey 433量子比特（已实现）	Condor 1121量子比特（已实现）	Flamingo 1386+量子比特	Kookaburra 4158+量子比特		展示提高逻辑沟通质量的途径	展示提高逻辑门的途径		
					Heron 133量子比特（已实现）	Crossbill 408量子比特						

图5 IBM量子计算发展路线

开源编程平台，如 IBM 的 Qiskit、英特尔的量子加速工具（QAT）和亚马逊的 Braket，这些平台通过提供便捷的接口和工具，降低了量子计算的门槛，使开发者能够有效设计、测试和优化量子算法。其中，Qiskit 因其友好的用户界面及与 IBM 量子硬件的紧密集成，已成为市场上使用最广泛的量子编程框架，庞大的用户社区和丰富的第三方库极大支持了量子应用的开发。然而，尽管量子编程框架多样化，但各平台之间互操作性较弱，不同框架缺乏标准化接口，增加了开发者在整合多种工具时的难度。特别是在国内，许多企业和研究机构依赖 Qiskit 等外部框架，核心编译技术尚未完全自主可控，限制了自主创新能力，无法满足本土化需求，在实现不同量子编程框架之间的有效互操作性方面存在障碍。随着量子计算需求的多样化，应用领域的复杂性也在增加，量子编程不仅需要处理基础的量子门操作，还需涵盖量子机器学习、量子优化等多种应用场景，迫切要求量子编程框架提升其灵活性和可扩展性，反复迭代和升级，使其走向成熟。

（4）开放云端在量子计算领域促进了资源共享与协同创新，推动量子信息技术的实用化和市场化，但生态系统的成熟度和影响力尚需提升。

通过开放云端，各方（政府、企业、科研院所）可共享资源与信息，实现有效协作。以 IBM 为参考，IBM Quantum Experience 提供了全栈式的硬件、软件与算法布局，并发布了基于 133 量子比特处理器（Heron）的机群式量子计算机架构，率先将 Q-CTRL 容错技术集成于云量子服务中，这得益于其 140 多个成员的联盟，与美、日、韩携手合作，共同推动了量子技术的普及与应用。此外，云端的开放性和生态系统建设有助于吸引量子领域的企业和人才，深入理解用户真实的场景需求，推动量子计算技术与各行业的深度融合。然而，目前大多数量子计算云平台在技术

支持、社区交流及线下合作方面的投入不足，导致业界关注度有限。这一现状阻碍了开放共享的潜力，使得量子技术创新进程受到制约。因此，在全球量子技术竞争加剧的背景下，亟须通过开放云端吸引更多企业和科研机构参与量子计算技术的研发与应用，实现跨行业合作，增强产业链整体竞争力，为各方提供更广阔的合作空间与发展机遇。

4 发展建议

在全球量子计算云平台的发展背景下，提升用户体验和统一编程框架是推动量子计算实用化的核心，而扩大量子算法的实际应用和加强平台间的开放合作则是实现行业持续发展的关键。为此，针对关键点提出发展建议，以明确方向，促进量子计算的实际应用和市场化进程。

（1）明确平台的需求侧问题，优化供给侧管理，实现双向驱动的动态定制智能化

平台可通过适当的免费开放策略，提供实时的小规模量子计算服务实例或算法案例，增强用户使用体验，以丰富接口功能，确保业务的实时在线，提升用户对量子计算的信任感。在用户界面和操作流程方面，应优化前端设计，使用户能够灵活选择不同的量子架构，并提供自定义和迁移量子任务的功能，提高服务利用效率。同时，须加强后端管理，根据用户需求上线与即时操作相衔接的管理模块，支持量子任务的自动分解与调度，确保各计算单元的返回结果能够实时整合。强化完整的服务实例生命周期管理及计费管理，进一步提升用户参与度、活跃度和忠诚度，从而推动平台智能化的进程。

（2）依据量子计算产业成熟度，推进适用于 NISQ 设备的量子算法研发与应用

平台应充分考虑不同量子计算架构（如超导量子比特、离子阱等）的物理特性，开发更加高效的量子逻辑门和量子纠错机制。面对有限的量



子比特数与相干时间,应专注于节省计算资源的NISQ算法设计,减少计算误差,使其能够更好地整合有限资源,最大化提升计算能力,确保算法在资源受限的条件下高效执行。在量子计算硬件性能尚未全面成熟的阶段,优先从小规模问题入手,开展验证性研究,重点验证应用的可行性。首先解决特定小型问题,展示量子计算在实际场景中的潜力,逐步扩展至大规模应用领域,尤其是在信号处理、网络优化和机器学习等领域,验证量子算法在这些场景下的加速能力,评估量子计算相对经典计算在处理大规模问题上的潜在优势。通过不断优化算法与硬件协同工作,逐步实现非实时到实时计算的过渡,为未来的商业化提供坚实基础。

(3) 在“深度完善”和“广度投入”方面,促进核心量子编程语言自主可控和互操作性

平台应加速自主量子编程语言的研发,优化量子汇编语言、量子中间表示和高级量子程序设计语言,减少对外部框架的依赖。通过开源软件推动编程语言的迭代,改进图形化和在线编程功能,提升用户体验。增强可视化量子运算能力,并集成调试测试工具和经典—量子混合编程功能。同时,平台应加强不同量子编程语言的互操作性,通过开放API,支持不同系统间的互联互通,确保经典计算与量子计算资源的无缝整合。跟进量子编程语言的发展,尤其是经典—量子混合架构的支持,逐步实现量子与经典系统的协同运行,推动多元编程框架下的生态系统建设,增强系统灵活性,促进量子计算云平台的广泛应用。

(4) 依托开源社区与联盟,深化技术交流合作,强化量子计算云平台运营能力

开放量子云平台客户端,构建共享框架,促进开源知识、技术和资源的合作与共享。推动量子计算研发项目的立项和技术标准的制定与推广,确保技术更新与市场需求之间的紧密联系。

量子云平台不仅是技术应用的桥梁,更是塑造未来量子计算产业生态的关键力量。应积极依托量子联盟,以专用量子计算机的落地和明确量子算法应用为导向,吸引核心技术资源企业、科研单位及政府的加入。建立联合研究中心,积极参与政府的政策制定与项目申报,争取政策支持与项目资金;组织行业峰会、论坛、赛事和培训等活动,共同提升量子云平台的曝光度与分享量,促进跨界合作与技术交流,加速量子产业生态的实质构建。

5 结束语

量子计算云平台的快速发展为推进量子计算广泛应用奠定了重要基础。本文通过分析其架构、服务模式和全球发展趋势,指出当前量子计算云平台面临用户实时体验不足、噪声与误差对算法性能的限制、量子编程标准化不足以及平台间资源共享和协作的欠缺等挑战。为应对上述挑战,提出了优化用户体验、推动NISQ算法研发、提升编程框架兼容性和加强平台合作的建议,旨在明确量子计算云平台发展路径,有效解决当前噪声、误差及编程框架不统一等瓶颈,提升量子计算的的实际应用能力。展望未来,量子计算云平台将逐步优化,释放更大潜力,更高效地支持实际应用,推进各行业创新发展,为全球技术进步提供持续动能。

参考文献:

- [1] HUANG L L, ZHOU H Y, FENG K, et al. Quantum random number cloud platform[J]. NPJ Quantum Information, 2021, 7: 107.
- [2] KUMAR V, RAYAPPAN J B B, AMIRTHARAJAN R, et al. Quantum true random number generation on IBM's cloud platform[J]. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 2022, 34(8): 6453-6465.
- [3] LI Y H, FEI Y Y, WANG W L, et al. Quantum random number generator using a cloud superconducting quantum computer

- based on source-independent protocol[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 23873.
- [4] FARHI E, GOLDSTONE J, GUTMANN S, et al. A quantum approximate optimization algorithm[J]. *arXiv preprint*, arXiv: 1411.4028, 2014.
- [5] KOCHENBERGER G, HAO J K, GLOVER F, et al. The unconstrained binary quadratic programming problem: a survey[J]. *Journal of Combinatorial Optimization*, 2014, 28(1): 58-81.
- [6] LEWIS M, GLOVER F. Quadratic unconstrained binary optimization problem preprocessing: theory and empirical analysis[J]. *Networks*, 2017, 70(2): 79-97.
- [7] HERMAN D, GOOGIN C, LIU X Y, et al. Quantum computing for finance[J]. *Nature Reviews Physics*, 2023, 5(8): 450-465.
- [8] ORÚS R, MUGEL S, LIZASO E. Quantum computing for finance: overview and prospects[J]. *Reviews in Physics*, 2019, 4: 100028.
- [9] GOBATO R. Calculations using quantum chemistry for inorganic molecule simulation BeLi2SeSi[J]. *Science Journal of Analytical Chemistry*, 2017, 5(5): 76-85.
- [10] MAGANN A B, GRACE M D, RABITZ H A, et al. Digital quantum simulation of molecular dynamics and control[J]. *Physical Review Research*, 2021, 3(2): 023165.
- [11] FADLI S, RAWAL B S, MENTGES A. Hybrid quantum machine learning using quantum integrated cloud architecture (QICA)[C]//*Proceedings of the 2023 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 419-425.
- [12] BERGANZA GÓMEZ R, O'MEARA C, CORTIANA G, et al. Towards AutoQML: a cloud-based automated circuit architecture search framework[C]//*Proceedings of the 2022 IEEE 19th International Conference on Software Architecture Companion (ICSA-C)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 129-136.
- [13] GONG C Q, DONG Z Y, GANI A, et al. Quantum k-means algorithm based on trusted server in quantum cloud computing[J]. *Quantum Information Processing*, 2021, 20(4): 130.
- [14] HIBAT-ALLAH M, MAURI M, CARRASQUILLA J, et al. A framework for demonstrating practical quantum advantage: comparing quantum against classical generative models[J]. *Communications Physics*, 2024, 7: 68.
- [15] WEST M T, TSANG S L, LOW J S, et al. Towards quantum enhanced adversarial robustness in machine learning[J]. *Nature Machine Intelligence*, 2023, 5: 581-589.
- [16] KAIHALI M, SEZER S, KHALID A. Cloud computing in the quantum era[C]//*Proceedings of the 2019 IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-4.
- [17] LEYMANN F, BARZEN J, FALKENTHAL M, et al. Quantum in the cloud: application potentials and research opportunities[J]. *arXiv preprint*, arXiv:2003.06256, 2020.
- [18] SOEPARNO H, PERBANGSA A S. Cloud quantum computing concept and development: a systematic literature review[J]. *Procedia Computer Science*, 2021, 179: 944-954.
- [19] KARALEKAS P J, TEZAK N A, PETERSON E C, et al. A quantum-classical cloud platform optimized for variational hybrid algorithms[J]. *Quantum Science and Technology*, 2020, 5(2): 024003.
- [20] ROJO J, VALENCIA D, BERROCAL J, et al. Trials and tribulations of developing hybrid quantum-classical microservices systems[J]. *arXiv preprint*, arXiv: 2105.04421, 2021.
- [21] NGUYEN H T, USMAN M, BUYYA R. QFaaS: a serverless function-as-a-service framework for quantum computing[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2024, 154: 281-300.
- [22] 张萌, 王敬, 赵文玉, 等. 量子计算云平台的架构与发展[J]. *信息技术与政策*, 2023(7): 27-35.
- ZHANG M, WANG J, ZHAO W Y, et al. Architecture and development of quantum computing cloud platform[J]. *Information and Communications Technology and Policy*, 2023(7): 27-35.
- [23] BÖRNER S D, BERKE C, DIVINCENZO D P, et al. Classical chaos in quantum computers[J]. *Physical Review Research*, 2024, 6(3): 033128.
- [24] NGUYEN H T, KRISHNAN P, KRISHNASWAMY D, et al. Quantum cloud computing: a review, open problems, and future directions[J]. *arXiv preprint*, arXiv:2404.11420, 2024.
- [25] ANAGOLUMS, ALAVISAMANIN, DAS P, et al. Elivagar: efficient quantum circuit search for classification[C]//*Proceedings of the 29th ACM International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, Volume 2. New York: ACM Press, 2024: 336-353.
- [26] RUTH CADELIÑA A, ASSANTY CUEVAS M, KALLOS M, et al. D-wave implementation of quantum annealing for optimal resource allocation in disaster response operation of Marikina city[J]. *ECTI Transactions on Computer and Information Technology (ECTI-CIT)*, 2024, 18(1): 24-33.



- [27] 魏璐, 马钟, 刘倩玉. 量子计算模拟平台发展综述[J]. 微电子学与计算机, 2022, 39(11): 1-10.

WEI L, MA Z, LIU Q Y. Overview of quantum computing simulation platforms[J]. Microelectronics & Computer, 2022, 39(11): 1-10.

[作者简介]



郝苑辰 (1996-), 女, 中国电信股份有限公司研究院工程师, 主要研究方向为网络协议、网络安全技术、量子计算。



解宇恒 (1993-), 男, 博士, 中国电信股份有限公司研究院工程师, 主要研究方向为光纤传输系统、特种光纤、量子计算。



唐建军 (1977-), 男, 博士, 中国电信股份有限公司研究院高级工程师, 主要研究方向为光通信与量子信息技术。