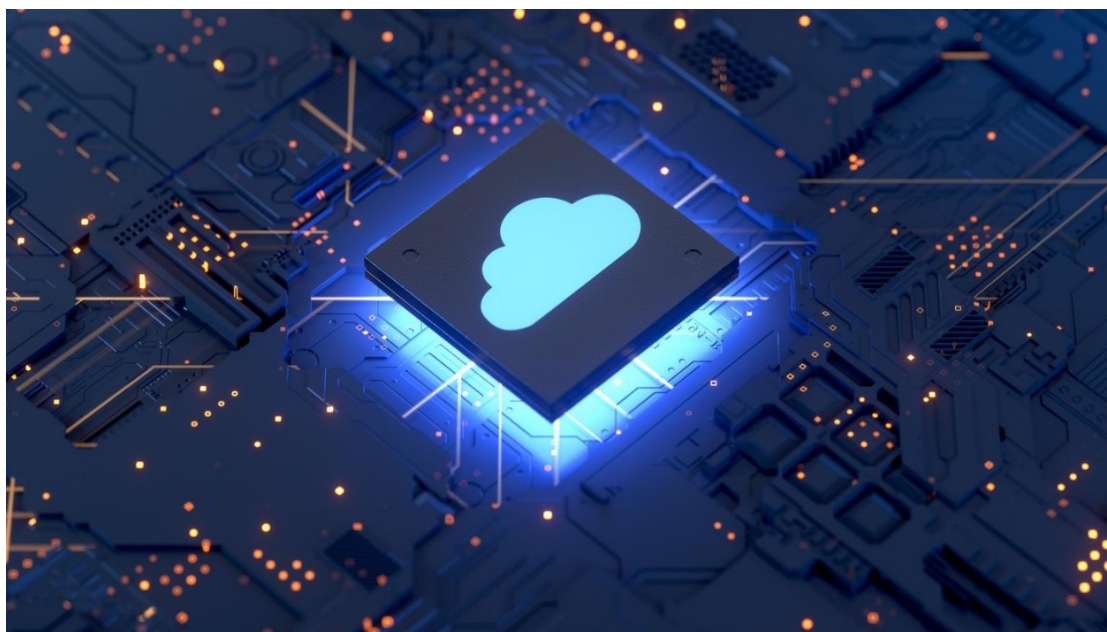




量子计算系列报告

Quantum Computing Series Report

量子计算云平台——量子时代的必然趋势



光子盒研究院

2021 年 8 月

目录

目录.....	i
图表目录.....	ii
图目录.....	ii
表目录.....	ii
编者序.....	iii
光子盒简介.....	iv
声明.....	v
第一章 量子计算云平台概述.....	1
一、量子计算云平台的基本概念.....	1
二、量子计算云平台的开发背景.....	1
三、量子计算云平台的优势.....	2
第二章 量子计算云平台服务.....	5
一、量子计算云平台服务类型.....	5
二、量子计算模拟器.....	6
第三章 量子计算云平台现状.....	8
一、国外量子计算云平台.....	8
二、国内量子计算云平台.....	16
第四章 量子计算云平台的对比.....	26
一、量子计算云平台配置对比.....	26
二、量子计算云平台价格对比.....	27
第五章 量子计算云平台发展前景.....	30
一、量子计算云平台未来发展方向.....	30
二、量子计算云平台市场规模预测.....	31
关于作者.....	32

图表目录

图目录

图 1 量子计算云平台服务类型.....5

图 2 IBM Quantum Composer 用户操作界面.....9

图 3 IBM Quantum Lab 用户操作界面.....9

图 4 Quantum Inspire 用户操作界面..... 11

图 5 Amazon Braket 工作原理..... 13

图 6 Strawberry Fields 操作页面15

图 7 中科院量子计算云平台用户操作界面.....16

图 8 本源量子云平台用户操作界面..... 17

图 9 百度量易伏用户操作界面.....19

图 10 百度量易伏架构.....20

图 11 量旋科技“金牛座”云平台用户操作界面21

图 12 北京量子院云平台用户操作界面.....22

图 13 ScQ .Cloud 用户操作界面23

图 14 昆峰量子模拟云平台.....24

图 15 量子云平台市场规模.....31

表目录

表 1 IBM 已发布的量子计算模拟器对比.....7

表 2 量子云平台/模拟器首次发布时间24

表 3 国内外量子云平台比较.....26

表 4 本源量子云平台量子计算模拟器价目表.....28

表 5 微软 Azure Quantum 价目表.....28

表 6 Amazon Braket 云平台量子电路模拟器价目表.....28

表 7 Amazon Braket 量子计算云平台量子计算机价目表.....29

编者序

“云计算”在近些年发展中已趋于成熟。随着量子计算的快速发展，量子计算与云计算有机结合，产生了“量子计算云平台”，极大地克服了目前量子计算机制造成本昂贵、维护难度高、占用空间大等缺陷。量子计算云平台不仅可推动量子软件及算法的研发，还对整个量子生态产业环境的培养以及增加人们对量子计算的认识具有重大意义。

自 2016 年 IBM 推出商业化的量子计算云平台以来，至今已有超过 32.5 万名注册用户，开源 Qiskit 软件开发工具包下载超过 65 万次，每天在 IBM Quantum 系统上运行 20 亿个量子电路，使用 IBM Quantum 已发表了 700 多篇论文。截至目前，全球有超过 20 家公司/科研机构开发了量子计算云平台。量子云平台将在未来很长的一段时间内助力量子计算的商业化进程，以更低的成本和更优质的服务满足用户的更多需求。

光子盒研究院在此背景下编写了这份报告，力求以专业、客观、全球化的视角对量子计算云平台的相关情况作以叙述，希望能为中国量子计算产业的发展提供参考和借鉴。

通过这份报告，您将了解到“什么是量子计算云平台”、“量子云平台有哪些”、“量子云平台未来发展方向”等问题。

本报告为光子盒研究院出品的《量子计算系列报告》第 2 期，介绍了量子计算云平台、量子计算模拟器、量子计算云平台发展历程和未来趋势等内容，希望通过此报告，加深您对量子计算云平台这一新领域的理解。更多关于量子计算的相关知识与信息，详见光子盒研究院《量子计算系列报告》其他子报告。

关键词：量子计算云平台；量子计算模拟器；量子云平台对比；量子云平台市场规模

光子盒简介

光子盒创立于2020年2月,名称来自于在1930年第六届索尔维会议(Solvay Conference)上,爱因斯坦在其与玻尔的争论(Bohr-Einstein debate)中提出的一项光子盒实验(photon-box experiment)。

光子盒定位为量子产业服务平台,通过推送前沿量子科技新闻、科普量子知识、解读量子技术、发布年度和专题报告等形式,致力成为中国量子科技产业最值得信赖的服务机构。截至2021年7月,光子盒已公开发布了20余份量子科技领域的专题报告,并且为10余家中国量子科技领军企业提供量子行业咨询和数据服务等。

2021年5月,光子盒作为协办方,与主办方中国电子科技集团公司电子科学研究院、社会安全风险感知与防控大数据应用国家工程实验室和中国工程科技发展战略安徽研究院,在安徽合肥成功举办了“2021中国量子科技产业‘双循环’高峰论坛”。

光子盒正在不断扩充自有量子科技产业数据库的广度与深度,建立多维量子产业数据信息,提供客观、专业、深入及具有时效性的量子行业报道与咨询服务。光子盒未来还将承办量子科技领域的论坛,提供更为丰富的主题和内容,联合量子产业科技公司、金融行业投资公司、国家/省级量子相关科研院所、政策战略研究单位等共同促进量子产业持续向好发展。

声明

本报告采用的数据均来自公开渠道或对公开数据进行的整理。本报告发布的观点力求独立、客观和公正，结论不受第三方授意或影响，不构成任何广告。

光子盒所有原创作品版权归光子盒所有。其他媒体、网站或个人转载使用时不得进行商业性的原版原式的转载，也不得歪曲和篡改本网站所发布的内容。如转载须注明来源为“光子盒”，不得对本报告进行任何有悖原意的引用、删减和篡改。未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制或发表。如征得光子盒同意进行引用、刊发的，需在允许范围内。违规使用本报告者，法律必究。

光子盒引用其它媒体作品或数据的目的在于传递信息，并不代表光子盒赞同其全部观点，不对其真实性、时效性负责；其他媒体、网站或个人转载使用时，必须保留光子盒注明的来源，并自负法律责任。

若报告涉及动态数据的，仅表达截至发稿时的情况，不代表未来情况。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见均不构成投资建议。

如因作品内容、版权和其它问题需要同光子盒联系的，请联系王女士(邮箱：wangsy@chinafincon.com)

第一章 量子计算云平台概述

一、量子计算云平台的基本概念

量子计算云平台，简称为量子云平台，依托云计算技术，提供用户接入实体量子计算机硬件或量子计算模拟器的一种服务平台，在平台上用户可以运行算法或进行实验任务。量子云平台为用户带来诸多便利，提供了更广泛的量子计算机接口，对发展量子计算研究有极大地推动作用。

云计算是一种按使用量付费的模式，这种模式提供可用的、便捷的、按需的网络访问，进入可配置的计算资源共享池（资源包括网络、服务器、存储、应用、软件、服务），这些资源能够被快速提供，但只需投入很少的管理工作，或服务供应商进行很少的交互。

量子云平台好比连接量子计算机和用户之间的桥梁——用户使用经典计算机访问量子云，然后经由量子云将处理过的指令传输到后端，后端完成量子计算后经由量子云把结果输送给用户。通过量子云平台，即使不能实地使用量子计算机，用户也可以完成所需的量子计算。

量子云平台当前大体可分为三种应用场景：在量子研究中，科学家可以使用量子云平台来测试量子信息理论，进行试验，比较架构等；在量子教学中，教师可以使用量子云平台帮助学生更好地理解量子力学，以及实现和测试量子算法等；在量子开发中，程序员可以使用量子云平台创建量子教学游戏，向人们介绍量子概念，又或者开发量子编程软件，丰富量子开发工具。

二、量子计算云平台的开发背景

量子计算是指在遵循量子力学规律下，通过操作基本量子或模拟量子来完成计算的前沿技术。当前已有实验证明量子计算技术在解决特定问题方面具有经典计算机完全无法比拟的计算能力。但由于目前量子技术发展尚处于早期阶段，大部分技术方案构建的量子计算机实际应用需要超低温、隔绝噪音和振动等多种苛刻的外部环境，再加之昂贵的设备购置成本和维护费用，量子计算机令许多研究

机构和研究人员望而却步。

量子云平台将量子计算与云计算相结合,对于整个量子计算行业发展具有重要意义。2016 年 5 月,自世界上第一个基于 5 量子比特超导量子计算机 IBM Quantum System One 的量子云平台 IBM Quantum Experience 面世,量子计算向更广大的群体开放。2017 年 10 月,我国首个量子计算云平台由中国科学院量子信息与量子科技创新研究院(上海)(简称量子创新研究院)于“2017 杭州·云栖大会”联合阿里云共同发布的“量子计算云平台”,最初提供 11 量子比特的云接入超导量子计算服务。虽然我国量子云平台与美国有一定差距,但国内量子云平台的上线也为我国的广大量子研究人员和爱好者提供了基于真实量子计算机进行研究开发的条件,填补了国内量子计算领域的空白。

在量子云平台发展过程中,大多数提供量子云平台的公司都是接入自己公司研发的量子计算机或量子模拟器,除了这种基于自身硬件的量子云平台,还有一种量子云平台的发展路径被称之为“硬件无关量子云平台”(hardware independent quantum cloud service)。例如, Microsoft (微软) 和 Amazon (亚马逊) 目前是这种发展路线。虽然微软的拓扑量子计算路线尚未成熟,但其凭借成熟的云技术和优质的商业资源使其量子云平台可接入 Honeywell、IonQ、东芝、Quantum Circuits 和 IQBit 的量子计算硬件或软件系统,为用户提供优质的量子计算服务。亚马逊更多地与一些较为成熟的量子计算硬件公司、软件算法公司等合作,通过亚马逊提供的量子云平台,用户可以接入 D-Wave (量子退火)、IonQ (离子阱) 和 Rigetti (超导) 的量子计算硬件。

三、量子计算云平台的优势

量子云平台提供了更多实验选择,用户可根据自身需求选择适合的服务商和不同的量子计算硬件后端。量子云平台将其具有的量子硬件、量子软件、量子算法等量子相关资源以服务的形式提供给用户,并根据用户的需求类型以及任务复杂程度进行资源分配,这种服务形式被成为量子即服务 (Quantum as a Service, QaaS)。

将量子资源部署在云平台上较一般的本地部署(On-Premises)而言在如下方面具有其特殊的优势:

1、较低的购置、运维和研发成本

从购置角度来看,量子计算机的硬件成本高,合适的零部件供应商少,制造难度高,导致配备量子计算机费用高昂。例如,一台超导量子计算机所需的稀释制冷机的价格一般为几百万至一千万人民币之间。全球能提供量子计算机整机的商业化公司极少。此外,量子计算机是国际最前沿的科学仪器,包括其核心硬件可能都在各国禁运或禁售的名单中。因此,量子计算机不仅供应量有限,而且购买难度很大。

从运维角度来看,量子计算机运行条件苛刻,维护难度大。以技术相对成熟的超导量子计算机为例,计算机的运行除了需要一个接近绝对零度的运行温度外,一个安静稳定的环境和一定的放置空间也是必须的。IBM、谷歌等科技公司尚且需要一个庞大的专业技术团队来维护和保证量子计算机的正常运行。而对于普通公司来说,一旦相关设备出现问题将很难解决。

从研发角度来看,目前量子云平台面向的潜在用户有:量子软件开发者、量子算法研究者、高校教师学生、量子计算爱好者和化学、生物、金融等其他领域的公司。除部分研究机构需要真实量子计算机进行基础量子层面的相关研究外,其他潜在用户的需求大多可以通过量子云平台上得到满足。部分量子云平台还可以根据客户的差异性需求提供开发对应软件的服务,这极大的降低了公司的研发成本。

2、较低的技术要求

当前量子计算软件开发困难。目前同时具备量子计算相关知识与软件开发技术的专业人员极为有限,即使对于未来量子计算有明确需求的化学、生物等行业的公司,从现在起就开始专门培养量子计算机工程师与量子开发人员对于人力资源也会是一种浪费。因而目前更多的选择是应用量子云平台来发展相关算法、软件以回避当前存在的技术人员缺乏问题。

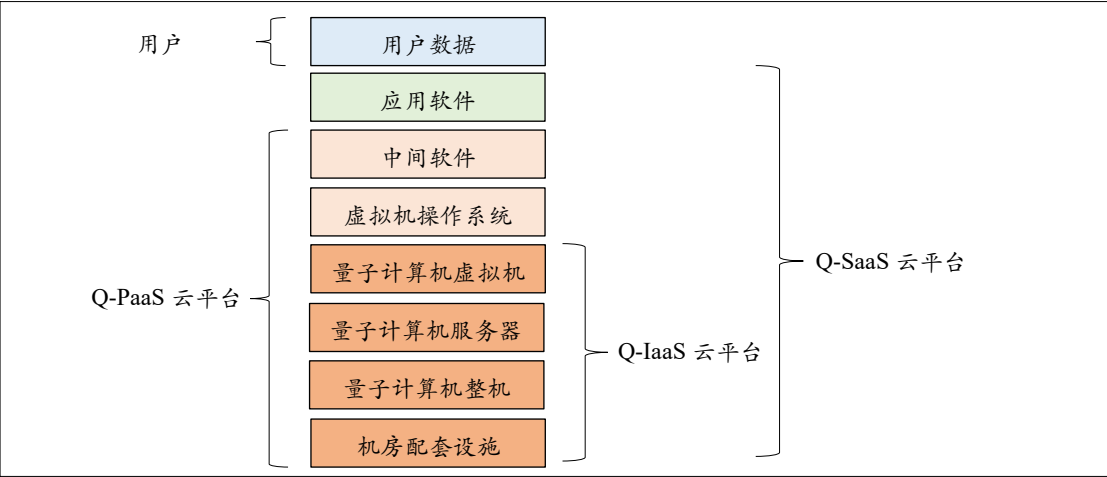
综上所述，目前对于大多数量子计算的潜在用户来说，使用量子云平台比购买量子计算机更为方便和有效。在未来量子计算机硬件相关产业没有大的技术突破前，量子云平台都将长期保持量子计算的行业主导地位，为特定客户提供更为便捷、经济的量子算力。各国政府同时也在努力推动量子云平台发展，助力本国量子软件与算法研发，为未来的量子计算竞争提高自身的“量子软实力”。

第二章 量子计算云平台服务

一、量子计算云平台服务类型

当前各公司量子云平台的逻辑架构基本相同，与云计算分类相似。根据提供服务的类型不同将量子云平台提供的服务细分为量子基础设施即服务（Quantum Infrastructure as a Service, Q-IaaS）、量子平台即服务（Quantum Platform as a Service, Q-PaaS）和量子软件即服务（Quantum Software as a Service, Q-SaaS）三种¹。部分量子云平台提供的量子计算服务包括其中的两种或三种，如 D-Wave 提供的服务类型包括 Q-IaaS 和 Q-SaaS，本源量子 and IBM 包括了上述三种。

图 1 量子计算云平台服务类型



来源：光子盒研究院

Q-IaaS 是指把量子计算机的硬件及配套设施作为服务来在量子云平台上提供给用户。对于提供 Q-IaaS 类服务的量子云平台，用户可以通过量子云平台调用量子计算机的所有硬件而不用费时费力地对其进行维护。这类量子云平台的主要用户是量子计算机底层开发人员和科研人员。

Q-PaaS 是指将量子计算机的基础设施与中间件组成的开发平台作为服务来在量子云平台上提供。应用此类量子云平台，所有用户都可以方便地在云平台上进行自己特定的软件开发，但这同时也限制了用户在不同云平台上进行迁移。目

¹ 来源：量子云计算发展态势研究报告（2020），中国信通院

前来看提供 Q-PaaS 类型服务的量子云平台是数量最少的，这是因为它既不能彻底绕开复杂的量子知识来开发软件满足自身的需求，也无法满足研究所和高校这类针对于具体的量子特性进行研究的需求。

Q-SaaS 是指整个量子云平台提供的是一种软件类型的服务。目前 Q-SaaS 类型的量子云平台主要是面向其他领域的大型企业。这些企业希望在量子时代能够依靠量子技术的强大算力解决当前难以解决的实际问题，继续保持自身行业内的领先地位。虽然目前量子云平台所提供算力尚不足满足大多数企业的实际应用需求，但他们已经在通过和量子云平台间的合作，开发、完善适合自身的软件，静待量子硬件领域的下一次突破了。

目前来说大部分量子云平台的服务以 Q-SaaS 为主，这是由于当前量子计算机开发人员需要同时掌握一定程度的量子知识和编程能力，相应人才供不应求，而 Q-SaaS 类型的服务则可以绕过这些人力与技术难关。预计在未来随着量子开发人员的逐渐增多，部分大型企业会出于保障自身数据安全，降低营运风险，以及自身差异化产品开发的考虑，完成由选择 Q-SaaS 服务到选择 Q-PaaS、Q-IaaS 服务的逐渐转变。

二、量子计算模拟器

当前，由于高量子比特数的量子计算机数量极少且大多被用作技术的持续研发，使得量子云平台能接入的量子计算机数量及算力不能满足人们对量子比特数的设定值，这将会导致很多未来实际应用的验证过程和结果受到影响。为解决这一问题，量子计算模拟器应运而生。

量子计算模拟器是指通过经典计算机底层编程来模拟量子特性，进而依靠模拟出的“量子”搭建量子计算机来进行相应计算。量子计算模拟器可以模拟量子纠错、量子噪音等特性，并且支持量子指令，这满足了量子软件及算法的开发需求。量子计算模拟器与当前真实量子计算机相比，具有成本低、算力强、支持更量子比特数高、不易受外界环境干扰等优势，使得其在量子算法以及量子软件的开发中被广泛应用。

目前各类量子云平台提供的真实量子计算从几量子比特到十几量子比特不等,而同平台下的使用超级计算机模拟的量子计算则可以提供从几十量子比特到上千量子比特不等。如 IBM 提供了 5,000 量子比特的可以用作噪声模拟的 simulator_stabilizer 和 100 量子比特的可以用来模拟量子弱纠缠的 simulator_mps 等多种量子计算模拟器。本源量子则提供了 4 种模拟器后端: 35 量子比特的全振幅量子计算模拟器、68 量子比特的部分振奋量子计算模拟器、200 量子比特的单振幅量子计算模拟器和 32 量子比特的含噪声量子计算模拟器。Google 的高性能开源量子电路模拟器 Qsim 已证明能在 111 秒内在一个谷歌云节点中以 14 栅极深度模拟一个 32 量子比特量子电路。Amazon Braket 提供完全托管的高性能张量网络模拟器 (TN1), 这种基于张量网络的电路模拟器可以支持高达 50 个量子比特的量子计算模拟。Atos 是第一个成功模拟量子噪声的公司, 其开发的量子模拟器 Atos 量子机器学习机 (Atos QLM) 被称为世界上性能最好的商用量子模拟器, 该模拟器将高功率、超紧凑的机器与通用编程语言相结合, 使研究人员和工程师能够开发和试验量子软件。

表 1 IBM 已发布的量子计算模拟器对比

	类型	名称	量子比特	噪声建模
Statevector	Schrödinger wavefunction	simulator_statevector	32	是
Stabilizer	Clifford	simulator_stabilizer	5,000	是 (仅 Clifford)
Extended stabilizer	Extended Clifford (e.g., Clifford+T)	simulator_extended_stabilizer	63	否
MPS	Matrix Product State	simulator_mps	100	否
QASM	General, context-aware	ibmq_qasm_simulator	32	是

来源: IBM Quantum Simulators²

尽管量子计算模拟器的发展给量子计算机的软件与算法的研发提供了极大便利, 但量子计算模拟器模拟量子比特数目受限于经典计算机算力及相关算法, 同时较高的能源消耗也在一定程度上限制了各平台量子计算模拟器算力的无限增加。在量子硬件技术仍有待进一步突破的今天, 应用量子计算模拟器不仅满足了绝大部分量子软件与算法的研究, 而且也将研发成本降到了最低, 是当前发展量子计算的重要支撑力量。

² <https://quantum-computing.ibm.com/lab/docs/iql/manage/simulator/index>

第三章 量子计算云平台现状

一、国外量子计算云平台

1、IBM

2016 年 5 月，IBM 推出了量子计算云平台 IBM Quantum Experience，用户可以通过该云平台在 IBM 的量子处理器上运行算法和实验，这是全球范围内量子计算云服务的开端³。

2017 年 5 月，IBM 在 IBM Quantum Experience 付费服务上提供了一个新的 16 量子比特处理器。

2019 年 5 月，IBM 推出全新测试版本，用户可以制作电路和应用程序构建工具，该版本对开源 Qiskit⁴量子计算软件框架的访问进行了简化。新的 Circuit Composer 功能可构建比以往复杂的量子电路，然后在模拟器和 IBM Quantum Experience 物理量子系统上运行。可视化工具会在用户构建电路时展示量子比特模拟量子态的变化。当用户使用文本编辑器编程时，可以实时以图形方式观察电路变化⁵。

2020 年 8 月至 2021 年 3 月，IBM 多次更新云平台，增加了 q-sphere view、phase disk、电路执行过程中测量和批量处理量子门等功能⁶。

2021 年 3 月，由 IBM Quantum Composer 和 IBM Quantum Lab 组成，它们取代了 IBM Quantum Experience。IBM Quantum Composer 是一个图形化的量子编程工具，允许用户操作来构建量子电路并在真实的量子硬件或模拟器上运行它们。而在 Quantum Lab 中，用户可以在 Jupyter Notebook 环境中编写结合 Qiskit 代码、方程、可视化和叙述文本的脚本，在真正的量子硬件或模拟器上运行代码，从任何地方存储、访问和管理文件。

³ <https://newsroom.ibm.com/2016-05-03-IBM-Makes-Quantum-Computing-Available-on-IBM-Cloud-to-Accelerate-Innovation>

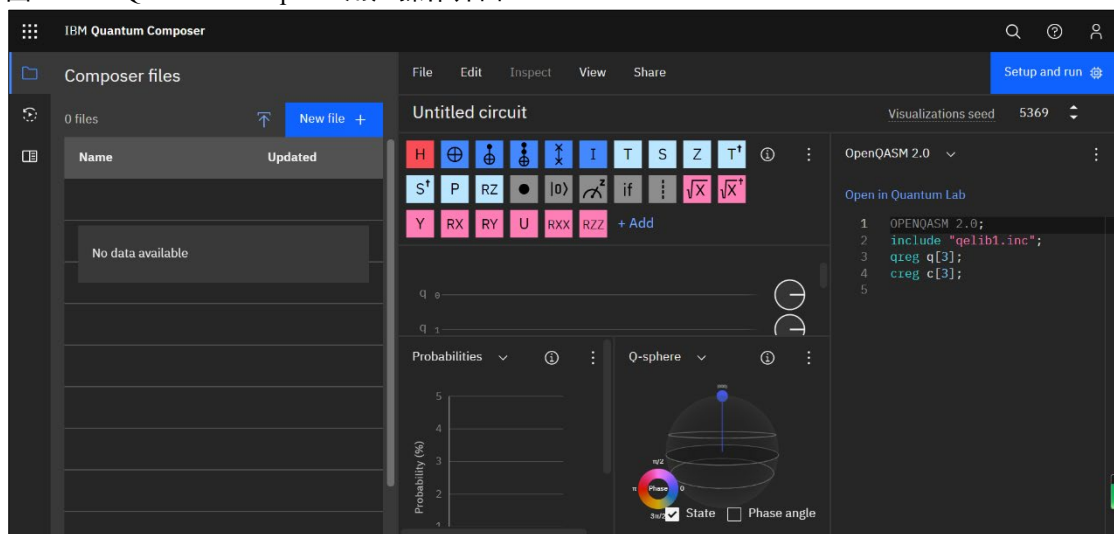
⁴ Qiskit 是一个用于编程量子计算机的开源框架。

⁵ <https://www.ibm.com/blogs/research/2019/05/next-gen-ibmqx/>

⁶ <https://quantum-computing.ibm.com/notifications?type=Product%20Update>

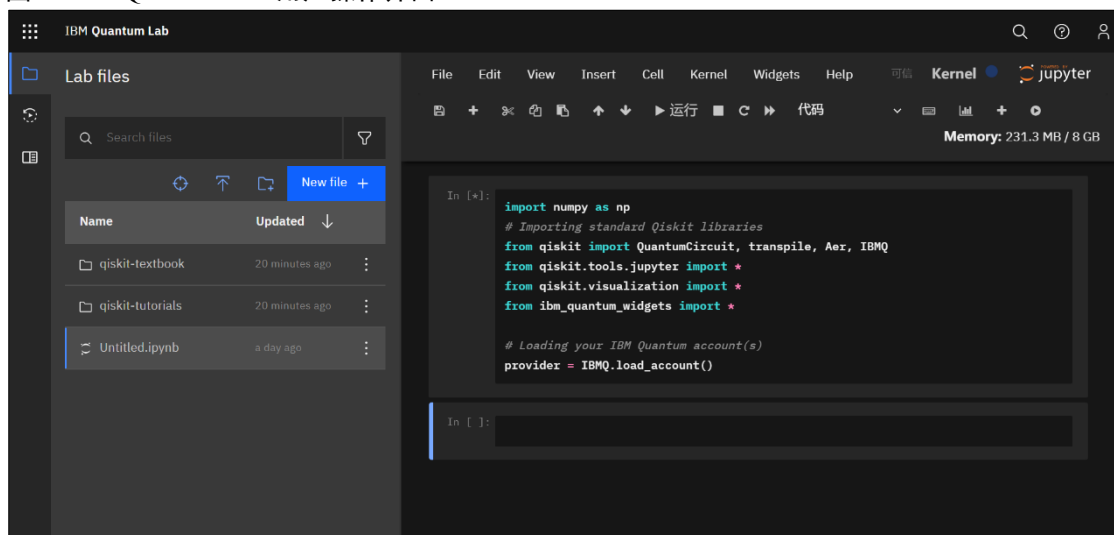
目前,IBM 量子云平台实行三个等级的访问,最初级的访问是 Open Access,用户仅需简单注册,即可通过公共云提供的多个量子计算系统;中级的访问是 Advance Access,具有更多量子比特数量和容量的开放和附加系统的特定用户;高级的访问是 Premium Access,通过订阅优先时间分配,使用 IBM 最先进的量子计算系统。Advance Access 和 Premium Access 需申请特别的用户使用权限。⁷

图 2 IBM Quantum Composer 用户操作界面



来源: IBM Quantum⁸

图 3 IBM Quantum Lab 用户操作界面



来源: IBM Quantum⁹

⁷ <https://www.ibm.com/quantum-computing/services/>

⁸ <https://quantum-computing.ibm.com/composer/files/new>

⁹ <https://quantum-computing.ibm.com/lab/files/Untitled.ipynb>

2、谷歌

2018 年 7 月，谷歌 AI Quantum 团队发布了 Cirq 的公开测试版，这是一个 NISQ 计算机（具有约 50-100 个量子比特和高保真量子门的设备）的开源框架。

¹⁰ Cirq 用于编写、操作和优化量子电路，然后在量子计算机和量子模拟器上运行它们。通过调用 Quantum Engine——API，可以在模拟器或量子计算机上运行用户在 Cirq 中创建的电路。用户需先填写问卷申请访问权，通过身份验证后方可访问位于加州圣巴巴拉的谷歌量子计算实验室的量子处理器（54 量子比特的 Sycamore），远程运行量子程序。¹¹

3、Rigetti

2018 年 9 月，Rigetti 推出了量子计算云服务 Quantum Cloud Service (QCS)，并为此提供 Forest 量子编程框架作为支持¹²。

2019 年 1 月，Rigetti 向公众开放了 QCS，并为量子编程引入了一个全新的访问模式，该模式以集成云架构为中心。并且该程序运行速度比 web API 模式快 30 倍¹³。

2019 年 12 月，Rigetti 加入 AWS Partner Network（AWS 合作伙伴网络，简称 APN）与 Amazon 合作，通过 Braket 量子计算机向客户开放¹⁴。

2020 年 8 月，Rigetti 与 Amazon Braket 合作，每个 AWS 客户都可以访问 Aspen-8——基于 Rigetti 最新的 32 量子比特节点技术的门型超导量子处理器¹⁵。

4、QuTech

QuTech 是由 TNO（荷兰应用科学研究组织）和荷兰代尔夫特理工大学共同

¹⁰ <https://ai.googleblog.com/2018/07/announcing-cirq-open-source-framework.html>

¹¹ https://quantumai.google/cirq/google/concepts#quantum_programs

¹² <https://www.forbes.com/sites/alexknapp/2018/09/07/rigetti-computing-takes-small-step-toward-cloud-services-in-big-leap-for-quantum-computing/?sh=306f069b6503>

¹³ <https://medium.com/rigetti/quantum-cloud-services-opens-in-public-beta-31989e15e36e>

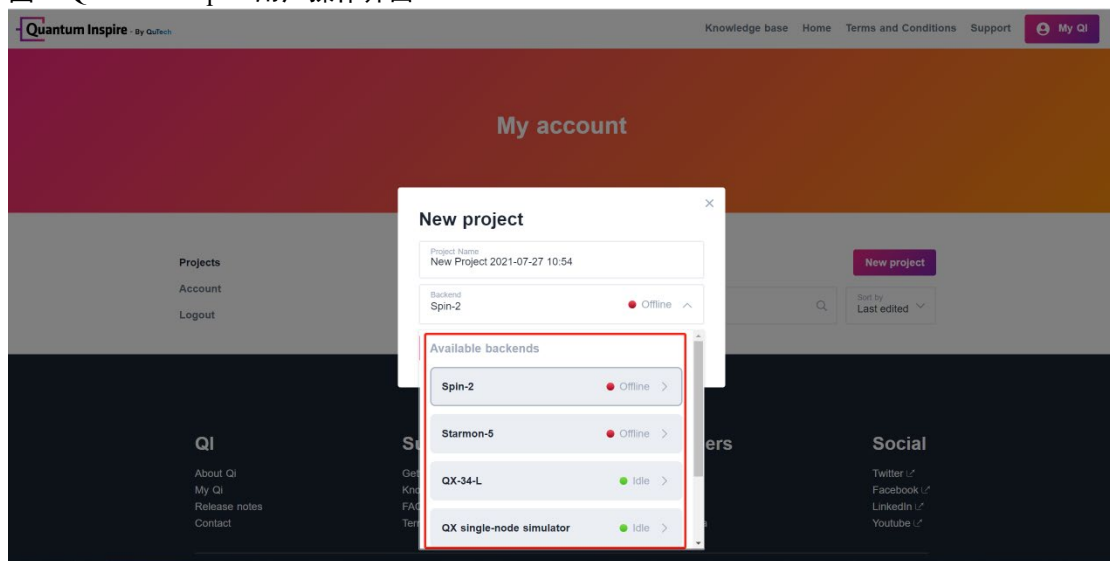
¹⁴ <https://www.prnewswire.com/news-releases/rigetti-quantum-computers-now-available-via-amazon-web-service-s-300967559.html>

¹⁵ <https://medium.com/rigetti/rigetti-aspen-8-on-aws-236d9dc11613>

创立的量子计算机构,2018年9月,QuTech推出量子云平台 Quantum Inspire¹⁶,用户可以在 QX 模拟器上使用 QI Editor 编写和执行算法。Quantum Inspire 为包含量子芯片、经典控制、量子编译器、软件层和用户界面的全堆栈系统。用户通过 Quantum Inspire 可以使用的 QuTech 量子后端有四个:Starmon-5¹⁷(基于超导 transmon 量子比特的 5 量子比特处理器)¹⁸、Spin-2¹⁹(基于硅自旋量子比特的 2 量子比特处理器)和 QX-single-node simulator(单模式模拟器)和 QX-34-L(可编程量子模拟器)。

2020年4月,Quantum Inspire 成为欧洲第一个公共量子计算平台。Quantum Inspire 使每个人都可以使用量子计算机,并且是世界上第一个使用由可扩展的“自旋量子比特”制成的量子处理器的云平台。²⁰

图 4 Quantum Inspire 用户操作界面



来源: Quantum Inspire²¹

¹⁶ <https://qutech.nl/2018/09/10/go-quantum-computing-quantum-inspire/>

¹⁷ Starmon-5 量子处理器由 X 配置的五个超导 transmon 量子比特组成。每个 transmon 有多达七个端口: 多达四个耦合到最近邻居的总线谐振器、一条用于单量子比特门的微波控制线、一条用于两量子比特门的 通量控制线和一个读出谐振器。

¹⁸ <https://www.quantum-inspire.com/backends/starmon-5/>

¹⁹ Spin-2 量子处理器在同位素纯化的 Si-28 中的双量子点中具有两个单电子自旋量子比特。它结合了高保真操作和长相干时间。它的纳米级尺寸和与标准半导体技术的兼容性使其成为未来扩展到大量量子比特的理想选择。

²⁰ <https://qutech.nl/2020/04/20/minister-ingrid-van-engelshoven-and-european-commissioner-mariya-gabriel-launch-europes-first-quantum-computer-in-the-cloud-quantum-inspire/>

²¹ <https://www.quantum-inspire.com/projects>

5、微软

2019 年 11 月，微软推出了量子云生态系统 Azure Quantum²²。

2020 年 5 月，微软推出了面向特定客户的 Azure Quantum 预览版²³。

2020 年 9 月，东芝加入 Azure Quantum，提供 Ising（伊辛）机来解决大型组合优化问题²⁴。

2021 年 2 月，Azure Quantum 升级为面向公众的公共预览版，用户通过该系统可以访问 IonQ、Honeywell Quantum Solutions、Quantum Circuits 的量子计算机，还可以使用微软、1QBit、东芝开发的优化算法²⁵。

2021 年 6 月，Azure Quantum 进一步扩充其求解器产品，在原有的求解器平行回火（PT）和量子蒙特卡罗（QMC）的基础上，又增加了另外两种算法：次随机蒙特卡罗（SSMC）和群体退火（PA）²⁶。

2021 年 7 月，微软宣布 Azure Quantum 即将进行更新，增加四个功能：1、量子 Python 开发人员能够将电路直接发送到 Azure Quantum，通过与主要的量子 Python SDK 集成，开发人员可以使用他们熟悉的工具来体验 Azure Quantum 生态系统并与之交互；2、开发人员将可以从 Jupyter Notebooks 中免费访问 Azure Quantum；3、增加了一个基于云的全状态模拟器，使开发人员可以模拟更大的量子程序；4、推出新的开放系统模拟器（预览版），使开发人员可以模拟程序如何在当今可用的硬件系统上运行²⁷。

6、亚马逊

2019 年 12 月，AWS（Amazon Web Services，亚马逊网络服务）推出量子云

²² <https://www.forbes.com/sites/martingiles/2019/11/04/microsoft-cloud-computing-and-quantum-computers/?sh=2985679d57e4>

²³ <https://cloudblogs.microsoft.com/quantum/2020/05/19/azure-quantum-preview-new-developer-training-learning-tools/>

²⁴ <https://cloudblogs.microsoft.com/quantum/2020/09/22/toshiba-joins-azure-quantum-network-machine-solving-large-combinatorial-optimization-problems/>

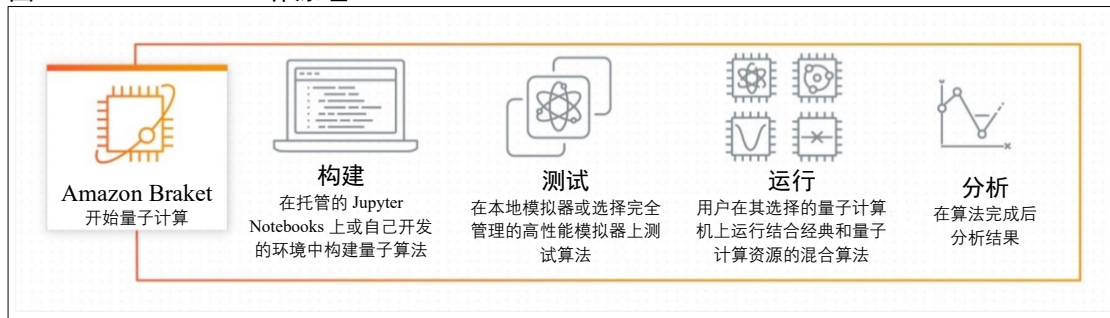
²⁵ <https://azure.microsoft.com/en-us/services/quantum/#features>

²⁶ <https://cloudblogs.microsoft.com/quantum/2021/06/17/new-solvers-further-enhance-the-azure-quantum-optimization-offering/>

²⁷ <https://cloudblogs.microsoft.com/quantum/2021/07/09/announcing-azure-quantum-credits-and-new-development-capabilities/>

平台 Braket²⁸。首先，用户可以通过 Amazon Braket 从零开始设计和构建自己的量子算法，也可以选择预构建的算法。然后，用户可以选择 Amazon Braket 提供的模拟器来测试、排查和运行该算法。接着，用户可以在 D-Wave（量子退火）、IonQ（离子阱）、Rigetti（超导）三家公司提供的量子计算机上运行算法。最后，用户可以为组织评估量子计算的潜力，并掌握专业知识。

图 5 Amazon Braket 工作原理



来源：aws²⁹

7、D-Wave

2018 年 10 月，D-Wave 推出 Leap 量子云服务，提供访问量子计算机、开源开发工具、交互式演示和编码示例、教育资源和知识库文章³⁰；

2019 年 10 月，D-Wave Systems 宣布，将把 Leap 量子云系统安装在位于德国于利希研究中心的超级计算中心，欧洲的商业客户可以通过 Leap 访问 D-Wave 2000Q³¹。

2019 年 12 月，D-Wave Systems 在 AWS re: Invent（AWS 举办的年度大会）上，宣布将 Leap API 扩展到 Amazon Braket，AWS 用户从而可以通过 Leap 量子云服务 API 实时云访问 D-Wave 的 2000Q 量子处理器，客户和开发人员将能够实时利用 D-Wave 的处理能力直接从 Amazon Braket 运行量子应用程序³²。

2020 年 2 月，Leap 正式升级为 Leap 2，旨在帮助企业和开发人员从量子探

²⁸ <https://aws.amazon.com/cn/about-aws/whats-new/2019/12/introducing-amazon-braket/>

²⁹ <https://aws.amazon.com/cn/braket/>

³⁰ <https://www.dwavesys.com/company/newsroom/media-coverage/ieee-spectrum-d-wave-launches-free-quantum-cloud-service/>

³¹ <https://www.dwavesys.com/press-releases/d-wave-announces-first-european-leap-quantum-cloud-site>

³² <https://www.dwavesys.com/company/newsroom/press-release/d-wave-expands-leap-api-into-amazon-braket/>

索过渡到量子生产³³。

2020 年 7 月，印度和澳大利亚引进了 Leap 量子云服务，这两个国家的开发人员、研究人员和企业现在可以通过 Leap 实时访问 D-Wave 2000Q 量子计算机、混合求解器和量子应用环境³⁴。

2021 年 2 月，新加坡引进了 Leap 量子云服务，使新加坡的开发人员、研究人员和企业可以通过 Leap 实时访问 D-Wave 的 Advantage 量子计算机、混合量子/经典求解器和量子应用环境³⁵。

截至 2021 年 8 月，Leap 量子云服务允许访问的国家有 38 个，包括欧盟所有 27 个成员国、日本、冰岛、列支敦士登、挪威、瑞士、英国、美国、澳大利亚等，这些国家的用户可以访问 D-Wave 2000Q 系统及其量子应用环境 (QAE)，中国目前不在可访问国家列表中。³⁶

8、Strangeworks

2021 年 2 月，Strangeworks 上线发布。Strangeworks 量子计算平台是一个免费的量子计算生态系统，使研究人员、开发人员和爱好者能够快速学习、开发量子代码。

通过 Strangeworks 量子计算平台，用户可以轻松创建、组织和协作量子计算项目，并访问代码库、框架和语言。其中包括亚马逊 Braket SDK、Blueqat、谷歌 Cirq、D-Wave Ocean、Forest、Jupyter Notebooks、微软 QDK (Q#)、Atos MyQLM、IBM OpenQASM、ProjectQ、Python、IBM Qiskit、Xanadu PennyLane 和 Xanadu Strawberry Fields。同时该平台还与 IBM 等诸多量子计算公司合作，将其加入到自己的量子计算生态中。加入方式目前为在网站上显示各量子计算云平台的网站链接。当前该平台本身的量子计算后端仅有量子计算模拟器。

³³ <https://www.dwavesys.com/company/newsroom/media-coverage/techcrunch-d-wave-launches-leap-2-the-next-version-of-its-quantum-cloud-service/>

³⁴ <https://www.dwavesys.com/company/newsroom/press-release/d-wave-expands-leap-quantum-cloud-service-to-india-and-australia/>

³⁵ <https://www.dwavesys.com/press-releases/d-wave-introduces-leap-quantum-cloud-service-singapore>

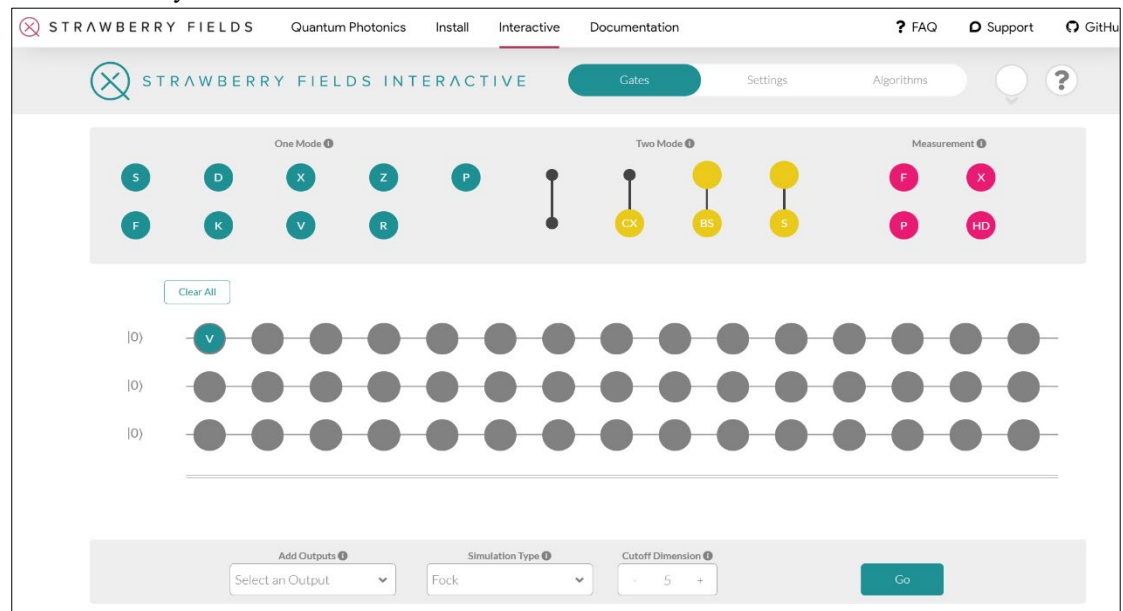
³⁶ <https://support.dwavesys.com/hc/en-us/articles/360051869733-From-What-Countries-Can-I-Access-Leap>

9、Xanadu

2020 年 9 月，Xanadu 推出了全球首个基于光量子计算的云平台，宣布提供三款光量子计算机，分别为 8 模式、12 模式和 24 模式。Xanadu 希望量子云能够让企业、开发者和研究人员为金融、量子化学、机器学习和图像分析等领域的问题建立新的解决方案。

此外，Xanadu 发布了用于光量子计算的开源全栈量子软件平台 Strawberry Fields，这是一个基于 TensorFlow 的框架，将机器学习的最新进展与量子计算进行了结合。Strawberry Fields 允许对光量子算法进行编程，并通过 Xanadu 量子云平台在硬件上执行或模拟光量子算法。与基于其他量子比特的系统相比，光量子程序使用不同的逻辑门组合，并具有不同的近期商业应用。Strawberry Fields 支持最多 10 光量子比特的计算³⁷，有 Fock、Gaussian 和 Fock (Tensorflow) 三种模拟器后端可选。可以根据需要添加 Fock 状态、量子矢量图、Wigner 函数和 Python 代码四种输出。

图 6 Strawberry Fields 操作页面



来源：Xanadu³⁸

³⁷ Xanadu 发布之日宣称 Strawberry Fields 接入了 8 量子比特和 12 量子比特芯片，但目前网站免费可使用的量子比特数目最多为 10 量子比特。

³⁸ <https://strawberryfields.ai/interactive/>

二、国内量子计算云平台

1、中科院量子信息与量子科技创新研究院

2017 年 10 月，阿里云和中科院联合发布量子计算云平台。

2018 年 2 月，中科院量子信息与量子科技创新研究院与阿里云共同发布 11 比特的云接入超导量子计算服务，这是继 IBM 后全球第二家向公众提供 10 比特以上量子计算云服务的系统³⁹。

2021 年 4 月，量子计算云平台进行了系统切换，量子创新研究院联合济南量子技术研究院和科大国盾等对网站页面和功能进行了重新设计，超导量子计算原型机升级至 12 比特⁴⁰。

图 7 中科院量子计算云平台用户操作界面



来源：中科院量子计算云平台⁴¹

2、本源量子

2017 年 10 月，本源量子联合中科院量子信息重点实验室推出“本源量子计算云平台”，公众通过互联网远程登录，可使用我国自主研发的 2 量子比特半导

³⁹ http://www.xinhuanet.com/tech/2018-02/23/c_1122442280.htm
⁴⁰ <http://quantumcas.ac.cn/2021/0420/c20522a481291/page.htm>
⁴¹ <https://quantumcomputer.ac.cn/AboutUs>

体芯片以及最大支持 30 量子比特的量子模拟器来实现应用。同时，本源量子还推出了全球首款半导体量子芯片编程语言“量子音符”(QRunes)。量子云是以量子计算为核心的云服务兼具科普、教学、编程等多重功能，用户只需免费注册登录即可使用。

2018 年 4 月，“本源量子计算云平台”推出 64 量子比特的量子计算模拟器付费体验，已注册用户可选择付费体验 42/56/64 量子比特量子计算模拟器。

2020 年 9 月，本源完全自主开发的超导量子计算云平台正式向全球用户开放，该平台提供对本源量子自主研发的超导量子计算机——本源悟源（搭载 6 比特超导量子处理器夸父 KF C6-130）的访问。

2020 年 12 月，本源量子提出量子计算“五朵云”战略，面向全网用户提供“学习—训练—交流—服务—应用”全流程的量子计算服务平台——本源量子云 Beta 3.0。

图 8 本源量子云平台用户操作界面



来源：本源量子云⁴²

3、华为

2018 年 10 月，华为在 HUAWEI CONNECT 2018 大会上，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

⁴² <https://qcloud.originqc.com.cn/quantumVm/5/0>

程框架，基于华为云的超强算力，HiQ 可模拟全振幅 42 量子比特以上，单振幅 81 量子比特以上，对于低深度电路的单振幅可模拟 169 量子比特⁴³。

2019 年 9 月，HUAWEI CONNECT 2019 大会上发布了华为量子云服务解决方案 HiQ 2.0，相较于此前发布的 HiQ 1.0，HiQ 2.0 推出了业界首个一站式量子化学应用云服务及对应的软件包 HiQ Fermion，新增云端脉冲优化设计服务及对应的 HiQ Pulse 软件包，并大幅提升了量子计算模拟器的性能，拓展了量子计算编程框架的多个功能⁴⁴。

2020 年 9 月，华为量子团队在 HUAWEI CONNECT 2020 大会上发布了 HiQ 3.0 量子计算模拟器及开发者工具，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⁴⁵。

4、阿里巴巴达摩院量子实验室

2020 年 12 月，阿里巴巴达摩院量子实验室发布阿里云量子开发平台 (Alibaba Cloud Quantum Development Platform, ACQDP)，并公开量子计算模拟器“太章 2.0”代码及一系列量子应用案例。⁴⁶ACQDP 是一个可用于量子算法和量子计算机的开源仿真器驱动的开发工具平台。

ACQDP 未来的发展方向如下：根据目标电路的规模，加强模拟器的能力，并允许近似；提高应用能力，扩大应用范围；为教育和研究社区开发友好的用户界面；添加方便在各种计算环境中部署的实用工具。⁴⁷

5、百度

⁴³ <https://www.huawei.com/cn/news/2018/10/huawei-hiq-cloud-service-platform>

⁴⁴ <https://www.qtumist.com/post/9548>

⁴⁵ <https://www.qtumist.com/post/12516>

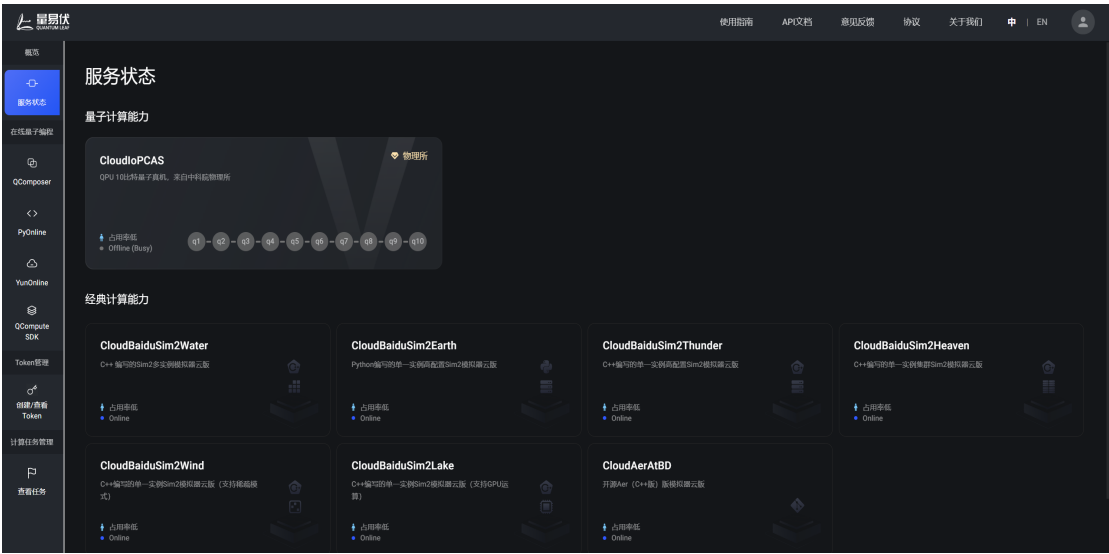
⁴⁶ <http://www.c114.com.cn/quantum/5285/a1148524.html>

⁴⁷ <https://github.com/alibaba/acqdp>

2018 年 3 月，百度成立量子计算研究所，致力于广泛开展量子技术储备、量子人才培养以及新量子业务探索，主要聚焦于量子软件和信息技术应用研究，重点进行量子人工智能（Quantum AI），量子算法（Quantum algorithm）和量子架构（Quantum architecture）的研发，合称为 QAAA 规划。目前已经初步建成由量脉（Quanlse）⁴⁸、量桨⁴⁹（Paddle Quantum）以及量易伏（Quantum Leaf）三大项目为主体的百度量子平台，旨在提供全面的 QaaS⁵⁰。

2020 年 9 月，在“万物智能——百度世界 2020”大会上，量易伏压轴登场。⁵¹量易伏是国内首个云原生量子计算平台，提供 QaaS 模式的量子计算环境。量易伏为用户提供了四种方式进行量子计算实验，其中 QComput 支持本地运行和连接在线资源运行，PyOnline、QComposer 和 YunOnline 则需要登录 Quantum-hub 在线运行。

图 9 百度量易伏用户操作界面



来源：量易伏⁵²

⁴⁸ 量脉：是连接量子软硬件的桥梁，基于量脉开源的软件开发工具包，可以自动、高效地实现对量子电路进行脉冲层面的控制

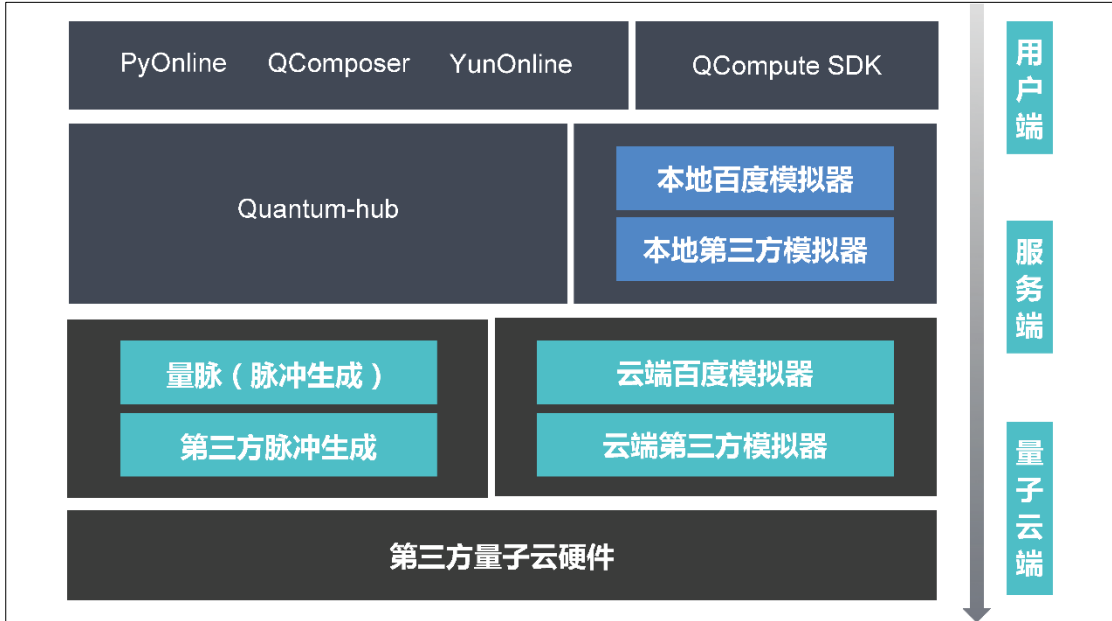
⁴⁹ 量桨：是连接量子计算和 AI 的桥梁，基于百度飞桨深度学习平台，支持量子神经网络的搭建与训练，提供易用的量子机器学习开发套件与量子优化、量子化学等前沿量子应用工具集

⁵⁰ <https://quantum.baidu.com/>

⁵¹ <https://haokan.baidu.com/z/activity/index?fit=1&id=678>

⁵² <https://quantum-hub.baidu.com/services>

图 10 百度量易伏架构



来源：量易伏⁵³

6、量旋科技

深圳量旋科技有限公司 (SpinQ, 以下简称“量旋科技”) 与深圳量子科学与工程研究院、南方科技大学物理系合作, 在 2018 年 11 月联合发布了世界上首台开放控制层的核磁共振云平台 PCloudQ 平台 (简称 PCQ), 具有四个量子比特, 不但具有当前世界上大多数主流量子云平台所提供的功能, 还是国际上首个开放控制层的云平台。除了提供给用户基本的量子门, 包括任意角度的单比特旋转和两比特控制非门 (CNOT)、交换门 (SWAP) 等以外, PCQ 还开放了底层控制层, 即允许用户自主设计量子控制脉冲形状。平台提供了预先配置的编译环境, 即可以满足业余爱好者初步体验量子计算, 又可以满足专业科研人员演示量子算法和探索量子现象的需求⁵⁴。

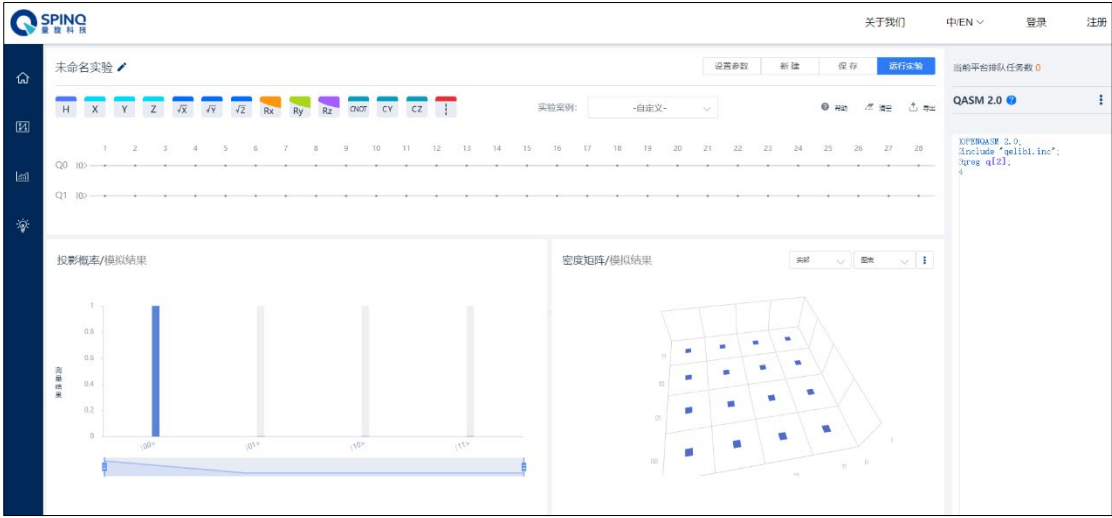
2020 年 10 月, 在 CT2020·中国高层论坛之量子计算论坛上, 量旋科技发布了新一代通用量子计算云平台“金牛座”。该云平台可链接多种量子计算物理体系, 其搭载的超导核磁共振体系可以实现多达 6 量子比特的量子计算, 能极大满足科研工作者的设计需求; 同时还搭载有 2 量子比特的桌面型核磁共振量子计

⁵³ <https://quantum-hub.baidu.com/quickGuide#>

⁵⁴ <https://www.spinq.cn/aboutUs>

算机（双子座），可为量子计算领域的兴趣爱好者提供充足的机时。⁵⁵。

图 11 量旋科技“金牛座”云平台用户操作界面



来源：量旋科技云平台⁵⁶

7、北京量子院

北京量子信息科学研究院（以下简称“北京量子院”）子云平台旨在推动实用量子算法和量子模拟的发展，促进量子计算技术走向成熟。

2021 年 5 月，北京量子院量子计算研究部第一代超导量子计算云平台正式上线，对大众全面开放⁵⁷。

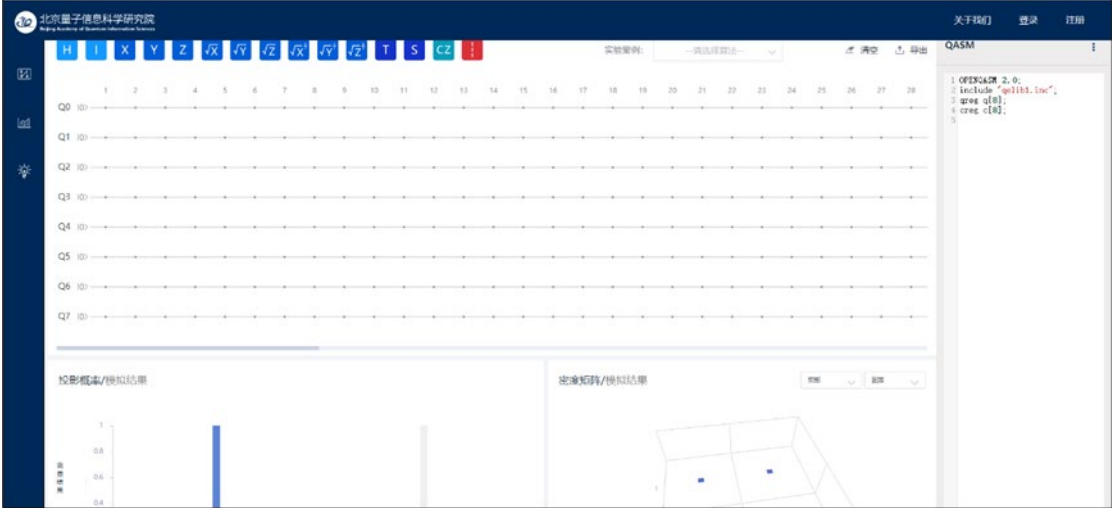
该云平台的特点如下：提供 8 个近邻耦合的可调频率量子比特；采用简洁直观的图形化界面，用户可自由组合量子门并返回各量子比特投影测量结果；提供 QASM 代码和实时的模拟结果，让用户能够更直观了解量子电路的预期运行结果。

⁵⁵ <https://www.spinq.cn/aboutUs>

⁵⁶ <https://cloud.spinq.cn/#/gemini>

⁵⁷ https://mp.weixin.qq.com/s/j51uE_kGq3tt4M932dvVFw

图 12 北京量子院云平台用户操作界面



来源：北京量子院⁵⁸

8、中国科学院物理研究所

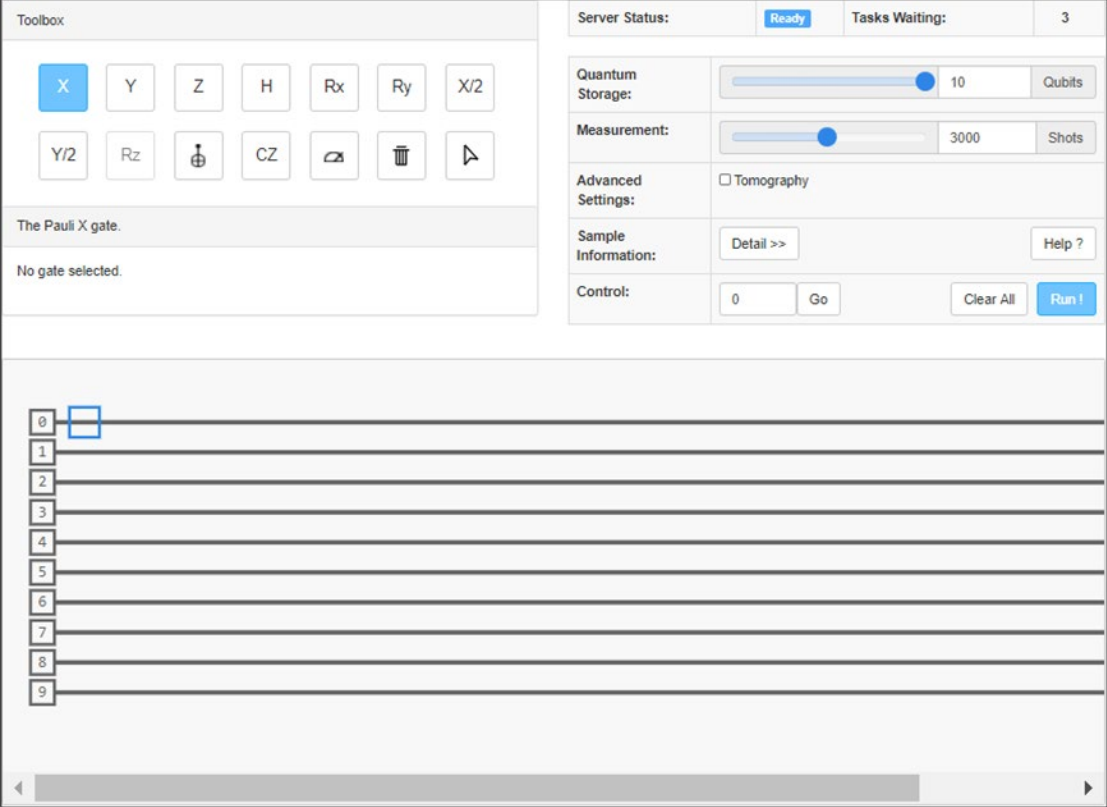
2021 年 5 月，中科院物理研究所的超导量子计算云平台 ScQ .Cloud 正式上线⁵⁹。该云平台免费对公众开放，用户可访问 10 量子比特的量子处理器。ScQ .Cloud 提供了一个超导处理器集群，分别集成了 10 个和 30 个量子比特。该平台还提供了一个基于名为 QtVM 的计算机服务器的模拟器，它可以运行多达 34 个量子比特的量子计算。量子汇编语言 QASM 可以应用于 ScQ .Cloud⁶⁰。ScQ .Cloud 还与公司合作，提供定制科研和教学服务。

⁵⁸ <https://qcloud.bqis.ac.cn/#/superconductor>

⁵⁹ <https://mp.weixin.qq.com/s/KnsEjyfs9Aa93Fr1yiW38g>

⁶⁰ <http://q.iphy.ac.cn/>

图 13 ScQ.Cloud 用户操作界面



来源：ScQ.Cloud⁶¹

9、昆峰量子

2019 年 9 月，上海昆峰量子科技有限公司（以下简称“昆峰量子”）发布了昆冈量子计算（模拟）云平台 1.0 版本。

2020 年 9 月，昆冈量子计算（模拟）云平台 2.0 版本正式对外提供服务。此版本新增对经典量子混合式编程的支持，包括远程调用接口 API 与基于网页的集成开发环境 IDE。此外，在模拟性能、易用性、可靠性等多个方面均比之前的 1.0 版本有着显著提升。昆冈 2.0 版本支持 40 量子比特的量子电路模拟，现对外免费开放 36 量子比特的模拟能力；一体化集成的经典量子混合编程框架，向量子研发人员提供相对友好的交互界面；云原生的工程架构，拥有高可靠性、高可扩展性，可以根据需要支持不同级别的备份及容灾⁶²。

2021 年 6 月，昆昇量子设计服务云平台（QDAP）Alpha 版正式发布上线。

⁶¹ <http://q.iphy.ac.cn/scq.php>

⁶² https://mp.weixin.qq.com/s/iVI_pbz9N55F9MntMRLKw

它是全世界第一家“云原生”面向量子芯片设计自动化（QDA）的平台，旨在为量子计算和量子器件领域的从业人员提供即开即用、基于云端的量子芯片设计服务⁶³。昆昇目前仅供邀请客户使用，体验使用需申请后获批即可。

图 14 昆峰量子模拟云平台



来源：昆峰量子⁶⁴

IBM 是最早发布商业化量子云平台的公司，而且随后不断进行升级和拓展功能。中国公司在量子云平台 and 模拟器的建设也紧跟国际步伐，有至少 9 家公司/科研机构提供量子云平台/模拟器。下表汇总了量子云平台/模拟器首次发布时间：

表 2 量子云平台/模拟器首次发布时间

序号	时间	机构	云平台/模拟器
1	2013.09	布里斯托大学量子光子学中心	Qcloud 量子模拟器 ⁶⁵
2	2016.05	IBM	IBM Quantum Expeirence
3	2017.10	中科院量子信息与量子科技创新研究院	量子计算云平台
4	2017.10	本源量子	本源量子计算云平台
5	2017.10	清华大学	NMRCloudQ
6	2018.07	谷歌	Cirq（开源框架）
7	2018.09	Rigetti	Quantum Cloud Service
8	2018.09	QuTech	Quantum Inspire
9	2018.10	D-Wave	Leap
10	2018.10	华为	HiQ
11	2018.11	量旋科技	PCloudQ
12	2019.09	昆峰量子	昆网量子模拟云平台
13	2019.11	微软	Azure Quantum

⁶³ <https://mp.weixin.qq.com/s/SqH6wYxy6FD9oo0tZcMnCw>

⁶⁴ <https://kfquantum.com/#/quantumlist>

⁶⁵ <http://www.bris.ac.uk/news/2013/9720.html>

量子计算系列报告

14	2019.12	亚马逊	Braket
15	2020.04	AQT	SCCE ⁶⁶
16	2020.09	Xanadu	Xanadu Quantum Cloud
17	2020.09	百度	量易伏
18	2020.12	阿里巴巴达摩院量子实验室	阿里云量子开发平台、太章 2.0
19	2021.02	Strangetworks	Quantumcomputing.com ⁶⁷
20	2021.03	Sandia 实验室	QSCOUT ⁶⁸
21	2021.05	北京量子院	超导量子计算云平台
22	2021.05	中科院物理所	ScQ .Cloud

来源：光子盒研究院

⁶⁶ <https://www.aqt.eu/hqs/>

⁶⁷ 目前仅开放模拟器，硬件尚未开放。<https://app.quantumcomputing.com/signup>

⁶⁸ <https://www.sandia.gov/quantum/Projects/QSCOUT.html>

第四章 量子计算云平台的对比

目前全球约有 20 余家公司/大学/科研机构开发了量子计算云平台，各家量子云平台提供的服务、配置以及价格和计费方式等不完全相同。下面从平台的配置和价格两方面进行简要介绍。

一、量子计算云平台配置对比

以下选择了 4 个量子云平台，它们都提供免费的服务，以下将从其基本信息、配置、功编程、实时以及结果这五个角度进行对比。

表 3 国内外量子云平台比较

基本信息	云平台名称	本源量子云平台	量子计算云平台	IBM Quantum Composer & Lab	Quantum Inspire
	开发方	合肥本源量子计算	中国科学院量子信息与量子科技创新研究院	美国 IBM	荷兰 Qutech
配置	是否可免费访问	是	是 ^[1]	是	是
	量子比特数 ^[2]	6	12	5、1 ^[3]	5、2
	最大模拟次数	10,000	20,000	8,192	16,384
	是否具有量子计算模拟器后端 ^[4]	是	否	是	是
编程	是否具有量子语言编程功能	是	否	是	是
	是否具有量子可视化编程功能	是	是	是	否
	可视化编程具有的量子门数量	22	16	26 可自定义添加	0
实时	是否实时显示当前量子电路	是	是	是	是
	是否实时显示当前量子态	预期投影概率 预期密度矩阵 预期振幅 ^[5]	否	q-sphere ^[6] phase disk 状态向量图 概率分布图	否
结果	是否显示量子态概率分布	是	是 ^[7]	是	是
	结果是否包括其他内容	有 ^[8]	无	无	无

[1] 每个用户初始具有 200 积分，每次实验（不超过 12bit）消耗一个积分，优秀实验可奖励积分；

[2] 真实量子计算后端的量子比特数；

[3] 当前免费版本可选取的真实量子计算后端仅包括 1 qubit 和 5 qubits 两种规模，IBM Services 网站上还包括 7、16、27、65qubits 多种后端；

[4] 指具有 30qubits 以上的全振幅输出量子计算模拟器；

- | |
|-----------------------------------|
| [5] 可显示范围为 7、4、7 qubits 以内； |
| [6] 可显示范围为 15、6、8、5 qubits 以内； |
| [7] 只显示频度最高 12 种状态分布； |
| [8] 结果报告包括芯片拓扑结构、保真度、量子层析、量子汇编语言。 |

来源：光子盒研究院

从各家云平台配置的可免费访问量子比特数目来看，量子创新研究院量子云平台以 12 量子比特大幅领先另外 3 家云平台，但 4 家云平台中只有量子创新研究院量子云平台没有配有高量子比特数的量子计算模拟器。

从操作界面可视化方面来看，IBM 的云平台和本源量子云平台均同时具有量子语言编程和可视化两种编程途径，而且可选的量子操作指令也比较全面，明显优于量子创新研究院量子云平台和 Quantum Inspire。

从实验结果显示方面来看，除本源量子具有芯片拓扑结构、保真度、量子层析、量子汇编语言内容外，其他量子云平台均只包括量子态概率分布，内容比较单一。

整体来看，IBM 的云平台和本源量子云平台目前处于量子云平台产业中的领先地位。

对于本源量子云平台而言，可以多专注于硬件技术方面的研发以扩充自身后端的量子比特数目，进一步优化自身服务；对于中科院量子计算云平台而言，除了继续保持自身在量子计算硬件方面的优势，也要通过在可视化模块及量子模拟计算方面来努力优化用户服务；而 Qutech 除了要在自身芯片研发上继续钻研，对于云平台的服务优化也是其下一步努力的方向。

二、量子计算云平台价格对比

目前量子云平台的服务分为免费和付费两种，而付费服务则根据计费方式的不同，一般分为即用即付和按操作定价两种。

1、免费服务

大部分的量子云平台目前都提供免费的接入，例如 IBM 的 Open Access 和量子创新研究院的量子云平台。但一般而言，部分平台的免费服务可能会有次数或时长限制，以及免费服务内所具有的量子算力和量子计算模拟器模拟的量子比

特数量较付费而言较少。更适合有满足量子计算兴趣、具有量子教学的需求以及量子计算初学者这些用户选择。部分量子计算云平台会同时提供免费服务和更高性能的付费服务。

2、即用即付

即用即付指的是按时间计费。由于目前量子计算云平台的定价政策尚未成熟,根据量子处理器的使用时间的定价是目前占主导地位的定价策略,并且被用户广泛接受。基于时间消耗的定价服务对客户来说更有利用控制自己的整体量子计算费用。以下为部分采用即用即付定价策略的量子云平台。

表 4 本源量子云平台量子计算模拟器价目表

任务种类	收费标准
42 量子比特	基本费用 100 元, 100 元/小时
56 量子比特	基本费用 200 元, 100 元/小时
64 量子比特	基本费用 3,000 元, 50,000 元/天

来源: 本源量子云⁶⁹

表 5 微软 Azure Quantum 价目表

SKU 每月配额	求解器	性能	价格 (按秒计费)
学习和开发 1/20 计算小时 (默认/最大)	模拟退火 模拟退火 (无参数) 平行回火 平行回火 (无参数) 量子蒙特卡罗 Tabu 搜索	最多 5 个并发作业	0-1 小时: 免费 1-20 小时: \$10 /小时
	FPGA 模拟退火	最多 2 个并发作业	0-1 小时: 免费
大规模性能 1,000 计算小时 (默认) 50,000 计算小时 (最大)	模拟退火 模拟退火 (无参数) 平行回火 平行回火 (无参数) 量子蒙特卡罗 Tabu 搜索	最多 100 个并发作业	0-1 小时: 免费 1-100 小时: \$90 /小时 100-500 小时: \$80 /小时 500-1000 小时: \$70 /小时 >1000 小时: \$50 /小时
	FPGA 模拟退火	最多 10 个并发作业	0-1 小时: 免费 1-100 小时: \$900 /小时 100-500 小时: \$800 /小时 500-1000 小时: \$700 /小时 >1000 小时: \$500 /小时

来源: Microsoft Azure⁷⁰

表 6 Amazon Braket 云平台量子电路模拟器价目表

量子电路模拟器名称	类型	作用	模拟量子比特数	价格
-----------	----	----	---------	----

⁶⁹ <http://www.originqc.com.cn/website/businessNewsDetail.html?newsId=127>

⁷⁰ <https://azure.microsoft.com/zh-cn/pricing/details/azure-quantum/#purchase-options>

本地模拟器	通用量子电路模拟器	在高性能托管模拟器和量子计算机上运行电路之前，可使用本地模拟器进行快速原型设计、调试或测试	25 个无噪声量子比特或 12 个有噪声量子比特	免费
Amazon Braket SV1	完全托管的量子电路状态向量模拟器	使用本地模拟器在 Amazon Braket SDK 中设计量子算法后，使用 SV1 并行处理大规模测试算法以运行大量模拟	34	\$0.075 /分钟 (第 1 小时免费)
Amazon Braket DM1	完全托管的高性能模拟器	模拟噪声对电路的影响	17	\$0.075 /分钟 (第 1 小时免费)
Amazon Braket TN1	完全托管的高性能张量网络模拟器	针对某些类型的量子电路进行更大规模的模拟	50	\$0.275 /分钟 (第 1 小时免费)

来源：aws⁷¹

3、按操作定价

按操作定价是指根据基于某一确定后端的操作次数收费的定价策略。该策略适合对于量子计算性能有所需求但需求量较少的用户，如 Amazon Braket 云平台。

表 7 Amazon Braket 量子计算云平台量子计算机价目表

硬件提供方	QPU 家族	量子比特数	每个任务的价格 ⁷²	每次 shot ⁷³ 的价格
D-Wave	2000Q	2000	\$0.30000	\$0.00019
D-Wave	Advantage	≥5000	\$0.30000	\$0.00019
IonQ	IonQ device	32	\$0.30000	\$0.01000
Rigetti	Aspen-9	31	\$0.30000	\$0.00035

来源：aws⁷⁴

在未来，随着量子计算日趋成熟，各平台将会提供更为丰富的定价策略，供用户根据自身需求选择。

⁷¹ <https://aws.amazon.com/cn/braket/pricing/>

⁷² 任务 (task) 是基于相同电路设计或退火问题的一系列重复试验。当把任务提交给 Amazon Braket 时，用户可以定义希望在一个任务中包含多少 shot (在 QPU 上单次执行量子算法)。每个任务的定价 (per-task pricing) 在所有 QPU 中都是相同的。

⁷³ 一个 shot 是指量子算法在 QPU 上的一次执行。例如，一个 shot 是通过 IonQ 或 Rigetti 的基于门的 QPU 上的完整量子电路的每个阶段的单次传递。当您使用 D-Wave 量子退火器时，一个 shot 是指获得量子退火问题的结果样本。每次 shot 的价格 (per-shot pricing) 取决于所使用的 QPU 类型。每次 shot 的价格不受量子电路中使用的门的数量或类型或量子退火问题中使用的变量数量的影响。

⁷⁴ <https://aws.amazon.com/cn/braket/pricing/>

第五章 量子计算云平台发展前景

一、量子计算云平台未来发展方向

“云计算+量子计算=量子计算云平台”，这一有机结合一定程度上解决了当前量子计算机资源紧张的问题，扩大了量子计算的覆盖范围，同时，也将推动量子算法与量子软件的开发进程。未来几年，随着量子计算业务的增长，一些重要的因素将有可能为量子云带来新的发展机会：

服务类型的转换：随着量子基础技术的突破，在未来，应用覆盖范围的扩大和应用程度的深化势必会促进一部分 Q-SaaS 云平台用户随着对于量子计算技术和量子编程的了解深入而逐渐转化为 Q-PaaS 和 Q-IaaS 云平台用户。这一发展趋势在当今云计算市场规模的变化中也能略见一二。

量子计算云平台：后端（量子计算机硬件）有设定的操作序列并按顺序执行计算任务，用户发送任务至云端后，机器往往不是可以立即运行，非计算因素导致的延时同样也会影响实验进程。对此，一些供应商已经实现了预定功能，用户可以通过预定后端时间来解决任务的等待时间较长这一问题。在用户体验方面，供应商还有待进一步提高服务能力。

量子计算模拟器：在 NISQ 时代，量子计算模拟器在量子算法和量子软件开发登方面是当下性价比极高的选择。但到纠错量子计算机时代，量子计算机模拟器的效用可能会降低，或是寻求新的发展。

安全问题：由于量子云平台是线上平台，不可避免地存在着对数据安全性的挑战。量子计算技术正处在发展的初期，对量子云平台如何防止黑客攻击、如何保证数据安全等相关方面的研究还有待深入。云加密的漏洞日益增加，除了技术层面需要不断提升，在政策和立法支持方面也需要同步推进。

向量子互联网过渡：目前的量子云是通过经典云访问的，但随着量子技术进一步发展，量子互联网有望扩大其覆盖范围，如何将现在的经典云访问融合到传输量子比特的量子互联网中，是下一步需要考虑的问题。

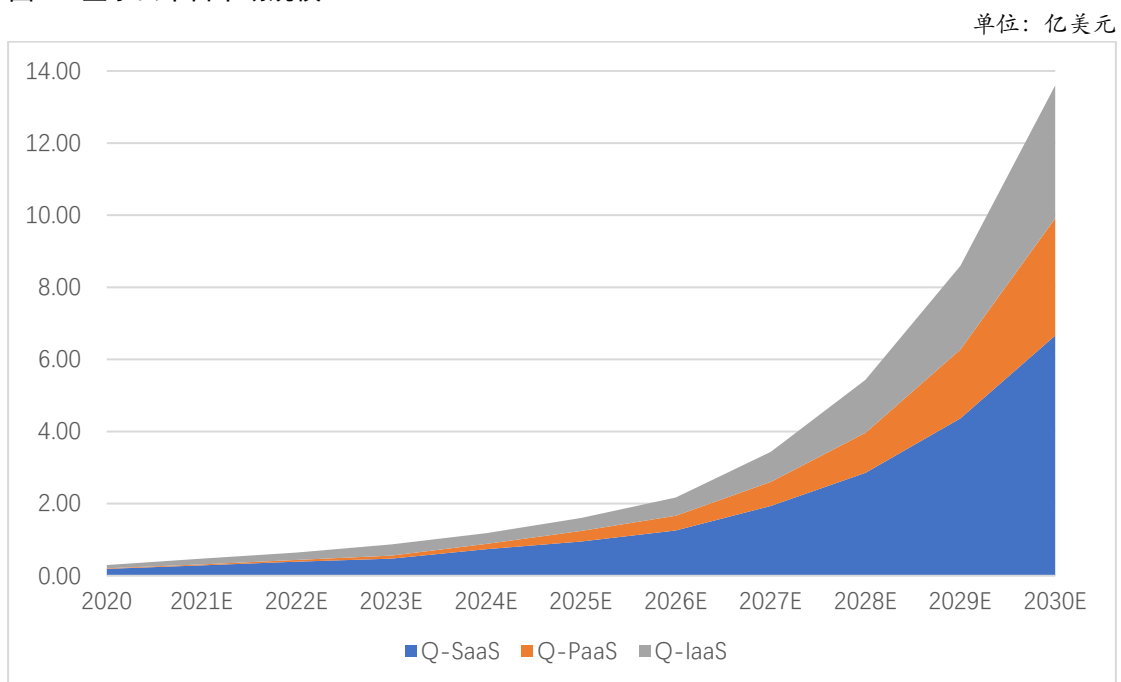
整体来看，量子云平台在未来很长的一段时间都是量子计算领域不可或缺的

一部分，并且为量子计算产业的商业化贡献活力。当下首要的任务是继续优化量子云平台产品和服务，以提供量子基础设施或者差异性软件开发等服务形式扩大自身市场份额，为迎接将要到来的量子计算时代做好准备。

二、量子计算云平台市场规模预测

根据当前量子计算公司发布的研发计划和实际进展，预计到 2030 年左右量子计算芯片已基本达到商业应用的性能标准。此外，随着量子云计算技术逐渐成熟，量子计算云平台的服务价格有可能随着技术进步和用户激增而在未来几年开始降价的策略，这对大型最终用户来说变得更加实惠，同时较低的门槛也会有更多的用户加入进来。在此背景下，光子盒根据当前全球云计算市场规模，结合量子计算云平台发展进程和业务占比，预测量子云平台及其细分市场规模。2030 年的量子计算云平台的全球市场规模约为 13.6 亿美元，年复合增长率约为 46.62%（2020-2030 年）。其中 Q-SaaS 占比逐年缓慢下降，Q-PaaS 占比逐年提高，Q-IaaS 占比基本维持不变。

图 15 量子云平台市场规模



来源：光子盒研究院，2021.08.23

关于作者



编译/撰写：Shuo Wang、Suyan Wang、Xinxin Liang



撰稿指导：Dr. Gu



商务咨询：wangsy@chinafincon.com



科技咨询：caixq@quantumchina.com



公司地址：北京市 东城区 朝阳门 SOHO 1506 室



下载方式：光子盒微信公众号/光子盒微店

了解更多信息，请扫一扫光子盒微信公众号





公众号：光子盒
邮箱：caixq@quantumchina.com
地址：北京市东城区朝阳门SOHO 1506室