

CAICT 中国信通院

量子云计算发展态势 研究报告 (2021 年)

中国信息通信研究院技术与标准研究所
2021 年 9 月

版权声明

本报告版权属于中国信息通信研究院，并受法律保护。转载、摘编或利用其它方式使用本报告文字或者观点的，应注明“来源：中国信息通信研究院”。违反上述声明者，本院将追究其相关法律责任。

前 言

量子计算是将微观量子效应与计算科学相结合，基于量子调控技术进行信息处理的新型计算方式，近年来科研探索和技术创新保持活跃，代表性研究成果和应用探索进展亮点纷呈，未来有望带来解决计算困难问题的算力飞跃，引发下一代科技革命浪潮。学术界和工业界普遍看好量子计算的发展前景，积极开展技术研究、应用探索和产业生态培育等工作。采用何种方式展示量子计算优势，提供量子计算输出能力成为该领域的重要命题。近年来出现的量子计算云平台将真实量子计算单元或模拟器与经典计算基础设施在云端进行有机结合，成为量子计算领域发展亮点之一。量子计算云平台为用户提供丰富易用的软硬件服务，加速科学研究、技术研发、科普教育与应用探索等进程。

在此背景下，中国信息通信研究院技术与标准研究所继《量子云计算发展态势研究报告（2020）》之后，再次发布量子云计算蓝皮报告。在前期研究基础上，持续跟踪量子计算云平台在技术、服务、企业参与度和测评探索等方面的最新进展，进一步对总体态势进行分析总结，最后结合我国量子计算整体发展现状，提出相关建议，为业界持续推动量子计算产业培育和生态构建提供参考。

目 录

| | |
|----------------------------|----|
| 一、量子计算云平台技术发展趋势..... | 2 |
| (一) 量子计算硬件多种技术体系竞相发展..... | 3 |
| (二) 多种量子计算软件并举研发迭代活跃..... | 7 |
| (三) 经典云计算可为量子计算提质加速..... | 10 |
| 二、量子计算云平台上开展应用服务探索..... | 11 |
| (一) 加速科研领域突破..... | 12 |
| (二) 深度挖掘行业潜能..... | 12 |
| (三) 助力普及量子教育..... | 13 |
| 三、量子计算云平台提供企业发展态势..... | 14 |
| (一) 国际企业多元发展，竞争合作并举..... | 14 |
| (二) 国内企业多方发力，积极贡献原生力量..... | 20 |
| 四、量子计算云平台测评研究与实践..... | 23 |
| (一) 量子计算云平台测评需求与研究进展..... | 23 |
| (二) 量子计算云平台测评体系多维度分析..... | 24 |
| (三) 量子计算云平台测评实践案例..... | 27 |
| 五、发展态势总结及建议..... | 30 |
| (一) 商业模式初步尝试，多方合作热度提升..... | 30 |
| (二) 行业巨头大力推动，联盟生态初具雏形..... | 31 |
| (三) 云化能力仍需提升，标准测评亟待推进..... | 31 |
| (四) 发展建议..... | 32 |

图 目 录

| | |
|-------------------------------------|----|
| 图 1 量子计算云平台功能实现示意图..... | 2 |
| 图 2 量子计算处理器物理比特数和量子体积发展趋势..... | 5 |
| 图 3 量子计算云平台服务探索整体视图..... | 11 |
| 图 4 IBM 量子计算云平台发展时间线..... | 15 |
| 图 5 Google 量子计算云平台发展时间线..... | 15 |
| 图 6 D-wave 量子计算云平台发展时间线..... | 16 |
| 图 7 Amazon 量子计算云平台发展时间线..... | 17 |
| 图 8 Microsoft 量子计算云平台发展时间线..... | 17 |
| 图 9 Xanadu 量子计算云平台发展时间线..... | 18 |
| 图 10 Honeywell 量子计算云平台发展时间线..... | 19 |
| 图 11 Strangeworks 量子计算云平台发展时间线..... | 20 |
| 图 12 量子计算云平台测评原则维度图..... | 25 |
| 图 13 量子计算云平台能力成熟度及测评指标维度..... | 25 |
| 图 14 量子计算云平台服务时间测评示意图..... | 27 |

表 目 录

| | |
|-----------------------------|----|
| 表 1 量子计算软件发展概况..... | 9 |
| 表 2 量子计算云服务行业应用探索概况..... | 12 |
| 表 3 某量子计算云平台服务访问时间测试结果..... | 28 |
| 表 4 量子计算云平台虚拟机性能基准测试结果..... | 29 |

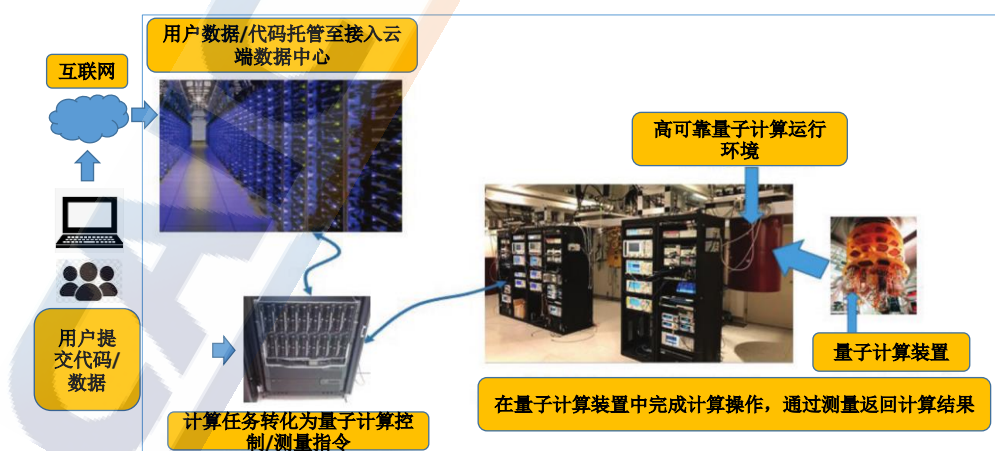
过去的几年，量子计算取得了突破性进展，量子计算优越性已得到实验性验证，产业界与学术界纷纷加大研究投入，推动量子计算进入到实用化优势探索新阶段。孕育出现的量子计算云平台作为其中展示量子计算实用化优势和输出能力的途径之一，成为量子计算领域发展热点。2021 年量子计算云平台的硬件、软件、服务应用探索、企业发展、测评探索等方面都不乏亮点。本报告在《量子云计算发展态势研究报告（2020）》提出的量子云计算总体技术体系架构、服务类型、测评体系基础上，对今年量子计算云平台取得的多方突破进行跟踪研判，持续开展量子计算云平台的测评实践工作，最后总结提炼总体发展态势。主要研究结论如下：

- **技术发展方面：**多种硬件技术体系并举，量子计算模拟器成为量子计算云平台的重要能力补充；软件开发活跃，开辟了量子芯片辅助设计软件和量子计算通用操作系统的新赛道。此外，经典云计算为量子计算云平台提质加速，成为量子计算逐步走向商用化的重要支撑。
- **服务应用方面：**NISQ 时代依托量子计算云平台的应用探索加速，科研、教育和诸多行业均有望成为量子计算实用化优势的受益者。
- **企业参与度方面：**国际企业多元发展，竞争与合作并存；国内科技企业、初创企业、研究机构表现活跃，不断为国内量子计算发展贡献原生力量。

- **能力测评方面：**进一步提出量子计算云平台的测评技术成熟度与能力指标，基于量子计算云平台服务时间、虚拟机性能基准测评实践案例进行探索展示。
- **趋势建议方面：**总结量子计算云平台在商业模式、生态构建及标准测评三方面发展趋势，提出我国量子计算发展建议。

一、量子计算云平台技术发展趋势

目前量子计算机的潜在应用途径包括在用户本地搭建独立运行的量子系统以及接入量子云平台提供远程访问与算力服务等。量子计算装置通常对环境的要求苛刻，运行条件和维护成本高，与之配套的量子计算运行软件也具备较高的专业门槛，导致本地部署和使用的难度提升，维护成本也较高。近年来出现的量子计算云平台将经典云计算软件工具、通信设备及 IT 基础设施等与量子计算处理器硬件进行有机结合，为用户提供直观化及实例化的量子计算接入访问与算力服务，将成为未来量子计算能力输出、应用探索和商业推广的主要方式之一。



来源：根据《Quantum Computing and Prospects》整理

图 1 量子计算云平台功能实现示意图

量子计算云平台集成了量子计算与经典云计算的特点与优势，基本功能实现如图 1 所示。用户所设计的计算任务，通过量子计算软件进行编程设计后，转换为程序语言通过互联网提交至云端，由云端服务器转换为相应的量子控制信号后，操控量子计算装置进行运作与测量，最终将得到的计算结果，再通过互联网返回给用户。量子计算云平台符合用户对于经典云计算的操作习惯，可满足量子计算研究人员、教学人员、开发人员等多方需求，同时各方用户的试用和反馈也将成为量子计算云平台的贡献者，形成演进闭环，共同促进量子计算技术发展。

（一）量子计算硬件多种技术体系竞相发展

1. 量子计算处理器

量子计算处理器是量子计算云平台的“后端基石”，也是当前阶段量子计算亟待突破的“核心命题”。量子处理器主要技术路线包含超导、离子阱、硅基半导体、光量子、NV 色心等，呈现多元化发展态势。

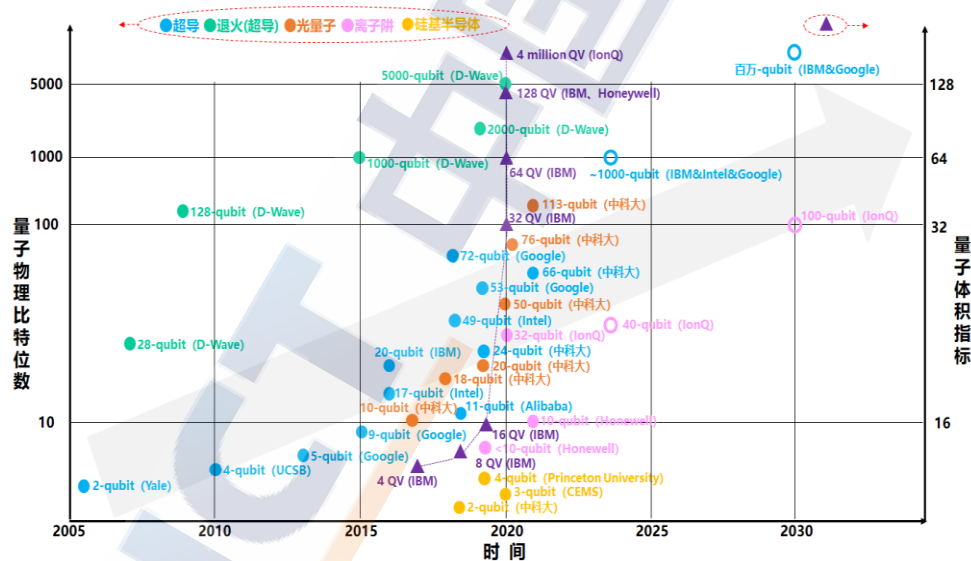
超导量子计算被业界认为是有可能实现通用化量子计算的技术路线之一，在量子计算保真度、ns 尺度下的工作能力、与微波电子器件兼容性等方面具备优质潜力，处于稳健提升的发展期。国际科技巨头 IBM、Google 等在超导量子计算方面持续发力，样机研发占据领先地位，纷纷制定超导量子计算发展的宏伟蓝图。IBM 于 2020 年发布超导量子计算路线图，计划 2021 年推出 128 位物理比特“鹰”平台，2023 年推出 1123 位“秃鹫”平台，2030 年目标达到上百万位。

Google 在 2019 年报道基于 53 位量子物理比特超导处理器“悬铃木”率先实验验证了量子计算优越性，2020 年报道基于超导处理器开展的量子化学应用验证实验。“悬铃木”的二维耦合与可调耦合器芯片架构已成为超导量子计算硬件设计典范。2021 年发布超导量子计算路线图，计划 2023 年实现 1000 位物理量子比特，2029 年实现百万物理量子比特可纠错量子计算。

离子阱技术路线在量子比特数量和量子体积等指标上屡创新高，在量子比特容量、质量和可扩展性方面取得突破，成为工业界青睐的候选技术之一。如美国 Honeywell 公司 2021 年报导了基于量子电荷耦合器架构的离子阱量子计算原型机 H1，具备 10 位全连接高保真度物理比特，量子体积指标达到 128，并计划 2023 年实现环形真空腔的 40 位物理比特原型机 H2，2030 年实现基于离子阱栅格集成光学控制的模块化百位物理量子比特。

硅基半导体技术路线与现代半导体集成电路工艺兼容，在可扩展性、可集成性和工业化量产等方面具有潜在优势，目前取得了一定工程化突破，包括实现了高保真度单量子比特门制备、高保真度两量子比特门以及高速高保真度的比特读出等，并提出了可扩展的半导体量子芯片方案。光量子集成计算技术路线具有相干时间长、可常温运行的显著优点及实用化潜力，也受到资本市场的青睐。NV 色心技术路线在 ms 量级的电子自旋相干时间、室温条件下实现相干操控和读入读出等方面具有技术特色，目前主要用于量子计算科研、教学和原理性演示等。

我国科学家不断努力，在超导、离子阱、光量子等多个技术路线与欧美学术研究方面的差距在缩小，局部研究成果达到了全球先进水平。在空间光学量子计算实验方面，2020 年中科大团队报导基于 76 光子的单模压缩光学实验系统——九章，在高斯玻色采样问题模拟方面再次证明了量子计算优越性；2021 年预印本论文报道升级为九章 2.0 系统，光子数量提升至 113。在超导量子计算方面，2021 年 5 月中科大报道采用三维连接新方案和谐振腔比特间耦合机制，研制出 62 位物理量子比特超导量子计算原型机——祖冲之号，实验演示二维量子随机行走，2021 年 6 月预印本论文报道 66 位超导物理量子比特的量子随机线路采样测试，进一步验证了更大规模的量子计算优越性。



来源：中国信息通信研究院公开材料整理（2021.9）

图 2 量子计算处理器物理比特数和量子体积发展趋势

在量子计算硬件不断发展的过程中，综合评价指标也呈现多元化研究态势。继 IBM 提出量子体积指标后，IonQ 基于量子算法在量子计算机上的运行性能，提出了算法量子比特评价指标；美国量子软件

初创公司 Zapata Computing 基于 NISQ 计算架构，提出了应用基准度量指标。随着未来量子计算标准的推进与完善，量子计算综合评价指标和测试基准将成为衡量量子计算云平台算力提供的重要依据。

2. 量子计算模拟器

量子计算模拟器基于经典计算资源和软件算法，实现量子计算状态演化和运行逻辑的模拟仿真，是量子计算云平台的特有计算后端，成为量子计算技术验证的重要补充。模拟量子计算的经典信息辅助处理也是量子计算领域的关注技术之一。量子计算模拟器一方面缓解了当前量子计算资源的稀缺性问题，在一定程度上降低了对真实量子计算物理条件的依赖，促进量子计算科学实验和应用验证在软件和算法层面的顺利进行；另一方面为复杂含噪环境下的量子计算模拟、量子物理现象推演、量子启发式算法实现、真实量子芯片计算验证等提供了辅助实现工具。

近年来，国内外科技企业也加大了量子计算模拟器的研究和应用推广力度，取得了突破性成果。2021 年 5 月，Amazon 在 Amazon Braket 量子云平台上提供完全托管的密度矩阵模拟器 DM1，用户可模拟最高具有 17 个量子比特的量子噪声线路。2020 年 9 月，华为量子团队发布了 HiQ 3.0 量子计算模拟器及开发者工具，推出了量子组合优化求解器 HiQ Optimizer 和张量网络计算加速器 HiQ Tensor，在我国天河二号超级计算机上部署了 HiQ 模拟器，可进行超大规模的量子计算模拟器仿真任务。2020 年 12 月，阿里巴巴开源了自研量子计算模拟器——太章 2.0，对分布式张量网络收缩算法进行了优化改进，支持

量子硬件设计、量子算法测试，以及在材料、分子发现，优化问题和机器学习等领域内的探索应用；芯片巨头 NVIDIA 也看好量子模拟器的算力需求，2021 年 4 月推出名为 cuQuantum 的开发工具组，让开发者基于 NVIDIA GPU 对量子计算模拟器进行计算加速。

（二）多种量子计算软件并举研发迭代活跃

1. 基础运行类软件

量子基础运行类软件系统与量子硬件、经典硬件紧密相关，也是量子计算机运行所需要的核心控制类软件。其中量子编译软件，主要规范量子编程的边界，保证量子程序编译执行的正确性，提供完善的语法规则用来协调和约束量子操作、经典操作，安全的语义用来融合量子计算和经典计算之间的语义差异；量子测控软件，可用于量子计算纠错，提供了测量结果精准反馈，量子芯片高效校准等功能，是量子计算处理器稳定运行的重要保障；此外，量子芯片设计 EDA 软件的出现，有助于高效完成量子芯片的自动化辅助设计、参数的标定与优化、芯片封装设计等功能。依托云平台所提供的量子计算芯片辅助设计服务，可加速量子计算芯片的研发与迭代，实现量子计算硬件与软件人员的合作共赢。

2. 计算开发类软件

量子软件系统中的开发层软件，提供了研究量子算法、开发量子应用的工具链体系，主要包含了量子编程语言和量子软件开发工具。量子编程框架类软件用来编写运行在量子计算机中的量子算法和程序，经过封装后还可提供常用的量子计算组件和量子算法库，进行量

子程序的快速开发；量子汇编类软件与量子计算硬件对接，提供了统一表示量子算法程序的数据及接口。

3. 应用服务类软件

量子应用服务类软件，提供了面向多个领域的量子云计算技术应用套件，包括解决特定问题的算法和应用程序，同时在云端提供了人机交互的应用环境，其中量子化学、量子机器学习和量子组合优化类是其中较为典型的应用服务软件。量子计算+行业应用探索加速，刺激应用服务类软件不断涌现，并趋于多样化，从而有助于降低量子云计算使用门槛，对行业用户群体形成“虹吸效应”。

量子计算应用套件，可加快量子云计算资源的应用服务开发，支持开发人员将经典和量子任务分发到适当的系统，使得任务能够匹配到适合的硬件资源，同时结合量子处理器的计算规模和能力，对任务进行分段处理，实现计算资源优势互补。

4. 通用系统类软件

量子计算软硬件多方探索加速对量子计算操作性和兼容性的要求也随之提升，在此背景下量子计算通用操作系统软件诞生问世，开辟了量子软件新赛道。量子计算通用操作系统可实现量子资源系统化管理和自动任务调度，保证量子计算任务高效执行，屏蔽了多种量子计算硬件的差异性，简化了量子计算操控和使用，未来有望加速量子计算高效运行，实现量子计算资源共建共享。

5. 量子计算软件小结

如表 1 所示，目前多类量子计算软件发展表现活跃。量子计算软

件由于专业门槛高，交叉学科研发人员还十分匮乏，目前仍处于培育初期，开放化和开源化成为量子计算软件发展的主要趋势。

表 1 量子计算软件发展概况

| 软件类别 | | 软件名称 | 软件厂家 |
|-------|---------------|---|--------------|
| 基础运行类 | 量子编译软件 | QASM、eQASM、QASM-HL、Quil、OpenQASM、f-QASM、Jaql 等 | |
| | 量子芯片设计 EDA 软件 | Qiskit Metal | IBM |
| | | KQCircuits | IQM |
| | | “昆昇”量子芯片设计服务云平台 | 上海昆峰量子科技有限公司 |
| | 量子测控软件 | LabOne | 苏黎世仪器公司 |
| | | HVI | 是德科技 |
| | | Optimus | Google |
| | | PyQCat | 本源量子 |
| 计算开发类 | 量子语言 | QCL、Q#、Qiskit、Cirq、QRunes、Quipper、Silq 以及 Scaffold 等 | |
| | 量子编程框架 | QPanda、QDK、Cirq、Qiskit、ProjectQ、HiQ、Forest 以及 SuperstaQ 等 | |
| | 量子中间表示 | OriginIR、Quil、Blackbird 等 | |
| 应用服务类 | 量子计算应用套件 | Qiskit | IBM |
| | | Quantum 开发工具包 | Microsoft |
| | | SuperstaQ | Super.tech |
| | | HiQ | 华为 |
| | | Qpanda2 | 本源量子 |
| | 量子化学软件 | OpenFermion | Google |
| | | ChemiQ | 本源量子 |
| | | HiQ Fermion | 华为 |
| | 量子人工智能软件 | Quantum SVM | IBM |
| | | Quantum-Fog Quantum-Edward | Artiste |
| | | TensorFlow Quantum | Google |
| | | VQNet | 本源量子 |

| 软件类别 | | 软件名称 | 软件厂家 |
|-------|-----------|----------------|-----------|
| | | Paddle Quantum | 百度 |
| 通用系统类 | 量子计算机操作系统 | Deltaflow | Riverlane |
| | | ParityOS | ParityQC |
| | | 本源司南 | 本源量子 |

来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理（2021.9）

（三）经典云计算可为量子计算提质加速

经典云计算可为量子计算发展保驾护航，是未来量子计算逐步走向商用化的重要支撑。

1. 计算资源虚拟化

随着量子计算云平台上的应用规模持续扩大，量子 and 经典计算资源虚拟化技术的重要性也随之提升。通过软件栈实现量子计算硬件和经典计算集群的仿真，可以合理调配异构计算资源，实现量子与经典计算资源弹性综合利用，降低成本，加速量子计算服务落地与能力扩展进程。

2. 分布式计算存储

在量子计算云平台上通常需要处理更具挑战性的计算密集型和数据密集型任务。分布式存储技术可保证数据的高可靠性，提升计算吞吐量和读写效率，减少服务等待时间；此外经典分布式并行计算技术（例如 Map Reduce 等）可有效实现多用户、多任务、高并发下的计算资源匹配，提升云平台业务感知能力和用户体验。

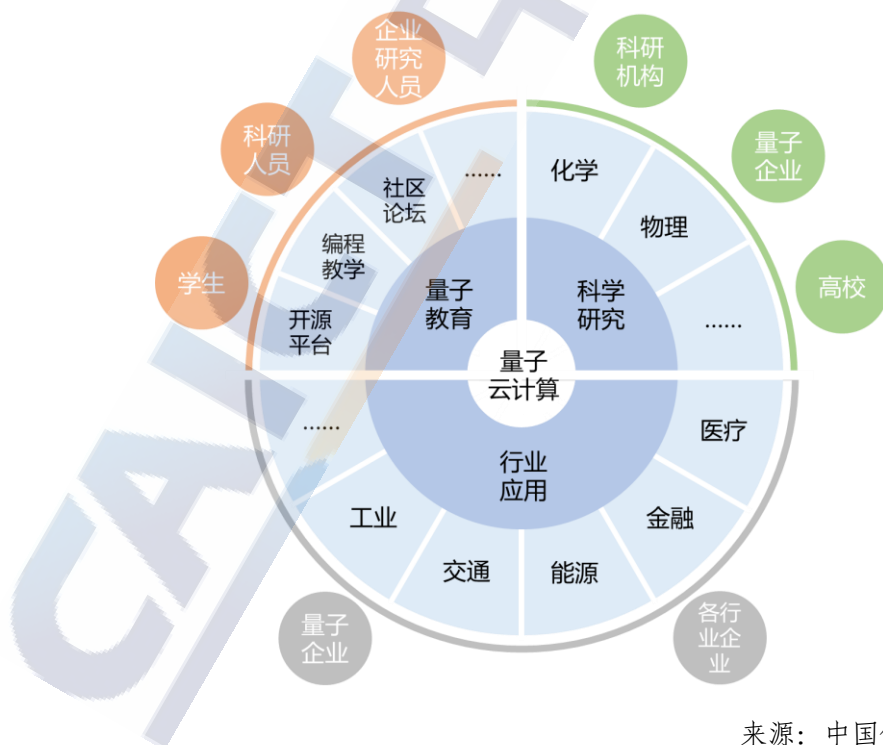
3. 云平台通用管理

随着未来量子计算逐步走向商用，量子计算云平台综合管理要

求也随之提升。云平台通用管理技术通过有效机制可保证跨地域、多节点的状态同步，避免单点故障，实现负载均衡，保证系统及服务安全，提供持续稳定、非间断的量子计算云服务。

二、量子计算云平台上开展应用服务探索

量子计算的优越性已经得到实验性验证，目前已进入实用化优势探索新阶段。如图 3 展示了量子计算云平台有望开展的服务探索整体视图，未来针对各个行业的服务探索有望不断涌现。量子计算云平台不仅为科研工作者提供了利用量子计算解决科研难题的工具，同时也能将量子计算方法与本领域的实际应用问题相结合，探索出更多契合需求的量子计算潜在解决方案。此外，量子计算云服务还为量子计算的教育普及提供了新方式，通过免费向用户提供量子计算环境，可为初学者提供教学引导，拨开量子计算神秘迷雾。



来源：中国信息通信研究院

图 3 量子计算云平台服务探索整体视图

（一）加速科研领域突破

在科学技术发展日新月异的今天，众多领域涌现出许多计算复杂度高、数据计算量大的基础问题与挑战。如化学领域中的材料设计与发现、生物领域中的分子作用研究与药物开发，以及物理领域中的量子动力学模拟、量子相变等。以量子计算云平台作为科研工具，将科技需求与量子计算优势有效结合，有望在一些挑战性科学难题解决上取得突破。另外，基于量子计算云平台提供的软硬件资源，可进一步优化开展量子计算硬件研发、量子线路优化、量子算法验证等工作，迄今为止基于 IBM 量子计算云平台所完成的论文已达数百篇。通过云端所部署的量子计算服务，可面向全球提供真实或仿真的量子计算环境，助力科学研究取得新突破。

（二）深度挖掘行业潜能

量子云计算服务不仅在科研方面探索应用，同时也渗透到了多个行业应用研究之中，如继 Google 在 2017 年推出开源量子软件 OpenFermion 提供量子化学模拟功能之后，2019 年华为的量子计算云平台 HiQ 开始提供一站式 VQE 量子化学模拟云服务；2021 年 7 月本源量子正式推出量子化学软件 ChemiQ，在云平台中提供专业的量子化学模拟服务。如表 2 所示，医疗、金融、能源等行业有望最先成为量子计算云服务应用的受益者。

表 2 量子计算云服务行业应用探索概况

| 行业 | 解决方案 | 参与机构 | 应用案例 |
|----|--------|--------------------------|-----------------------------------|
| 医疗 | 量子机器学习 | 剑桥量子计算（CQC）、中美冠科生物（Crown | 利用量子计算分析基因数据，发现生物标志物，从而寻找新的肿瘤治疗药物 |

| 行业 | 解决方案 | 参与机构 | 应用案例 |
|----|--------|--|---|
| | | Bioscience）、JSR 生命科学（JSR Life Sciences）等 | |
| | 量子化学模拟 | Kuano、Amazon 等 | 探索新冠病毒 SARS-Cov-2 主要蛋白酶的抗病毒药物 |
| | 量子机器学习 | ApexQubit 等 | 寻找无副作用的药物 |
| | 量子统计力学 | Aqemia 等 | 预测药物特性 |
| | 量子组合优化 | 德国国家癌症研究中心（DKFZ）等 | 为患者定制个性化的癌症治疗方案 |
| 金融 | 量子组合优化 | 毕马威（KPMG）等 | D-Wave 的 2000Q 量子退火处理器对股票交易进行组合优化研究 |
| | 量子机器学习 | AlgoDynamix 等 | 推出量子计算财务分析行为预测云服务，为用户提供多类别的资产预测分析 |
| | 量子计算 | —— | 高频交易 |
| 能源 | 量子机器学习 | —— | 对能源生产、运输和加工过程中对设备产生的腐蚀进行模拟和预测 |
| | 量子组合优化 | —— | 分布式能源资源整合和利用机制，合理调配资源，实现成本最优化 |
| | 量子人工智能 | —— | 检测运作数据中的异常情况，应对极端天气事件的发生，并寻找最优的恢复方法，提高能源供应可靠性 |

来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理（2021.9）

（三）助力普及量子教育

由于现阶段科研人员、开发人员、学生等现有或潜在的用户团体对量子计算相关机制理解存在差异，如何尽快普及量子计算知识，成为推动量子计算生态良性发展的重点工作之一。量子计算云平台的建设，能够为用户提供灵活、方便的接入形式以便体验和使用量子计算服务。

除了向用户免费开放量子计算云平台的接入访问外，量子计算企业还纷纷推出了云平台使用教程、量子计算社区等一系列的量子教育

服务，促进量子计算普及。如 IBM 公司 Q Experience 的社区生态早在 2016 年就开始建立，以图形和代码编程两种方式为用户提供编程指导，同时开放社区论坛，并定期举办量子编程比赛，激发用户开发与研究的积极性。国内本源量子在 2020 年 9 月上线的本源超导量子计算云平台中也为初学者提供了图形化编程和代码编程两种在线编程方式。

值得关注的是，目前量子计算仍处于 NISQ 的发展阶段，量子硬件设备功能与性能的局限性依然明显，量子计算云平台中真实量子后端为行业所提供的服务仍然存在一定的不稳定性。未来随着量子硬件和软件的能力提升，将逐步对外提供更成熟的量子计算云服务。

三、量子计算云平台提供企业发展态势

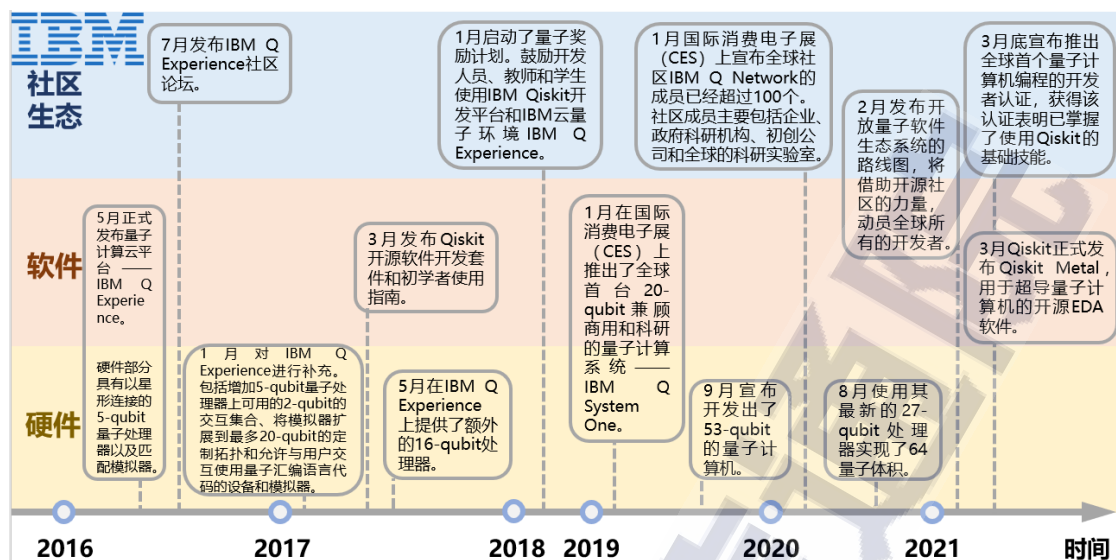
（一）国际企业多元发展，竞争合作并举

近年来国内外量子计算云平台提供玩家不断涌现。初创企业、研究机构和科技企业是其中主要力量，在此领域的企业和机构竞争与合作并举，科技巨头、初创企业、联盟机构在硬件、软件、应用及生态培育方面取得一定突破，呈现出多元化发展特征。

目前国外提供量子计算云平台代表性企业/组织发展情况如下：

1. IBM

IBM 作为全球大型的科技企业，是量子计算行业的先行者，在量子云计算方面具有布局早、投入大的特点，研发布局规划较为完善，硬件、软件研发并驾齐驱，以构筑未来量子计算生态系统作为长期的发展目标。IBM 在量子计算云平台的重要发展节点如图 4 所示。

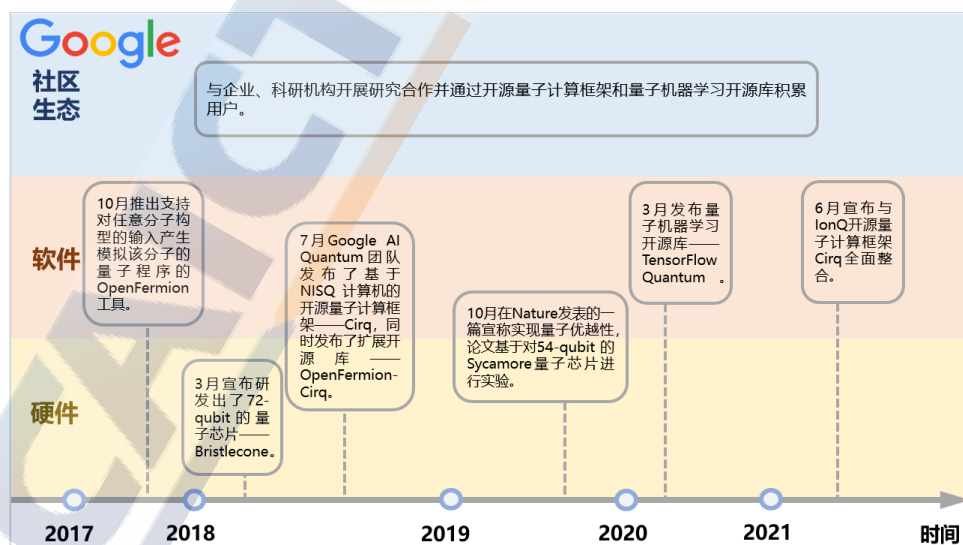


来源：中国信息通信研究院

图 4 IBM 量子计算云平台发展时间线

2. Google

Google 是量子计算领域的另一重要玩家，在量子计算基础科研、硬件研发、软件开发以及应用场景探索等方面稳步发展，阶段性成果斐然，以超导技术路线物理平台研发最为突出。Google 在量子计算云平台方面的重要发展节点如图 5 所示。

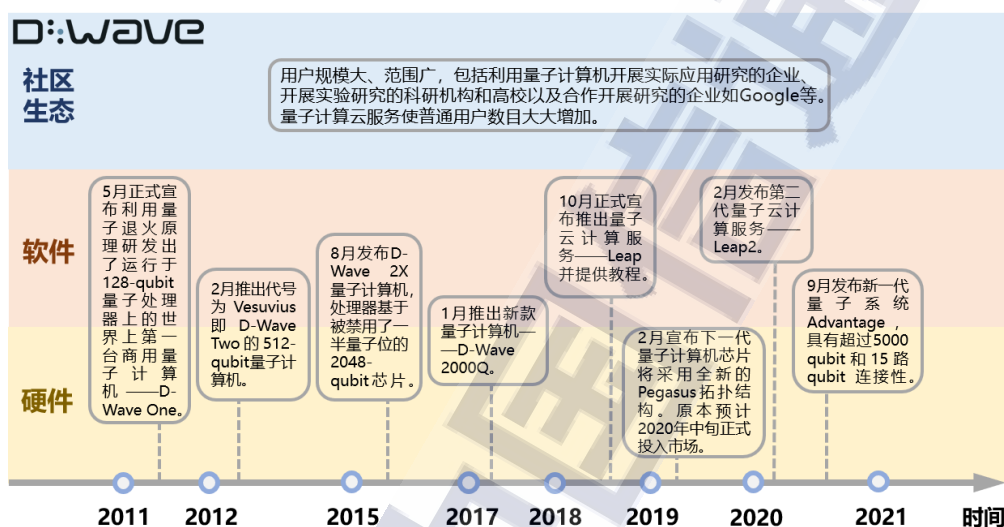


来源：中国信息通信研究院

图 5 Google 量子计算云平台发展时间线

3. D-wave

D-Wave 作为全球最早的量子计算（退火）公司，在量子硬件开发、量子开源软件、量子算法、量子商务和量子计算应用等方面具有长期研发经验，量子退火计算机是量子计算专用机领域的重要方向之一。D-wave 在量子计算云平台方面的重要发展节点如图 6 所示。

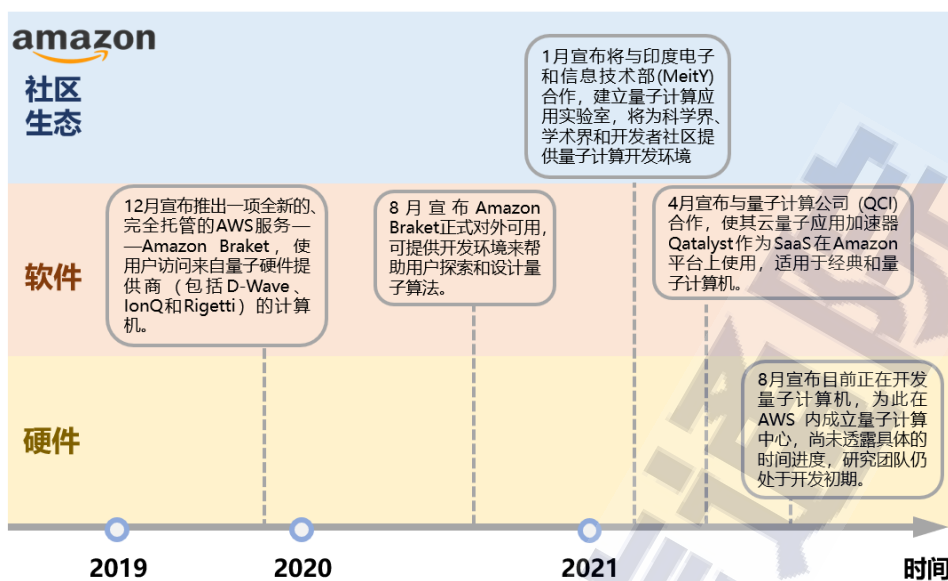


来源：中国信息通信研究院

图 6 D-wave 量子计算云平台发展时间线

4. Amazon

Amazon 在 2019 年入局量子计算领域，发布全托管式 Amazon Web Services (AWS) 解决方案 Amazon Braket，并接入多家量子计算硬件提供商平台，为跨平台的开发人员提供一致体验，探索量子计算技术应用场景，设计运行混合算法。Amazon 在量子计算云平台方面的重要发展节点如图 7 所示。

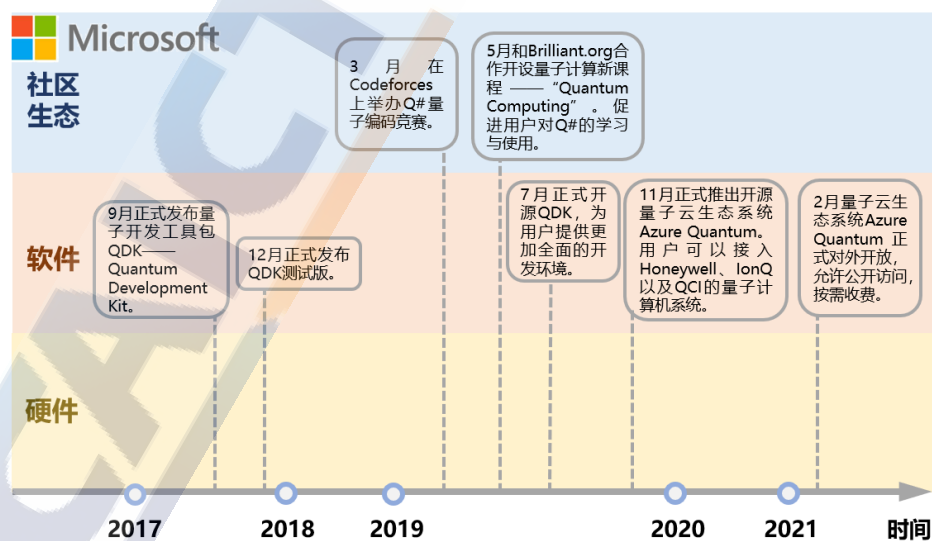


来源：中国信息通信研究院

图 7 Amazon 量子计算云平台发展时间线

5. Microsoft

Microsoft 经过多年研发, 在量子云平台、量子软件研发等发面成果显著, 量子硬件研发主要关注拓扑量子计算路线, 仍处于科学研究探索阶段。Microsoft 在量子计算云平台方面的发展节点如图 8 所示。

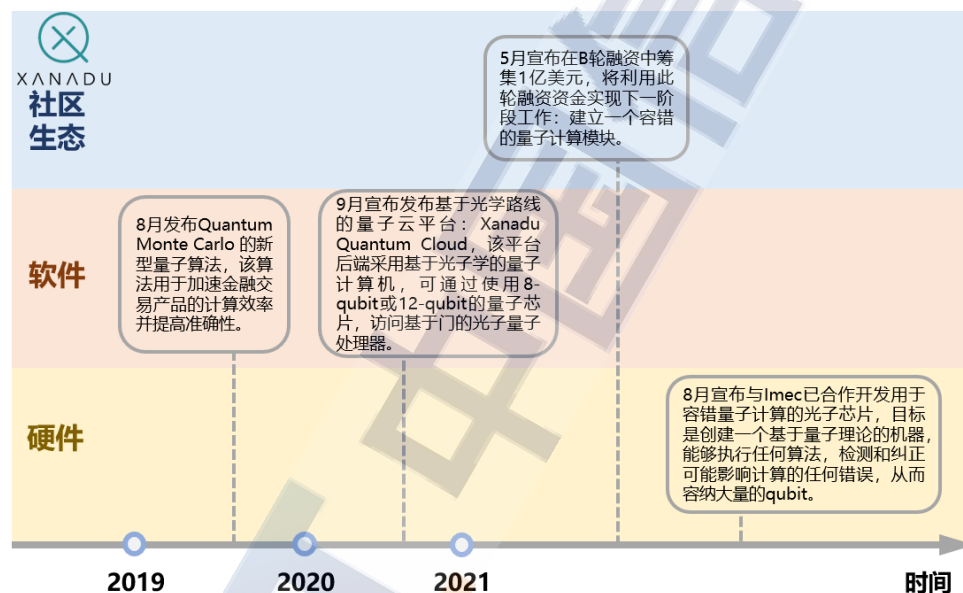


来源：中国信息通信研究院

图 8 Microsoft 量子计算云平台发展时间线

6. Xanadu

Xanadu 成立于 2016 年，布局光子集成量子计算路线，发展目标是提供全堆栈量子计算产品。2020 年发布基于光学路线的量子计算云平台 Xanadu Quantum Cloud，提供开源软件产品包括量子软件 PennyLane 和光量子计算全栈平台 Strawberry Fields，作为量子计算机的开源机器学习平台和跨平台的全栈 Python 库。Xanadu 在量子计算云平台方面的重要发展节点如图 9 所示。

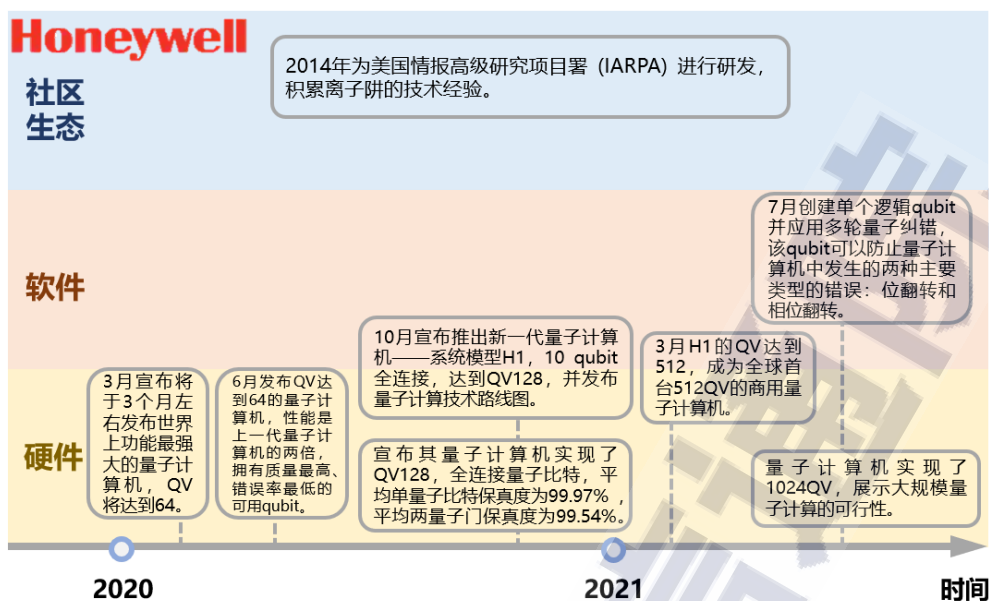


来源：中国信息通信研究院

图 9 Xanadu 量子计算云平台发展时间线

7. Honeywell

Honeywell 是多元化发展的高科技和制造企业，对于量子计算的研究可追溯到 2014 年，主攻离子阱技术路线，采取硬件、软件及量子计算云服务的多方位全栈式发展模式。Honeywell 在量子计算云平台方面的重要发展节点如图 10 所示。



来源: 中国信息通信研究院

图 10 Honeywell 量子计算云平台发展时间线

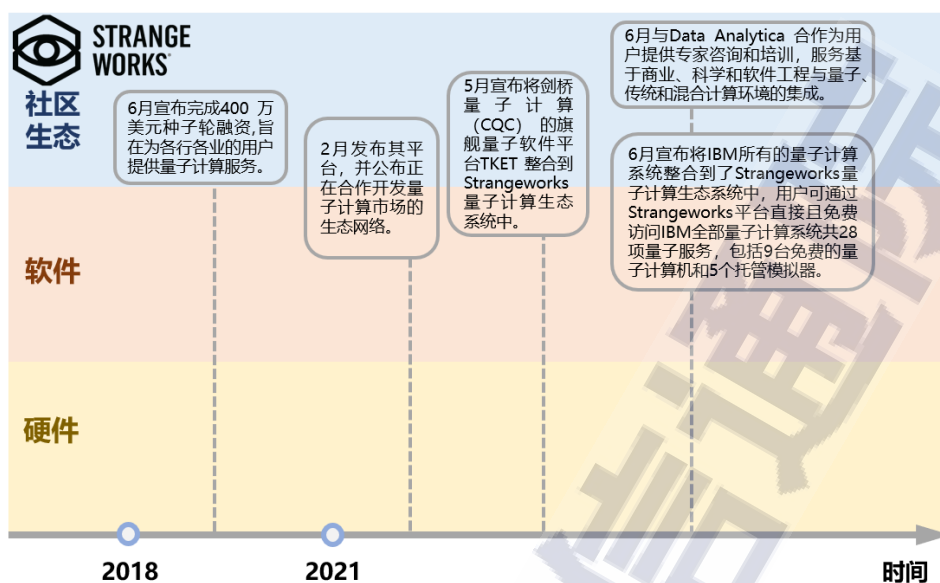
8. QuTech

QuTech 是由荷兰国家应用科学研究院和代尔夫特理工大学于 2013 年联合创立的量子计算机研究机构, 2020 年 4 月推出量子计算云平台 Quantum Inspire, 平台可访问“自旋量子比特”量子处理器和超导量子处理器, 主要面向教育、培训以及应用程序的开发探索, 未来将进一步加大投入扩展云平台的计算能力和功能。

9. Strangeworks

Strangeworks 成立于 2017 年, 利用量子计算开发应用服务 (SaaS) 工具推出开放量子计算云平台, 与多家企业合作整合量子计算领域最新软硬件资源。用户可借助其云平台开发量子算法, 处理量子计算项目, 使用开源社区中的代码、框架和语言库, 访问后端多种类型量子计算硬件资源。Strangeworks 在量子计算云平台方面的重要

发展节点如图 11 所示。



来源：中国信息通信研究院

图 11 Strangeworks 量子计算云平台发展时间线

(二) 国内企业多方发力，积极贡献原生力量

我国量子计算云平台提供企业虽然起步较晚，但紧跟国际企业发展步伐，整体表现非常活跃，汇集了多家科技企业、初创企业、研究机构，不断为国内量子计算发展贡献原生力量。

目前国内提供量子计算云平台的典型企业发展情况如下：

1. 华为

华为 2012 年开始进行量子计算的研究。2018 年推出量子计算模拟器及 HiQ 云平台，平台包括量子计算模拟器与基于模拟器开发的量子编程框架。目前已更新到 HiQ 3.0 版本，新增量子组合优化求解器 HiQ Optimizer 和张量网络计算加速器 HiQ Tensor 两个核心功能模块，同时升级多个功能模块，使得系统功能更完善、性能更优越、适配的应用场景更多。华为致力于提供多领域的量子计算模拟服务，

并推进量子计算软件的开源生态建设。

2. 本源

本源量子成立于 2017 年 9 月，量子业务版图囊括量子芯片、量子云、量子应用、量子测控、量子软件、量子计算机等。2020 年 9 月发布自主可控超导量子计算云平台，可访问搭载 6-Qubit 超导量子处理器的量子计算机 OriginQ Y 悟源。此外，发布量子语言标准 QRunes、量子编程架构 QPanda 以及量子程序开发插件 Qurator-VSCode。2021 年 7 月云平台中的真实量子计算云和仿真训练云模块优化迭代。2021 年 9 月在全国首届量子大会上，发布量子云平台国际版，面向全球用户，提供一站式量子计算机云服务端。

3. 百度

百度 2018 年 3 月成立量子计算研究所，聚焦于量子软件和信息技术应用研究，提供“量脉”、“量浆”和“量易伏”三大量子计算云平台 and 量子应用服务。其中“量脉”是基于云的量子控制平台，用户可使用开源软件开发工具包实现对量子电路脉冲层面的控制；“量浆”是量子机器学习工具集，用户可使用应用工具集搭建并训练量子神经网络；“量易伏”属于云原生量子计算平台，用户可访问量子硬件后端并兼容第三方模拟器和硬件。

4. 腾讯

腾讯于 2017 年开始布局量子计算领域研究，注重基础理论与量子信息技术领域实际应用之间的交叉融合。2018 年初成立量子实验室，提出“ABC2.0”技术布局(AI、RoBotics、Quantum Computing)，

利用人工智能、机器人和量子计算，构建面向未来的基础设施，探索推动以技术服务行业实体。2019 年发布 Simhub 云平台，以此为基础展开量子 AI、化学模拟、制药材料等方面的应用研究，搭建以量子云计算平台为基础的产业生态圈。2021 年 9 月公布量子计算机微体系结构并行化设计和软硬件研究的进展，探索全栈式量子计算平台构建。

5. 阿里巴巴

阿里巴巴自 2015 年与中科院联合成立“中国科学院-阿里巴巴量子计算实验室”，采用光学路线，着眼于量子处理器、量子存储、量子算法和量子计算系统的设计和实现。2017 年发布与中科院联合打造的量子云平台体验版。2018 年研制出量子模拟器“太章”，可模拟 81 位物理比特运算。2019 年研发完成一个可控的量子比特。2020 年 12 月发布阿里云量子开发平台 (ACQDP)，全面开源量子模拟器“太章 2.0”。阿里巴巴研究提供基于量子计算的技术解决方案，并以实现量子计算对人工智能优化领域等的应用为目标。

6. 量旋

深圳量旋科技（简称“量旋”）成立于 2018 年，聚焦桌面型核磁共振量子计算机、超导芯片量子计算机、量子计算软件以及量子计算云平台等方面的自主研发。2019 年 12 月发布桌面型核磁共振量子计算机“双子座”，可实现 2 至 4-Qubit。2020 年 10 月发布通用量子云平台“金牛座”，可访问核磁共振及超导芯片等体系量子计算硬件。量旋提出以超导量子计算为未来技术栈的发展路线，持续推进量子计

算产品更新和实用型超导芯片量子计算机研发。

7. 北京量子院

北京量子院 2021 年 5 月发布超导量子计算云平台，为量子算法和量子模拟研究提供真实的物理测试场景，使量子算法与量子硬件之间紧密连接，该平台提供 8 个近邻耦合的可调频率量子比特，采用简洁直观的图形化界面，并提供 QASM 代码和实时的模拟结果，目前主要用于量子计算的普及教育与科研探索。

8. 量子创新研究院

中国科学院量子信息与量子科技创新研究院（简称“量子创新研究院”）2017 年 10 月与阿里巴巴共同打造“量子计算云平台”体验版上线。2018 年平台接入 11-Qubit 超导量子计算服务。2021 年 2 月平台接入的超导量子计算原型机升级至 12-Qubit。2021 年 4 月推出“知识库”及“答疑解惑”等功能板块。致力于推动量子云平台的全面开放，创造良好的量子计算生态环境，推动量子计算知识普及、科研进步和应用探索。

四、量子计算云平台测评研究与实践

（一）量子计算云平台测评需求与研究进展

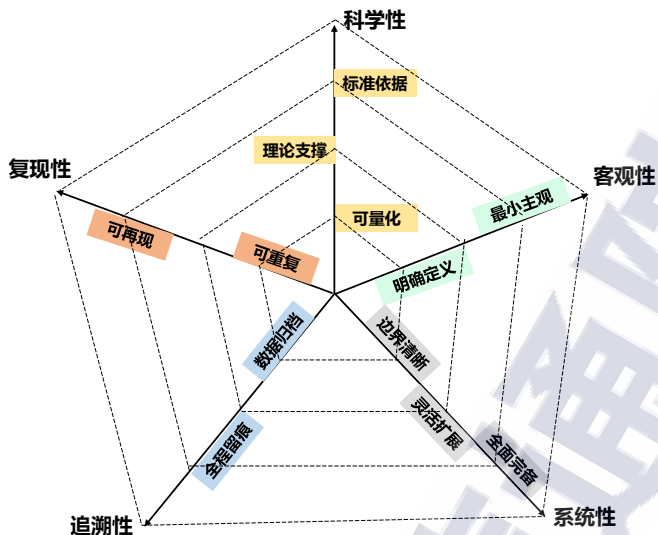
量子计算目前仍处于关键发展时期，其技术研究和先导性技术、应用、服务性质的测评验证需求日益迫切。在此背景下，欧美等发达国家积极开展了量子计算技术验证及平台构建项目。如 2021 年美国能源部桑迪亚国家实验室发布量子科学计算开放式测试床

(QSCOUT)计划，用于建立可供研究团体使用的量子测试平台；美国国防高级研究计划局（DARPA）启动了其量子基准测试项目，其目标是重新发明关键的量子计算度量，并估计达到关键性能阈值所需的量子资源和经典资源（“风洞”计划）；欧盟中 12 家机构联合发起 NEASQC 项目，计划调查大量与噪声中尺度量子计算（NISQ）兼容的工业和金融用例，并为这些用例开发开源 NISQ 编程库，以期促进新用户的量子计算实验，并为量子技术旗舰计划开发软件栈和基准测试。

由于目前量子计算诸多关键技术环节具有显著不确定性，技术的可行性、风险性、容错性和经济性对未来量子计算应用产业会产生决定性的影响，因此全面开展量子计算技术验证和应用探索，对于量子计算整体良性发展至关重要。作为展示量子计算技术及服务能力的主要途径之一，在《量子云计算发展态势研究报告（2020）》基础上，本报告对量子计算云平台测评体系、测评指标和测评实践研究进展情况进行介绍。

（二）量子计算云平台测评体系多维度分析

1. 测评体系持续探索



来源：中国信息通信研究院

图 12 量子计算云平台测评原则维度图

借鉴经典云计算与信息系统的测评方法论，在 2020 年量子计算云平台测评研究框架基础上，如图 12 所示，本报告在测评原则方面开展进一步研究探索，主要体现在科学性、客观性、系统性、追溯性与可复现性五个维度。

2. 技术成熟度与指标



来源：中国信息通信研究院

图 13 量子计算云平台能力成熟度及测评指标维度

如图 13 所示，本研究报告基于 2020 年提出的量子计算云平台测评体系中的五大评测维度(量子云硬件、量子云软件、量子云运维、量子云应用和量子云安全)，进一步研究了技术及服务成熟度能力指标，包括硬件成熟度、软件成熟度、运维成熟度、服务应用成熟度和安全成熟度：

- 量子云硬件成熟度：包括量子计算能力、经典计算能力、资源抽象与控制能力、存储能力、网络传输与数据交换能力等，对应具体指标包括量子比特数、量子体积、计算准确率、可存储量子比特数、页面打开成功率、数据上传下载时延等。
- 量子云软件成熟度：包括量子语言处理能力（汇编能力）、量子程序语言提供能力、算法提供能力、量子全栈能力、量子 API 提供能力等，对应具体指标包括编程语言的可用性、完备性、易用性、可理解性与可扩展性、量子算法库的完备性、易用性、丰富度、正确性等。
- 量子云运维成熟度：包括服务提供能力、平台监控能力、平台管理能力、平台计费能力等，对应具体指标包括用户服务的获得与保证，具体包括服务的可用性、连续性、稳定性、及时性，计费的稳定性与合理性等方面。
- 量子云服务应用成熟度：包括产品能力、开源能力、生态建设能力、注册/活跃用户数等，对应具体指标包括产品可用性、多样性、示范效果等。

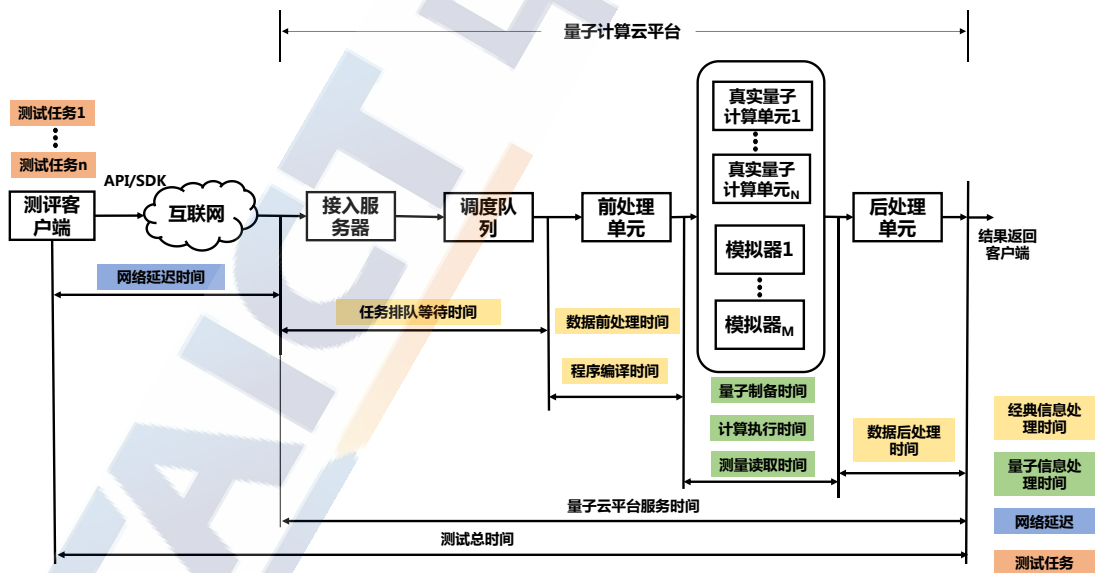
- 量子云安全成熟度：包括系统安全能力、网络安全能力、数据安全能力、物理安全能力、用户隐私保护能力等，对应具体指标包括对用户账号与角色的身份认证、权限管理与访问控制能力、不同用户与应用的隔离性、系统入侵检测与防范能力、系统运行安全审计与跟踪能力、安全漏洞修补能力等。

(三) 量子计算云平台测评实践案例

基于上述测评体系框架，本报告开展了量子计算云平台的测评探索工作，部分实践案例介绍如下：

1. 量子计算云平台服务时间测评

量子云计算任务时间是反映量子计算云平台服务能力的重要指标，也是体现量子计算云平台综合运维能力的重要手段，本报告基于现有开放的量子计算云平台，设计了量子云计算服务时间的测评用例。



来源：中国信息通信研究院

图 14 量子计算云平台服务时间测评示意图

如图 14 所示，基于云平台开放的 SDK/API，在用户测评客户端

可设计多种测试任务通过互联网向量子计算云平台发送计算服务请求，云平台在执行任务的期间，可记录出量子计算 workflow 各环节的执行时间，包括用户计算任务的排队等待时间、数据前处理及程序编译时间、量子计算单元中的量子制备、计算执行及测量读取时间、数据后处理时间等。

表 3 某量子计算云平台服务访问时间测试结果

| 测试指标 | 计算后端 | 轻量级计算任务 | 中等规模计算任务 | 大规模计算任务 |
|--------------------------|------------|---------|----------|---------|
| 数据前处理 &程序编译 时间(us) | 真实量子计算单元 1 | 11134 | 15800 | 15819 |
| | 真实量子计算单元 2 | 9065 | 10730 | 12159 |
| 计算执行时 间(us) | 真实量子计算单元 1 | 75 | 786 | 10134 |
| | 真实量子计算单元 2 | 242 | 1664 | 16280 |
| 测量读取时 间(us) | 真实量子计算单元 1 | 34 | 318 | 566 |
| | 真实量子计算单元 2 | 22 | 122 | 202 |
| 数据后处理 时间(us) | 真实量子计算单元 1 | 219 | 1845 | 9169 |
| | 真实量子计算单元 2 | 64 | 484 | 1667 |
| 任务排队时 间(us) | 真实量子计算单元 1 | 10512 | 17707 | 32109 |
| | 真实量子计算单元 2 | 2247 | 6440 | 15633 |

来源：中国信息通信研究院

本报告根据量子计算任务规模，设计了三种类型的测试任务集（轻量级计算任务、中等规模计算任务和大规模计算任务），基于三种测试任务各创建 100 个测试用例，对某量子计算云平台的服务时间进行测试和统计评估。表 3 为在量子计算云平台两种真实量子计算后端下的多个处理环节服务时间平均值。根据量子云运维成熟能力指标体系，基于测试结果，可对量子计算云平台的服务能力进行持续性测评，有助于量子计算服务能力的优化改进和标准化工作的进一步开展。

2. 量子计算虚拟机性能基准测评

量子计算虚拟机是当前量子计算云平台所提供 Q-IaaS 服务方式之一，为量子计算初学者、应用开发者提供了软硬件执行环境，对于数据预处理、任务调度、量子模拟器及混合量子计算运行起到重要支撑作用。本报告利用目前经典云计算的基准测评工具，对国内外多家量子云平台提供的量子计算虚拟机开展初步测试验证。

表 4 量子计算云平台虚拟机性能基准测试结果

| 测试指标 | 测试基线 | 量子云计算虚拟机 1 | | 量子云计算虚拟机 2 | |
|--|-----------------|--------------------|--------|---------------------|---------|
| | | 测试结果 | 测试得分 | 测试结果 | 测试得分 |
| 字符串处理性能 | 116700.0 lps | 38250922. 0 lps | 3277.7 | 20097396 0.5 lps | 17221.4 |
| 浮点数操作的性能 | 55.0 MWIPS | 4000.0 MWIPS | 727.3 | 44462.2 MWIPS | 8084.0 |
| 系统调用吞吐量 | 43.0 lps | 2571.5 lps | 598.0 | 1221.6 lps | 284.1 |
| 文件传输速率 (Copy 1024 bufsize 2000 maxblocks) | 3960.0 KBps | 112339.5 KBps | 283.7 | 14576.9 KBps | 36.8 |
| 文件传输速率 (Copy 256 bufsize 500 maxblocks) | 1655.0 KBps | 8121.3 KBps | 169.9 | 3654.5 KBps | 22.1 |
| 文件传输速率 (Copy 4096 bufsize 8000 maxblocks) | 5800.0 KBps | 379466.7 KBps | 654.3 | 55897.3 KBps | 96.4 |
| 每秒进程管道内 交换整数次数 | 12440.0 lps | 245723.2 lps | 197.5 | 2271245.9 lps | 1825.8 |
| 每秒管道读写吞 吐量 | 4000.0 lps | 35111.0 lps | 87.8 | 182214.5 lps | 455.5 |
| 每秒子进程创建 回收次数 | 126.0 lps | 5808.9 lps | 461.0 | 13344.4 lps | 1059.1 |
| 每秒单进程脚本 并发拷贝次数 (n=1) | 42.4 lpm | 4933.5 lpm | 1163.6 | 83.0 lpm | 19.6 |
| 每秒单进程脚本 并发拷贝次数 | 6.0 lpm | 1002.0 lpm | 1670.0 | 5.7 lpm | 9.4 |

| 测试指标 | 测试基线 | 量子云计算虚拟机 1 | | 量子云计算虚拟机 2 | |
|-------------|-------------|--------------|------|--------------|-------|
| | | 测试结果 | 测试得分 | 测试结果 | 测试得分 |
| (n=8) | | | | | |
| 一次系统内核调用的代价 | 15000.0 lps | 131414.8 lps | 87.6 | 930460.4 lps | 620.3 |
| 综合得分 | 1.0 | 445.5 | | 287.0 | |

来源：中国信息通信研究院

如表 4 所示，本报告对目前量子计算云平台上的两种量子计算虚拟机性能进行测试，对量子计算云平台 Q-IaaS 虚拟机部分服务能力进行测评探索，测评指标重点关注量子计算虚拟机的浮点型数据计算性能、数据读写性能、系统吞吐量、内核调用性能等，根据基线指标进行单项和综合打分。测评结果表明由于目前量子计算云平台尚在建设和运营初期，为用户免费开放和试运行的虚拟机性能与经典云计算商用虚拟机还存在一定差距。随着量子计算商业探索进程的加速，以及用户对量子计算云平台服务能力要求的提升，量子虚拟机的性能和服务质量保证也是值得关注的重要环节。

五、发展态势总结及建议

（一）商业模式初步尝试，多方合作热度提升

虽然量子计算的硬件技术路线尚未收敛，量子计算软件也在发展初期，但基于量子计算云平台开展的商业服务探索已经展开。国外的 AWS、D-wave、Microsoft 以及国内的本源量子等企业借鉴经典云计算的运营经验，尝试采用按时即价、会员定价、操作定价的多种策略，对不同需求的用户初步开展了付费商业服务。随着量子云计算技术的不断进步，其商业化、市场化和产业化也会逐步成熟。

量子计算云平台逐步成为多方开展合作的综合性平台，软件和硬

件提供方通过量子计算云平台进行资源的有机整合和优化利用，实现多方共赢。例如 Honeywell 与剑桥量子计算公司宣布合并，未来依托云平台提供更强的软硬件服务，IonQ 宣布与 Google 开源量子计算框架 Cirq 全面整合，在云端实现多种量子软件框架访问，Strangeworks 积极构建第三方量子计算云平台，为多个量子云计算企业引流，构建活跃的量子计算社区。

（二）行业巨头大力推动，联盟生态初具雏形

量子计算云平台也是产业生态培育重要推进器。当前国内外多个企业正在依托量子计算云平台积极开展联盟生态培育与活动推广工作，如 IBM 牵头成立的量子计算联盟 Q Network 中 160 个国家、超过 100 家组织、20 万用户使用了 Q Experience 量子计算服务，2021 年举办全球挑战赛，已超过 1400 多名选手参赛，在云平台上累计提交 7000 多次挑战任务；Microsoft 主导成立了成立“微软量子网络”和“西北量子联盟”，与全球高校、研究机构、产业界一道共同推动量子计算的发展；我国本源量子也建立了本源量子计算产业联盟（OQIA），为行业用户提供量子计算云平台，积极探索量子计算在金融、化学等行业的应用落地，探索培育我国量子计算产业生态。

（三）云化能力仍需提升，标准测评亟待推进

量子计算应用服务的热度提升和用户规模的扩大，也加速了量子计算云平台相关技术的发展。受经典云计算启发，一些新颖的量子计算优化技术不断涌现。例如 IBM 发布了 Qiskit Runtime 量子计算机容器化服务，能够最大限度地利用计算时间，最小化等待时间，所发布

了新的量子内核对齐算法，为用户按需提供特定算法和计算任务的最佳匹配量子内核，显著提升了量子应用实验的执行效率。

量子计算标准化对于量子计算的产业化、规模化和商用化具有至关重要的意义，目前国内外正在积极开展量子计算的预标准化研究和测评探索工作。量子计算云平台是技术实验、接口开放、数据提供和技术研讨的综合体，在量子计算标准制定过程中将会发挥重要作用，以云平台为对象的测评和标准化推进也是其中关键环节。

(四) 发展建议

量子计算云平台是未来展示量子计算能力和探索服务应用的重要途径。全球量子计算技术发展加速大背景下，我国在该领域总体发展势头良好，但在基础硬件、软件开发、应用探索力度和产业培育方面与欧美发达国家相比仍然具有不小差距。

建议我国进一步完善量子计算领域发展战略与规划，基于量子计算云平台联合产学研用各方资源与多方力量，形成技术研发、应用探索、标准与测评等多维度分工协同机制与合作模式，以量子计算云平台为载体，积极开展通用技术软件开发、联合应用探索、及推广科普教育等工作，共同推动我国量子计算领域可持续健康发展。

中国信息通信研究院 技术与标准研究所

地址：北京市海淀区花园北路 52 号

邮编：100191

电话：010-62300331

传真：010-62300123

网址：www.caict.ac.cn

