

Start sailing

2022

全球量子计算产业发展报告

Global Quantum Computing Industry Development Report

前言

量子计算是一种遵循量子力学规律，进行高速运算、存储、处理信息的新型计算。与传统计算机相比，量子计算机具有天然的量子并行计算能力，存储能力强，运算速度快，将给现有计算能力带来质的飞跃。随着新一轮信息科技革命和产业革命的推进，各个行业数据信息体量不断增加，提高算力的同时又能降低能耗是各国亟待解决的关键问题，而量子计算作为该背景下的先锋技术，为问题的解决提供了颠覆性思路。

对量子计算的研究是突破经典计算算力极限的突破性科学尝试，已成为世界各国抢占军事、安全、经济、科研等领域全方位优势的战略制高点。从概念构想，到实验室成果，再到商业价值初探，探索量子计算物理实现方式和增加量子比特数量是全球研究机构及科技企业追逐的关键目标。

2021 年全球量子计算快速跨入 NISQ 时代，超导量子比特数量正在进入百位时代，多技术路线齐放异彩，量子计算应用积极探索，中美两国领导全球进展，融资规模超过过去十年总和，上市融资也成为 2021 年新潮。

ICV 联合光子盒全球发布《2022 全球量子计算产业发展报告》，展望 2022 年，更加精彩。

ICV 前沿科技咨询总监、高级副总裁：Jude Green



致谢

本篇报告由全球前沿科技咨询机构 ICV 与光子盒联合出品。此外,感谢 Delft Circuits、Google、IBM、IonQ、Origin Quantum (本源量子)、Oxford Instruments、Quantum CTek (国盾量子)、Qudoor (启科量子)、Rigetti 等公司给予技术和素材的支持。

2022 量子计算产业发展报告编写组

2022 年 1 月 25 日

特别鸣谢 (以下顺序按公司英文名称首字母排列, 排名不分先后)



目录

前言.....	1
第一章.....	7
量子计算产业透视.....	7
一、量子计算发展概述.....	8
二、量子计算产业链.....	10
三、量子计算应用场景.....	12
第二章.....	15
量子计算机——齐头并进.....	15
一、超导——最受关注.....	17
二、离子阱——量子体积遥遥领先.....	20
三、光量子——商业化元年开启.....	22
四、中性原子——美国领先.....	24
五、半导体量子点/硅自旋——值得期待.....	26
六、拓扑量子计算——仍有不确定.....	27
七、金刚 NV 色心——扩展难度大.....	29
八、量子退火机——进展不大.....	29
九、相干伊辛机——继续观察.....	29
第三章.....	31
核心元器件——发现与突破.....	31
一、低温设备.....	32
二、测控系统.....	38
三、同轴电缆.....	45
四、低温组件.....	46
五、超高真空 (UHV) 腔.....	48
六、激光器.....	49
七、单光子源.....	50
八、单光子探测器.....	51
第四章.....	57
云平台、软件、算法——应用至上.....	57
一、云平台进展.....	58
(一) 国外量子计算云平台.....	60
(二) 国内量子计算云平台.....	63
二、软件进展.....	66
(一) 国外软件开发企业.....	66
(二) 国内软件开发企业.....	70

三、算法进展.....	75
(一) 金融.....	76
(二) 化学、生物学、医学.....	78
(三) 人工智能.....	81
(四) 汽车.....	83
(五) 航空.....	84
(六) 能源.....	84
(七) 供应链/交通优化.....	85
(八) 天气预报.....	86
(九) 密码.....	86
(十) 基础科学.....	87
第五章.....	90
量子公司——王者与新贵.....	90
一、国外.....	92
二、国内.....	109
第六章.....	123
投融资——勇敢想象.....	123
特点一：上市融资成了量子科技公司的潮流.....	126
特点二：单笔融资金额创纪录.....	127
第七章.....	131
国家政策——坚持支持.....	131
观点 1.....	132
观点 2.....	133
观点 3.....	133
观点 4.....	133
观点 5.....	133
第八章.....	135
2022 年展望.....	135
一、市场规模预测.....	136
二、2022 年发展趋势预测.....	139
附 主要国家和地区的政策支持.....	142
关于我们.....	159

表目录

表 1	主流量子计算公司路线图.....	8
表 2	量子计算各技术路线成熟度评价体系.....	16
表 3	2021 年全球超导量子计算重要进展.....	20
表 4	2021 年离子阱量子计算重要进展.....	22
表 5	2021 年光量子计算重要进展.....	24
表 6	2021 年离子阱量子计算重要进展.....	25
表 7	2021 年半导体量子点/硅自旋量子计算重要进展.....	27
表 8	2021 年拓扑量子计算重要进展.....	28
表 9	量子测控系统发展历程.....	38
表 10	全球量子计算云平台发展历程.....	59
表 11	2021 年全球量子计算软件发展大事件.....	75
表 12	量子计算各技术路线成熟度评价体系.....	76
表 13	生物学和医学领域的预期量子优势.....	80
表 14	2021 年全球量子计算应用算法发展大事件.....	88
表 15	2021 年量子计算融资情况.....	124
表 16	全球量子主要参与者评价体系.....	132

图目录

图 1	量子计算产业链图谱.....	10
图 2	稀释制冷机内部结构.....	33
图 3	牛津仪器 Proteox 无液氦稀释制冷机.....	36
图 4	量子计算测控系统发展趋势.....	40
图 5	量子测控一体机 Origin Quantum AIO.....	41
图 6	ez-Q Engine 超导量子计算操作系统.....	42
图 7	是德科技集成测控系统.....	43
图 8	芯片上方产生的磁场可以控制百万级量子比特.....	45
图 9	低温同轴电缆示意图.....	46
图 10	本源量子极低温系列衰减器.....	47
图 11	霍尼韦尔离子阱量子计算机使用的真空腔.....	49
图 12	国内首台 100kW 超高功率工业光纤激光器.....	50
图 13	近红外波段自由运行单光子探测器 QCD600.....	52
图 14	单光子探测器在离子阱中的应用.....	54
图 15	EMCCD 芯片结构图.....	55
图 16	iXon Ultra 系列 EMCCD 相机.....	56
图 17	本源量子计算“五朵云”.....	64
图 18	量子计算云平台.....	65
图 19	开源电子设计自动化软件 Qiskit Metal.....	67

图 20	Singularity 量子金融分析工具.....	68
图 21	lambeq 将句子转换成量子电路.....	70
图 22	本源司南量子计算操作系统.....	71
图 23	本源量禹使用界面.....	72
图 24	商业风险敏感性分析的量子算法.....	77
图 25	2021 年全球量子计算主要参与者地理分布.....	91
图 26	IBM 量子计算硬件路线图.....	93
图 27	在稳定器电路的批量采样方面, Stim 明显快于以前的工具.....	94
图 28	微软低温控制芯片 Gooseberry.....	98
图 29	Xanadu 可编程光量子芯片.....	102
图 30	PsiQuantum 光量子芯片.....	103
图 31	“九章”二号整体装置图.....	109
图 32	“祖冲之号”66 量子比特超导量子处理器示意图.....	110
图 33	本源量子未来五年量子计算技术规划路线图.....	111
图 34	百度 QIAN 战略规划.....	117
图 35	2014-2021 年全球量子科技公司融资金额及增长率.....	127
图 36	2021 年量子计算两大领域融资额占比情况.....	128
图 37	2021 年量子计算融资情况.....	129
图 38	2021 量子计算融资轮次情况.....	130
图 39	全球量子计算市场预测.....	136
图 40	全球量子计算市场预测.....	137
图 41	全球量子计算下游行业应用预测.....	138



第一章

量子计算产业透视

2021 年，是量子计算界备受瞩目的一年。量子比特数量实现较大规模增长的同时，各量子计算硬件技术均有所发展；越来越多的机构开始研发上层软件和算法，并有越来越多的算法在小规模实际问题中得到实验。

量子计算机能够解决问题的规模在很大程度上取决于量子比特的数量。2021 年以来，主要研究团队都实现了突破，中性原子公司 ColdQuanta 和 Atom Computing 推出了 100+ 量子比特量子计算机，哈佛-MIT 开发了 256 量子比特基于中性原子的量子模拟器。

超导方面，中国科大的 66 量子比特“祖冲之号”实现量子计算优越性，计算复杂度比谷歌“悬铃木”提高了 6 个数量级；Rigetti 则提出了模块化的量子处理器架构，预计在几个月内推出 80 量子比特处理器；IBM 推出了 127 个量子比特的处理器 Eagle。

离子阱方面，IonQ 提出可重构多核量子架构，已扩展到 64 量子比特。光量子方面，传统上光量子计算的缺点是难以编程，但是越来越多的研究表明，光量子计算同样可以编程，例如 Xanadu 公司和国防科技大学都展示了可编程光量子计算芯片，此外，研究人员透露，“九章”未来也将可编程。

一、量子计算发展概述

从主流量子计算公司的技术路线图来看，2021-2022 年左右将突破 100 量子比特，3 年内突破 1000 量子比特，到这个十年结束（2030 年）实现 100 万量子比特。

表 1 主流量子计算公司路线图

Company	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	Farther
 IBM	65	127	433	1121	-	-	-	-	-	-	1m	-
 Google	54	100	-	1000	-	10k	-	100k	-	1m	-	-
 本源量子 ORIGIN QUANTUM	6	24/64	144	-	-	1024	-	-	10k	-	-	1m
 PsiQuantum	0	0	0	0	0	1m	-	-	-	-	-	-
 rigetti	32	80	-	-	1000	-	4000	-	-	-	-	-
 ColdQuanta	0	100	300	-	1000	-	-	-	-	-	-	-
 XANADU	24	40	-	80	-	-	-	-	-	-	1m	-
 IQM	0	5	20	-	50	-	-	-	-	-	-	-
 Silicon Quantum Computing	0	0	0	10	-	-	-	-	-	-	100	FTQC

iCV Tank

资料来源：ICV

量子计算机是否有用的另一个维度是量子比特的质量，主要指标包括：相干时间（决定量子态可以保持多久）、量子比特之间的连接程度、门保真度等。

在相干时间方面：2021 年中国清华大学金奇奂研究组在离子阱系统上刷新了单量子比特相干时间记录（5500 秒）。

在量子比特之间的连接程度方面：离子阱系统可以实现全连接，但量子比特数量较少，超导量子计算机，例如祖冲之号和悬铃木，单个量子比特只与周围 4

个量子比特相连,如果能够提高连接性,那么可解决问题的规模将呈指数级增长,日本 RIKEN 则首次实现了三个半导体(硅自旋)量子比特的纠缠。

在门保真度方面:目前最先进的量子计算系统的 2 量子比特门(纠缠门)保真度都在 99% 以上,目前最高记录是澳大利亚硅量子计算公司通过半导体技术实现的 99.99%,但他们仅仅开发了 2 个量子比特。

当前任何一种技术路线都无法同时所有指标上领先,不同技术路线都各有优缺点。目前还不断有研究团队在制造新的量子比特。

在测量和控制方面:2021 年也取得了突破。2021 年以苏黎世仪器为代表的一些厂商发布了可以测控 100+ 量子比特的测控系统。最大的突破则是澳大利亚新南威尔士大学提出了可以控制数百万个硅自旋量子比特的技术,为未来百万量子比特处理器的出现打下了坚实基础。

量子计算快速发展的同时,也不能忽视经典计算的进步。2019 年 Google 宣称超级计算机需要 1 万年才能完成的计算,最近的研究表明,经典模拟已经达到了与 Google 量子计算机不相上下的速度。

2021 年该领域的主题可以定为经典模拟与量子计算之争,而且这场竞争将一直持续下去,经典计算的巨大进步迫使量子计算也加快了发展脚步。

二、量子计算产业链

量子计算行业目前处于早期探索阶段，核心参与者不多，产业链上下游较为清晰，目前国外科技巨头如 IBM、谷歌、亚马逊、微软、英特尔、霍尼韦尔等处于行业领先地位，IonQ、Rigetti、PsiQuantum 等量子计算新贵已获得数亿美元的风险投资，实力同样雄厚；国内科技巨头阿里巴巴、百度、腾讯、华为等也在跟进，但国内领先的量子计算公司主要是以本源量子、国盾量子等为代表的依托高校的公司。总体上，国内外量子计算产业链已经初具雏形。

图 1 量子计算产业链图谱



来源：ICV

产业链来看，量子计算设备供应商主要以国际公司为主，特别是稀释制冷机和低温同轴线缆。但在其他领域，中国企业已经占有一席之地，特别是测控系统，中微达信、国盾量子和本源量子与国外厂商并没有差距，甚至可以达到更高水平。另外，衰减器、滤波器等低温组件，本源量子也取得了一定突破。

芯片制造方面，目前量子芯片的制造过程主要是在实验室完成的，但有一些领先的量子计算团队已经在工厂制造量子芯片，例如，谷歌“悬铃木”量子芯片

就是在加州大学圣芭芭拉分校（UCSB）的一家工厂制造的。2022 年 1 月，本源量子自主建设的两大实验室——量子芯片制造封装实验室和量子计算组装测试实验室正式启用，这也是继 2021 年本源-晶合量子芯片联合实验室后建成的国内第二个工程化量子芯片实验室。

产业链中的量子计算公司主要集中于硬件和软件研发，目前领先的硬件团队主要是科技巨头和有实力的研究机构（如中科大），但中国的科技巨头布局量子计算较晚，初创公司如本源量子、国盾量子、启科量子、图灵量子是行业的中坚力量。软件方面，国际上已经有 100 多家量子软件公司，但中国的量子软件公司较少。

三、量子计算应用场景

量子计算机过大的体积、极其严苛的运行环境和数千万美元的价格，使得当前量子计算的应用主要通过云平台范围量子硬件，量子计算与经典计算也不是取代和被取代的关系，而是在对算力要求极高的特定场景中发挥其高速并行计算的独特优势。

对于量子计算机将能够解决的所有问题，目前还没有达成共识，但研究主要集中在以下类型的计算问题上：

- **模拟**：模拟自然界中发生的过程，很难或不可能用当今的经典计算机来描述和理解。这在药物发现、电池设计、流体动力学以及衍生品和期权定价方面具有巨大潜力。
- **优化**：使用量子算法来确定一组可行选项中的最优解。可能适用于干线物流和投资组合风险管理。
- **机器学习**：识别数据中的模式以训练机器学习算法。这可以加速人工智能的发展（例如用于自动驾驶汽车）以及防止欺诈和洗钱。
- **密码**：打破传统加密和支持更强的加密标准。

从行业上来说，量子计算的潜在应用主要包括供应链、金融、交通、物流、制药、化工、汽车、航空、能源、气象等领域。

制药、化工、新材料：量子计算可模拟分子特性，有望通过计算机数字形式直接帮助研究人员获得大型分子性状，缩短理论验证时间，极大地推动制药行业药品研发和开发新型材料。

金融：量子计算非常适合复杂的金融建模，在投资组合定价、衍生品定价等方面具有潜在优势。据不完全统计，全球已有超过 25 家国际大型银行及金融机构与量子计算企业开展合作研究。

交通、物流、供应链：这三个领域均涉及量子计算优化，利用量子计算优化供应链、交通（包括飞机、火车、汽车等）线路和物流，从而降低成本。

航空：量子计算有助于解决航空行业面临的一些最严峻的挑战，从基础材料科学研究、机器学习优化到复杂的系统优化，而且有可能改变飞机的制造和飞行方式。

能源：量子计算有可能应用于模拟碳氢化合物井中各种类型粘土的化学成分和累积——这是高效碳氢化合物生产的关键因素；分析和管理风电场的流体动力学；优化自主机器人设施检查；并帮助创造前所未有的机会，提供世界想要和需要的清洁能源。2021 年 2 月，英国 BP 公司与 IBM Quantum 展开合作，探索提高能源利用效率和减少碳排放。¹

汽车：近年来各大汽车厂商加快推进电动化战略。推进电动化战略过程中，量子计算将发挥其在化学模拟的优势，多家汽车厂商正致力于利用量子计算技术来研发性能更好的电池。

¹ <https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/press-releases/bp-joins-the-ibm-quantum-network-to-advance-use-of-quantum-computing-in-energy.html>

气象：量子计算可以有效和快速处理包含多个变量的大量数据，而且，并行计算和不断优化的算法，可促进对气象条件的跟踪和预测，有助于提高天气预报的准确性。此外，量子计算机还可通过机器学习来识别和理解不同的天气模式。



第二章

量子计算机——齐头并进

实

现量子计算的物理平台需要有编码量子比特的物理载体，使不同量子比特之间可以可控的耦合，并对噪声环境影响有一定的抵抗力。2021 年，超导体系发展迅速，量子比特的规模不断刷新，而离子阱、光量子、硅自旋、中性原子等技术路线同样发展强劲，其他技术路线如金刚石 NV 色心也取得了一定的进展。

拓扑方案虽然因为“发现马约拉纳粒子”（拓扑量子计算实现的基石）的文章被撤回而遭遇重挫，但研究人员仍然坚信这种不需要纠错的方案可以实现。总之，量子计算物理实现方案的发展远远没有收敛。

除了基于门的量子计算机，近年来出现的相干伊辛机（CIM）方案也表现不俗，2021 年，日本 NTT 通过 CIM 方案实现了 10 万量子比特，虽然无法与基于门的量子计算机直接比较，但这也是一个不小的里程碑。值得一提的是，2021 年量子退火先驱 D-Wave 宣布将开发基于门的量子计算机，从某种程度上表明量子退火机的前景可能有限。

表 2 量子计算各技术路线成熟度评价体系

Technical route	Technological progress in 2021	Current popularity	Scalability	Time to use	Scope of application	Comprehensive evaluation of commercialization prospects
Superconducting	●	●	●	○	●	↑
Ion trap	●	●	○	○	●	↑
Photonic quantum	●	●	○	○	○	↑
Neutral atom	●	●	●	○	●	↑
Semiconductor	○	●	○	○	●	→
Topological quantum	○	●	●	○	●	→
Diamond NV center	○	○	○	○	○	↓
Quantum annealer	○	○	●	○	○	→
CIM	●	○	●	○	○	→

Note:
The rating is based on a 5-point scale, with 1 being the worst and 5 being the best, with ○ representing 1 and ● representing 5

iCV Tank

注：评分采用 5 分制，1 为最差，5 为最优，○代表 1 分，●代表 5 分。
绿色箭头表示商业化发展情况较其他路线较好，黄色和红色依次次之。
资料来源：ICV

一、超导——最受关注

超导量子计算是目前国际上发展相对迅速的一种固态量子计算的实现方法。超导效应作为一种宏观量子效应，为量子态相干操控提供了无损耗环境。超导量子电路的能级可以通过外加电磁场进行干预，电路更容易实现定制化开发。由于集成电路工艺已经比较成熟，超导量子电路的可扩展性优势将会更加明显。目前，基于超导量子电路的量子计算技术已经在退相干时间、量子态操控和读取、量子比特间可控耦合、中大规模扩展等关键技术上取得大量突破，成为构建通用量子计算机和量子模拟机最有前途的候选技术路线之一。

2021 年，中国在超导量子研究中取得重要进展。2021 年 1 月，南方科技大学在基于超导量子线路系统中，利用可调耦合器实现高保真度、高扩展性的两比特量子门方案。在实验中实现了快速（30ns）高保真度（0.995）的两比特量子门操作。相比于之前的两比特量子门，该方案鲁棒性更高、需要的控制线更少、串扰影响更小、系统校准流程更简化。²2 月，本源量子上线国产工程化超导量子计算机本源悟源 2 号。5 月，中国科大中科院量子信息与量子科技创新研究院潘建伟、朱晓波、彭承志等组成的研究团队，成功研制了 62 比特可编程超导量子计算原型机“祖冲之号”，并在此基础上实现了可编程的二维量子行走；³6 月，潘建伟团队再次将可编程超导量子计算原型机“祖冲之号”升级，构建了 66 比特可编程超导量子计算原型机“祖冲之二号”，实现对 56 量子比特 20 层循环“量子随机电路采样”任务的快速求解。在计算复杂度上，比谷歌的“悬铃木”量子计算机高出 3 个数量级。⁴9 月，中国科大郭光灿院士团队郭国平教授研究组与本源量子合作，在本源“夸父”6 比特超导量子芯片上研究了串扰对量子比特状态读取的影响，并创新性地提出使用浅层神经网络来识别和读取量子比特的状态信息，从而

² <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.125.240503>

³ <https://science.sciencemag.org/content/early/2021/05/05/science.abg7812>

⁴ <https://arxiv.org/abs/2106.14734>

大幅度抑制了串扰的影响，进一步提高了多比特读取保真度。⁵8月，清华大学交叉信息研究院段路明研究组利用可调耦合的多量子比特系统首次实验研究了环境比特对于交叉共振逻辑门（Cross-resonance, CR）的影响并提出了在大规模超导量子体系中，环境比特存在和不存在两种情况下有效提高双量子比特门操作保真度的解决方案。⁶10月，潘建伟团队又实现了60量子比特24层循环量子随机电路采样，计算复杂度比“悬铃木”高出6个数量级。⁷10月，潘建伟团队使用变分量子本征求解器（VQE）模拟约瑟夫森结阵列量子电路，从而发现了一种新型高性能量子比特 plasonium。⁸10月，腾讯量子实验室实现一种快速、高保真、易扩展的超导量子比特初始化方案，与业内已有工作相比，该初始化方法具有速度快、保真度高、对周围比特影响小、扩展性强的优势。⁹12月，浙江大学发布了两款超导量子芯片。“莫干1号”是一款专用量子芯片，采用全连通架构，适用于实现针对特定问题的量子模拟和量子态的精确调控。另一款芯片“天目1号”面向通用量子计算，采用较易扩展的近邻连通架构，芯片集成36个具备更长比特寿命的超导量子比特（退相干时间约50微秒），实现高保真度的通用量子门（受控相位门，精度优于98%）。¹⁰

国际方面，2021年4月，美国国家标准与技术研究院（NIST）的物理学家使用光纤代替金属电线来测量和控制了超导量子比特，有利于实现量子计算机的可扩展性。¹¹2021年9月，日本情报通信研究机构（NICT）开发出了一种全氮化物超导量子比特，它的超导转变温度为16K（-257°C），比其他超导量子比特结构所需的温度高15度。¹²2021年11月，哥伦比亚大学工程学院 James Hone 教授的实验室展示了一种由2D材料制成的超导量子比特电容器，其尺寸比传统

⁵ <https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.16.024063>

⁶ <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.127.060505>

⁷ <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.127.180501>

⁸ <https://arxiv.org/abs/2109.00994>

⁹ <https://www.nature.com/articles/s41467-021-26205-y>

¹⁰ <https://mp.weixin.qq.com/s/xPK7UnmVvy5TyDhk8UB2SA>

¹¹ <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03268-x>

¹² <https://www.nature.com/articles/s43246-021-00204-4>

方法生产的芯片小 1000 倍。¹³11 月，IBM 发布目前最高量子比特数的超导量子计算芯片——127 量子比特处理器 Eagle。¹⁴2021 年 12 月，Rigetti Computing 推出其下一代 80 量子比特 Aspen-M 量子处理器，利用其多芯片专利技术，由两个 40 量子比特芯片组装而成。基于单芯片 40 量子比特处理器的新 Aspen 系统也同时发布。¹⁵12 月，芬兰国家技术研究中心（VTT）和 IQM 公司推出该国首台 5 比特超导量子计算机 Micronova。¹⁶

取得进展的同时，2021 年的几项研究表明，超导量子计算机存在一些我们之前没有发现的障碍。2021 年 6 月，威斯康星大学麦迪逊分校提出，宇宙射线可能是导致超导量子比特出错的原因之一。¹⁷2021 年 12 月，谷歌在其量子处理器上证明了宇宙射线确实会导致超导量子比特出错。¹⁸2021 年 8 月，费米国家加速器实验室发现了纳米氢化物会导致超导量子比特的相干时间缩短。¹⁹研究人员表示他们正在努力克服这些障碍。

¹³ <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.nanolett.1c04160>

¹⁴ <https://research.ibm.com/blog/127-qubit-quantum-processor-eagle>

¹⁵ <https://www.globenewswire.com/news-release/2021/12/15/2352647/0/en/Rigetti-Computing-Announces-Next-Generation-40Q-and-80Q-Quantum-Systems.html>

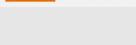
¹⁶ <https://www.aalto.fi/en/services/about-micronova>

¹⁷ <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03557-5>

¹⁸ <https://www.nature.com/articles/s41567-021-01432-8>

¹⁹ <https://arxiv.org/abs/2108.10385>

表 3 2021 年全球超导量子计算重要进展

时间	国家/地区	机构/企业	重要进展
1月	中国	 安徽科技大学	在超导量子线路系统中实现快速 (30ns) 高保真度 (0.995) 的两比特量子门操作
2月	中国	 本源量子	上线工程化超导量子计算机本源悟源2号
4月	美国	 NIST	使用光纤测量和控制了超导量子比特
5月	中国	 中国科学技术大学	研制62比特可编程超导量子计算原型机“祖冲之号”
6月	中国	 中国科学技术大学	构建66比特可编程超导量子计算原型机“祖冲之二号”，实现量子计算优越性
8月	中国	 清华大学	实验研究环境比特对于交叉共振逻辑门 (Cross-resonance, CR) 的影响
9月	日本	 NICT	开发出全氮化物超导量子比特
10月	中国	 中国科学技术大学	发现新型高性能量子比特plasonium
	中国	 Tencent 腾讯	实现快速、高保真、易扩展的超导量子比特初始化方案
	中国	 中国科学技术大学	“祖冲之二号”实现了更复杂的实验——60量子比特24层循环量子随机电路采样，将量子计算优越性提高了三个数量级。
	美国	 COLUMBIA UNIVERSITY	展示了超小尺寸的2D材料超导量子比特电容器
12月	美国	 IBM	发布127量子比特处理器Eagle
	中国	 浙江大学	发布两款超导量子芯片：“莫干1号”和“天目1号”
	美国	 rigetti	推出80量子比特Aspen-M量子处理器
	芬兰	 VTT IQM	推出该国首台5比特超导量子计算机Micronova

ICV Tank

资料来源：ICV

二、离子阱——量子体积遥遥领先

离子阱，又称离子囚禁，其技术原理是利用电荷与电磁场间的交互作用力牵制带电粒子运动，并利用受限离子的基态和激发态组成的两个能级作为量子比特，利用微波激光照射操纵量子态，通过连续泵浦光和态相关荧光实现量子比特的初始化和探测。离子阱量子计算机具有量子比特品质高、相干时间较长、量子比特的制备和读出效率较高等三大特点。当前，离子阱量子计算机在量子比特连接性和相干时间方面领先其他技术路线。但扩展性较差的问题是离子阱体系亟待解决的主要问题。

近年来，世界各地研究团队一直在尝试创建离子阱量子计算机，被捕获的离子充当纠缠的量子比特，以执行高级计算，这类计算机被证明是用于实际应用的量子计算最有希望的系统之一。

2021 年离子阱量子计算机实现了新的里程碑。2021 年 1 月，清华大学交叉信息院金奇奂研究组在离子阱系统中首次将单量子比特相干时间提升至 1 小时以上，即 5500 秒。²⁰2021 年 6 月，因斯布鲁克大学实验物理系的研究人员成功演示了紧凑型离子阱量子计算机。²¹2021 年 8 月，离子阱量子计算公司 IonQ 首次推出可重构多核量子架构(RMQA)，IonQ 称，该架构可以每个芯片的量子比特数量扩展到数百个，而且不会随着量子比特数量的增加而降低量子比特的稳定性和性能。²²2021 年 9 月，中山大学物理与天文学院罗乐教授研究团队，通过人工神经网络技术与射频微波-自发辐射光子关联技术，实现了离子阱中量子比特微运动抑制的自动化处理，这是国际上首次把神经网络技术应用于囚禁离子量子比特的微运动控制。²³2021 年 9 月，由美国国家标准与技术研究院 (NIST) 领导的研究团队使用一种基于射频磁场梯度与微波磁场相结合的方案，创下无激光方案双量子比特门保真度的世界纪录，达到[0.9964, 0.9987]。该方案有可能在不增加控制信号功率或复杂性的情况下，对大规模离子阱量子处理器中的多对离子同时执行纠缠操作。²⁴2021 年 10 月，清华大学交叉信息研究院段路明研究组在离子阱量子信息处理领域取得重要进展，通过对优化选择的少量离子进行激光冷却，首次实现对长离子链的高效协同冷却，获得接近全局激光冷却的极限温度，为多量子比特量子计算准备了技术基础。²⁵2021 年 10 月，马里兰大学联合量子研究所(JQI)研究员 Christopher Monroe 及其团队首次在实验中通过多个错误率更高的物理量子比特实现了一个错误率更低的逻辑量子比特。他们使用 BaconShor-13 编码的 9 个数据量子比特和 4 个辅助量子比特实现了一个逻辑量子比特。²⁶2021 年 12 月，霍尼韦尔团队（现为 Quantinuum）首次实时检测和纠正量子错误。研究人员使用[[7, 1, 3]]色码 (color code)。利用霍尼韦尔离子阱量子计算机中的 10 个物理量子比特，对单个逻辑量子比特进行编码、控制和反复纠

²⁰ <https://www.nature.com/articles/s41467-020-20330-w>

²¹ <https://journals.aps.org/prxquantum/pdf/10.1103/PRXQuantum.2.020343>

²² <https://ionq.com/news/august-25-2021-reconfigurable-multicore-quantum-architecture>

²³ <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0062508>

²⁴ <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03809-4#MOESM1>

²⁵ <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.127.143201>

²⁶ <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03928-y>

错。²⁷2021年最后一天，Quantinuum 再次带来惊喜，宣布他们的霍尼韦尔 H1-2 量子计算系统测得 2048 量子体积，是所有技术路线中的最高数值。

表 4 2021 年离子阱量子计算重要进展

时间	国家/地区	机构/企业	重要进展
1月	中国	 清华大学 Tsinghua University	将单量子比特相干时间提升至5500秒
6月	奥地利	 universität innsbruck	演示了紧凑型离子阱量子计算机
8月	美国	 IONQ	推出可重构多核量子架构(RMQA)
9月	中国	 中山大学 QUDCOR 启科量子	首次将神经网络技术应用于囚禁离子量子比特的微运动控制
	美国	 NIST	创下无激光方案双量子比特门保真度的世界纪录
10月	中国	 清华大学 Tsinghua University	实现对长离子链的高效协同冷却
	美国	 UNIVERSITY OF MARYLAND	实现错误率更低的逻辑量子比特
12月	美国/英国	 QUANTINUUM	实现实时检测和纠正量子错误
	美国/英国	 QUANTINUUM	2048量子体积

iCV Tank

资料来源：ICV

三、光量子——商业化元年开启

基于光子的量子计算有几个独特的性质。首先，光子的量子态在没有真空或冷却系统的情况下得以维持，因为它们与外部环境的相互作用极其微弱。光量子计算机可以在室温的大气环境中工作。其次，光子是量子通信的最佳信息载体，因为它们以光速传播，并为高数据传输容量提供大带宽。因此，光量子计算机与量子通信完全兼容。光子的大带宽也在光量子计算机中提供了高速(高时钟频率)操作。光子的这些特性同时也给量子计算带来了内在的困难。由于光子之间不相互作用，因此很难实现需要光子之间相互作用的两量子比特纠缠门。此外，由于

²⁷ <https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.11.041058>

光子以光速传播，并且不停留在同一位置，因此必须沿着光子的光路布置许多光学组件，导致效率不高。目前，光量子计算机的研究主要集中于克服这些困难。

2021 年光量子相关研究成果丰硕，堪称光量子计算机商业化元年。2021 年 1 月，爱沙尼亚塔尔图大学物理研究所的科学家找到一种开发新型光学量子计算机的方法，研究表明具有某些特征并可以充当量子比特的稀土离子，与早期的解决方案相比，可以给量子计算机带来超快的计算速度和更好的可靠性。²⁸2021 年 2 月，国防科技大学和其他团队合作研制新型可编程光量子计算芯片，这一芯片首次实现了对量子漫步演化时间、哈密顿量、粒子全同性、粒子交换特性等要素的完全编程调控，从而支持实现多种基于量子漫步模型的量子算法应用。²⁹2021 年 3 月，加拿大光量子计算公司 Xanadu 推出 X8 光量子处理器。这是一款可编程、可扩展、可执行多种算法的光量子芯片。它可集成到现有的基于光纤的电信基础架构中，更容易实现扩展，也可以有效降低运营成本。³⁰2021 年 5 月，北京大学物理学院、人工微结构和介观物理国家重点实验室、纳光电子前沿科学中心极端光学创新研究团队与合作者研制出可惠勒延迟选择测量装置的多路径马赫-曾德尔干涉仪。该芯片单片集成 350 多个光子元器件和近 100 个可调相移器，是目前规模最大的光量子芯片之一。³¹2021 年 7 月，丹麦科技大学的研究人员实现了光量子计算机的完整平台。该平台具有通用性和可扩展性，所有操作都在室温下进行，并且与标准光纤网络直接兼容。³²2021 年 7 月，上海交通大学金贤敏团队提出了首个基于光子集成芯片的物理系统可扩展的专用光量子计算方案，并首次在实验中实现了“快速到达”问题的量子加速算法。³³2021 年 8 月，弗吉尼亚大学电气和计算机工程系助理教授 Xu Yi 领导的研究团队用基于光学微谐振器的频率梳在一个硬币大小的芯片上成功实现了 40 量子模式 (qumode)，是目前集

²⁸ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0030401820311111?via%3Dihub>

²⁹ 该研究成果的论文《Implementing graph-theoretic quantum algorithms on a silicon photonic quantum walk processor》发表于 Science Advances 期刊。

³⁰ <https://phys.org/news/2021-03-xanadu-programmable-photonic-quantum-chip.html>

³¹ 相关研究成果《基于大规模集成光量子芯片的多路径普适化波粒二象性研究》发表于《自然·通讯》。

³² 相关研究成果《Deterministic multi-mode gates on a scalable photonic quantum computing platform》发表在期刊《Nature Physics》。

³³ 相关研究成果《Experimental quantum fast hitting on hexagonal graphs》发表在《自然·光子学》

成光学平台实现的最大模式数。³⁴2021年10月,中国科大潘建伟、陆朝阳等在量子计算原型机“九章”基础上成功研制出“九章二号”。新的原型机从之前的76个光子增加到了113个光子,处理特定问题的速度比超级计算机快亿亿倍。³⁵2021年12月,光量子计算公司 ORCA Computing 实现了一种被称为“变分玻色求解器”的光量子计算平台,可用于解决二次无约束二进制优化(QUBO)问题。

36

表5 2021年光量子计算重要进展

时间	国家/地区	机构/企业	重要进展
1月	爱沙尼亚		找到一种开发新型光学量子计算机的方法
2月	中国	国防科技大学 National Institute of Defense Technology	研制出新型可编程光量子计算芯片
3月	加拿大		推出X8光量子处理器
5月	中国	北京大学 PEKING UNIVERSITY	研制出可惠勒延迟选择测量装置的多路径马赫-曾德尔干涉仪
7月	丹麦	Danmarks Tekniske Universitet DTU	实现具有通用性和可扩展性的光量子计算机的完整平台,所有操作都在室温下进行,且与标准光纤网络直接兼容
	中国	上海交通大学 SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY	提出首个基于光子集成芯片的专用光量子计算方案,并在实验中实现“快速到达”问题的量子加速算法
8月	美国	UNIVERSITY OF VIRGINIA	基于光学微谐振器的频率梳,在一个硬币大小的芯片上成功实现40量子模式
10月	中国	中国科学技术大学 University of Science and Technology of China	研制出113个光子的“九章二号”,实现更大规模的量子计算优越性
12月	英国		实现“变分玻色求解器”的光量子计算平台

ICV Tank

资料来源:ICV

四、中性原子——美国领先

基于中性原子的量子计算,一般在超高真空腔中利用远失谐光偶极阱阵列或光晶格从磁光阱或玻色爱因斯坦凝聚体(BEC)中捕获并囚禁超冷的原子形成单

³⁴ <https://www.nature.com/articles/s41467-021-25054-z>

³⁵ <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.127.180502>

³⁶ <https://arxiv.org/pdf/2112.09766.pdf>

原子阵列，然后将原子基态超精细能级的两个磁子能级编码为一个量子比特的 0 态和 1 态。高数值孔径透镜将原子比特操控所需的拉曼光、里德堡激发光、态制备光等聚焦到单个原子上，形成对阵列中量子比特的操控。同时透镜也收集原子的荧光并传输到电子倍增型相机（EMCCD）上实现量子态的探测。根据收集到的信息和实验的需要，通过传统计算机上的数据采集和时序产生系统，实时控制原子的冷却、转移以及相应的磁场、电场和光场来完成量子算法的执行。在进行量子计算时，中性原子体系将根据不同的量子算法，采用优化后所需逻辑操作数最少的原子阵列构型，执行一系列高保真的单比特门和两比特受控非门。

中性原子体系在 2021 年保持强劲的发展势头。2021 年 7 月，量子初创公司 ColdQuanta 基于冷原子技术推出 100+量子比特处理器 Hilbert，在冷原子技术中使用了排列在二维 11×11 网格中的铯原子。³⁷2021 年 7 月，另一家量子计算初创公司 Atom Computing 推出其第一代量子计算系统 Phoenix，该系统使用由铯原子组成的核自旋量子比特，能够用光镊在真空室中捕获 100 个原子（每个原子代表一个量子比特），具有较强的稳定性。³⁸2021 年 7 月，哈佛-麻省理工学院超冷原子中心领导的一个研究团队开发了基于中性原子可编程量子模拟器，能够操作 256 个量子比特。研究人员使用该机器观察到了几种以前从未在实验上实现过的奇异物质量子态，并进行了精确的量子相变研究。³⁹

表 6 2021 年中性原子量子计算重要进展

时间	国家/地区	机构/企业	重要进展
7月	美国	 ColdQuanta	推出100+量子比特处理器Hilbert
	美国	 atom computing	推出其第一代量子计算系统Phoenix，拥有100+量子比特
	美国	 HARVARD UNIVERSITY 	开发了基于中性原子的256比特可编程量子模拟器

ICV Tank

资料来源：ICV

³⁷ <https://coldquanta.com/coldquanta-capabilities/coldquantas-quantum-computer>

³⁸ <https://www.servethehome.com/atom-computing-unveils-phoenix-quantum-computing/>

³⁹ <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03582-4>

五、半导体量子点/硅自旋——值得期待

量子点(quantum dot)是把激子在三个空间方向上束缚住的半导体纳米结构。它是一种重要的低维半导体材料,其三个维度上的尺寸都不大于其对应的半导体材料的激子玻尔半径的两倍。硅量子点,是量子点实例中的一部分。通过向纯硅中加入电子,科学家们造出硅量子点这种人造原子,运用微波控制电子的量子态。硅的优势在于,可以利用传统的微电子工业几十年来积累的大规模集成电路制造经验。硅量子比特比超导量子比特更加稳定、且相干时间更长,但量子纠缠数量较少,需要保持低温。

半导体量子计算是当前国际上热门、主流的研究方向。2021年4月,本源量子联合中国科大郭光灿院士团队郭国平、李海欧等人发现了自旋量子比特操控的各向异性:通过改变外加磁场与硅片晶向的相对方向,可以将自旋量子比特的操控速率、退相干速率和可寻址性进行同时优化。⁴⁰2021年5月,本源量子联合郭光灿院士团队郭国平、曹刚等人利用微波超导谐振腔实现对半导体双量子点激发能谱的高灵敏测量,为将来实现半导体量子比特的高保真读出提供了一种有效方法。⁴¹2021年5月,美国/爱尔兰的硅基量子计算公司 Equal1 Laboratories 通过商用硅工艺将量子比特与所有支持控制和读出的电子器件集成在同一集成电路上。⁴²2021年6月,日本理化学研究所(RIKEN)的一个研究小组将可纠缠的硅基自旋量子比特数量从2个增加到3个,产生的三量子比特态的保真度高达88%,并且处于一种可用于纠错的纠缠态。⁴³2021年10月,哥本哈根大学 Assoc 研究团队实现在单个量子芯片上同时操作多个自旋量子比特。⁴⁴今年1月,中国科大

⁴⁰ <https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.15.044042>

⁴¹ <https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.15.044045>

⁴² <https://www.equal1.com/fullyintegratedquantumprocessor/>

⁴³ <https://www.nature.com/articles/s41565-021-00925-0>

⁴⁴ <https://scitechdaily.com/innovative-chip-resolves-quantum-headache-paves-road-to-supercomputer-of-the-future/>

郭光灿院士团队和本源量子、美国、澳大利亚的研究人员共同合作，实现了硅基自旋量子比特的超快操控，这也是目前为止国际上已报道的最高值。⁴⁵

表 7 2021 年半导体量子点/硅自旋量子计算重要进展

时间	国家/地区	机构/企业	重要进展
4月	中国	 本源量子 ORIGIN QUANTUM 中国科学技术大学 University of Science and Technology of China	发现了自旋量子比特操控的各向异性
5月	中国	 本源量子 ORIGIN QUANTUM 中国科学技术大学 University of Science and Technology of China	利用微波超导谐振腔实现对半导体双量子点激发能谱的高灵敏测量
	爱尔兰	 equal1.labs	利用商用硅工艺集成量子比特与所有电子器件在同一集成电路
6月	日本	 RIKEN	可纠缠的硅基自旋量子比特数从2个增加到3个
10月	丹麦	 UNIVERSITY OF COPENHAGEN	在单个量子芯片上同时操作多个自旋量子比特

iCV Tank

资料来源：ICV

六、拓扑量子计算——仍有不确定

拓扑量子计算是利用拓扑材料中具有非阿贝尔统计的准粒子构筑量子比特、执行量子计算的研究方案。由于材料的拓扑稳定性，拓扑量子计算利用多体系统中的拓扑量子态来存储和操控量子信息，具有内在的容错能力，有望解决量子比特退相干与容错量子计算的关键问题，是量子计算的前沿研究领域。

虽然微软主动撤回了关于发现马约拉纳费米子的论文，但 2021 年拓扑量子计算仍有一定成果。2021 开年之初，纽约州立大学 Li Qiang 教授发现了实现拓扑量子计算的关键，他们发现一种新的光诱导开关，可以扭曲外尔半金属的晶格，开启一种几乎没有耗散的巨大电子流。这些性质的发现使得实现拓扑量子计算等应用又向前迈进了一步。2021 年中国在该方案的探索和实施中也取得了一系列突破性进展。在材料生长和制备方面，中国科学院半导体研究所赵建华课题组利

⁴⁵ <https://www.nature.com/articles/s41467-021-27880-7>

用分子束外延技术制备出高质量纯相 InAs、InSb 和 InAsSb 半导体纳米线，在此基础上实现超导体在纳米线上的低温原位外延生长，异质结界面达到原子级平整。清华大学何珂-薛其坤课题组利用选区外延生长方法制备出新的半导体纳米线体系，有效降低杂质对拓扑量子器件的影响以及衬底晶格失配，为进一步实现多马约拉纳量子器件奠定了基础。在拓扑量子器件的制备和输运测量方面，中科院物理所沈洁和代尔夫特理工大学 (TU Delft) 的 Kouwenhoven 等在量子器件“马约拉纳岛”中绘制出完整的电子奇偶性（宇称）相图，并给出库伦振荡幅值和峰值关联的明确信息，为未来构筑拓扑量子比特提供了调控基础。清华大学刘东课题组理论上提出了一种实验探测手段，利用耗散电极引入的电子和环境玻色子的相互作用重整化效应，使得马约拉纳输运信号和其它平凡输运信号产生完全不同的标度行为和温度电压依赖关系，从而有望解决纳米线体系中的“马约拉纳态-安德烈夫态”的竞争与争论。⁴⁶

表 8 2021 年拓扑量子计算重要进展

时间	国家/地区	机构/企业	重要进展
1月	美国		发现新的光诱导开关，可扭曲外尔半金属的晶格
10月	中国		刘东课题组理论上提出一种实验探测手段，使得马约拉纳输运信号和其它平凡输运信号产生完全不同的标度行为和温度电压依赖关系
	中国 荷兰		在量子器件“马约拉纳岛”中绘制出完整的电子奇偶性（宇称）相图，并给出库伦振荡幅值和峰值关联的明确信息
	中国		赵建华课题组利用分子束外延技术制备出高质量纯相 InAs、InSb 和 InAsSb 半导体纳米线，实现超导体在纳米线上的低温原位外延生长，异质结界面达到原子级平整
	中国		何珂-薛其坤课题组利用选区外延生长方法制备出新的半导体纳米线体系

ICV Tank

资料来源：ICV

⁴⁶ https://mp.weixin.qq.com/s/LnWxMMx_qvoPZ6kmijVw_g

七、金刚 NV 色心——扩展难度大

金刚石 NV 色心具有室温可观测到的零声子线、发光稳定、相干时间长等优秀的光学特性，尤其是具有非常特殊的精细能级结构，可实现高精度的物理量探测和量子调控。其中，超低浓度的 NV 色心特别是单个 NV 色心在光子纠缠、量子调控等领域已经得到广泛的关注。除此之外，NV 色心在精密测量领域，如温度测量、磁场测量、超高分辨率成像、高性能陀螺仪等领域已得到应用。但应用于量子计算机，存在扩展难的问题。

2021 年 4 月，量子计算初创公司 Quantum Brilliance 开发了一台基于金刚石 NV 色心的紧凑型量子计算机，包含 5 个量子比特，并计划在 5 年内推出 50 个量子比特的量子计算机。⁴⁷

八、量子退火机——进展不大

目前量子计算机可分为量子逻辑门计算机和量子退火计算机，前述几大主要技术路线都是构建量子逻辑门计算机提出的，基于量子逻辑门的量子计算机就是所谓的通用量子计算机，本报告中前 7 个体系均为基于门的量子计算方案。量子退火机 (Quantum Annealer) 不需要量子逻辑门，而是通过伊辛模型 (Ising model) 寻找最优解，这是一种专用量子计算机，在处理最优化问题上有独特优势。总的来说，2021 年量子退火技术进展不大。值得一提的是，2021 年量子退火先驱 D-Wave 宣布将开发基于门的量子计算机，从某种程度上表明量子退火机的前景可能有限。

九、相干伊辛机——继续观察

⁴⁷ <https://spectrum.ieee.org/nitrogen-vacancy-diamond-quantum-computer-accelerator-qubits-server-rack>

相干伊辛机 (CIM) 和量子退火机的原理类似, 都是基于伊辛模型, 类似于一种人工磁铁组成的可编程网络, 如同一个真实的磁系统, 每个磁铁的状态只能“向上”或者“向下”, 倾向于在低能量状态工作。工作原理是: 如果磁铁网络之间的连接可以被重新编程, 以代表实际问题, 一旦它们设定了需要面对的最优化、低能量方向, 就可以从它们的最终状态推断出解。

在量子退火机中, 这些人造磁铁就用超导电路代替, 作为量子比特。CIM 则将超导电路换成一种特殊的激光系统, 称为简并光学参量振荡器 (DOPO)。CIM 利用耦合 DOPO 脉冲进行计算, 通过测量脉冲的最终相位, 尝试寻找最佳解决方案。CIM 使用的光脉冲可以来回穿梭, 使得任何两个脉冲都可以直接相互作用。同时, 底层器件是光学器件的设计与超导器件相比, 无需低温环境, 稳定性高、可控性好。

目前, 包括 NTT、NII、NASA、斯坦福、加州理工、马里兰、东京大学等研究院所和院校, 以及中国的玻色量子科技公司, 都在从事 CIM 方向的研发工作。2021 年 9 月, 日本 NTT 基础研究实验室实现了 100,512 自旋量子比特的 CIM 计算实验, 突破 10 万大关, 在所有量子计算技术方案中遥遥领先。尽管 CIM 的自旋量子比特与通用量子计算的量子比特数无法直接进行比较, 但此次突破也可认为是一个里程碑级别的事件。⁴⁸国内的 CIM 研究还处在起步阶段, 玻色量子于 2020 年底成立, 据该公司透露, 已完成光量子实验室的搭建, 正在研发 1000+ 量子比特级别 CIM 量子 AI 协处理器工程样机, 以及相应的加速算法。

⁴⁸ <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abh0952>



第三章

核心元器件——发现与突破

本 报告重点研究超导或半导体量子计算机必不可少的低温设备（以 mK 级稀释制冷机为主），以及对超导和半导体量子计算机极为重要的量子测量和控制系统（简称“测控系统”）；

同轴电缆是连接处于低温的量子芯片和处于室温的测控系统之间的桥梁；

此外，超导量子计算机还需要额外的低温器件防止环境噪声的影响；

超高真空设备是离子阱和中性原子系统必需的；激光器的应用则比较广泛，包括光子、离子阱、中性原子等系统都需要激光冷却或操纵量子比特；

其他核心元器件还有单光子源和单光子探测器，其中，单光子源主要用于光量子计算机；而单光子探测器在光子和离子阱系统中都有应用。

长期以来，mK 级稀释制冷机都是中国的卡脖子工程，目前，量子计算专用稀释制冷机市场主要由 Bluefors 和牛津仪器两家公司占据。不过，中科院物理所在 2021 年取得了国产稀释制冷机的突破，自主研发的无液氦稀释制冷机原型机率先实现 10mK 以下极低温环境。

目前的测控系统主要针对超导和半导体量子比特，其他体系如离子阱和中性原子通过激光就能实现量子比特的控制和测量。随着量子比特数增加，2021 年量子测控系统的主要厂商都推出了能够满足 60-100 量子比特测控的系统。甚至有一些前沿研究提出了可以控制百万量子比特的方法。在测控系统领域，国内外公司基本处于同一起跑线。

超高真空设备和激光设备，虽然国外厂商仍然领先，但是中国厂商已经迎头赶上。单光子源和单光子探测器，分别负责光子的生成和读取，国内团队在这些领域处于世界领先地位。

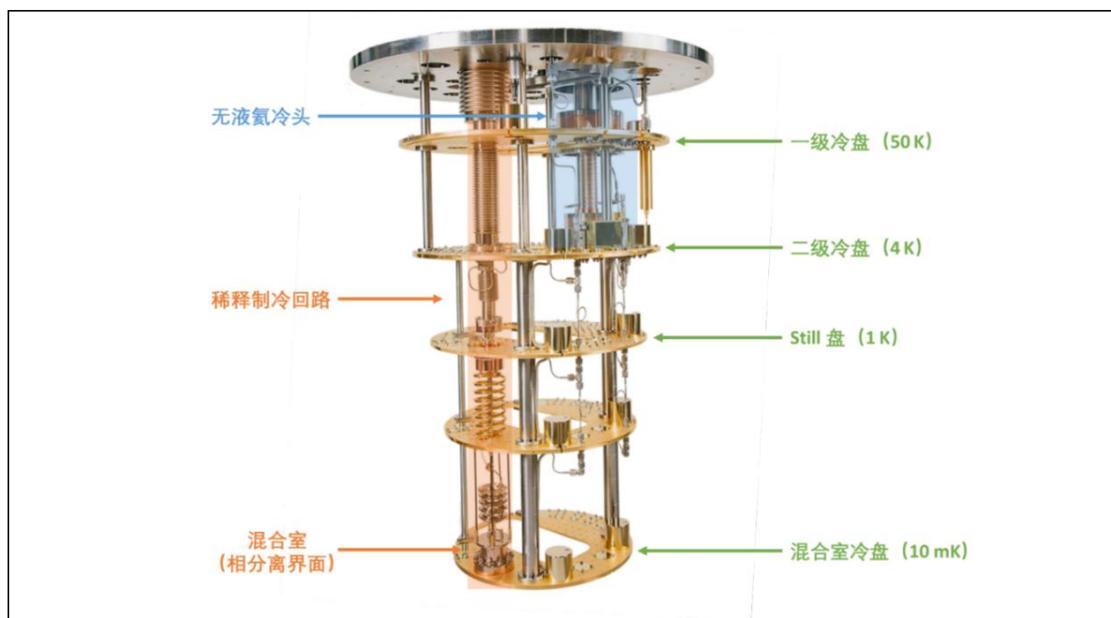
一、低温设备

量子计算机所需低温设备以稀释制冷机为主，此外还包括其他低温恒温器。稀释制冷机为量子计算机的正常运行提供必要的极低温环境，是量子计算研究中极其重要的关键部分。

基于超导或半导体的量子计算芯片需要在极低温环境下（20mk）工作。稀释制冷机可以提供量子处理器（QPU）运行所需的极低温环境和较大的样品空间，从而容纳 QPU 及其配套的低温线缆和低温电子器件。

稀释制冷技术于 1950 年代首先提出，而后在 1960 年代被具体实现。现在流行的无液氦稀释制冷机是稀释制冷技术同无液氦冷头技术的结合。从原理上讲，稀释制冷机利用的是氦元素的两种同位素，氦-3 和氦-4 的混合液体在 0.8K 左右发生的相分离现象。相分离之后，氦-3 和氦-4 混合液发生分层，上层是密度较低的以氦-3 为主的氦三浓相，下层是密度较高的由部分氦-3 溶于氦-4 液体的氦-3 稀释相。通过设计气体循环回路让氦-3 循环流动，在低温时氦-3 原子从氦-3 浓相穿越相分离界面达到氦-3 稀释相的过程是吸热降温过程，可以在此相分离界面处形成 mK 量级的最低温度。由于利用了氦-3 的浓相和稀释相的物理过程，因此该制冷机被命名为稀释制冷机。

图 2 稀释制冷机内部结构



来源：牛津仪器

从技术上讲，稀释制冷机内部需要处于一个真空腔之中，从而达到低温部件与外界绝热的目的。而在制冷方面，为了实现 mK 量级的最低温，需要通过多级

制冷，逐步实现。首先制冷机的无液氮冷头可以提供 4K 的基础低温环境，在此基础上，当氮-3 氮-4 混合液流经 4K 冷盘的时候可以初步液化氮-4。之后再利用蒸发制冷以及焦耳-汤姆逊效应将氮-3 氮-4 彻底液化，达到 1K 左右的低温。在此基础上利用氮-3 的蒸发制冷可以进一步将混合液降温至发生相分离。最后利用稀释制冷原理实现 mK 量级极低温。

国内外量子计算的爆发使得以 Bluefors 为代表的稀释制冷机公司一跃成为高科技领域的“新贵”。目前国际上主流的稀释制冷机供应商包括芬兰的 Bluefors 公司、英国的牛津仪器公司、美国的 JanisULT 公司和荷兰的 Leiden Cryogenics 公司等。

Bluefors 公司由于在量子计算领域起步较早，市场份额长期占据第一，其次是牛津仪器。例如，根据北京量子信息科学研究院的中标公告，该单位 2021 年购入 Bluefors 和牛津仪器稀释制冷机分别为 8 台和 5 台。目前，Bluefors 稀释制冷机有 SD、LD、XLD、LH 四个系列。其中 LD 系列是 Bluefors 最畅销的一款稀释制冷机，包括 LD250 和 LD400。

2021 年 11 月，Bluefors 宣布推出一个新的低温平台 KIDE。该平台为更大的芯片提供更强的冷却能力。它可以将三个六边形单元连接在一起，用于创建一个三向量子计算集群。目前该低温平台仍在研发中，但 IBM 已经宣布在即将推出的 IBM Quantum System 2 系列机器中使用该平台。

2021 年除了继续达成与 IBM 的深度合作外。9 月, Bluefors 加入芬兰的量子计算产业联盟 BusinessQ, 支持企业采用和开发量子技术和解决方案。⁴⁹

与 Bluefors 相比, 牛津仪器公司进入量子计算市场较晚, 但是近几年来牛津仪器的稀释制冷机越来越受到量子计算研发团队的青睐, 特别是在 2020 年推出最新一代无液氮稀释制冷机 Proteox 之后。

到目前为止, 牛津仪器已经推出了一系列不同型号和不同应用导向的稀释制冷机, 包括模块化稀释制冷机 ProteoxMX ($<10\text{mK}$)、多比特数量子计算专用无液氮稀释制冷机 ProteoxLX ($<7\text{mK}$) 以及 5mK 基础温度的极端低温制冷机 Proteox5mK。

牛津仪器 Proteox 稀释制冷机进一步升级了底部快速换样功能, 对于需要快速筛选小比特数样品, 摸索工艺参数的量子比特芯片测试, 底部快速换样功能可以在不升温整个制冷机的情况下, 单独更换量子比特芯片。

传统稀释制冷机整体热机再整体降温需要约 2-3 天时间, Proteox 搭配底部装样的设计将整个芯片更换和重新降温时间缩短到仅 3.5 个小时。这将大大提升量子比特芯片筛选的效率。

⁴⁹ <https://www.vttresearch.com/en/search?s=businessQ&type=all&size=12>

图3 牛津仪器 Proteox 无液氦稀释制冷机



来源：牛津仪器

此外，Proteox 系列稀释制冷机引入了侧面装载二级插件的模块化设计，并且统一在不同型号的制冷机上兼容同样尺寸的二级插件。这一创新性设计打破了传统稀释制冷机相互间独立运作的模式，引入了多根二级插件共用和多台制冷机相互配合的规模化运行思路。

具体来说，二级插件首先可以从制冷机上拆下单独进行量子比特实验的引线布置和室温预测试，同一台设备可以配置多根二级插件，从而保证制冷机运行实验的同时，已经可以利用额外的二级插件准备下一个实验。不仅如此，由于二级插件可以跨平台使用，对于规模化量子比特实验的用户来说，为了保证多量子比特制冷机高效运行，完全可以利用标准稀释制冷机提前进行低温二级插件的预测试，然后将二级插件移植到多量子比特制冷机中直接运行，从而免去用大型制冷机来做初级线缆测试的尴尬情况。

目前，牛津仪器的产品已经进入主流量子计算硬件制造商。2021 年，牛津仪器与 Rigetti 合作建成英国首台用于商业的量子计算机。⁵⁰Rigetti 的量子处理器将放置在牛津仪器的多量子比特专用 ProteoxLX 稀释制冷机之中。2021 年 1 月，牛津仪器宣布与牛津量子电路公司建立合作关系并交付 Proteox 稀释制冷机用于加速商业化量子计算进程研究。⁵¹作为 Proteox 第一家公司用户，OQC 将利用 Proteox 的高密度布线二级插件来扩大其量子计算机的三维架构规模，同时也为将来利用量子计算机提供量子测量服务做准备。2021 年，牛津仪器与英国格拉斯哥大学达成合作⁵²，并邀请到该大学 James Watt 工程学院的 Martin Weides 教授兼任牛津仪器纳米科学部顾问技术总监职位。Weides 教授同时也是牛津仪器 Proteox 产品的用户之一。在国内，2021 年，北京量子信息科学研究院通过连续 4 次招标采购入了 5 台牛津仪器的稀释制冷机。

除了国外厂商，2021 年中国的国产稀释制冷机也取得了重大突破。2021 年 6 月，中科院物理研究所姬忠庆等人组成的团队，攻克了稀释制冷机热交换器的制作等多项核心技术，自主研发的无液氦稀释制冷机原型机率先实现 10mK 以下极低温环境，实现 10.9mK 的长时间稳定连续运行，单冲程模式可达 8.7mK。⁵³

其他低温设备。2021 年 10 月，美国光学恒温器制造商 Montana Instruments 推出了全新型号 CryoAdvance 系列，助力科技工作者在先进材料和量子信息等领域有更进一步的研究。该系列可保证卓越的低温和稳定性，并增加了电学通道的数量，提高了后续功能模块的兼容性。

⁵⁰ <https://www.oxinst.cn/news/accelerating-uk-quantum-computing-with-rigetti/?sbms=nanoscience>

⁵¹ <https://www.oxinst.cn/news/oxford-instruments-nanoscience-delivers-first-proteox-globally-to-oxford-quantum-circuits/?sbms=nanoscience>

⁵² <https://www.oxinst.cn/University-of-Glasgow-Partners-with-OI-NS?sbms=nanoscience>

⁵³ http://www.iop.cas.cn/xwzx/snxw/202106/t20210625_6117203.html

二、测控系统

离子阱、中性原子和光子等体系以自然粒子作为量子比特，主要是通过激光进行操纵。但对于超导和半导体量子计算机，量子测量和控制系统（简称“测控系统”）起到了对量子芯片进行控制、处理、运算的作用。早期的量子测控系统是由量子计算机研发团队利用一系列科学仪器自行搭建的。测控系统的最大难点是需要对多比特同时操控，因为仅一个比特至少就需要3个或3个以上的DAC输出通道，在ADC做读取的同时至少还需要2个DAC输出通道。当比特数目达到数十比特时，多通道的同步，大量实验命令下发到毫秒时间内硬件同时反馈成了其中最需要解决的难点问题。近年来，国内外少数几家公布先后开发了专门用于量子计算机的测控系统。

表9 量子测控系统发展历程

区域	年份	产品	公司	最大可控制量子比特数	适用技术	研究成果/用户
国外	2016	量子控制软件 LabOne	苏黎世仪器	-	超导自旋	量子近似优化算法的成功概率随着电路深度的增加而提高(Phys. Rev. Applied)、表面码中的重复量子错误检测(Nature Physics)、用于可编程超导量子计算机的快速、低泄漏、高保真双量子比特门(PRL)等
	2018	量子计算控制系统(QCCS)	苏黎世仪器	-	超导自旋	
	2018	量子计算测试解决方案	是德科技	-	超导	舍布鲁克大学、代尔夫特理工大学、Nord Quantique、SBQuantum、Seqc、南京大学、苏州纳米技术与纳米仿生研究所、阿里巴巴
	2019	Optimus 量子测控软件	谷歌	53+ (含 coupler 结构)	超导	使用可编程超导处理器的量子计算优越性(Nature)
	2021	SHFQA 量子分析仪	苏黎世仪器	64	超导自旋	在欧洲、美国、日本、中国上市
	2021	与稀释制冷机集成的量子测	是德科技	-	超导	尚未推出市场

		试系统				
	2021	Cluster	Qblox	20	超导自旋	通过重复奇偶测量保护量子纠缠不受量子比特错误和泄漏的影响(Science Advances)
国内	2018	量子测控一体机 Quantum AI O	本源量子	8	超导自旋	本源量子自用，同时对外销售
	2018	量子态控制与读出系统(CRS)	国仪量子	-	实现部分功能	德国美因茨大学
	2020	ez-Q Engine	国盾量子	24	超导	相同技术助力 12 比特“簇态”纠缠态的制备(PRL)、强关联量子行走(Science)、20 超导比特的高精度量子相干调控(PRL)等
	2020	量子测控一体机 Quantum AI O 2	本源量子	32	超导自旋	Quantify the Non-Markovian Process with Intervening Projections in a Superconducting Processor(arXiv)
	2021	21 版 ez-Q Engine	国盾量子	66+ (含 coupler 结构)	超导	相同技术助力 62 比特祖冲之号(Science)、66 比特祖冲之二号

来源：ICV

2016 年，瑞士苏黎世仪器公司开始量子测控技术的研究，随后推出了量子测控软件——LabOne。2018 年，苏黎世仪器推出首个商业量子计算控制系统(QCCS)，用于控制超导和自旋量子比特。谷歌在 2019 年开发了名为 Optimus 的量子芯片自动化校准系统，用于谷歌“量子计算优越性”实验。另外，美国测量仪器公司是德科技也是最早开发量子测控系统的公司之一。

在国内，2017 年成立的成都中微达信科技是最早开始研制超导量子计算机测控系统的团队之一，经过多年发展，公司合作覆盖国内约 70% 以上的量子计算整机公司及科研机构，已为中国科学技术大学、北京量子信息科学研究院、南方科技大学等提供量子计算测控系统设备及解决方案。

中微达信于 2018 年在国际上首次推出基于二次变频体制的系统架构，具备 μV 级超低噪声、超高稳定度直流电压产生，1KHz 以下信号底噪等核心指标优于国外先进产品；支持上千通道的可扩展皮秒级同步精度的低噪声任意波形产生；信号同步精度高达 1ps 的低抖动触发和时序控制；200M~20G 超宽带、低相噪、高稳定、高集成度微波信号产生。

中微达信量子计算测控技术布局覆盖量子计算机发展的各个阶段，涉及常温测控、低温测控两大技术路线。根据其路线图，常温测控技术下，该公司已实现 100 比特级可扩展的量子计算常温测控，预计 2022 年实现 1000 比特内常温量子计算测控全线覆盖能力。低温测控技术下，预计 3 年内研制出 1000 比特级低温量子测控芯片。根据 IBM、本源量子等国内外主要量子计算参与者发布的量子计算路线图，到 2023 年左右，量子计算测控系统需实现 1000 量子比特级的控制能力。

图 4 量子计算测控系统发展趋势



来源：中微达信

本源量子公司在 2018 年推出了第一台商用量子测控一体机 Origin Quantum AIO，总计 40 个功能通道，输出频率范围为 12-16 GHz，可以测控 8 个量子比特；

2020 年推出第二代量子测控一体机，支持 216 通道，具备 200 皮秒同步稳定性，能够测控 32 个量子比特，提供灵活的 Python 接口库。本源量子还开发了配套的量子测控软件 PyQCat，用于提高测试速度，同时支持更高效率的量子反馈功能。

图 5 量子测控一体机 Origin Quantum A10



来源：本源量子

除了上述公司，近年来新出现了几家量子测控系统供应商，包括中国最早的量子科技公司国盾量子。

国盾量子依靠多年来从事量子信息产品的研发和服务积累的技术优势，于 2020 年 4 月前瞻布局量子计算，正式成立国盾量子计算调控技术部。针对多比特超导量子计算需求，国盾量子联合中国科学技术大学在 2020 年推出 ez-Q™ Engine 超导量子计算操控系统。整体价格仅为国外商用仪器的 1/3-1/2。该产品已经提供给中科院物理所、南方科技大学等团队使用。在此基础上，于 2021 年 3 月推出优化版本，在产品集成、便捷性方面做了提升改进。该系统可以支持 100

比特以上，是目前操控比特数目最大的量子计算操控系统之一。相关技术已应用到“祖冲之号”并完成“量子计算优越性”实验。而在软件配套方面，国盾量子建立了超导量子计算操控软件系统团队，致力于将中国科大潘建伟、朱晓波超导量子计算研究团队软件进行商业化改进，让其更稳定、更易用。

图 6 ez-Q Engine 超导量子计算操控系统



来源：国盾量子

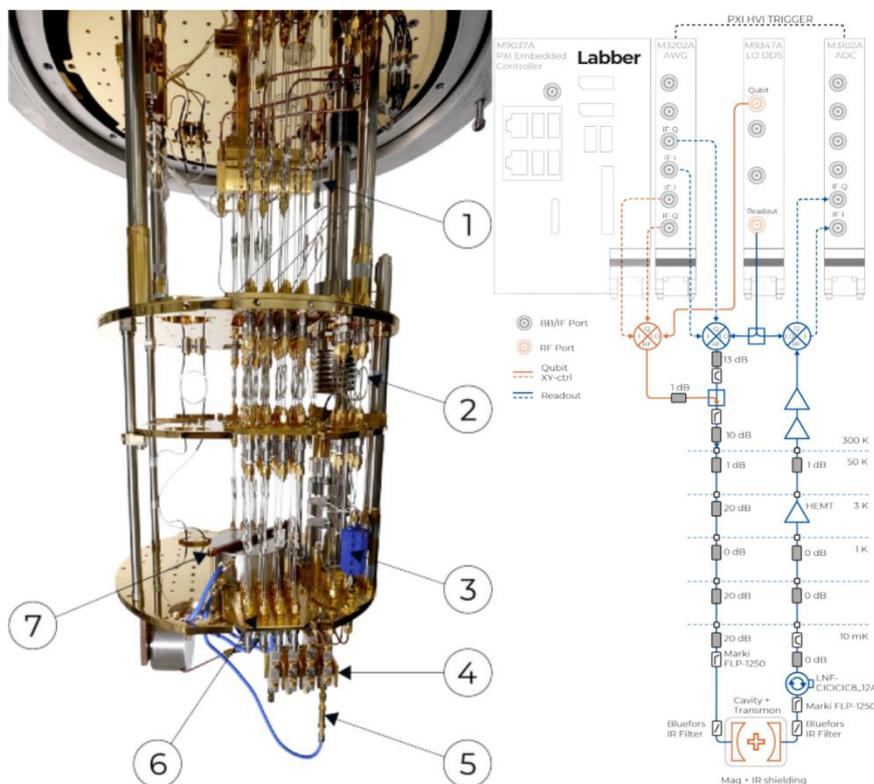
此外，荷兰初创公司 Qblox 在 2021 年的美国物理学会（APS）年会上推出并演示其新一代量子控制堆栈，提供从超长直流到 18.5 GHz 的所有输入和输出信号。它封装在一个名为 Cluster 的 19 英寸机柜中，能够控制和读取 20 个量子比特。

除了目前普遍使用的室温量子测控系统外，英特尔还在 2019 年推出了量子比特低温控制芯片 Horse Ridge，2020 年推出了第二代芯片。Horse Ridge 通过将量子计算机操作的关键控制功能引入低温制冷设备——为了尽可能地接近量子比特本身——简化量子系统控制布线的复杂性。英特尔和 QuTech 在 2021 年的

研究表明，他们的基于 CMOS 的低温控制器件在与室温电子器件相同的保真度水平（99.7%）下实现了对 2 量子比特处理器的相干控制。⁵⁴

2021 年，商业量子测控系统还有其他进展。是德科技实现了量子测控系统与稀释制冷机的集成，这在业内还是首次。⁵⁵2021 年 3 月，苏黎世仪器发布 SHFQA 量子分析仪，单台测控系统最多读取 64 个量子比特。⁵⁶2021 年 7 月，澳大利亚公司 Archer Materials 宣布开发了一种量子比特控制芯片，Archer 首次记录了连续波电子自旋共振（cwESR）信号，该信号由集成微观量子比特的特制超导片上谐振器半导体器件产生。他们发现片上 cw-ESR 信号特征与室温测量获得的信号非常一致。⁵⁷

图 7 是德科技集成测控系统。左图是 Bluefors LD250 稀释制冷机；右图是量子测控系统与稀释制冷机的集成



⁵⁴ <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03469-4>

⁵⁵ <https://www.keysight.com/cn/zh/assets/7121-1069/article-reprints/The-Bluefors-Dilution-Refrigerator-as-an-Integrated-Quantum-Measurement-System.pdf>

⁵⁶ www.zhinst.com/shfqa

⁵⁷ <https://thequantuminsider.com/2021/07/12/archer-reports-first-indication-of-on-chip-qubit-control/>

来源：是德科技

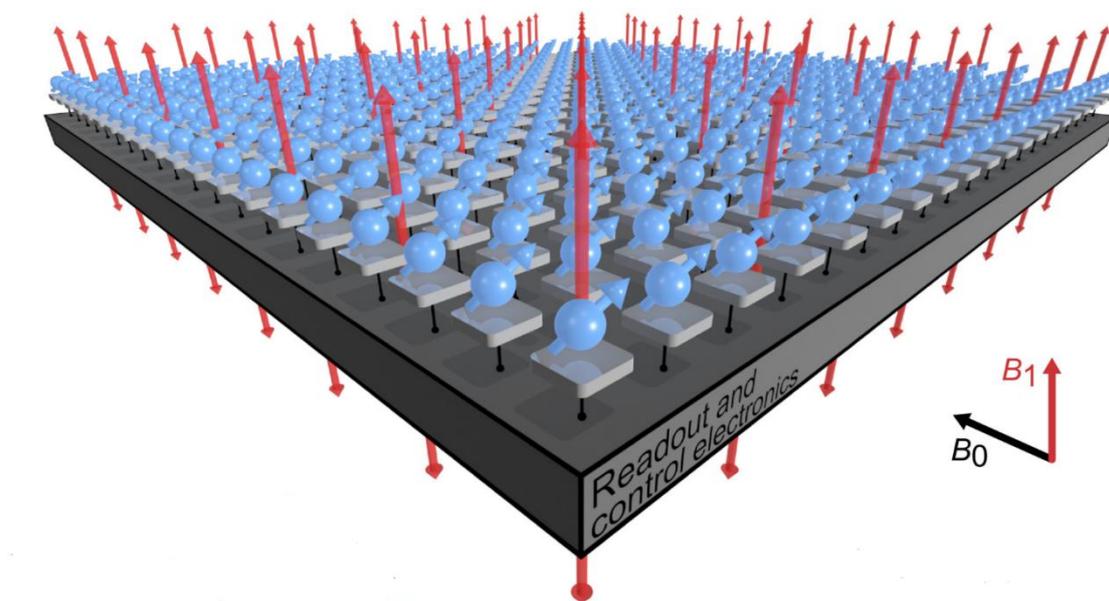
在学术界，量子比特控制技术也取得了重大突破。2021年8月，澳大利亚新南威尔士大学提出了一种能同时控制数百万个自旋量子比特的新技术。该团队提出了在芯片上方产生磁场的方法，通过磁场同时操纵所有量子比特。研究人员发现，谐振器产生的场可以控制一个能容纳400万个量子比特的区域。⁵⁸微软也提出了控制数千个量子比特的技术。2021年11月，悉尼大学和微软发明了一种工作温度比深空温度低40倍的单芯片，研究表明，“只需两根传输信息的线缆作为输入，即可产生数千个量子比特的控制信号。”⁵⁹2021年12月，华中科技大学物理学院副教授严承宇与芬兰阿尔托大学、VTT（芬兰国家技术研究中心）研究人员开发出一种片上器件，可以产生控制量子计算机所需的高质量微波信号，并可以在接近绝对零度的温度下工作。但是，这种器件产生的微波源还不能直接用来控制量子比特。因为微波必须成形为脉冲。该团队目前正开发快速打开和关闭微波源的方法。⁶⁰

⁵⁸ <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abg9158>

⁵⁹ <https://www.nature.com/articles/s41928-020-00528-y>

⁶⁰ <https://www.nature.com/articles/s41928-021-00680-z>

图 8 芯片上方产生的磁场可以控制百万级量子比特



来源：新南威尔士大学

三、同轴电缆

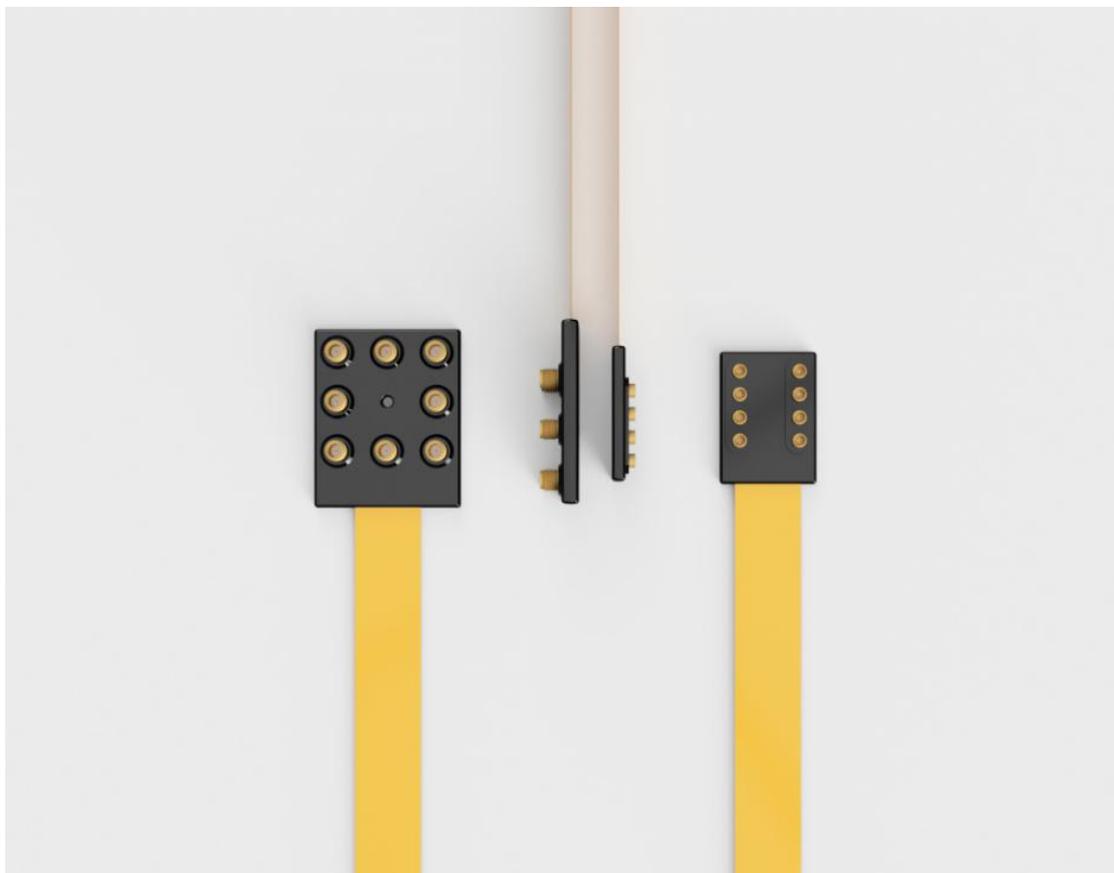
低温同轴电缆是一种超导电电缆，是传输、控制、读取量子比特的微波信号的专用电缆，同轴电缆和机架/制冷机里的模拟信号电路进行连接，保证量子比特脆弱的量子态不被破坏，主要用于超导量子计算机。目前日本 Coax 公司是同轴电缆的主要制造商，创立于 1974 年，提供低温半刚性电缆（Semi-rigid coaxial cables）。该电缆由中心和外部导体上的低导热金属材料组成，低导热率的金属材料可最大程度地降低外界的低温影响。⁶¹ 另一家供应商是 2016 年成立的荷兰初创公司代尔夫特电路公司（Delft Circuits），主要提供低温同轴电缆 Cri/oFlex® 系列产品⁶²，可以帮助监视和控制量子比特，包括一些用于传输微波信号的专用电缆。目前，量子计算机专用的同轴电缆几乎由上述两家公司垄断。美国 DARPA 在 2021 年 8 月发布高密度连接器低温电缆项目的招标，要求工业界确定开发高密度连接低温电缆的可行性，以便将来用于超导经典计算、超导量子计算以及超

⁶¹ <http://www.coax.co.jp/en/semi/cryogenic>

⁶² <https://delft-circuits.com/applications/quantum-computation/>

导单光子探测器阵列。目标是为超导电子应用创造一种新型高密度数据电缆，具有高密度、低衰减、低串扰和低热负荷。⁶³

图9 低温同轴电缆示意图



来源：荷兰代尔夫特公司官网

四、低温组件

低温量子芯片和室温测控系统之间的交互是超导量子计算机面临的一个严峻问题。同轴电缆是连接它们的桥梁，但在布线时必须在制冷机的每个温度阶段进行热处理，以避免混合室过热。每个阶段需要插入额外组件（包括衰减器、滤波器和放大器）。

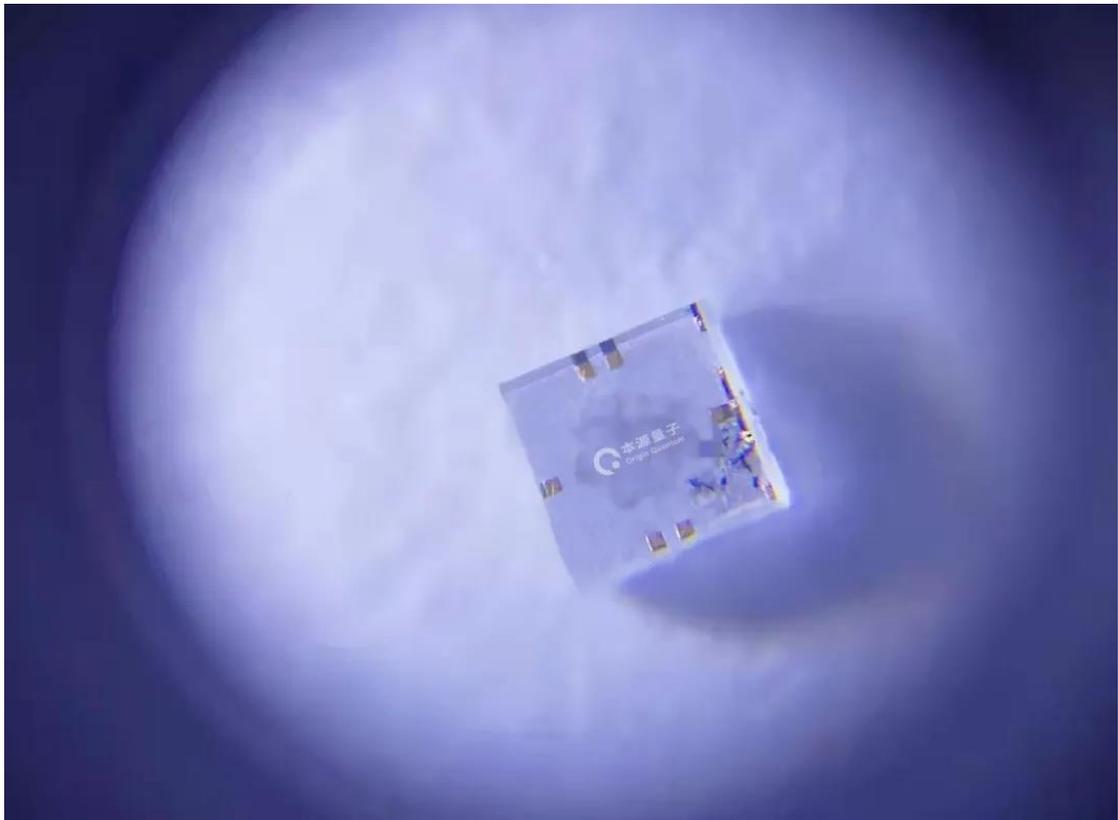
⁶³ <https://www.militaryaerospace.com/computers/article/14208427/cryogenic-cables-quantum-computing>

衰减器、滤波器和放大器，连接到量子处理器，用于控制和读出，对应驱动线、磁通线和输出线。简单来说，衰减器用于减少带内辐射，滤波器（衰减器不在所需频率范围内的信号）用于消除带外辐射噪声，该噪声不在拟传送至设备的信号的频率范围内。信号经过衰减器和滤波器优化之后，使用低温放大器来增强信号。

低温放大器的主要厂商有美国的 AmpliTech、B&Z Technology、L3Harris Narda-MITEQ 和 QuinStar Technology Inc，英国的 Atlantic Microwave，瑞典的 Low Noise Factory，以及加拿大的 Nanowave Technologies。中国的赋同量子科技公司也有此类产品。

低温衰减器的主要厂商有美国的 API Technologies、XMA Corporation 和 Quantum Microwave，日本的 KEYCOM Corporation。2021 年 2 月，中国的本源量子宣布推出了可用于 10mK 温度环境的极低温系列衰减器。

图 10 本源量子极低温系列衰减器



来源：本源量子

低温高通滤波器的主要厂商有美国的 Quantum Microwave。本源量子也有相关产品。本源量子成立了量子测控部低温电子器件长期项目组，研发范围主要包括环形器、功分器、滤波器、Bias-Tee、低噪声放大器等产品。

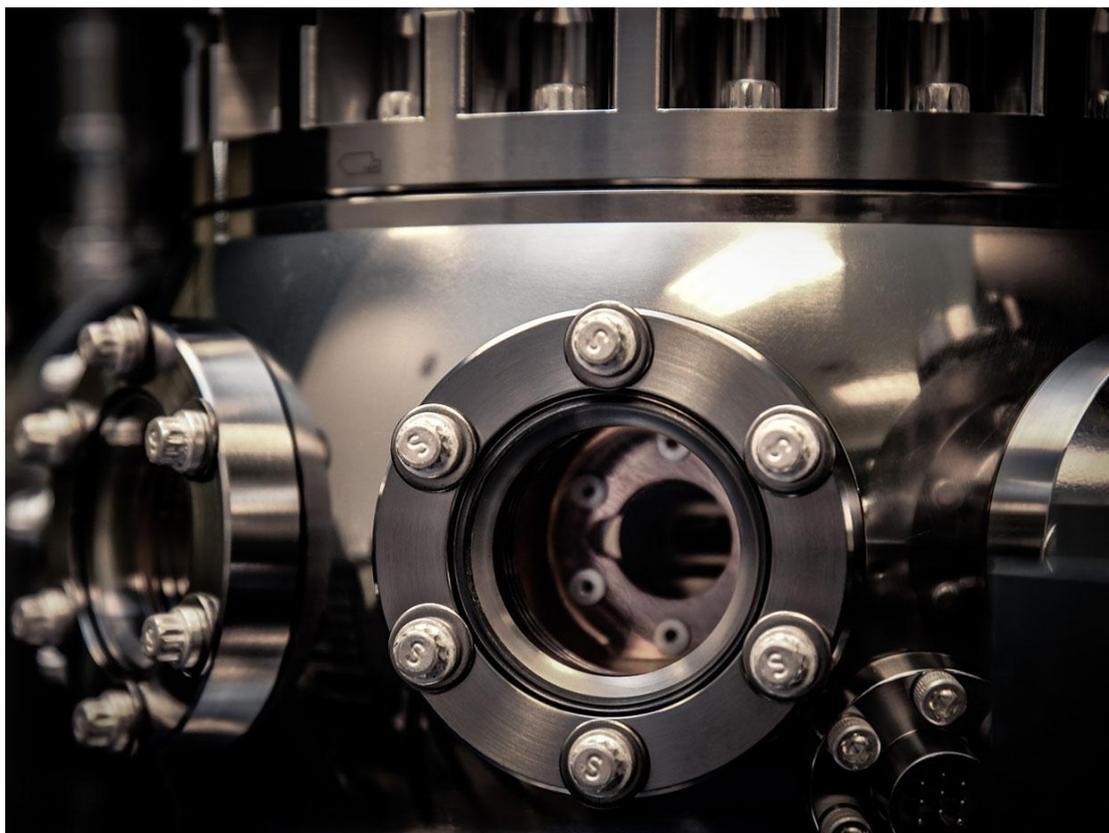
五、超高真空（UHV）腔

超高真空是离子阱量子比特和中性原子量子比特必需的运行环境，甚至一些半导体量子比特也需要这样的环境。例如，霍尼韦尔、IonQ 的离子阱量子芯片就放置在一个篮球大小的真空腔中。成立于 1961 年加拿大公司 Johnsen Ultravac Inc. (JUV) 是全球超高真空产品的顶级供应商。JUV 公司用户遍及北美、欧洲和亚洲众多国家的科研机构 and 企业的实验室。国内超高真空腔体的供应商主要有北京维意真空、Htc 日扬真空、巴托真空科技（苏州）有限公司等。

JUV 的超高真空腔有多种标准配置。可以根据客户的特殊需求制造满足特定技术和性能要求的真空腔。真空性能达到 10^{-11} 托范围。目前的超高真空腔基本能够满足离子阱等体系量子计算机的需求。2021 年 3 月，美国国家标准与技术研究院 (NIST) 计划构建冷原子真空传感器 (CAVS)，该传感器将能够测量超高真空 (UHV) 状态下的压力，对应的压力小于 10^{-7} 帕或 10^{-9} 托。目前，在这种压力下没有可靠的测量工具。CAVS 的工作原理是将保守陷阱与环境室温原子和分子碰撞导致的超冷 $1\mu\text{K}$ 锂原子损失与背景压力联系起来。该项目从理论上确定锂原子与相关背景原子和分子碰撞的弹性率系数及其温度依赖性。⁶⁴

⁶⁴ <https://www.nist.gov/programs-projects/cold-atom-based-sensor-measuring-pressure-ultra-high-vacuum-domain>

图 11 霍尼韦尔离子阱量子计算机使用的真空腔



来源：霍尼韦尔

六、激光器

激光和传统光源的重要区别在于光束的“相干性”。相干性决定了激光束在执行各种精密任务时的能力，高度的相干性使激光适合应用在高精度器件上。比如在控制量子计算机的组件时，需要特定频率的高度相干光束来长时间地控制大量的量子比特，而未来的量子计算机可能还需要相干性更强的光源。离子阱、光子和中性原子等量子计算体系都需要激光器。

目前主流的激光器是光纤激光器，成立于 1990 年的美国 IPG 是全球最大的光纤激光器制造商。产品线涵盖高、中、低功率光纤激光器。国内的激光器龙头是上市公司锐科激光，其高功率激光器技术达到国际领先水平，在国内市场正逐步替代海外主要激光器厂商的产品，公司整体销售维持增长态势。

2021年12月10日，锐科激光与南华大学联合研制的国内首台100kW超高功率工业光纤激光器及配套设备正式启用。从立项到研制成功到交付使用仅用了短短6个月的时间。作为国内最大功率的工业光纤激光器，也是全球第二大功率的工业激光器，其将在先进制造、航空航天、医疗设备等方面发挥巨大作用。⁶⁵

图12 国内首台100kW超高功率工业光纤激光器



来源：锐科激光

七、单光子源

确定性的高品质单光子源是发展光量子信息技术的关键组件，包括量子通信和光量子计算。自发参量下转换（SPDC）是传统的生成单光子的器件，但这是一种不确定性的单光子源，而且生成概率很低。近年来，基于量子点的光子源的应用越来越广泛。2013年，中国科学技术大学潘建伟、陆朝阳等在国际上首创

⁶⁵ <https://uscnews.usc.edu.cn/info/1025/43700.htm>

量子点脉冲共振激发技术；2016 年，该团队实现了当时国际上综合性能最优的单光子源；2019 年提出相干双色激发和椭圆微腔耦合理论方案，在实验上同时解决了单光子源所存在的混合偏振和激光背景散射这两个最后的难题，成功研制出确定性偏振、高纯度、高全同性和高效率的单光子源。基于此，光量子计算原型机“九章”成功实现了“量子计算优越性”。

除了单光子外，光量子计算机还可以使用连续变量，例如压缩光。在“九章”光量子计算机中，通过光学参量下转换（OPDC）生产压缩态。加拿大量子计算公司 Xanadu 通过使用纳米光子波导谐振器代替光学参量放大器中的大型非线性晶体来产生光的压缩态。2021 年 12 月，日本 NTT 公司、东京大学、RIEKN 合作开发了一种光纤耦合压缩光源，可以在光通信波长下工作。通过将其与光纤组件相结合，首次在光纤封闭系统中成功地产生了连续波压缩光，压缩量子噪声超过 75%，边带频率超过 6 THz。⁶⁶

八、单光子探测器

量子实验中光子的生命始于它的生成，止于它的探测，而这两个过程都需要很高的效率。目前量子信息技术中主要使用单光子雪崩二极管（SPAD）、超导纳米线单光子探测器（SNSPD）、电子倍增电荷耦合器件（EMCCD）探测器等单光子探测器。其中，前两类主要应用于光量子信息技术，EMCCD 则在离子阱和中性原子量子计算机中有广泛应用。

⁶⁶ <https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/5.0063118>

单光子雪崩二极管 (SPAD) (也称为盖革模式 APD, 光子计数器, SPAD 或单光子探测器) 是传统的单光子探测器, 基于这种技术, 2021 年 9 月, 国盾量子推出首款紧凑型、高性能近红外自由运行单光子探测器系列产品——QCD600, 具有高探测效率、低暗计数、紧凑稳定的特点。⁶⁷这种类型的单光子探测器在量子通信领域应用广泛, 实力较强的量子通信公司都推出了基于 SPAD 的单光子探测器, 例如 IDQ、启科量子、问天量子等。此外, 还可以用于量子激光雷达、荧光寿命检测、单光子测距等极弱光探测场景。国盾量子交付的第一批 QCD600 试产样机已应用于某大气检测雷达产品内。

图 13 近红外波段自由运行单光子探测器 QCD600



来源: 国盾量子

与 SPAD 相比, 目前快速发展的超导纳米线单光子探测器 (SNSPD) 具有更高的探测效率, 但需要在 0.8k - 3k 的低温下运行。2021 年 5 月, 中国科学院

⁶⁷ <http://www.quantum-info.com/product/hexinzujian/671.html>

理化技术研究所梁惊涛团队与中科院上海微系统与信息技术研究所尤立星团队合作，在面向空间应用的 SNSPD 技术领域取得进展，实现了通信波段最大探测效率 93% 的新纪录。⁶⁸ “九章”使用的超导纳米线高效率单光子探测器正是来自尤立星团队。

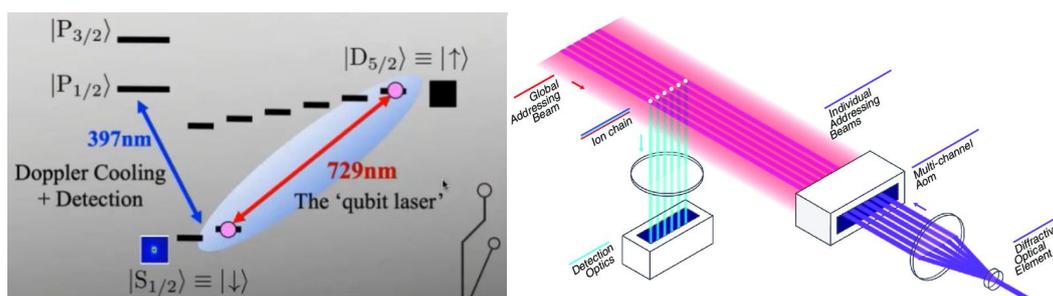
目前，尤立星团队创立的赋同量子科技（浙江）有限公司已将 SNSPD 产品市场化。赋同量子官网显示，他们的超导纳米线单光子探测系统的探测效率达到 95%，最大计数率 >50MHz，暗计数率 <1cps，系统全球用户 80+。产品包括单模光纤耦合 SNSPD、大光敏面 SNSPD 和多像素 SNSPD 阵列。技术能力达到国际一流水平。

还有一类单光子探测器是电子倍增电荷耦合器件（EMCCD）探测器，主要用于离子阱量子计算机。在离子阱中，激光操纵离子的量子态：自旋向上（表示量子比特态“0”）或自旋向下（表示量子比特态“1”）。用激光照射处于自旋下降状态的离子会使其发出光，单光子探测器可以测量这种光，这样就可以区分自旋上升状态。此外，在中性原子量子计算机，EMCCD 同样可用于收集原子的荧光，与在离子阱中的应用差异不大。

以钙离子阱量子计算机为例，由于所有离子始终处于多普勒激光（397 nm）冷却照射中，不同状态的离子会对 397 nm 的光有不同的反应，处于基态的离子会发出荧光，处于激发态的却不会，如图 14（左）。如果是多量子系统，可以将其解释为一个二进制串，其中发光的离子为 1，暗离子为 0。通过高灵敏度的相机收集和测量这种光线，即得到计算的结果，如图 14（右）。

⁶⁸ 相关研究成果以《系统探测效率达到 93% 的基于可空间应用制冷机的超导单光子探测器》为题，发表在期刊 Superconductor Science and Technology 上。

图 14 单光子探测器在离子阱中的应用

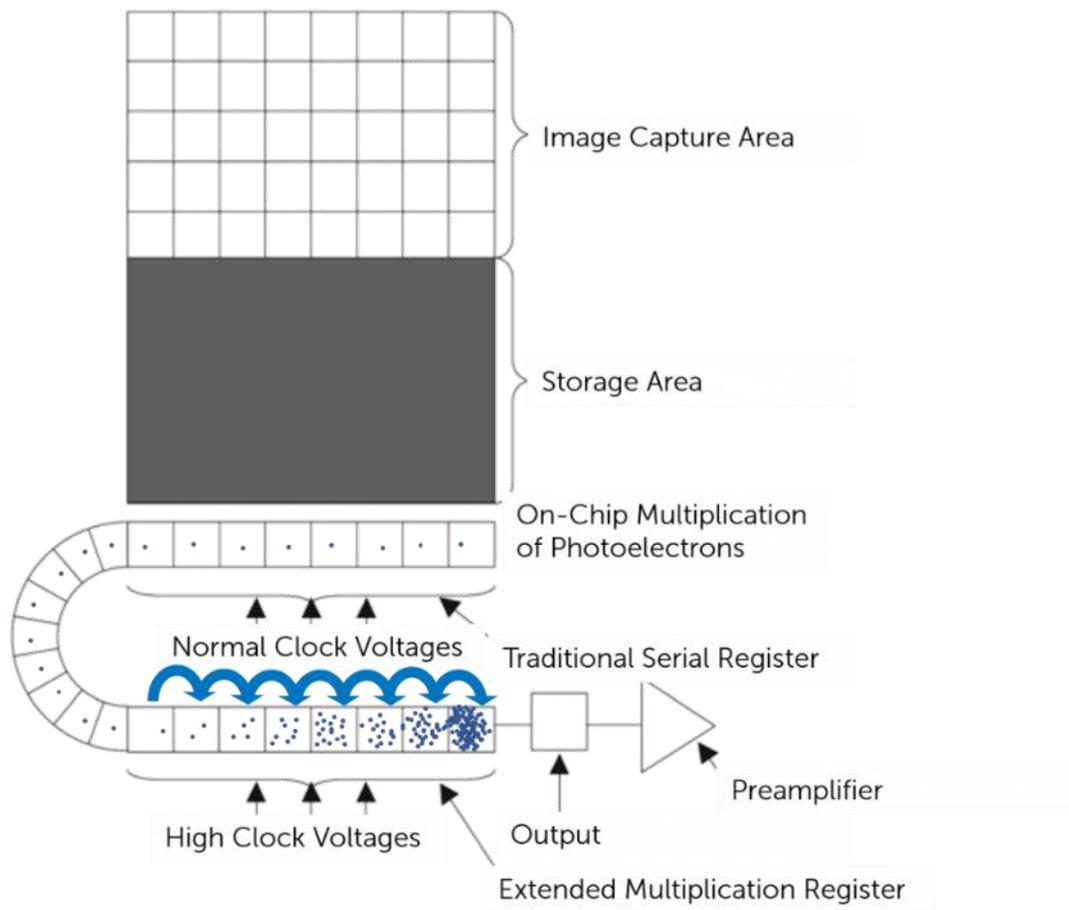


来源：牛津仪器

离子阱封装到高真空腔内部，通过腔外的高灵敏度 CCD 相机可以观察离子的发光情况。电荷耦合器件（Charge-coupled Device, CCD）是 70 年代初期一种在光电效应基础上发展起来的半导体光电器件，它具有量子效率高、动态范围大和线性好等优点。但是 CCD 还达不到单光子探测的要求，因此 2000 年牛津仪器集团旗下 Andor 推出世界上第一款 EMCCD 相机。相对于普通 CCD，EMCCD 引入片上增益（on-chip gain），所以可以将信号和暗噪声放大 G 倍，但是不影响读出噪声（读出噪声只跟读出速度有关）。由于短曝光时间和高帧率的工作状态下，读出噪声是主要噪声源，通过放大信号而抑制读出噪声，可以使等效读出噪声小于 1，而常规 CCD 高帧率模式下，读出噪声可高达 100 多电子，因此通过这种方法，EMCCD 可以获得高速单光子检测能力。

清华大学交叉信息研究院量子信息中心实验室正在开展科技部离子阱量子计算重点专项的研究工作，其目标是构建拥有 5 到 10 个量子比特的量子计算机雏形。该研究工作具有重要的科学价值和深远的应用前景。在项目实施期间进行一系列先进的离子阱实验，构建一个基于镱离子的大型离子系统，使用牛津仪器 ANDOR 的 iXon 系列 EMCCD 作为离子阱计算机的主要探测器。目前中国开展离子阱量子计算研究的科研团队，大量采用该系列的 EMCCD，如中国人民大学张翔课题组、清华大学金奇奂课题组、山西大学申恒课题组等。

图 15 EMCCD 芯片结构图

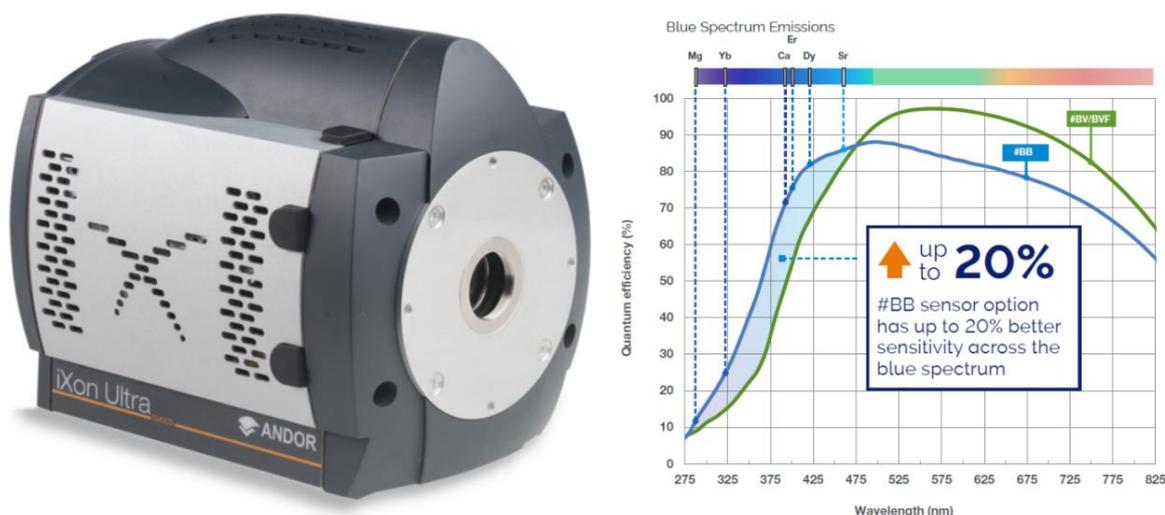


来源：牛津仪器

目前最先进的 EMCCD 相机之一是牛津仪器 Andor 的 iXon Ultra 系列，具有单光子探测灵敏度；专为离子阱计算机打造的背照式 BB 芯片，有更高紫外量子效率，对弱光探测更有利；高级光子计数模式；采用电子倍增技术，读出噪声 $< 1e^-$ ；实时的光电子数显示，精确追溯真实的信号水平；内置计算芯片，追溯光电子数；可实时拍摄，也可以拍摄后处理。⁶⁹

⁶⁹ <https://andor.oxinst.cn/products/ixon-emccd-cameras>

图 16 iXon Ultra 系列 EMCCD 相机



来源：牛津仪器

除了牛津仪器 Andor, Photonics Industries、德州仪器、QImaging、日本滨松光子、Photometrics、德国 PCO 等公司也在销售 EMCCD。

实际上，离子阱系统的外部探测器，除了 EMCCD 相机外，也可以使用光电倍增管 (PMT)、雪崩光电二极管 (APD) 和超导纳米线单光子探测器 (SNSPD) 等。2021 年 1 月，美国国家标准与技术研究院 (NIST) 开发了一种带有 SNSPD 的新型离子阱。研究人员使用其内置的光子探测器以近乎完美的精度测量铍离子的量子态，准确率高达 99.9%。⁷⁰

⁷⁰ <https://www.nist.gov/news-events/news/2021/01/spotlight-new-ion-trap-single-photon-detector>



第四章 云平台、软件、算法——应用至上

硬件发展是量子计算应用的基础，但要解决实际问题，
硬离不开云平台、软件 and 算法的发展。

截至 2021 年，全球已有约 20 个科研机构发布量子计算云平台。Strangeworks、中科院物理所和北京量子院在 2021 年首次发布其云平台。目前，已经有使用超导、离子阱、退火、光子、核磁共振、硅自旋等硬件为依托的云平台。整体来看，早些年发布云平台的公司，例如 IBM、微软、谷歌等，在 2021 年主要以升级云平台可支持的量子硬件类型、物理比特和逻辑比特数量、融合和开发更多的功能为主。

软件方面，目前程序设计主要围绕硬件进行开发，随着量子计算机硬件已有了阶段性的成果，硬件环境相对稳定，软件将是现阶段需要大力开发的方面。现阶段，主要是为研发服务的程序，例如可供芯片电路设计与验证、实验结果分析等，提高研发效率，降低研发试错成本。

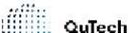
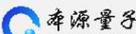
算法方面，由于量子计算被证明较经典计算在算力方面有较大优势，因此也将首先惠及对算力有明显需求的行业。现阶段，化学医药、金融、交通物流、人工智能等行业已展开相关合作研究。金融方面，建信金科、毕马威、高盛等国际银行均与量子计算公司展开合作。化学医药方面，新日铁、罗氏、杨森制药等公司已与量子公司展开新材料、新分子等模拟实验。

一、云平台进展

云计算经过近二十年发展已趋于成熟。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以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。量子计算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。

自 2016 年 IBM 推出商业化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，已使用 IBM Quantum 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。量子计算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。

表 10 全球量子计算云平台发展历程

Time	Product	Institution /Enterprise	Number of available qubits	Hardware	Provide externally
2016	Quantum Experience		1-65 ^[1]	Superconducting	✓
2018	Quantum Cloud Service (QCS)		31 ^[2]	Superconducting	✓
2018	Leap (Quantum Cloud Platform)		5000 ^[3]	Quantum Anneal	✓
2019	Cirq (Open-Source Quantum Computing Framework)		53	Superconducting	✓
2019	Quantum Inspire		Superconducting-5 Spin-2	Superconducting Spin	✓
2019	Azure Quantum		Including 10-bit devices from IonQ and Honeywell ^[4]	Ion trap Quantum Anneal	✓
2019	AWS Braket		Includes Rigetti's 31-bit device	Superconduction Ion trap Quantum Anneal	✓
2020	TensorFlow Quantum (Quantum Machine Learning Open-Source Library)		53	Superconducting	✓
2020	Optical quantum cloud platform		8-24	Photonic	✓
2021	Strangeworks QC		Includes IBM's 65-bit devices ^[5]	Contains almost all technologies	✓
2017	Quantum Computing Cloud Platform		11	Superconducting	✓
2018	HiQ		-	Simulation /Emulation	✓
2019	Kunfang quantum computing (simulation) cloud platform		-	Simulation /Emulation	✓
2020	Origin Quantum computing cloud platform		6	Superconducting	✓
2020	Quantum leaf		Access to the hardware of the Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences	Superconducting	✓
2020	Taurus (quantum cloud platform)		8	Nuclear magnetic resonance (NMR)	✓
2020	Second-generation quantum computing cloud platform		12	Superconducting	✓
2021	ScQ.Cloud		10	Superconducting	✓
2021	First-generation superconducting quantum computing cloud platform		8	Superconducting	✓

iCV Tank

注 1: IBM 云平台上线的 24 个量子系统中只有 7 个系统向中国用户提供, 最高比特数 5; IBM 的 127 量子比特芯片还未上线。

注 2: Rigetti 的 40 和 80 量子比特处理器正在内测, 还未上线。

注 3: 量子退火机的量子比特数量不能与基于门的量子计算机相提并论。

注 4: Azure Quantum 和 Rigetti 达成合作, 将于今年第一季度接入后者的量子计算机。

注 5: Strangeworks QC 是一个跨硬件、软件兼容的量子开发环境,用户可以通过平台直接注册使用 IBM Quantum。

来源: ICV

2021 年,国内外量子计算云平台的最新进展如下。

(一) 国外量子计算云平台

1、IBM

2021 年 3 月,IBM 宣布其量子云平台由 IBM Quantum Composer 和 IBM Quantum Lab 组成,它们取代了之前的 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,并在真实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。

目前,IBM 量子计算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,可以使用 IBM 最先进的量子计算系统。Advance Access 和 Premium Access 需要申请特别用户使用权限。

2、微软

2021 年 2 月,Azure Quantum 服务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、霍尼韦尔、Quantum Circuits Inc.的量子计算机,还可以使用微软、1QBit、东芝开发的优化算法。

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

2021 年 7 月，微软宣布 Azure Quantum 将增加四个新功能：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 生态系统并与其交互；2.开发人员可以从 Jupyter Notebooks 中免费访问 Azure Quantum；3.增加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。

2021 年 12 月，Rigetti Computing 宣布与微软合作，通过云向微软 Azure Quantum 服务的用户提供 Rigetti 量子计算机。双方预计在 2022 年第一季度完成整合并向用户开放。届时，Rigetti 系统将成为 Azure Quantum 上最大规模的量子计算机。

3、谷歌

2021 年 6 月，IonQ 的 11 量子比特离子阱量子计算机宣布在谷歌云上向公众开放，而谷歌的超导量子计算机也处于内部测试模式。当前的谷歌云客户将能够使用他们现有的帐户通过谷歌云市场访问 IonQ 机器。同时，IonQ 宣布将其量子计算平台与谷歌领先的开源量子计算框架 Cirq 完全集成。

4、D-Wave

2021 年 2 月，新加坡宣布引进 D-Wave 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 5000 比特 Advantage 量子退火机、混合量子/经典求解器和量子应用环境。

截至 2021 年 8 月，Leap 量子云服务提供访问的国家有 38 个，包括欧盟的全部 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，中国目前不在可访问国家列表中。

2021 年 12 月，D-Wave 在 Q2B 2021 大会上发布新的量子加速包 Quantum QuickStart™，结合了量子编程培训和云访问。Quantum QuickStart 旨在快速培训并使得开发人员能够轻松利用量子计算和量子混合资源构建量子应用程序，为开发人员提供全面的培训体验和一个月的无限制实时量子云访问。

2021 年 12 月，日本 NEC 公司成为 D-Wave Leap 量子云服务的第一家全球经销商。此举将进一步促进 D-Wave 基于云的量子计算和量子混合求解器服务的快速扩展与运用。

5、Strangeworks

Strangeworks 量子计算平台是一个可使研究人员、开发人员和爱好者能够快速学习、开发量子代码的免费的量子计算生态系统，2021 年 2 月正式上线。通过 Strangeworks 量子计算平台，用户可轻松创建、组织和协作量子计算项目，并访问代码库、框架和语言。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。目前加入方式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。

2021 年 6 月，IBM 宣布 Strangeworks 公司已将 IBM 的所有量子计算系统整合到 Strangeworks 量子计算生态系统中，用户可以通过 Strangeworks QC 直接和完全免费地访问这些系统。

2021 年 10 月，Strangeworks 推出后台通行证（Backstage Pass）计划，帮助开发人员和研究人员加速研究机构、政府和商业组织的量子计算研发。该计划的成员将可以使用 Strangeworks 自己的内部开发团队及其量子企业联盟成员提供

的最新技术。

2021 年 12 月，ColdQuanta 宣布，把即将推出的量子计算机 Hilbert 先提供给 Strangeworks 后台通行证的成员，随后再全面开放。Hilbert 量子计算机共拥有 121 个冷原子，每个冷原子作为一个量子比特。

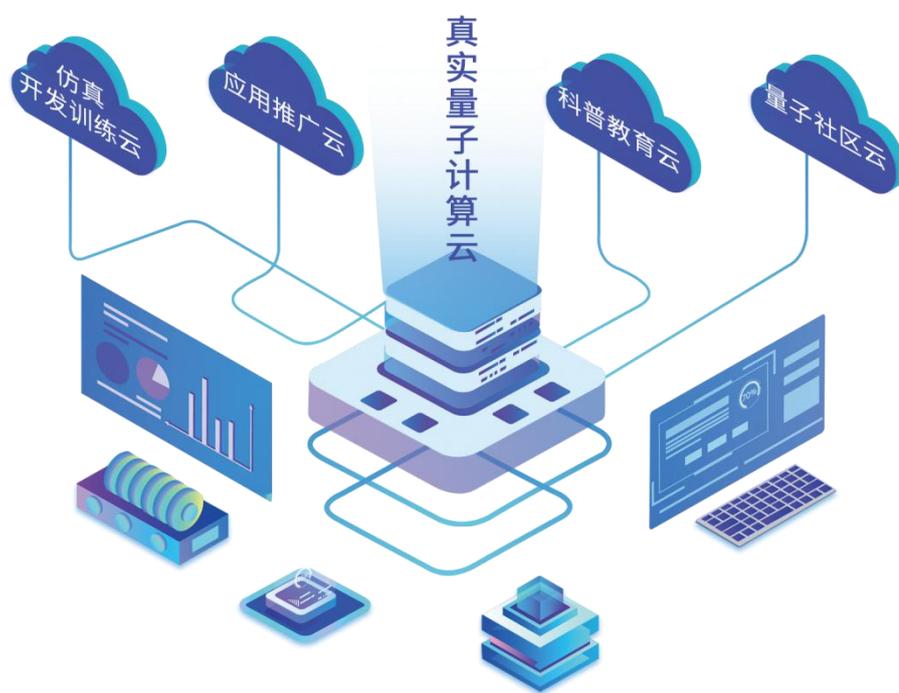
（二）国内量子计算云平台

1、本源量子

2021 年 2 月，由本源量子自主研发的工程化超导量子计算机本源悟源 2 号正式上线，用户可继续通过本源量子云使用该量子计算机。本源悟源 2 号沿用了本源悟源 1 号的设计架构，搭载本源第一代超导 6 比特量子处理器夸父 KF C6-130 和本源量子测控一体机。9 月，本源量子在首届量子产业大会发布本源量子云平台国际版，力争让中国量子计算机的软硬件系统和标准迈向世界。此前 2020 年 12 月，本源量子在业内首次提出了量子计算“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。目前本源量子云平台上已上线金融工程、智能制造、生物化工、大数据、人工智能等量子计算应用。

利用量子计算云平台，越来越多的研究人员开始尝试在各行业探索量子计算新应用，2021 年 10 月，本源量子与合肥市大数据公司共同打造的量子计算创新创业平台正式上线，为国内首个以“量子计算”为主要特色的双创平台。今年 1 月升级为 2.0 版，更新为“量子计算全球开发者平台”，面向全球量子计算爱好者和开发者，提供全面丰富的量子计算服务。

图 17 本源量子计算“五朵云”



来源：本源量子

2、量子创新研究院/国盾量子

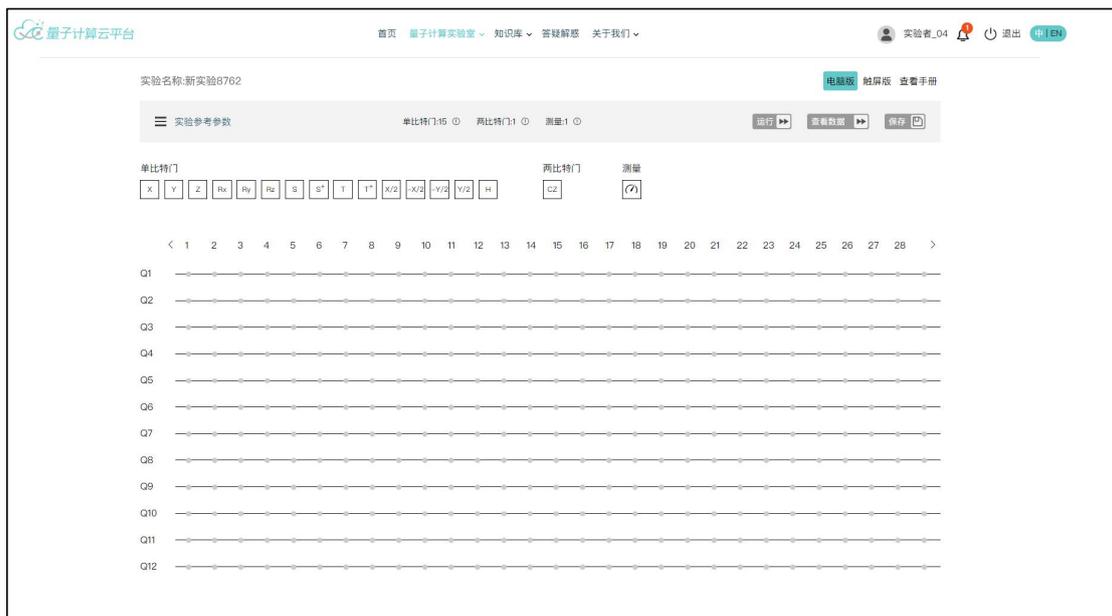
2021年4月，中科院量子信息与量子科技创新研究院（简称为“量子创新研究院”）量子计算云平台进行了系统切换，该研究院联合济南量子技术研究院和国盾量子等对网站页面和功能进行了重新设计，超导量子计算原型机升级至12比特。该量子计算原型机由一个包含12个超导量子比特的量子芯片、极低温极低噪声测控平台、高精度量子调控电子学系统和量子操控软件系统组成，可以通过标准的量子门指令集进行编程运行量子算法。

全新的量子计算云平台是一个集实验（实体量子计算物理机）、交流（关键量子计算技术和前沿研究结果）、分享（量子计算知识普及）为一体的公共平台

信息系统。

此外，量子创新研究院量子计算云平台将在未来接入“九章”量子计算机，用户可有效求解“高斯玻色取样”数学问题，并把该数学问题映射到量子化学、机器学习等应用。

图 18 量子计算云平台



来源：量子创新研究院

3、北京量子信息科学研究院

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。该平台的特点如下：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。

4、中国科学院物理研究所

2021 年 5 月，中国科学院物理研究所超导量子计算云平台 ScQ.Cloud 正式

上线，免费对公众开放，用户目前可以访问 10 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。此外，该平台还提供一个基于名为 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.Cloud。ScQ.Cloud 还将与公司合作，提供定制科研和教学服务。

5、昆峰量子

2021 年 6 月，昆峰量子的昆昇量子设计服务云平台（QDAP）Alpha 版正式发布上线。这是一个“云原生”面向量子芯片设计自动化的平台，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。昆昇目前仅供邀请客户使用，体验使用需申请后获批即可。

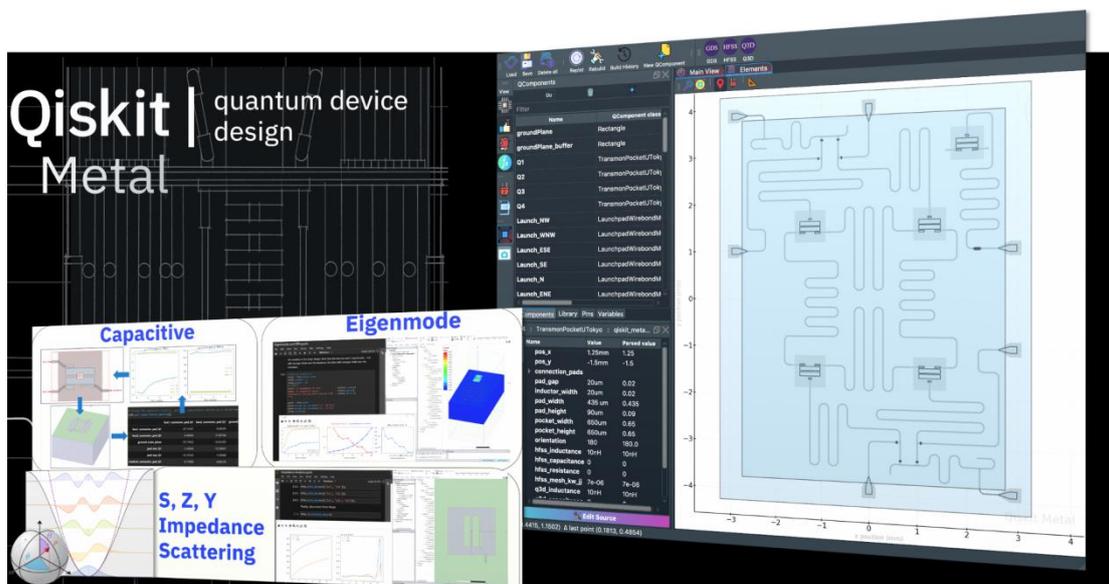
二、软件进展

（一）国外软件开发企业

1、IBM

2021 年 3 月，IBM 发布了超导量子计算机开源电子设计自动化软件 Qiskit Metal，这是第一个专门针对量子计算机的电子设计自动化（EDA）工具，旨在帮助量子计算领域的研究人员使用预构建或定制的组件轻松地自主创新和设计超导量子设备。通过 Qiskit Metal 组件库，处理第一级布局只需几分钟。然后进行自动经典分析，以确定设备的电磁特性，接下来进行量子分析，以返回设备的能量本征光谱等信息。最后，用户可以将量子分析的结果与目标哈密顿量进行比较，并根据需要进行调整。

图 19 开源电子设计自动化软件 Qiskit Metal



来源：IBM

2、IQM

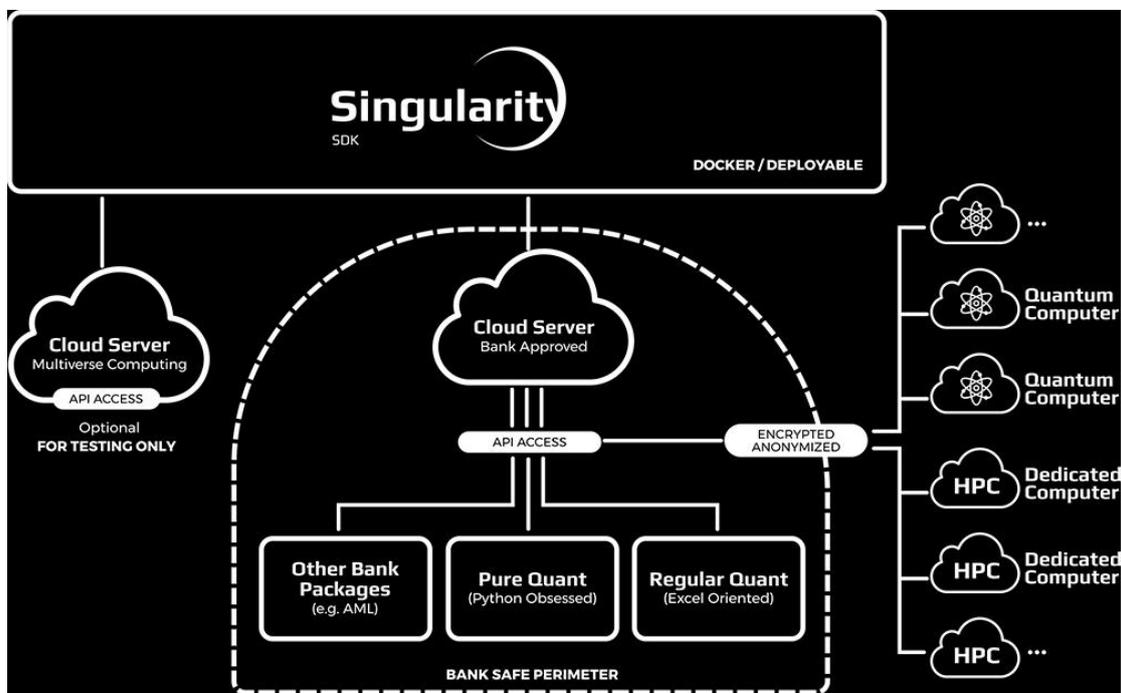
2021 年 6 月，总部位于芬兰的欧洲量子计算公司 IQM 发布了用于自动化设计超导量子处理器的开源软件工具 KQCircuits——由芬兰阿尔托大学和 IQM 利用 KLayout 设计程序联合开发的 Python 库。KQCircuits 创建了一个由社区驱动的通用平台，通过一个简单、开放的框架，实现了从芯片设计、模拟到制造的量子芯片开发。借助 KQCircuits，量子工程师和物理学家只需点击一下即可方便地生成芯片设计。他们还可以在设备制造过程之前检查信号路由，避免产生代价高昂的错误。

3、Multiverse Computing

2021 年 8 月，总部位于西班牙和加拿大的金融量子算法公司 Multiverse Computing 推出第一款产品——Singularity，这是一个 Excel 插件，可以直接用于量子投资优化。该产品可以将强大的量子计算直接连接到 Excel 表格——分析师用来处理财务数据并获得销售给客户的产品。安装这个插件后，只需要输入相关的数据，如资产的回报率和波动率，以及其他参数，如总投资和投资区间。单击

开始优化后，Singularity 负责设计优化问题，再发送到云端的量子计算机，返回结果并以用户友好的方式显示

图 20 Singularity 量子金融分析工具



来源：Multiverse Computing

4、Super.tech

2021 年 8 月，位于美国芝加哥的量子软件初创公司 Super.tech 宣布推出跨硬件的量子软件平台 SuperstaQ，可将应用程序连接到来自 IBM、IonQ 和 Rigetti 的量子计算机。SuperstaQ 通过跨越整个系统堆栈的优化来提高性能，直至模拟控制量子硬件技术的脉冲。

SuperstaQ 在整个量子堆栈中进行了优化，使得典型量子程序的错误减少了 2 倍。SuperstaQ 包括一个复杂的错误缓解技术库，包括动态解耦、激发态提升和零噪声外推。SuperstaQ 根据目标硬件的脉冲级原生门（native gate）自动优化量子程序。SuperstaQ 已通过开源 Qiskit-SuperstaQ 存储库与 IBM Qiskit 生态系统集成。用户还可以通过 Cirq-SuperstaQ 或者 superstaq.super.tech/api 上的 OpenAPI

与 SuperstaQ 进行交互。

5、aQuantum

2021 年 10 月，西班牙量子软件公司 aQuantum 宣布第一个面向高质量量子软件的量子开发和应用生命周期平台 QuantumPath®可以公开访问。该平台支持量子软件工程师从量子算法的创建、开发、测试和实施，再到部署和重复使用的整个生命周期。QuantumPath 是一个由工具、服务和流程组成的生态系统，它可简化量子算法和应用程序集成到混合信息系统的开发。它由 QPath®核心模块和 QPath®平台应用程序组成。

QPath 核心模块是 QuantumPath 平台的核心，可以在通用工具的辅助下管理跨硬件的量子算法和解决方案（基于门、量子退火）。QPath 平台应用程序支持软件工程和编程最佳实践的采用。目标是开发高质量的量子软件。为此，QPath 平台应用程序提供了一系列广泛的应用程序，这些应用程序将逐步发布，并与 QuantumPath 系统的核心模块集成。

6、Quantinuum

2021 年 10 月，Quantinuum（前剑桥量子）宣布发布世界上第一个量子自然语言处理（QNLP）工具包和库。该工具包被称为 lambeq（或 λ lambeq），以已故数学家和语言学家 Joachim Lambek 的名字命名。lambeq 是世界上第一个 QNLP 软件工具包，能够将句子转换成量子电路，受益者包括全球量子计算领域的量子计算研究人员、开发人员和用户生态系统。lambeq 采用模块化设计，因此用户可以在模型中交换组件，并在架构设计上具有灵活性。

支持用户基于量子计算机操作系统直接操控一体机及相关设备,以达到调试及优化量子芯片性能指标的目的;应用模式是指支持用户基于量子计算机操作系统运行编码完成的量子程序。

本源司南可支持多种量子计算系统,能够为用户接入具有多个量子处理器核心的量子计算机高性能工作站,包括超导量子处理器、半导体量子处理器、离子阱量子处理器,或是混合量子处理器。用户只需要通过口令,接入管理员部署的一台经典服务器即可使用全部功能。据悉,本源量子已经出口一套本源司南量子计算操作系统和量子云服务平台到一带一路国家,开启中国量子计算生态系统的国际化。

图 22 本源司南量子计算操作系统



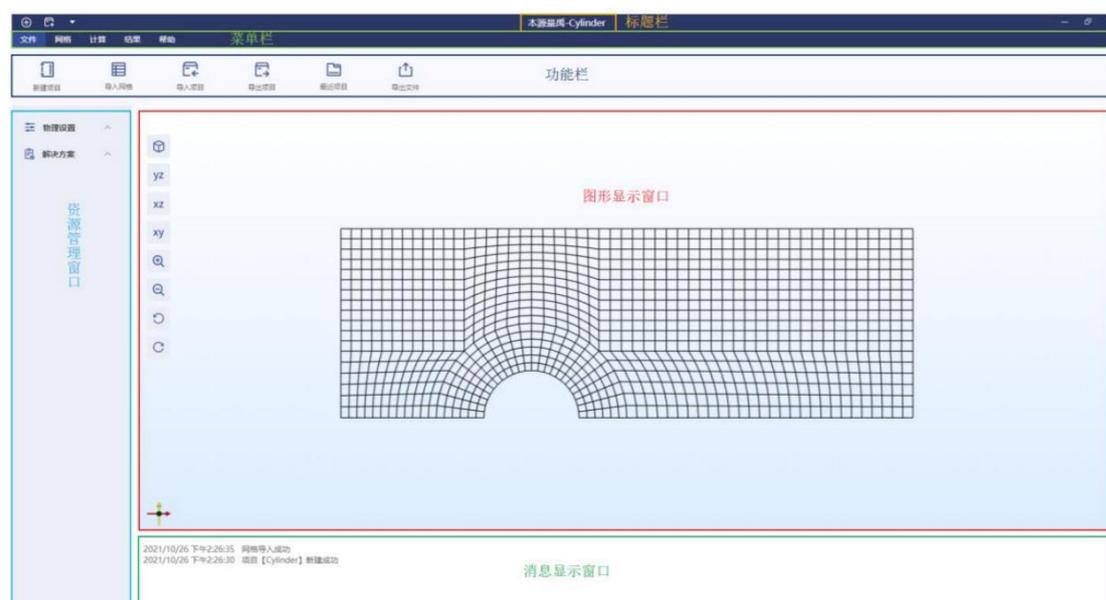
来源: 本源量子

此外,2021年2月,本源量子发布量子图像识别应用,开发研究量子卷积神经网络,有效提升了图像识别(二分类、多分类)的运行速度,并降低了资源消耗。2021年7月,本源量子推出量子化学应用ChemiQ正式版。ChemiQ适配量子虚拟机和量子计算机,能够可视化构建分子模型、快速模拟基态能量、扫描势能面、研究化学反应,最终以图形化形式展示量子计算结果。8月,本源量子

发布了量子人工智能应用 QGAN。该应用展示了量子计算机上的生成对抗网络在人像修复领域拥有相对于经典计算机的速度优势和空间优势,证明了基于超导量子比特技术的量子机器学习可行性。

2021 年 11 月,本源量子发布国内第一款量子计算流体力学仿真软件“本源量禹”(OriginQ QCFD),该软件基于量子有限体积法,原理上能实现对 CFD 仿真计算的亚线性加速。未来在航空航天、热能动力、环境工程等领域,该软件可以进行更高效的数值仿真实验。

图 23 本源量禹使用界面



来源: 本源量子

2、京东探索研究院

2021 年 8 月,京东探索研究院提出全球首个以经典云平台为依托、量子计算设备为终端的量子并行处理框架 QUDIO (quantum distributed optimization scheme),将可以实现充分调度现有量子计算资源去求解超越经典计算的大规模任务。

QUDIO 是由一个经典处理器为中心和多个分布式量子处理器形成的量子云

构成的，其中经典计算机作为一个中心节点服务器，将大规模数据进行高效划分并且快速分发到云端的多个量子计算机。每个量子计算机在获取到数据块之后独立处理，同时以一定频率与其他量子计算机进行通信，共享模型参数和处理结果，最后将计算结果返回到经典计算机进行汇总和后处理。整个计算过程完全实现在量子云上完成，经典计算机只负责数据的分发与通信。

QUDIO 是一种独立于具体量子硬件和协议的框架，具有很强的兼容性，易于扩展到各种光量子计算机、离子阱量子计算机和超导量子计算机，能最大程度地利用现有的量子资源；它利用并行计算和量子计算的加速性能，为自然语言处理、计算机视觉、量子化学、组合优化等领域的大规模问题求解和数据处理提供显著的运行时间优势。

3、百度量子计算研究所

2021 年 10 月，百度量子计算研究所发布全球首个云原生量子集成开发环境 YunIDE，提供全新量子编程体验。YunIDE 开箱即用，拥有完备的量子计算环境配置，集成常用经典科研工具和量子开发工具链，能够降低经典程序开发者的学习门槛，使得全量量子开发触手可及，真正践行“人人皆可量子”的愿景。与其他编程环境相比，YunIDE 具有响应速度快、资源消耗低、隔离租户运行、可定制化程度高等特点。YunIDE 镜像内置量易伏等组件，并提供量脉、量浆等发布包，方便开发者高效便捷地研发量子控制、量子机器学习技术。

4、弧光量子

2021 年 1 月，弧光量子发布国内首个量子程序设计与验证平台 isQ。该平台包括量子程序设计、编译、模拟、分析与验证等系列工具，已经上线的功能主要包括编译器、模拟器、模型检测工具、定理证明器四部分。其中的定理证明器是国际上首个量子程序定理证明器，对量子程序的正确性验证有十分重要的作用。

5、图灵量子

2021年12月，图灵量子自主研发的国内首款商用光量子计算模拟软件 FeynmanPAQS 宣布试商用，弥补了国内这一领域技术和产品的空白。

FeynmanPAQS 同时是专用光量子计算模拟软件和三维光子芯片设计的EDA软件，是着眼于未来实际芯片开发且方便易用的云计算模拟平台。作为量子计算模拟器，软件能够模拟并计算多种情况的光学演化过程。目前软件包括五大主要模块：

- ①单光子量子行走 (Quantum Walks) ；
- ②量子随机行走 (Quantum Stochastic Walks) ；
- ③多粒子量子行走 (Multi-Particle Quantum Walks) ；
- ④自由设计的二维量子行走 (Customized Quantum Walks) ；
- ⑤玻色采样 (Boson Sampling) 。

表 11 2021 年全球量子计算软件发展大事件

时间	国家/地区	机构/企业	重要进展
1月	中国	ARC LIGHT 弧光量子	发布量子程序设计与验证平台isQ
2月	中国	本源量子 ORIGIN QUANTUM	发布量子计算机操作系统——本源司南；发布量子图像识别应用；开发研究量子卷积神经网络
3月	美国	IBM	发布超导量子计算机开源电子设计自动化软件Qiskit Metal
6月	芬兰	IQM Aalto-yliopisto Aalto-universitetet Aalto University	发布用于自动化设计超导量子处理器的开源软件工具KQCircuits
7月	中国	本源量子 ORIGIN QUANTUM	推出量子化学应用ChemiQ正式版
8月	西班牙 加拿大	MULTIVERSE SINGULARITY	推出第一款产品:可以直接用于量子投资优化的Exce插件——Singularity
	美国	SUPER.TECH	推出跨硬件的量子软件平台SuperstaQ
10月	中国	JD.COM 京东	提出全球首个以经典云平台为依托、量子计算设备为终端的量子并行处理框架QUDIO
	西班牙	aquantum	第一个面向高质量量子软件的量子开发和 应用生命周期平台QuantumPath®可以公开 访问
	英国/美国	QUANTINUUM	发布世界上第一个量子自然语言处理 (QNLP) 工具包和库
11月	中国	Baidu 百度	发布全球首个云原生量子集成开发环境 YunIDE
	中国	本源量子 ORIGIN QUANTUM	发布第一款量子计算流体力学仿真软件 “本源量禹”(OriginQ QCFD)
12月	中国	TURINGO	自主研发的首款商用光量子计算模拟软件 FeynmanPAQS宣布试商用

iCV Tank

资料来源: ICV

三、算法进展

通过对目前行业客户参与量子软件与算法研发的进展情况，普遍认为金融、密码与制药有可能是最先受益的行业。

表 12 量子计算各技术路线成熟度评价体系

Application field	Technological progress in 2021	Current popularity	Time expectation	Potential value	Social influence	Comprehensive evaluation of commercialization prospects
Finance	●	●	●	●	●	↑
Security	●	●	●	●	●	↑
Pharmaceutical	●	●	●	●	●	↑
Logistics	●	●	●	●	●	→
Transportation	●	●	●	●	●	→
Basic science	●	●	●	●	●	→
Auto	●	●	●	●	●	→
New material	●	●	●	●	●	→
Aviation	●	●	●	●	●	↓
Climate	○	●	●	●	●	↓

Note:
The rating is based on a 5-point scale, with 1 being the worst and 5 being the best, with ○ representing 1 and ● representing 5

iCV Tank

注：评分采用 5 分制，1 为最差，5 为最优，○代表 1 分，●代表 5 分。

资料来源：ICV

（一）金融

2021 年 2 月，本源量子携手中国建设银行旗下建信金科量子金融应用实验室，以建信基金应用场景为依托，联合发布共同研发的业内首批量子金融应用算法，包括“量子期权定价算法”与“量子风险价值（VaR）计量算法”，相关参数明显优于国外同类产品。实现了国内量子金融算法 0 的突破。

“量子期权定价算法”应用量子振幅估计相关的算法实现双对数级别的量子加速，从而可以加速使用经典蒙特卡罗方法的期权定价，获得一个高置信度的价格估计。⁷¹与量子期权定价应用较为相似，VaR 值估计算法也应用了量子振幅估计相关算法实现对经典蒙特卡罗方法的双对数级别的量子加速，最后获得一个稳定的 VaR 值计算值。⁷²

2021 年 3 月，毕马威（KPMG）与丹麦技术大学的研究人员在 D-Wave 量子退火处理器上运行了一个包括 65 项资产的投资组合优化模型，并将结果与经典方法进行了比较。他们发现，量子退火机的性能比其他方法更好、更快，同时能够解决更大的问题。尽管研究还表明，D-Wave 的技术仍然存在一些问题，比如

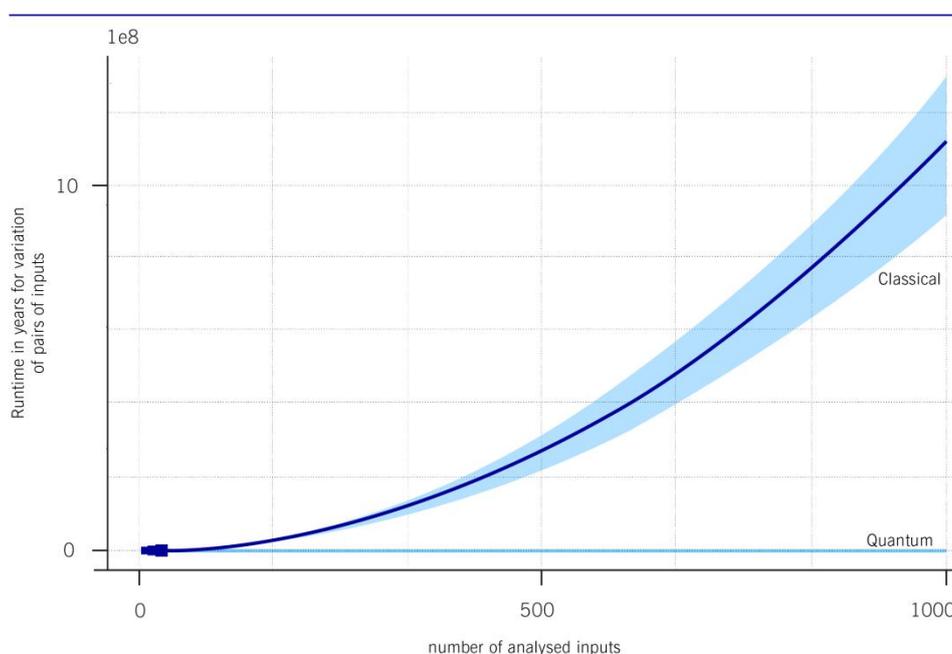
⁷¹ <https://qcloud.originqc.com.cn/main/priceIndex>

⁷² <https://qcloud.originqc.com.cn/main/quantumVaR>

不易编程和扩展。⁷³

2021 年 3 月，德意志交易所集团（DBAG）聘请法兰克福的金融科技公司 JoS QUANTUM 开发了一种量子算法，以解决计算交易所业务风险模型中存在的挑战。两家公司合著了一篇论文《商业风险敏感性分析的量子算法》，研究结果表明，对于所选的 1000 个输入，量子计算比经典计算快 20 万倍，在经典硬件上运行传统蒙特卡罗模拟需要大约 10 年，而量子蒙特卡罗模拟的计算时间还不到 30 分钟。⁷⁴经典计算机模拟和量子计算机模拟的比较结果如下：

图 24 商业风险敏感性分析的量子算法



Graph: Compute demand of an average real-life risk model leads to impractical runtimes on a classical computer beyond 10 years, which can be drastically reduced on a quantum computer down to minutes. Source: JoS QUANTUM

来源：德意志交易所集团

2021 年 5 月，为了加快量子算法在蒙特卡罗模拟中的应用，QCWare 开发了一种新的量子算法，通过牺牲一些提速（1000 倍变为 100 倍），实现浅层蒙特卡罗算法，预计能够在 5 到 10 年内可用的近期量子硬件上使用。⁷⁵提速 1000 倍的量子算法需要纠错量子硬件——预计将在 10 到 20 年内提供。

⁷³ <https://www.zdnet.com/article/are-quantum-computers-good-at-picking-stocks-this-project-tried-to-find-out/>

⁷⁴ <https://arxiv.org/pdf/2103.05475.pdf>

⁷⁵ <https://arxiv.org/abs/2012.03348>

2021年9月, IonQ 宣布在其量子计算机上演示了高盛和 QC Ware 最先进的量子算法, 有望加快蒙特卡罗模拟的速度。蒙特卡罗模拟是许多行业解决问题的关键, 包括金融、电信、机器人、气候科学和药物发现等。论文报告了在最先进的量子计算机上进行振幅估计实验的结果。量子振幅估计 (QAE) 使量子计算机能够实现一大类统计估计问题的平方加速, 包括蒙特卡罗方法。⁷⁶

2021年9月, IonQ 与富达应用技术中心 (FCAT) 联合发表论文, 展示了其量子计算机如何超越传统计算机, 生成用于测试金融模型的高质量数据。金融机构通常使用模型进行资产配置、电子交易和定价, 并需要测试数据来验证这些模型的准确性。IonQ 和 FCAT 采用了 Copula——一种在统计模型中常用来描述大量变量之间关系的方法。通过使用量子计算机来实现该技术, 证明了量子计算机构建复杂模型的能力远远大于经典计算机。⁷⁷

2021年11月, 加拿大量子计算 SaaS 初创公司 Agnostiq 宣布与光量子计算公司 Xanadu 合作, 在 Xanadu 的开源软件 PennyLane 上构建产品, 以使用先进的计算技术解决金融问题。⁷⁸

2021年12月, 本源量子发布量子金融投资组合优化应用。该研究成果基于量子优化算法 Grover 适应性搜索算法, 可快速从所有投资组合中找到给定风险偏好下的最佳收益组合, 进一步拓宽量子计算在金融领域的使用场景。⁷⁹

(二) 化学、生物学、医学

2021年1月, Quantinuum (前剑桥量子公司) 与全球 TOP3 制药巨头罗氏达成合作, 罗氏将使用剑桥量子的 EUMEN 量子化学平台, 模拟量子尺度的相互

⁷⁶ <https://arxiv.org/pdf/2109.09685.pdf>

⁷⁷ <https://arxiv.org/abs/2109.06315>

⁷⁸ <https://www.prnewswire.com/news-releases/agnostiq-selects-pennylane-to-develop-quantum-platform-for-finance-301420610.html>

⁷⁹ <https://mp.weixin.qq.com/s/JYD-LkGgA8zsroea53c7wg>

作用，研究治疗阿尔茨海默氏症和其他疾病的新疗法。⁸⁰

2021 年 3 月，美国初创公司 Entanglement 创建了一个疫苗分发平台，使用突破性的量子计算技术和先进的数据模型，帮助美国政府制定和实施有效且公平的疫苗接种分配计划。此前，Entanglement 公司和富士通公司合作为美国国防部开发了一个类似的平台，以优化个人防护装备在美国所有县公平分配。该平台的性能优于可比较的进化算法 90% 以上。⁸¹

2021 年 3 月，欧洲量子计算软件开发商 Qu&Co 发布 QUBEC 测试版，这是第一个专为化学和材料科学设计的量子计算平台。QUBEC 融合了最先进的专有和开源化学算法。混合量子经典算法允许小规模量子处理器进行实验，QUBEC 通过与 IBM Quantum Experience 和亚马逊 Braket 平台的集成提供对该处理器的访问。⁸²2021 年 5 月，美国杨森制药 (Janssen) 宣布与 Qu&Co 将开展一项为期三年的研究合作，开发和测试用于药物研发的新型量子算法和软件。杨森制药是国际上三家研发生产新冠疫苗的公司之一，目前疫苗已获准在美国使用。

2021 年 7 月，本源量子推出了量子化学应用 ChemiQ 正式版。ChemiQ 适配量子虚拟机和量子计算机，能够可视化构建分子模型、快速模拟基态能量、扫描势能面、研究化学反应，最终以图形化形式展示量子计算结果。10 月，该公司发布量子化学软件 ChemiQ 国际版，面向全球生物医药、化学工业以及新材料等行业用户提供量子计算化学的中国解决方案。此外，本源量子还发起成立了量子生物化学行业生态联盟。

2021 年 8 月，英国量子软件初创公司 Phasecraft 介绍了一种很有前途的量子系统模拟新策略。与之前表现最好的研究相比，他们的工作显示出了 5 个数量级的改进。新算法只需要 259 个逻辑时间步，甚至考虑了噪声和错误，而与之前的

⁸⁰ <https://thequantuminsider.com/2021/01/31/cqc-roche-partner-to-use-quantum-algorithms-to-tackle-drug-discovery-for-alzheimers-disease/>

⁸¹ <https://www.entanglement.ai/entanglement-takes-a-quantum-leap-towards-transparent-vaccine-distribution/>

⁸² <https://quandco.com/news/release-qubec-beta>

最好记录是 1,243,586。这让以前被认为需要完全可扩展的、容错的量子计算机才能进行的哈密顿量模拟，在 NISQ 时代更接近可行。⁸³

2021 年 9 月，新日铁和 Quantinuum（前剑桥量子公司）表示，他们以两种不同的配置模拟铁晶体的行为，使用的算法和噪声缓解技术可以在今天的 NISQ 量子计算机上运行。为了模拟铁晶体，研究人员使用了一个 IBM 量子处理器的七个量子比特。研究人员也指出，要实现对铁晶体能量状态的更精确模拟，需要一种比目前存在的更强大、更不容易出错的量子设备。⁸⁴

2021 年 11 月，谷歌量子人工智能实验室和初创公司 QSimulate 联合发布了费米量子仿真器 (FQE)，这是一个在费米子模拟中仿真量子计算机行为的软件框架。FQE 利用化学、材料和凝聚态物质系统中常见的对称性（包括数对称性和自旋对称性），在模拟费米子量子电路时获得了显著的性能增益。通过将模拟速度提高了几个数量级，FQE 将帮助量子科学家预测材料量子计算所需的硬件资源，并为这种模拟执行经典基准测试。⁸⁵

2021 年 12 月，俄勒冈健康与科学大学和英特尔公司发布的报告《生物学和医学量子优势前景》显示，如果实现广泛的量子优势，将大大有利于某些医学和生物学研究。⁸⁶报告总结了生物学和医学领域在短期或中期内可能实现量子优势的具体应用：

表 13 生物学和医学领域的预期量子优势

目标应用	实验演示	硬件设备	算法类型	经典复杂度	预期优势
蛋白质折叠与构象模拟	有	量子退火机	量子退火	多项式；启发式近似	未知，至多为多项式
分子对接模拟	没有	高斯玻色采样器	采样	超越多项式	未知，至多为超越多项式

⁸³ <https://www.nature.com/articles/s41467-021-25196-0>

⁸⁴ <https://arxiv.org/abs/2109.08401>

⁸⁵ <https://quantum-journal.org/papers/q-2021-10-27-568/>

⁸⁶ <https://arxiv.org/pdf/2112.00760.pdf>

新的基因组装配	有	量子退火机 基于门的通用量子设备	量子退火优化	多项式; 启发式近似	未知, 至多为多项式
序列比对	没有	基于门的通用量子设备	优化	多项式; 启发式近似	多项式
序列匹配	没有	基于门的通用量子设备	QML 搜索	多项式	至多为超越多项式
进化树推断	没有	基于门的通用量子设备	优化	超越多项式	多项式
生物网络推断	有	量子退火机	优化	多项式与超越多项式	多项式
转录因子结合分析	有	量子退火机	优化	多项式; 启发式近似	未知, 至多为多项式
神经网络	有	基于门的通用量子设备	QML	多项式和超越多项式 (例如, 玻尔兹曼机)	超越多项式

来源: 英特尔

(三) 人工智能

2021 年 2 月, 本源量子团队自主研发量子人工智能应用——量子图像识别应用, 提供二分类识别与多分类识别两种功能, 可识别手写数字 0 和 1 或多种常见动物。此前, 本源量子还曾发布量子手写数字识别应用, 并公开在其本源量子云平台上。

2021 年 3 月, Quantinuum (前剑桥量子公司) 展示了有史以来最大的量子自然语言处理任务。自然语言处理 (NLP) 是一项重要的人工智能技术, 主要应用于机器翻译、舆情监测、自动摘要、观点提取、文本分类、问题回答、文本语义对比、语音识别、文字识别等方面。实验在 IBM 量子计算机上将句子实例化为参数化量子电路, 将词义嵌入为量子态, 量子态根据句子的语法结构“纠缠”在一起。⁸⁷

2021 年 3 月, 维也纳大学、因斯布鲁克大学、奥地利科学院、莱顿大学和德国航空航天中心的研究人员首次成功地通过实验证明利用量子技术能够加快

⁸⁷ <https://arxiv.org/pdf/2102.12846.pdf>

机器人的学习时间。该团队将单光子耦合到集成光子量子处理器中。该处理器被用作机器人并用于执行学习任务。在这里，机器人将学习将单个光子路由到一个预定义的方向。在使用 10000 个 AI 代理并经过 165 项实验后，他们发现在挑战更复杂的问题时，混合量子系统显示出明显的优势。⁸⁸

2021 年 3 月，Quantum Computing Inc. (QCI) 推出了 QGraph 平台，它基于 QCI 即时运行量子软件 Qatalyst 分析图形问题（即顶点和边的集合）。在图形被提交给 Qatalyst API 后，QGraph 会自动将图形转换为基于特定请求函数的约束优化问题。然后问题被提交给 Qatalyst Core 进行量子转换和处理。最后，QGraph 转换并以与图形相关的格式将其呈现给请求的工作流、应用程序或中小企业。⁸⁹

2021 年 3 月，Quantinuum（前剑桥量子公司）最新研究表明，量子计算机可以学会推理。剑桥量子使用了两种最新的机器学习技术：对抗训练和核化 Stein 差异法。对抗训练方法一前一后优化了一个经典概率分类器和一个被称为玻恩机的概率量子模型。玻恩机是近似后验分布的表达。它输出表示未观测变量配置的位串。训练步骤优化分类器和玻恩机的参数，直到其输出与真实后验分布的样本紧密匹配。第二种方法是在不进行对抗训练的情况下，使玻恩机和真实后验之间的核化 Stein 差异最小化。⁹⁰

2021 年 5 月，在《自然·通讯》杂志上发表的“数据在量子机器学习中的力量”中，谷歌的研究人员剖析了机器学习中的量子优势问题，从而可以更好地了解它将在何时适用。在谷歌的工作中，他们开发了一套实用的工具来检验这些问题，并使用它们来开发一种新的投影量子核方法，该方法与现有方法相比具有许多优势。谷歌进行了迄今为止最大的数字演示（30 量子比特），展示了量子嵌入的潜在学习优势。⁹¹

⁸⁸ <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03242-7>

⁸⁹ <https://www.dbta.com/Editorial/News-Flashes/Quantum-Computing-Inc-Debuts-QGraph-Platform-145971.aspx>

⁹⁰ <https://arxiv.org/abs/2103.06720>

⁹¹ <https://ai.googleblog.com/2021/06/quantum-machine-learning-and-power-of.html>

2021 年 7 月，IBM 在一篇论文中提出了一种量子核 (kernel) 算法，在只允许数据经典访问的情况下，相比经典机器学习算法，它在一个分类问题上提供了可证明的指数加速。它的量子优势来自于：我们可以构建一个只有量子计算机才能识别内在标记模式的数据集，对于经典计算机来说，这些数据集看起来像随机噪声。但是量子核估计算法仍有局限性，为了获得优势，分类问题必须首先遵循一种循环结构。因此，仍然会有许多现实生活中的问题，这种量子算法的表现不会比传统的经典机器学习算法好。下一步，IBM 将讨论这种结构的可推广性。⁹²

2021 年 8 月，本源量子发布量子人工智能应用 QGAN。该应用展示了量子计算机上的生成对抗网络在人像修复领域拥有相对于经典计算机的速度优势和空间优势，证明了基于超导量子比特技术的量子机器学习可行性。

2021 年 11 月，英伟达宣布使用其自主开发的 cuQuantum 工具包创建了有史以来最大规模的量子算法模拟来解决最大割 (MaxCut) 问题。cuQuantum 能够使大型量子电路的模拟速度大大加快。结果表明，英伟达研究人员使用 896 个 GPU 模拟 1688 个量子比特，能够解出一个有 3375 个顶点的图，这比之前最大的量子模拟多了 8 倍的量子比特。他们的解也非常精确，达到了已知最佳解的 96%。⁹³

(四) 汽车

2021 年 2 月，德国启动了一个为期两年的名为“QuEST”的项目，德国航空航天中心 (DLR) 和弗劳恩霍夫材料力学研究所 (IWM) 正在使用量子计算机研究用于更强大电池和燃料电池的新材料。全球最大的汽车技术供应商博世集团和梅赛德斯-奔驰北美研发公司也作为合作伙伴参与了 QuEST。QuEST 旨在采用创新模拟技术的电化学能量储存与转换的量子计算机材料设计。量子计算机将被

⁹² <https://www.nature.com/articles/s41567-021-01287-z>

⁹³ <https://arxiv.org/abs/2106.13304>

用来模拟能量储存装置内的电化学反应。在模拟中，科学家们比较了各种新材料和电极结构的量子化学相互作用。他们的最终目标是实现电池中电子最高的化学结合能。在燃料电池中，氢和氧应该尽可能高效地相互反应。⁹⁴

2021年8月，来自悉尼大学和香港科技大学的研究人员通过“量子傅里叶变换估计行驶工况”，并且能够通过IBM-Q16 Melbourne量子模拟器上的15量子比特运行更快地达到傅里叶驱动的行駛工况建模结果。汽车行驶工况，又称车辆测试循环，是描述汽车行驶的速度-时间曲线，快速估计行驶工况频率对于与燃油效率、减排和提高安全性相关的控制应用非常重要。⁹⁵

2021年12月，宝马量子计算挑战赛公布4个获胜者：1) 自动驾驶功能的传感器定位：埃森哲团队解决了优化传感器定位以实现高度自动化驾驶功能的问题。2) 材料变形模拟：量子计算初创企业Qu&Co在数值模拟领域求解偏微分方程的方法中脱颖而出。3) 生产前车辆配置的优化：来自1QBit和NTT的获胜团队用混合算法解决了优化设备配置的命题逻辑中的可满足性问题。4) 自动质量分析：QC Ware团队以其源自机器学习领域的方法脱颖而出，该方法可用于质量分析领域的图像识别。⁹⁶

（五）航空

2021年11月，本源量子发布国内第一款量子计算流体力学仿真软件“本源量禹”（OriginQ QCFD），该软件基于量子有限体积法，原理上能实现对CFD仿真计算的亚线性加速。本源量子称，未来在航空航天、热能动力、环境工程等领域，该软件可以进行更高效的数值仿真实验。

（六）能源

⁹⁴ https://www.dlr.de/content/en/articles/news/2021/01/20210219_quest-quantum-computer-energy-storage.html

⁹⁵ https://assets.researchsquare.com/files/rs-772223/v1_covered.pdf?c=1628091229

⁹⁶ <http://www.automobilspport.com/bmw-group-quantum-computing-challenge-winners-decided---232171.html>

2021 年 1 月，Quantinuum（前剑桥量子公司）宣布了他们与欧洲独立能源公司 Aker BP 公司的合作。双方合作着重于前沿量子机器学习(QML)算法的设计和演示，以解决多相流分类问题。该团队的解决方案由一个瞬时量子多项式时间电路组成，该电路被训练成一个三类分类器，使用剑桥量子的量子软件开发平台 (tket) 在 IBM 量子处理器上实现。通过对 Aker BP 数据的测试，QML 分类器只需要少量的量子比特就可以与具有非线性核的经典支持向量机 (SVM) 的性能相匹配。⁹⁷

（七）供应链/交通优化

2021 年 6 月，全球第三大钢铁生产商新日铁委托 Quantinuum（前剑桥量子公司）开发了一种算法，可以优化钢铁制造过程中使用的中间产品的调度，并在霍尼韦尔的量子计算系统上运行。⁹⁸但是并未公开具体结果。

2021 年 6 月，日本住友公司、东北大学和美国 OneSky 系统公司启动了一项试点计划——量子转型 (QX)，从 2021 年 6 月持续到 2021 年 12 月，通过量子计算为城市空中交通 (UAM) 开发数千条飞行路线。研究人员进行了使用量子计算开发实时三维交通控制系统的演示，以此来应对数十万架空中机动车辆将在空中飞行的时代，并将可同时飞行的车辆数量提高了约 70%。他们还证明在某些问题上，量子计算的速度大约是传统计算机的 10 倍。

2021 年 11 月，Quantinuum（前剑桥量子公司）与德国联邦铁路公司子公司 DB Netz 宣布合作探索量子计算机如何改善铁路交通线路的重新调度。DB Netz 将剑桥量子最新的组合优化算法过滤变分量子本征求解器 (F-VQE) 与其自身的运筹学专业知识相结合，以在模拟延迟后重新优化现实列车时刻表。

⁹⁷ <https://www.hpcwire.com/off-the-wire/aker-bp-and-cambridge-quantum-computing-to-develop-quantum-machine-learning-for-energy/>

⁹⁸ <https://www.honeywell.com/us/en/news/2021/06/how-quantum-computing-can-help-nippon-steel-improve-scheduling-at-plants>

2021年11月，澳大利亚新南威尔士州交通局（TfNSW）宣布，计划从2021年初开始启动一系列量子计算试点项目，帮助优化公共交通网络。TfNSW局长Rob Stokes表示，“量子技术有潜力通过即时重新计算时间表和路线来实时解决交通网络问题，从而成为一个‘自愈’网络（Self-healing network）。通过量子技术为旅客提供个性化的实时信息，使他们的旅程更快、更安全、更可靠。”⁹⁹

（八）天气预报

2021年12月，Rigetti Computing宣布已经开发出一种使用量子计算机解决天气建模问题的有效方案。在现有机器学习工作流程的基础上，该公司将经典和量子机器学习技术相结合生成高质量的合成天气雷达数据，并将其用于改进风暴预测的经典模型。这项工作是在Rigetti的32量子比特系统上进行的，这证明了近期量子硬件的实际应用是可以实现的。¹⁰⁰

（九）密码

量子计算机的出现增加了破解传统加密方法的可能性。早在2019年，谷歌团队宣布，量子计算机将在8小时内破解2048位RSA加密，但需要2000万个量子比特。这样规模的量子计算机显然是一个遥不可及的梦想。在2021年9月发表的一篇新论文中，法国新能源与原子能委员会的研究人员证明，通过将量子存储器集成到量子计算机中，13436个量子比特就能破解RSA-2048，这比之前研究中所需的量子比特数减少了3个数量级。¹⁰¹11月，本源量子发布破解RSA算法与破解ECC算法应用，减少了运行算法所需的量子比特数量，相关指标达到国际先进水平。同时，该官方平台上线了全球首款Shor量子算法破解密码的演示应用。

⁹⁹ <https://www.itnews.com.au/news/tfnsw-ramps-up-quantum-computing-ambitions-with-new-pilot-program-5723>

¹⁰⁰ <https://aithority.com/machine-learning/rigetti-enhances-predictive-weather-modeling-with-quantum-machine-learning/>

¹⁰¹ <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.127.140503>

另一方面，量子计算机也可以为安全领域提供解决方案，因为量子比特的值在测量之前是不确定的，可以产生真随机数。2021 年 9 月，亚马逊利用 Braket 量子计算服务平台上的 Rigetti 和 IonQ 量子处理器创建了真随机数。12 月，剑桥量子公司利用霍尼韦尔 System H1 量子计算机也创建了随机数，并推出了世界上第一个量子计算驱动的加密密钥生成平台。¹⁰²

（十）基础科学

理查德·费曼最早提出了使用量子计算机模拟量子物质的设想，现在，这一设想得以实现——使用量子计算机制造时间晶体（time crystal）。2012 年，时间晶体这一概念首次被提出。正如晶体的结构在空间中重复，时间晶体也在时间中重复，在没有任何能量输入的情况下无限重复，就像是一台“永动机”。

2021 年，科学家首次使用量子计算机制造了时间晶体。11 月，斯坦福大学、谷歌量子 AI 实验室、德国马克斯-普朗克研究所和牛津大学的研究人员使用谷歌的“悬铃木”量子计算机成功制造了时间晶体。¹⁰³而在此之前，加州大学伯克利分校的 Norman Yao 和荷兰 QuTech 的研究人员使用基于金刚石的量子计算机也成功制造了时间晶体，持续了大约 8 秒，寿命比谷歌的实验长了 10 倍。¹⁰⁴

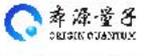
¹⁰² <https://cambridgequantum.com/quantum-origin-press-release/>

¹⁰³ <https://www.nature.com/articles/s41586-021-04257-w>

¹⁰⁴ <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abk0603>

表 14 2021 年全球量子计算应用算法发展大事件

时间	国家/地区	机构/企业	重要进展
2月	中国	 	发布首批量子金融应用算法, 包括“量子期权定价算法”与“量子风险价值 (VaR) 计量算法”
3月	荷兰 丹麦	 	在D-Wave量子退火处理器上运行65项资产的投资组合优化模型
	德国	 	开发解决计算交易所业务风险模型的量子算法
	美国		创建疫苗分发平台
	荷兰		发布专为化学和材料科学设计的量子计算平台QUBEC测试版
	英国	 QUANTINUUM	展示有史以来最大的量子自然语言处理任务
	奥地利 荷兰 德国	   	通过实验证明利用量子技术能够加快机器人的学习时间
	美国		推出量子机器学习图形分析软件QGraph
5月	美国		开发新的量子算法, 通过牺牲提速实现浅层蒙特卡罗算法
6月	英国	 QUANTINUUM	开发可优化钢铁制造过程中使用的中间产品的调度的算法
7月	中国		推出量子化学应用ChemiQ正式版
8月	英国	 PHASECRAFT	介绍了一种量子系统模拟新策略
	中国		发布量子人工智能应用QGAN
	澳大利亚 中国香港	 	通过“量子傅里叶变换估计行驶工况”, 可在IBM-Q16 Melbourne量子模拟器上的15量子比特运行更快地达到傅里叶驱动的行駛工况建模结果

9月	美国		在其量子计算机上演示了Goldman Sachs和QC Ware最先进的量子算法
	美国	 富达应用技术中心	展示其量子计算机如何超越传统计算机，生成用于测试金融模型的高质量数据
	美国		使用量子计算机创建真随机数
11月	加拿大	 	在Xanadu的开源软件PennyLane上构建金融产品
	美国	 	发布费米量子仿真器 (FQE)
	美国		使用其自主开发的cuQuantum工具包创建最大规模的量子算法模拟来解决最大割 (MaxCut) 问题
	中国		发布第一款量子计算流体力学仿真软件“本源量禹” (OriginQ QCFD)
	美国 德国 英国	   	使用谷歌量子处理器成功制造时间晶体
12月	美国		开发出一种使用量子计算机解决天气建模问题的有效方案
	英国		推出世界上第一个量子计算驱动的加密密钥生成平台

iCV Tank

资料来源：ICV



第五章

量子公司——王者与新贵

总

体来说，全球量子活动正在迅速升温。量子计算已是

国内外科技企业的重要研究方向，已从企业边缘转移

从目前的态势来看，市场上的公司主要趋向于以局部发力的形式来推进量子计算，以更灵活的方式去访问现有不同类型的量子计算机硬件后端。谷歌、微软、亚马逊和 IBM 都有雄心勃勃的量子路线图，也都在各自的云平台上推出了量子计算服务。

采用量子技术的企业正在多方面做准备，比如寻找建立内部团队、试验和构建概念证明、在量子硬件或模拟器上运行实验、构建新应用程序。大型科技公司正在无数垂直领域展开扩张和竞争，用量子技术捍卫关键业务线。初创公司大多已经与大型科技公司合作，提供对多种量子计算机的远程访问。

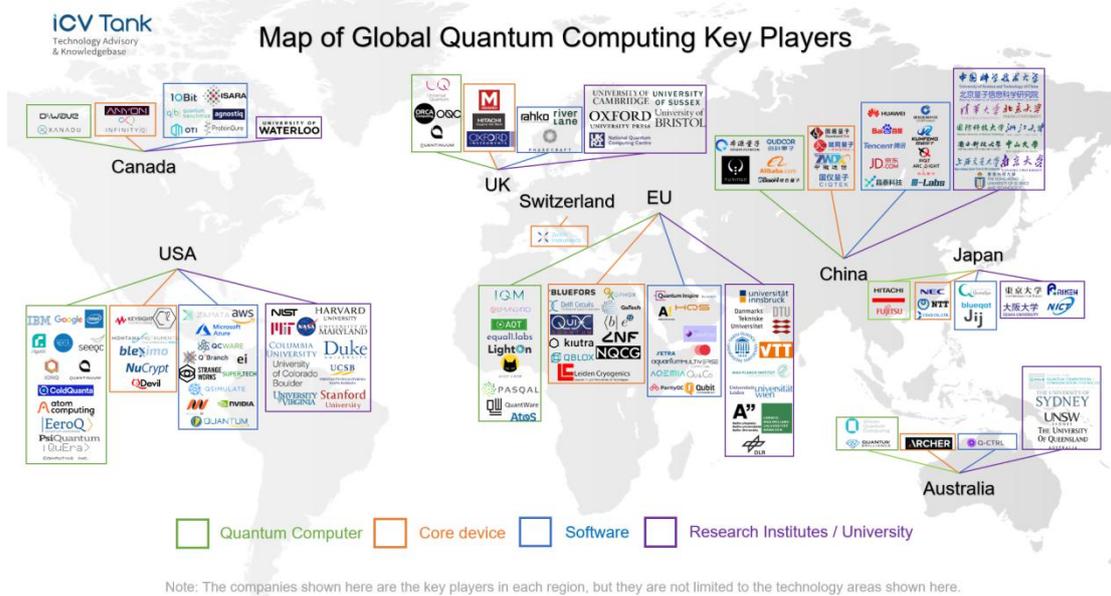
毫无疑问，量子计算正在成为企业技术库中的新型竞争武器。

量子计算的主要参与者可分为四大类：第一类是国际科技巨头，例如 IBM、谷歌、霍尼韦尔等；第二类是量子计算初创公司，例如 Rigetti、IonQ 等；第三类是国家科研院所，例如美国费米国家实验室（Fermilab）、美国阿贡国家实验室（Argonne National Laboratory）、中科院量子信息与量子科技创新研究院；第四类是高水平研究型大学，例如剑桥大学、中国科学技术大学、哈佛大学等。

现在的量子计算机仅能处理某一个或某几个方面的问题，尚未达到通用的程度。量子科技企业不仅需要斥巨资研制量子计算机，还需要拥有诸多研究人员设计制造量子硬件和软件来支持这些机器。

未来，通用量子计算机需要在底层量子物理设备、量子计算机架构、量子资源调度、上层量子程序设计语言、量子算法及量子应用软件等多方面进行努力。以下是量子计算行业典型代表有关量子计算的最新技术和商业进展。

图 252021 年全球量子计算主要参与者地理分布



Note: The companies shown here are the key players in each region, but they are not limited to the technology areas shown here.

资料来源：ICV

一、国外

1、IBM

2021年3月，IBM发布了超导量子计算机开源电子设计自动化软件 Qiskit Metal，这是第一个专门针对量子计算机的电子设计自动化（EDA）工具。

3月，IBM与克利夫兰诊所（Cleveland Clinic）达成一项为期10年的合作计划，将共同建设“探索加速器”（Discovery Accelerator），其目标是使用混合高性能云计算、人工智能和量子计算技术，加快医疗保健和生命科学领域的发现速度。

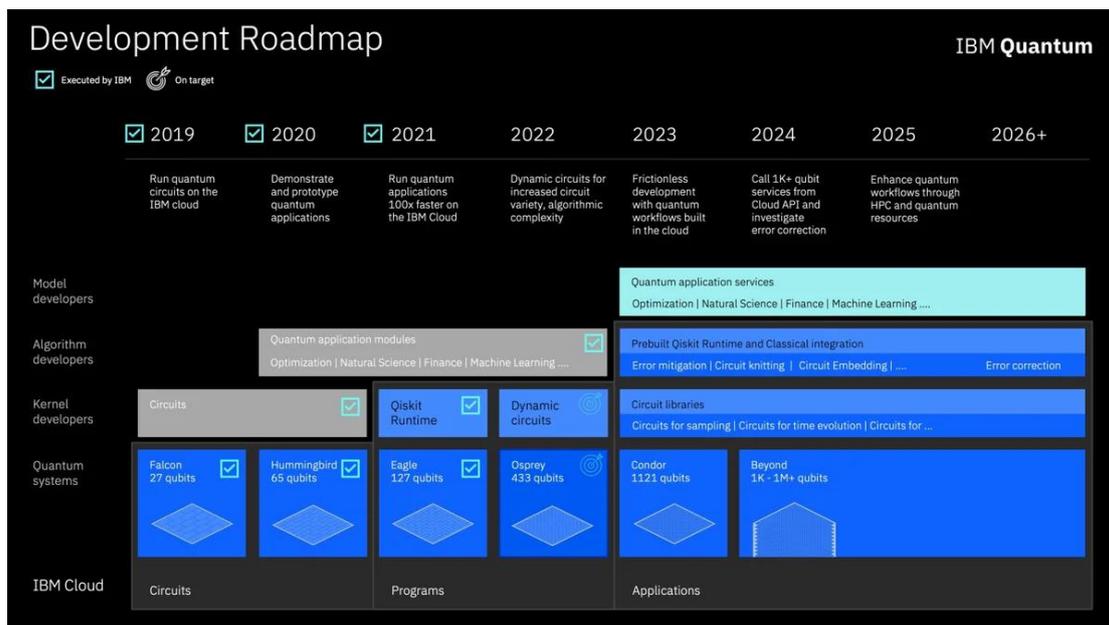
6月，IBM宣布，将在伊利诺伊大学香槟分校建立一个价值2亿美元的发现加速器研究所（Discovery Accelerator Institute）；同月，英国政府和IBM宣布了一项为期5年、价值2.1亿英镑的人工智能和量子计算合作计划。

9月，IBM宣布将与德国意昂集团（E.ON）开展合作，共同探索量子计算在优化世界范围内极其分散的能源基础设施方面的潜力，通过量子计算推动能源行业的转型。

11月，IBM提出了行业内第一个衡量量子计算速度的指标——每秒电路层操作数（CLOPS）。同月，IBM宣布推出127量子比特处理器——Eagle。

未来，IBM计划在2022年和2023年分别推出一款433量子比特的 Osprey 芯片和1121量子比特的 Condor 芯片。

图 26 IBM 量子计算硬件路线图



来源：IBM

2、谷歌

2021 年 1 月，勃林格殷格翰与谷歌达成一项合作协议，双方将专注于研究与实现药物研发领域量子计算的前沿应用案例，特别是在分子动力学模拟领域。

2021 年 5 月，谷歌在 I/O 开发者大会上宣布，计划在 2029 年前打造出一台商用量子计算机，该计算机可以进行大规模计算而不出错，旨在加速解决世界上最紧迫的一些问题，包括可持续能源发展、开发更实用的人工智能等。

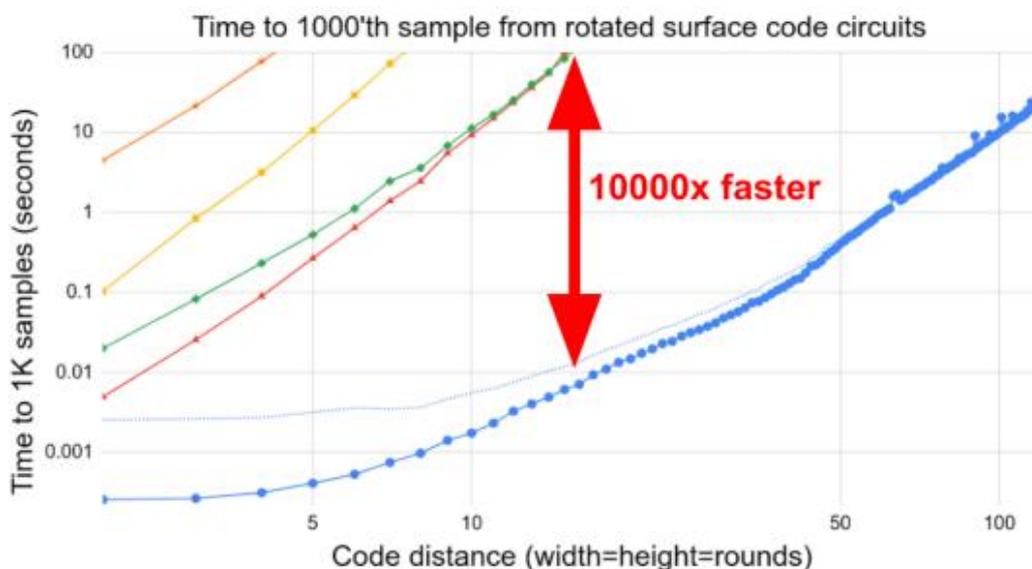
2021 年 7 月，谷歌量子人工智能（Google AI Quantum）团队基于谷歌量子处理器“悬铃木”（Sycamore）实现了量子计算错误抑制的指数级增长。研究数据表明，研究人员将重复码基于的量子比特数量从 5 个提高到 21 个，对逻辑错误

的抑制实现了最多 100 倍的指数级增长，这种错误抑制能力在 50 次纠错实验中均表现稳定。¹⁰⁵谷歌表示，制造 1 个逻辑量子比特需要 1000 个物理量子比特。

2021 年 7 月，谷歌量子人工智能实验室和麻省理工学院 (MIT) 提出了一种量子算法，在 NTK (神经正切核 Neural Tangent Kernel) 近似下训练广度和深度的神经网络，随着训练集的增大，估计训练神经网络的输出误差为零。实现端到端指数加速的能力。

2021 年 7 月，谷歌推出一款快速稳定器电路模拟器——Stim。在没有预知的情况下，Stim 可以在 15 秒内分析距离为 100 的表面码 (surface code) 电路 (2 万个量子比特、800 万个门、100 万次测量)，然后以 1 kHz 的速率开始对整个电路进行采样。¹⁰⁶

图 27 在稳定器电路的批量采样方面，Stim 明显快于以前的工具



来源：谷歌

2021 年 11 月，谷歌宣布 qsim 将与英伟达 cuQuantum SDK 整合，将使 qsim 用户在开发量子算法和应用程序时能够充分利用 GPU。要将 cuQuantum SDK 与

¹⁰⁵ <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03588-y>

¹⁰⁶ <https://quantum-journal.org/papers/q-2021-07-06-497/>

qsim 结合使用，用户可以按照通常的工作流在虚拟机上模拟量子电路，在模拟命令中启用 cuQuantum。¹⁰⁷

2021 年 11 月，谷歌量子人工智能实验室和初创公司 QSimulate 联合发布了费米量子仿真器 (FQE)，这是一个在费米子模拟中仿真量子计算机行为的软件框架。通过将模拟速度提高几个数量级，FQE 将帮助量子科学家预测材料量子计算所需的硬件资源，并为这种模拟执行经典基准测试。¹⁰⁸

2021 年 11 月，斯坦福大学、谷歌量子 AI 实验室、马克斯-普朗克研究所和牛津大学的研究人员使用谷歌的“悬铃木”量子计算机成功制造了时间晶体。¹⁰⁹

2021 年 12 月，谷歌与加州理工学院的一项合作表明，在某些条件下，量子机器可以从比传统上要求的实验数量少得多的实验中了解物理系统。这一新方法通过使用 40 个量子比特和 1300 个量子操作进行实验验证，证明了即使使用我们今天的嘈杂量子处理器，也具有巨大的量子优势。¹¹⁰

3、Quantinuum（霍尼韦尔&剑桥量子）

2021 年 6 月，霍尼韦尔和剑桥量子计算共同宣布，剥离霍尼韦尔量子解决方案 (HQS) 部门，将其与剑桥量子公司 (CQ) 合并。2021 年 11 月，HQS 和 CQ 完成合并，成立了新公司 Quantinuum。目前 Quantinuum 已经处在量子计算的全球领先地位。

2021 年 3 月、7 月和 12 月，霍尼韦尔 System Model H1 分别通过 512、1024 和 2048 量子体积的基准测试，继续保持量子体积的世界记录。此前，霍尼韦尔

¹⁰⁷ <https://opensource.googleblog.com/2021/11/qsim%20integrates%20with%20NVIDIA%20cuQuantum%20SDK%20to%20accelerate%20quantum%20circuit%20simulations%20on%20NVIDIA%20GPUs.html>

¹⁰⁸ <https://quantum-journal.org/papers/q-2021-10-27-568/>

¹⁰⁹ <https://www.nature.com/articles/s41586-021-04257-w>

¹¹⁰ <https://scirate.com/arxiv/2112.00778>

承诺每年将其量子体积增加一个数量级（10 倍）。2021 年 12 月，霍尼韦尔首次在业界实现量子计算机的实时检测和纠正错误。研究人员创建单个逻辑量子比特并应用多轮量子纠错。这个逻辑量子比特可以防止量子计算机中发生的两种主要类型的错误：比特翻转和相位翻转。

剑桥量子方面，2021 年 2 月，中美冠科生物技术股份有限公司、JSR 生命科学公司和剑桥量子公司宣布了一项合作协议，以探索应用量子技术来推动多基因识别用于肿瘤药物发现的生物标志物发现。5 月，剑桥量子公司提出了一种新算法，可以加速量子蒙特卡罗模拟，从而缩短获得量子优势的时间，并证实量子计算对金融业的重要性。9 月，新日铁和剑桥量子公司表示，他们以两种不同的配置模拟铁晶体的行为，使用的算法和噪声缓解技术可以在 NISQ 量子计算机上运行。¹¹¹10 月，剑桥量子公司发布世界上第一个用于量子自然语言处理 (QNLP) 的工具包和库——lambeq，是世界上第一个能够将句子转换为量子电路的 QNLP 软件工具包。2021 年 11 月，剑桥量子与 Deutsche Bahn Netz AG（德国铁路公司）利用最新的量子算法优化列车调度。12 月，剑桥量子公司利用霍尼韦尔 System H1 量子计算机也创建了随机数，并推出世界上第一个量子计算驱动的加密密钥生成平台。¹¹²

4、微软

1997 年，微软的物理学家 Alexei Kitaev 提出了一个构建马约拉纳费米子并最终实现拓扑量子计算的理论。2005 年，微软建立 StationQ，负责研究拓扑量子计算。

¹¹¹ <https://arxiv.org/abs/2109.08401>

¹¹² <https://cambridgequantum.com/quantum-origin-press-release/>

2018年3月，微软支持的荷兰物理学家 Leo Kouwenhoven 在《自然》杂志发表了一篇论文，通过实验证明他观察到了马约拉纳费米子——拓扑量子计算的基础。但在2021年1月，原始论文以“技术错误”为由被撤回。¹¹³这被认为是微软量子计算硬件团队迄今为止遭遇的最大挫折。

虽然硬件方面遭遇瓶颈，但是2021年微软在量子生态建设方面取得了突出成果。2月，微软面向量子解决方案的全栈公共云生态系统 Azure Quantum 已经从有限预览版升级为公开预览版。¹¹⁴9月，IBM、微软和 AWS 成立了量子语言技术指导委员会。12月，霍尼韦尔、微软、橡树岭国家实验室、量子电路公司和 Rigetti Computing 加入 Linux 基金会成立的量子中间表示（QIR）联盟，旨在减少量子生态系统各个成员的开发工作。

生态建设方面，微软相继与金融科技公司 Ally、国际四大会计师事务所之一毕马威和 Rigetti 达成合作。Rigetti 量子计算机将接入 Azure Quantum 平台，双方将在2022年第一季度完成整合并向用户开放。目前，Azure Quantum 已经接入 IonQ、霍尼韦尔（现为 Quantinuum）和量子电路公司（QCI）的量子计算机。¹¹⁵

微软在量子控制技术方面也取得了突破。2021年11月，悉尼大学和微软的科学家和工程师发明了一种工作温度比深空温度低40倍的单芯片，“只需两根传输信息的线缆作为输入，即可产生数千个量子比特的控制信号。”¹¹⁶

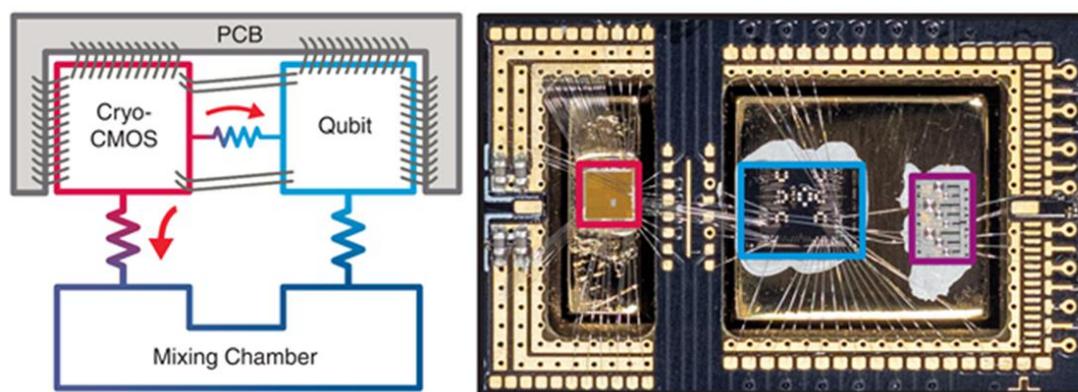
¹¹³ <https://arxiv.org/abs/2101.11456>

¹¹⁴ <https://azure.microsoft.com/en-us/services/quantum/>

¹¹⁵ <https://cloudblogs.microsoft.com/quantum/2021/12/06/azure-quantum-open-flexible-and-future-proofed/>

¹¹⁶ <https://cloudblogs.microsoft.com/quantum/>

图 28 微软低温控制芯片 Gooseberry



来源：微软

5、亚马逊

2020年8月，AWS宣布了亚马逊 Braket 的全面上市，作为完全托管的 AWS 服务，Braket 可提供开发环境来帮助客户探索和设计量子算法。亚马逊 Braket 目前客户包括富达投资集团、大众汽车、Enel、安进、Rahko、Qu & Co 等。

2021年，亚马逊开始重点攻关量子计算硬件。4月，亚马逊首度公开其容错量子计算机架构——使用猫量子比特更有效地编码信息。基于超导电路的猫量子比特已经被几个研究团队证明，它们的高偏差错误率可以在设计额外的 QEC 时加以利用。10月，专注于超导量子比特的 AWS 量子计算中心正式落成，“这个中心有推动量子计算研发所需的一切，从制造、测试和操作量子处理器，到创新控制量子计算机的流程，以及扩展支持更大量子设备所需的技术，例如低温冷却系统和布线。”11月，在 Invent 2021 大会上，AWS 宣布推出亚马逊 Braket 混合作业功能，旨在帮助用户设置、监控和高效运行混合量子-经典算法。AWS 宣布在未来几个月内，QuEra 和牛津量子电路公司 (OQC) 都将作为新的硬件提供商加入 Braket 服务。

6、英特尔

英特尔致力于开发超导和半导体量子计算机,并在低温控制技术方面取得了突破。2019 年,英特尔实验室发布了首款低温控制芯片 Horse Ridge,可在大约 4 开氏度的低温下工作。第二代低温控制芯片 Horse Ridge II 进一步简化了量子电路控制,预计将带来更高的保真度和更低的功率输出。¹¹⁷

2021 年 5 月,英特尔和 QueTech 的研究表明,Horse Ridge 可以在控制多个硅量子比特的同时,实现与室温电子器件相同的高保真结果。¹¹⁸12 月,英特尔宣布将采取包括发展量子计算在内的三大措施延长摩尔定律。英特尔在 IEDM 2021 大会上展示了完整的 300mm 量子比特工艺流程,用于实现与 CMOS 制造兼容的可扩展量子计算,并确定了未来的下一步研究计划。¹¹⁹

7、Rigetti Computing

Rigetti 是一家美国的量子计算初创公司,创立于 2013 年,创始人 Chad Rigetti 是一位物理学家,曾在 IBM 从事量子计算机工作。

Rigetti 于 2021 年 6 月推出了全球首款多芯片量子处理器。该处理器采用了专有的模块化架构,可加速商业化进程,并解决容错量子计算机的关键扩展挑战。

2021 年 7 月,Rigetti 宣布将与 Riverlane 和 Astex Pharmaceuticals 合作使用 Rigetti 量子云服务(QCS)开发一个集成应用程序,用于模拟分子系统,这可以改变药物研发中的药物发现。

¹¹⁷ <https://www.intc.com/news-events/press-releases/detail/1429/intel-debuts-2nd-gen-horse-ridge-cryogenic-quantum-control>

¹¹⁸ <https://www.intc.com/news-events/press-releases/detail/1466/intel-and-qutech-demonstrate-advances-in-solving-quantum>

¹¹⁹ <https://www.businesswire.com/news/home/20211211005006/en/>

2021年10月，Rigetti 宣布计划通过与 Supernova II（一家公开交易的特殊目的收购公司）达成最终合并协议。Rigetti 将获得超过5亿美元融资，合并后的公司的估值可能为15亿美元。

2021年11月，Rigetti Computing 被选中领导美国能源部授予的聚变量子模拟项目。该项目将在 Rigetti 的基于云的量子计算机上模拟等离子体动力学。

2021年12月，Rigetti Computing 宣布开发了一种使用量子计算机解决天气建模问题的有效方案。Rigetti Computing 推出了下一代“Aspen-M”¹²⁰80 量子比特的量子计算机的私人测试版。Aspen-M 利用 Rigetti 专有的多芯片技术，由两个40量子比特芯片组装而成。

8、IonQ

马里兰大学的 Chris Monroe 和杜克大学的 Jungsang Kim 在2016年创办了 IonQ。目前，IonQ 是唯一一家同时通过亚马逊 Braket、微软 Azure Quantum 和谷歌云提供其量子系统的公司。

2021年8月，IonQ 提出了业界首个可重构多核量子架构（RMQA），有望将每个芯片的量子比特数量扩展到数百个，不会随着量子比特数量的增加而降低量子比特的稳定性和性能。9月，IonQ 宣布与马里兰大学共建美国首个国家量子实验室（简称 Q-Lab）。9月，IonQ 宣布在其量子计算机上演示了高盛和 QC Ware 最先进的量子算法，有望加快蒙特卡罗模拟的速度。10月，马里兰大学和 IonQ 在量子纠错方面取得了重大突破，研究人员使用多个保真度较低的物理量子比特

¹²⁰ Aspen-M 是世界上第一个商用多芯片量子处理器，解决了容错量子计算竞赛中的关键扩展挑战

创建了一个保真度更高的逻辑量子比特。10月，IonQ完成合并上市，此次合并为IonQ带来了6.5亿美元的总收益。

12月，IonQ宣布，计划在其系统中使用铯离子作为量子比特，从而为实现高级量子计算架构带来了优势。至此，IonQ成为第一家能够利用多个原子类型作为量子比特的量子计算公司。IonQ预计基于铯量子比特的量子计算机的主要优势包括：更低的错误率、更高的门保真度和更好的状态探测；可迭代、更可靠硬件的基础，为客户提供更多的正常运行时间；更容易联网的量子系统。

9、Xanadu

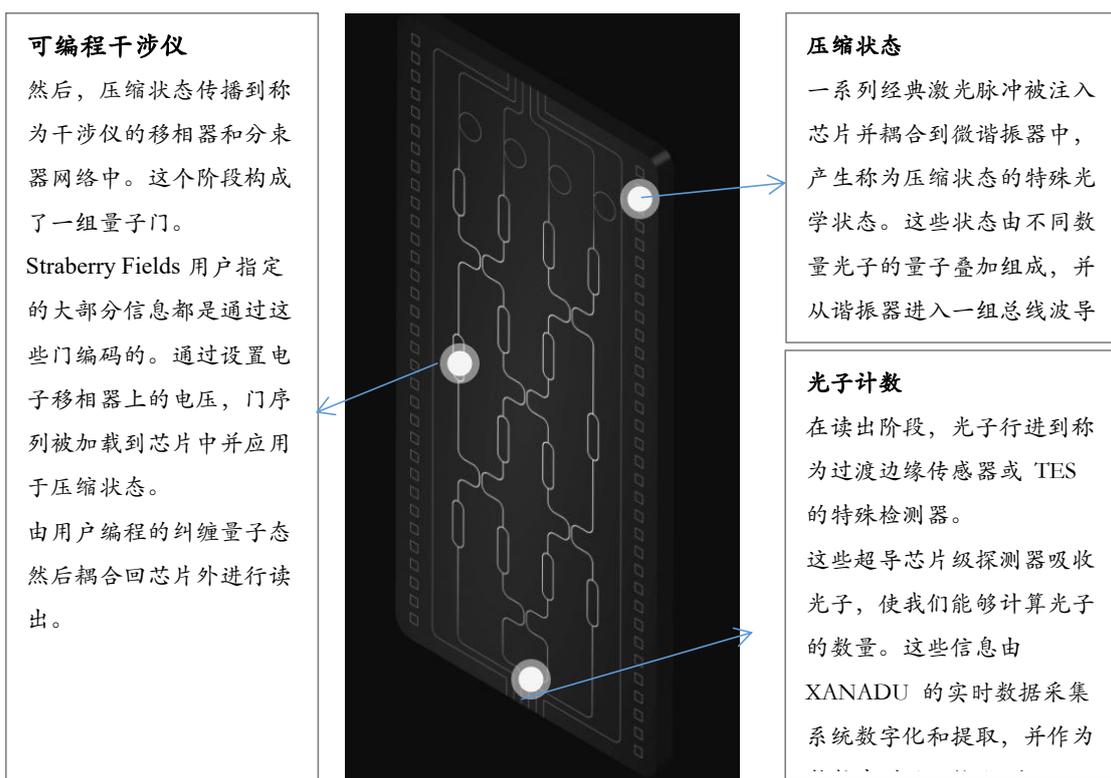
Xanadu于2016年成立，是一家加拿大量子计算硬件和软件公司，总部位于安大略省多伦多。该公司开发了世界上第一台可访问云的光量子计算机，并开发用于量子机器学习和模拟量子光子设备的开源软件。其使命是构建对世界各地的人们有用且可用的量子计算机。

2021年5月，Xanadu完成1亿美元B轮融资，后者是美国硅谷历史最悠久的风险投资公司之一。截至目前，这家成立5年的公司的融资总额已达1.45亿美元。这笔融资主要用于将其量子计算机从现在的40量子比特芯片发展到2026年的100万量子比特，并将其联网成一个计算系统。¹²¹8月，Xanadu和IMEC宣布合作开发下一代基于超低损耗氮化硅波导的光子量子比特。11月，Xanadu宣布与加拿大量子计算公司Agnostiq合作，在Xanadu的开源软件PennyLane上构建产品，以使用先进的计算技术解决金融问题。

目前，Xanadu的主要产品有：可编程光量子芯片、量子机器学习库PennyLane、Xanadu量子云、Strawberry Fields量子计算开发平台。

¹²¹ <https://www.wsj.com/articles/xanadu-lands-100-million-as-investments-pour-into-quantum-computing-11621944002>

图 29 Xanadu 可编程光量子芯片



来源：Xanadu

10、PsiQuantum

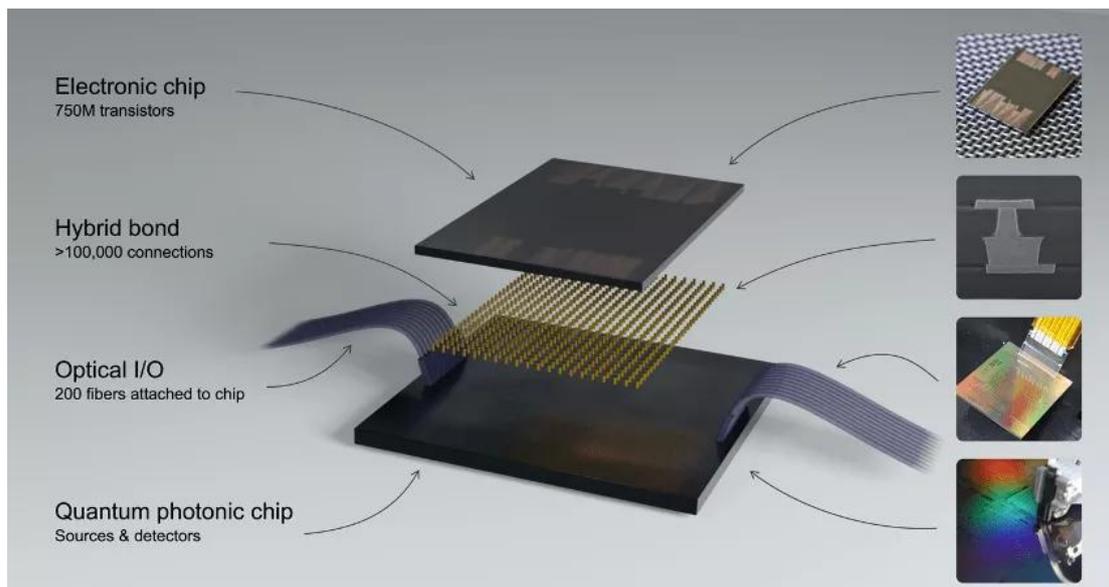
PsiQuantum 于 2016 年成立，拥有一支世界级工程师和科学家团队，致力于整个量子计算堆栈，从光子和电子芯片到封装和控制电子、低温系统、量子架构和容错，再到量子应用。

2021 年 5 月，PsiQuantum 宣布与全球领先半导体制造商格罗方德正在制造构成 Q1 系统基础的硅光子和电子芯片，这是 PsiQuantum 量子计算路线图中的第一个里程碑，旨在提供具有 100 万个量子比特的商业可行的量子计算机。¹²²

¹²² <https://psiquantum.com/news/psiquantum-and-globalfoundries-to-build-the-worlds-first-full-scale-quantum-computer>

2021 年 7 月 27 日，PsiQuantum 宣布完成 4.5 亿美元的 D 轮融资，用于建造世界上第一台具有商业可行性的量子计算机。迄今为止，PsiQuantum 融资总额高达 6.65 亿美元。¹²³

图 30 PsiQuantum 光量子芯片



来源：PsiQuantum

11、其他

• D-Wave System

2021 年 10 月，D-Wave 在年度用户大会 Qubits 上宣布了对 Advantage 量子系统（该公司 Leap 量子云服务提供的一种新型混合求解器）的性能更新，以及下一代量子计算平台的预览，该平台将包括退火和基于门的量子计算机。该公司提供了一个清晰的路线图，主要包括：

¹²³ <https://psiquantum.com/news/psiquantum-closes-450-million-funding-round-to-build-the-worlds-first-commercially-viable-quantum-computer>

新一代 Advantage 2 量子系统采用新的量子比特设计，可在新拓扑中实现 20 路连接（目前为 15 路连接）。Advantage 2 的量子处理器（QPU）将包含 7000+ 量子比特（目前为 5000+）。

• Quantum Brilliance

2021 年 3 月，Quantum Brilliance 推出可在室温下运行的基于金刚石的量子加速器，并且该公司表示它将在澳大利亚的 Pawsey 超级计算中心安装其第一台金刚石量子加速器。¹²⁴

• Alpine Quantum Technologies

Alpine Quantum Technologies（阿尔卑斯量子技术公司, AQT）是全球领先的离子阱量子技术公司，正在开发具有 100 多个量子比特的模块化通用离子阱量子计算机，作为遵循行业标准的机架安装系统。

2021 年 1 月，AQT 展示了在两个 19 英寸机架中的离子阱系统中的 24 量子比特 GHZ 纠缠。

2021 年 6 月，AQT 和因斯布鲁克大学的研究人员演示了一台紧凑型离子阱量子计算机，这台紧凑型量子计算机可以放入两个 19 英寸宽（合计约 100 厘米）的机架中。而传统的离子阱量子计算机通常占地 30-50 平方米。¹²⁵

• ColdQuanta

¹²⁴ <https://siliconangle.com/2021/03/23/quantum-brilliance-built-diamond-based-quantum-accelerator-can-run-room-temperature/>

¹²⁵ <https://journals.aps.org/prxquantum/pdf/10.1103/PRXQuantum.2.020343>

2021 年 5 月, ColdQuanta 宣布加入 IBM Quantum Network。同时 ColdQuanta 还将与 IBM 开源软件开发工具包 Qiskit 整合。2021 年 7 月, ColdQuanta 推出其 121 (11×11 阵列) 量子比特处理器 Hilbert。单比特门保真度 99.1%, 双比特门保真度 95%。12 月, ColdQuanta 宣布将把即将推出的量子计算机 Hilbert 先提供给 Strangeworks 后台通行证 (Backstage Pass) 的成员, 随后再全面开放。

• Archer Materials

Archer Materials 是一家在澳大利亚上市的公司, 目前已从其他业务转向开发量子计算芯片。

2021 年 2 月, Archer Materials 宣布, 作为其 ^{12}CQ 量子计算芯片技术开发的一部分, 室温量子芯片能够在室温下以单个量子比特实现电子传输。这一突破是成功开发 ^{12}CQ 芯片的基础。7 月, Archer Materials 宣布在微观尺度的量子比特材料上实现了量子比特控制芯片, 这标志着作为该公司 ^{12}CQ 量子计算芯片开发的一部分取得了重大进展。

• 英伟达

2021 年 4 月, 英伟达正式入局量子计算, 推出了基于 GPU 的量子计算模拟软件开发工具包 (SDK) cuQuantum。11 月, 在英伟达 GTC 大会上, 正式宣布 cuQuantum SDK 提供公开访问。¹²⁶同时, 研究人员宣布使用 cuQuantum 创建了有史以来最大规模的量子算法模拟来解决最大割 (MaxCut) 问题。¹²⁷

• Q-CTRL

2021 年 11 月, Q-CTRL 宣布, 公司新的算法基准测试实验表明, 使用量子控制构建的替换量子逻辑操作, 可以在不增加用户额外开销的情况下, 将在真实

¹²⁶ <https://developer.nvidia.com/cuquantum-sdk>

¹²⁷ <https://arxiv.org/abs/2106.13304>

硬件上执行量子算法的成功率提高 2500% 以上。具体来说，Q-CTRL 利用在量子控制和人工智能方面的专业知识，将在 7 量子比特电路上的算法成功概率提高了 2680% 以上。对于固定资源，这意味着 Q-CTRL 技术在减少算法错误方面的效率提高了约 400 倍。¹²⁸

• QuEra Computing

2021 年 11 月，波士顿量子公司 QuEra Computing 宣布制造出一种量子比特比任何竞争对手都多的设备——基于中性原子技术的 256 量子比特模拟器。¹²⁹

• IQM

IQM 是欧洲领先的量子计算硬件公司，总部位于芬兰埃斯波，同时在欧洲多国开设了办事处。

2021 年 11 月，IQM 宣布斥资 2000 万欧元建成一家专门的制造工厂，用于设计、研究和制造其量子处理器。

2021 年 12 月，IQM 向芬兰国家技术研究中心（VTT）交付了一台 5 个量子比特的超导计算机 Micronova。此台机器将用来向阿尔托大学在读学生提供开源教学资源。

• Seeqc

2021 年 4 月，美国量子计算公司 Seeqc 宣布，该公司的那不勒斯团队成功开发并测量了一个双量子比特门。Seeqc 成为少数几个实现这一关键工程里程碑的国际量子计算公司之一。

• QuiX

¹²⁸ <https://q-ctrl.com/blog/q-ctrl-boosts-quantum-algorithms-by-greater-than-25x-in-benchmarki>

¹²⁹ <https://mp.weixin.qq.com/s/CQ0BrONxiM9G67Pbprk7oQ>

2021 年 7 月，荷兰量子计算公司 QuiX 宣布开发出迄今为止最大的通用量子光子处理器：一个基于化学计量氮化硅波导的低损耗 12 模式（mode）全可调谐全模式耦合线性干涉仪。

• Atom Computing

2021 年 7 月，Atom Computing 推出第一代量子计算系统 Phoenix。Phoenix 目前用光镊在真空室中捕获了 100 个原子（每个原子代表一个量子比特），然后用激光重新排列和操纵它们的量子态。

• 牛津量子电路公司

2021 年 7 月，牛津量子电路公司（OQC）宣布推出英国首个完全使用公司专有技术构建的商用量子计算即服务（QCaaS）。12 月，OQC 宣布将从 2022 年 2 月开始提供其最新系统 Lucy——一台 8 比特超导量子计算机，这是第一个连接到亚马逊 Braket 的欧洲系统。

• QC Ware

QC Ware 成立于 2014 年，是一家量子软件和服务公司。QC Ware 专门开发近期量子计算硬件的应用程序。每年 12 月，QC Ware 都会举办 Q2B 大会，这是量子计算领域最负盛名的产业大会。

2021 年 4 月，为了加快量子算法在蒙特卡罗模拟中的应用，QCWare 开发了一种新的量子算法，通过牺牲一些提速（1000 倍变为 100 倍），产生浅层蒙特卡罗算法，预计能够在 5 到 10 年内可用的近期量子硬件上使用。

• Multiverse Computing

Multiverse Computing 是一家领先的量子软件公司，它应用量子 and 量子启发的解决方案来解决金融领域的复杂问题。

2021 年 8 月，Multiverse Computing 推出了第一款产品——Singularity，这是一个 Excel 插件，可直接用于量子投资优化。该产品将量子计算直接连接到 Excel 表格。11 月，Multiverse 与 IonQ 达成合作，将在其金融解决方案 Singularity® 中使用 IonQ 量子云平台，该集成系统使金融机构能够以前所未有的速度和准确度模拟真实金融问题。

• Strangeworks

2021 年 2 月，Strangeworks 宣布为科学家、研究人员、软件开发者和爱好者提供完整的量子生态系统

2021 年 6 月，Strangeworks 宣布将 IBM 的量子云服务集成到 Strangeworks 生态系统。此举为 Strangeworks 生态系统增加了 28 项量子服务，包括 9 台免费量子计算机和 5 个托管模拟器。

• Quantum Computing Inc

2021 年 2 月，QCI 推出了一款名为 Qatalyst 的应用加速器，有望简化在不同量子计算平台上部署应用程序的工作。6 月，与洛斯阿拉莫斯国家实验室达成了一项为期 3 年的协议，将运行 P 级和 E 级模拟。7 月，QCI 在纳斯达克资本市场上市，股票代码 QUBT。

• Qu&Co

2021 年 3 月，欧洲量子软件公司 Qu&Co 发布量子计算化学和材料科学平台“QUBEC”测试版，这是第一个专为化学和材料科学设计的量子计算平台。

二、国内

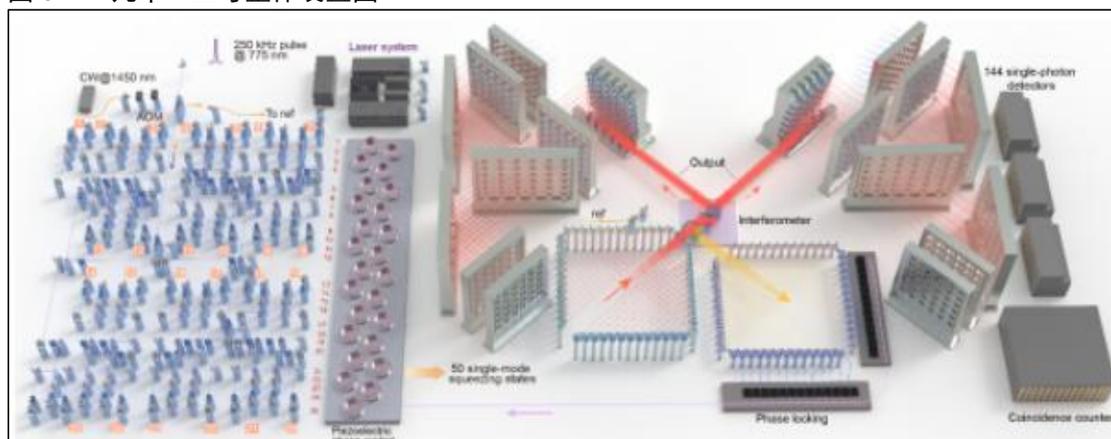
1、中国科学技术大学

2021 年 5 月，中国科大中科院量子信息与量子科技创新研究院潘建伟、朱晓波、彭承志等组成的研究团队，成功研制了 62 比特可编程超导量子计算原型机“祖冲之号”，并在此基础上实现了可编程的二维量子行走；

6 月，潘建伟团队再次将可编程超导量子计算原型机“祖冲之号”升级，构建了 66 比特可编程超导量子计算原型机“祖冲之 2.0”，实现对 56 量子比特 20 层循环“量子随机电路采样”任务的快速求解。在计算复杂度上，比 Google 的“悬铃木”量子计算机高出 3 个数量级；

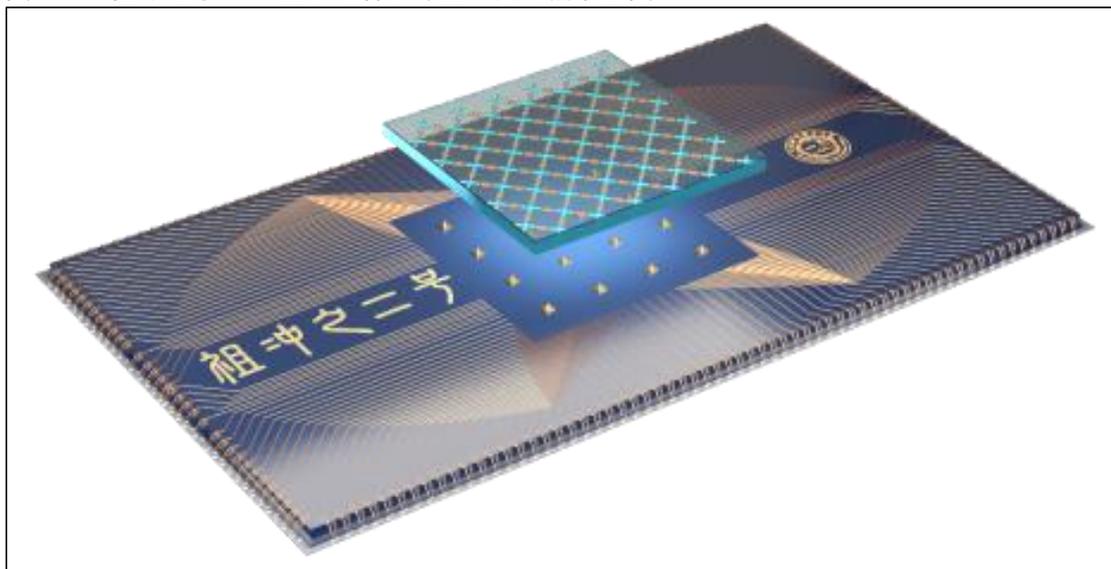
10 月，中国科大团队又实现了 60 量子比特 24 层循环量子随机电路采样，计算复杂度比“悬铃木”高出 6 个数量级。同月，中国科大潘建伟、陆朝阳等成功研制出“九章二号”，从之前的 76 个光子增加到 113 个光子，处理特定问题的速度比超级计算机快亿亿亿倍。

图 31 “九章”二号整体装置图



资料来源：中国科学技术大学

图 32 “祖冲之号” 66 量子比特超导量子处理器示意图



注：祖冲之量子处理器由两颗蓝宝石芯片组成，一个携带 66 个量子比特和 110 个耦合器，每个量子比特耦合到四个相邻的量子比特(边界处除外)。另一个承载读出组件和控制线以及接线。这两个芯片通过铜凸块对齐并绑定在一起。

资料来源：Strong quantum computational advantage using a superconducting quantum processor

2、本源量子

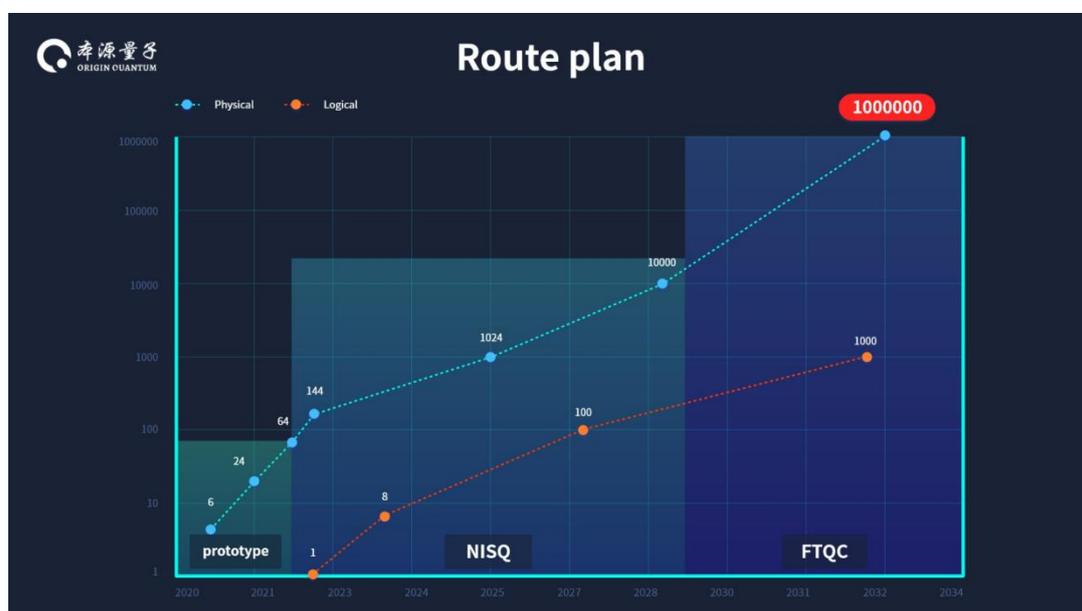
2021 年 1 月，本源量子宣布完成数亿元 A 轮融资，由“国家队”中网投和国新基金领投。2 月，本源量子的国产工程化超导量子计算机本源悟源 2 号正式上线，并发布首款国产量子计算机操作系统“本源司南”。该操作系统旨在大幅缩短一台全新量子计算机投入运行时间。目前，本源司南已捐赠给西安电子科技大学、武汉大学、北京航空航天大学、四川大学、中国科学技术大学、华中科技大学等十家国内一流网安学院及河南省郑州市网络安全科技馆。据悉，本源量子在 2021 年已出口一套本源司南量子计算操作系统和量子云服务平台到一带一路国家。

2021 年 4 月，本源量子与合肥晶合集成电路公司宣布将共建量子计算芯片联合实验室。晶合集成是驱动芯片代工领域的龙头企业，双方共建的安徽省首个

量子计算芯片领域联合实验室，将在极低温集成电路领域进行工艺合作开发以及工程流片验证，实现从芯片设计到封装测试全链条开发。联合实验室的建设，将对量子计算芯片集成化发展、填补国内制造空白、加快应用落地具有重要的推动作用。

2021 年 9 月，本源量子发布未来五年量子计算技术规划路线图。

图 33 本源量子未来五年量子计算技术规划路线图



来源：本源量子

根据路线图，本源量子预计 2021 年底推出 64 比特超导量子芯片，新的设计布局增加了芯片的可拓展性，到 2025 年，将实现 1024 量子比特。从 2022 年量子计算产业赋能大会获悉，2021 年，本源量子已完成 24 位超导量子计算机整机交付，并正在进行 64 位量子计算机整机交付。

2022年1月，本源量子宣布自主建设的两大实验室——量子芯片制造封装实验室和量子计算组装测试实验室在合肥中安创谷正式启用，两大实验室将实现从量子芯片到量子计算整机软硬件的全栈式开发。

除了硬件，本源量子还在努力推动量子计算行业应用。金融方面，本源量子联合建信金融科技（中国建设银行旗下金融科技子公司）推出了国内首批量子金融应用——量子期权定价应用与量子 VaR 值计算应用，模拟速度和准确率均超越国际同类产品。成功开发量子贝叶斯网络应用，推出金融概率预测、网络监控和故障溯源新工具——量子贝叶斯算法应用程序，填补了该领域从前瞻研究到实际应用的空白。并在本源量子云平台上线了投资组合优化应用，可快速从所有投资组合中找到给定风险偏好下的最佳收益组合，将进一步拓宽量子计算在金融领域的使用场景。此外，本源量子还在2021年4月率先成立中国量子金融行业应用生态联盟，推进量子计算在金融场景的应用开发。

化学方面，2021年6月，成立量子生物化学行业生态联盟，推动中国量子计算应用“生态群落”建立。7月，本源量子团队自主研发的量子化学应用 ChemiQ 正式版上线，并于10月推出国际版。人工智能方面，本源量子推出了自主研发量子人工智能应用——量子图像识别应用；在量子计算操作系统本源司南上运行验证了 QGAN（量子生成对抗网络）算法的可行性和有效性，将量子生成对抗网络技术与图像修复相结合，在 QGAN 上实现了新的应用，即人像修复。密码领域，本源量子完成了密码量子破译相关算法与软件研发，减少了运行算法所需的量子比特数量，相关指标达到国际先进水平。航空领域，2021年10月，本源

量子发布国内第一款量子计算流体力学仿真软件“本源量禹”（QCFD），该软件基于量子有限体积法，原理上能实现对 CFD 仿真计算的亚线性加速。

本源量子围绕量子计算机、量子芯片、量子测控、量子软件、量子云平台和量子教育等核心业务，实现量子计算全栈式发展布局，一直积极推动量子计算产业落地和量子计算生态体系建设，面向生物医药、金融工程、航空航天、大数据等多行业领域，率先打造量子计算生产制造链、生态应用链和科普教育链，持续推动量子计算工程化、产业化发展。

3、国盾量子

国盾量子成立于 2009 年，是国内领先的量子信息公司，于 2020 年 7 月登陆科创板。针对多比特超导量子计算需求，国盾量子联合中国科大在 2020 年推出 ez-Q™ Engine 超导量子计算操控系统。

朱晓波团队应用该套系统多年，取得了：12bit“簇态”纠缠态的制备（PRL）、强关联量子行走（Science）、24 超导比特的高精度量子相干调控（PRL）等成绩。并成功应用到中国首台云端超导量子计算平台。

2021 年 3 月，国盾量子推出了优化版本的超导量子计算操控系统 21 版“ez-Q Engine”。10 月，超导量子计算操控系统 ez-Q Engine 助力 66 比特超导量子计算原型机“祖冲之二号”实现“量子计算优越性”。国盾量子团队为该实验提供了室温电子设备的生产和维护，相关的团队成员是文章的作者。

目前从已完成“量子计算优越性”实验的“祖冲之”超导量子计算处理器的性能测试来看，在单比特门保真度、两比特门保真度、读取保真度等关键指标上已达到 2019 年谷歌实现“量子优越性”的超导量子计算系统的水平。

2021 年 4 月，国盾量子宣布使用 1.2 亿元超募资金投资建设新项目：“特种行业量子通信设备科研生产中心”和“量子计算原型机及云平台研发项目”，公司将先后研制两台高性能超导量子计算原型样机和与之适配的量子计算云平台。

同时，国盾量子携手中科院量子信息与量子科技创新研究院共同打造了 12 超导量子比特量子计算云平台。软件方面，国盾量子正在与数家一流的软件科研单位共同开发设计了适配云平台 QCIS 指令集硬件的 isQ-Core 量子编程语言及其编译器。

未来，通过在云平台上的测试以及两台样机的迭代研发，国盾量子计划形成适用于高性能超导量子计算机的新一代量子调控技术、超导量子计算机整机集成技术等核心技术。

4、启科量子

启科量子正式成立于 2019 年，致力于量子通信设备制造和量子计算机全栈式开发，未来将设计并构建新一代量子互联网。

目前，启科量子计算团队涵盖原子物理、离子阱量子计算、量子光电、量子软件系统等领域的教授专家团队、光电子学、电子机械、低温真空、电磁系统、

软件开发等领域的工程师团队。在首席科学家、战略科学家、顾问专家委员会的带领下，团队总人数已超过 50 人，博士占比约 30%。截至 2021 年 12 月，团队在离子阱量子计算机方面输出知识产权 50 余项，发表论文多篇。

2021 年 1 月，启科量子宣布完成 5000 万元天使轮融资，用于新一代小型化的量子通信设备研发与量产，以及百比特离子阱量子计算机的研发。

2021 年 7 月，启科量子发布了中国第一台百比特离子阱量子计算机工程机 AbaQ-1 总体设计。启科量子致力于全栈式开发离子阱量子计算机，主营业务涵盖离子阱量子计算机的各系统（包括离子阱芯片、精密激光系统、量子比特光电测控系统、高速电子时序与控制系统、量子编程语言、量子云和量子应用软件等）。

目前，启科量子已完成离子阱量子计算机研发产业链布局，与十多家上下游公司达成产业合作框架，并完成离子阱量子计算机模拟机 IonMaster-1（教学版）和通用量子计算机算法模拟器 QuBox（教学版）的研发。

启科量子计划在 2022 年推出量子计算云平台、离子阱量子计算机模拟机云平台、商用离子阱量子计算系统、分布式量子计算链路演示、工程化离子阱量子计算机、开放百比特离子阱量子计算机订制。

到 2023-2025 年，启科量子将实现十比特商用离子阱量子计算节点、百比特工程化分布计算机，千比特模块化分布式量子计算系统，全栈量子软件开发、并在化学、医学、金融、交通、科教等领域已开展应用落地

5、阿里巴巴达摩院量子实验室

2017年9月，密歇根大学终身教授施尧耘入职阿里巴巴，组建并负责阿里云量子计算实验室（达摩院量子实验室）。国际化团队横跨杭州、北京和西雅图三地，全栈式研发贯穿量子芯片、系统、算法和应用四层。2019年9月，阿里巴巴完成了第一个可控的量子比特的研发工作，该量子比特的设计、制备和测量全部是自主完成。

2020年5月，达摩院量子实验室用“太章2.0”模拟了2019年“谷歌量子霸权”宣称用的量子电路，将其设计的经典计算耗时超一万年的任务，压缩至20天内完成。

2020年12月，阿里巴巴发布阿里云量子开发平台(Alibaba Cloud Quantum Development Platform, ACQDP)，开源自研量子计算模拟器“太章2.0”及一系列量子应用案例。

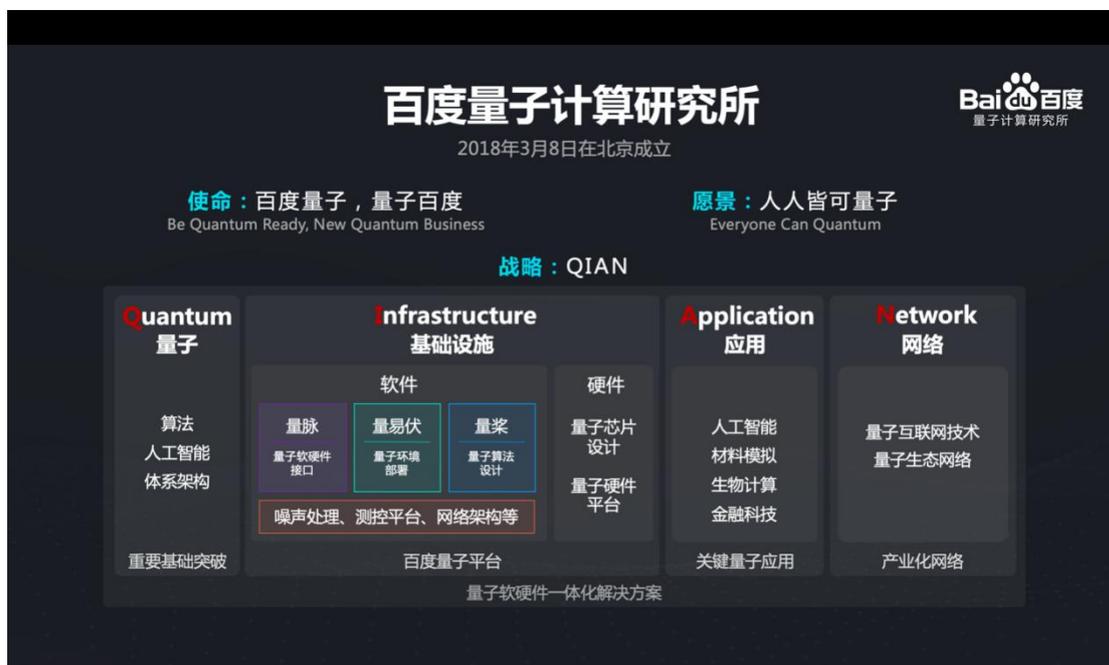
6、百度量子计算研究所

2018年，百度宣布成立量子计算研究所，致力于量子计算软件和信息技术应用业务研究，由悉尼科技大学量子软件与信息中心主任段润尧教授担任研究所所长。

百度主要专注于量子人工智能，核心产品包括脉冲计算系统量脉、国内首个量子机器学习开发工具量桨(Paddle Quantum)和国内首个云原生量子计算平台量易伏。

2021 年 10 月，百度研究院量子计算研究所所长段润尧宣布百度量子 QIAN 战略规划升级。QIAN 代表着百度在量子 (Quantum)、基础设施 (Infrastructure)、应用 (Application) 和网络生态 (Network) 等四个方面的全新战略布局。此外，百度量子还发布全球首个云原生量子集成开发环境——YunIDE，提供全新量子编程体验。

图 34 百度 QIAN 战略规划



来源：百度量子计算研究所

7、腾讯量子实验室

腾讯量子实验室旨在研究量子计算与量子系统模拟的基础理论，以及在相关应用领域和行业中的应用。

2021年2月，健康元研究院与腾讯量子实验室签署了战略合作协议，双方将共同推进量子计算+人工智能在微生物合成生物学研究及相关药物研究领域的应用。6月，腾讯量子实验室与清华大学物理系签署合作备忘录。

10月，腾讯量子实验室实现了一种快速、高保真、易扩展的超导量子比特初始化方案。

8、华为

2018年1月，华为就开始着手组建量子计算研发团队，邀请南方科技大学物理系副教授翁文康，担任量子计算软件与算法首席科学家。同年10月，华为在全联接大会上首次发布了量子计算模拟器 HiQ 云服务平台。在2020年的HC大会上，正式发布了 HiQ 3.0 的量子计算解决方案，目前正在持续更新。

9、京东探索研究院

2021年8月，京东量子计算研究团队主要成员杜宇轩、钱扬提出全球首个以经典云平台为依托、量子计算设备为终端的量子并行处理框架 QUDIO(quantum distributed optimization scheme)，可实现充分调度现有量子计算资源去求解超越经典计算的大规模任务。与传统处理框架相比，QUDIO 将已有的量子计算机结合起来形成量子云，可充分利用各个量子资源，加速大规模数据处理，有效地缓解了当前量子计算机性能稳定性较差、处理大规模数据迭代时间过长的困境。

10、其他

• 浙江大学

2021 年 12 月，浙江大学同时发布“莫干 1 号”“天目 1 号”超导量子芯片学术成果。

“莫干 1 号”是一款专用量子芯片，采用了全连通架构，适用于实现针对特定问题的量子模拟和量子态的精确调控。36 量子比特的“天目 1 号”芯片面向通用量子计算，采用了较易扩展的近邻连通架构。

• 北京大学

2021 年 9 月，北京大学物理学院研究员王剑威与来自英国布里斯托大学和丹麦科技大学的研究人员合作在光子架构上实现量子纠错编码，提高量子算法的性能。当运行无错误保护和有错误保护的相位估计算法时，成功率从 62.5% 提高到 95.8%。相关论文已发表在《自然·物理学》杂志。

• 清华大学

2021 年 3 月，中国科学技术大学潘建伟、朱晓波、陈宇翱团队，清华大学马雄峰团队，以及牛津大学等机构的科学家们利用超导量子比特，对五量子比特纠错码进行了实验探索。

2021年5月，清华大学量子信息班正式成立，由图灵奖得主、中国科学院院士姚期智担任首席教授。

2021年8月，清华大学交叉信息研究院段路明研究组在超导量子计算领域取得重要进展，该小组利用可调耦合的多量子比特系统首次实验研究了环境比特对于交叉共振逻辑门（Cross-resonance（CR））的影响并提出了实验解决方案。

2021年10月，清华大学段路明研究组在离子阱量子信息处理领域取得重要进展，通过对优化选择的少量离子进行激光冷却，首次实现对长离子链的高效协同冷却，获得接近全局激光冷却的极限温度，为多离子比特量子计算准备了技术基础。

· 国防科技大学

2021年3月，国防科技大学计算机学院QUANTA团队，联合军事科学院、中山大学等国内外单位，研发出了一款新型可编程硅基光量子计算芯片，实现了多种图论问题的量子算法求解，有望未来在大数据处理等领域获得应用。

· 国仪量子

国仪量子是国内领先的量子精密测量公司，在量子计算领域也有涉足。早在2019年就推出了金刚石量子计算教学机，这是一台基于金刚石NV色心和自旋磁共振为原理，通过控制激光、微波、磁场等，对NV色心的自旋进行量子操控和读出，从而实现量子计算功能的教学仪器。

2021 年 12 月，国仪量子启动了内部代号为“722 工程”的离子阱量子计算机开发项目，将于 2022 年推出第一台商用离子阱量子计算机，向量子计算领域的科研工作者提供稳定可靠的低成本解决方案。

• 图灵量子

2021 年初，国内首家光量子计算公司图灵量子正式成立，并随后宣布完成近亿元人民币的天使轮融资，公司起源于上海交通大学集成量子信息技术 (IQT) 研究中心。

12 月，图灵量子在量子计算的金融衍生品定价应用中取得进展，运用量子幅值估计算法代替传统的蒙特卡罗数值方法，对抵押债务凭证 (Collateralized Debt Obligations, CDO) 的不同批次进行更准确的定价。同月，图灵量子自主研发的国内首款商用光量子计算模拟软件 FeynmanPAQS 宣布试商用，弥补了国内这一领域技术和产品的空白。

• 玻色量子

北京玻色量子科技是一家聚焦于相干量子计算技术路线，致力于“量子+AI”的软硬件全平台研发并实现“用量子重新定义 AI”的高科技公司。公司于 2020 年底成立，是国内首个“相干量子计算”方向的初创企业。

2021 年 10 月，玻色量子与华夏银行股份有限公司，中国人民银行丹东市中心支行，龙盈智达（北京）科技有限公司共同对量子计算在金融领域内的应用原

理与场景进行了研发和探索，此次联合科研的成果之一——《聚焦于量子近似优化算法在中国股票市场的应用研究》在《银行家杂志》上发表。

迄今为止，玻色量子已完成光量子实验室的搭建，正在研发 1000+量子比特级别 CIM 量子 AI 协处理器工程样机，以及相应的加速算法。

• 昆峰量子

2021 年 7 月，昆峰量子研发的“昆昇”量子芯片设计服务云平台(Quantum-chip Design Automation Platform: QDAP) Alpha 版正式上线。“昆昇”是昆峰量子打造的一站式面向量子芯片设计的专用软件工具，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，可满足相关科研与工程研发需求。

• 弧光量子

弧光量子成立于 2020 年，由中国科学院软件研究所及其量子软件研究团队共同出资设立。2021 年 1 月，弧光量子推出能够对量子程序是否正确进行验证的平台 isQ，可在经典计算机上克服计算时间与存储空间限制，为较大规模量子程序的设计提供重要帮助。10 月，弧光量子完成数千万元的天使轮融资。

第六章 投融资——勇敢想象

2021 年是量子计算领域投融资大爆发的一年，全球投资机构持续加码量子计算。

根据 ICV 的统计数据，2021 年，全球量子计算公司共实现融资 26.91 亿美元，比过去十年量子计算领域融资的总和还要多，是 2020 年融资额的 1.6 倍左右。



表 15 2021 年量子计算融资情况

序号	公司	最新融资日期	国家	技术领域	原始货币	轮次
1	Rigetti Computing	2021/12/27	美国	量子计算机	4500 万美元	-
2	国仪量子	2021/12/24	中国	量子计算机 量子测量	数亿元人民币	C 轮
3	QphoX	2021/12/21	荷兰	量子计算机	-	-
4	Multiverse Computing	2021/12/21	西班牙	量子软件	1250 万欧元	-
5	Equal1	2021/12/21	美国/爱尔兰	量子计算机	1000 万欧元	-
6	Q-CTRL	2021/11/30	澳大利亚	量子软件	2500 万美元	B 轮
7	QuEra	2021/11/18	美国	量子计算机	1700 万美元	-
8	Quandela	2021/11/16	法国	量子计算机	1500 万欧元	-
9	图灵量子	2021/11/10	中国	量子计算机	数亿元人民币	Pre-A
10	Multiverse Computing	2021/10/20	西班牙	量子软件	1150 万美元	种子轮
11	Rigetti Computing	2021/10/6	美国	量子计算机	4.58 亿美元	SPAC
12	Equal1	2021/10/5	美国	量子计算机	600 万欧元	-
13	Archer Materials	2021/10/4	澳大利亚	量子计算机	1500 万澳元	上市增发
14	QC Ware	2021/9/29	美国	量子计算机	2500 万美元	B 轮
15	Quantum Machines	2021/9/6	以色列	量子计算机	5000 万美元	B 轮

16	Quantum Brilliance	2021/8/25	澳大利亚/德国	量子计算机	1300 万澳元	种子轮
17	PolarisQb	2021/8/10	美国	量子软件	210 万美元	种子轮
18	Qu&Co	2021/8/9	荷兰	量子软件	-	-
19	PsiQuantum	2021/7/27	美国	量子计算机	4.5 亿美元	D 轮
20	玻色量子	2021/7/21	中国	量子计算机	-	天使+轮
21	Atom Computing	2021/7/21	美国	量子计算机	1500 万美元	A 轮
22	QuantWare	2021/7/16	荷兰	量子计算机	115 万欧元	预种子轮
23	Quantum Generative Materials LLC	2021/6/25	美国	量子软件	1500 万美元	种子轮
24	玻色量子	2021/6/24	中国	量子计算机	数千万人民币	天使轮
25	Atomionics	2021/6/17	新加坡	量子计算机	250 万美元	-
26	Pasqal	2021/6/8	法国	量子计算机	2500 万欧元	A 轮
27	C12 Quantum Electronics	2021/6/8	法国	量子计算机	1000 万美元	种子轮
28	Xanadu	2021/5/25	加拿大	量子计算机	1 亿美元	B 轮
29	Agnostiq	2021/5/13	加拿大	量子软件	200 万美元	种子轮
30	ColdQuanta	2021/5/12	美国	量子计算机 量子测量	2000 万美元	-
31	QphoX	2021/5/11	荷兰	量子计算机	200 万欧元	-
32	图灵量子	2021/5/7	中国	量子计算机	近亿元人民币	天使轮

33	D-Wave	2021/3/11	加拿大	量子计算机	4000 万加元	-
34	IonQ	2021/3/8	美国	量子计算机	6.5 亿美元	SPAC
35	IQM	2021/2/12	芬兰	量子计算机	1240 万欧元	-
36	Classiq	2021/1/28	以色列	量子软件	1050 万美元	A 轮
37	Riverlane	2021/1/25	英国	量子软件	2000 万美元	A 轮
38	启科量子	2021/1/19	中国	量子计算机 量子通信	5000 万元人民币	天使轮
39	国仪量子	2021/1/15	中国	量子计算机 量子测量	数亿元人民币	B 轮
40	本源量子	2021/1/15	中国	量子计算机	数亿元人民币	A 轮
41	量旋科技	2021/1/14	中国	量子计算机	2000 万元人民币	A+轮

来源：ICV

2021 年量子计算公司融资有如下几个特点：

特点一：上市融资成了量子科技公司的潮流

2021 年 9 月，离子阱量子计算公司 IonQ 通过 SPAC 收购在纽约证券交易所上市，并融资 6.5 亿美元，刷新了量子科技公司单笔融资纪录，总市值最高达到 69 亿美元。

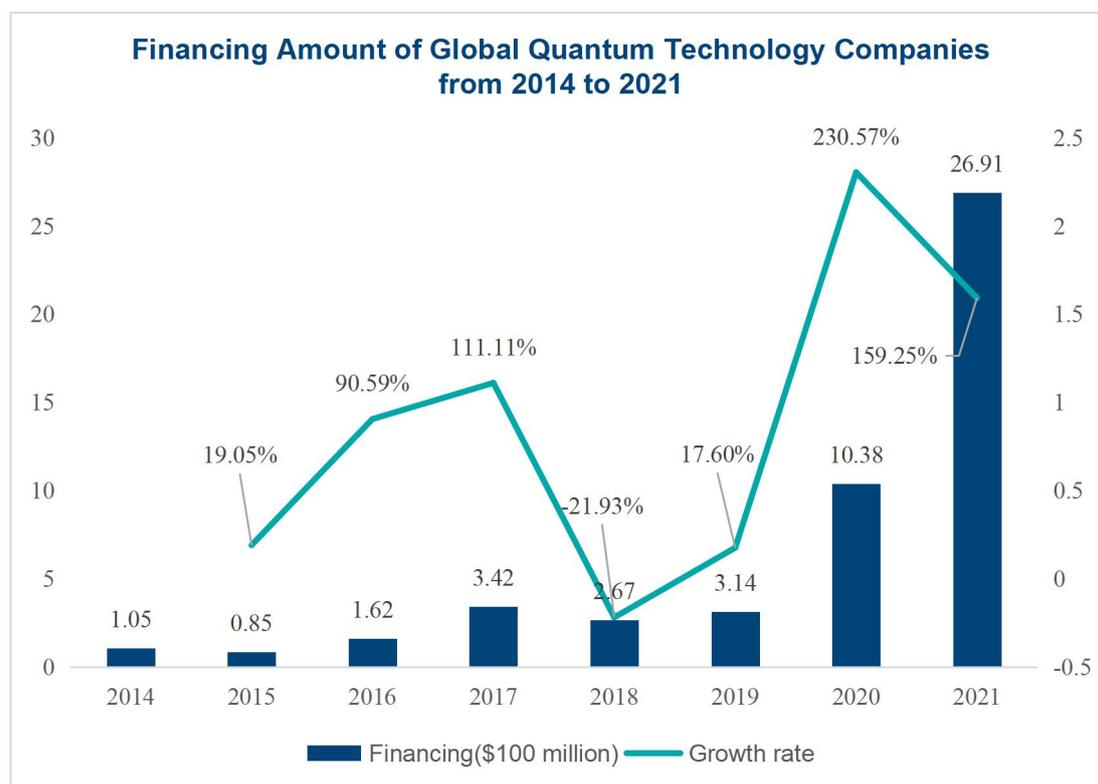
2021 年 10 月，Rigetti 与特殊目的收购公司 Supernova II 签订最终合并协议。合并后的公司预计将获得总额约 4.58 亿美元的现金收入，其中包括超过 1 亿美元的全额承诺 PIPE、直接投资以及 Supernova II 信托账户中持有的 3.45 亿美元现金。12 月，又宣布 PIPE 增加 4500 万美元的投资。

特点二：单笔融资金额创纪录

硅谷光量子计算公司 Psi Quantum 刷新了非上市量子科技公司融资纪录，于 2021 年 7 月完成 4.5 亿美元的 D 轮融资。其他许多量子计算公司单笔融资都在千万美元以上。

例如，光量子计算公司 Xanadu 融资 1 亿美元，非全栈量子计算公司 Quantum Machines 融资 5000 万美元，中性原子量子计算公司 Pasqal 融资 2500 万欧元，量子控制技术公司 Q-Ctrl 融资 2500 万美元。

图 35 2014-2021 年全球量子科技公司融资金额及增长率



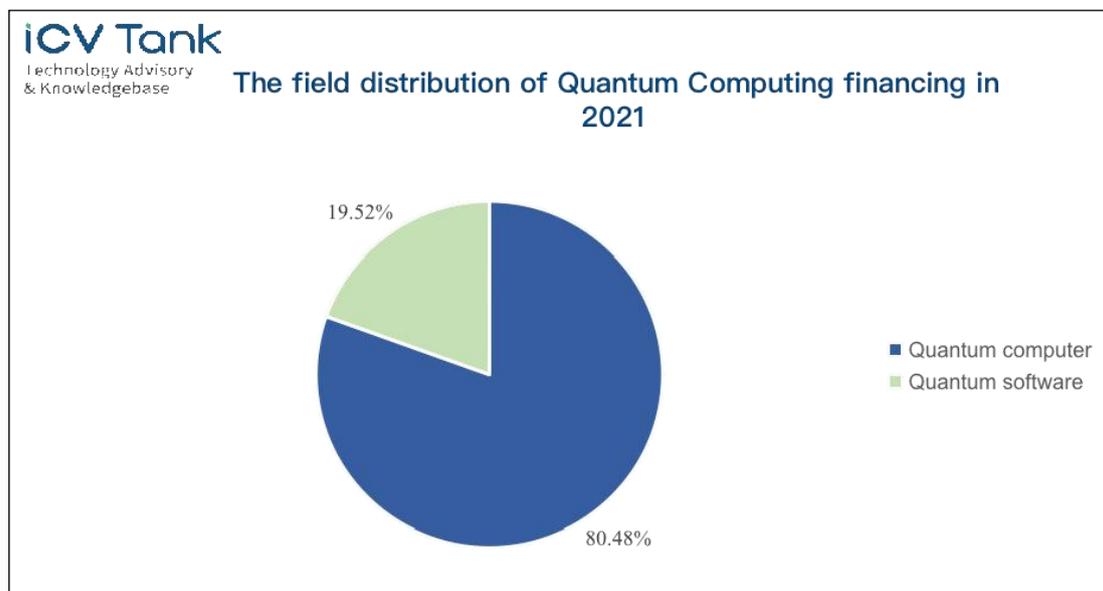
数据来源：ICV

由于量子计算尚处在早期发展阶段，多数公司发展还未定型，本次将量子计算公司分为量子计算机（含量子硬件）公司和量子计算软件公司两大类。

根据 ICV 统计的公开披露融资情况，2021 年度量子计算公司共完成 42 笔融资，融资总额约为 26.91 亿美元。其中，量子计算机（含量子硬件）融资事件

31起，约为21.66亿美元，融资额占比为80.48%；量子计算软件融资事件11起，5.25亿美元，融资额占比为19.52%。

图 36 2021 年量子计算两大领域融资额占比情况

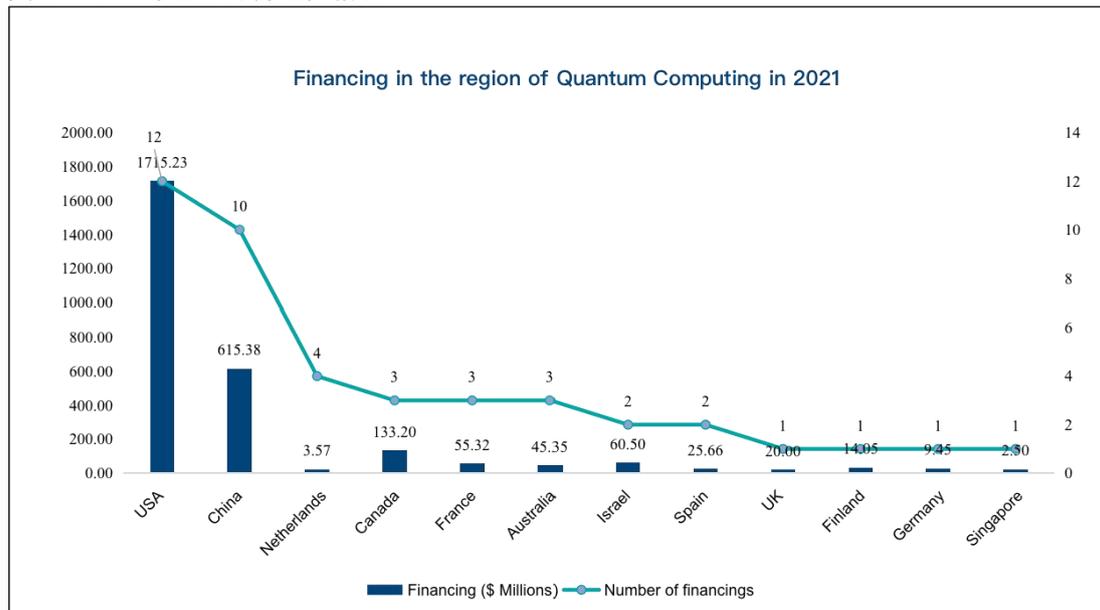


数据来源：ICV

从国别来看，2021年美国和中国的量子计算融资活动较多，分别为12笔和10笔，然后是荷兰的4笔，法国、加拿大的3笔，澳大利亚、西班牙、以色列的2笔，其余国家融资均只有1笔。

从融资金额来看，总金额差距较大，美国量子计算公司融资约17.15亿美元，主要来自上市融资，而中国量子计算公司融资约6.15亿美元，全部来自风险投资，且金额偏少的部分原因是中国公司通常倾向于不披露金额。荷兰有4笔融资，但总金额偏小。加拿大虽然只有3笔融资，但是融资总额达到约1.33亿美元。

图 37 2021 年量子计算融资情况

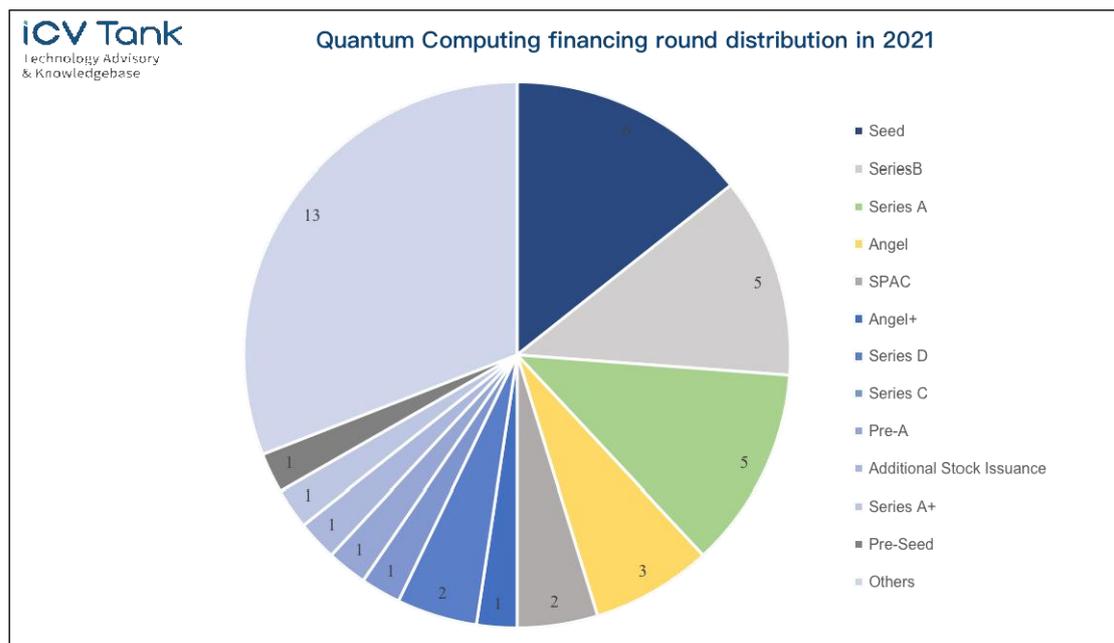


注：由于 Quantum Brilliance 是由澳大利亚和德国共同建立的公司，其获得的 1300 万欧元融资在上表中分别计算在澳大利亚和德国中，因此上表融资总额产生上述差异。

数据来源：ICV

从已披露的融资轮次来看，种子轮最多，有 6 次，其次是 A 轮和 B 轮，均为 5 次。这说明全球量子计算领域整体还处在早期发展阶段。值得注意的是，在美国，量子计算硬件公司 PsiQuantum 已获得 D 轮融资，进入上市阶段和 B 轮融资的已有 4 家，而中国量子计算企业融资轮次集中在天使轮和 A 轮。这说明，相比美国，中国量子计算企业商业化和产业化的进程相对较慢。

图 38 2021 量子计算融资轮次情况



数据来源: ICV

第七章

国家政策——坚持支持

近年来，世界主要国家及地区高度重视量子技术发展，均把量子计算机的研发作为国家战略，加速量子计算机的研发。

2021 年，各国及地区相继出台量子信息政策文件、成立研究机构、支持量子科技研究，加大对量子研发的投资，促进量子科技研发和产业发展，旨在推动建立量子生态系统，赢得量子技术发展先发优势，率先实现超越经典计算的实用量子优势。



如表 16 所示，通过对目前全球主要量子参与国家在资本投入、研究成果、研究员数量、专利数量、论文发表数量和量子公司数量 6 个维度进行评价，可以看出，目前美国和中国走在了全球最前列。

表 16 全球量子主要参与者评价体系

Country	Capital	Research results	Number of researchers	Number of patents	Number of papers	Number of quantum companies	Comprehensive strength
USA	●	●	●	●	●	●	↑
China	●	●	●	●	●	●	↑
EU	●	●	●	●	●	●	↑
France	●	●	●	●	●	●	→
Germany	●	●	●	●	●	●	→
Netherlands	●	●	●	●	●	●	→
Spain	●	●	●	●	●	●	→
Finland	●	●	●	●	●	○	↓
Italy	●	●	●	●	●	○	↓
UK	●	●	●	●	●	●	→
Japan	●	●	●	●	●	●	→
Canada	●	●	●	●	●	●	→
Australia	●	●	●	●	●	●	→
South Korea	●	●	●	○	○	○	↓
Singapore	○	○	○	○	○	○	↓

Note:
The rating is based on a 5-point scale, with 1 being the worst and 5 being the best, with ○ representing 1 and ● representing 5

ICV Tank

注：评分采用 5 分制，1 为最差，5 为最优，○代表 1 分，●代表 5 分。

绿色箭头表示综合实力较其他国家/地区较好，黄色和红色依次次之。

资料来源：ICV

通过对 2021 年全球主要国家政策的梳理（请参见：附 主要国家和地区的政策支持），总结发现以下重要观点：

观点 1：越来越多的国家和地区将量子科技写入国家层面的发展战略中

例如，美国、中国、英国、德国、法国、俄罗斯、日本、印度、韩国、荷兰、新加坡、奥地利、匈牙利、伊朗、以色列、中国台湾、斯洛伐克等，政府不仅从政策层面提及量子科技，并且通过国家资金支持量子科技发展。全球发展量子科技的国家中，美国公开发布的政策最多，最为全面。

观点 2：美国方面，在政策、资金、人才、产业、国际合作等方面均做出实际行动

美国政府多个部门及相关组织频发发布报告，旨在提升对量子科技的认识和重视，这些政府部门及组织包括，国家人工智能安全委员会（NSCAI）、政府问责局（GAO）、国家反情报与安全中心（NCSC）、国家科学技术委员会（NSTC）等。从各类政策中可以看出，量子技术已被美国认定为中美博弈下，需要重点发展的技术之一。

观点 3：中国方面，量子科技成为“十四五”发展战略重点

在《国务院政府工作报告》、《中华人民共和国国民经济与社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》、《国家标准化发展纲要》、《“十四五”软件和信息技术服务业发展规划》、《“十四五”国家信息化规划》政策中被提及，中国 20 多个省市将量子科技写进地方“十四五”规划。

观点 4：国家间强强联合

由于量子科技需要大量的前沿技术方能支撑其全面发展，且在新技术突破方面耗资巨大，也有赖于相关基础技术，因此，一些国家开始加强国与国之间的合作，例如法国和荷兰，英国和美国，美国和日本等，通过取长补短、强强联合等方式展开合作。

观点 5：国家立法与标准制定逐渐加速

随着技术领域的不断突破，量子技术将逐步推广及应用到实际生活中，涉及到法律制定和标准制定等环节。立法方面，美国是全球范围内首先将量子信息技

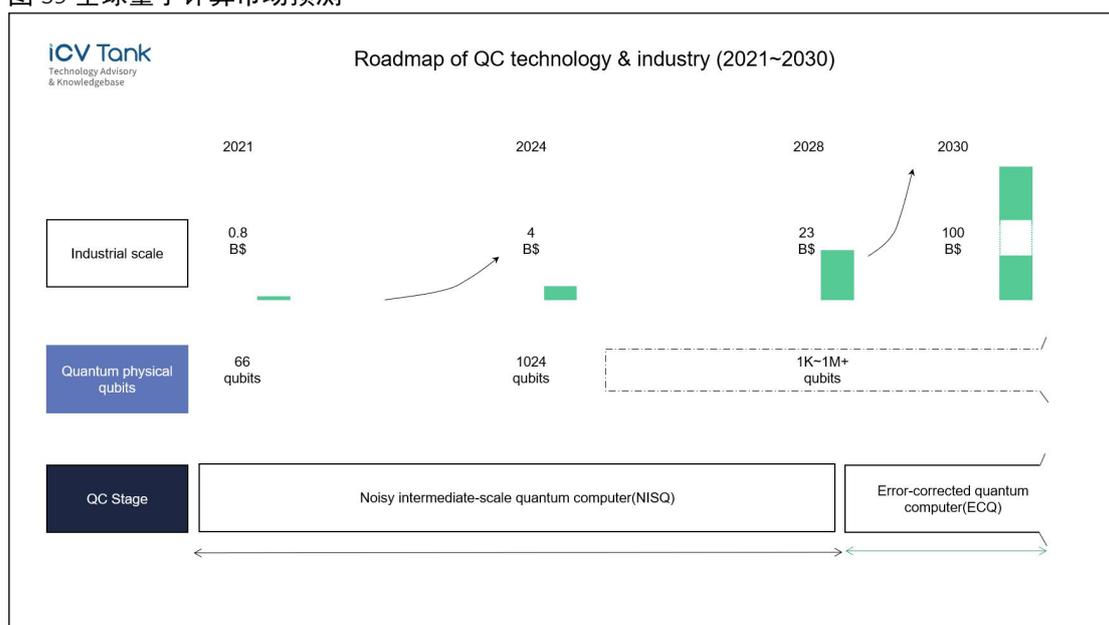
术形成立法的国家，也正在建立量子相关的标准制度。标准制度方面，中国目前在量子计算方面尚未发布过任何标准，仅有 3 部量子通信标准制度。

一、市场规模预测

根据 ICV 研究,2021 年,全球量子计算市场规模约为 8 亿美元,预计到 2024 年市场规模将增长到 40 亿美元左右。根据全球顶尖量子计算公司发布的技术路线图,预计 2024 年前后有望实现 1000+物理量子比特突破。但千级量子比特也不足以解决大量实际应用问题。

预计到 2030 年前后,将从 NISQ (含噪声量子计算) 时代进入容错量子计算时代,那时,量子计算优势将更为广泛和明显,全球量子计算市场规模将从容错量子计算时代开启时,呈现指数上升趋势,至千亿美元甚至更高。

图 39 全球量子计算市场预测



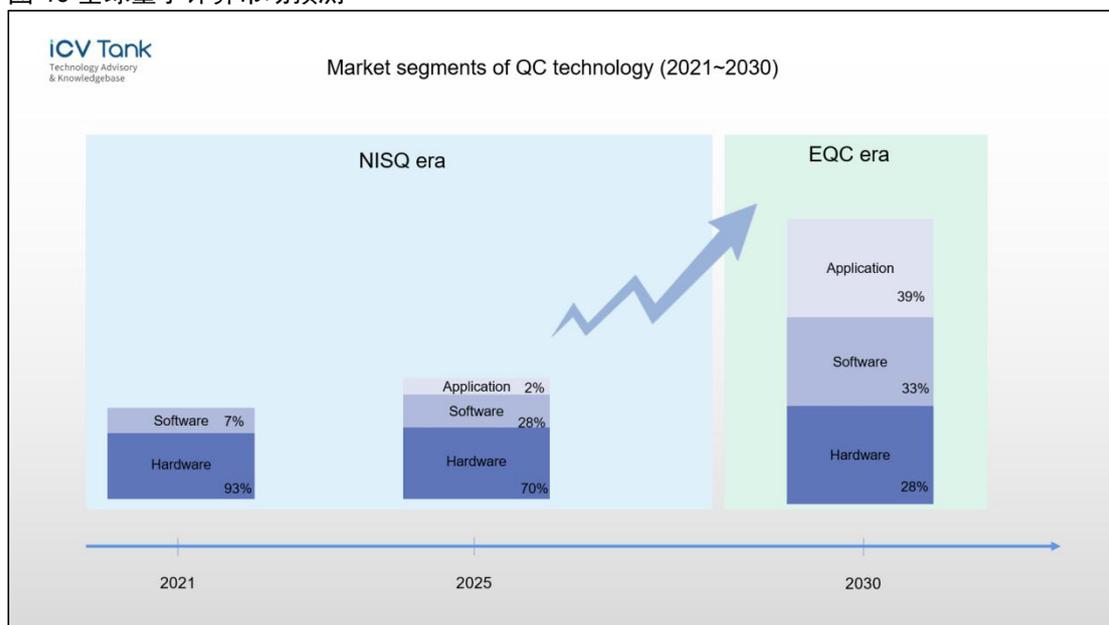
数据来源: ICV

到 2021 年底,全球约有超过 100 台超导量子计算机,超导量子计算机依然占据极高的市场地位。

在 NISQ 时代,硬件投入仍然是市场的主力,2021 年,硬件市场占比达到 93%,到 2025 年会迅速降至 70%,而软件和应用合计占到 30%。

也就是说，随着硬件的逐步强大，软件研发与初步应用会逐渐势大，这一趋势到 2030 年左右更为明显，也就是从 NISQ 时代金融容错量子计算时代，软件与应用将合计占到全市场的 72%。

图 40 全球量子计算市场预测

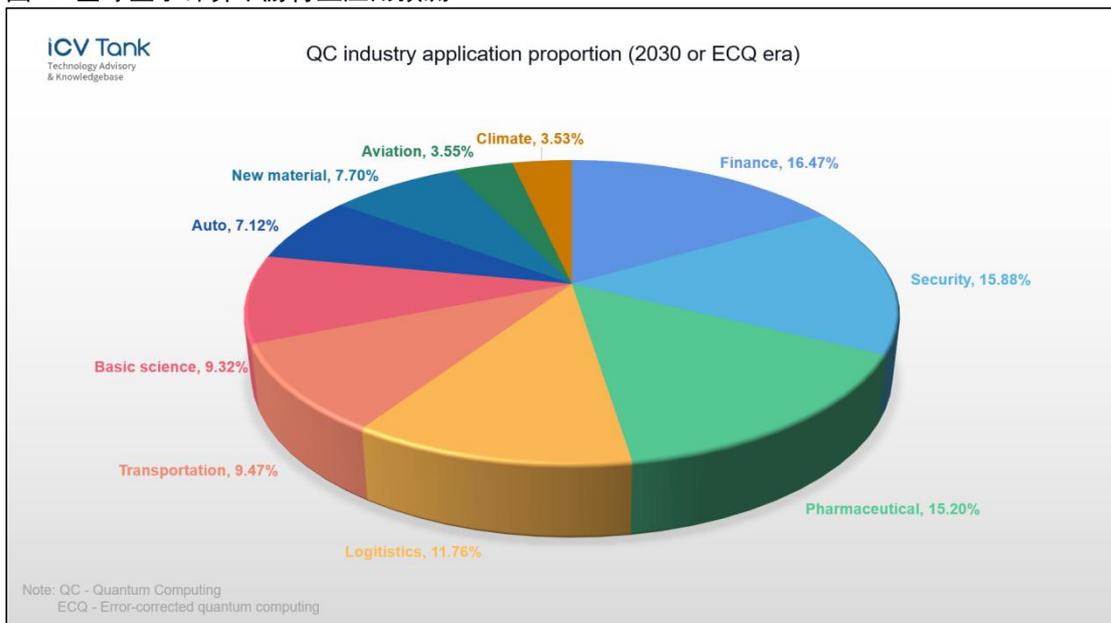


数据来源：ICV

ICV 预计大约从 2025 年起，量子计算开始释放行业应用价值。量子计算的下游应用占比中，高科技和金融产业是应用最广泛的行业，其次是物流和航天产业。

根据 ICV 预测，到容错计算机时代，量子计算将首先赋能金融产业（16.47%）、安全产业（15.88%）、制药产业（15.20%）和物流产业（11.76%）。

图 41 全球量子计算下游行业应用预测



数据来源: ICV

二、2022 年发展趋势预测

趋势 1：领先的量子计算硬件公司迈入 100 量子比特门槛

目前，中性原子体系拥有最多的量子比特，QuEra 和哈佛-MIT 推出了 256 比特量子模拟器，但是应用范围有限，另外三家公司 ColdQuanta、Pasqal、Atom Computing 推出了 100+ 基于中性原子的量子计算机，但性能有待验证。当前应用最广泛的仍是超导和离子阱系统。IBM 在 2021 年底推出的 127 量子比特芯片，有望在 2022 年投入使用；Google、Rigetti 和“祖冲之号”有望突破 100 量子比特。而离子阱体系存在扩展难的问题，但随着 2021 年 IonQ 提出了多核架构，未来 1-2 年离子阱量子计算机也将突破 100 量子比特。

趋势 2：保真度和纠错能力提升

目前，单量子比特门保真度大多可以实现 99.9%，但最重要的双量子比特门还需要证明其保真度能够稳定达到 99.9%，离子阱和半导体在这一指标上暂时领先。2022 年重点关注 IonQ 最新的铯离子量子比特能否将性能提升到新的高度。纠错方面，2021 年 Google、Honeywell、IonQ 和中国科大团队都发表论文展示了他们创建的逻辑量子比特。2021 年中国科大并未在祖冲之号量子计算机中展示纠错，我们期待在 2022 年能够实现。

趋势 3：测控系统低温化和芯片化

测控系统和量子芯片的交互可能简化。目前，测控系统需要通过几十根同轴电缆与稀释制冷机中的量子芯片进行交互，费时又费力，但如果将量子计算机操作的关键控制功能引入低温制冷设备——为了尽可能地接近量子比特本身——简化量子系统控制布线的复杂性，那么它与量子芯片的交互变得更加容易，从而提高量子比特的读出性能。

趋势 4：量子计算软件和算法离商用还有很长距离

由于操作系统的发展还在初期阶段，很大程度上受限于硬件系统的发展，而当前量子计算硬件系统也尚未收敛。短期内，操作系统厂商大量的工作都将集中在适配不同的硬件环境、虚拟机、平台和软件等。目前量子计算软件市场规模较小，各公司研发的产品主要用于科研单位或自身的量子计算机开发中，所进行的小规模实验，只能证明其优越性，但离商业化、大规模应用还有较长的路要走。短期内，大型银行、大型新药研发企业等将会进一步与具备算法开发能力的公司合作，寻求更大规模、更深层次的实验。

趋势 5：科技巨头间量子竞争愈发激烈，推动量子计算技术加速发展

Google、IBM、Intel、Microsoft 在量子计算领域布局多年，Honeywell 随后加入。产业巨头基于雄厚的资金投入、工程实现和软件控制能力积极开发原型产品、展开激烈竞争。大型科技企业也对量子计算规划较大投资数额，如 Google 计划投资数十亿美元，在 2029 年之前成功建造商用量子计算机。IBM、Microsoft、Amazon、Inter 以及一些创业公司也在大力投资发展量子技术。预计 2022 年科技巨头间激烈的量子竞争对量子计算成果转化和加速发展助力将愈发明显。

趋势 6：“量子服务”新型服务机构将会出现

一些公司已经在出售量子计算机容量。例如，用户可向 Amazon Braket 提交一个量子作业，并在几分钟后获得结果。但是，一旦量子计算机能够比经典计算机更好地运行复杂的算法，量子计算就应当被作为一种服务产品来看待。例如，使用 API 提交一篮子股票以进行优化，或者在交付路线中提交所需的站点，该服务将从量子计算机返回一个优化的答案。

趋势 7：量子计算软硬件领域投融资差距逐渐减小

从 2021 年的投融资领域分布来看，获融资的公司主要分布在与硬件相关的产品和服务领域（含量子计算、量子通讯、传感器与原材料，以及仪器、工具等），该领域获融资数量是软件公司融资数量的两倍多。但从事软件业务的公司正在开

发能够解决实际问题的算法，以用于能够在早期量子计算机上运行的软件，例如物流供应链的优化，以及药物开发中的分子模拟。预计 2022 年大公司的风险投资部门将有更多资金涌入该领域，以对该领域进行战略性的布局。

趋势 8：各国政策力度将会更大

对于美国、中国、英国和欧盟国家来说，量子科技政策将从国家层面进一步落实到分管国防、工业、科技等部门，由这些下一级部门发布更为针对性的政策。对于尚未发布量子科技政策的国家，以及尚未将量子科技上升到国家层面的国家和地区，随着其技术能力和意识的提升，也将有望将量子科技升至更高的关注层面。

趋势 9：立法与标准化是未来五年重点

未来几年，英国、欧盟等国有望推动量子科技立法进程。美国还有尚在推进中的立法，未来必将持续推进新的量子科技相关立法，其他量子技术发展较快的国家也将随着技术的推广与逐步应用，着手推进量子科技的立法程序。标准制定方面，美国和中国虽然已有量子标准的发布，但是数量较少，尚未形成体系。标准制定有助于推动整个行业发展，有助于量子计算的商业化进程。因此，随着各项技术的成熟，未来几年，各主要量子科技强国将建立更为完善的量子科技体系。

趋势 10：企业加速拓展量子计算合作伙伴，量子生态圈逐渐成形

量子计算的广泛应用前景很可能会改变银行业、药物研发、物流等行业的游戏规则，科技企业将会更加重视量子伙伴关系的建立和巩固，不断拓展能将技术应用于自身业务的企业的量子合作伙伴。科技企业与金融、医药、物流、制造型企业的联系愈发紧密，形成技术叠层伙伴。

附 主要国家和地区的政策支持

1、美国

组织机构：建立技术竞争力委员会

2021年3月1日，美国国家人工智能安全委员会(NSCAI)发布了一份长达756页的最终报告，提出了对于总统拜登、国会及企业和机构的数十项建议。报告已在委员会内部投票获得通过报告建议美国建立一个由副总统领导的技术竞争力委员会，包括人工智能和其他新兴技术，如生物技术和量子计算。

制定法案：提升量子战略高度

2021年3月18日，众议院共和党人提出科学技术量子用户扩展法案(QUEST)，QUEST法案要求能源部制定一项计划，有意“鼓励和促进使用美国量子计算硬件和量子计算云进行研究”，以最终增加美国在这一领域的研究企业和劳动力，加速其量子计算能力的发展。¹³⁰10月19日，美国政府问责局(Government Accountability Office, GAO)发布《量子计算与通信：现状和前景》(Quantum Computing and Communications: Status and Prospects)，这是最近美国官方频繁发布的量子信息科技报告中的一份。¹³¹同时，美国国家反情报与安全中心(NCSC)也发布报告《战略竞争对手的挑战和威胁》，其中提到“包括人工智能、量子信息科技、生物技术、半导体和自主系统在内的5个关键领域将决定中国是否超越美国成为超级大国。”¹³²

资金投入：大幅增加量子科研投入

¹³⁰ <https://www.nextgov.com/emerging-tech/2021/03/republicans-put-forth-two-quantum-computing-bills/172695/>

¹³¹ <https://www.gao.gov/assets/gao-22-104422.pdf>

¹³² https://www.dni.gov/files/NCSC/documents/SafeguardingOurFuture/FINAL_NCSC_Emerging%20Technologies_Factsheet_10_22_2021.pdf

2021 年 3 月 31 日，拜登政府宣布 2.3 万亿美元的基建和经济复苏计划，其中包括投资量子计算。5 月 27 日，美国众议院科学委员会建议国会未来五年内把对能源部(DOE)科学办公室的拨款从 70 亿美元增加到近 110 亿美元，并且将量子信息作为第一优先级，该法案在 2018 年《国家量子倡议法案》的基础上，吸纳了《科学技术量子用户扩展法案》和《量子网络基础设施法案》中的条款。2021 年 5 月，美国能源部宣布拨款 1000 万美元，用于量子信息科学和核物理的跨学科研究。该资金的目的是利用核物理学界的专业知识和能力来推进诸如量子计算和量子传感器等领域，并利用量子信息科学的进展来扩大对核物理学的理解。此外，美国国家科学基金会(NSF)也加大了对量子研究和量子教育的资助力度。NSF 为量子互联网项目拨款 500 万美元，用于开发量子互连—连接量子计算机和为量子互联网铺平道路的关键技术。同时，拨款 500 万美元资助俄亥俄州立大学量子科学教育项目。¹³³7 月 23 日，美国能源部(DOE)宣布拨款 7300 万美元用于推进量子信息科学(QIS)研究，总计 29 个项目¹³⁴将研究开发下一代量子智能设备和量子计算技术所需的材料和化学过程——这是解决气候变化和国家安全等最紧迫和最复杂挑战的关键工具。12 月 2 日，美国参议院审议的年度国防政策法案中的一项条款，寻求为量子计算加码 1 亿美元，增加对美国量子计算的资助。12 月 7 日，美国国防高级研究计划局(DARPA)官方发布一份价值 5800 万美元的量子启发经典计算(QuICC)项目的招标文件(HR001121S0041)，寻找受量子启发的求解器系统，为军事任务解决现实问题。¹³⁵

产教融合：设立并扶持量子孵化器

2021 年 6 月 3 日，美国启动量子创业工厂 (Quantum Startup Foundry)。至此，美国共设立两个量子孵化器：量子创业孵化器 Duality 和量子创业工厂 (Quantum Startup Foundry)，以培育专注于量子技术的创业公司成立和发展新

¹³³ <https://www.aip.org/fyi/2021/science-committee-envisions-expanded-doe-office-science>

¹³⁴ https://science.osti.gov/-/media/bes/pdf/Funding/2021/2449_BES_QIS_Awards_List.pdf?la=en&hash=0A30746455D320C1817CA8049451C4916A1CF87C

¹³⁵ <https://www.militaryaerospace.com/computers/article/14214102/quantum-computing-swap-military-missions>

兴初创企业，将量子企业与导师、现有公司和基础设施连接起来，创造或推进量子物理原理在技术中的应用。9月21日，美国国家科学基金会(NSF)宣布一项5000万美元的投资，以推动由融合加速器项目(Convergence Accelerator)资助的10个融合多学科的研究团队进入到第二阶段，包括量子技术团队。¹³⁶

人才资源：重视量子人才的引进与培养

2021年10月12日，美国国家科学技术委员会(NSTC)发布《国际人才在量子信息科学中的作用》(The Role of International Talent in Quantum Information Science)报告，强调量子科学的经济和安全影响、量子劳动力以及吸引外国人才和全球量子企业的重要性。

国际合作：联合技术攻关与创新研究

2021年11月4日，英国和美国签署《促进量子信息科学和技术合作的联合声明》——帮助实现量子技术的全部潜力，深化两国关系，共同开展量子领域相关研究。¹³⁷11月19日美国和澳大利亚正式签署《美国和澳大利亚关于量子科学和技术合作的联合声明》

2、中国

2021年2月20日，中国科学技术大学获教育部批准新增设5个本科专业，其中包括“量子信息科学”，这是量子信息科学首次进入中国本科教育。

2021年3月5日，“量子信息”首次出现在国务院政府工作报告中，此前，只有2016年和2018年的政府工作报告两次提及“量子通信”，但量子信息不仅包括量子通信，还包括量子计算、量子精密测量等，这意味着中国将从优先发展量

¹³⁶ https://www.nsf.gov/news/special_reports/announcements/091621.jsp?sf151621351=1

¹³⁷ <https://www.gov.uk/government/news/new-joint-statement-between-uk-and-us-to-strengthen-quantum-collaboration>

子通信转变为量子信息科学的全面发展。作为量子信息科学领先的地区,安徽省、北京市、广东省等已地方政府报告中大量提及量子信息。

2021年3月8日,《中华人民共和国国民经济与社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要(草案)》作为指导未来五年中国经济、社会、科技等方方面面发展的五年规划,这是一份具有前瞻性的文件该文件共5次提到“量子信息”,2次提到“量子计算”和“量子通信”,1次提到“量子科技”和“量子精密测量”。在十四五规划中,明确提出要瞄准人工智能、量子信息、集成电路、生命健康、脑科学、生物育种、空天科技、深地深海等前沿领域,实施一批具有前瞻性、战略性的国家重大科技项目,并计划投入1000亿元建设量子信息科学国家实验室。中国大陆31个省级行政区的地方“十四五”规划已经全部出台,其中,20多个省级行政区将量子科技纳入“十四五”规划。

部分区域“十四五”规划中的量子科技

地区	规划亮点
北京	培育国家战略科技力量。持续建设世界一流新型研发机构。支持量子科技、脑科学、人工智能、区块链、纳米能源、应用数学、干细胞与再生医学等领域新型研发机构发展。
上海	加强重大战略领域前瞻布局。围绕国家目标和战略需求,持续推进脑科学与类脑人工智能、量子科技、纳米科学与变革性材料、合成科学与生命创制等领域研究,积极承接和参与国家科技创新2030重大项目和国家科技重大任务。
广东	持续推进产业关键核心技术攻关。支持企业在人工智能、区块链、量子信息、生命健康、生物育种等前沿领域加强研发布局,增强5G、超高清显示等领域产业技术优势。开展量子计算、量子精密测量与计量、量子网络等新兴技术研发与应用,建立先进科学仪器与“卡脖子”设备研发平台。到2025年,建成广东“量子谷”,打造世界一流的国际量子信息技术创新中心和量子信息产业南方基地。
深圳	共建大湾区综合性国家科学中心。推进量子、生物医药等国家实验室基地建设,加强省部共建国家重点实验室,支持设在港澳的国家重点实验室在深圳建设分室。关键核心技术攻关重点领域包括量子信息:重点围绕未来信息材料、量子计算和模拟、量子精密测量和量子工程应用等领域开展关键技术攻关。
安徽	明确关键核心技术攻坚方向,聚焦人工智能、量子信息、集成电路、生物医药、新材料、高端仪器、新能源等重点领域。实施“3+N”未来产业培育工程,前瞻布局量子科技、生物制造、先进核能等产业。充分发挥量子计算、量子通信、量子精密测量研发领先优势,支持一批量子领域“独角兽”企业加快成长。
山西	重点攻关量子信息、精密测量、激光离子加速器等领域先进技术,加快极端光学装置项目建设。探索将废弃矿井改造为基于量子光源的引力波探测科学研究基地。
山东	在量子信息、5G、物联网、工业互联网、智能机电、光纤传感、人工智能、无人

	驾驶、生物医药、种质创新、MEMS 等领域，新创建一批省级技术创新中心、产业创新中心、制造业创新中心，加强创新链和产业链对接，形成多层次网络化创新体系。建设济南国家量子保密通信产业基地。
浙江	加强基础研究和关键核心技术攻坚，实施“双尖双领”重大科技创新计划，其中“尖峰计划”要求在量子信息、人工智能等领域，组织实施 100 项左右重大前瞻性基础研究项目。
湖北	打造世界级光电子信息产业带。涉及光、芯、屏、端、网等五大发展重点。布局 5G 通信、量子通信、光子无线通信、太赫兹通信等下一代通信领域。加快发展新型内存计算芯片、智能语音识别芯片、量子芯片、光子芯片、太赫兹超高速芯片等。
天津	支持自主可控芯片、基础软件、智能感算一体芯片、5G 射频前端模组、区块链技术及支撑系统、量子科技、工业互联网、5G 行业应用终端等新一代信息技术。提升超级计算、量子加密、区块链等信创前沿技术、关键技术攻关能力。
重庆	布局量子通信器件联合重点实验室。量子通信器件联合重点实验室入选重庆市“十四五”规划纲要重大项目清单，主要建设内容及规模：新建量子通信器件联合实验室，推进量子通信单光子探测器、光子源激光器及光量子调控集成光路器件等基础研究、技术开发、器件验证、集成应用等全方位协同创新。
江苏	聚焦量子通信和量子计算机、物质科学与量子调控等前沿基础，前瞻布局量子科技。
湖南	聚焦量子科学、系统基因科学等前沿关键问题研究领域。加强量子计算实验室建设。创新技术产品研发，推动技术应用创新，支持云计算、大数据、人工智能、区块链、量子计算、商用密码等技术在网络安全领域的应用。
福建	围绕人工智能、区块链、量子科技等新技术领域，前瞻布局新兴产业前沿科学问题研究与技术研发，加快新技术、新产品产业化应用，培育未来产业。
河北	超前布局区块链、太赫兹、智能传感器、量子通信等未来产业链，抢占发展制高点。瞄准新一代人工智能、量子信息、集成电路、生命健康、航空航天等前沿领域，实施一批发展急需的重大科技项目，积极参与国家战略性科学计划和科学工程。
河南	争取布局建设超短超强激光平台、交变高速加载足尺试验系统、量子信息技术基础支撑平台等重大科技基础设施。
辽宁	采用“项目+团队”引才方式，引进高端人才团队，引领带动机器人、集成电路、生物医药等产业以及量子科技、储能材料等未来产业快速发展。
吉林	重点发展全固态激光雷达系统、全彩色超高清 MicroOLED 显示器关键技术、高速安全激光通信技术、全光量子集成芯片及其制备系统、面向光通信应用的高速垂直腔面发射激光器研发及产业化和忆阻型类脑智能芯片关键技术研发。
四川	打造高能级创新平台。围绕生物医学与生物治疗、网络空间安全、轨道交通、脑科学、纳米、量子等重点领域，布局建设省重点实验室。积极稳妥推进量子保密通信网络建设。
广西	加快突破关键核心技术。开展重要产业关键核心技术攻坚，瞄准人工智能、量子信息、集成电路、生命健康、脑科学等前沿领域。谋划布局、第三代半导体、人工智能、量子信息、氢能与储能等未来产业，积极培育“蛙跳”产业。
云南	积极布局人工智能、先进通信网络、生命健康、柔性电子、量子信息等未来产业。
甘肃	发展壮大新兴产业。积极对接量子通信等尖端产业，抢占发展制高点。

来源：ICV 整理

2021 年 10 月 20 日，中共中央、国务院印发《国家标准化发展纲要》，提出加强关键技术领域标准研究，在人工智能、量子信息、生物技术等领域，开展标准化研究，以在国际上拥有量子标准制定的话语权。¹³⁸

11 月 30 日，国家工业和信息化部发布《“十四五”软件和信息技术服务业发展规划》，提出软件在数字化进程中发挥着重要的基础支撑作用，加速向网络化、平台化、智能化方向发展，驱动云计算、大数据、人工智能、5G、区块链、工业互联网、量子计算等新一代信息技术迭代创新、群体突破，加快数字产业化步伐。

12 月 27 日，中央网络安全和信息化委员会印发《“十四五”国家信息化规划》(以下简称《规划》)，对中国“十四五”时期信息化发展作出部署安排。《规划》提出了 10 项重点任务和优先目标，其中量子科技在这些任务和目标中都扮演着重要角色。¹³⁹

3、英国

2021 年，英国在量子领域不断加大投资力度，着力建设数据中心。2021 年 1 月，英国政府宣布支持 3 个涉及英国和美国合作者的项目——将量子技术应用于关于宇宙的基础物理问题。

为促进国内量子技术发展，英国政府实施了两大项目：国家量子计算中心(NQCC)项目和未来量子数据中心项目。其中，国家量子计算中心建设工程将在五年内获得 9300 万英镑的资金。建设国家量子计算中心的关键目标之一是在未来五年内展示超过 100 个量子比特的量子计算机。目前，NQCC 团队已经试运行其第一批量子研究和开发项目。未来量子数据中心项目由英国研究与创新局 (UKRI) 负

138 http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/10/content_5641727.htm

139 <http://www.gov.cn/xinwen/2021-12/28/5664873/files/1760823a103e4d75ac681564fe481af4.pdf>

责实施，此项目预计为英国量子工业项目提供 5000 万英镑的资金。目前，英国已建设超过 450 个数据中心。此外，英国研究和创新部门(UKRI)还宣布从其 1.7 亿英镑的商业化量子技术挑战计划中拿出 5000 万英镑(4.3 亿元人民币)用于 12 个项目，多达数十家量子产业链公司参与。仅在 2021 年，截止至本年 11 月 8 日 UKRI 商业化量子技术挑战计划就向商业主导的量子项目授予近 6000 万英镑。12 个项目如下：

UKRI 商业互量子技术挑战计划的 12 个项目

项目名称	项目金额	项目简介
Aeon-Rb 项目	250 万英镑	由 HCD Research Ltd 公司牵头的 Aeon-Rb(铷)项目已收到 250 万英镑，用于开发量子时钟，以实现对国家基础设施至关重要的超精确、超可靠的计时。
Altnaharra 项目	430 万英镑	由 Quantum Motion Technologies Ltd 领导的价值 430 万英镑的 Altnaharra 项目汇集了：Quantum Motion、英国国家物理实验室(NPL)、牛津仪器公司(Oxford Instruments)、牛津离子科学(Oxford Ionics)、格拉斯哥大学。其目的是开发一种用于集成量子比特控制和读出的低温芯片，在标准的 CMOS 代工厂制造。
自主量子技术(AutoQT)项目	530 万英镑	Riverlane 领导的自主量子技术(AutoQT)项目已收到 530 万英镑，用于解决量子计算机工作所需的基本构件——量子比特的控制问题。为了在商业上有用，我们需要可靠、容易地控制数百甚至数千个量子比特。
钙离子频率标准(CIFS)项目	210 万英镑	由 TMD Technologies Ltd 领导的钙离子频率标准(CIFS)项目已收到 210 万英镑，用于开发比当前设计更小、更轻、更便携和更坚固的高精度捕获离子量子时钟。
开发纠错量子处理器解决方案	560 万英镑	目的是开发一个更具有鲁棒性的量子计算平台，该平台更精确，更少依赖低温冷却。该项目与 Rolls Royce 合作，将把新型计算机应用于航空航天工业的关键问题。
Cryo-CMOS 项目	480 万英镑	sureCore 有限公司将解决量子计算机生产规模扩大方面的挑战，包括创造与量子计算机运行所需的超低温兼容有关的电子技术。参与该项目的成员还包括 Universal Quantum、牛津仪器公司、SEEQC 英国公司、SemiWise、Synopsys 以及格拉斯哥大学。
工业用氢传感器(HYDRI)项目	250 万英镑	由英国石油公司牵头的 HYDRI 财团的“工业氢传感器”项目已收到 250 万英镑。其目的是开发量子气体传感器，这对将氢作为一种广泛应用于家庭、工业和交通部门的能源的安全推广至关重要。
QuPharma 项目	470 万英镑	由 SEEQC 英国公司领导的药物研发量子增强计算平台(QuPharma)项目已经收到 470 万英镑，用于通过量子计算彻底改变药物发现的过程。目的是提高药物发现的速度和准确性。

未来的量子数据中心	900 万英镑	ORCA Computing Ltd 将研究量子计算如何与目前支撑和推动数字经济的数据中心集成。这些数据中心是一个庞大的系统体系,由来自一个多样化的全球供应链的数千个组件组成。由于需要处理的数据数量和复杂性不断增加,这些系统变得越来越复杂,量子系统可以帮助管理和保护这种复杂性。
迈向量子云项目	300 万英镑	量子加密上市公司 Arqit 将领导该项目,支持卫星通信网络量子安全加密技术的开发,帮助确保长期稳定的数据安全。
水下单光子成像系统项目	270 万英镑	70 万英镑将用于 Sonardyne International 领导的水下单光子成像系统项目。它将使用光子探测创建海底高分辨率 3D 地图,支持:海上风能的安装和运行、资产退役、环境监测、防御
UpScale 项目	310 万英镑	310 万英镑将用于 UpScale(集成光学实现的可扩展量子信息)项目。该项目将汇集由弗劳恩霍夫英国研究有限公司(Fraunhofer UK Research Ltd)领导的五个商业合作伙伴,开发可扩展的量子计算技术,该技术将在从药物发现到供应链管理等应用领域给许多行业带来革命性的变化。

来源: ICV 整理

2021 年 8 月,法国和荷兰宣布在量子领域“加强合作”,促进欧洲在该技术领域的战略自主;2021 年 9 月 20 日,位于英国牛津郡的国家量子计算中心(NQCC)即将开始建设。该建设工程将在五年内获得 9300 万英镑的资金,目标是加速开发可扩展的实用量子计算机,从而使英国能够继续扩展这一具有潜在变革性的新领域的边界。2021 年 11 月 4 日,英国和美国签署了一项《促进量子信息科学和技术合作的联合声明》——英国国家物理实验室(NPL)和美国国家标准与技术研究院(NIST)将探索如何通过项目的协调以及关键领域(包括量子计量、计算、时钟和未来技术标准)的交流来发展两国在量子计划之间的长期合作伙伴关系。

4、西班牙

西班牙将建设量子生态作为一项重要工作。2021 年 10 月,在西班牙部长会议上,政府批准了量子西班牙(Quantum Spain)项目。该项目的战略目标是在西班牙建立一个强大的量子计算生态系统,建造和安装首台基于欧洲技术的量子计算机。巴塞罗那超级计算中心(BSC)负责该项目的协调工作。目前该项目已有 2200 万欧元的公共投资,但若私人参与,预计将达到 6000 万欧元。其中 1000 万欧元将用于建造量子计算机,700 万欧元用于开发处理它的软件。另外 500 万欧元将

用于开发一个支持全国各地的研究人员访问量子计算机的云平台，以应用其能力解决实际问题。

5、欧盟

2021年3月欧盟成立欧洲创新理事会(EIC)，并为该机构提供超100亿欧元的总预算(2021至2027年)，用于开发和扩大量子领域的突破性创新。12月21日，EIC正式宣布为来自21个国家的99家创新公司投资6.27亿欧元，包括三家量子公司 Equall Laboratories(1000万欧元)、QphoX(未公开)和 Multiverse Computing(1250万欧元)。

2021年7月28日，随着爱尔兰签署欧洲量子通信基础设施(EuroQCI)宣言，所有27个欧盟成员国都已承诺与欧盟委员会和欧洲航天局(ESA)合作，共同建设EuroQCI——一个覆盖整个欧盟的安全量子通信基础设施。EuroQCI将成为欧盟委员会目前正在规划的空基安全连接系统的一部分。

2021年10月欧洲核子研究中心量子技术倡议(CERN QTI)发布第一份路线图，确定中长期量子研究计划。主要任务是探索量子技术如何在量子计算与算法，量子理论与模拟，量子传感、计量与材料，量子通信与网络这四个主要的量子研究领域为高能物理和其他领域带来益处。

6、法国

2021年法国在量子科技方面频繁采取行动。

2021年1月21日，法国总统马克龙宣布了为期5年18亿欧元的法国国家量子战略，在资金使用方面，将为量子计算机拨款约7.8亿欧元，为量子传感器

拨款 2.5 亿欧元，为后量子密码拨款 1.5 亿欧元，为量子通信拨款 3.2 亿欧元，为低温等相关技术拨款 3 亿欧元。

2021 年 4 月，欧洲量子产业联盟(QuIC)启动大会在网上举办。这次活动汇集了来自欧洲量子技术行业所有部门的 100 多名成员——包括欧洲大陆各地的中小企业、大公司、风险投资家以及研究机构、学术机构和其他行业协会。QuIC 联盟的成立正值欧盟制定了在欧洲进行量子研究和技术部署的宏伟计划之际，该联盟将为实现这些目标作出贡献，并在欧洲发展一个繁荣的量子产业生态系统。

2021 年 8 月 31 日，法国和荷兰签署《法荷联合声明》。目标是增强法国和荷兰生态系统之间的自然协同效应，并达到帮助培养欧洲领军人物和吸引最优秀国际人才所需的群聚效应。

此外，2021 年法国国家研究局（ANR）的“量子技术中心”开始实施 AAPR 专项，每年超 1000 万欧元用于该专项，并在巴黎、萨克雷和格勒三个城市和地区创建三个“枢纽中心”，以支持涉及量子通信专家、网络安全专家和电信设备制造商的 QKD 技术的研究。其中，量子优先研究与设备计划（The Quantum Priority Research and Equipment Program）是 18 亿欧元量子科技国家战略最重要的项目之一。该项目于 2021 年 9 月 30 日正式启动，计划在五年内投资 1.5 亿欧元围绕四个主题开展基础研究：固态量子比特、冷原子、算法、纠错和后量子密码、基于计算和密码的基本非传统量子方法。

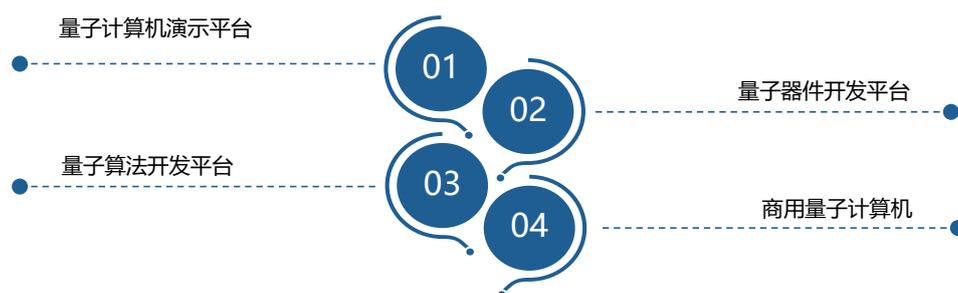
7、荷兰

2021 年 4 月，荷兰公私合营基金会 Quantum Delta NL(QANL)——负责协调和执行荷兰量子技术国家议程(NAQT)——宣布荷兰经济事务和气候政策部已向其拨款 6.15 亿欧元，用于推动量子技术的进步。到 2027 年之前，这笔资金将用

于在荷兰培训 2000 名研究人员和工程师，孵化 100 家创业公司，并建立 3 个企业 R&D 实验室。

2021 年 7 月，荷兰国家量子计划 Quantum Delta NL 宣布在代尔夫特理工大学校园内建设 12000 平方米的量子之家（House of Quantum），并作为荷兰的量子总部。依托 TU Delft，荷兰正在努力打造量子版的“硅谷”。

为了加速量子计算机的发展，荷兰量子生态系统于 2021 年 9 月成立了 ImpaQT 项目——首要任务是制定路线图：将量子计算机视为一个产品需要接口的标准化和其所有构建模块的集成，以及能够提供高质量组件并确保供应安全的成熟供应链。具体来说，ImpaQT 的产品路线图包括以下四类：



荷兰还加强与其他国家加强量子科技合作，共同开展技术攻关。2021 年 8 月，法国和荷兰签署《法荷联合声明》，打算深化和加强双边关系。关键优先事项之一是加强量子技术方面的合作。其目标是：建立欧洲量子生态系统，增强法国和荷兰生态系统之间的自然协同效应，并达到帮助培养欧洲领军人物和吸引最优秀国际人才所需的群聚效应。目前，正在考虑的工作领域包括：（1）加强研究合作。计划的主题：由法国和荷兰共同试点的欧洲 QLSI(硅中的量子大规模集成)项目指导委员会将在未来几周内决定旨在加强在硅上扩展量子计算潜力的科学方向；（2）促进研究与产业合作：大型科技公司与研究集群之间的对接；（3）协调教育和宣传工作；（4）投资于生态系统的发展。计划的首要行动：就建立“量子之家”和增加该领域的欧盟风险投资的最佳实践交流联合工作组；（5）加速欧

洲倡议，包括 欧洲量子通信基础设施(EUQCI)、量子互联网联盟(QIA)和欧洲高性能计算(EuroHPC)；(6) 鼓励创造就业。作为合作的第一步，双方已共同创建联合门户网站，并列出法国和荷兰生态系统中的工作机会，以促进量子技术跨学科的发展。

8、德国

德国将“投资加码”和“研究中心建设”作为量子科技发展的“推动剂”。

2021 年 1 月，德国航空航天中心(DLR)和弗劳恩霍夫材料力学研究所启动了一个为期两年的名为 QuESt 的项目——致力于使用量子计算机研究用于更强大电池和燃料电池的新材料。

2021 年 2 月 4 日，德国联邦教育与研究部(BMBF)资助了一个为期四年的项目——GeQCoS（基于超导量子比特的德国量子计算机），目标是基于超导量子比特构建具有新特性的量子处理器。在这个联合项目中，德国超导量子电路领域的领先专家合作开发了创新概念，用于构建改进的量子处理器。GeQCoS 开发的技术不仅会带来新的科学知识，还会通过与公司的密切联系加强德国和欧洲的量子生态系统。

2021 年 5 月 12 日，德国政府加码投资 20 亿欧元发展量子技术。预计到 2025 年，德国科学部将投入 11 亿欧元支持量子计算的研发，经济部也将投入 8.78 亿欧元支持实际应用。德国政府希望在担任欧盟轮值主席国期间，把量子计算机相关议题纳入未来欧盟的科研框架，进一步推动欧洲在这一关键技术上加速发展。

此外，德国政府也在 2021 年开始启动 3 亿欧元“量子谷”项目，目标是在十年内使慕尼黑成为世界上拥有最先进量子技术的地区之一；关于合作研究中心建

设方面，德国政府计划投资 2.54 亿欧元建设新的合作研究中心（CRC），以进一步支持大学的顶级研究。

2021 年 8 月 10 日，由德国联邦教育与研究部(BMBF)资助的 QuNET 项目演示了量子安全视频通话。QuNET 的目标是面向应用开发物理基础技术以及在现实条件下使用量子物理实现高度安全通信网络所需的技术。在这次视频会议中，QuNET 使用了多个自由空间和光纤量子通道，这是该项目的里程碑：为未来复杂的量子安全网络中的通信提供了重要见解。

2021 年 11 月 16 日，IQM 将与德国三大国家超级计算中心之一的莱布尼茨超级计算中心(Leibniz Supercomputing Centre, LRZ)、德国领先的 HPC（高性能计算）和量子系统供应商(Atos)以及德国领先的量子计算应用创新者(HQS)合作开展 Q-Exa 项目——目标是解决某些经典超级计算机无法解决的科学和产业问题，从而加强德国量子技术的应用。

2021 年 11 月底，在路透社的采访中德国总理默克尔进一步表示，从芯片开发到云计算、量子计算和电池生产等领域，向更高层次迈进的巨大成本意味着私营部门将需要更多的国家支持。

9、奥地利

奥地利联邦政府启动了名为“量子奥地利”(Quantum Austria) 的项目，旨在加速发展量子研究和量子技术领域，并与产业界推动研究和应用落地。该项目由欧洲复原和恢复基金资助，并由联邦教育、科学和研究部实施，资助金额为 1.07 亿欧元（约合人民币 8.3 亿元）。项目将持续至 2026 年，从 2021 年开始，每隔三年进行一次招标。

10、芬兰

芬兰一直走在量子计算前沿。2021 年，芬兰通过制定商业路线图以帮助芬兰企业适应新的量子技术。2021 年 4 月，芬兰国家技术研究中心(VTT)、阿尔托大学和赫尔辛基大学联合建立了芬兰量子研究所 InstituteQ，目标是利用芬兰的量子专业知识，为研究和商业创造新的机会。在 InstituteQ 框架下，VTT 建立了个具有量子计算产业联盟性质的项目—BusinessQ。BusinessQ 汇集了具有量子专业知识的公司和组织以及潜在的最终用户，旨在支持企业采用和开发量子技术和解决方案。随着 BusinessQ 的成立，芬兰将围绕 VTT 和 IQM 建立一个完善的量子生态系统。

11、加拿大

2021 年 5 月 5 日，是加拿大商业发展银行（BDC）的投资部门宣布成立风投基金 BDC Capital，专注于投资加拿大境内的早期深科技（deep tech）公司。该基金旨在帮助解决加拿大科技领域的关键缺口，将加拿大在量子科技和光子学等领域的世界级研究成果商业化和规模化，并发展新的国内科技领军者。其中 2 亿美元将被用于加速变革性技术的发展，涵盖量子、电子、光子、基础人工智能等相关领域。

2021 年 7 月 16 日，加拿大也开始启动国家量子战略。加拿大政府在官网上宣布将制定国家量子战略并征集意见。根据此前公布的 2021 年财政预算¹⁴⁰，加拿大政府将在七年内投资 3.6 亿加元（约 18 亿元人民币），以启动国家量子战略。该战略的目标是增强加拿大在量子研究方面的强大实力；发展量子技术、公司和人才；并巩固加拿大在该领域的全球领导地位。加拿大创新、科学和经济发展部(ISED)的秘书处将协调该战略。

¹⁴⁰ <https://budget.gc.ca/2021/pdf/budget-2021-en.pdf>

12、日本

为了促进与美国在量子技术、人工智能和其他顶级领域的联合研究，日本将对大学实施更严格的信息披露规定，以加强对敏感技术的控制，并限制外国研究人员参与量子技术等尖端领域。

为提升日本企业在量子领域的国际竞争力，日本政府与丰田汽车、东芝、日本电气(NEC)等其他知名公司合作成立量子研究集团(quantum research group)，以促进一项具有重大安全影响的技术的发展。

日本已经制定了一个二十年计划，以追赶中国和美国脚步。日本的二十年计划涉及四个关键领域，包括量子计算和量子密码，其基础是政府、工业界和学术界应共同努力，在全球范围内的量子竞赛中生存下来。2020年起政府每年投入300亿日元（约2.81亿美元），这也是Moonshot研发计划的重点之一，投资总额1000亿日元。根据政府的路线图，日本的目标是用10年时间制造出100量子比特的机器，在2039年左右制造出功能更强大、功能更完善的量子计算机。在全国建立8个量子技术研发基地，也包含其中。

13、印度

2019年，印度科技部在南部城市海得拉巴的一个研究所设立了一个名为“量子使能科学与技术(QuEST¹⁴¹)”的研究项目，获得3年8亿卢比（约1100万美元）的资助。

¹⁴¹ QuEST是印度政府科学技术部门开展的一项措施，用于开发量子计算机和相关技术，以推动印度量子技术的研发活动。

为鼓励研究人员在量子领域的持续研究，印度推出量子赋能科学与技术（QuEST）研究项目，并在 2021 年向印度科学教育与研究学院（IISER）的研究人员提供了 1.138 亿卢比的研究资助。

此外，印度还推出首个面向产业的量子课程，位于班加罗尔的印度科学研究院（IISc）于 2021 年 8 月开始其在量子技术领域的第一个 MTech（由 IISc 首创的跨学科计划，计划招收 20 名学生。

14、南非

南非科学与创新部已开展南非量子技术计划(SA QuTI)的第一阶段工作：为金山大学(University of the Witwatersrand)提供 800 万兰特的种子资金。南非量子技术计划是推动量子技术研究和创新的国家路线图，共有三年，主要支持三个重点领域：量子通信、量子计算、量子传感。

15、中国台湾

为应对未来的挑战，中国台湾表示将由科技部、经济部及中研院共同筹组量子“国家队”，未来 5 年将投入 80 亿新台币元(18.59 亿人民币)的“台湾量子计划”。引导产学研界共同加入量子科技的研发，建设产业合作的平台；也要在台南沙仑科学园区设立中研院量子科研基地，整合相关软硬件并培育人才，让台湾在面对即将来临的量子新时代竞争时，能够持续在量子核心技术、量子科技应用上扮演关键角色，让量子计算机为台湾创造下一个半导体的奇迹。

16、澳大利亚

澳大利亚提出将加快其经济计划，计划将投入 1 亿澳元（7300 万美元）开发量子技术，澳大利亚政府已经确定了认为对国家利益至关重要的九个技术领域。支持九项技术，其中第一项是量子技术。所承诺的 1 亿澳元中的大部分将用于澳大利亚量子研究的商业化，并与全球市场和供应链建立联系。

17、新西兰

2021 年 7 月 19 日，新西兰政府宣布了一项新的重大投资——未来七年半为奥塔哥大学 Dodd-Walls 光子和量子技术中心提供 3675 万美元的资金。该项投资旨在使 Dodd-Walls 中心能够支持新西兰的量子产业、支持新技术的发展，为新西兰提供量子教育计划，以及改善农村经济。

关于我们



作为全球前沿科技咨询机构，ICV 对新技术始终充满热情，我们专注于发布最准确客观的行业数据与观点，来帮助我们的客户做出正确的战略决策。

我们目前专注于最前沿的科技，例如智能驾驶、量子技术、人工智能和新能源等。

我们集合了全球顶尖的技术专家与行业研究团队，通过连接动态的行业与公司信息，我们的分析师将为我们的客户提供更丰富、更高度融合的视角来看待未来商业世界。

我们可以实时动态且有效的揭示新技术路线下的风险与机会，这将助力我们的客户获得最快的信息，从而更有信心地进行决策。



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2022年1月,光子盒已公开发布了30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。

iCV Tank
Technology Advisory
& Knowledgebase



2022 全球量子计算产业发展报告