

量子云计算发展态势 研究报告 (2020 年)

中国信息通信研究院技术与标准研究所
2020 年 10 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

人类正处于第四次工业革命的开端，量子计算则被视为继人工智能之后，又一个具有颠覆性影响的领域。当前，量子计算处在快速发展阶段，新技术层出不穷，随着量子计算硬件、软件、配套平台的不断进步，量子计算对行业吸引力随之提升。以何种方式展示量子计算优势、体现商业应用潜力是量子计算领域的重点关注方向。在此背景下，量子云计算将量子计算与经典互联网相结合，依托经典信息网络提供量子计算硬件与软件相关的普惠服务，成为未来量子计算能力输出的主要途径之一。

国内外云计算企业、初创公司和科研机构看好量子云计算产业与应用的发展潜力，在技术与服务模式方面各具特色，并开展了提前布局。技术方面，量子云计算技术架构逐渐成型；应用方面，量子云计算服务探索开始兴起；产业方面，量子云计算发展态势良好。

本蓝皮报告通过梳理和分析国际、国内量子云计算整体发展状况，从技术、服务、产业、测评四个方面阐述了量子云计算发展特点及态势，为业界推动量子云计算产业和生态未来发展提供参考。

目 录

一、概述.....	1
二、量子云计算助力量子计算技术发展.....	2
（一）量子云计算技术架构逐步成型.....	3
（二）量子云计算关键技术协同发展.....	4
（三）量子云计算亟需多维研究推进.....	9
三、量子云计算服务探索日益升温.....	11
（一）角色定位日渐清晰.....	11
（二）服务模式逐渐成型.....	12
（三）应用场景多方探索.....	15
四、量子云计算产业发展势头良好.....	20
（一）国际巨头百家争鸣，竞争如火如荼.....	20
（二）国内产业逐步兴起，发展态势良好.....	27
五、量子云计算测评工作初步展开.....	30
（一）测评体系.....	31
（二）测评实例.....	33
（三）小结.....	36
六、发展前景与建议.....	37
（一）机遇挑战.....	37
（二）发展建议.....	40

图 目 录

图 1 量子云计算技术架构示意图.....	3
图 2 量子云计算服务模式及主流厂商	13
图 3 华为量子计算云平台量子化学模拟应用示例	16
图 4 本源量子计算云平台网络排序应用示例	17
图 5 量子卷积神经网络模型实现线路示例	18
图 6 基于 D-wave 量子退火机实现北京交通路线优化示例	19
图 7 IBM 量子云计算发展时间线.....	20
图 8 Google 量子云计算发展时间线.....	21
图 9 D-wave 量子云计算发展时间线.....	22
图 10 Microsoft 量子云计算发展时间线.....	24
图 11 Rigetti 量子云计算发展时间线.....	25
图 12 量子云计算测评体系图	32
图 13 量子云计算测评维度框架	33
图 14 平台软件功能检验测试配置.....	34
图 15 量子机器学习基准测试配置图	35

表 目 录

表 1 平台 A 软件功能测试结果统计	34
表 2 平台 B 开源项目数据调查统计	34
表 3 平台 C 量子机器学习基准测试评估表	36



一、概述

量子计算机基于量子力学原理构建，量子态叠加原理使得量子计算机的每个量子比特（qubit）能够同时表示二进制中的0和1。相较经典计算机，算力呈指数级爆发式增长，从而形成“量子优越性”。量子计算在特定计算任务上具备指数加速能力，有望成为“后摩尔定律”时代新的计算形态，对潜在商业应用形成良性激励。在量子计算尚未完全成熟和规模普及的前提下，以何种方式来展示量子计算优势、吸引行业多方参与、发挥商业应用潜力是当前量子计算领域的重点关注方向。目前，依托于经典信息网络，通过提供量子计算硬件与软件等普惠服务的量子云计算，成为量子计算呈现与发展最重要的形式之一。量子云计算将量子计算与经典互联网相结合，对于量子计算的实现、应用及发展具有以下重要意义。

一、加快量子计算技术及产业发展进程。目前虽然已研制出若干量子计算物理原型机，但量子计算机软硬件实现仍处于科学攻坚阶段，大规模、可容错的通用量子计算机实现需要长期的发展历程。量子云计算的出现，推动量子计算软件、平台、服务等关键环节与量子计算硬件并行发展，加快量子计算发展整体进程。

二、解决量子计算资源稀缺性难题。目前世界上只有少数商业巨头和高精尖实验室拥有真实量子计算硬件资源，其部署及运行需要严苛的物理环境。随着学术界和工业界对量子计算的期望日益迫切，量子云计算缓解量子计算资源稀缺性与应用需求实用性的矛盾。

三、提升综合性普惠服务能力。对于量子计算的提供方，量子云计算依托现有丰富的云计算资源和成熟的商用模式，为用户提供便捷的接入手段，是未来较为可行的服务提供方式；对于量子计算需求方，一方面考虑到量子计算机所需的硬件及其支撑系统十分昂贵，一方面考虑到量子计算机还在快速发展初期，设备形态尚未成熟，因此按需租赁和购买弹性计算服务是务实可行的方式。

目前业界围绕量子云计算的技术、应用、产业、测评等相关研究和探索正有序开展，总体发展态势良好，量子云计算未来或将进入发展“黄金时期”。

二、量子云计算助力量子计算技术发展

如何将量子计算和经典网络云平台服务进行结合，最终通过量子云计算的方式实现量子计算能力的输出，是量子云计算技术领域需要解决的重要问题。

从应用方式上看，由于研发、购置量子计算机的成本极其昂贵（如据报道 D-Wave 量子退火专用机 1500 万美元售价），业界普遍认为在相当长的时间里，通过云平台开展量子计算服务，共享稀缺资源，探索适用于量子计算的行业应用，是较为切实可行的实现方式。

从技术实现上看，量子计算应用落地是复杂的系统工程，需要量子信息技术与经典信息处理技术的深度融合。量子云计算将诸多关键技术进行整合，为量子计算软硬件协同工作提供了必要的使能条件。依托于量子计算云平台，量子计算硬件和软件产生良好的“化

学反应”，加速量子计算技术发展。

（一）量子云计算技术架构逐步成型

目前现有量子云计算的技术架构逐步成型，层次化设计逐步清晰，如图 1 所示。



数据来源：中国信通院

图 1 量子云计算技术架构示意图

- 硬件底座为量子计算云平台的核心部分，利用传统的计算设施与量子芯片、量子存储、量子测控技术等提供强大的算力，量子云计算的后端形态呈现多样化技术特征，主要包括真实量子计算、量子计算模拟器和经典-量子混合计算三种方式。
- 量子计算引擎实现基础的量子计算功能，包括量子中间表示、量子逻辑门、量子电路、量子模拟加速组件、量子编译器等。
- 工具框架层为用户提供封装后的量子计算功能，包括量子编程语言、量子算法库、量子计算 GUI (Graphical User Interface)、量子计算 SDK (Software Development Kit) 等。
- 应用服务层则在计算引擎与工具框架的基础上，进一步实现更具体与用户友好的软件服务，包括提供量子算法开发的 API

（Application Programming Interface）、垂直行业服务例如基于量子算法的金融投资、化学材料设计、量子机器学习软件开发等。

（二）量子云计算关键技术协同发展

1. 计算芯片与经典模拟器并存

（1）量子计算芯片成为量子云计算的核心“引擎”

量子计算芯片作为量子云计算的核心“引擎”，也是量子云计算后端实现的基石。目前量子计算芯片技术形态呈现百花齐放的发展态势，包含超导、离子阱、光量子、硅量子点和拓扑等多种路线，是量子云计算有别于经典云计算的主要技术特征。目前不同实现路线的典型企业及研究机构进展如下：

超导路线方面，Google 在 2018 年推出 72 位量子比特处理器，2019 年报道实现量子优越性重要研究成果；IBM 在 2020 年 8 月报道通过 27 位量子比特实现 64 量子体积；我国中科大在 2019 年已实现 24 位量子比特处理器，报道正研发 60 位量子比特、99.5%保真度的超导处理器。

离子阱路线方面，Honeywell 在 2020 年 6 月报道世界上首次实现 64 量子体积，同年 9 月将量子体积能力提升至 128；IonQ 于 2020 年 10 月报道通过 32 个量子比特达到了 400 万量子体积，刷新了量子体积记录。

光量子路线方面，中科大致力于光子玻色取样技术研究，在高

维光量子调控等方面处于国际先进水平；上海交通大学在大规模光量子计算集成芯片制备方面取得一定成果。

硅量子点路线方面，新南威尔士大学报道了保真度为 99.96% 的单比特逻辑门和保真度为 98% 的双比特逻辑门；国内中科大也报道实现了高保真的单比特逻辑门。

以上四种技术路线均已实现物理量子比特，为量子计算云平台提供可实际应用的底层硬件，目前量子计算物理平台研究正在向突破逻辑量子比特迈进，研究不再单纯追求比特数量，同时关注逻辑门保真度、相干时间等质量方面的同步提升。

（2）量子计算模拟器是经典云计算的能力延伸

量子计算模拟器依托于现有经典计算资源，模拟量子计算的特有逻辑，成为量子云计算不可或缺的组成部分，用于模拟量子计算的辅助经典信息处理也是该领域的关键技术之一。

量子计算模拟器一方面解决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，保证量子计算科学实验和工业验证在软件、算法层面的顺利进行；一方面为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科学的实现工具。

由于依托于经典算力进行量子计算模拟需要强大的算力及海量数据支撑，因此不断提升量子计算模拟器的比特数量，优化量子模拟器的运算指标，是目前云计算巨头企业展示超算能力，提高量子

计算优势门槛的主要竞争形式之一。如 2016 年，Google 报道通过特定随机量子电路，模拟了操纵 49 比特量子纠缠对，电路的深度达到 40 层，2018 年进一步展示了 72 比特量子模拟器。阿里巴巴 2018 年报道研制出的量子计算模拟器“太章”，并采用分布式经典模拟算法模拟了 81 量子比特的通用量子线路。华为 2018 年推出的分布式量子计算模拟器，可提供全振幅 42 量子比特、单振幅 81 量子比特、低深度电路的单振幅 169 量子比特的一站式量子电路模拟云服务。

考虑到大规模通用量子计算机真正问世还需要经历相当长的历史时期，量子计算模拟器未来将会长期存在，并与真实量子计算芯片相互促进，协同发展。量子+经典混合计算形态将是量子云计算的显著特征之一。

2. 计算软件体系框架尚在构建

目前量子计算软件还处于生态体系建立的早期阶段，由于量子计算的实现逻辑与经典计算有所不同，经典计算软件不能完全移植延续，因此量子计算基础运行类、计算开发类和应用服务类软件均需要在量子云计算框架下进行重新构建。虽然大规模通用的量子计算机尚未到来，但在量子操作系统和量子软件开发等方面已开展提前布局，新的软件产业正在兴起。依托于量子云计算的量子计算软件现状及发展态势如下：

- (1) 基础运行类软件是量子云计算“底座”，处于起步阶段量子基础运行类软件系统与量子硬件、经典硬件紧密相关的，

也是量子计算机运行所需要的核心软件。目前量子计算基础运行类软件主要包括量子编译软件和量子测控软件两类，由于技术门槛高、工程难度大、专业人才匮乏，目前该类型软件比较稀缺，处于发展初期。

量子编译软件，规范了量子编程的边界，保证了量子程序编译执行的正确性，提供健全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，包括 QASM、eQASM、QASM-HL、Quil、OpenQASM、f-QASM 等。

量子测控软件，是量子计算机操作系统的雏形，用于进行量子计算纠错，进行测量结果的高效反馈，高效的量子芯片校准等功能，包括苏黎世仪器公司的 LabOne，是德科技的 HVI，Google 的 Optimus，本源量子的 PyQCat 等。

（2）计算开发类软件是量子云计算的“中台”，目前发展活跃

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，包含了众多量子编程语言和量子软件开发工具。目前计算开发类软件呈现丰富多样的态势，总体可分为量子语言、量子编程框架以及量子中间表示。

量子语言实现了量子专用的语法，构成独立、全新的程序语言。量子语言可以用来编写运行在量子计算机中的量子算法和程序，常用的量子语言包括 QCL、Q# 以及 QRunes 等。

量子编程框架则通常包含常用的量子计算组件和量子算法库，

更着眼于当前技术条件下量子程序的快速开发，包括 QPanda、QDK、Cirq、Qiskit、ProjectQ、HiQ 以及 Forest 等。

量子中间表示包含分离之后的量子经典混合代码中的量子线路部分，可直接与量子硬件对接，提供了统一表示量子算法程序的数据方式，包括 OpenQASM、OriginIR、Quil 以及 Blackbird 等。

（3）应用服务类软件是量子云计算“门户”，行业关注度高

量子应用服务类软件，提供了面向各个领域的量子计算技术应用和解决方案，涉及到能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，其中量子化学和量子机器学习是其中两大类典型的应用服务软件。

量子化学软件方面，Google 推出了 OpenFermion 工具，支持对任意分子构型的输入产生模拟该分子的量子程序；本源量子推出的 ChemiQ，是可应用于量子计算机的量子化学应用软件；华为推出的 HiQ Fermion 软件包，在华为云上提供一站式量子化学模拟解决方案。

量子人工智能软件方面，IBM 推出了量子支持向量机、Artiste 公司推出 Quantum-Fog 和 Quantum-Edward 等系统，支持不同场景下的量子机器学习模型；Google 推出了 TensorFlow Quantum 量子机器学习库，可用于快速设计量子与经典机器学习混合模型的原型，并提供与现有 TensorFlow API 兼容的量子计算原函数，以及高性能量子线路模拟器；本源量子推出了国内第一款量子机器学习框架 VQNet，可满足构建包括 QAOA、VQE、量子分类器和量子线路学习算法等常见

类型的量子机器学习算法；百度发布了量子机器学习开发工具 Paddle Quantum 量桨，提供了对量子机器学习的支持，这也是国内首次在深度学习平台引入量子机器学习工具。

（三）量子云计算亟需多维研究推进

1. 经典网络关键特性是提升量子云计算服务质量的保障

首先，量子计算云平台所解决的量子计算任务如量子模拟计算、组合优化、量子机器学习等，往往需要海量数据接入和中间计算参数的传输，特别是跨网络的分布式量子计算需要巨大的通信负荷开销，如 2017 年瑞士苏黎世联邦理工学院的 Thomas Haner 和 Damian Steiger 进行了模拟量子位实验¹，使用了 0.5PB 的内存和 8192 个节点，实现的性能为每秒 0.428 千万亿次浮点运算，其中通信负荷占总负荷的 75%；其次，适用于需要实时计算、反馈计算的应用算例，需要低时延、确定时延的结果获取；此外，跨广域网非稳定带来的数据重传错传问题，有可能会降低某些量子计算任务（如量子机器学习训练）的实现效率。综上所述，量子云计算作为一种新兴的网络服务形态，给现有通信网络的稳定性、低时延与高可靠传输等方面提出了新的机遇与挑战。

¹Thomas Häner, Damian S. Steiger, 0.5 Petabyte Simulation of a 45-Qubit Quantum Circuit. Physical Review A 91, 2 (2015), 022311, 2017.

2. 安全保护与数据验证是量子云计算良性发展的前提

同传统云服务平台一样，量子计算云平台同样具有数据安全与隐私泄露方面的隐患。当前针对量子计算云平台安全问题的研究，包括盲量子计算或量子复制保护等技术仍在起步阶段，如何避免数据隐私泄露、防止黑客攻击、对数据的访问控制、存储安全等问题亟待解决。此外，量子计算云平台还面临新的服务风险，例如验证后端是否为真正量子计算机等。解决量子计算云平台的安全问题和数据验证问题对未来量子计算云平台赋能行业发展至关重要。

3. 能效管理是降低运营成本与大规模部署的关键

在量子计算云平台运行初期，需要大量量子模拟器计算集群、经典辅助计算设备、外围量子计算运行系统等进行算力支撑，能效管理不可忽视（如阿里“太章”量子模拟器在运行 64 比特 40 层线路深度的模拟实验中，调用阿里云在线集群 14% 的计算资源²）。如何有效的提升能效是量子计算云平台发展与降低成本需解决的问题。

4. 量子云计算有序演进需要技术标准做规范引导

目前，量子云计算在数据操作、量子编程语言、应用接口、计算服务、算法库等还未出现统一的标准规范。随着量子计算云平台的不断涌现与发展，开展平台之间互操作、数据可移植性、数据流通等方面的标准研究非常必要。同时，如何评价量子计算云平台的

²Jianxin Chen, Fang Zhang. Et. Al., Classical Simulation of Intermediate-Size Quantum Circuits, <https://arxiv.org/abs/1805.01450>, 2018.

服务质量、构建量子计算云平台测评体系等也需要进行统一规范。

三、量子云计算服务探索日益升温

量子云计算一方面实现对稀缺量子计算资源的充分共享，一方面依托现有云计算模式，充分考虑到用户的应用习惯，成为量子计算应用的主要抓手，为量子计算研究者、量子软件开发者和行业用户提供了友好的服务窗口，降低用户进行量子计算开发、社交与应用

（一）角色定位日渐清晰

1. 助推量子计算技术产业发展

在产业推动方面，量子云计算依托于互联网丰富资源，为化学、交通、电信、材料等垂直领域提供了良好的应用平台；在技术推动方面，量子云计算融合了硬件基础资源与软件应用开发工具，为量子算法研发、纠错编码研究、量子芯片验证等提供了科学验证手段，为工业界和学术界提供了公开的交流渠道。在通用量子计算硬件芯片问世之前，量子云计算的出现，可推动量子计算产业的其他关键环节如软件开发、服务应用、行业探索、生态培养等并行发展，从而加速量子计算技术产业整体进步。

2. 促进多领域交叉融合

量子计算的应用与成熟涉及到数学、物理、软件科学、人工智

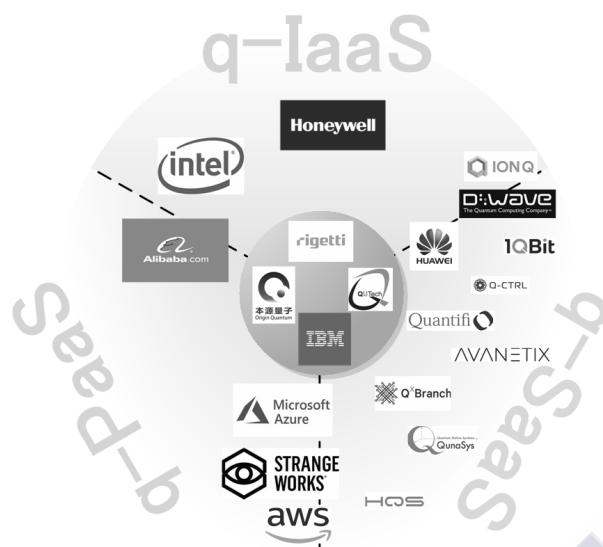
能、大数据、计算机科学等多学科交叉研究，量子计算云平台为多学科的融合创新提供了快捷的验证入口，降低了量子计算的准入门槛，加速了量子计算相关技术的发展与创新。量子计算云平台的企业和科研机构用户，可以专注于研究与开发相关领域的量子算法与实现方案，利用量子计算云平台进行算法测试与验证，提高量子计算更新迭代速度。

3. 加速量子计算科普与人才培养

量子计算是全新的交叉学科，当前该领域的专业人才匮乏，如 2018 年《纽约时报》调查声称，全球只有 1000 名左右的研究人员真正了解这项技术。量子云计算具有大数据、互联网、产业应用的综合属性，可聚集大数据、互联网、通信和计算领域的专家，依托量子计算云平台一方面可开展跨领域的交流与合作，另一方面可直观进行教育使能与实践演练，加速量子计算专业人才培养。

（二）服务模式逐渐成型

随着各大公司和机构纷纷发布量子计算云平台，并初步形成包括底层硬件、云端服务和应用软件在内的社区和生态体系，如图 2 所示。基于量子计算云平台的体系架构，当前主流的量子计算云平台服务内容不断丰富，量子计算基础设施服务、量子计算软件平台服务和量子计算行业应用服务模式逐渐成型。



数据来源：量子计算云平台的现状与发展，2020 年《信息通信与政策》第 7 期
图 2 量子云计算服务模式及主流厂商

1. 量子计算基础设施服务

量子计算基础设施服务 Q-IaaS (Quantum Infrastructure as a Service) 以提供基本的计算和存储资源为主要服务模式，例如量子计算调度程序、量子模拟器和实际量子设备等。目前，随着物理平台与试验技术的发展，提供计算引擎的 Q-IaaS 模式比重会不断增加，由于未来量子计算硬件技术呈多样性发展，Q-IaaS 的计算类型也会不断丰富。例如美国的 IonQ、IBM、Rigetti、D-wave，欧洲的 Quantum Inspire 等均提供了不同方案的量子设备。除真实量子计算设备外，Q-IaaS 还提供了经典计算集群运行量子计算模拟器的超算服务，而超强计算能力的量子模拟器是展示经典云计算能力的有力方式，目前国内外云计算巨头如 Google、华为、阿里等在 Q-IaaS 方面表现活跃，积极推进新型超算服务的发展。

2. 量子计算软件平台服务

当前,量子计算软件平台服务 Q-PaaS (Quantum Platform as a Service), 提供量子计算和量子机器学习算法的软件开发平台, 开发量子编程框架和量子算法库, 并通过云端服务器层连接其他公司的计算引擎分配计算。Q-PaaS 模式提供连接其他公司硬件资源的服务, 支持跨平台兼容开发, 而不需要使用者学习多个开发环境, 降低了软件使用者和应用开放者的准入门槛, 同时还支持通过模拟器进行量子线路的调试、诊断和优化, 自动分配经典计算和量子计算所需资源, 结合优化混合量子算法, 并完全托管作业以提高效率和降低成本。

3. 量子计算行业应用服务

量子计算行业应用服务 Q-SaaS(Quantum Software as a Service) 根据特定的行业应用场景和应用要求提供打包好的应用服务方案, 例如数据推理专用工具, 材料设计(量子化学模拟), 并提供诸如医疗制药, 智慧城市、人工智能加速计算等服务。目前, 随着量子云生态的不断成熟, 针对特定问题提供解决方案的 Q-SaaS 模式初创公司不断增加。例如, 日本的 QunaSys 专注于量子计算解决量子化学、量子机器学习和优化算法问题, 德国成立的 Avonetix 提供利用量子计算和其他经典方法优化解决供应链问题的解决方案, 法国的 QuanFi 则为金融服务产业提供相对应的量子算法。随着量子计算产业的进一步发展、量子云生态的逐步开放, 未来将会有更多垂直行

业企业尝试通过 Q-SaaS 模式对业务能力进行赋能。

（三）应用场景多方探索

根据波士顿咨询公司预测，截止到 2030 年，量子计算应用的市场规模将达到 500 亿美元³，其发展前景被业界看好。当前阶段，诸多行业看好量子计算的巨大商业潜力，业界认为量子计算云平台是连接特定行业需求与展示量子算法优势的“桥梁”，依托量子计算云平台是开展量子应用探索的主要途径之一。

目前依托于量子计算云平台开展的应用探索亮点层出，未来或将进入量子应用探索的“活跃期”。一旦某个具有应用价值的算法被验证其加速有效，它可能会具有潜在巨大的市场需求。未来 5 年左右，小规模专用量子计算机可能在量子化学模拟、量子组合优化、量子启发式机器学习等领域率先取得突破，有望出现“杀手级应用”，为量子计算打开实用化之门。

依托量子计算云平台开展的典型行业领域应用探索进展如下：

1. 量子化学模拟

化学过程的模拟对于经典计算机来说是极具挑战的计算任务，因为其反应过程复杂，计算量呈指数级增长。量子化学模拟具有广阔的商业潜力，例如可显著提高药物发现率并节约研发时间，或成为未来量子计算可切入的市场之一。国内外已有若干量子云计算企

³The coming quantum leap in computing [R]. Boston Consulting Group. 2018.

业与医药行业合作，开展量子化学模拟的应用探索研究工作。

以华为 HiQ2.0 量子计算云平台为例，如图 8 所示，利用 HiQ Fermion 量子化学模拟应用软件，针对 Hartree-Fock 模型实现对化学分子的能量预测，结合云平台提供的量子电路优化算法以及量子测控系统，降低量子化学模拟量子电路的参数，提高线路深度压缩比，提升运行速度，帮助更多量子计算开发者在药物等领域取得新的成绩，加速量子化学研发进程。



数据来源：华为 HiQ2.0 量子计算云平台

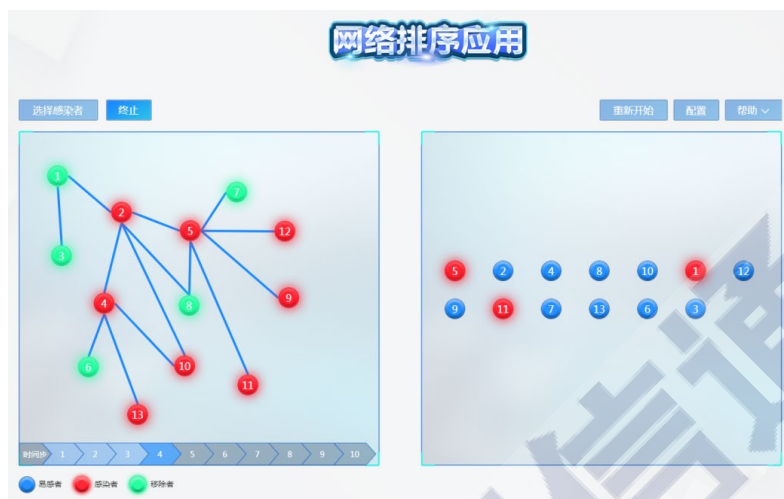
图 3 华为量子计算云平台量子化学模拟应用示例

2. 复杂网络排序

新冠病毒疫情仍在全球肆虐，给整个人类社会造成了巨大影响。弄清病毒的传播过程，对于疫情防控与预警至关重要。社交群体中的病毒传播与防控，对应复杂网络小世界特性和无标度特征发现问题，具有复杂的计算特征。

以本源量子复杂网络排序服务探索为例，如图 4 所示，为追踪和预测病毒的传播节点，依托本源量子计算云平台，对给定的社交网络图谱进行建模，通过 HHL 量子算法计算得到该特定网络节点重

要性的排序结果，进一步使用 SIR 模型评估特定节点的影响效果。这一功能在云端展示了对于复杂网络计算任务，量子计算的有效性和优越性，将为预测新冠病毒的下一个传播点提供重要参考。



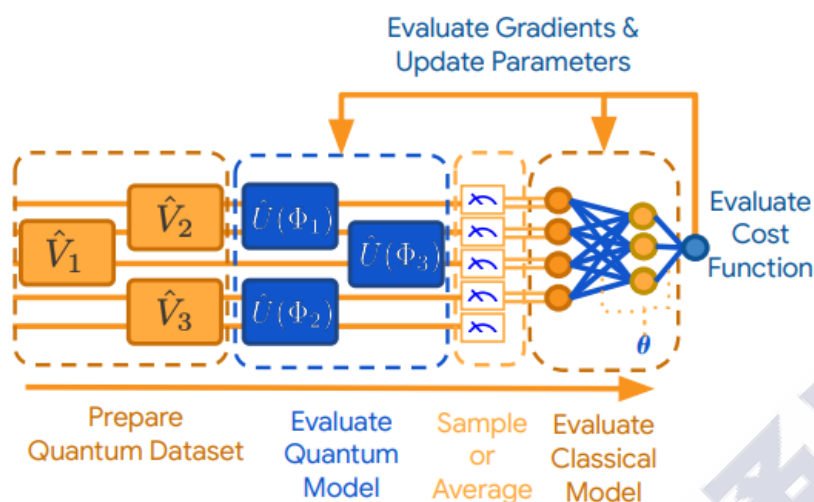
数据来源：本源量子计算云平台

图 4 本源量子计算云平台网络排序应用示例

3. 量子机器学习

在数据不断增长、传统计算机数据处理能力接近极限的情况下，量子计算所带来的巨大算力优势让其与机器学习的结合成为有前景的方向。将量子计算运用于机器学习，这不仅能够突破传统计算机无法解决的问题，更会为机器学习领域带来全新的技术变革。

以 Google 开发的 TensorFlow Quantum 框架为例，如图 5 所示，研究人员基于量子机器学习框架，在云端从事量子机器学习算法实现与模型评估，加快量子机器学习领域的应用探索。

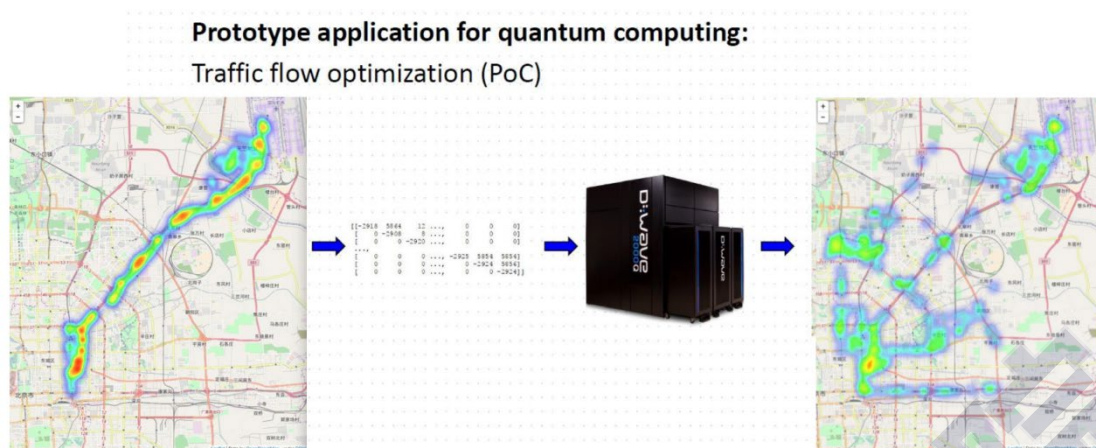


数据来源：Google Tensorflow Quantum 白皮书

图 5 量子卷积神经网络模型实现线路示例

4. 组合优化问题

组合优化问题是指在有限可行解集合内寻找最优（或者次优）解的问题，它在工业界，例如航线规划和网络流量分配等方面有着广泛的应用价值。寻找出能够加速解决这类问题的方法，将有可能极大的降低生产成本，和推动人类社会各方面的进步。目前，工业界的很多问题，随着规模的增大，其计算复杂性使得经典计算机很难在有限的时间和计算资源下求解组合优化问题。近年来量子计算领域进展迅猛。借助于量子计算的天然优势，针对含噪中等规模量子器件（50-1000 量子比特），业界提出的量子退火算法和量子近似优化算法等，有望降低组合优化问题的求解难度。



数据来源：D-wave

图 6 基于 D-wave 量子退火机实现北京交通路线优化示例

如图 6 所示，D-wave 公司与德国大众公司合作，基于 D-wave 量子计算云平台运行量子退火算法，对 10000 辆出租车的 GPS 交通流向数据进行组合优化求解，计算在 32km 的路程中以最快的速度到达目的地，且不会造成交通堵塞。优化结果表明，仅用时不到 1 秒即找到了最优行驶路线，对于诸多车联网应用场景，量子退火计算服务，有望缓解大型城市出租车的交通阻塞问题。

量子近似优化算法是解决组合优化问题的另一实现方法，以华为 HiQ 量子计算云平台为例，平台提供了组合优化问题的高效解决方案量子组合优化求解器 HiQ Optimizer。该求解器包括将组合优化问题转化为对应的哈密顿量，并将之转化为量子+经典混合架构可以实现的量子态制备、演化和测量、以及优化参数更新等全套工具。组合优化问题的高效解决，将助力量子计算在工业界、学术界的广泛应用。

四、量子云计算产业发展势头良好

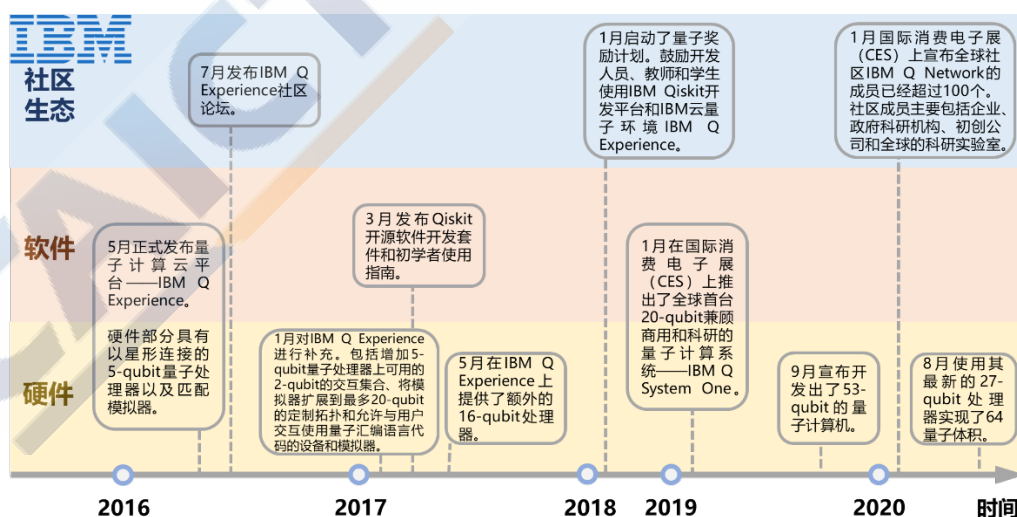
国内外云计算企业、初创公司和科研机构看好量子云计算产业与应用的发展潜力，纷纷提前布局，在技术与服务模式方面力争做出特色，生态产业逐步兴起。

（一）国际巨头百家争鸣，竞争如火如荼

目前国际提供量子计算云平台的典型企业发展状况如下：

1. IBM

IBM 作为量子计算领域的领军者之一，在量子云计算领域的研究具有系统化、成熟化的研发运营模式，在硬件和软件方面形成了相对完善的研发链，已逐渐建立日益成熟的量子云计算生态。IBM 在量子云计算领域的重要发展节点如图 7 所示。



数据来源：根据公开资料整理

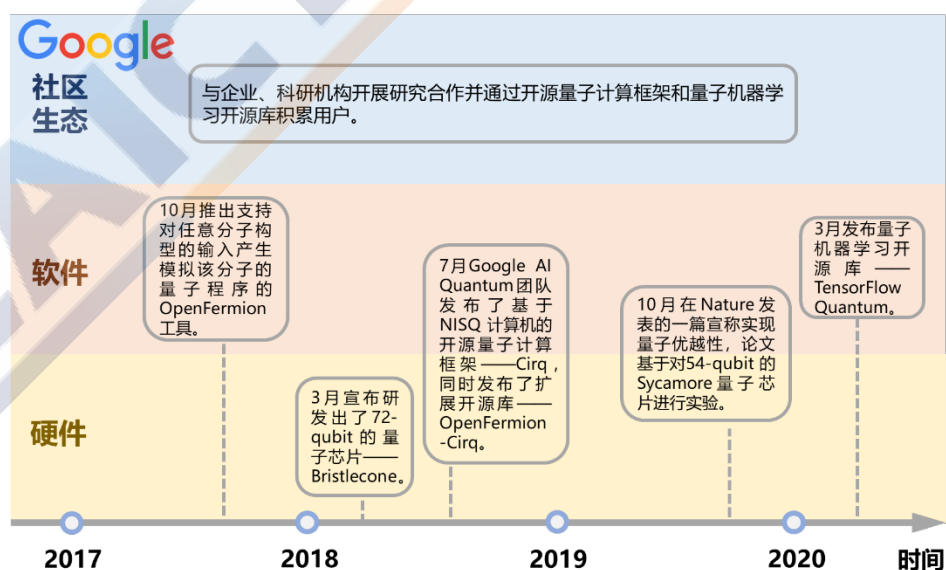
图 7 IBM 量子云计算发展时间线

IBM 在量子云计算领域的主要工作探索包括：

- 持续开展基础量子信息科学的研究，不断探索新的量子算法以降低错误率以保证计算结果更加准确和可靠。
- 构建科研和商用的量子硬件及平台系统，保证量子体积和量子比特数的不断增加。
- 大力开发量子电路和软件，提供更多创新型用例供开发人员和企业进一步探索。
- 构建可持续发展的量子计算社区环境，引导更多人了解和参与量子计算研究，形成 IBM 量子计算生态链。

2. Google

Google 在量子计算领域也具有强大的研发能力，布局主要围绕基础研究、硬件研发和软件开发展开。在多年的研究蓄力后，近三年 Google 在量子领域的动作愈加频繁。Google 在量子云计算领域的重要发展节点如图 8 所示。



数据来源：根据公开资料整理

图 8 Google 量子云计算发展时间线

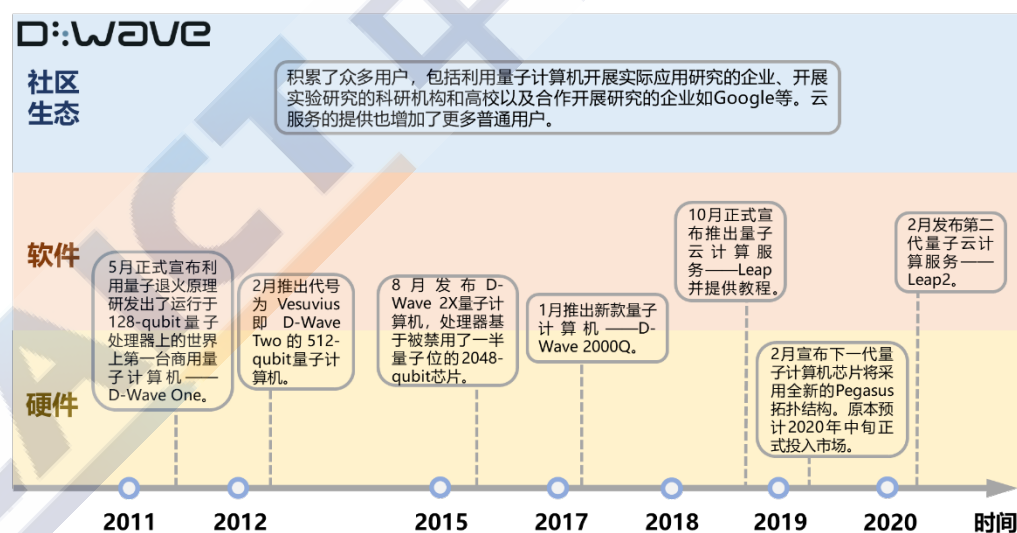
Google 在量子云计算领域的主要工作探索包括：

- 致力研发超导量子处理器，搭建量子计算框架和开源库，在软硬件研发方面持续发力。
- 量子计算云服务目前尚未公开，但 Google 已经公开表示未来将致力于提供可商用的量子计算云服务。
- Google 生态圈中的合作伙伴多，软件开源程度高。

3. D-wave

D-wave 是全球最早的量子计算公司，成立于 1999 年，致力于量子计算系统的研发、软件开发并向用户提供以量子退火为技术原理的量子计算服务，形成了一套完整的量子计算研发与服务体系。

D-wave 在量子云计算领域的重要发展节点如图 9 所示。



数据来源：根据公开资料整理

图 9 D-wave 量子云计算发展时间线

D-wave 采用了专用的量子退火计算方式，主要工作探索如下：

- 利用独特的量子退火技术简化量子计算过程，已经实现了量子退火计算试商用且证明了量子退火计算的应用能力。
- 作为起步最早的量子计算企业，在领域的布局方面同样具有很强的竞争力，量子计算机量子位增长迅速、云服务向公众开放，形成了良性的生态循环。
- 利用量子计算机商用所获得的资源开展众多实际应用相关的研究，并与科研机构、高校、企业合作开展科研项目。

4. Amazon

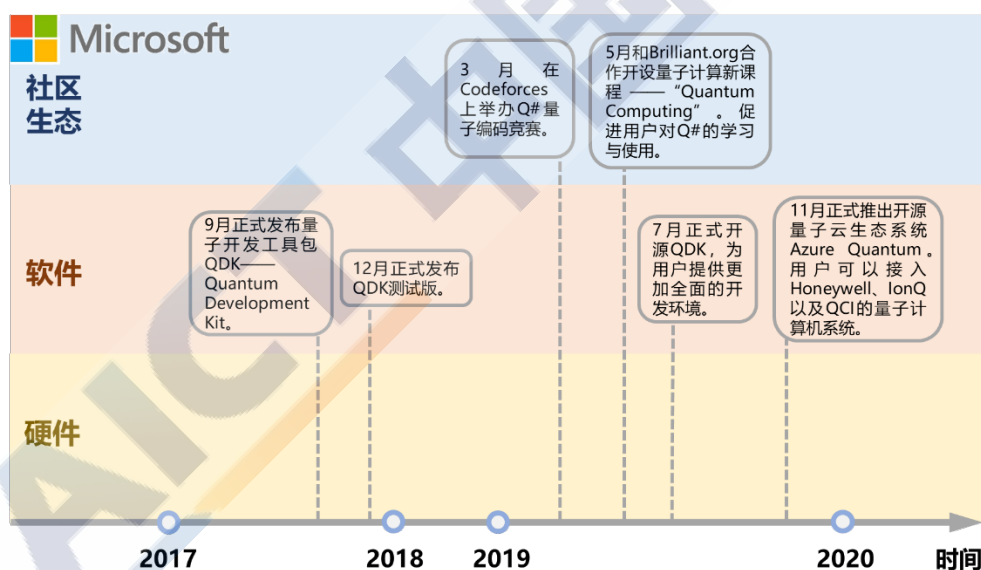
作为全球最大的云计算提供商，2019 年 12 月，Amazon 正式进军量子云计算，宣布推出全新的全托管式 Amazon Web Services(AWS) 解决方案—Amazon Braket，Amazon 量子计算云平台后端可连接多种第三方量子硬件设备如 IonQ 的离子阱量子设备、Rigetti 的超导量子设备以及 D-Wave 的量子退火设备，为研究人员和开发者提供设计量子算法的开发环境、测试算法的仿真环境，和对比三种类型的量子计算设备运行量子算法的平台。因此 Braket 的优势在于，研究者和开发人员可以更全面地探索量子计算复杂任务设计。

不同于拥有自研的量子计算硬件的企业，Amazon 目前只提供量子计算软件平台服务（Q-PaaS）。但 Amazon 也与加州理工学院合作共同开设量子研究中心，未来可能会在硬件方面开展研究。APN（AWS Partner Network，合作伙伴网络）是 AWS 的全球合作伙伴计划，参与 Amazon 量子解决方案实验室的包括 IQbit、Rahko、Rigetti、

QCWare、QSimulate、Xanadu 和 Zapata。Amazon 目前的服务模式为联合量子企业以 Braket 为接入口和客户共同进行实验，指导客户将量子解决方案纳入业务，从而在帮助客户满足高性能计算需求的同时建立围绕 Braket 为中心的量子云计算生态圈。

5. Microsoft

Microsoft 目前也在量子软件开发和软件社区运营方面进行了大力的推动，硬件研发也正在处于研究阶段，暂未发布量子计算硬件的研究成果。Microsoft 在量子云计算领域的重要发展节点如图 10 所示。



数据来源：根据公开资料整理

图 10 Microsoft 量子云计算发展时间线

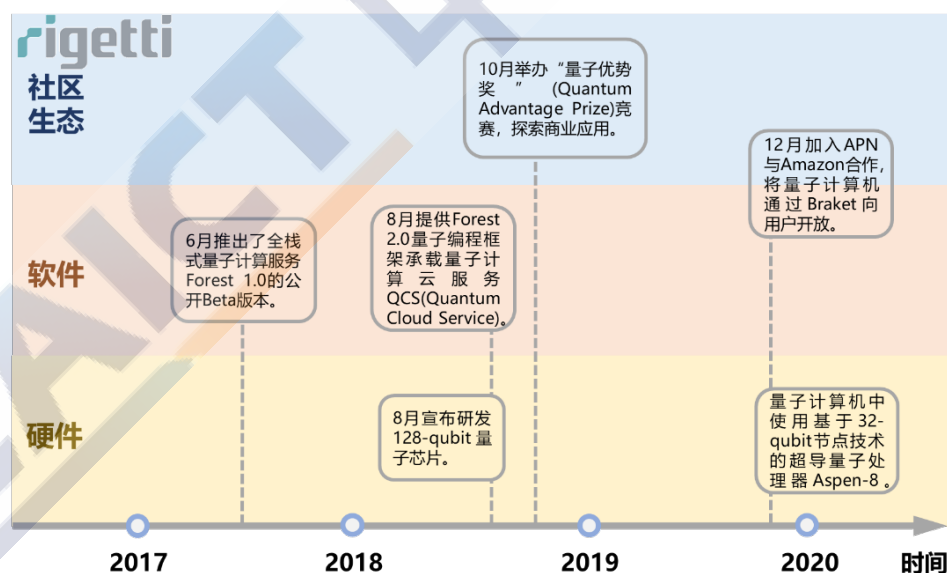
Microsoft 在量子云计算领域的主要工作探索包括：

- 不同于其他企业，Microsoft 首推全新的量子编程语言 Q#，建设一套独立且能够更好适配量子计算的编程模式。

- 初期围绕 QDK 开展量子生态建设，引导用户使用 Q#；Azure Quantum 云平台推出后联合其他量子企业进一步为全行业用户提供量子硬件服务。
- 量子硬件的研发正在进行中，Microsoft 目前尚未正式发布自研量子计算机。

6. Rigetti

作为初创量子企业的代表,Rigetti 凭借强大的科研实力在众多大企业蓄力研究的量子计算领域争得了一席之地。目前 Rigetti 的全栈式研究布局包含了硬件方面芯片处理器的研发、软件方面量子编程框架和云服务的开发以及量子计算机商用探索和量子生态圈建设。Rigetti 发展过程中的主要时间线如图 11 所示。



数据来源：根据公开资料整理

图 11 Rigetti 量子云计算发展时间线

Rigetti 在量子云计算领域的主要工作探索包括：

- 开展全栈式路线，兼顾硬件开发、软件框架搭建以及商用生态圈建设。
- 前期主推自主研发的云平台，后期尝试与云平台成熟的大企业 Amazon 合作，将量子计算机硬件接入 Braket，以构建更广阔的生态圈并寻求更大的市场。
- 除了自主开设比赛拓展量子计算的商业应用，还与众多企业达成合作，尤其是加入 APN，进一步推动量子计算商业化的开展。

7. 小结

随着国际巨头，如 IBM、Google、AWS、Microsoft 等科技公司纷纷布局量子云计算，抢占未来发展先机，量子云计算产业进入快车道，产业发展不断提速。国际企业百家争鸣，为培养量子计算用户习惯，占领生态地位，目前竞争如火如荼。

总体而言，量子计算云平台发展的主要竞争力来自于美国，且发展水平普遍较高。由于拥有雄厚的资金支持以及技术研发能力的优势，美国的大型企业如 IBM、Google、Microsoft 等在领域内占据领先地位。尽管 Amazon 和 Microsoft 目前尚未形成全栈式布局，但也已经通过与其他企业合作的方式暂时弥补了硬件的空缺，并正在大力开展硬件研发。Rigetti 虽然是一家初创公司，但也已经利用技术优势成功获得了多轮的巨额资金支持，目前在开展全栈研发外也与 Amazon 合作推广自研的量子计算机。D-wave 的量子退火技术路线

也有实际的应用示范并已开始为若干企业提供量子计算服务，证明了专用量子计算的应用潜力。

（二）国内产业逐步兴起，发展态势良好

国内提供量子计算云平台的典型企业发展状况如下：

1. 华为

华为于 2012 年起开始从事量子计算的研究，量子计算作为华为中央研究院数据中心实验室的重要研究领域，研究方向包括了量子计算软件，量子算法与应用等。在 HUAWEI CONNECT 2018 大会上，华为首次发布其量子计算模拟器 HiQ 云服务平台，搭载量子线路模拟器和基于模拟器开发的量子编程框架。目前 HiQ 云服务平台已经推出到 3.0 版本，新增两个核心模块：量子组合优化求解器 HiQ Optimizer 和张量网络计算加速器 HiQ Tensor，同时升级 HiQ Circuit、HiQ Fermion、HiQ Pulse 等多个模块，使得 HiQ 系统功能更完善、性能更优越，可适配更多应用场景，意在构建业界领先的量子计算云服务，给用户、开发者提供简单、易用、高效的全栈量子编程体验。

2. 本源

合肥本源量子计算科技有限责任公司（简称“本源量子”）成立于 2017 年 9 月 11 日，是国内首家量子计算初创公司，目前专注量

子计算全栈开发，设立了量子芯片、量子测控、量子软件、量子云、量子应用、量子计算机六大业务板块，推出了量子计算云平台 OriginQ，可支持 35 位全振幅、68 位部分振幅和 200 位单振幅量子虚拟机或基于半导体及超导的真实量子计算机，并提供 OriginIR 编程指令集和 QPanda 量子计算编程框架，同时还推出了移动端与桌面端应用程序，兼具科普、教学和编程等功能，为我国量子计算的研究和应用推广提供了有益的探索。2020 年 9 月 12 日，本源量子发布了国内首个搭载了真实超导量子芯片的超导量子计算云平台。

3. 百度

百度于 2018 年成立量子计算研究所，主要进行量子计算软件和应用研究，推动量子计算的应用快速落地，经过两年半的努力，百度目前已经初步建成由“量脉”、“量浆”以及“量易伏”主体的百度量子平台。其中“量脉”（Quanlse）发布于 2019 年百度人工智能开发者大会，是百度量子计算研究所开发的量子脉冲计算系统，适用于核磁共振量子计算、超导量子计算等平台的量子逻辑门脉冲快速产生及优化。作为基于云平台的量子脉冲计算系统，“量脉”可以作为连接量子软件和硬件的桥梁。“量浆”（Paddle Quantum）是百度的深度学习平台飞桨发布的基于量子机器学习的开发工具，是百度飞桨平台支持的量子机器学习的深度学习平台。开发者可以通过量浆搭建量子神经网络，同时量浆还提供了丰富的量子机器学习案例组建所需的模型。此外百度还于近期发布了云原生量子计算平台

“量易伏”，可用于编程、模拟和运行量子计算机，为量子基础设施服务提供量子计算环境。

4. 腾讯

腾讯于 2017 年进军量子计算领域，提出用“ABC2.0”技术布局（AI、RoBotics、Quantum Computing），即利用人工智能、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 B 端实体产业。目前主要聚焦在依托腾讯云搭建的化学计算云平台，建立化学及生物制药，材料，能源等相关领域的生态系统。实验室于 2019 年发布了 Simhub 云计算平台，致力于填补云和超算之间的空白，一方面发展云端部署工具帮助科学计算程序上云，另一方面调整云端系统，使云服务更贴近科学计算的使用习惯和场景。

5. 阿里巴巴

阿里巴巴 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”进军量子信息领域的前瞻性研究并研制量子计算机，其技术路径为光学方向。商业模式为硬件+软件+云服务的全栈式服务，旗下产品包括 2017 年与中科大、中科院、浙大等共同研制出 10 位逻辑比特的光量子计算机，以及可模拟 81 位物理比特的自有量子云计算模拟器“太章”。阿里巴巴的竞争优势是作为国内最大的云服务提供商，具有显著的客户和渠道优势，推广成本低，2017 年依托阿里云初步推出了量子计算云平台的体验版。

6. 量旋

量旋科技于 2018 年 8 月在深圳成立，核心团队由来自于清华大学、中国科学技术大学、南方科技大学、滑铁卢大学以及华盛顿大学的量子计算专家组成。量旋科技致力于量子计算产业化，目标是研发出实用型量子计算机，并提供量子计算全套解决方案。2020 年 01 月 06 日，在 QIP 国际会议上正式发布了业界首台桌面型核磁共振量子计算机(2 比特)“双子座”。目前开放的量子计算云平台 PCloudQ，开放了底层控制层，即允许用户自主设计量子控制脉冲形状，使用户从更基本的层次理解实际量子体系的运行规则。目前该平台致力于量子计算领域的教学科研与科学普及工作。

7. 小结

国内量子云计算产业起步较晚，云计算企业和初创企业数量还十分有限，在软硬件发展、生态建设上与世界先进水平相比仍有一定差距，但目前发展态势良好，依托于国内海量的用户群体与完善的信息产业生态，量子云计算产业逐步兴起，力争缩短与国际量子云计算第一梯队的差距。

五、量子云计算测评工作初步展开

量子云计算处于快速发展阶段，不但具有复杂的技术特征，同时也具备多态的应用场景与服务体验。量子云计算的科学测评，在

方法论层面与实践层面，对于引导量子计算的技术、产业、服务良性发展有积极推动的作用。

国外研究机构及企业已开展了量子计算本身的测评工作，企业方面，IBM 提出的“量子体积”是衡量量子计算能力较为全面的综合性能准则⁴；标准方面，IEEE 标准组通过 P7131 标准立项建议（Approved PAR），启动量子计算性能度量指标和基准测试的研究及标准化工作；研究机构方面，美国能源部先进计算研究（ASCR）计划发布了《ASCR 关于建立用于科学的量子计算测试平台的报告》⁵，详细介绍了 ASCR 计划召开的量子计算测试平台利益相关方研讨会的结果，识别了建立量子计算测试平台的机会和挑战，以推动量子计算硬件和软件系统的发展，在未来 5 年促进量子计算的科学应用。目前这些测评实践工作更聚焦于量子计算技术主体，对于量子云计算所提供的综合运行能力、计算服务与应用成效还缺少系统性的研究与实践。本报告围绕量子云计算的实现架构、关键技术、服务模式及应用能力，对量子云计算的测评开展了初步探索。

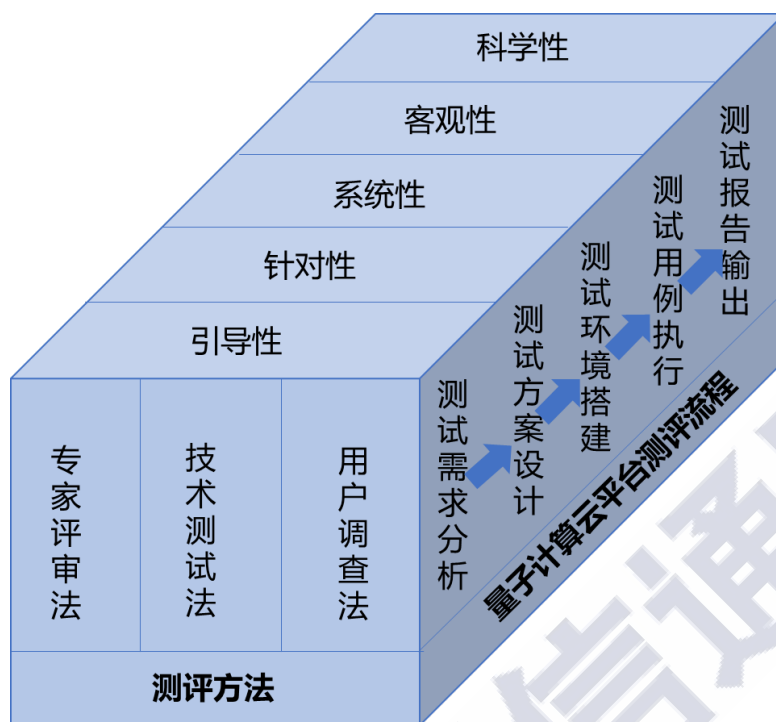
（一）测评体系

1. 测评框架

本报告构建的量子云测评体系主要包括测评原则、测评流程、测评方法与测评维度四部分内容，如图 12 所示。

⁴Andrew W. Cross, Lev S. Bishop. et.al., Validating quantum computers using randomized model circuits, <https://arxiv.org/pdf/1811.12926.pdf>, 2019.

⁵ASCR Report on Quantum Computing Testbed for Science Descriptive[R], 2017.



数据来源：中国信通院

图 12 量子云计算测评体系图

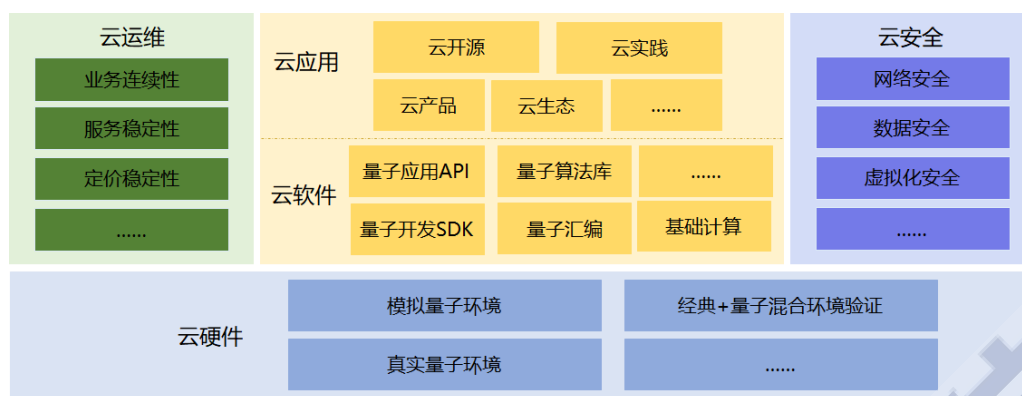
测评原则方面，参照经典云计算与信息系统的测评方法论，包括科学性、客观性、系统性和针对性。

测评方法方面，包括专家评审法、技术测试法、用户调查法等。

测评流程方面，包括需求分析、方法设计、环境搭建、用例执行和报告输出五个执行步骤。

2. 测评维度

如图 13 所示，根据量子云计算的技术特点、实现架构、服务模式和应用能力，初步提出测评维度框架如下：



数据来源：中国信通院

图 13 量子云计算测评维度框架

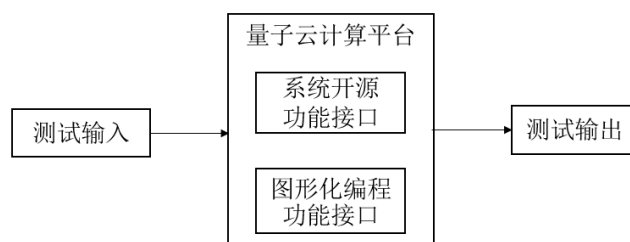
测评维度框架主要包括量子云硬件、量子云软件、量子云运维、量子云应用和量子云安全五个测评维度。

（二）测评实例

根据报告所提出的测评体系方法，基于国内外三家开放的量子计算云平台（命名为平台 A、平台 B 和平台 C）在软件功能检验、开源项目调查及基准测试测评等方面开展初步实践探索。

1. 平台软件功能检验

以量子云计算平台 A 为例，如图 14 所示，针对其对外提供的图形化编程和代码编程两种量子计算在线编程方式，设计测试配置和测试脚本，采用技术测试法，验证量子计算云平台应用服务多方式提供功能。



数据来源：中国信通院

图 14 平台软件功能检验测试配置

一方面通过 A 平台代码编程方式，设计并编写量子线路测试脚本，一方面通过平台 A 图形化量子程序创建界面，设计并创建相同的量子线路。

上述两种方式均使用 4 个量子比特，1 个经典寄存器，并重复测量 1000 次，其中经典寄存器用于存储第一个量子比特的测量结果。表 1 统计了测量结果分别为 0 和 1 的次数和统计占比，结果显示代码编程与图形化编程的运行结果基本一致。

表 1 平台 A 软件功能测试结果统计

测试方式及结果统计	结果为 0 的次数	结果为 1 的次数	结果为 0 的占比	结果为 1 的占比
代码编程	496	504	0.496	0.504
图形化编程	490	510	0.490	0.510

测试结果表明，平台 A 能够通过图形化编程和代码编程两种子计算在线编程方式对外提供量子云计算应用服务，能够满足包括以入门学习与科研开发为目的的使用对象功能需求。

2. 开源项目调查统计

依托云平台开展的软件开源项目活跃度可以作为衡量平台软件生态发展的重要指标之一。这里以平台 B 为例，采用用户调查法统计了其在 Github 的开源项目活跃度相关数据，调查统计信息见表 2。

表 2 平台 B 开源项目数据调查统计

名称	功能	Star	Issues	Branches	Commits	Releases	Contributors
主体	开源框架	1.2k	49	3	708	41	121
套件 1	基础功能	2.9k	285	10	4022	60	214

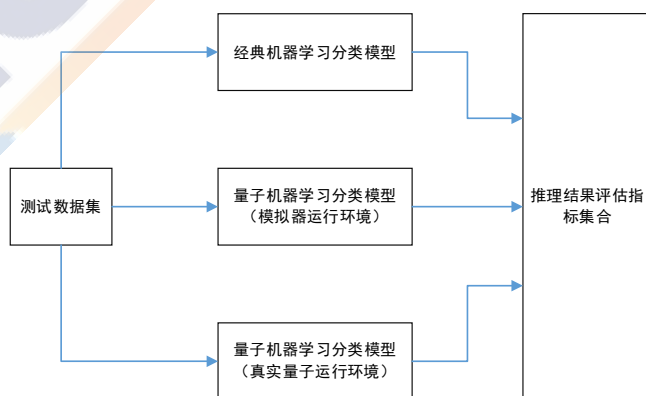
名称	功能	Star	Issues	Branches	Commits	Releases	Contributors
套件 2	高性能仿真器	163	61	5	971	19	50
套件 3	量子算法与应用	413	54	2	6101	27	80
套件 4	硬件验证、噪声表征和误差纠正	122	32	4	530	8	36
套件 5	提供量子设备、模拟器接入	111	35	5	483	27	18

来源：中国信通院统计 截止日期：2020 年 9 月 22 日

调查统计结果表明，平台 B 的用户群体规模较大、开源参与度高，平台问题反馈及时，目前在量子计算软件板块表现活跃，软件版本更新迭代较快，且兼容性较好，用户整体体验良好。

3. 机器学习基准测试

这里针对量子计算云平台 C, 提供机器学习应用基准测试实例。如图 15 所示，采用不同运行后端环境（经典计算、模拟量子计算、真实量子计算），基于同一的机器学习数据集，对机器学习模型的推理效果进行对比评估。



来源：中国信通院

图 15 量子机器学习基准测试配置图

参照上述测试步骤，如表 3 所示，得到三种支持向量机训练模

型，基于异常检测数据集，得到如下测试比对结果。

表 3 平台 C 量子机器学习基准测试评估表

评估指标	经典计算	模拟量子计算	真实量子计算
精确率	90.75%	88.47%	83.15%
准确率	88.75%	86.92%	81.33%
召回率	99.10%	97.75%	96.51%
F-分值	0.9364	0.9202	0.8827
AUC	0.8865	0.8264	0.7671

来源：中国信通院

以经典计算结果作为参考基准 (baseline)，测试结果表明由于量子模拟器在量子制备、量子线路构建环节引入量化误差，测试性能略有下降；真实量子计算后端由于存在量子噪声，综合指标稍低于经典计算推理性能。总体来讲，验证了量子计算云平台下运行机器学习算法的应用效果基本一致，量子模拟器与真实量子计算后端的机器学习推理服务结果正常。

（三）小结

本报告基于量子云计算的总体技术架构、结合量子云计算的服务模式，从服务和应用角度出发，提出量子云计算的测评体系，并针对国内外开放的量子计算云平台，初步开展了测评实践工作。

从目前国内外量子计算云平台的整体测评实践结果来看：

- 云平台总体能力方面，国内量子计算云平台在总体功能覆盖、可用性方面与国际开放的量子计算云平台差距不大。
- 服务能力与生态建设方面，目前国内量子计算云平台在真实量子计算资源算力提供的“硬服务”能力，以及社区生态、

软件开源活跃度、用户激励，垂直行业应用探索等“软服务”能力方面，与国际量子云计算巨头相比还存在一定差距。

- 平台维护与软件管理方面，国内外量子计算云平台均处于快速更新迭代阶段，建议在软件版本管理、模块兼容性、运行稳定性、平台维护性、系统可迁移性、数据容灾备份等方面进行统筹规划，同时在用户服务习惯培养、服务持续运营方面做到及时响应，促进量子云计算产业生态闭环发展。

六、发展前景与建议

（一）机遇挑战

1. 两大机遇

（1）量子云计算有望成为量子信息领域的重要发展方向

为抢占量子信息技术的制高点，近年来美国加大量子计算科学研究与战略布局，如2018年12月通过的《国家量子计划法案》，把量子计算提升到阿波罗登月计划的高度。我国对量子计算领域的投入力度也不断加大，2016年《“十三五”国民经济和社会发展规划》中，将量子信息技术视为体现国家战略意志的重大科技项目之一，发展量子信息产业已经成为国家发展战略性新兴产业的重要任务。量子计算是新一代信息技术产业的重要领域，量子云计算是量子计算提供新型信息服务，为行业赋能的主要途径之一，将极大地推动中国量子信息基础设施建设、推动传统产业的升级和加速培育高科

技新兴产业孵化，将得到国家在政策、资金、项目方面的大力支持。

（2）量子云计算市场潜力巨大

量子云计算整合了现有 IT 资源以及新兴的量子信息 QIT（Quantum Information Technology）资源并以统一的方式提供给用户提供新型普惠服务，对 IT（Information Technology）及 QIT 资源的利用具有较大的规模效应，能够为稀缺的量子计算基础设施和 IT 基础设施节约大量的成本，具有巨大的市场潜力。第一，加快两化融合，量子云计算使用户和企业以较低的成本使用量子信息技术，可加快传统产业信息化改造，促进高新技术产业跨越式发展，加快国家信息化步伐，将有效促进我国两化融合进程；第二，加速科技创新，通过经典云计算、大数据与量子计算领域的交叉融合，为科技创新提供坚实基础，提高科技创新能力。

2. 三大挑战

（1）支撑量子云计算产业发展的核心技术亟待突破

与发达国家相比，我国量子云计算技术的起步相对较晚。目前，由于国外企业对量子计算核心技术、基础设施核心部件的垄断，国内只有少数企业和研究机构进行量子云计算的关键计算芯片、底层硬件、基础软件的研究与开发，产业化程度不高，各企业信息沟通不畅通，业务关联度较低。在量子计算器件，高性能计算芯片、高端服务器、存储、网络设备、系统软件等领域的核心技术亟待突破，以支撑我国量子云计算产业良性长远发展。

（2）量子云计算市场还在培育期，商业模式尚未明朗

量子云计算作为一种新的应用方式和商业模式，对其应用的深度和广度的认识有待进一步加深。当前，量子计算虽然在某些应用问题上具备强大发展潜力，但真正的“杀手级”行业落地应用尚未出现，商业前景存在变数，资本投入未进入稳定期，因此量子云计算市场还处于培育阶段。目前量子云计算的潜在应用主要集中在金融、化学、人工智能、交通运输等领域，如何甄别和切入适合量子云计算的细分应用领域，通过量子云计算应用的典型实践带动传统产业的升级改造和业务模式创新，需要进一步的研究和梳理。

（3）标准尚未完善，行业缺乏科学评价准则

量子云计算出现在量子计算发展的黄金窗口期，吸引了大量用户数据接入。在量子云计算应用模式下，目前在标准规范层面缺乏用户数据、计算数据和通信数据的全生命周期管理及保障，导致用户对量子云计算应用产生顾虑，这将阻碍量子云计算应用的开展。此外，由于我国量子云计算关键技术和服务模式还在发展期，市场环境复杂，多个产品鱼目混珠，假借量子之名推广，给市场带来了恶劣影响，部分公司和媒体炒作概念，引起了科学界与民意的不必要反弹和争议，对未来技术研究和推广产生了消极和负面的影响。因此需要相应的标准和测评准则，明确量子计算、量子计算云平台的概念和技术内涵，制止各种不当宣传将会有助于各方形成共识，创造有利的社会舆论环境，促进技术的发展。

（二）发展建议

1. 加强量子计算基础研究

强大的基础科学研究是量子计算持续发展的基石。目前我国量子计算基础研究短板依然突出，量子计算硬件实现、量子纠错编码、量子计算软件架构、量子计算基础算法等方面仍是量子计算发展的薄弱环节。建议制定量子计算创新驱动机制，加大基础研究项目与人员投入，着力实现前瞻性基础研究、引领性原创成果重大突破，全面提升量子计算领域创新能力。

2. 加快量子云计算领域产业布局

鼓励行业龙头企业发挥牵头带动作用，并支持产业上下游企业通过参股合资、长期战略合作等形式，畅通资源和信息对接渠道。支持企业、行业协会、科研机构等深化合作，成立量子云计算联盟，共同开展量子云计算关键共性技术研究。

3. 依托量子计算云平台进行人才培养

依托量子计算云平台，开展量子计算普遍服务，“以云育人”，发挥教育职能属性，培育一批量子计算领域人才。开放量子计算科学普及教育与技术交流窗口，支持企业跟踪国际先进技术发展动态，采取积极财政政策提供资金支持，完善产学研协同创新机制。通过量子计算云平台，前瞻支持高校在量子计算方向学科建设，集结多

方智慧，培养本土的高端技术人才队伍。

4. 开展量子云计算标准制定与测评探索

有序推进量子云计算标准化工作，在方法论层面在工业界和学术界达成一定共识，引导量子云计算技术路线的平稳发展与产学研成果的顺利转化。开展量子云计算科学测评实践工作，加速量子云计算领域产业化进程，促进生态良性发展。

5. 积极构建量子云计算生态体系

推动国内量子云计算产业的发展，除了学术界、企业界的努力，也需要从国家层面制定量子信息技术领域整体发展战略，推出总体规划，从而有效引导和推动量子计算生态体系构建与发展。而通过对量子计算产业的布局和投入，获得拥有自主知识产权的核心技术以及实用化的产品，是我们未来能够处于量子计算技术领先地位、打破国外行业垄断保证，并且为我国在国际量子计算战略竞争中抢占优势地位打下扎实基础。

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

邮政编码：100191

联系电话：010-62300331

传真：010-62300123

网址：www.caict.ac.cn

