光子盒研究院
QUANTUMCHINA

2025

全球量子计算产业发展展望



2025/02

量子科技年度系列报告

序言

融合赋能 产业新程

当人类文明迈入21世纪第三个十年，量子计算已不再是实验室里的科学畅想，而是成为重塑全球科技版图的核心变量。2024年，谷歌“Willow”量子处理器与中国“祖冲之三号”芯片的相继问世，标志着量子计算正式进入中美双极竞速的新纪元。2025年，这场关乎未来技术主权的博弈将迎来历史性转折——技术突破、产业融合与地缘战略的交织，正在为全球量子计算格局写下新的注脚。

美国凭借其深厚的芯片技术积淀与算法创新能力，构建了量子计算领域的“技术护城河”。从IBM的量子体积突破到谷歌的纠错算法迭代，美国企业依托顶尖人才池、资本聚合效应和开放的创新生态，持续巩固硬件与软件的双重优势。然而，技术壁垒并非不可逾越的高墙。中国以举国体制为支撑，在量子网络、超导、离子阱技术等领域实现差异化突围，未来更可以以庞大的数据资源与人工智能的深度融合，开辟了一条“量子-智能”协同发展的独特路径。

当下，全球量子计算的竞争逻辑已悄然改变：算力竞赛的终点不再是单一的物理比特数，而是量子计算与人工智能、网络通信、产业场景的深度耦合能力。值得警惕的是，量子计算的产业化进程正面临“技术理想主义”与“商业现实需求”的撕裂。超导与光量子技术路线的分野、专用与通用量子计算机的博弈、短期场景落地与长期战略投入的权衡，都在考验各国政府的战略定力。在此背景下，美国试图通过《国家量子倡议法案》2.0版，将量子优势转化为军事与安全领域的战略筹码，而中国则有条不紊，井然有序推进产业生态自主化。

作为光子盒研究院院长，我始终坚信：量子计算的终极价值不在于零和博弈中的技术霸权，而在于其对人类认知边界的突破。本报告将从技术路线、产业生态、地缘政治三维视角，解析2025年量子计算发展的十大趋势展望、三大矛盾与两类范式革命。我们试图回答一个根本性问题——当量子计算从“实验室变量”转化为“文明常量”时，人类将如何平衡竞争与合作、安全与发展、伦理与创新的永恒命题？

历史从不等待犹豫者。2025年，量子计算的“临界点”已触手可及。

光子盒研究院 院长



声明

01 本报告体现的内容和阐明的观点力求独立、客观，本报告中的信息或所表述的观点均不构成投资建议，请谨慎参考。

02 本报告旨在梳理和呈现2024年度内全球与量子细分技术和产业领域发生的重要事件，涉及数据及信息以公开资料为主，以及对公开数据的整理。并且，结合发布之时的全球经济发展状态，对短期未来可能产生的影响进行预判描述。

03 本报告重点关注2024年度量子计算细分行业发生的相关内容，以当地时间报道为准，以事件初次发布之时为准。对同一内容或高度相似内容的再次报道，若跨年度，不视为2024年发生的重要事件。

04 本报告版权归光子盒研究院所有，其他任何形式的使用或传播，包括但不限于刊物、网站、公众号或个人使用本报告内容的，须注明来源（2025年全球量子计算产业发展展望 [R]. 光子盒研究院. 2025.02）。本报告最终解释权归光子盒研究院所有。

05 任何个人和机构，使用本报告内容时，不得对本报告进行任何有悖原意的引用、删减和篡改。未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制、发表、印刷等。如征得同意进行引用、转载、刊发的，需在允许范围内。违规使用本报告者，承担相应的法律责任。

06 本报告引用数据、事件及观点的目的在于收集和归纳信息，并不代表赞同其全部观点，不对其真实性负责。

07 本报告涉及动态数据，呈现截至统计之时的情况，不代表未来情况，不够成投资建议，请谨慎参考。

研究方法

本研究报告基于系统化、科学化和多元化的研究方法论，通过深度数据挖掘、专家洞见提炼、产业建模分析与多维价值链梳理，全方位评估量子科技的技术前沿、市场潜力及其产业化路径。

01 多源数据收集与验证：本研究采用横跨多维度、多渠道的精细化数据采集策略，涵盖量子科技领域的多元数据源，包括全球量子产业链中的核心企业公开数据、领先科研机构的技术研发成果、政策法规解读、行业市场洞察及学术文献等。为确保数据的广泛代表性与严谨性，我们对采集数据进行了多轮验证与交叉比对，构建高质量的实证数据集，以支持后续分析工作的科学性与精确性。

02 专家网络与深度访谈：通过建立涵盖不同领域的多层次专家网络，本研究与量子科技领域的一线从业人员展开了深度对话。受访专家包括知名量子科技企业的创始团队及技术负责人、行业协会的资深顾问、顶尖高校及科研机构的量子科学家等。访谈以结构化与非结构化相结合的方式进行，围绕技术路径、企业商业模式及未来发展等关键议题展开，从而提炼具有高度前瞻性的洞见。

03 先进建模与数据量化分析：结合全球管理咨询领域的实践经验，研究构建了多层次分析框架与量化模型，以揭示量子科技产业的动态趋势和潜在价值。运用各类统计模型、预测算法及市场模拟技术，对投融资活动、市场规模及产业链分布进行量化分析，力求精准刻画量子科技行业的发展路径及关键驱动因素。

04 产业价值链及场景化洞察：研究采用端到端价值链分析方法，全面梳理量子科技在产业链各环节中的核心要素，从上游关键技术与核心组件研发，到中下游应用场景开发及市场拓展。系统探讨了量子技术在卫星通信、无源导航、金融、化工、材料、能源电力、基础科研、生命科学等多个重点行业的潜在变革性应用，为行业赋能提供战略参考。

05 地区与政策差异化分析：本研究从全球视角出发，开展了区域比较分析，重点评估全球各主要科技国家和地区在量子科技领域的政策扶持、创新生态、人才集聚及技术商业化等能力。基于差异化定位，揭示了区域之间的竞争优势与互补性，为全球量子科技协同发展提供洞见支持。

致谢

本篇报告由量子科技服务平台光子盒下属光子盒研究院撰写和发布。

感谢包括但不限于以下公司给予技术和素材的支持：

中电信量子集团 CHINA TELECOM QUANTUM GROUP
国盾量子 QuantumCTek
Google AI Quantum
IBM Q
SPINQ 量旋科技
QUANTINUUM
华翊量子
中国电子科技集团公司第十六研究所 THE 16TH RESEARCH INSTITUTE OF CHINA ELECTRONICS TECHNOLOGY GROUP CORPORATION
幺正量子 UNITARY QUANTUM
IONQ
硅臻 SILICON EXTREME
XANADU
中科酷原 CAS COLD ATOM
PASQAL
atom computing
intel
ARC LIGHT 弧光量子
西部超导 WESTERN SUPERCONDUCTING
中微达信
ONE 量羲
ZL CRYOGENIC
CryoPride 中船鹏力超低温
QUDOOR 启科量子
Q-CTRL

目录

01. 2024产业发展概览	8
02. 上游核心设备与器件	24
03. 硬件整机	42
04. 软件算法	62
05. 云平台	75
06. 下游应用	83
07. 全球主要国家现状与分析	93
08. 投融资分析	103
09. 供应商评价	111
10. 产业分析与预测	134
11. 产业展望	144
12. 附件	167

研究对象

本报告的核心研究对象是量子计算产业。量子计算机是一种基于量子力学原理构建的计算设备，是以量子比特（qubit）为基本单元，利用干涉、叠加、纠缠等量子特性，通过量子门操作对量子态进行演化，最终通过测量获取计算结果的物理系统。

与经典计算机不同，量子计算机利用量子并行性和量子态演化，在特定问题（如大数分解、量子化学模拟）上可实现对经典计算机的指数级加速，具有重大战略意义和科学价值，是实现未来算力飞跃的重要手段之一。

量子计算产业则是以量子力学原理为理论基础，围绕量子计算机的研发、制造、应用及生态构建形成的综合性产业体系。

当前，量子计算正处于技术攻坚和应用探索的关键时期，各技术路线均处于快速进展阶段，哪条技术路线能最终胜出仍未有定论，技术路线未收敛。

主要技术路线包括：超导、离子阱、中性原子、光量子、半导体、金刚石色心、拓扑等技术路线各有千秋，核心差异在于：物理载体（电路/离子/光子）、操控能标（微波/光频/静电）、环境需求（低温/真空/磁场）及扩展瓶颈（退相干/串扰/光子损耗）等方面。

所有技术路线均需满足以下标准：

- 量子比特定义：可区分的二分量子态（$|0\rangle$，$|1\rangle$）；
- 幺正演化：量子门操作满足幺正性（$U^{\dagger}U=I$）；
- 纠缠能力：实现至少两比特受控门（如CNOT）；
- 可扩展性：比特数N可物理扩展（$N\geq 50$为中等规模）；
- 测量兼容性：符合Born规则的概率输出。

以下对各主要技术路线分别进行定义。

超导量子计算是利用约瑟夫森结的超导电路量子态（如Transmon的电荷-相位自由度）编码量子比特，通过微波脉冲（GHz频段）操控量子态，依赖电容或谐振腔光子耦合实现多比特纠缠。超导量子计算需要运行于稀释制冷机环境（~10 mK）以维持量子相干性。

离子阱量子计算是通过电磁场（Paul/Penning阱）囚禁离子链（如Yb+/Ca+），以电子基态与亚稳态编码量子比特，利用激光诱导拉比振荡实现单比特门，通过共享声子模式的Mølmer-Sørensen相互作用完成多比特纠缠。离子阱量子计算需超高真空（$<10^{-11}$ mbar）与激光冷却（μK级）等核心设备。

中性原子量子计算是以光镊阵列囚禁中性原子（如Rb/Cs），量子比特编码于基态与里德堡态（n>50），通过里德堡阻塞效应实现受控相位门，依赖偶极-偶极相互作用（C_6系数）构建纠缠。中性原子量子计算需激光冷却（μK级）与光晶格束缚等核心设备。

光量子计算是以光子偏振/路径自由度编码量子比特，通过线性光学元件（分束器、波片）和Hong-Ou-Mandel干涉实现量子逻辑门，依赖纠缠光子源（SPDC）与单光子探测器完成测量。

半导体量子计算是利用半导体量子点中的电子/空穴自旋态（如Si/SiGe或GaAs异质结）编码量子比特，通过电控势阱局域载流子，借助自旋共振（ESR）或交换相互作用（Heisenberg模型）实现门操作。

拓扑量子计算利用非阿贝尔任意子（如Majorana零能模或v=5/2分数量子霍尔态）的拓扑简并态存储量子信息，通过编织这些任意子（即交换它们的位置），可以实现量子比特的操作。



01

2024产业发展概览

目录

01
2024产业发展概览

01 上游供应积极适配

02 中游整机不断迭代

03 下游应用仍在探索

04 云上“量超”已成大势

05 全球融资逐渐回暖

06 产业成长预期积极

2024年，全球量子计算在理论原理、技术研发、产品开发、应用探索和投融资等方面均取得了显著的进展，与此同时，随着全球量子计算的竞争愈加激烈焦灼，更多欧美国家（如美国、荷兰等国家）将禁运条目从量子计算机整机扩展到了量子计算上游设备及部件，全球量子计算资源封锁和交流阻碍情况日益严峻。中国量子计算在过去一年同样取得各项突破性进展，特别是在产业链自主化方面完成了多项核心设备与器件的研发与适配，构建了中国独立自主的量子计算产业生态。

在量子计算机整机方面，全球竞争格局未变，依旧是美国和中国处于第一梯队，欧洲与亚太地区（除中国）处于第二梯队。技术路线上，超导、离子阱和中性原子是当前实现通用量子计算的三条主流路线，光量子计算技术进展缓慢，半导体路线在扩展性等方面仍存在一定瓶颈，拓扑、分子、磁子、机械等路线目前依旧处于实验室阶段。

软件方面，使用人工智能（AI）辅助量子硬件测控及量子线路设计成为系统软件的主流，例如Google相继开发出AlphaTensor、AlphaQubit等软件。未来，量子计算或将反哺AI，比如帮助AI减少训练模型的参数等等。

算法方面，由于当前的量子计算机硬件还不足以提供实际可用的算力，因此难以在短期内实施可行的量子算法，所以量子应用算法仍以含噪中等规模量子（NISQ）算法为主，比如量子-经典混合算法、量子退火算法、量子模拟算法等。另一方面，量子纠错算法的改进有助于通用量子计算的实现。例如，Google基于其全新量子纠错码（Gröss码），提出了一种端到端量子纠错协议。

下游应用方面，随着量子优越性的演示以及量子计算云平台的搭建，更多的行业领域开始尝试使用量子计算处理实际问题。但受限于目前的量子计算机硬件水平，全球范围内的应用仍以探索尝试为主。

图表 2024全球量子计算产业生态图谱



01 上游供应积极适配

随着量子计算的快速发展，量子计算产业的上游供应链企业迎来了发展机遇期。

量子计算上游企业呈现两种发展路径：

- **专业化分工**：如测控系统（Keysight、Zurich Instruments、中微达信等供应商）、低温设备（Bluefors、Oxford等供应商）等头部企业专注核心技术迭代，与量子计算整机企业开展合作，通过模块化设计与定制化服务适配整机厂商需求。

- **垂直整合**：以IBM、Google为代表的头部整机厂商通过量子芯片自主流片、稀释制冷机联合研发等方式，以保障供应链安全并降低技术耦合风险，同时也试图拓展相关业务。

量子计算测控系统的核心供应商加速技术迭代。当前，测控系统正积极向四个方面进行技术升级：

（1）**自动化**：利用AI，实现硬件优化、自动化等功能；

（2）**低温化**：由室温方案向低温方案转变，从而有效降低互联复杂性和噪声干扰；

（3）**混合化**：将量子-经典混合架构考虑在内，促进量子处理单元（QPU）与中央处理器（CPU）更好地连接；

（4）**集成化**：方便微波信号生成、数字处理和实时解调等多种功能的集成，系统能够同时支持高并行度的量子门操作和态读取。

量子计算机的稳定运行需依赖极低温与超低噪声的特殊环境，因此需要通过制冷系统、真空系统等精密设备的协同运作来保障。其中，稀释制冷机作为超导、半导体、拓扑量子计算机的核心设备，一直受到各国特别关注。从2024年的进展来看，欧美与中国企业呈现出不同的发展趋势：

- **欧美企业**：芬兰Bluefors、英国Oxford Instruments、荷兰Leiden Cryogenics等欧美企业目前主要聚焦于产品定制、模块化设计、提高可拓展性、增大样品空间以及提高制冷功率等方面。此外Bluefors公司还对外提供量子计算芯片的测试服务。

- **中国企业**：中国电科16所、量羲技术、知冷低温、中船鹏力超低温、中科量仪、国盾量子及集焓仪器等中国企业则将重心放在国产替代与性能提升方面。通过持续投入、多次迭代，如今中国产的稀释制冷机，其各项关键性能指标均已达到国际一流水准。

02 中游整机不断迭代

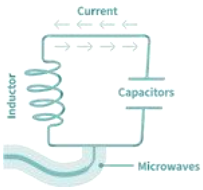
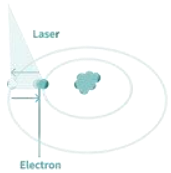
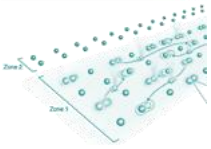
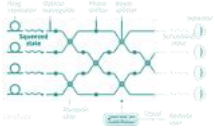
2024年是量子计算硬件快速发展的一年，如表所示，全球共有10余家企业及科研机构完成了产品迭代升级，包括美国的IBM、Google、Rigetti、Quantinuum、QCi，法国的Alice & Bob，以及中国的中国科大-国盾量子-中电信量子联合团队、北京量子院、本源量子、华翊量子、幺正量子、中科酷原、硅臻等。

从**技术路线**来看，2024年无疑超导量子计算的进展最为亮眼，全球相关领先机构均发布了新一代量子处理器。主要原因有两点，一是超导量子计算路线本身特点优势明显，比如保真度高、运算速度快、扩展性好、可控性强，从而受到更多科研人员与投资机构的关注。二是超导量子计算机与成熟的电子学、半导体工艺密切相关，而离子阱、中性原子等技术路线所用设备多为成熟度相对较低的光子学设备。

从**国家分布**来看，美国、中国的量子机构的技术更为活跃，主要原因在于美国、中国更为深刻地意识到量子计算的重要性并加快布局量子计算产业，颁布了相应的激励政策并配备了对应的资金。同时，高校与科研院所积极响应，开展量子计算研发以及量子相关人才培养。

此外，也应留意到，美国Atom Computing、芬兰IQM和法国Pasqal等企业未能按计划在2024年发布新一代产品。可见量子计算机研发仍面临技术挑战，需要持续的政策支持、长期资本投入、高端人才储备以及跨国技术协作。

图表 全球领先量子计算机信息

路线	机构	型号	发布日期	量子比特数/模式数
 超导	IBM	Condor	2023.12	1121
		Heron R2	2024.11	156
	Google	Willow	2024.12	105
	Rigetti Computing	Ankaa-3	2024.12	84
	QuantWare	Tenor	2023.02	64
	IQM	IQM Radiance	2023.11	20或54
	OQC	OQC Toshiko Gen 1	2023.11	32
	Alice & Bob	Helium 1	2023.12	16
		Boson 4	2024.05	2
	日本理化学研究所	-	2023.03	64
	中国科大、国盾量子、中电信量子	祖冲之三号	2024.12	105
		天衍504（骁鸿）	2024.04	504
	北京量子院	Yunmeng（云蒙）	2024.04	156
	本源量子	本源悟空	2024.01	72
	物理所、北京量子院	庄子号	2023.08	43
	量旋科技	大熊座	2023.04	20
 离子阱	Quantinuum	System Model H2-1	2023.05/ 2024.06	32/ 56
	IonQ	Forte	2022.05	36
	AQT	PINE	2023.02	30
	华翊量子	HYQ-A37	2023.07	37
		HYQ-B100	2024	-
	幺正量子	UQM1	2024.09	30
 中性原子	QuEra Computing	Aquila	2022.11	256
	Atom Computing	Phoenix	2021.07	100
	Pasqal	Orion Alpha	2023	200
	中科酷原	汉原一号	2024.06	100+
 光量子	中国科大	九章三号	2023.10	255
	Xanadu	Borealis	2022.06	216
	QCi	Dirac-3	2024.03	949（变量数）
	QC82	-	2021	40
	硅臻	-	2024.02	32

光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2025.2

注：量子比特数/模式数均指物理的、可用于计算的，逻辑的、耦合的不考虑在内。

03 下游应用仍在探索

量子计算的行业应用合作广泛涉及多个领域，包括教育科研、生物医药、化工材料、国防政务、能源电力、金融服务、人工智能等。鉴于当前量子计算机的发展程度，可以肯定的是，在全球范围内，目前量子计算机都未达到实用化阶段，无法就现实问题提供算力支持，现阶段的各类应用合作尚处于早期探索阶段。

量子计算的行业应用合作广泛涉及多个领域，包括教育科研、生物医药、化工材料、国防政务、能源电力、金融服务、人工智能等。鉴于当前量子计算机的发展程度，可以肯定的是，在全球范围内，目前量子计算机都未达到实用化阶段，无法就现实问题提供算力支持，现阶段的各类应用合作尚处于早期探索阶段。



教育科研

当前全球量子计算机的销售格局呈现出显著的“科研驱动型市场”特征。以IBM、IQM为代表的超导量子计算企业在全球合计售出超100台商用设备（IBM Quantum System One等），客户集中于高校、国家实验室及大型科技公司。这一现象揭示了量子计算产业化初期的核心逻辑——技术验证、生态构建与战略卡位三重需求叠加。



生化环材

量子计算在复杂分子模拟、新药研发、材料设计中展现出了广阔的应用前景。例如，腾讯量子实验室与苏州医图生科开发了一种为解决真正的药物设计问题而量身定制且不同于传统研究的混合量子计算管道。



国防军工

量子计算的战略价值引发各国军方的深度布局。美国空军率先启动量子军事化应用探索，与Quantum Research Sciences签订为空军开发量子软件的合同。



能源电力

在领域，相关企业旨在利用量子计算，实现优化生产工艺、减少能耗、创建绿色生态等目标。例如，瑞士Terra Quantum与韩国浦项制铁达成合作，通过部署Quantum AI来优化钢铁生产。双方以减少排放和能源消耗等切实成果为目标，共同展示量子神经网络在提高效率方面的潜力。



金融服务

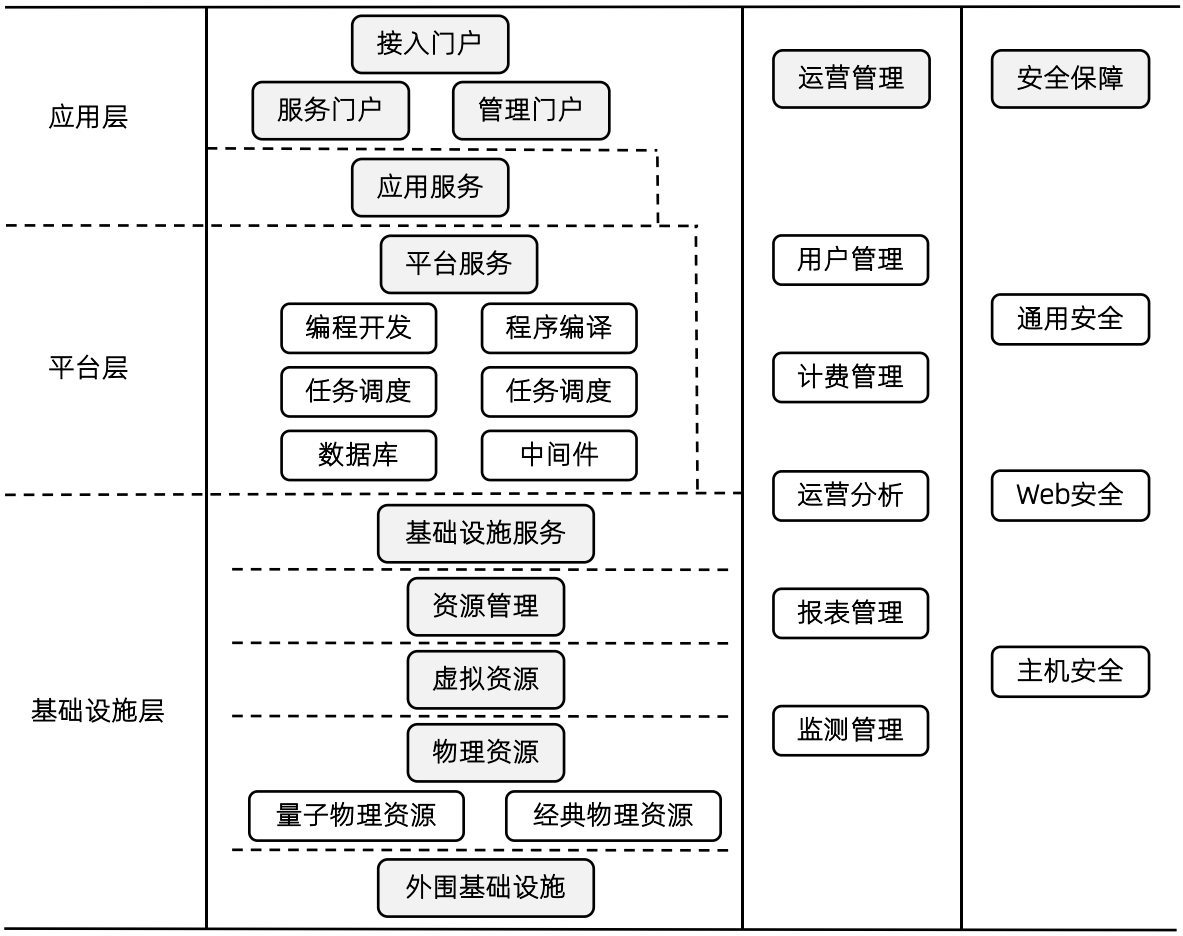
积极探索量子计算在密码学和投资组合优化中的应用。例如，新加坡国立大学和麻省理工学院探讨了量子计算技术在金融衍生品定价中的应用，特别是在不完备市场中，提出了能够高效计算衍生品鞅定价的量子算法。

04 云上“量超”已成大势

现阶段，量子计算机受建造成本、维护难度及运行环境等因素限制，用户难以低成本地访问优质的量子计算资源。将量子计算的原理与云基础设施相结合，有望显著降低量子计算资源的使用门槛，使科研人员和开发人员无需依赖量子硬件即可探索量子算法，从而为NISQ时代实现量子优势提供了一条有效路径。

近年来，量子计算机构与超算中心持续推动量子计算机与经典超算的融合。量超融合作为新型计算形态的重要补充，通过提供多样、灵活、高效的计算资源，为不同行业领域提供更强大的算力。目前，全球至少已有12个国家部署了20余个量超融合项目。例如，德国莱布尼茨超级计算中心合作将芬兰IQM和奥地利AQT的量子计算机集成到德国的超级计算机SuperMUC-NG中。欧洲高性能计算联合中心（EuroHPC JU）宣布在意大利、德国、卢森堡、荷兰等国家安装IQM的量子计算机。

图表 量子计算云平台功能框架



光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2025.2

除了经典超算，云计算、边缘计算等其他类型的算力也在不断被融合进云平台。例如，中国电信发布四算融合试验场，以天翼云（安徽）智算中心为基地，集成了“天衍”量子计算云平台和天翼云“一云多算”底座，将通信、人工智能、经典超算和量子计算四种算力有机结合，为未来的科技创新提供强大支持。

目前，各公司主要通过不断推出新功能、新工具、新业务来逐步降低用户的使用门槛，为更多行业领域提供便捷服务。例如，美国高性能计算公司Rescale与美国离子阱量子计算公司IonQ合作，将Rescale云平台已承载的1000多个交钥匙研发应用程序与IonQ的量子计算机进行融合。与此同时，各云平台也在不断丰富社群，提供科普介绍、专业教程、使用指南等，帮助用户更好的走进量子世界。

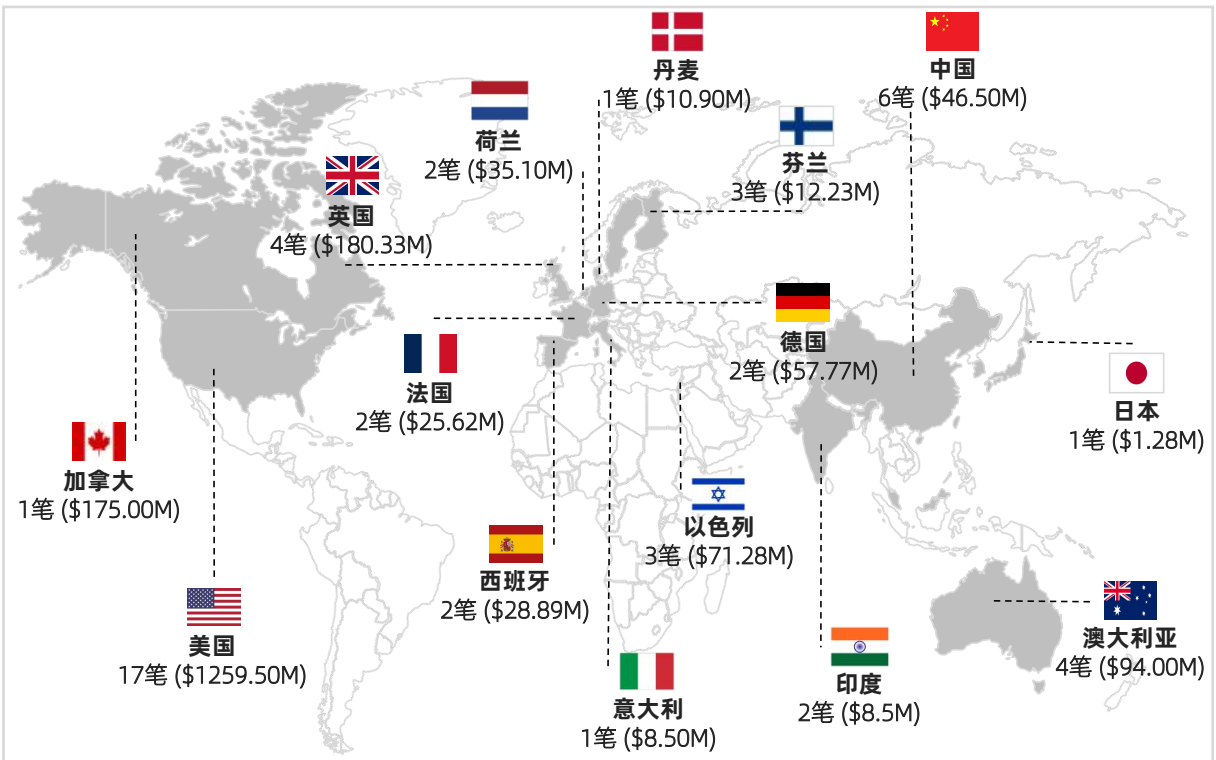
05 全球融资逐渐回暖

2024年全球量子计算领域的融资总额为20.15亿美元；相比于2023年，增长了30.34%，表明行业成长动能有所增强，资本市场对量子计算领域增加关注度和信心。

从总融资规模来看，美国以12.60亿美元的总融资规模高居首位，远超其他国家和地区，具有数量级的优势。其次是英国的1.80亿美元、加拿大的1.75亿美元、澳大利亚的0.94亿美元、以色列的0.71亿美元、德国的0.58亿美元。中国2024年的融资规模为0.47亿美元，仅位居全球第七位，为美国的3.7%，与英国、澳大利亚等国也有明显差距，反映出中国资本在量子计算领域的布局相对谨慎。

从投资交易笔数来看，美国以17笔交易保持最高活跃度，中国以6笔位列第二，英国和澳大利亚各4笔并列第三。表明美国在量子计算领域同时具备资金规模和资本活跃度的双重优势，而中国虽交易数量排名靠前，但单笔融资体量较小。

图表 2024年全球量子计算企业融资笔数与金额



ICV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2025.2

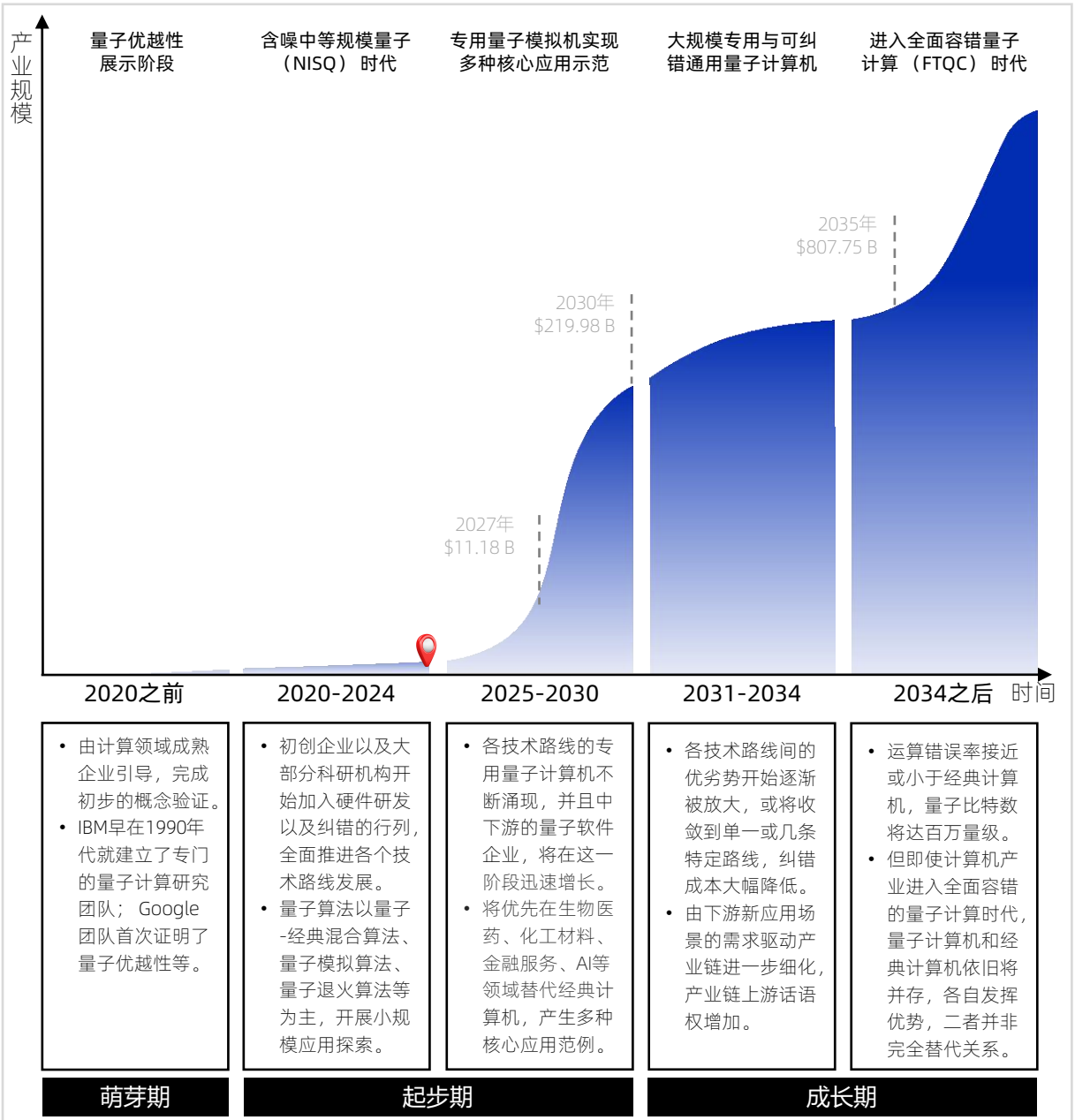
总体来看，美国在量子计算领域的融资规模与笔数仍然遥遥领先，欧洲整体在量子计算领域的投资水平和活跃度较高，中国与美国、欧洲仍有较大差距。未来，随着更多国家和地区布局量子计算产业，地区分散化将进一步加剧。

此外，美国量子计算各上市公司在2024年最后1个月也有着出色的股价表现，例如Rigetti公司股价2024年内累计上涨约1600%，这对投资者进入量子计算行业也有一定的积极作用。

06 产业成长预期积极

现阶段，我们仍处于NISQ时代，量子计算产业仍处于前期技术研发和应用探索阶段。目前量子计算硬件技术仍有相当多的挑战需要克服，比如测控系统优化、量子比特数量与质量、量子比特间的相互干扰等。2024年，Google、IBM、Quantuinum、中国科大、中电信量子、国盾量子、华翊量子等代表性机构在众多领域取得了显著突破，这为量子计算的应用时间表带来了积极的影响，但无可争议的是，在全球范围内，现阶段量子计算机仍未能提供实际应用价值。

图表 量子计算发展生命周期示意图



随着量子计算机硬件的不断升级和算法的不断优化，将会有更多软硬件企业投身量子计算领域，推动量子计算率先在某些具体的实际问题上发挥作用。

与此同时，政策、投资、技术发展和市场需求将成为推动产业前进的关键驱动力。多国政府不断加快布局量子计算产业，通过政策、项目、投资等多种方式，推动应用探索与生态建设，以争取各自在全球量子计算领域的竞争优势。

从**产业规模**来看，2024年全球量子计算产业规模为50.37亿美元，较2023年增长7.46%，预计2027年产业规模将达111.75亿美元，2030年将陡增到2199.78亿美元，而后进入通用容错量子计算前的一段过渡期，此期间内的增速相对平缓，并在2035年左右进入通用容错阶段，届时量子计算产业将再次实现飞跃，全球量子计算产业规模有望达到8077.50亿美元。

02

上游核心设备与器件



目录

02
上游核心设备与器件

01 稀释制冷机

02 测控系统

03 芯片

04 其他

01 稀释制冷机：欧美开展定制化服务，中国迎来国产化元年

在量子计算领域，稀释制冷机能够为超导、半导体、拓扑量子计算机提供10mK左右的极低温极低噪环境，因此占据着极其重要的地位。然而，尽管稀释制冷机在技术上已经基本成熟，但是受到美国及其盟友禁运政策的影响，中国与欧美在该产业中，呈现出不同的发展态势。

政策驱动产业布局，欧美禁运倒逼中国产业突围

随着量子计算技术被各国纳入战略体系，稀释制冷机作为量子计算的核心设备之一，其发展格局正面临重塑。

欧美国家除了立法限制包括稀释制冷机在内的量子科技上游设备出口，也在立项发展稀释制冷机。例如，2024年，欧盟发起并联合11国36个机构启动ARCTIC（Advanced Research in Cryogenic Technologies for Innovative Computing）项目，致力于构建欧洲自主的低温量子处理器供应链及控制基础设施。这一政策导向表明，保障稀释制冷机供应安全已成为全球共识。

自2022年欧美国家对华禁运稀释制冷机以来，中国面临稀释制冷机供应不足、性能不够等难题。但是，在2022至2024这几年里，中国电科16所、量羲技术、知冷低温、中船鹏力超低温、中科量仪、国盾量子及集焓仪器等中国企业通过自主研发，突破技术封锁，实现了从“0到1”的跨越。

中国电子科技集团公司第十六研究所
THE 16TH RESEARCH INSTITUTE OF CHINA ELECTRONICS TECHNOLOGY GROUP CORPORATION

中国电科16所自主研发的大功率稀释制冷机（XS1000型）最低温度达到10mK以下，制冷量实现1100uW@100mK，可应用于数百比特超导量子计算系统，各项指标均达到国际先进水平，并实现了1000uW稀释制冷机及搭载国产6-1-1矢量磁体和100mm大口径光学光窗等特殊稀释制冷机的批量研制交付；“面向科学研究用的超低温测试平台（XS400型稀释制冷机）”产品获评2024年度第二批安徽省“国际先进、实现自主供应能力”首台套重大技术装备。

国盾量子推出量子计算机稀释制冷机ez-Q Fridge，在交付客户后完成性能测试，实际运行指标达同类产品国际主流水平，打破了欧美在该领域的技术封锁。

2024年，是中国稀释制冷机的**国产化元年**，中国稀释制冷机的产能、性能均有大幅提升，基本满足了中国量子计算企业的需求，并且目前主流产品的大部分参数，已接近国际领先水平。

这种“逆向激励”效应源于三重驱动力：其一，中国强大的工业体系与产业链整合能力，为技术突破提供了坚实基础；其二，欧美因禁运让渡出的市场空间，为中国企业提供了发展机遇；其三，政策导向加速了技术攻关审批流程，助力企业快速推进研发工作。

产品技术趋同发展，大冷量、定制化为主要发展趋势

如今，稀释制冷机的商业化已经相当成熟，但其技术仍在不断发展。

10mK的温度已满足量子计算机的运行需求，因此追求更低温度的意义不大。目前，主要以增大制冷量、增大样品空间、提高布线密度、提高换热效率、减小振动为主。

为了能够更好地满足量子计算机的扩展需求，稀释制冷机厂商通过多种方式改进产品。具体而言，柔性带状线可弯曲、折叠，能更好地适应制冷机内部复杂的空间形状和不规则区域，可紧密贴合在冷盘或其他部件表面，提高空间利用率；时分复用、频分复用等技术也有助于减少每个量子比特使用的线缆条数。鉴于商用稀释制冷机中液氦温区制冷机功耗大且效率低，可采用大型氦液化器替代，以大幅降低功耗。稀释制冷机换热器由管套管换热器和烧结金属粉末换热器构成。在获取20mK以下低温和更大冷量时，依赖烧结金属粉末换热器，目前虽工艺成熟，但仍有学者尝试通过3D打印技术、纳米金属线材料等方式开发新型高效换热器或优化其性能。针对低振动等应用场景，设计可暂时关闭预冷制冷机（振动源）并维持运行的结构等。

这些方面的不断改进，令稀释制冷机的性能实现了飞跃发展。

量羲技术推出了1000μW大冷量无液氦稀释制冷机，可以搭载超过1500路高密度射频测量线路及与之匹配的高密度滤波、衰减模组等，向用户提供了更大规模的极低温、大冷量和极微弱信号测量的整体解决方案。

中国知冷低温推出的ZL-DR400型极低温稀释制冷机，其连续运行最低温度7.45mK，制冷功率650μW @100mK、18μW @20mK，冷板直径300mm，10mK样品空间深度达到350mm，降温时间（300K至10mK）小于30h，多项指标位于中国国产、商业化、批量生产的稀释制冷机的前列。

这些方面的不断改进，令稀释制冷机的性能实现了飞跃发展。例如，此外，稀释制冷机厂商也在根据客户需求，对产品进行定制，包括小型化、与测控系统相融合等。

Oxford Instruments推出新一代稀释制冷机Proteox，新增侧面加载“二级插件”模块设计，使用户可根据不同需求安装和更换样品、通信线路和电子器件，实现了不同用户共用一台设备进行多项实验的。

Bluefors推出了超紧凑版本的稀释制冷机系统，占地面积小，适合空间有限的实验室环境，或者需要在单个空间中放置多个单元的实验室环境。

提升单组稀释单元的性能或成破局关键

以芬兰Bluefors、英国Oxford Instruments、荷兰Leiden Cryogenics为首的欧洲企业目前处于国际领先地位，这些公司成立时间较早，技术积淀深厚，产品丰富成熟，当前多以产品迭代、提供定制化服务为主。

中国对稀释制冷机的研发起步相对较晚，但通过持续投入研发资金，现已成功研制出高性能指标的无液氦稀释制冷机，标志着中国超低温制冷技术在全球科技竞争中崛起。目前，中国产稀释制冷机除氦3 [注：稀释制冷机中的氦3用量主要由其几何结构决定。目前中型制冷机的氦3用量大致为15-20升，折算为内部容积约20毫升左右。] 仍需要进口外，其余部件基本已实现国产化替代，但距离实现大冷量与定制化，仍有较长的路要走。

在振动方面，除去芯片部分的量子比特对振动十分敏感外，稀释制冷机本身对力学干扰也非常敏感。来自机械制冷机、真空泵组等的振动都会直接造成稀释单元内部液体的振颤，动能直接转化为热能将造成一定的温升，同时还会造成温度计和测量引线的振动，从而引起较大的测量干扰。

中船鹏力超低温KDDR-1-400稀释制冷系统采用自研GM制冷机，搭载自研减振换热腔体，结合全焊接稀释单元，整体高度集成化，能够为样品区提供＜20mK的低温环境以及>400μW@100mK的制冷量，同时保证<1μm的振动水平。

在制冷量方面，目前实现0.5mW@100mK以内的制冷性能只需要单组稀释单元即可实现，而要实现5mW以上甚至更高的制冷功率，则需要很多组稀释单元的阵列，使得制冷机非常庞大、成本高昂、能耗大。如果能将单组稀释单元的性能大幅提高，将有效减少稀释单元阵列数量、减少体积和成本。但单组稀释单元性能的提高，就必须突破克服渗透阻力、超大面积换热等关键问题，以突破现有技术瓶颈。目前欧美企业的大功率稀释单元研发也正处于起步阶段，因此对于中国来说，并没有现成的技术路径可供参照，需要通过自主创新来实现技术突破。

水涨船高，稀释制冷机市场规模大幅增加

量子计算的快速发展为稀释制冷机市场带来了新的风口。尤其是在超导量子计算的推动下，全球稀释制冷机市场规模持续扩张。但在2027~2028年量子计算产业爆发之前，产品需求基本呈线性增长。

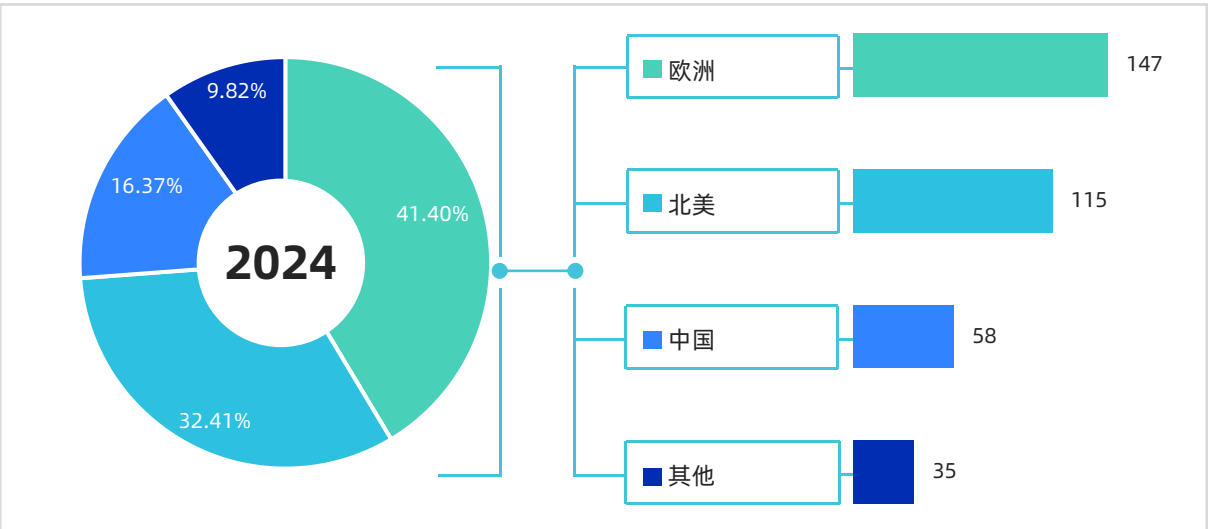
以实际出货量为统计标准，2024年10mK级稀释制冷机的全球市场规模为3.54亿美元，其中，欧洲市场规模约1.47亿美元，北美市场规模约1.15亿美元，中国市场规模约0.58亿美元，其他地区市场规模约0.35亿美元。

从欧美企业的角度来看，禁运政策虽切断了对华出口渠道，但由于其本土市场需求旺盛，因此可以在短期内迅速弥补出口缺口。而中国稀释制冷机产业在欧美禁运和自身产能不足的双重困境下，曾面临巨大挑战。由于此前长期依赖进口，禁运后，稀释制冷机在中国的产能在短期内难以满足市场的迫切需求，致使市场供需关系严重失衡，因此在2022年和与2023年，中国的稀释制冷机市场规模出现了急剧下滑。

但与此同时，中国各机构也意识到了稀释制冷机自主可控的重要性，因此迅速加大在稀释制冷机研发与生产领域的投入。科研机构积极组建专业团队，攻克技术难题；企业也纷纷加大资金与人力投入，扩建生产线。经过不懈努力，到 2024年末，中国产稀释制冷机的产能相较于2023年实现了大幅提升，市场规模也已接近禁运前水平。

总的来说，稀释制冷机行业将继续受益于量子计算等前沿领域的快速发展。未来随着超导量子计算技术成熟，行业竞争的焦点将转向“量子适配性”——即设备在热管理、振动控制等方面与量子比特系统的协同优化能力，以确保整体系统性能的稳定与高效。市场数据与技术创新轨迹共同揭示，原本欧美作为技术封锁工具的禁运政策，客观上加速了中国在稀释制冷机领域的自主化进程，为全球量子计算竞赛增添了新的变数。

图表 2024年全球稀释制冷机各地区市场规模（单位：%，百万美元）



02 测控系统：实现容错量子计算的核心支撑

量子测控系统作为实现容错量子计算的核心支撑，其核心使命是通过高保真度量子门操作、高效纠错编码与高速反馈控制，确保含噪量子计算机的可靠运行。

超导测控系统整机：自动化、低温化、混合化、集成化

量子计算测控系统是实现量子比特操控、读取和纠错的核心设备，具体包括：

- **固态量子体系测控设备**：主要针对以超导、半导体量子比特的测控，供应商包括专注于测控系统整机研发的厂商，例如美国Keysight、瑞士Zurich Instruments、中国中微达信、中国耐数电子等，以及中游量子计算整机厂商自研的测控系统，例如美国IBM、美国Google、中国国盾量子等。

- **非固态量子体系测控设备**：包括离子阱量子比特和中性原子量子比特的测控。此类测控设备多由中游整机企业采购元器件后设计、组装、调试，例如美国IonQ、法国Pasqal等公司。

当前，测控系统整机方面有四个发展趋势。

（1）**自动化**。在物理量子比特数不断扩张的进程中，使多比特系统更快、更高效地构建起来，需要系统性、流程化的标定。而在标定流程中，从逻辑层面给测控软件系统加入自动化的功能非常重要。

芬兰QuantrolOx推出量子比特自动化控制软件Quantum Edge，支持量子芯片监测与控制自动化。此外，在实现自动化的过程中，还需要AI辅助实现更鲁棒的数据拟合、更全面和丰富的逻辑判断等。

（2）**低温化**。室温量子测控系统作为经典-量子接口，为每一个量子比特提供了门脉冲偏置、微波脉冲激励和色散反射测量，以实现高保真度、大规模并行的量子态制备、逻辑量子门操控和读取。然而，工作于稀释制冷机极低温温区（~20mK）的超导/硅基量子比特需要穿越复杂的电子线路和多层制冷机冷盘，才能与室温（300K）量子测控设备相连接，这带来了严重的复杂互联、热传导、噪声、串扰和反馈延迟问题。

为取代室温测控设备，基于先进的硅基CMOS工艺制程，实现量子测控系统的芯片化集成，并工作在稀释制冷机的4K或者其他温区（例如：50K）冷盘上，成为了未来大规模量子计算的核心技术之一。

中微达信面向大规模量子比特阵列的高保真度量子门操控和并行快速量子态读取，推出了全新的“蜀山”系列低温CMOS量子测控芯片组，包含：“贡嘎”Konka超导量子比特操控芯片，“峨眉”Emei超导量子比特读取芯片和“西岭”Xiling硅基量子比特操控芯片。该技术有利于解决大量量子比特带来的稀释制冷机内部空间不足、噪声较大、信号串扰、大规模布线及反馈延迟等问题，为未来量子计算机迈向真正商用提供了有利的支撑。

Intel发布处于毫开尔文温区、高效控制大规模硅量子比特的低温测控芯片Pando Tree，令其成为首家展示低温硅自旋量子比特控制电子器件位于稀释制冷机内不同温区的半导体制造商。

通过采用先进CMOS工艺集成低温测控系统，可以将微波信号产生、数字处理与读取模块直接部署在低温环境中，可以显著降低系统复杂性和信号传输延迟。这种转变不仅改善了超导量子比特与测控设备间的耦合质量，还为大规模、稳定和高精度的量子计算提供了更为理想的物理平台。

（3）**混合化**。逐渐将量子-经典混合架构纳入考量，促进量子处理单元（QPU）与中央处理器（CPU）更好地连接。

新加坡Horizon与美国Rigetti和以色列Quantum Machines合作创建的量子测试平台将Horizon的Triple Alpha量子软件，与Rigetti的9量子比特Novera量子处理单元和Quantum Machines的OPX1000量子控制平台整合在一起，能够对硬件和软件堆栈进行完全控制。其核心目标为，建立能够在量子处理器上并行处理算法的、包含经典部分和量子部分的经典-量子混合系统，且具有较小的延迟。

（4）**集成化**。通过集成微波信号生成、数字处理和实时解调等多种功能模块，系统能够同时支持高并行度的量子门操作和态读取。

Q-CTRL

澳大利亚Q-CTRL将Boulder Opal的硬件优化和自动化功能集成到美国Keysight的量子控制系统中，增强了量子处理器特性分析和优化能力，从而快速缩短特性分析时间并提高设备正常运行时间。

未来，为实现百万量子比特通用量子计算机，除了标准的微波控制线路之外，还可以利用高质量光纤和光电探测器进行集成化的全光布线。微波控制信号可以通过电光调制器转换为光频信号，再经光纤传输至量子芯片的低温环境，最后利用高速光电检测技术将其下变频回微波频率范围。

该方式可以在低噪声尺度下进行超导量子比特的高精度控制和读取，能够满足当前超导量子信息处理的严格需求。最重要的是，光传导具有固有的低热导率和宽带宽特性，可以高精度、大规模地多路传输相干微波控制脉冲，为实现百万量子比特通用量子计算机提供了一条可行途径。

离子阱、中性原子测控系统：增稳降噪、集成化、小型化

激光器在量子计算领域应用广泛，主要用于操控离子阱、中性原子的量子比特，以及在部分光量子计算系统中发挥作用，涉及的激光器类型包括单频光纤激光器、飞秒激光器、半导体激光器、钛宝石激光器等等。为了满足这些应用场景对激光的不同要求，还需要交叉声光偏转器、电光调制器、空间光调制器等设备对激光进行调制。

美国Coherent、德国TOPTICA等国际厂商在激光器领域占据领先地位，同时中国上海频准等企业也逐渐在全球量子计算用激光器市场中崭露头角，并且在关键性能指标方面较为领先。

量子计算用激光器的发展方向包括提高稳定性、降低低噪声、集成化以及开发特定波长的窄线宽激光器等。量子计算对激光器的相位、频率及功率稳定性都有极高要求。量子比特的操控往往依赖于激光脉冲的精确控制，一旦激光频率漂移或者相位噪声过大，都会引入误差，导致量子操作失败或量子纠缠破坏。因此，开发高稳定性、低噪声的激光器成为量子计算硬件中不可或缺的一环。

澳大利亚BluGlass宣布其可见DFB激光器在115毫瓦的运行功率下实现了74%的功率转换效率和双倍的侧模抑制比，可为量子计算提供了更高效、更稳定的光源。

麻省理工学院、马里兰大学、明斯特大学、纽约州立大学、美国空军研究实验室通过将包含高亮度红外半导体量子点单光子发射器的多个 InAs/InP 微芯片混合集成到采用 300 毫米代工厂工艺制造的先进绝缘体上硅光子集成电路中，克服了将具有单发射器可调性的原子量子系统集成的障碍，借助此平台，通过共振荧光和可扩展的发射波长可调性实现了单光子发射。

此外，为了适应量子计算系统的紧凑化需求，激光器将朝着集成化和小型化方向发展，如将激光器与其他量子器件集成在同一芯片上，提高系统的集成度和性能。

未来可能需要更多定制化的激光器来满足不同量子系统的需要。例如，选择特定波长的激光器来控制原子或离子。因为每种元素的原子或离子都有其独特的光谱线，这些光谱线对应于其电子在不同能级之间跃迁时吸收或发射的光的特定波长，因此激光的波长需要与目标原子或离子的能级跃迁相匹配。

离子阱路线常用到的镱原子的1S0到1P1跃迁对应的是399nm的波长。通过精确的波长控制，激光器可以实现对特定原子或离子的精确操控，从而实现量子比特的生成和操作。例如，清华大学首次实现512离子二维阵列的稳定囚禁冷却以及300离子量子比特的量子模拟计算。团队选用411nm激光器用来操控镱离子与镱离子的特定能级跃迁相匹配，从而达到精确控制单个量子态的目的。

感光元件：降低暗计数、提高时间分辨率

感光元件是实现非固态量子比特状态读取的关键元件，包括单光子探测器（多用于光量子计算）、电荷耦合器件（多用于离子阱量子计算）。全球主要供应商有瑞士ID Quantique、美国Photon Spot、中国赋同量子等公司。

未来，量子计算用单光子探测器的发展将着重提升探测效率、降低暗计数率以及提高时间分辨率等关键指标，同时逐步降低单通道成本。

更低暗计数率方面，随着技术的进步，通过改进低温封装、增加窄带滤波器等措施，暗计数率有望进一步降低，降低至接近零的水平，从而减少噪声对量子计算的干扰，提高量子态测量的精度。

更高时间分辨率方面，将多根纳米线互嵌并行工作等技术的应用会更加广泛，使计数率持续提升，达到GHz以上，可实现单位时间内对更多光子的探测和处理，满足量子计算中高速量子比特操作的需求。

中国科学院上海微系统与信息技术研究所利用三明治结构超导纳米线、多线并行工作的方式实现最大计数率5GHz、光子数分辨率61的超高速、光子数可分辨光量子探测器。

更小时间抖动方面，借助自研低温放大器等技术有效降低读取电路噪声，时间抖动有望进一步缩小，达到皮秒级甚至更短，提高探测器的时间分辨率和精确度，有利于更精确地控制和测量量子比特的状态。

集成化与小型化方面，波导混合集成超导纳米线单光子探测器（SNSPD）技术将不断发展，使其能够与更多类型的光量子集成芯片架构兼容，如硅、氮化硅和铌酸锂等，实现更高密度的集成，减少系统体积和复杂度，为量子计算系统的小型化和可扩展性提供支持。

降低成本方面，SNSPD系统的成本之一是制冷成本，随着商业公司的持续推动和技术的成熟，未来在同一个制冷机里集成更多通道的SNSPD器件，可以有效降低单通道的成本，助力其在量子计算领域的大规模应用。

03 芯片：设计、工艺持续改进

架构设计：考虑纠错需求

在量子芯片架构设计领域，纠错算法正深刻地重构芯片的物理布局逻辑。以表面码纠错方案为例，其要求量子比特阵列构建菱形拓扑结构；而采用低密度奇偶校验（LDPC）码时则需实现跨芯片的远程耦合网络。在微观层面，需通过电磁场仿真优化量子比特耦合通道（包括激发耦合、偏置耦合、读取耦合及比特间耦合），最大限度抑制非预期耗散路径；宏观层面则需建立多级屏蔽架构，消除多控制线/读取腔间的电磁串扰。

芯片设计：EDA软件辅助设计

量子芯片为多层图形结构，需要用到不用的材料。芯片的尺寸多种多样，大小可以从6mmx6mm到30mmx30mm，形状有正方形也有矩形。芯片上面的超导量子比特，比如最典型的Transmon，尺寸大小根据不同的设计可以从0.3mmx0.3mm到1mmx1mm。因此随着比特数量不断增多，芯片会不断变大，设计的难度也随之增加。

因此，基于成熟的半导体工业基础，超导、半导体路线率先推出了对应的量子芯片EDA软件。

KEYSIGHT

Keysight推出了一款面向超导量子比特处理器设计的集成电磁设计与仿真工具的EDA（电子设计自动化）工作流QuantumPro，将电路原理图设计、布局构建、电磁分析、非线性电路仿真和量子参数提取这五大核心功能整合至其最新的设计系统平台PathWave中。

制备工艺：精密化、规模化，以提高良率、控制成本

在量子芯片加工制造过程中，随着量子比特规模的不断扩展，对制造工艺提出了三重核心要求：精密化加工能力、高良率生产体系及可规模化成本控制。

洛桑联邦理工学院与中国科学院上海微系统所合作开发了新型光子集成电路（PIC）平台，使高品质的PIC在经济上更具可行性。

IMEC在符合晶圆厂标准的洁净室中，使用行业标准方法在300毫米互补金属-氧化物-半导体（CMOS）先导线上制造的超导Transmon量子比特实现了高相干性和98.25%的晶圆产量。

浙江大学提出了一种用于约瑟夫森结制造的重叠工艺，该工艺实现了接近100%的良率。

清华大学在飞秒激光极限加工精度和单光子器件制备领域实现了接近量子极限的激光加工精度，为单光子及量子比特器件的激光制备提供了新的技术路线。

当前半导体量子点路线面临同位素提纯（如Si-28中Si-29杂质的去除）与缺陷抑制等技术瓶颈，而金刚石色心体系则受限于微纳结构的亚波长级加工精度，这两类固态量子比特系统的工程化成熟度明显滞后于超导、离子阱、中性原子及光量子等技术路线。

封装测试：常温下测试是未来努力方向

当量子芯片中的量子比特数目不断增加时，各个量子比特所需要的控制线路和读取线路以及相应的元件也会成倍地增加。由此导致芯片的设计和制作难度不断升高，从而使得芯片的性能稳定性以及良率难以达到期望的高度。

面对此现状，目前多选择使用倒装芯片，可以极大程度地解决多超导量子比特之间的串扰，而且解决了空气桥工艺有可能引起的结构损耗问题。此外还可以结合使用金属化通孔技术（如硅通孔）、利用铌或钽取代铝制备三维封装。通过将线路、元件等有选择地分配到多层芯片中，使得布线更方便。但是在量子比特进一步增加的情况下，再考虑到芯片尺寸的可接受程度，线路和元器件的分布仍然会越发困难。因此，在制作类似的倒装芯片时，不同层芯片之间的精确定位就非常重要。

此外，对封装后的芯片进行功能、性能和可靠性测试也是芯片制造过程中的关键步骤，目前已有多家量子上中游企业对外开展相关业务。

SPINQ 量旋科技

量旋科技面向缺乏必要设备或专业知识的公司及研究机构提供专业的量子芯片测试服务，包括量子芯片关键性能指标参数（退相干时间、比特频率、芯片设计参数等）的测试和标定、定制化量子算法的运行。

WAVE PHOTONICS

Wave Photonics提出一种易于使用的、用于原型设计研发的交钥匙封装解决方案，最大限度地减少量子技术公司的定制开发要求和成本。

但目前的测试方案均将芯片置于稀释制冷机中进行测试。未来，如何在常温下对芯片进行测试或将成为一大努力方向。

04 其他

极低温温度计继续朝着更高精度迈进

在极低温环境中，随着温度降低，测温难度显著提升。长期以来，中国的氧化钌温度计严重依赖进口，缺乏能在10mK以下温区进行测量的中国本土替代产品。在此背景下，国盾量子发布了自主研发的氧化钌温度计ezQ-RX56。

国盾量子发布了自主研发的氧化钌温度计ezQ-RX56，产品测温极限接近6毫开，刷新了中国纪录。与普通的氧化钌温度计相比，ezQ-RX56的标定基准在20毫开以下温区采用顺磁盐温度计，显著降低了标定过程的环境干扰和测量误差。

未来，极低温温度计将朝着更高精度的方向发展，推动量子测控系统整机性能的提升。

微波元器件紧密配合测控系统，延续低温发展方向

微波元器件是量子计算测控系统的重要组成部分，广泛应用于量子比特的状态操控和信号传输。关键器件包括：可调谐微波源、低温低噪放大器、锁相放大器、微波滤波器、耦合器等等。

供应商除了国际上具备核心技术能力的企业，例如德国Rohde & Schwarz、美国Lake Shore、瑞典Low Noise Factory、中国电科16所等，还包括部分专注于低温电子器件的初创公司，例如美国Trexon、芬兰Arctic Instruments等。

微波元器件的技术发展方向旨在满足量子计算机大规模扩展需求，例如实现与超导量子比特在低温环境下的单片集成。

未来，微波元器件将继续紧密配合测控系统，同步延续低温化、模块化的发展趋势，提升测控系统整机的性能。

中国电科16所持续开展关键技术攻关，国内率先实现量子计算用HEMT低温放大器、低温环行器／隔离器批量交付。针对超导量子计算机的干扰信号滤除、小型化、集成化以及10mK-50K宽工作温区的需求，完成0.5G、1G、8G等系列低温低通滤波器和红外滤波器集成产品研制，10mK-300K宽工作温区小型化衰减器产品已批量供货，并具备高密度低温电子系统的集成能力。

QuantWare推出了新一代超低噪声量子放大器及其更新的Crescendo-S J-TWPA，尺寸减半，性能更好。

Bluefors推出了微波读取模块，能够在毫开尔文温度下对信号进行近量子极限放大，并将附加噪声降至最低。预组装模块集成了一个行波参量放大器和用于量子比特读取的所有必要连接微波组件。

Low Noise Factory推出了一款尺寸更小的新型4-12GHz环行器/隔离器。

低温线缆：高密度布线成制约因素之一

当量子比特规模突破千位时，传统同轴电缆布线需1100+条控制线，远超当前Bluefors稀释制冷机6层热沉盘168通道/层的极限，而未来超导量子比特数目将成千上万地集成在一起，因此这种信号传输方式将面临着很大问题。与此同时，安装如此多的控制线路后，稀释制冷机有限的制冷量难以保证为量子芯片提供足够低的基底温度，从而面临着热噪声的困扰，也间接影响了对量子芯片的高精度操控与探测。因此，使用高密度布线成为重要发展方向之一。

目前，量子计算机用超导同轴电缆目前全球主要生产厂家为荷兰Delft Circuits、日本的Keycom与Coax。

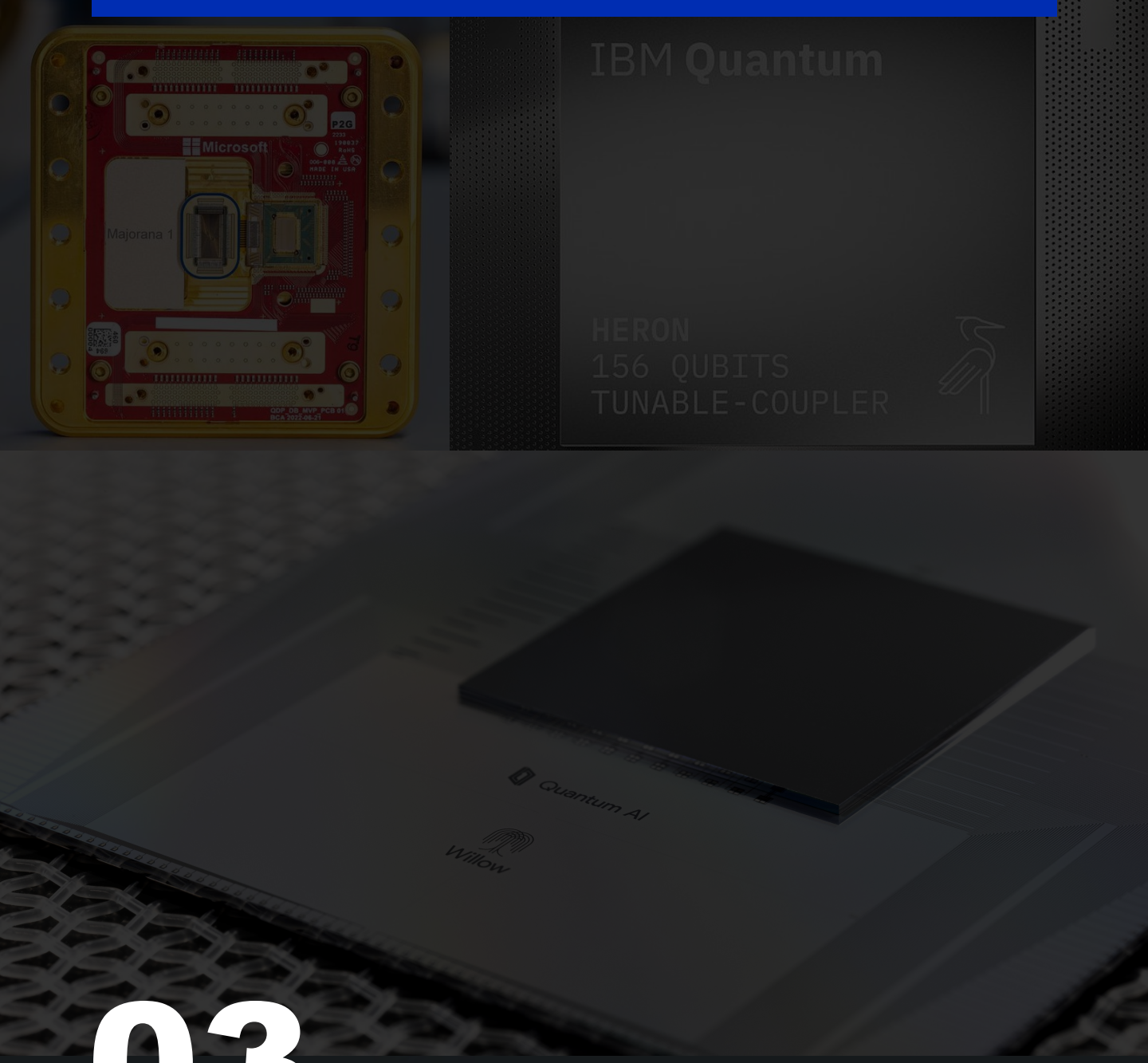
Delft Circuits的超导柔性NbTi带状线缆具有损耗为1.5dB/m@6GHz、临界温度为9K、临界电流为150mA、接触电阻小于10mΩ的优秀性能。

日本国家先进工业科学与技术研究所 (AIST) 、横滨国立大学、日本东北大学、NEC公司在液氦温区成功演示了一种可以通过单根电缆使用微波多路复用技术控制多个量子比特的超导线路，有潜力将每根线缆的微波信号密度提高约1000倍。

随着欧洲、日本追随欧美开始对中国实施禁运政策，中国企业开始抓紧时间技术攻坚。

中国电科16所完成了低温柔性线缆的电路设计、隔热设计、高隔离度设计、薄膜制备等关键技术攻关，打破了欧美日等国的技术封锁，实现了中国低温多通道柔性线缆零的突破。

西部超导成功攻克了量子计算机用超导同轴电缆的批量化制备技术难题，包括NbTi毛细管外导体的塑性成形技术，绝缘层制备工艺，微米级超细NbTi丝加工工艺等，在打破欧美日垄断、突破技术封锁、实现超导量子计算机用超导电缆的中国国产化等方面具有重要意义。


Microsoft
Majorana 1
IBM Quantum
HERON
156 QUBITS
TUNABLE-COUPLER
Quantum AI
Willow

03

硬件整机

目录 03 硬件整机

01 超导量子计算

02 离子阱量子计算

03 中性原子量子计算

04 光量子计算

05 半导体量子计算

06 其他量子计算路线

01 超导量子计算：继续领跑，高保真、高比特数、高运算速度

2024年，超导量子计算进展斐然，大致包括三个方面：

硬件指标大幅提升

2024年，超导量子计算的硬件进展主要在于提升量子比特性能，包括增加比特数、提高保真度、延长相干时间、加快运算速度等多个关键维度。例如，IBM、Google、中国科大、Rigetti相继发布了各自最先进量子处理器Heron_R2、Willow、祖冲之三号、Ankaa-3，各项参数的显著提升与出色表现充分验证了超导量子计算的技术可行性。在上述芯片发布后，量子计算相关股票随之大涨，体现出市场对新一代量子处理器的认可度。

索邦大学、Alice & Bob、法国国家科学研究中心（CNRS）、巴黎-萨克雷大学刷新了fluxonium超导量子比特有史以来的最低频率。

亚马逊网络服务公司（AWS）、耶路撒冷希伯来大学、悉尼大学、芝加哥大学、加州理工学院利用“双轨擦除”量子比特（dual-rail erasure qubit）技术，极大地简化了量子系统的复杂性和资源需求。

芬兰超导量子计算公司IQM的研究人员展示了两个关键指标的显著提升——量子比特门的保真度和量子比特的相干时间，其中，CZ门保真度达到了99.91%，弛豫时间T1为0.964毫秒，退相位时间T2回波为1.155毫秒。

南方科技大学、深圳国际量子研究院、合肥国家实验室深圳分院提出并演示了一种利用可调谐耦合器的泄漏减少方案。在耦合器的协助下，研究团队以高效率（98.1%）和计算子空间的低错误率（0.58%），进一步减少量子比特更高能级的泄漏，从而抑制了QEC周期期间的时间关联错误。

新架构继续涌现

为持续优化性能，科研机构与企业相继开发出Transmon、Fluxonium等新型量子比特架构。2024年，瑞士Terra Quantum基于扭曲铜酸盐范德华异质结构研制的Flowermon量子比特，可将相干时间提升数个数量级。在量子比特互联性改进方面，富士通采用超导磁通量子比特实现了量子退火互连与精确耦合态控制，其倒装芯片键合技术为门型量子比特互联提供了技术上的可能性。

斯坦福大学提出了一种创建铌基量子比特的方法，实现了6200万分之一秒的相干时间，比其性能最好的铌基量子比特长150倍。

Terra Quantum基于扭曲铜酸盐范德华异质结构研制的Flowermon量子比特，可将相干时间提升数个数量级。

奥地利科技学院、意大利国家研究委员会纳米科学研究所与高等师范学院、米兰理工大学的研究人员提出了一种由平面锗制成的gatemon。通过在薄垫片顶部蒸发铝来诱导二维空穴气体中的超导电性，垫片则将超导体与锗量子阱分开。然后，将约瑟夫森结集成到Xmon线路中，并电容耦合到传输线谐振器。通过谐振器和双音谱展示了在宽频范围内的量子比特可调性。时域表征揭示了高达75 ns的能量弛豫时间和相干时间。

瑞典查尔姆斯理工大学的研究人员展示了硅上铝平面transmon量子比特，其平均时间为T1、能量弛豫时间高达270μs（对应的Q=500万），并且最高观测值可达501μs。通过材料分析技术和数值模拟，研究了能量损耗的主要来源，并制定、展示了缓解能量损耗的策略。

AI助力量子纠错

量子纠错领域，Google的成就最为亮眼。展望未来，利用AI提升实时解码速率将成为该领域的重点研究方向，并有望进一步提升超导量子计算的可靠性和实用性。

Google在Willow芯片上突破表面码纠错阈值，成功实现码距7的纠错码与码距5的实时解码，并完成码距29的重复码验证。开发了一个基于transformer的递归神经网络AlphaQubit，用AI辅助来解码表面码。

总体而言，超导路线依托成熟的电子工业体系，在当前已成为技术最成熟、性能最优越、从业者最集中的量子计算分支之一。预计在中短期内，超导量子计算仍将维持其在量子计算领域的主导地位。长期来看，随着其他技术路线配套设备的不断突破，量子计算的内部格局或将面临调整。

02 离子阱量子计算：稍逊风骚，高保真却难扩展

2024年，离子阱量子计算进展同样巨大，但整体不如超导。趋势大致包括三个方面：

三种方案研究重点各异

离子阱量子计算领域存在三种主流方案，分别是量子电荷耦合器（QCCD）、量子中继、基于交叉声光偏转器（AOD）的二维平面任意寻址方案，其代表企业分别为Quantinuum、IonQ与华翊量子。不同方案的技术特性差异导致研发重心有所分化。

采用**QCCD方案**的Quantinuum，通过网格化表面电极泡利阱来控制离子晶体，突破量子计算机规模化与商业化的核心瓶颈——“布线问题”和“排序问题”。

采用**量子中继**方案的IonQ于2024年成功实现了离子-光子纠缠以及远程离子-离子纠缠，进一步提升了其光子互连技术水平。

采用**AOD寻址方案**的华翊量子则在2024年完成了最新一代离子阱量子计算整机HYQ-B100的研发，其基于低温单片离子阱系统中的二维离子晶体架构，能够实现超过512个离子量子比特的稳定囚禁冷却以及300离子量子比特的量子模拟。此外，作为后起之秀，幺正量子于2024年正式发布自主研制的高通光离子阱量子计算工程机，该工程机系统具有独特的高通光性能，兼容2xNA0.32和2xNA0.64四个大数值孔径，工作距离均为15mm，可稳定囚禁和冷却108个离子，双侧激光独立寻址超过30个离子，单比特门保真度>99.6%，两比特门保真度>98.5%，两离子串扰低至0.001。

IonQ实现了商业级离子-光子纠缠、远程离子-离子纠缠，标志着IonQ在增加量子比特数道路上取得了两个关键进展。

清华大学、华翊量子公司组成的研究人员通过设计长程自旋-自旋相互作用，观察到自旋纽结劈裂成不同位置的纽结叠加，从而产生表现出非局域性和量子干涉的“薛定谔纽结”。此外，通过制备具有不同相位的相邻纽结的叠加态，观察到了波包在不同方向上的传播，从而明确验证了叠加态中的量子相干性。

美国离子阱量子计算公司IonQ宣布在下一代钡离子开发平台上实现了超过99.9%的双量子比特门保真度。

美国离子阱量子计算公司Quantinuum提出了一种可扩展的方法，用于在基于网格的表面电极Paul阱中控制离子晶体，并在对多物种晶体进行分类和重排的输运操作的背景下，对其进行表征。

以色列魏茨曼科学研究所、Quantum Art提出了一种整体的、可扩展的、具有大型离子晶体的量子计算架构来克服“离子运动的高加热速率”和“密集的运动谱”两个问题。该方法依赖于动态操作的光势，该光势可立即将离子晶体分割成可管理大小的单元。

清华大学、合肥国家实验室、华翊量子、新基石科学实验室组成的研究团队展示了在由四个离子构成的2D晶体中，任意两个离子对之间实现两量子比特纠缠门。利用对称放置的交叉声光偏转器（AOD）驱动拉曼跃迁，并实现了低于0.1%的寻址串扰错误；设计并演示了一种通过交替寻址两个目标离子的门序列，使其能够与任何单离子寻址技术兼容，且不会因为多束寻址光束而产生串扰。

中国科学技术大学、幺正量子提出并实验展示了一种基于多目标和声光偏转器的低串扰光学寻址系统，其具有低串扰（近邻离子串扰小于千分之一）、高效率（独立离子微秒级的寻址切换）、可扩展性（可适用二维近千离子比特的操作）等优势，为量子容错计算提供了可靠的技术路径。

芯片阱保真度惊艳四座

除上述主流方案外，英国Oxford Ionics采用芯片阱方案取得突破：单、双量子比特门保真度达99.9992%、99.97%，SPAM保真度达99.9993%。与其它三种路线相比，使用芯片阱的核心差异在于使用电子设备替代激光来执行量子门操作，其优势主要体现在：一是电子技术成熟度高；二是半导体工艺兼容性强；三是单元复制扩展较为便利。然而，该方案也存在明显劣势，比如无法实现全连接，以及相干时间仅为微秒级，较短。目前该方案已实现10量子比特的操控，但未来的发展潜力还有待进一步验证。

英国离子阱量子计算公司Oxford Ionics推出了一种将离子阱技术与硅芯片技术相结合的嵌入式策略，使得量子比特的控制组件能够直接嵌入到硅片中，从而实现了高达99.9992%、99.97%的单、双量子比特门保真度，以及99.9993%的SPAM保真度。

逻辑量子比特数大幅提高

伴随物理量子比特数量与保真度提升，各机构加速推进离子阱量子纠错研究。

Quantinuum与Microsoft等合作，基于四维立方体码演示了保真度最高为99.9%的12个逻辑量子比特。Quantinuum与Google等借助错误检测码，利用52个物理量子比特创建出具有50纠缠逻辑量子比特的GHZ态，码距为2，保真度为98.09%到99.06%之间。

总体而言，2024年离子阱技术的研究重点依然集中在量子比特扩容、纠缠能力强化与保真度优化这三个方向。展望未来，一方面，预计将有更多的机构投身于离子阱路线的量子纠错研究；另一方面，随着离子阱量子比特规模的不断扩展，部分方案存在的劣势可能会被进一步放大，甚至面临被淘汰的风险。

03 中性原子量子计算：后起之秀，易扩展却低保真

中性原子路线方面，2000年，因斯布鲁克大学Jaksch团队最早提出利用里德堡原子实现量子门；2012年，巴黎高等师范学院Haroche团队成功将里德堡原子穿过微腔，首次实现了光与原子之间的纠缠。此后，科研人员相继提出各种利用里德伯原子体系实现相位门、CNOT门和CZ门的方案，不断丰富着中性原子量子计算的技术手段。

2022-2023年，中性原子路线迎来爆发期，多篇重磅研究成果发表在了《Nature》等顶尖期刊上，引起了全球学术界和产业界的广泛关注；进入2024年，中性原子路线发展势头依旧强劲，但成果不如超导、离子阱亮眼。

中性原子囚禁数实现飞跃

中性原子路线具备优异的量子比特扩展能力，使得单次囚禁量子比特数的世界纪录不断被刷新。

加州理工学院利用光镊阵列囚禁了6100多个中性原子，并且阵列内超精细量子比特的相干时间为12.6秒，但在量子门保真度方面仍落后于超导与离子阱体系。

Atom Computing演示了“基于光镊和腔增强光学晶格的协同组合，从重复填充的原子库中增量填充目标阵列”的组装原子阵列新范式。1225 个位点的光阱阵列的近确定性填充（每个位点99%占据率）。

达姆施塔特工业大学、马克斯-普朗克量子光学研究所平铺多个微透镜生成的光镊阵列，每个阵列都由独立的激光源操作，实现了3000个量子比特位点的组合二维构型，平均数为1167(46)个单原子量子系统。



马克斯-普朗克量子光学研究所、慕尼黑量子谷、慕尼黑大学、PlanQC通过将原子从一个实验运行回收到下一个实验运行，同时不断重新加载原子并将其添加到阵列中，实现了密堆积阵列，其中超过1000个原子存储在光学晶格中，以2.5秒的净循环时间连续填装，每个循环中重新加载约130个原子。



马克斯·普朗克量子光学研究所与苏黎世联邦理工学院的研究人员展示了一种量子寄存器，其使用光镊和光晶格确定性地组装光腔中的二维原子阵列。利用单个原子寻址光束，刺激每个原子发射光子，并展示了多路复用原子-光子纠缠，从生成到检测的效率接近90%。

中国、欧洲抓紧布局中性原子路线

美国在中性原子量子计算领域保持技术领先，QuEra Computing已研发出拥有256原子量子比特的类比量子计算机，而Atom Computing的下一代1000比特中性原子量子计算机也处于研发之中，预计将于2025年发布。

中国方面，2024年，中国迎来了首台商用中性原子量子计算机——汉原1号，实现了从无到有的突破，打破了欧美的垄断。



中科酷原推出了中国首台原子量子计算机——汉原1号。汉原1号采用激光冷却和囚禁的单原子作为量子比特，可用量子比特数目达到100个以上；利用微波实现的单比特量子门，保真度大于0.999；具备多量子比特的纠缠能力和任意量子比特间的连接；能适用于全局操控的量子模拟和线路式的量子计算。



清华大学、北京大学联手利用魔法态蒸馏、序连码阵列、容错逻辑多受控Z门等策略以及中性原子平台的非局域连接性、并行门操作、集体可移动性以及原生多受控Z门，高效容错地实现非Clifford门。

中国科学技术大学研究团队成功构建用于求解费米子哈伯德模型的超冷原子量子模拟器——“天元”。该模拟器以超越经典计算机的模拟能力首次验证了该体系中的反铁磁相变，朝着获得费米子哈伯德模型的低温相图、理解量子磁性在高温超导机制中的作用迈出了重要的第一步。

欧洲在中性原子上的布局也不容小觑。比如法国Pasqal、德国Planqc、意大利ITQuanta等公司都在研发中性原子量子计算机。莫斯科国立大学和俄罗斯量子中心也于2024年年底展示了俄罗斯首台中性原子量子计算原型机，其具有50个量子比特，使用原子为铷原子。

法国Pasqal将超过 1110 个原子囚禁在约 2000 个阱中，证明了大规模中性原子量子计算的可行性。在 Pasqal 的量子计算架构中，这些原子被囚禁并使用电磁场进行操控。这些原子的内部能态充当量子比特的量子态，操控量子比特可执行量子操作和量子算法。在 6K 低温环境下，成功利用大型光镊阵列（多达2088个位点）囚禁单个铷原子。

随着对中性原子的测控技术逐步成熟，预计未来会有更多高校、科研院所和企业选择布局中性原子路线。然而，目前如何在大规模原子阵列中实现高保真度的量子门操作，仍然是现阶段中性原子量子计算领域亟待攻克的难题，并将直接影响该技术的进一步发展和应用。

04 光量子计算：进展缓慢，技术挑战较大

光量子路线具备诸多其他路线不具备的优点，比如，光子能够长时间保持相干；光子难与其他微观粒子发生相互作用；在常温环境下也能保持系统稳定运行；此外，光量子计算的器件可沿用现有半导体和硅光工艺制程，加之其“飞行比特”属性，让时分复用技术成为可能，这使得光量子可以从空间和时间两个维度实现规模扩展，是现有主流可扩展的技术路线中首个达到百量子比特规模的技术路线，也被视为是最有希望实现百万量子比特的解决方案之一。

部分机构转向专用光量子计算

光子在具备稳定性优势的同时，却也带来了操控上的弊端。低能条件下，光子间几乎无法产生有效相互作用，这一特性导致光子量子比特难以直接执行双量子比特门操作。如今，光量子计算硬件整机的发展方向已逐渐从尝试构建通用量子计算机，转向专注于完善专用量子计算机，比如搭建用于模拟费米子-哈伯德模型的模拟机。

上海交通大学、合肥国家实验室、上海理工大学、图灵量子的研究人员提出了一个在二维三角晶格上具有三个光子的量子行走，该量子游走被映射到 19 × 19 × 19 的高维状态空间，并构建了一个具有 6859 个节点和 45486 条边的复杂图。通过利用输出组合的统计特征并结合机器学习技术，成功地验证了实验的非经典性质。

中国科学技术大学、利兹大学的研究人员利用光子量子系统，并采用双光子关联和无耗散虚时演化，来模拟两种不等价的马约拉纳零模编织操作。结果表明，所得振幅在数学上等同于琼斯多项式。光学平台具有高保真度，使研究人员能够通过确定相应的琼斯多项式来区分各种链环，如Hopf链环、Solomon链环、Trefoil纽结、Figure Eight纽结和Borromean环。

通用光量子计算的尝试仍在继续

尽管如此，仍有许多机构积极探索其他方式来实现通用光量子计算，比如，基于融合的量子计算（FBQC）、时间仓（time-bin）编码等。FBQC由PsiQuantum提出，利用资源态生成器（RSG）生成少量光子的纠缠态，并通过融合设备将这些资源态融合成更大的簇态，然而，该方案存在明显难点，即检测概率会随着构成簇态的光子数的增加呈指数式下降。

时间仓方案是2024年机构选择的主要方案，并取得了多项进展。例如，加拿大国家研究委员会与渥太华大学提出了一个利用光子进行超快时间仓编码的量子信息处理平台，具有飞秒到皮秒时间尺度上的共线时间干涉网络的固有相位稳定性，为时间仓方案的进一步发展提供了技术支撑。

维也纳大学、米兰理工大学、布鲁塞尔自由大学基于单空间模式下的时间仓编码（time-bin encoding），维也纳大学、米兰理工大学和布鲁塞尔自由大学设计出一种多光子处理的资源高效架构（resource-efficient architecture），大大减少了物理开销。

新加坡国立大学提出了一种方法，仅使用条件位移（CD）门和量子比特读取来证明腔之间的非高斯纠缠。CD见证源于对Bochner定理的应用，该定理揭示了两个负值之间的联系：即约化Wigner函数的负值和部分转置的负值。

加拿大国家研究委员会、渥太华大学提出了一个利用光子进行超快时间仓编码（ultrafast time-bin encoding）的量子信息处理平台。利用飞秒到皮秒时间尺度上的共线时间干涉网络的固有相位稳定性，提供了一条实现可扩展性的途径。

中国台湾国立清华大学演示了在单个光子的32个时间仓或时间维度中对信息进行编码。通过实验实现了一种在高维上操控单光子的实用方案，进而在单个光子上实现Shor算法的编译版本。

硅臻提出将波导模式作为编码量子信息新自由度，实现片上波导模式自由度的相干调控及量子受控非门操作。

硅臻已成功调试基于22模式通用光计算网络芯片的全可调光量子计算机，并流片32模式芯片，可实现单光子干涉、双光子干涉、玻色采样和受控非门等量子计算过程。后续将接入本源量子计算云平台，面向全球用户提供算力服务。

中国科学技术大学、合肥硅臻芯片技术有限公司提出了一种大规模 PIC 的全局校准方法。该方法利用自定义网络，通过最小化测量数据集的负似然，同时学习 PIC 上所有热光移相器的非线性相位-电流关系。此外，使用这种校准方法也可以同步提取所有静态分束器组件的反射率。

此外，2024年光量子路线在构建量子网络方面同样取得了重大突破。

中国科学技术大学基于量子门隐形传态协议，成功实现跨7.0公里量子节点的非局域量子门操作，突破了现有技术通常仅支持节点内或百米级距离的限制，为构建大规模量子计算网络奠定基础。

05 半导体量子计算：未来迷茫，工艺成熟但举步维艰

半导体量子计算因与现有半导体工艺具备高度兼容性，展现出独特的发展潜力，吸引了全球至少15家机构投身相关研究。

2024年，半导体路线进展众多，但缺乏突破性进展。半导体技术路线以硅/锗硅异质结构为核心架构，当前面临的主要瓶颈集中在高纯度材料制备难度大以及电子/空穴量子态初始化精度不足这两方面。这些问题严重制约了逻辑门保真度的提升，进而阻碍了半导体量子计算的快速发展。

与半导体工艺相结合

Intel作为半导体路线的代表企业，在2023年发布12量子比特硅基处理器Tunnel Falls后，并未继续提高量子比特数，而是在2024年转向与传统半导体生产线相结合，并成功实现单量子比特门保真度达99.9%的全晶圆参数采集能力。

新南威尔士大学、墨尔本大学将磷离子以99.95的置信度注入硅晶体中，同时精确定位在芯片内，提供了一种灵活且可扩展的方式来制造量子计算机的供体量子比特。

英特尔推出了一种300mm低温探测工艺，能够获得跨整个晶圆的自旋量子比特器件的大量数据。实现了99.9%的门操作保真度，是全CMOS工业制造的量子比特中所达到的最高保真度水平。

新南威尔士大学、ARC量子计算和通信技术卓越中心、Diraq、桑迪亚国家实验室、庆应义塾大学、墨尔本大学、皇家墨尔本理工大学介绍了两个弱交换耦合电子系统中的通用单量子比特和双量子比特门的实验演示和层析扫描，这些电子通过离子注入与硅中引入的单磷供体结合。研究观察到交换相互作用对量子比特一致性没有影响。通过使用门集层析扫描（GST）量化量子运算的保真度，并使用通用门集创建电子自旋的纠缠贝尔态，保真度为91.3±3.0%，并发度为0.87±0.05。

代尔夫特理工大学、荷兰应用科学研究组织（TNO）在2×4的锗量子点阵列中定义了四个单重态-三重态量子比特，并展示了每个量子比特的双轴单量子比特控制以及所有邻近量子比特对之间的SWAP风格的双量子比特门，平均单量子比特门保真度为99.49(8)-99.84(1)%，Bell态保真度为73(1)-90(1)%。

架构设计不断创新

目前，半导体路线尚未成熟，架构设计仍处于不断创新的阶段。例如，亚琛工业大学采用的SpinBus架构，利用电子穿梭的方式来连接量子比特，该架构具有低工作频率和增强量子比特相干性的优势，为量子比特的连接提供了新的思路。

Diraq推出了一种算法初始化协议，使硅量子计算处理器能够在1K以上正常运行，即使在20倍高温下运行硅量子计算处理器，热能远高于量子比特能量，也可以准备纯双量子比特态，并结合射频读取，实现保真度高达 99.34%的读取和初始化。

亚琛工业大学推出了SpinBus架构，该架构使用电子穿梭来连接量子比特，并具有低工作频率和增强的量子比特相干性。

荷兰代尔夫特理工大学QuTech和Kavli纳米科学研究所与QuTech和荷兰应用科学研究组织（TNO）展示了自旋量子比特可以在多个量子点之间穿梭，同时保留其量子信息。在最小量子点链中，完成了自旋基底态在超过300微米的有效长度上的穿梭，并展示了叠加态在对应于9微米有效长度上的相干穿梭，通过结合动态解耦，可以将其扩展到49微米。

九州大学、大阪大学、波鸿鲁尔大学通过精确的量子控制和锁存过程，展示了在双量子点（DQD）系统中，双锁存机制（DL）机制如何有效抑制这些错误，实现了创纪录的99.94%的自旋读取保真度。

EDA软件辅助硬件设计

此外，与超导路线相似，由于半导体量子计算与现有半导体工业的兼容性良好，因此适用于该路线的EDA软件也在同步开发中。

Quobly与Nanoacademic Technologies推出全球首款用于半导体自旋量子比特的商用有限元建模软件QTCAD®，该软件也是目前最先进的半导体硬件数字模拟工具之一。

总体而言，在2024年，半导体量子计算的发展态势相对平稳，主要聚焦于架构设计的创新、协议搭建的完善、保真度的提升以及运行温度的提高等关键方向。未来一旦关键材料、技术取得突破，或将极大地推动该路线产业化进程。

06 其他量子计算路线：静水流深，优点各异却困难重重

金刚石NV色心逐渐掉队

目前，金刚石NV色心技术在量子传感领域成绩斐然，展现出极高的应用价值。然而，在量子计算领域，它却面临着诸多严峻挑战，例如，操控过程复杂且困难，信号读取效率低下，量子比特的可扩展性差等。这些问题限制了金刚石NV色心路线在量子计算领域的发展，致使其在计算领域的地位逐渐边缘化。在2024年，金刚石色心量子计算的研究进展相对平缓，研究重点主要集中在优化保真度以及延长相干时间方面。从长远来看，凭借其自身较长的相干时间这一独特优势，未来有可能在量子存储器领域得到应用，为量子信息存储提供新的解决方案。

芝加哥大学、阿贡国家实验室、爱荷华大学、日本东北大学采用磁子在金刚石NV色心量子比特之间进行选择性通信。该方法适用于室温，原则上可以推广到其他光学寻址自旋量子比特。

中国科学技术大学、浙江大学展示了一种金刚石存储介质，它利用荧光空位中心作为坚固的存储单元，提供了高达14.8 Tbit/cm^{3}的存储密度，200飞秒的短写入时间，以及估计在百万年量级的超长免维护寿命。通过平面和体积成像展示了高速读取，具有超过99%的高保真度。

中国科学技术大学、固态微波器件与电路全国重点实验室、合肥国家实验室、巴塞罗那大学、Ideaded公司展示了在Landau-Zener哈密顿量背景下任意量子态跃迁和一组通用的单量子比特门的实现。利用时域Rabi振荡的良好相干特性，实现了超过Mandelstam-Tamm量子速度极限的速度，并且比传统量子控制技术产生的能源成本显著降低。

拓扑量子计算仍未取得突破

拓扑量子计算依托拓扑能隙的物理保护机制，从理论层面来讲，具备天然的容错特性，并且拥有突破现有技术格局的巨大潜力，被视为量子计算领域的一颗“潜力股”。然而当前仍受限于马约拉纳零模自由态制备困难（需极端低温与超净环境）、拓扑编织操作精度不足、有限尺寸下的退相干效应等核心问题，尚未脱离实验室验证阶段。

武汉量子技术研究院、华中科技大学、清华大学、中国科学院大学利用迈斯纳效应可以在小于 10mT 磁场下在导体/拓扑绝缘体/超导体异质结中产生拓扑相,由此诱导具有非阿贝尔统计属性的马约拉纳零模。

澳大利亚墨尔本大学、德国汉堡大学探索了一种通过将磁链耦合到单分子磁体来初始化基于磁体-超导体混合网络的拓扑量子比特的协议。

不列颠哥伦比亚大学、南开大学、汉诺威大学探索出一种在对称保护的拓扑相中进行量子计算的新机制，该机制通过密集地打包打破对称性的测量来实现。这一反直觉的方法不仅保持了计算的有效性，而且在合理的物理假设下，成为了最节省资源的模式。

全新量子计算方案持续涌现

2024年，量子计算领域仍有诸多新的方案持续涌现出来。比如，苏黎世联邦理工学院把双层石墨烯作为量子计算平台，使用的能谷量子比特的相干时间是传统自旋量子比特的20倍；苏黎世联邦理工学院研制出全球首个机械量子比特；剑桥大学卡文迪许实验室则在常温条件下对六方氮化硼实现了单个光子发射缺陷自旋的量子相干控制。

在量子计算技术路线尚未收敛的大背景下，层出不穷的新兴方案不断拓展着该领域的发展维度，为量子计算的未来发展注入了新的活力。然而，目前这些新方案整体成熟度较低，在技术稳定性、计算效率等方面仍存在不足，并且尚未展现出超越超导、离子阱等主流路线的显著优势。

苏黎世联邦理工学院将双层石墨烯作为量子计算平台，使用谷量子比特（valley qubit），谷量子比特的相干时间是传统自旋量子比特的20倍。

剑桥大学于常温条件下在六方氮化硼（hexagonal boron nitride，hBN）这种层状范德瓦尔斯材料中实现了对单个光子发射缺陷自旋的量子相干控制，可用于在室温下实现与多量子比特量子寄存器或量子传感器耦合的自旋量子比特。

哈佛大学、科罗拉多大学博尔德分校、美国国家标准与技术研究院的研究人员利用内禀分子资源，使用单独囚禁的 X1Σ NaCs 分子，实现了双量子比特 iSWAP门。将分子在 1.9 μm 的距离进行相互作用 664 μs，研究人员在同时存有两个分子的试验中创建了一个保真度为 94(3)% 的最大纠缠贝尔态。

苏黎世联邦理工学院演示了在固态机械系统中实现单声子非线性态。系统中的单声子非谐性超过超过退相干率6.8倍，能够将其用作机械量子比特并演示初始化、读取和单量子比特门。

中国科学技术大学在磁子-自旋混合系统上实现量子逻辑的室温实验，成功演示了对单个自旋态的高保真量子控制，并通过灵活的相干磁子驱动，在HQS上实现了量子博弈的实验性实施。



04

软件算法

目录 04 软件算法

01 量子计算软件

02 量子计算算法

03 容错量子计算

04 量子计算基准测试

01 量子计算软件：创新突破推动实用化进程

量子计算软件涵盖多个方面。在量子芯片设计环节，量子电子设计自动化（EDA）软件发挥着重要作用；在量子计算机运行时，则需要依赖量子测控软件、量子主机软件以及量子编译软件来确保系统的稳定运作；而当各行业借助量子算法库、量子软件包开展不同领域的研究时，量子应用软件则成为关键工具。本章重点聚焦主机软件、编译系统与应用开发工具三大核心组件。

量子主机软件：AI辅助系统运行

量子主机软件肩负着量子计算任务调度、资源分配与异构算力协同等核心功能，是保障量子系统高效运行的关键所在。例如，IonQ推出量子操作系统Quantum OS以及一系列混合服务套件。此外，与量子EDA、测控软件类似，量子主机软件同样在引入AI，例如，以色列Quantum Machines和美国Rigetti成功对量子计算机进行AI驱动的校准。Quantinuum与Google等引入人工智能软件AlphaTensor来最大限度优化T门，使量子线路的优化自动化。Google基于transformer的递归神经网络，推出了用于解码表面码的AlphaQubit。

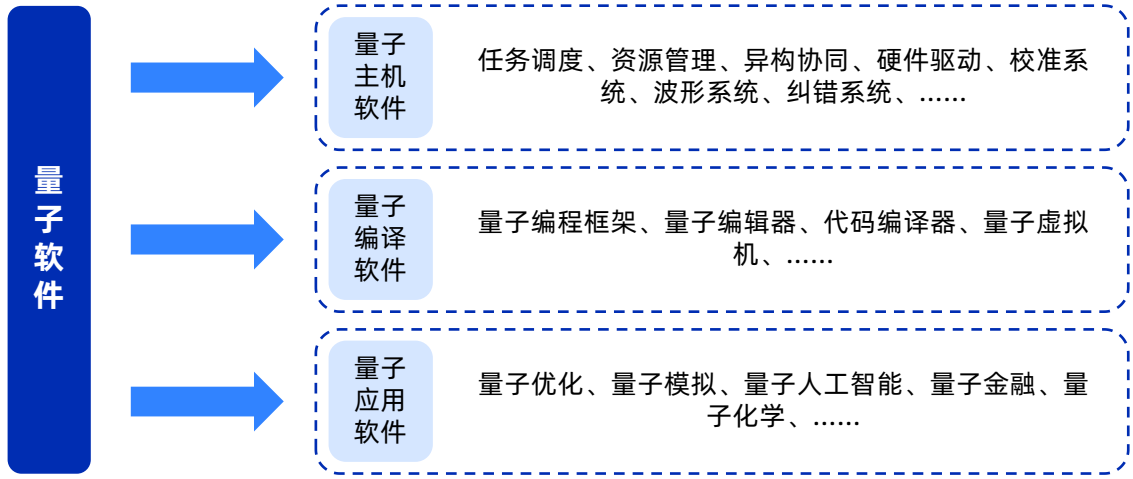
量子编译软件：软件栈迭代频繁

量子编译软件在规范量子编程范式的同时，为量子程序提供了编译与执行的环境。2024年是量子编译软件迈向成熟的重要一年，众多量子领军企业纷纷发布相关软件。Microsoft于1月发布Azure Quantum Development Kit 1.0，使其速度提高了100倍，体积缩小了100倍，并能在浏览器中运行。Quantinuum于1月发布量子自然语言处理软件lambeq 0.4.0版本，提高可用性以及字符串图处理速度。Intel于2月推出量子软件开发工具包Ouantum SDK 1.1。IBM于3月发布Qiskit SDK 1.0，进一步提高量子硬件电路优化速度和存储资源占用量等性能，5月将其扩展至整个软件开发栈，8月发布1.2版本。NVIDIA于11月推出混合量子-经典开源编程平台CUDA-Q的扩展版CUDA-QX。

量子应用软件：推动下游应用开展

量子应用软件通过集成开发组件、调试工具与算法库，有力地支撑了跨领域的研究创新。目前，诸如IBM、Microsoft、中电信量子、国盾量子、量旋科技、本源量子等均在其云平台嵌入开发组件、调试优化工具和应用算法包等，支持开发者设计和执行量子计算任务并获得运算结果。例如，Microsoft推出生成化学和密度泛函理论加速等功能，用于化学和材料科学研究与应用场景开发。中电信量子基于经典深度学习模型，构建出量子-经典混合神经网络模型，在提高预测准确性的同时，提升模型的运行速度和计算效率，在灾害性天气监测、预报和预警方面实现了更快的预测。

图表 量子软件分类



光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2025.2

02 量子计算算法：量子-经典混合算法成为当今攻坚方向

目前，从数学层面严格证明具备量子优越性的量子算法，仅有Shor算法。鉴于当前量子硬件的发展水平，含噪中等规模量子（NISQ）算法成为当下量子计算算法领域的主要研究方向。在此背景下，一系列专门面向NISQ设备设计的算法相继被提出，其中量子-经典混合算法备受关注。

混合算法的核心特征在于，量子计算仅负责处理特定子任务，而经典系统主导参数优化循环。对应到硬件上，量子处理器执行含参量子线路并输出计算结果，经典优化器依据损失函数对参数进行调整，通过不断迭代逐步逼近最优解。二者分工协作，共同解决复杂问题。也就是说，量子-经典融合计算包含了“混合”与“协同”两大基本特征。

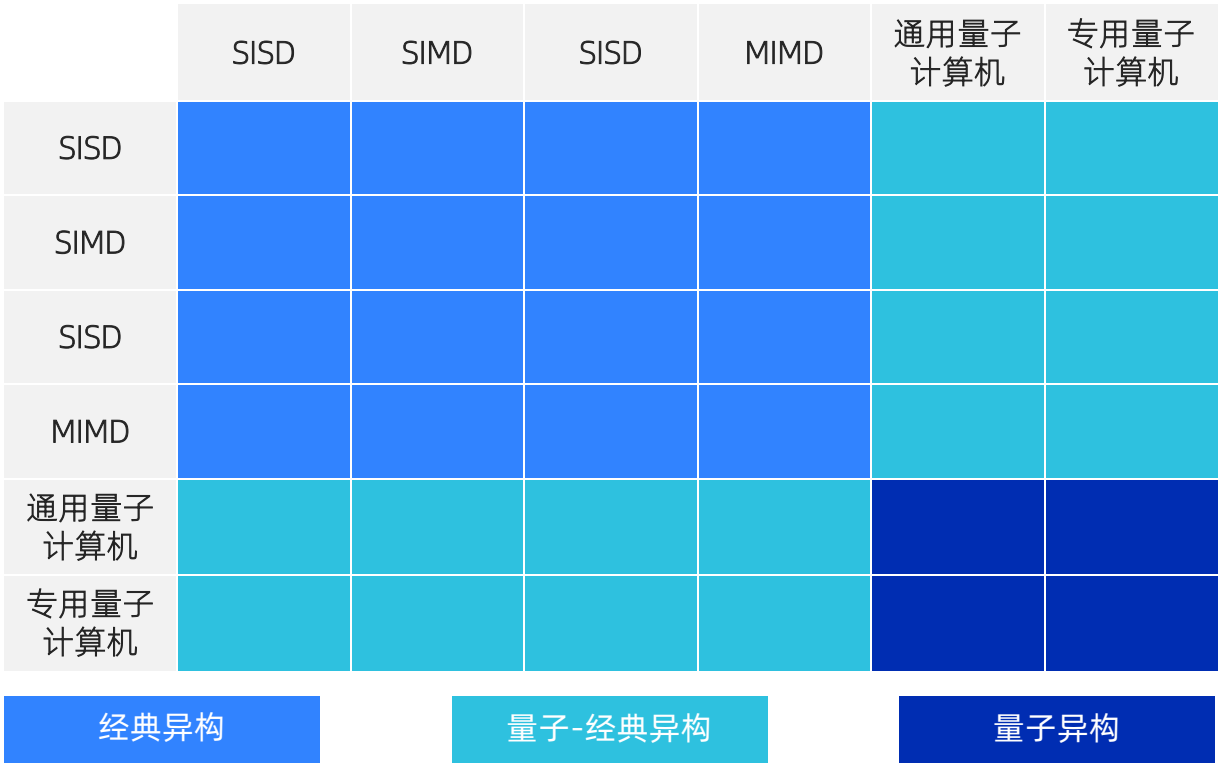
量子-经典混合架构有效地缓解了当前量子资源受限的难题，为量子计算在现有条件下的发展提供了可行路径。

三种量子-经典混合计算模型

为了使量子-经典混合算法能够更高效地运行，学界提出了三种量子-经典融合计算模型，分别是**量子随机存取机**（Quantum Random Access Machine，QRAM）模型、**受限异构量子-经典计算**（restricted Heterogeneous Quantum-Classical Computing，restricted HQCC）模型和**改良异构量子-经典计算**（refined HQCC）模型。

对这三种模型进行比较，QRAM假设经典计算机和量子计算机都是理想的，因此无需考虑量子比特的相干时间、经典计算-量子计算交互时延等因素，开发者可以更专注于计算逻辑本身；受限HQCC考虑了NISQ硬件的现状，更契合当前的硬件性能发展状态，但其无法实现动态的量子线路，限制了其应用范围；改良HQCC既充分考量了NISQ硬件性能，又兼顾了未来的应用需求，具有更广阔的应用前景，有望在未来量子-经典混合计算中发挥重要作用。

图表 量子-经典异构算力混合示意图



光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2025.2

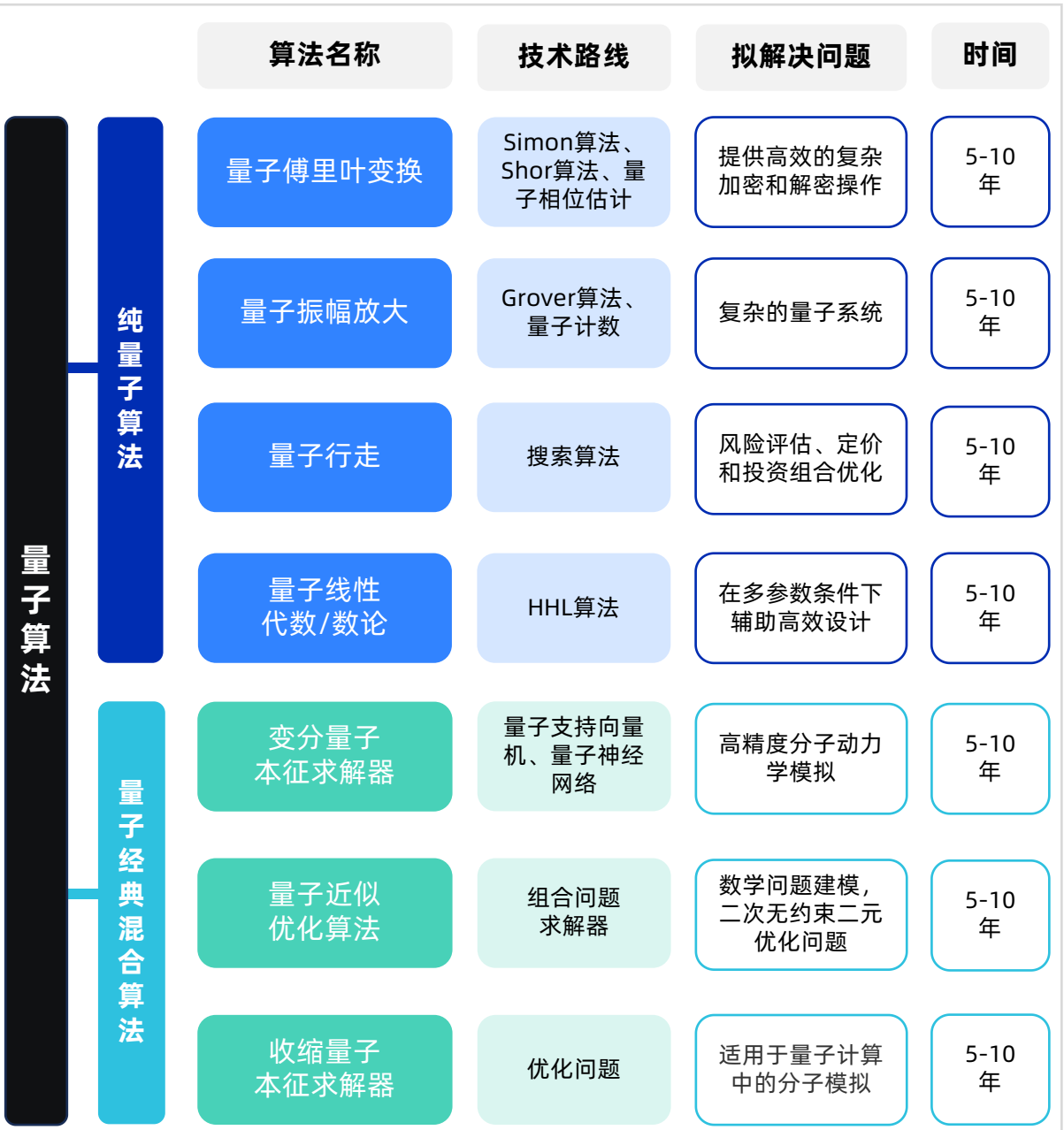
注：经典计算按照弗林分类法可以分为四类：单指令流单数据流机器（Single Instruction Single Data，SISD）、单指令流多数据流机器（Single Instruction Multiple Data，SIMD）、多指令流单数据流机器（Multiple Instruction Single Data，MISD）和多指令流多数据流机器（Multiple Instruction Multiple Data，MIMD）。

多种量子-经典混合算法

代表性的量子-经典混合算法包括变分量子本征求解器（Variational Quantum Eigensolver，VQE）、量子近似优化算法（Quantum Approximate Optimization Algorithm，QAOA）、量子机器学习（Quantum Machine Learning，QML）和量子神经网络（Quantum Neural Network，QNN）等。

这些算法在多个领域展现出了广阔的应用前景。例如，VQE凭借其对量子系统基态能量的高效求解能力，在量子化学领域大放异彩，能够精准模拟分子结构，助力新型材料的研发。QAOA则在组合优化问题中表现出色，如在物流配送的路径优化中，能够快速找到最优配送路线，显著降低运输成本。

图表 量子算法分类



光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2025.2

注：量子启发式算法是否属于量子算法仍有争议，这里暂不讨论。

03 容错量子计算：抑错、纠错、缓错协同演进

量子计算机中的错误可能来自错误的态制备、错误的门、错误的测量，甚至宇宙射线。因此，要想实现容错量子计算，量子抑错、量子缓错、量子纠错技术的协同配合尤为关键。

量子抑错：使用机器学习实现动态调整

量子抑错通过动态解耦、错排线路、反馈控制、拓扑码、避错码等方法，减少量子噪声对量子计算系统的影响，从硬件层面抑制错误的发生。以基于机器学习的量子抑错技术为例，其核心在于运用监督学习模型预测量子线路中的潜在错误，并动态调整线路结构，以此将错误对最终计算结果的影响降至最低，为应对量子噪声干扰提供了创新性的解决方案。

QCentroid将Q-CTRL公司的量子抑错软件Fire Opal集成到其平台中，从而为用户提供增强的量子优化工作流程。该公司表示，此次合作旨在通过提供无代码界面和广泛的API工具来简化量子应用程序的开发和部署。这将使企业和研究人员能够有效地测试、优化和管理量子算法，让他们更专注于风险分析、电动汽车位置放置和化学模拟等真实用例。

量子纠错：软硬件结合或成破局之法

量子纠错是一种能够识别并纠正量子计算机中错误的算法，通过纠缠多个物理量子比特来编码一个逻辑量子比特，能够在物理量子比特出现错误的情况下，在逻辑量子比特中保留正确信息，编码方案包括Shor码、Steane码、表面码、低密度奇偶校验码等。

2024年，美国Google、Microsoft、Quantinuum、Atom Computing等公司在量子纠错方面取得了亮眼的进展，使得逻辑量子比特数提升至50个（只生成逻辑量子比特，但无法高频参与计算）。

未来，量子比特的物理布局需要与纠错码对齐；反过来，量子纠错也将不再局限于纠错码本身，而是与各种类型的量子比特相结合。



Alice & Bob将量子低密度奇偶校验码与玻色子猫量子比特相结合，能够有效纠正相位翻转错误，显著降低量子纠错所需的开销。此外，线路优化策略将必须考虑软件级别的拓扑。



PlanQC、亚琛工业大学、于利希研究中心提出了小规模免测量的量子纠错方案。这些方案对线路级噪声具有容错能力，且以多种启发式方法为指导来实现容错：提取冗余校验子信息，并使用额外的单次标志量子比特。与传统的测量和前馈方案相比，这些免测量方案的额外开销适中。

量子缓错：仍有不可替代的应用价值

量子抑错和量子纠错发生在硬件层面，而量子缓错发生在软件层面。通过软件查看量子比特及其连接的错误率并开发噪声模型，可能在线路执行后自动应用，也可能在测量结果返回后刻意应用。当测量结果返回时，软件会反向应用噪声模型。例如，零噪声外推故意增加来自量子线路的噪声，然后反向工作以确定没有任何噪声的结果可能是什么。

当下存在一种观点，认为随着量子纠错技术的不断进步，使用后处理的量子缓错技术重要性会降低。但实际情况并非如此，量子缓错技术在复杂度为O(1/ε)的线路中仍能发挥重要作用，有着不可替代的应用价值。



以色列量子计算软件公司Qedma将其量子抑错与缓错（QESEM）解决方案作为IBM新推出的Qiskit函数目录中的一项服务提供给用户使用。

04 量子计算基准测试：愈发重要与迫切

近年来，随着量子计算软硬件的快速发展，对于反映其性能的需求日渐增长。因此，用于量化量子计算机性能的基准测试应运而生。接下来，将从概念、现状、需求、趋势四个方面对量子计算基准测试进行介绍。

基准测试的定义

基准测试是指通过设计客观有效的测试方法、工具和系统，对硬件、软件、算法、云平台等特定对象的功能和性能指标进行定量和可对比的测试，类似于“体检”用各项标准化的指标来反映身体不同器官或系统的健康状况。

当前，受硬件架构、计算成本等多方面因素的影响，并非所有的基准测试方法都具备同等的价值。

现有基准测试的通用性欠佳

目前，现有量子计算基准测试存在通用性欠佳的问题。首先，诸如玻色采样、随机线路采样等基准测试无法适用于所有技术路线，同时在面对同一技术路线下的异构架构时，不具备实现良好的兼容性。其次，不同基准测试虽然具有互补性，但由于各自的测试重点和方法不同，因此不能直接用于相互比较。

未来，在设计基准测试时，将以开发更加通用的基准测试框架，建立跨技术路线的性能指标换算体系等为导向。

设计基准测试时应考虑多个维度

早期广泛应用的随机基准测试等方法，主要聚焦于量子门错误率的测量，但它们无法有效反映出量子计算机的系统复杂性。事实上，以量子计算机硬件为例，其并不仅仅是量子比特阵列的简单组合，核心架构中还深度集成了控制器、编译器、路由器和调度器等经典计算组件，这些子系统共同承担量子比特管理与控制的核心功能。

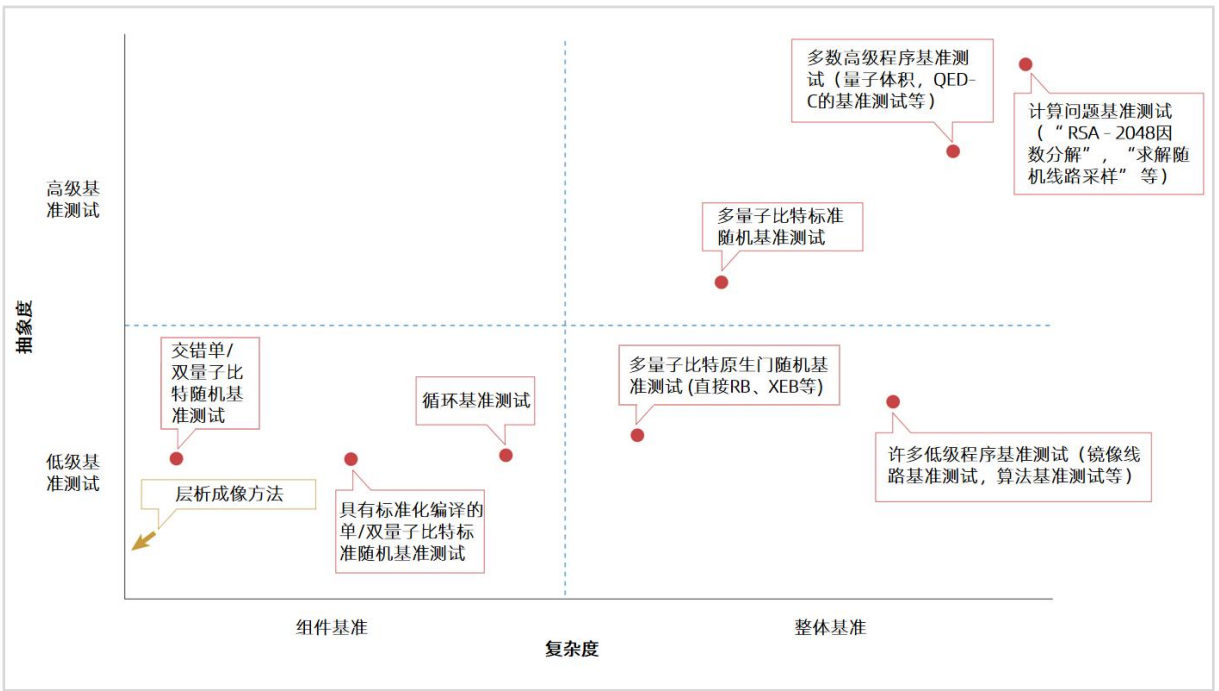
这种复杂架构催生出多维度基准测试方法：一方面，针对特定子系统展开专项测试，深入剖析各子系统的性能表现；另一方面，从不同的性能维度进行综合评估，全面考量量子计算机的整体性能，并最终给出量子体积（QV）这类综合量化指标，方便直观评估量子计算机的优劣。

开发实用基准测试是努力方向之一

当前的基准测试普遍缺乏实用价值，而基于实际问题开展基准测试则更具现实意义和应用价值。因此，推动基准测试的实用化无疑也是未来的重要发展方向之一。

通过将基准测试与实际应用场景紧密结合，例如将量子优化、量子模拟、量子机器学习等领域的相关指标纳入评估体系，能够更准确地评估量子计算系统在不同应用场景下解决实际问题时的性能表现，为量子计算技术的实际应用和产业推广提供有力支持。

图表 基准测试的种类



光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2025.2

来源：Proctor, T., Young, K., Baczewski, A.D. et al. Benchmarking quantum computers. Nat Rev Phys 7, 105-118 (2025).
编译：光子盒研究院

基准测试需要在软件层面进行集成

如今，多种量子计算技术路线并行，如超导、离子阱、光量子、中性原子等，每种技术都有其独特的特点和性能指标。将各类基准测试集成至统一软件平台（类似经典计算领域的性能评测工具），可为不同技术路线的量子计算机提供一个公平、一致的测试环境，既有利于技术路线横向对比和性能评估，也具备可观的商业应用潜力。

当前，具备量子计算基准测试功能的工具集、软件包相继问世。



2022年，量子经济开发联盟（QED-C）推出了开源项目QC-App-Oriented-Benchmarks，支持多种量子计算API和平台，用户可以在不同平台上执行基准测试并收集结果，从而更直观地了解各技术路线的优劣势。

北京量子信息科学研究院
Beijing Academy of Quantum Information Sciences

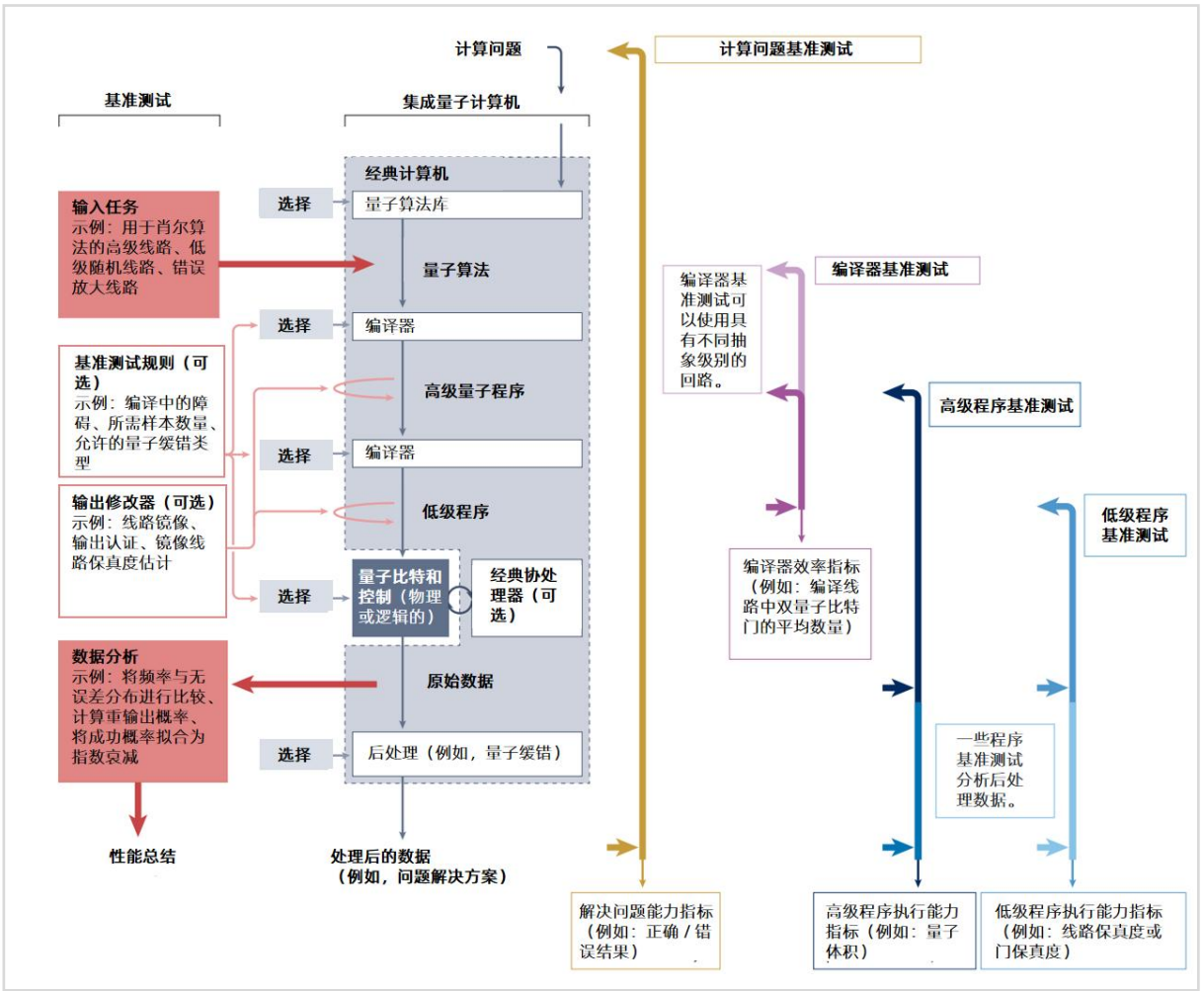
2024年，北京量子信息科学研究院量子操作系统与软件研发团队开发了一款涵盖比特级、线路级、系统级、应用算法级系统性能的综合性基准测试系统软件ErrorGnoMark（简称EGM），具有自动化测试、全方位诊断和可视化反馈量子芯片性能信息等优势。

多方合作推动基准测试落地

设计基准测试算法或软件的一方可能会忽略或不知道被测对象自身的限制，这使得基准测试软件在与被测对象集成时，问题频出，例如计算资源不足、计算成本过高、硬件架构不支持、软件与硬件接口不兼容等。

因此，设计与使用基准测试的双方应当加强合作，了解对方的现状与需求，优化整体框架，挖掘新的解决方案，推动基准测试落地。

图表 基准测试与其集成的量子计算机之间交互原理



光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2025.2

来源：Proctor, T., Young, K., Baczewski, A.D. et al. Benchmarking quantum computers. Nat Rev Phys 7, 105–118 (2025).
编译：光子盒研究院



05

云平台

目录 05 云平台

01 云平台布局

02 云平台趋势

01 云平台布局：美欧中三足鼎立

在量子计算领域，量子计算机由于操作流程极为复杂，同时采购与长期维护所需成本十分高昂，这形成了一道较高的技术门槛，极大地限制了终端用户对其进行直接接触与使用。

从硬件层面来看，量子计算云平台的接入模式主要分为量子计算整机厂商自研设备接入与云服务接入两类。

- **硬件厂商主导型**：以IBM、Google、Rigetti、IonQ、Xanadu、中电信量子、国盾量子、华翊量子、量旋科技、中科酷原、本源量子等企业为代表，通过云平台直接提供自主研发的量子计算机或基于经典计算资源的量子模拟器；

- **云服务集成型**：AWS Braket集成Rigetti、IonQ等厂商的量子系统；弧光量子后接中电信量子、国盾量子、亚马逊Amazon Braket等硬件平台；Microsoft Azure Quantum对接Quantinuum等硬件平台，形成了跨技术路线的量子算力资源池。

此外，为实现复杂算法，各云平台供应商持续升级量子芯片性能，在量子比特数量、线路深度等关键指标上取得突破。例如，美国Rigetti公司推出的84比特量子计算机Ankaa-3已通过其自有云平台，服务其合作伙伴，并计划于2025年第一季度在Amazon Braket和Microsoft Azure云市场上线。

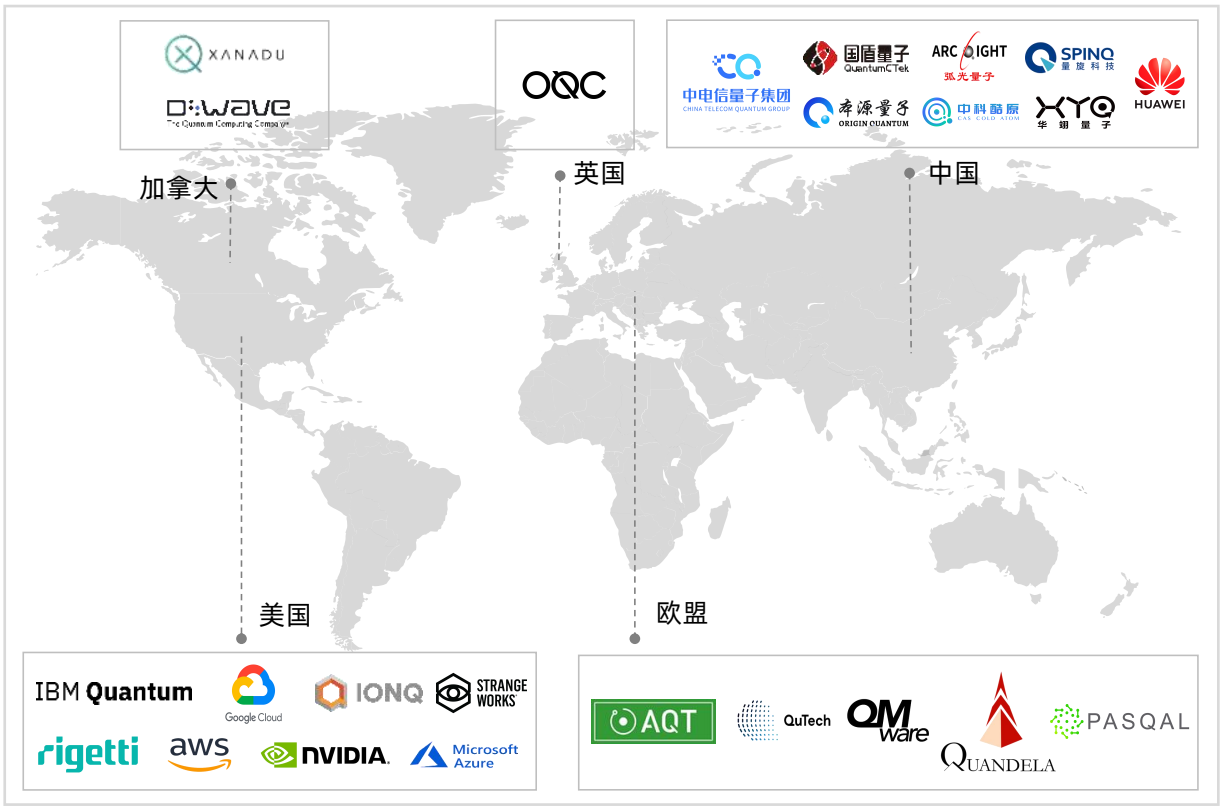
软件方面，主要包括量子基础设施即服务（Q-IaaS）、量子平台即服务（Q-PaaS）、量子软件即服务（Q-SaaS）这三种模式，涵盖了从基础设施到应用软件的全栈服务，用以满足不同用户的需求，即为用户提供直观、实例化的量子计算接入与算力服务。

- **Q-IaaS层**：提供稀释制冷机（10mK级别）、低温电子学系统（4K温区）等物理基础设施的远程接入；

- **Q-PaaS层**：部署Qiskit（IBM）、Cirq（Google）等开发框架，支持混合量子-经典算法编排；

- **Q-SaaS层**：集成化学模拟（材料设计）、组合优化（物流调度）等垂直行业解决方案。

图表 全球量子计算云平台地理分布情况



光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2025.2

如下表所示，呈现了北美八家公司、欧洲五家公司和亚洲九家公司的量子计算云平台信息，涵盖了以下几个方面：

平台发布日期，能直观反映各平台的发展历程；硬件技术提供商，明确背后的技术支撑来源；后端硬件可访问性，关系到用户使用时的便捷程度；以及可访问的量子比特数，为衡量量子云平台计算能力的关键指标之一。

从云平台数量的维度分析，中国、美国和欧洲的差距并不显著，表明在量子云平台的布局广度上，三方处于较为相近的水平。然而，深入到用户及社区活跃度层面，中国与美国相比，仍然存在较大差距。这与美国在量子计算领域起步较早，拥有更成熟的市场推广策略和用户培养体系有关，也反映出中国在提升量子云平台用户参与度和社区建设方面还有很大的发展空间。

图表 全球量子计算云平台比较

平台	机构	时间	国家	技术提供方	硬件	量子比特数
北 美						
IBM Q Experience	IBM	2016	美国	IBM's own cloud service	超导	433、127、65、27、16、7、5
Google Cloud	Google	2018	美国	Google, Rigetti, AQT, IonQ, Pasqal	超导 离子阱 中性原子	53、80、40 20 100
Rigetti QCS	Rigetti	2018	美国	Rigetti	超导	84
Amazon Braket	Amazon	2019	美国	OQC, Rigetti, IonQ, Xanadu, QuEra	超导 离子阱 光量子 中性原子	40、80、8 25 216 256
Microsoft Azure Quantum	Microsoft	2019	美国	IonQ, Quantinuum, QCI, Rigetti, Pasqal	离子阱 超导 中性原子	23 40 100
D-Wave Leap	D-Wave	2018	加拿大	D-Wave	量子退火	5000+
Strangeworks QC™	Strangeworks	2021	美国	IBM, Rigetti, IonQ, QuEra, D-Wave, Amazon Braket, Azure Quantum	超导 离子阱 中性原子 量子退火	-
Xanadu Cloud	Xanadu	2020	加拿大	Xanadu	光量子	216
欧 洲						
QuTech Quantum Inspire	Qutech	2018	荷兰	Qutech	硅自旋 超导	2 5
Alpha	QM Ware	2022	瑞士	QM Ware	-	-
Computing-as-a-Service	Oxford Quantum Circuits	2021	英国	Oxford Quantum Circuits	超导	4
Pasqal Cloud Services	Pasqal	2022	法国	Pasqal	中性原子	100
Quandela Cloud	Quandela	2022	法国	Quandela	光量子	6

（续表）

平台	机构	时间	国家	技术提供方	硬件	量子比特数
亚 洲						
中电信“天衍”量子计算云平台	中电信量子	2023	中国	国盾量子、中国科学院量子信息与量子科技创新研究院	超导	504、66、66、24
量子计算云平台	国盾量子	2023	中国	中国科学院量子信息与量子科技创新研究院	超导	66、66、24
Quafu量子云平台	北京量子院、中科院物理所、清华大学	2023	中国	北京量子院、中科院物理所、清华大学	超导	156、136、119、105、105、11、10、3
弧光量子云平台	弧光量子	2022	中国	中电信量子、国盾量子、亚马逊	超导 离子阱	66 11
本源量子cloud	本源量子	2017	中国	本源量子	超导	72
量子云	华翊量子	2023	中国	华翊量子	离子阱	11
量旋云	量旋科技	2022	中国	量旋科技	核磁共振 超导	核磁2、3、5 超导 8
中移动“五岳”量子云	中国移动云能力中心	2023	中国	长三角产业创新中心 中科院物理所 北京量子院 启科量子	超导 超导 超导 离子阱	20 21 429（4台总和） 20
华为HiQ量子云	华为	2018	中国	华为	模拟器	全振幅 42 单振幅低深度 169
量子云	中科酷原	2022	中国	中科酷原	中性原子	全振幅15

02 云平台趋势：新功能、新工具、新业务

2024年，量子云平台的发展依然聚焦于接入更强量子处理器、优化量子-经典混合算力、拓展业务以及深化应用合作等方面。

更强量子处理器提升量子算力

可用的高品质量子比特数越多，用户越有可能实现更加复杂的算法。对此，各大量子机构不断研发拥有更多高品质量子比特的新一代处理器，并接入云平台，为用户提供更强的算力。

中国科学院量子信息与量子科技创新研究院研发并向国盾量子交付了504比特超导量子计算芯片“骁鸿”，用于验证国盾量子自主研制的千比特测控系统，并通过中电信量子“天衍”量子计算云平台向全球开放。

量超融合提升综合算力

混合算力平台通过深度融合经典计算资源和量子计算资源，实现了计算能力的提升。在当前量子计算硬件尚未完全成熟的情况下，单纯依赖量子计算机进行复杂计算仍然面临诸多挑战。混合算力平台则通过经典计算和量子计算的协同工作，将任务划分为经典部分和量子部分，分别交由经典计算机和量子计算机处理。这样，不仅可以充分利用现有的经典计算资源，还能够在核心任务上发挥量子计算机并行计算的优势，从而大幅提升计算效率。

混合算力平台的另一个优势在于其灵活性和可扩展性。依托云计算技术，混合算力平台能够按需分配计算资源，充分满足不同规模和复杂程度的计算任务需求。这种灵活性使得无论是科研机构还是商业公司，都能够根据自身需求选择合适的计算资源配置，从而降低了量子计算的使用门槛。



澳大利亚帕西超级计算研究中心将在其国家超级计算与量子计算创新中心加入由英伟达Grace Hopper超级芯片加速的英伟达CUDA量子平台，利用CUDA Quantum（一种开源混合量子计算平台，具有强大的模拟工具和编程混合CPU、GPU和QPU系统的能力）以及NVIDIA cuQuantum软件开发套件来加速量子计算工作流程。

鉴于这些优势，近年来，量子计算整机公司积极融入超算集群，致力于为用户提供更多选择。例如，国盾量子为合肥先进计算中心“巢湖明月”提供一台超导量子计算机、超量融合系统及相应配套的软硬件设施，并负责平台建成后5年的设备运维服务及运营。另一方面，依托云平台，量子计算公司可以不断与各应用领域公司开展合作，以提供更好的服务。



Classiq与Alice & Bob合作推出第一个逻辑量子比特模拟器的早期访问程序，使用户能够模拟基于猫量子比特的逻辑量子比特，为量子计算的研究和应用提供新工具与思路。

新功能、新工具、新业务改善用户体验

为提高用户使用体验，降低使用门槛，各量子云平台不断推出新功能、新工具、新业务。例如，QPerfect推出了量子模拟器平台MIMIQ 1.0，Quantinuum推出其一体化量子计算平台Nexus的测试版。



Rescale的云平台承载了1000多个研发应用，与IonQ的量子计算机相辅相成，合作的目标是应对产品开发、医疗保健、金融服务、材料研究、物流优化等领域的复杂挑战。

展望未来，随着量子计算硬件和软件技术的持续创新突破，混合算力平台将不断升级拓展，逐步提高量子计算在整体计算资源中的占比，实现量子计算资源的最大化利用，从而推动量子计算技术在更多领域深入应用和发展。



06

下游应用

目录

06
下游应用

01 教育培训：当前市场主要为购买需求

02 生物医药：有想象空间但短期悲观

03 化工材料：精确模拟推动研发创新

04 国防军事：安全需求推动应用探索

05 金融服务：复杂市场需要强大算力

01 教育科研：当前市场主要为购买需求

当前全球量子计算机的销售格局呈现出显著的“科研驱动型市场”特征。以IBM、IQM为代表的超导量子计算企业在全球合计售出超100台商用设备（IBM Q System One等），客户集中于高校、国家实验室及大型科技公司。这一现象揭示了量子计算产业化初期的核心逻辑——技术验证、生态构建与战略卡位三重需求叠加。

从技术成熟度看，超导量子计算机虽已实现50-100量子比特的工程化能力，但其纠错水平与逻辑比特规模仍不足以支撑实际生产场景的算力需求。因此，现阶段销售的核心目标并非解决商业化问题，而是为科研机构提供“技术试验平台”。高校通过部署量子计算机开展算法开发与基础研究，实验室聚焦量子纠错、材料模拟等战略领域攻关，而微软、谷歌等科技巨头则借助自研或采购设备探索量子-经典混合计算架构。这种“需求分层”本质上是量子计算从实验室向产业化过渡的必经阶段。

更深层的市场逻辑在于生态话语权的争夺。以IBM为例，其通过向全球40多所高校输出Q System One，不仅锁定了未来十年量子计算教育的标准范式，更在硬件接口、软件框架层面构建了事实上的行业协议。这种“设备销售+云服务（IBM Quantum Network）”的组合拳，实质是通过降低科研门槛培育开发者生态，进而主导技术路线的话语权。IQM则通过为德国于利希研究中心等机构提供定制化超导系统，深度嵌入欧洲量子计算基础设施网络，形成区域性技术壁垒。

从客户决策动因分析，采购行为背后折射出国家与企业的双重战略焦虑。对欧美国家而言，量子计算机的部署是维持算力主权、防范“量子技术断链”的关键举措；对中国等追赶者，通过采购或合作研发可加速弥补硬件工艺短板。而科技公司则试图通过早期布局抢占“量子就绪”（Quantum-Ready）地位——例如，金融机构采购量子计算机并非期待立即优化投资组合，而是为未来3-5年量子优势爆发时的技术代差风险未雨绸缪。

2024年，量子计算在教育培训领域的应用合作也较为频繁，量旋科技推出专注实验教学场景的一站式量子计算实验平台——量旋双子座Lab，为高校和研究机构提供更加便捷高效的量子计算教学工具，让用户真实参与实验底层操作的每个步骤，真正体验从认识量子系统、测量量子系统，到控制量子系统、实现量子计算任务的完整过程。

此外，除了与开设量子相关专业的高校对接，部分量子企业还会开展面向大众的科普活动，举办面向学生的量子算法竞赛活动。例如，中电信量子开展了“2024量子科技中国行”活动，以“量子科技大篷车”的形式，面向全国开展量子科技知识及产业应用普及。目前已覆盖江苏、四川、重庆、河北、内蒙、宁夏、西藏等15个省市，40余万人。量旋科技成功举办第三届“量旋杯”量子计算挑战赛，将量子人才培育从深圳走向世界。第三届“量旋杯”升级为国际化赛事，覆盖全球10多个国家和地区，并且新增“量子国际象棋赛道”，增加了比赛覆盖度和多样性，有效推动了量子计算在全球范围内的认知和普及。

教育科研

日本 富士通 — 荷兰 代尔夫特理工大学

在代尔夫特理工大学成立富士通先进计算代尔夫特实验室，致力于开发量子计算技术的产学合作中心。

韩国 首尔国立大学 — 美国 离子阱量子公司

续签与韩国成均馆大学的联盟关系，继续为研究人员和学者访问IonQ的离子阱量子系统提供支持。

法国 Pasqal — 加拿大 谢布鲁克大学

合作内容将包括联合研究项目、教育计划以及为学生和研究人员提供量子计算资源和工具。

澳大利亚 格里菲斯大学 — 美国 PsiQuantum

PsiQuantum将在格里菲斯大学开设“测试与特性化”实验室。

02 生物医药：有想象空间但短期悲观

生物医药方面，传统药物研发流程漫长且成本高昂，从药物发现到获批上市平均需10年时间以及巨额资金。量子计算可同时处理大量分子构型，快速筛选出潜在有效药物，显著缩短研发周期，提高成功率。例如，诺和新元（Novonesis）和Kvantify通过结合经典计算机和量子计算机完成了世界上首次酶促反应的计算。量旋科技与深圳华大生命科学研究院提出了一种使用高精度的短读和易出错的长读来处理测序错误和重复序列的混合组装量子算法。该算法基于变分量子本征求解器，利用分治策略来近似较大哈密顿量的基态，同时还能节省量子资源。

在原子和分子层面上，量子计算能够精确模拟药物分子与生物靶标的相互作用，预测药物的结合亲和力和选择性，从而设计出更有效的药物。例如，腾讯量子实验室与苏州医图生科为了解决“精确测定涉及共价键断裂的前药激活的吉布斯自由能谱”以及“准确模拟共价键相互作用”两个问题，开发了一种混合量子计算管道。

此外，借助量子机器学习，医生可对医学图像进行高精度快速分析，进而更好地预测患者对特定药物的反应，从而为患者量身定制个性化的治疗方案。例如本源量子与蚌埠医科大学设计出的经典-量子混合图像算法，能针对乳腺钼靶图像的分类、分割进行分析，帮助医生更准确高效地判断患者病情。

最后，应用于生物医药的量子算法的开发和优化仍处于初级阶段，许多算法尚未经过充分验证。在进行相对简单但相关的计算时（如小分子模拟），量子计算算法还无法提供比经典系统更多的优势，因此短期内较为悲观。



生物医药

Cleveland Clinic
美国
非盈利医疗机构

IBM Q
美国
超导量子公司

加深对蛋白质结构及其如何影响治疗和预防疾病能力的理解。开发并优化量子算法，预测更大、更复杂的蛋白质结构。

novonesis
丹麦
生物技术公司

kvantify
丹麦
量子计算软件公司

通过结合经典计算机和量子计算机进行了世界上第一个酶促反应的计算。

03 化工材料：精确模拟推动研发创新

当前，量子计算在化工材料领域的应用研究正从“理论验证”向“问题导向”阶段过渡，其核心价值聚焦于分子模拟精度革命、催化剂理性设计及绿色化学范式重构三大维度。尽管受限于量子比特规模与纠错能力，但混合量子-经典计算架构的成熟，已推动该领域取得标志性进展。

分子模拟：突破经典计算瓶颈，解锁复杂系统研究

密度泛函理论（DFT）等传统计算方法在模拟多电子体系、激发态反应路径时面临指数级复杂度挑战，可能会产生定性错误的结果。对此，美国PsiQuantum、日本三菱日联金融集团和日本三菱化学公司宣布在模拟光致变色分子的激发态方面开展合作，而这种分子具有广泛的工业和住宅潜在应用，例如智能窗户的开发、节能数据存储、太阳能存储和太阳能电池以及其他光开关用例。

催化剂开发：从“试错筛选”到“量子引导设计”

量子计算正重塑催化剂研发流程。例如，英国石油公司BP Amoco和ORCA Computing的研究人员合作探索了使用生成对抗网络（GAN）来训练一种混合量子经典生成器。这种生成器能利用光子量子处理器和GPU来分析烷烃分子数据集，从而创建出具有特定能量的构象体。

绿色化学：量子优化驱动可持续创新

量子计算能够系统性评估数万种生物基材料的合成路径，有助于推动绿色化学发展，降低能耗和污染，开发可持续材料。例如，丰田北美研究所（TRINA）与加拿大Xanadu宣布启动新项目，旨在利用量子计算的力量推进材料科学模拟。此次合作专注于开发量子算法，以改进复杂材料的设计、表征和优化，包括对未来移动性至关重要的具有期望量子特性的材料。

现阶段研究仍受制于两大瓶颈：一是硬件限制：现有量子处理器（50-100物理比特）仅能处理简化模型，真实化工系统模拟需千比特级容错量子计算机；二是算法适配：化学问题的连续变量特性与离散量子比特映射存在本质冲突，需发展新型量子化学计算框架（如量子基组变换理论）。

对此，产业界采取“分层推进”策略：短期聚焦特定问题（如催化剂活性位点预测）开发专用量子算法，中长期通过量子纠错技术突破实现全流程模拟。

随着2025年千比特级量子计算机原型出现，化工材料领域有望迎来三大转变：（1）研发模式革新：量子计算与AI、自动化实验（Self-Driving Lab）融合，形成“量子预测-机器人合成-数据反馈”闭环；（2）材料创新加速：高通量量子模拟使新材料发现周期从10年级压缩至3-5年，尤其在固态电解质、OLED发光层材料等领域将率先突破；（3）碳中和赋能：量子优化算法将重新定义化工过程工程，预计到2030年可帮助全球化工行业减排8-12亿吨CO_2当量。

总体来说，量子计算正在重塑造化工材料的科学基础与技术经济范式。尽管产业化应用仍需5-8年孕育期，但当前研究已证明其颠覆性潜力——这不仅是一场计算能力的革命，更将引发从分子设计到工业生产的全链条创新海啸。



化工材料

日本
三菱集团

美国
光量子公司

模拟光致变色分子的激发态。

加拿大
OLED技术开发商

加拿大
量子纠错公司

利用量子模拟进行电子结构计算、振动电子光谱和从头算分子动力学。

日本
丰田北美研究所

加拿大
光量子公司

改进复杂材料的设计、表征和优化。

英国
石油公司

英国
光量子计算公司

探索使用生成对抗网络（GAN）来训练量子-经典混合生成器。

04 国防军事：安全需求推动应用探索

当前，量子计算对国防军事的颠覆性影响，本质在于其“超线性算力增长”与“复杂系统全局优化”的双重特性，这与传统军事决策的“线性推演+局部最优”模式形成代际差异。

从“经验驱动”到“量子最优解”的决策跃迁

经典决策的局限性：传统作战推演依赖蒙特卡洛模拟与启发式算法，需预设有限场景（通常≤1000种），难以应对现代战场多域融合（陆、海、空、天、电、网）的指数级复杂度。

量子计算的优势突破：以美国Sandia实验室的多战区弹药补给路径优化为例，量子退火算法通过并行搜索超10^20种可能路径，直接锁定全局最优解，而非经典算法的渐进逼近。这种能力使指挥官可实时调整策略，而非依赖预先规划的有限预案。

战争迷雾的“量子穿透效应”

量子计算通过处理高维不确定性数据（如电子战频谱动态、多源情报碎片），可构建“超实时战场上帝视角”。

战略模糊性与威慑升级

量子算力的不可观测性：与传统核武器不同，量子计算机的军事潜力难以通过卫星成像或试验场监测评估。业内共识认为“1000量子比特”目标的真实战力充满不确定性，可能诱发对手的过度防御性投入。

阈值效应的战略风险：当量子计算机突破特定阈值（如1000个逻辑量子比特），可能瞬间颠覆现有军事平衡。这种“量子奇点”特性迫使各国提前布局，形成“技术未成熟，对抗已升级”的囚徒困境。

量子计算的算力能力还远未达到实用化水平，但已经从理论和探索中验证了量子计算在复杂战场环境中的增效潜力，尤其是处理卫星情报融合、电子战频谱分配等超大规模组合优化问题。

国防军工

澳大利亚陆军 × 澳大利亚量子计算软件公司

解决车队调度问题。

英国陆军 × 美国中性原子量子公司

参与网络防御演习，应对网络威胁。

法国Airbus × 西班牙量子计算软件公司

为战斗机飞行员开发基于手势的控制系统。

美国空军 × 美国量子计算软件公司

设计出用来处理空军军事后勤的量子计算软件，旨在快速找到复杂情况下的最有效解决方案。

05 金融服务：复杂市场需要强大算力

量子计算对金融行业的革命性影响，源于其“高维数据处理”与“非凸优化求解”的核心能力，这与传统金融模型的“线性简化假设”与“局部最优解依赖”形成根本性代差。量子计算可以快速处理众多复杂计算任务，比如复杂金融系统的模拟、风险评估中的大规模数据模拟、金融衍生品定价模型的运算、投资组合的优化等。

在复杂金融建模领域，量子计算可显著提升风险评估与资产定价效率。传统蒙特卡洛模拟需消耗大量算力，而量子算法通过并行计算能力，能在数分钟内完成需经典计算机数千年的风险情景分析，例如新加坡国立大学和麻省理工学院探讨了量子计算技术在金融衍生品定价中的应用，特别是在不完备市场中，提出了量子算法来高效地计算衍生品的鞅定价。投资组合优化方面，量子退火技术可同步处理数万亿变量组合，帮助贝莱德等资管机构实现动态资产配置。高频交易领域，量子机器学习算法可实时解析非结构化数据流。

尽管量子计算展现巨大潜力，其规模化应用仍面临硬件稳定性（如量子比特退相干）、算法适配性及跨学科人才短缺等瓶颈。当前领先机构采取三阶段策略：一是与IBM、谷歌等量子巨头建立联合实验室，在云端测试优化算法；二是组建内部量子团队重构金融模型，如高盛开发低深度量子电路提升衍生品定价效率；三是投资量子初创企业布局生态，如花旗集团通过战略持股抢占技术先机。我们预测，未来5-10年量子计算将率先在组合优化、实时风险监控等场景实现商业化突破，为早期布局的金融机构创造15%-30%的决策效能提升。

2024年量子计算在金融领域的应用仍以实验验证与小规模试点为主，但已显露颠覆性潜力。其核心价值不仅是算力提升，更在于重构金融风险的认知与定价范式。未来竞争将聚焦于数据-算法-硬件的三位一体生态构建。



金融

BBVA 西班牙 外换银行

aws 美国 亚马逊云服务

进行了分布式量子模拟试点测试，有助于探索在复杂金融任务中的应用。

citibank 美国/以色列 花旗银行

CLASSIQ 以色列 量子软件公司

研究投资组合优化的量子解决方案。



07

全球主要国家现状与分析

目录

07
全球主要国家现状与分析

01 美国：全球领跑，树立量子计算标杆

02 中国：美国封禁，独立自主成效显著

03 欧洲：众人拾柴，暗表不甘落后之心

01 美国：全球领跑，树立量子计算标杆

美国在当前量子计算领域堪称标杆，在量子计算产业的政策、技术、人才、产业孵化及融资等方面均展现出强大的实力和优势，为全球量子计算的发展树立了典范。

政策起步早、数量多

政策方面，美国不仅是最早制定量子政策的国家，也是目前制定最多量子政策的国家。早在2002年，美国就出台了《量子信息科学和技术发展规划》，给出量子计算发展的主要步骤和时间表。

上游有短板、保障强，中、下游优势突出

上游供应方面，美国本土供应商数量众多，但存在一定“偏科”现象，在全球低温领域（美国拥有如Form Factor、Maybell Quantum等企业）中的竞争力弱于测控系统（美国拥有如Keysight等企业）。自2021年起，美国奉行“有弹性、多样化、安全的供应链”政策，因而在一定程度上依赖欧洲供应商（如芬兰Bluefors等企业），但某种程度上也是控制在这些核心企业。所以，目前美国凭借政治团体、经济联盟、专利保护等手段，足以保障自身在量子计算上游产业的供应。

中游软硬件方面，美国在超导、离子阱、中性原子、半导体等多条量子计算技术路线上处于领先地位。同时，IBM、Google、Honeywell、Microsoft、Nvidia、Amazon等一众科技巨擘均布局了量子计算产业，且均做到国际顶尖水平。

下游应用方面，美国各机构在不同领域深入开展了量子计算的应用探索，例如金融领域的摩根大通、花旗银行；医药领域的克利夫兰诊所；国防领域的美国空军、国防部、Davidson Technologies等。这些应用探索极大地推动了美国量子计算的发展。

综合实力领先，多维度优势显著

人才培养方面，美国拥有一批世界顶尖的一批高校、院所，培养出了世界最顶尖的量子人才，同时当地的量子企业数量较多、规模较大，足以吸纳大部分人才。

产业孵化方面，在全球11家/个量子孵化器/孵化项目中，美国占据4个（分别是Duality Accelerator、Quantum Catalyzer、Quantum Startup Foundry、Stanford Quantum Incubator），数量最多，孵化出了众多的量子初创企业。

政府资助、社会融资方面，美国政府在量子技术研发方面的支出显著低于中国政府，但差距在逐年缩小。而美国私人投资始终位居第一，并与中国存在数量级的优势，且差距越来越大。

领先源于需求、企业、政策、资本协同

美国在量子计算领域占据领先地位，有诸多深层次原因。

市场需求方面，美国拥有全球最活跃的量子创新生态系统，使得美国在国防、金融、医疗、制药等众多领域对量子技术这种新兴算力有着更为迫切的需求。

从**企业自身实力与生态**来看，美国量子企业展现出强大的创新能力，其商业模式也十分灵活。像Google、IBM等科技巨头在量子计算领域早早布局，多年来持续投入大量资源进行研发。它们凭借技术积累和庞大的科研团队，不断推动量子计算技术突破，在国际上取得了显著的技术优势和较大的产业份额。这些巨头不仅自身发展，还通过与初创企业、科研机构合作，推广量子计算技术，吸引更多人才和资源进入该领域，极大地促进了美国量子计算生态的建设。这种良好的生态环境，使得风险投资机构普遍看好美国量子计算公司，愿意投入资金，企业获得资金后又能进一步投入研发和业务拓展，形成了正向循环。

政策扶持方面，美国政府高度重视量子计算产业。一方面，通过设立各类科研项目，直接为量子计算相关研究提供资金支持，确保关键技术攻关有充足的经费保障。另一方面，美国制定了完善的配套政策，全方位营造了良好的政策环境，有力推动了产业发展。例如，给予研发资助以鼓励量子计算相关企业和科研机构开展前沿研究；给予税收优惠减轻企业负担；给予知识产权保护，保障创新成果不被侵犯。

资本市场方面，美国拥有成熟且完善的资本市场体系，涵盖股票市场、债券市场、风险投资市场等，为量子产业发展提供了得天独厚的条件，使得社会资本能够便捷地进入量子领域。美国量子企业拥有多元化的融资渠道，既可以通过出让股权获取发展资金，也能通过发行债券进行债务融资，同时还能申请政府资助。多种资金来源保障了企业在研发、设备购置、人才招募等方面的资金需求，助力企业快速成长。

02 中国：美国封禁，独立自主成效显著

中国在量子计算产业同样展现出强大的实力和优势，在全球量子计算发展进程中占据重要地位。

多项国家级政策，全方位推动量子科技产业发展

政策方面，自2021年在《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中提及量子信息科技以来，中国进入量子科技的快速发展阶段。目前已颁布30余条涉量子的国家级政策，涵盖课程设置、标准化建设、市场准入、中试平台、债券投向等多个方面。

中国量子企业资金主要来源于政府支持，社会融资规模与美欧相比，始终存在较大甚至数量级的差距。

上游破封锁，中游存在困境，下游亟待突破

上游供应方面，中国曾在较长时期依赖进口，但随着欧美对中国的禁运力度不断加大，中国不得不走上独立自主的道路。中国电科16所、量羲技术、知冷低温、中船鹏力超低温、中微达信、赋同量子、上海频准等中国企业合力打破了欧美的技术产品封锁，实现国产替代。

中游软硬件方面，中国以高校院所及其孵化的量子初创企业为主体，例如，国盾量子、量旋科技、华翊量子、幺正量子、启科量子、中科酷原、硅臻等。这些初创企业虽拥有数量众多的科技人才，但或多或少面临资金短缺的窘境。而随着百度、阿里巴巴等相对不缺少研发资金的中国科技巨头相继退出量子计算研发，中国量子产业遭受了一次又一次的沉痛打击。在此背景下，中国电信作为央企，挑起了带领中国量子产业发展的重任，成立了中电信量子集团。这不仅仅是中国电信满足自身发展需求的战略举措，更代表着中国政府在全球量子科技竞争中逢敌必亮剑的坚定决心。

下游应用方面，中国整体进展滞后于美欧，同时受美欧封锁的影响，无法开展跨国应用合作。但随着量子计算在下游应用领域的成果初步展现，以及政府与国央企的带头推动，未来将有望吸引更多下游厂商参与。

产品出海方面，尽管欧美国家拥有广阔的市场，然而受国际关系的影响，中国量子企业难以将产品售往这些国家，但中国量子企业从未放弃出海的尝试。2023年，量旋科技向中东一家科研机构交付自主研发生产的超导量子芯片，成为中国首家向海外交付超导量子芯片的公司。2024年，量旋科技先后向南美的安第斯大学、北美的墨西哥国立理工学院交付量旋双子座Lab，继续扩展其海外版图。这些进展拉响了中国量子企业出海的序幕，也鼓舞了更多中国量子企业出海。

中国量子计算较美国仍存在一定差距

目前，在量子计算领域，中国与美国相比，仍存在一定差距，主要体现在以下几个方面：

从**产业布局**层面来看，中国在量子计算领域布局要晚于欧美，且IT大公司参与力度小，例如，Google于2013年5月成立Quantum AI部门，阿里巴巴于2015年7月成立量子计算实验室（已于2023年底关闭），IBM于2016年5月成立IBM Q部门并发布IBM Quantum Experience，百度于2018年3月成立量子计算研究所（已于2023年底关闭）。

从**政策支持**层面来看,中国各级政府需要进一步出台有效的政策引导和支持机制。例如，目前中国还没有专门针对量子企业的风险投资引导基金，在融资担保及退出机制方面也存在缺失，这在一定程度上制约了量子企业的发展壮大。

从**资本市场**层面来看，中国资本市场成熟度不及美国。并且，量子计算作为前沿科技，技术复杂且应用前景存在不确定性，致使中国的投资者对其信心不足。相较于量子计算，中国的社会资本更倾向于投资商业模式清晰、盈利前景明确的领域，像人工智能、低空经济、智能驾驶等。这种投资倾向直接影响了量子计算领域的融资规模和活跃度。尽管2024年12月《国务院办公厅关于优化完善地方政府专项债券管理机制的意见》中提及量子科技，但相关举措仍处于初步探索阶段，尚未形成成熟的体系以有力支持量子产业发展。

从**国际关系**层面来看，中美关系的变化以及美国对华科技投资限制的不断强化，给中国量子计算产业带来了冲击。许多原本依赖美元基金融资的量子企业，因美元基金募资和投资活动受限而面临资金短缺困境，阻碍了企业的正常发展与技术研发进程。此外，美欧的封锁在很大程度上还限制了中国的产品出海，以及与其他国家的学术讨论与技术交流。

03 欧洲：众人拾柴，暗表不甘落后之心

尽管欧洲在诸多传统制造业处于领先地位，掌握大量尖端技术，但在量子计算这一新兴领域，欧洲整体实力已与中美两国拉开了一定差距。

欧洲紧随美国，大力发展量子计算产业

随着美国在量子计算领域的迅速布局并取得优势，欧洲也开始大力发展量子计算产业，参与的国家也日益增多。早期以英国、法国、德国、荷兰、瑞士等老牌欧洲强国为主，如今已拓展到芬兰、爱尔兰、捷克、塞尔维亚等国，整体展现出“众人拾柴火焰高”的趋势。

欧洲各国纷纷出台政策支持量子计算产业发展

2021年，法国发布《法国2030》；同年，荷兰提出《荷兰量子三角洲》计划；2022年，瑞士推出《瑞士量子倡议》；2023年，英国发布《国家量子战略》，德国通过《量子技术行动计划》，丹麦发布《国家量子技术战略》，爱尔兰推出《量子2030》。这些政策为欧洲量子计算产业发展奠定了坚实的政策基础，并提供了资金支持。

上游领先、中游追赶、下游应用生态逐步完善

在**上游供应**方面，欧洲仍处于领先地位，芬兰Bluefors、英国Oxford Instruments、荷兰Leiden Cryogenics、德国Rohde Schwarz、英国M Squared Lasers、比利时微电子研究中心（IMEC）、瑞典Low Noise Factory等能够提供最顶尖的产品和服务，同时保障了欧洲量子计算供应链的完整性。

在**中游软硬件**方面，欧洲整体实力落后于中美两国，不过随着欧洲各国政府的政策支持与资金投入，已涌现出不少实力强劲的量子计算软硬件公司。诸如英国Oxford Ionics、英国Riverlane、法国Alice & Bob、法国Pasqal、芬兰IQM、瑞士Terra Quantum、奥地利AQT、西班牙Multiverse Computing等企业正不断发力，推动中游产业的发展。

在**下游应用**方面，欧洲量子计算企业早年多与美国企业合作。然而，随着欧洲本土量子企业的快速发展以及政府导向支持，逐渐转向了与欧洲本土企业开展应用合作。欧洲在传统行业拥有大量顶尖企业，例如瑞士Roche、德国BASF、西班牙BBVA，这些企业与欧洲本土量子企业合作，将有力推动欧洲量子生态建设，加速欧洲量子计算在各行业的落地应用。

社会融资规模介于美中之间，未来有望不断扩张

在**社会融资**方面，欧洲总体规模少于美国，但多于中国。随着更多欧洲国家布局量子计算，未来融资规模预计将进一步扩大。此外，随着美国、中国相继实现量子优越性，欧洲各国政府将继续加大量子计算相关的投资力度，以缩小与中美之间的差距。

未来，欧洲将在继续巩固上游优势的同时，大力发展中游量子计算的软硬件，以及进一步拓展下游应用。此外，在与美加澳日韩等国保持紧密合作、生态融合的同时，欧洲也会在发展过程中保持自身的独立性，探索出一条独具特色的量子计算产业发展之路。



08

投融资分析

目录

08
投融资分析

01 融资金额：小幅反弹，有所回升

02 融资笔数：与去年持平，政府资助笔数增加

03 融资风向：回归以硬件为主

01 融资金额：小幅反弹，有所回升

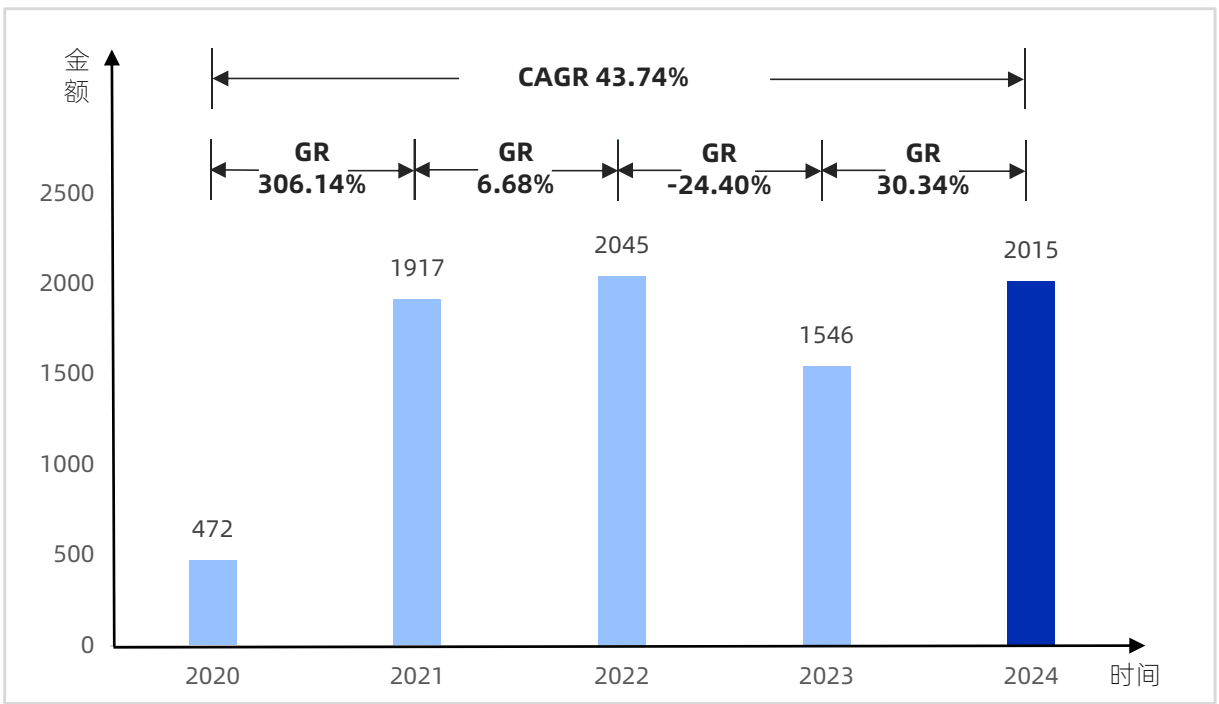
全球量子计算领域的投资规模在过去的五年中呈现震荡上行趋势，2020年总体融资额为4.72亿美元，2021年增长到19.17亿美元，2022年继续增长到20.45亿美元，而2023年下降到了15.46亿美元，2024年则回升至20.15亿美元。2020至2024年，各年度融资总额的复合增长率（CAGR）为43.74%。

2024年较2023年的总体投融资规模，增长约30.34%，表明全球投资方对量子计算的投资热情有所回升，看好量子计算的未来发展。但需要注意的是，2024年的大幅增长是基于2023年融资大幅跌落的情况，目前融资总额尚未达到2022年的水平，因此不宜过于乐观。

2024年融资整体反弹的背后，原因是多方面的。

首先是受大环境的影响，此前全球经济衰退、利率波动、市场波动加剧等因素导致用于未来科技的风险资本减少，但随着技术的进步、国家的推动、时局的稳定，全球的投资者们又恢复了对量子计算的投资信心。

图表 2020-2024年全球量子计算融资总额（单位：百万美元）



ICV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2025.2

其次，量子计算领域投资焦点发生了多次转移。2023年从重资产的硬件转向轻资产的软件，例如2023年，美国软件投资占本国比重超过了70%；澳洲软件投资占本国比重超过了50%。而2024年这一趋势又转回了硬件，从而在一定程度上带动了整体的投融资总额的增长。这种转变是资本市场与新兴产业的自然演化，即便整体投资水平暂时下降，未来也能够回归合理发展水平。

最后，除了技术挑战，此前由其他新兴技术，如人工智能、低空经济、智能驾驶和具身智能等热门科技竞争所形成的虹吸效应，也在分散投资者对量子计算的关注和资源。目前，量子计算行业仍处于技术研发的早期阶段，相比如人工智能、具身智能等行业，产品化和商业化仍未见曙光，因此当前及未来的社会融资仍不乐观。

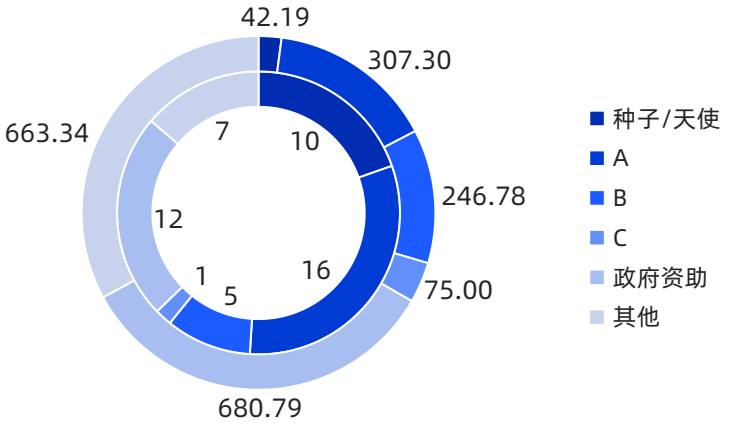
2024年成立的量子计算初创公司数量与2023年大致相当，且均为技术相对成熟的超导、中性原子等路线。这表明在全球经济下行、技术路线逐渐收敛等大背景下，市场保持着谨慎的态度。具体而言，一方面，在量子计算未展示出实际应用价值或满足潜在市场需求、尚处于技术开发早期阶段时，难以获得资金支持，多数投资者都在等待其更清晰的实用场景和更明确的盈利路径的出现。另一方面是量子计算各技术路线尚未收敛，因此创业者也在观察不同技术路线之间的竞争态势，选取更有前景的路线进行创业以提高成功几率。

02 融资笔数：与去年持平，政府资助笔数增加

虽然后疫情时代经济环境低迷，导致高通胀率、投资者风险偏好降低，致使2023年的融资情况不甚理想，但到了2024年，对于量子计算的投资已经逐渐复苏。如图所示，2024年，量子计算领域共发生51笔融资事件，合计20.15亿美元。与2023年相比，融资笔数减少4笔，融资金额则增加了4.69亿美元。

图表 2024年全球量子计算公司融资概览

种子/天使	$42.19M	10笔
A	$307.30M	16笔
B	$246.78M	5笔
C	$75.00M	1笔
政府资助	$680.79M	12笔
其他	$663.34M	7笔



	超导	离子	原子	光子	半导体	其它硬件	量子软件
种子/天使	QOLAB			QUANFLUENCE		ARCTIC INSTRUMENTS, 中微达信	瀚海量子, CAVERO, QMill, kvantify
A	QOLAB, 华翊量子, 华翊量子		planqc	QUANTUM SOURCE	diraq, diraq	Maybell, QUANTUM CORRIDOR, QUANTUM BRILLIANCE, QBLOX	MULTIVERSE COMPUTING, 微观纪元, QUANSCIENT
B	OQC						QUNASYS, Q-CTRL
C							river lane
政府资助	rigetti, ILMANJARO, ATLANTIC QUANTUM	Quantum Art		PsiQuantum	EeroQ	Quantum Transistors	river lane, ephos, BlueQubit
其他	rigetti, D-Wave	QUANTINUUM	atom computing	QCI		C12, QPHOX	

ICV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2025.2

注1：内环表示融资笔数，外环表示融资金额。
注2：其它硬件包括量子测控系统、量子存储器等。

从**融资笔数**来看，A轮最多（16笔），比2023年少了1笔。其次为政府资助（12笔），比2023年多了5笔。之后为种子轮/天使轮（10笔）、B轮（5笔）、C轮（1笔）。此外还有7笔其他类型或未披露具体情况的融资。

从**融资金额**来看，政府资助最多（6.81亿美元），约为2023年1.33亿美元的5倍；结合融资笔数来看，政府对量子计算的投资力度正不断加大。而种子轮/天使轮（0.42亿美元）、A轮（3.07亿美元）、B轮（2.47亿美元）、C轮（0.75亿美元）与2023年相比，分别变化了-1.02、0.55、-1.43、0.75亿美元，表明量子计算产业的发展朝着成熟的方向发展，预计未来几年有望迎来量子企业上市热潮。

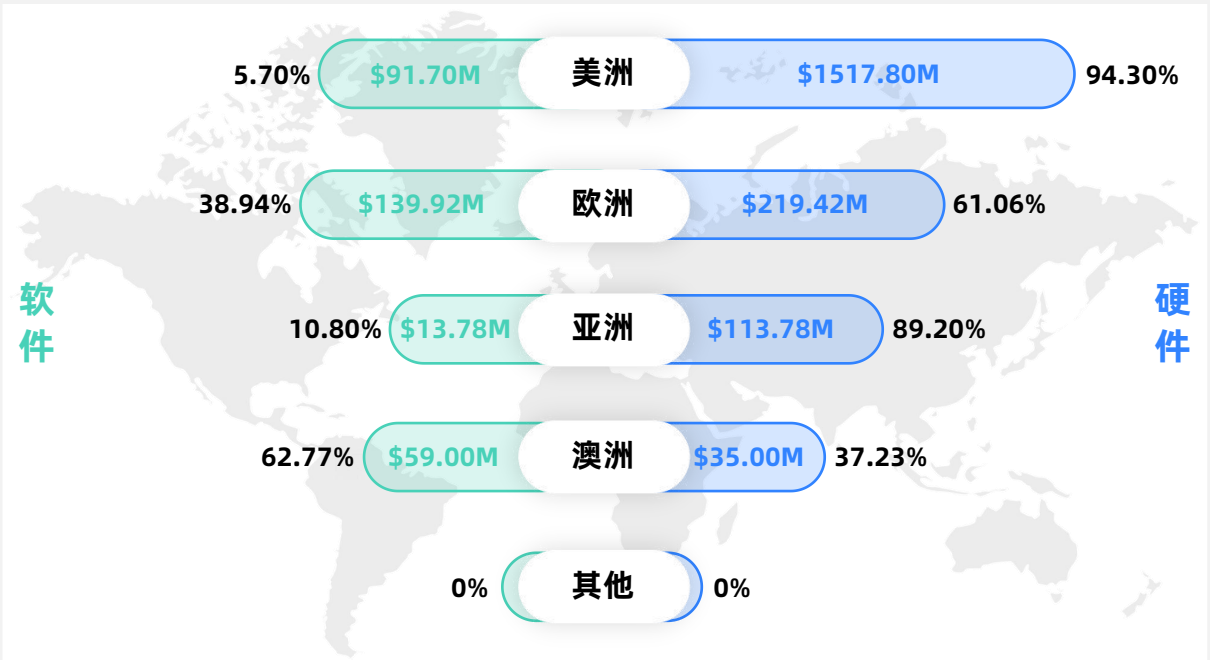
从**主营业务**来看，符合产业发展早期阶段的多元化特征，企业涵盖不同技术路线、上游核心硬件、计算软件等。与2023年的融资领域分布相比，已有更多超出整机层面外的上游硬件及材料供应商，以及符合轻资产模型的量子软件企业。

03 融资风向：回归以硬件为主

在2023年经济形势低迷的大背景下，作为轻资产模式的量子软件凭借其较低的资金门槛，在融资方面占据了相对优势。然而，量子计算硬件的研发与制造虽然此前已吸引了大量社会资本注入，但面对其高昂的研发成本以及冗长的研发周期，这些资金只是杯水车薪，远远无法满足需求。因此，2024年，全球量子计算领域的风险投资风向发生转变，不再延续2023年的趋势，从对量子软件的青睐重新回归到硬件投资。

在量子计算投资版图中，美洲硬件投资优势极为突出，占据了该地区软硬件总投资额的92.71%。早期，随着量子计算硬件的稳定性和可靠性稳步提升，投资者开始着眼于如何最大化发挥硬件的潜在价值，这一思路促使部分资金流向软件领域。与此同时，各行业对量子计算应用的探索不断深入，行业内企业对量子软件的需求呈现出爆发式增长。因此，2023年美洲地区的软件融资占比飙升至72.8%。

图表 2024年全球量子计算软硬件融资额占比图



ICV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2025.2

注：百分比表示该地区硬件或软件占该地区软硬件总和的百分比

但投资者逐渐意识到，现有的NISQ计算机难以充分释放已有量子算法的强大效能，当下的首要任务依然是大力发展硬件。随着Heron_R2、Willow、祖冲之三号等一系列先进量子处理器相继问世，它们所展现出的超越经典计算的量子优越性，进一步坚定了投资者的信心。除此之外，量子硬件企业大多在积极构建云平台、自主设计量子软件，并与下游企业紧密合作开展算法与应用场景的开发，这一系列举措严重压缩了纯量子软件公司的生存空间，使得2024年美洲地区的投资者再次将投资重点聚焦于硬件。

欧洲和亚洲地区的情况与美洲类似，硬件投资在当地占据主导地位。一方面，这些地区的量子计算机硬件技术水平落后于美国，出于维护自身信息安全的战略考量，各国纷纷加大对硬件研发的投入。另一方面，与美国相比，欧洲、亚洲地区相对缺少积极探索量子计算应用场景的下游企业，导致了量子软件公司难以实现盈利。再加上有利的政策环境以及充足的科技研发资金支持，投资者更倾向于将资金投入硬件领域，以此保持各国在全球量子计算核心技术上的领先地位。

澳洲是2024年全球范围内唯一软件投资超过硬件的地区，这主要是因为澳洲本土缺乏具备市场竞争力的量子硬件公司。澳大利亚现有的四家量子硬件公司——Diraq、Silicon Quantum Computing、Archer Materials和Quantum Brilliance，其中前三家采用半导体技术路线，另一家采用金刚石NV色心路线。但与超导、离子阱等几大主流技术路线相比，半导体与金刚石色心这两条技术路线未能展现出足够的竞争实力，致使澳洲在量子硬件融资方面困难重重，情况不容乐观。

回顾经典计算机的发展历程，在最初的30年里，行业利润主要集中在硬件端，直至硬件技术发展相对成熟后，软件才逐渐崭露头角，占据显著的份额。基于此，预计未来量子计算机的发展路径大概率会与经典计算机相似。所以在现阶段，投资者持续将大部分资金投入硬件领域，是顺应行业发展趋势的必然选择。



09

供应商评价

目录 09 供应商评价

01 硬件整机供应商评价

02 硬件整机代表性厂商

03 量子计算云平台代表性厂商

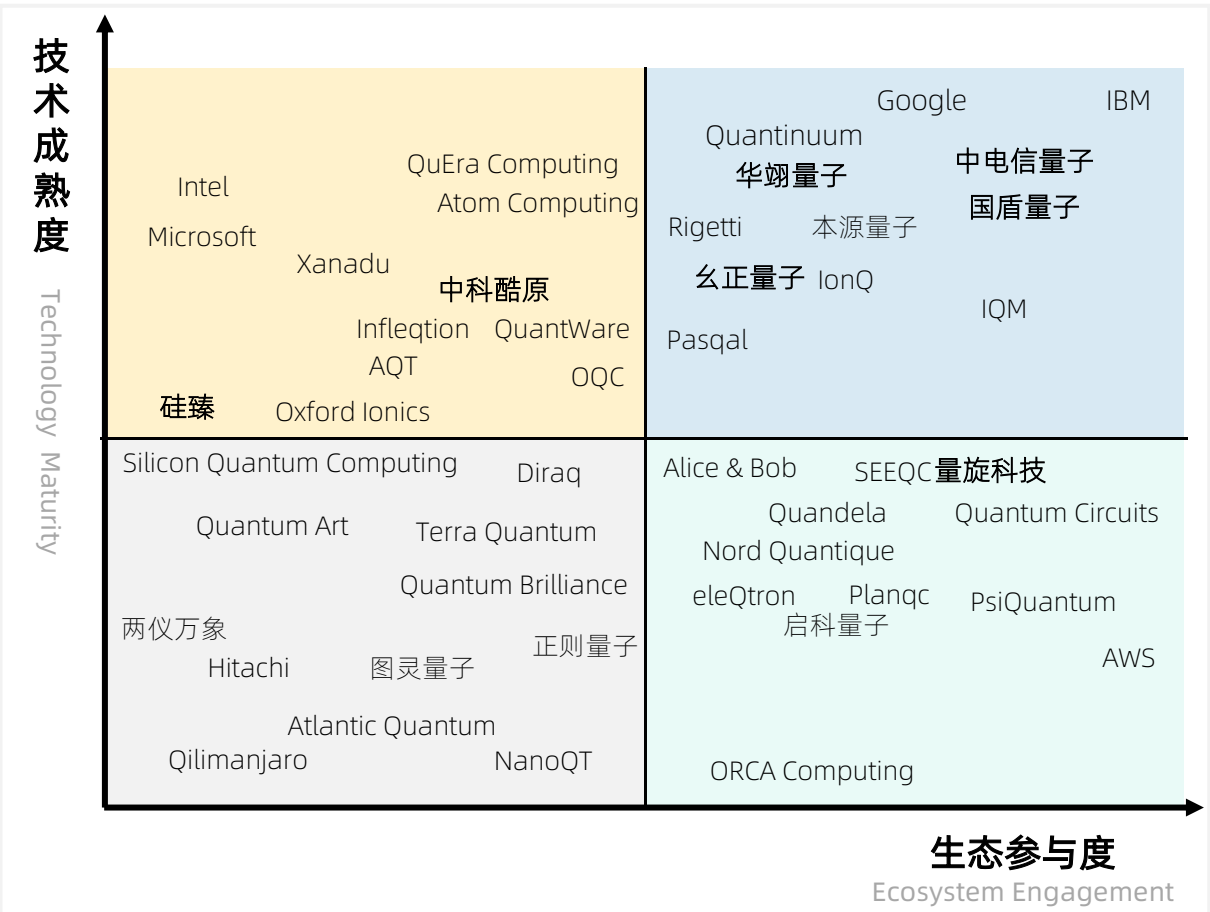
04 量子计算上游代表性厂商

01 硬件整机供应商评价

本报告针对全球量子计算领域，提出一个二维矩阵评价模型——量子生态成熟度罗盘（Quantum Ecological Maturity Compass，Q-EMC）模型，用于分析公司或技术在技术成熟度和生态参与度方面的表现。

纵轴表示技术成熟度，从下到上技术成熟度递增，反映公司在量子技术方面的成熟程度，包括其核心技术的研发深度、可靠性和稳定性；横轴表示生态参与度，从右到左生态参与度递增，衡量公司在量子生态系统中的合作深度和广度。Q-EMC模型具体含义见附件一。

图表 全球量子计算硬件整机供应商评价体系



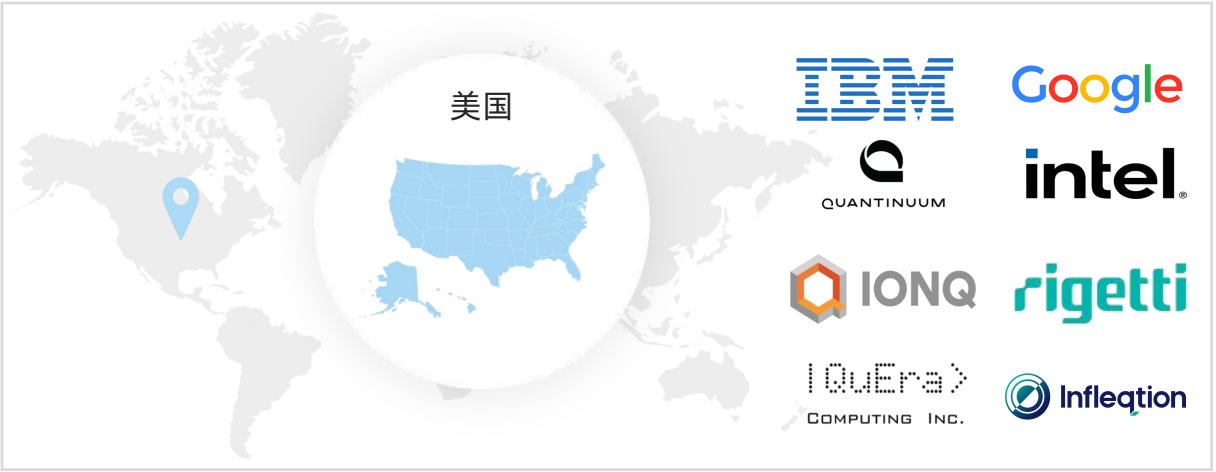
光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2025.2

根据Q-EMC模型，可将量子企业分为不同类型：

- 生态核心企业：位于右上象限，如IBM、Google、Quantinuum、中电信量子、国盾量子、华翊量子、幺正量子等，展现出高度的生态参与度与卓越的技术成熟度。
- 独立探索者：位于左上象限，如QuEra、Intel、Xanadu、中科酷原、硅臻等，该类公司技术应用较成熟，已有一定的产品化成果或商业化进展，但在合作参与度上相对独立，未形成较大规模的生态协作关系。
- 生态追随者：位于右下象限，如AWS、Alice & Bob、Quantum Circuits、PsiQuantum、量旋科技、启科量子等，显示出较高的生态参与度，技术成熟度有待提升。
- 成长新星：位于左下象限，如Silicon Quantum Computing、Quantum Art、正则量子、两仪万象等，技术成熟度和生态参与度均有较大提升空间。

02 硬件整机代表性厂商

图表 美国硬件整机代表性厂商



光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2025.2

美国：领军量子计算企业多为科技巨头

IBM于1911年创立，是全球最大的信息技术和业务解决方案公司，在量子计算领域，其主要优势包括发布了1121比特量子处理器Condor、156比特量子处理器Heron_R2、433比特量子处理器Osprey、Qiskit软件框架等。量子云服务器为开发人员提供基于云的服务，用于对非经典概率分布进行采样，并通过IBM量子网络与业界、学术界和政府开展合作。2024年，IBM更新了新的技术路线图，推出了1000+的QPU及创新量子计算机群架构。

Google于1998年创立，是全球最大的搜索引擎公司、Android系统开发商、全球无人驾驶技术及虚拟现实技术领导者、量子计算机开发公司等。2024年，Google推出105比特超导量子处理器Willow，并在Willow芯片上实现了突破盈亏平衡点的表面码纠错；基于transformer的递归神经网络，推出了用于解码表面码的AlphaQubit。旗下子公司Sandbox AQ融资5亿美元用于网络安全及其他量子工作。



Quantinuum由2021年与霍尼韦尔收购的英国量子公司Cambridge Quantum合并而来。2024年，Quantinuum将System Model H2-1处理器从32比特升级到56比特，并实现了99.914(3)%的双比特量子门保真度；与Microsoft等演示了保真度最高为99.9%的12个逻辑量子比特；与Google等利用52个物理量子比特创建出具有50纠缠逻辑量子比特的GHZ态。



Rigetti Computing成立于2020年，由前IBM研究人员Chad Rigetti创办，专注于全栈量子计算技术，是全栈量子计算的先驱，开发了业界第一个用于可扩展量子计算系统的多芯片量子处理器。2024年，推出其84比特量子计算机Ankaa-3，并宣布达成了两个重要的双量子比特门保真度里程碑：成功将错误率减半，实现中位数99.0%的iSWAP门保真度，并展示了中位数99.5%的fSim门保真度。



IonQ成立于2015年，是首家上市的量子计算初创公司，融资数亿美元。正在努力开发分布式量子计算，2024年成功实现离子-光子纠缠以及远程离子-离子纠缠。收购美国量子网络公司Qubitekk，用于研发下一代网络量子计算机架构和全栈量子编译器。此外公司为AWS提供新的（Aria系统，25个算法量子比特）后端支持。公司还与美国空军研究实验室（AFRL）签订了2550万美元的合同。



Infleqtion全球最大中性原子路线的量子计算公司。该公司一直致力于加速基于中性原子的量子计算技术的商业化，且在开发基于激光冷却中性铯原子的量子计算机。2023年，Infleqtion宣布推出了该公司首款用于中性原子研究和量子应用开发的下一代紧凑型真空系统 miniMOT V2，展示了一个使用光子芯片来传递激光冷却光束的光子集成MOT（PICMOT）。

Intel世界领先的半导体公司，在集成技术方面有优势，同时布局超导、半导体两条技术路线。2023年发布了一种在主流CMOS工艺技术上构建的具有12个量子比特的量子芯片Tunnel Falls。2024年，获得跨整个晶圆的自旋量子比特器件的大量数据，Intel开发了一种300mm低温探测工艺，同时在晶圆上实现了99.9%的单比特门操作保真度——这是全CMOS工业制造的量子比特中所达到的最高保真度水平。

QuEra由哈佛大学、麻省理工学院联合于2018年创立，已研发出拥有256比特的类比型中性原子量子计算机Aquila，并可在云端访问。2024年，QuEra在其256量子比特量子计算机Aquila中增加本地量子比特控制功能，也称为“本地失谐”。2024年，美国国家能源研究科学计算中心（NERSC）宣布延长与中性原子量子计算公司QuEra的合作伙伴关系，双方将继续研究可用于构建量子计算设备的中性原子技术。2024年，QuEra宣布获得了Google Quantum AI的投资。

图表 中国量子计算硬件整机代表性厂商



光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2025.2

中国：以中电信量子、量旋科技、华翊量子、幺正量子、中科酷原等为代表的量子企业多为初创公司

中电信量子集团
CHINA TELECOM QUANTUM GROUP

中电信量子成立于2023年，是中国电信股份有限公司全资设立的子公司。依托于中国电信在信息领域的优势，公司成立后在量子计算领域进展迅速。2023年11月公司发布了“天衍”量子计算云平台。该平台融合了“天翼云”超算及176量子比特超导量子计算能力，构建混合计算框架体系，支持量子算法与量子模拟计算等系列量子程序应用。2024年3月，中电信量子出资19亿元控股国盾量子；5月，发布中国电信（安徽）四算融合试验场；12月，正式发布“天衍-504”超导量子计算机。同时，中电信量子开展“2024量子科技中国行”活动，面向全国开展量子科技知识及产业应用普及。

国盾量子成立于2009年，是中国目前唯二的量子信息上市企业。公司联合中国科学技术大学、中科院上海技术物理研究所等合作完成了超导量子计算原型机“祖冲之1号”、“祖冲之2号”、“祖冲之3号”、“骁鸿”的研发与测试。2021年发布了第一代量子计算测控系统，第二代测控系统的集成度是上一代的10倍，目前已处于测试阶段。公司还向稀释制冷机、低温信号传输系统（低温线缆、低温器件）、软件等整机配套产品延伸，于2024年推出可商用、可量产的超导量子计算机稀释制冷机ez-Q Fridge与测温极限接近6毫开的氧化钌温度计ezQ-RX56。

量旋科技成立于2018年，已完成集成超导量子芯片、射频测控系统、稀释制冷机、量子云平台、量子操作系统及应用软件在内的产业级超导量子计算机。2024年，量旋科技的国际市场版图扩展到全球30多个国家和地区；公司的教育级核磁量子计算机已交付至哥伦比亚安第斯大学、墨西哥国立理工学院、希腊雅典国立技术大学、新加坡科技设计大学等百余所院校和客户；产业级超导量子计算机产品服务进一步开拓机构客户。

华翊量子依托来自清华大学强大的人才队伍、尖端的科研实力、丰富的实践经验，在离子阱赛道中崭露头角，成为一匹不容忽视的黑马，目前已经取得了一系列技术进展与商业化成果，包括HYQ-A37、HYQ-B100。5月，华翊量子宣布完成过亿元的Pre-A轮融资，由央视融媒体基金领投，百度风投、联想创投等跟投。此次融资旨在加速助力华翊量子研发新型离子阱量子计算机，拓展新业务场景，探索量子算法的更多行业应用。

中科酷原是中国首个同时具备原子量子计算和量子精密测量研发和产业化能力的公司。研发团队源自中科院精密测量科学与技术创新研究院，是中国最早开始中性原子量子技术研究的团队之一，拥有国家重点研发计划（973）项目首席科学家2人，国家级青年人才项目入选者3人，博士（后）20余人，共计发表高水平文章300多篇，团队在原子干涉法精密测量、中性原子量子计算等研究领域处于国际同类研究第一梯队。2024年，推出中国首台中性原子量子计算机“汉原1号”。

本源量子成立于2017年，进行超导和半导体两条技术路线的全栈布局，业务涵盖芯片设计与制造、其他核心硬件、软件，已发布量子芯片设计软件Q-EDA、半导体量子芯片电路载板、量子芯片激光退火仪、量子芯片无损探针台、量子芯片高真空存储箱等产品，目前已上线第三代72位超导量子计算机“本源悟空”，并已通过云平台开放使用。在行业合作方面，与金融、医疗、化工等领域广泛合作。公司还发布教学书籍《量子计算与编程入门》、量子计算教学机，举办量子计算比赛，在丰富产品和品牌推广的同时，也培养了行业人才。

幺正量子成立于2022年，以离子阱系统为技术核心，以实现分布式量子计算为目标，提供模块化、标准化、规模化的量子计算系统和测控系统，并沿路推动量子计算软硬件协同发展，不断扩展量子计算系统规模和计算能力。团队深耕离子阱量子系统及量子网络系统10余年，掌握该领域核心关键技术。公司成立初期，已成功获得近亿元天使投资。2024年，幺正量子正式发布自主研制的高通光离子阱量子计算工程机；正式向中国海洋大学交付自主研制的四光子纠缠源系统；牵头承担安徽省科技创新攻坚计划重大专项“低温芯片型离子阱量子计算系统”。

启科量子成立于2019年，拥有具有自主知识产权的模块化离子阱量子计算工程机“天算1号”（AbaQu 1.0）、ARTIO架构量子计算测控系统<Qu|Soil>、模块化低温离子阱<Aba|Qu|Cryoct>、离子阱低温真空系统<Aba|Qu|Cryovac>、离子阱环境控制系统<AbalQu|ENV>。公司正重点推进分布式离子阱量子计算、分布式量子网络、量超融合、量子云计算等项目。2024年，启科量子发布量子-经典混合算力云平台<Qu|Cloud>的1.0和2.0版本；其研发的<Aba|Qu>100接入中国移动“五岳”量子云平台；与中移（苏州）软件技术有限公司达成战略合作，将实现技术与资源的深度融合，在离子阱量子计算机、量子计算云平台等多个领域开展合作，推动量子计算技术在更多领域的应用。

硅臻成立于2020年，是一家专注于集成光量子芯片设计的公司，核心成员拥有超过20年集成光量子技术积累，研发团队专注于将量子光源、光量子操作及量子测量等核心光量子部分集成到可扩展的光学芯片上，从而实现基于集成光量子芯片的光量子计算机、量子安全芯片等。2024年，硅臻继续专注于大规模光量子计算网络芯片的研发，并成功流片32模式光量子计算网络芯片，该芯片将应用于下一代硅臻光量子计算机。目前，硅臻基于22模式大规模通用光计算网络芯片的全可调光量子计算原型机已经调试成功，可实现标记单光子干涉、单通道单光子干涉、双光子干涉、玻色子采样和量子受控非门等量子计算过程。后续将接入本源量子计算云平台，面向全球用户提供算力服务。

图表 加拿大硬件整机代表性厂商



光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2025.2

加拿大：代表性量子计算企业较少

Xanadu公司利用压缩态和硅光子器件。2023年，Xanadu推出首台具有量子计算优势的公共云部署计算机，与经典超级计算机需要9000年的时间相比，该计算机可在36微秒内解决一个问题；与劳斯莱斯合作进行量子机器学习、自动微分和优化量子-经典混合计算；与Pawsey超级计算中心建立全球合作伙伴关系；以及与Nvidia合作。2024年，Xanadu引入了一种针对以斯莱特行列式之和形式呈现的态的实现技术，该技术相较于此前所有方法展现出了好得多的扩展性，还提出了低精度量子相位估计（QPE）用于进一步提升态的质量。

D-Wave公司成立于1999年，是全球首家商业量子计算机供应商。2011年推出首款商用量子退火计算机D-Wave One；2013年推出D-Wave Two；2015年推出D-Wave 2X；2022年推出拥有拥有上千量子比特的Advantage2原型机；开发了Leap量子云服务平台和Ocean软件工具，为开发者提供量子-经典混合计算环境。2024年，D-Wave与加拿大德勤公司达成新的战略联盟，以加快加拿大政府和企业对量子计算解决方案的探索和采用。

图表 澳大利亚硬件整机代表性厂商



光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2025.2

澳大利亚：重点布局半导体量子计算

Silicon Quantum Computing由澳大利亚量子计算和通信技术中心（CQC2T）的创始人领导。该公司利用硅作为基础材料，取得了在量子计算领域的多项世界首创成就，包括实现最长的相干时间、固态中的最高保真度量子比特等。2023年，SQC与Silex Systems签订了合同，后者将提供关键材料零自旋硅（ZS-Si），以支持基于硅的量子处理芯片的信息存储和检索。2024年，制造了一种称为量子比特寄存器的四量子比特量子设备。

Diraq使用硅“量子点”技术制造量子处理器。这项技术利用了Diraq及其前身新南威尔士大学研究项目20多年研究开发的专有技术。该公司的方法依赖于代工厂用于生产当今半导体元件（CMOS）的现有硅制造工艺，从而开辟了一条更快、更便宜的上市之路。Diraq的目标是通过将单个芯片上的量子比特数提高到数百万甚至数十亿来彻底改变量子计算，以实现有用的商业应用。

图表 欧洲硬件整机代表性厂商



光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2025.2

欧洲：量子计算企业选取技术路线多样

Pasqal，2023年，推出了中性原子量子计算探索平台QuantumDiscovery该平台包括访问拥有200比特的类比量子计算机OrionAlpha，使用户能够体验真实世界的量子计算机。2024年，Pasqal宣布在其量子计算装置中一次性成功装载1000多个原子。这一突破标志着Pasqal在量子优势和可扩展量子处理器方面迈出了关键一步，证明了大规模中性原子量子计算的可行性。

IQM专注于开发针对特定应用进行优化的协同设计量子计算机。在2023年11月推出54比特超导量子处理器。IQM的专有技术结合了量子硬件和软件设计，可实现最佳性能和可扩展性。其量子云服务可通过流行的编程框架访问量子处理器。2024年9月，宣布实现了生产30台全栈量子计算机的量产里程碑，还成功向全球客户交付和安装了六台全栈量子计算机。

OQC成立于2017年，专门利用获得专利的3D架构构建超导量子比特和量子处理器。OQC声称，其3D方法可以增强量子比特的相干性和连接性，并实现量子处理器的模块化扩展。OQC还提供基于云的量子计算服务，名为“量子计算即服务”，这是英国和欧洲的首个平台，允许用户访问其量子处理器，并在亚马逊Braket等平台上运行应用程序。OQC还因其在量子计算领域的创新和影响被世界经济论坛评为2023年技术先锋之一。2024年，OQC宣布雪佛龙公司旗下的雪佛龙技术风险投资公司已加入其1亿美元系列B轮融资，双方将在能源行业开展量子计算合作。

AQT是一家在囚禁离子量子计算领域快速发展的奥地利公司。2021年，他们推出了世界上第一台可装入标准19英寸机架的量子计算机PINE。他们计划在未来几年开发出拥有数百或数千量子比特的更强大处理器。2022年，AQT推出了支持多达50个量子比特的激光光控制系统ROWAN；2023年，他们计划推出用于量子应用的超低漂移光学基准BEECH。AQT的专有技术利用单个原子作为量子比特，并通过主要云平台提供量子处理器访问。他们展示了对市场的理解和运营能力，并参与了欧盟旗舰项目MILLENION，以构建量子互联网生态系统。2024年，AQT赢得了欧洲囚禁离子量子计算机的招标，预计将于2025年安装。

Oxford Ionics公司正在利用囚禁离子技术和无噪声电子量子比特控制开发高性能量子计算机。2023年，OxfordIonics从量子和技术投资者那里获得了3000万英镑的A轮融资。公司还展示了具有高保真门和长相干时间的囚禁离子处理器。Oxford Ionics的独特优势在于其使用了专有专利电子丘比特控制（EQC）系统，无需通常用于囚禁离子系统的昂贵而复杂的激光器。Oxford Ionics的显著特点是将其量子处理器与标准半导体生产线集成，实现了量子芯片的可扩展性和可靠性。2024年，公司公布了最新进展：单、双量子比特门保真度达99.9992%、99.97%，SPAM保真度达99.9993%。

ORCA Computing使用光纤连接模块化量子处理器，并在室温下运行。2023年，他们推出了PT系列机架式、风冷、基于标准光纤组件的光子量子计算机，可与经典计算设备和工作流程集成，适用于量子-经典混合机器学习应用；推出PT系列软件开发工具包（SDK）；与政府和企业客户合作，探索和开发量子计算在各行业和跨领域的应用，如生成式机器学习和优化。他们的优势在于能够提供高性能、高可扩展性、高可用性和低成本的解决方案。2024年，ORCA Computing和波兰波兹南超级计算和网络中心（PSNC）宣布与英伟达合作，以加速混合量子经典方法的开发。ORCA Computing被蒙大拿州立大学（MSU）选中，要求提供两个PT-1量子光子学系统，以推进分布式量子计算和关键量子能力。

Quandela公司的技术是20多年来在纳米技术和光子工程等多个领域进行突破性研究的成果。2023年，他们推出了对现代量子技术至关重要的高质量单光子源Prometheus，实现了量子安全通信网络和可扩展量子处理器。他们推出了光子量子计算服务Quandela Cloud，允许用户向Quandela的量子处理单元（QPU）发送任务并实时监控。他们还发布了模块化、可重构、互联和可扩展的光子量子计算平台MOSAIQ。此外，他们还发布了与PyTorch兼容的基于Python的光子量子机器学习编程框架。2024年，Quandela宣布在蒙特利尔成立加拿大子公司Quandela Canada，迈出国际扩张的关键一步。

03 量子计算云平台代表性厂商

目前全球量子云平台大部分由量子整机公司自主搭建，此外还有其他类型公司也在搭建云平台或提供相干技术服务，典型厂商分别如下。

AWS全球最大的云计算服务商，四种类型（退火、超导、离子阱、光量子）的硬件都能在其云平台上访问。在容错量子计算研究方面已取得一定的成果。2023年，公司推出了新量子芯片Trainium2，错误率仅0.1%，且能源效率是上一代的两倍；以及一款Graviton4芯片，比前代性能提升30%。2024年，AWS在其Amazon Braket平台上接入IQM、Rigetti、IonQ等公司的量子计算机，向用户提供不同类型的量子算力。

NVIDIA成立于1993年，其在量子计算领域的主要贡献集中在开发加速量子计算的软件工具和硬件平台。其CUDA-Q平台是首个开源的量子-经典混合计算平台，支持多种量子处理器，能够实现量子与经典计算的无缝集成。此外，NVIDIA的cuQuantum SDK提供了加速量子电路模拟的工具，可将模拟速度提升至传统方法的75倍。NVIDIA还推出了DGX Quantum系统，结合了Grace Hopper超级芯片和量子控制技术，为量子计算提供了低延迟和实时纠错能力。2024年，NVIDIA宣布将通过开源NVIDIA CUDA-Q™平台加速全球国家超级计算中心的量子计算工作。

弧光量子成立于2020年，是量子计算软件行业的先行者，以加速量子信息产业发展为己任，汇聚全球量子软件人才，形成先进专业的技术力量，为客户提供前沿、便捷、安全的量子软件产品和量子计算服务，包括量子云平台、量子程序开发平台、量子EDA、量子应用及其他前沿科技研究。公司已与多家从事量子计算机研制的中国高校、科研院所、企业达成深度合作，在金融、工业、能源、生物制药等诸多领域为客户提供最前沿的量子机器学习、量子化学等软件产品和技术服务。2024年，公司在量子机器学习算法研发方面，获授权发明专利1项；在量子编译器研发方面，获授权发明专利2项；在量子计算应用方向，申请了十多项发明专利。

此外，公司获选第七届中关村国际前沿科技大赛大数据与云计算领域TOP10；在2024全国颠覆性技术创新大赛中获优胜奖；在“创客北京2024” 未来产业领域获二等奖；与合肥量超融合计算中心在量超融合计算领域达成战略合作；作为主要参与单位申报的2024年度“中央引导地方”专项金融科技方向课题《前沿金融科技风险监控平台关键技术研发及应用》获批立项。

04 量子计算上游代表性厂商

Bluefors成立于2008年，是一家芬兰公司，专门生产多个高科技行业所需的低温产品，包括稀释制冷机。为了应对不断增长的全球需求，该公司扩大了业务。例如，收购美国Cryomech和日本Rockgate。该公司在荷兰代尔夫特也有一个实验室。2024年，Bluefors推出了一款新型氦气再液化器Cryomech HeRL02-RM，专为从单个核磁共振（NMR）装置中回收氦气而设计；推出了一种无制冷剂、氦气驱动的测量系统XLDHe，可为1K温度范围内的实验提供极高的冷却功率。

Oxford Instruments于1959年成立于英国牛津，是一家在伦敦证券交易所上市的公司，为工业和科学客户提供高科技解决方案，包括分析设备、半导体设备、超导磁体、超低温设备及相关服务和支持。在60年的发展历程中，该公司以自身的研究优势、卓越的技术管理和产品服务，为全球科技发展做出了贡献。目前，其已成为科学仪器领域的跨国集团公司，在100多个国家和地区拥有生产基地、销售服务网络和客户。2024年，Oxford Instruments推出新一代稀释制冷机Proteox，新增侧面加载“二级插件”模块设计，使用户可根据不同需求安装和更换样品、通信线路和电子器件，实现了不同用户共用一台设备进行多项实验的。

Leiden Cryogenics于1992年从莱顿大学分拆出来。莱顿低温技术公司拥有一支灵活而专注的低温专家团队，为低温应用提供各种低温解决方案。目前，他们的系统具有目前市场上最低的振动水平和最高的冷却功率。

FormFactor成立于1993年，设计、开发、制造，销售和支持高精度、高性能先进的半导体晶圆探针卡产品和解决方案，同时也生产稀释制冷机。

中国电科16所又名“合肥低温电子研究所”，创建于1966年，是国内专业从事低温制冷、超导与低温电子技术研发、产品制造和工程应用的国家军工一类研究所。拥有“安徽省低温技术重点实验室”和“安徽省低温电子应用工程研究中心”等科技创新平台，同时也是中文核心期刊《低温与超导》的主办单位。

中国电科16所是国内最早一批开始稀释制冷机研究的单位之一，2022年实现首台工程化稀释制冷机交付，2024年度完成13套稀释制冷机生产交付。2024世界制造业大会，中国电科16所稀释制冷机产品作为“撷英十品”在大会开幕式发布。并已完成30余款低温电子器件产品研制，具备100%国产化能力，形成了系列化产品，实现批量市场应用和完全自主可控。其中，低温低噪声放大器等效噪声温度低至3K以下，低温隔离器隔离度达到60dB，低温低通滤波器实现高带外抑制、低温衰减器实现极低温环境高稳定性，技术指标国际先进。

量羲技术专注于极低温极微弱信号测量调控设备的研发、生产与销售，产品可应用于超导量子计算、表面物理研究、拓扑超导、分子量子霍尔效应、极端物性研究、高能物理研究等相关领域，其中超导量子计算是量羲技术产品目前最主要的应用领域。2024年，量羲技术推出了1000μW大冷量无液氦稀释制冷机，可以搭载超过1500路高密度射频测量线路及与之匹配的高密度滤波、衰减模组等，并成功中标包括中科院理化技术研究所在内的多家单位。

中船鹏力超低温成立于2014年，为中国船舶集团第八研究院鹏力科技集团发起成立的高科技企业，是国家级专精特新“小巨人”企业，是中国首家在全球拥有G-M制冷机自主知识产权并实现产业化的企业，是各类高性能、系列化超低温制冷设备制造商和低温应用综合解决方案服务商，打破了欧美公司的长期垄断。公司主要产品包括G-M制冷机、稀释制冷机、低温真空泵、低温测量仪器、氦氖氢分离纯化液化设备、LNG再液化装置、低温恒温器等。

知冷低温依托于安徽大学AHU-DR400科技成果而成立，是一家集极低温仪器设备研发、生产、销售、技术咨询为一体的高科技公司。公司独立自主研制的极低温稀释制冷机填补了中国空白，打破了中国极低温设备依赖进口的局面。2024年，知冷低温交付多台ZL-DR400型稀释制冷机；获得“国家级科技型中小企业”称号；获得了“合肥市雏鹰企业”称号，并被认定为“2024年合肥市新产品新技术新模式”。

中微达信成立于2017年，致力于常温测控系统自主芯片化、小型化和极低温量子测控阵列芯片的研发及产业化工作。目前公司已获得顶级基金数轮投资。2018年研制了8比特量子计算机控制系统；2019年研制了32比特量子计算机控制系统；2020年推出可媲美小型化原子钟性能的高阶芯片级分子钟；2021年公司推出支持百比特量子计算测控系统；2022年公司推出支持千比特量子计算测控系统及多款低温低噪放产品；2024年公司推出全新可扩展低延迟反馈量子计算测控系统，具备“单次触发多次测量”及“复杂快速反馈控制”的功能；2024年公司推出“蜀山”系列低温CMOS量子测控芯片组，可以显著降低当前量子测控系统的互联复杂度、成本和漂移。

西部超导材料科技股份有限公司成立于2003年，是中国专门从事有色金属（钛合金、高温合金）材料及超导材料研究、开发和生产的高新技术企业，是中国航空用钛合金棒丝材的主要研发生产基地，是全球唯一的超导用铌钛锭棒、超导线材、超导磁体的全流程生产企业。低温超导材料广泛应用于MRI、NMR、磁控拉晶磁体、医用加速器磁体、高能物理加速器磁体、强磁场应用科研磁体、核聚变项目以及大科学装置等多个领域，NbTi、Nb3Sn等多种低温超导材料的产品性能已经达到全球领先地位，2024年超导材料产量实现3000吨以上，位居世界先列。

10

产业分析与预测

目录

10
产业分析与预测

01 产业规模预测

02 主要地区产业规模预测

03 上游硬件细分产业规模预测

04 下游应用产业规模预测

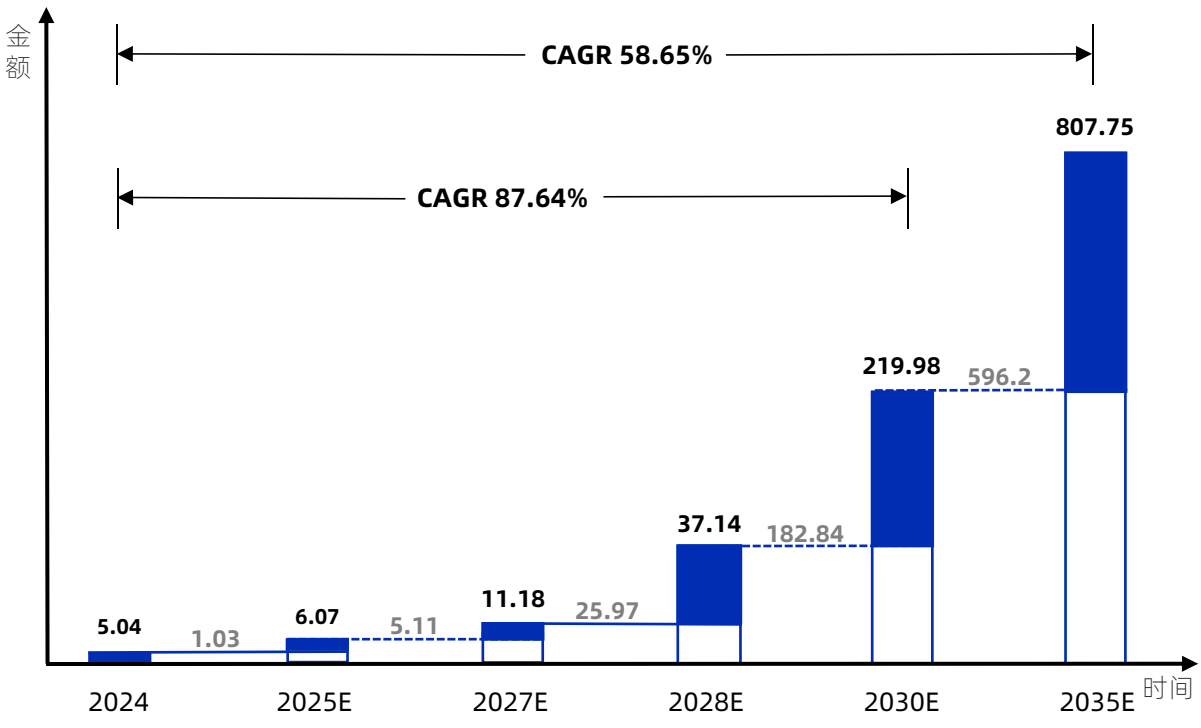
01 产业规模预测：谷歌Willow提升未来预期

随着IBM、Google、Quantinuum等量子计算巨头如期完成路线图的规划，依旧预计2027年会是全行业一个重要的时间点，专用量子计算机将逐渐解决，如组合优化、量子化学、机器学习，引导材料设计和药物开发等问题。

本报告将量子计算产业规模预期进行了小幅调整，调高了2030年左右的总体规模；上游规模占比有所下降，中游占比提升，下游应用占比基本持平。原因主要包括以下四个方面。

第一，参考了IBM、Google、Quantinuum等最新发布的技术路线图，预计到2028年，量子门数量、以及纠错等计算技术将达到较为成熟阶段，为实际的商业化应用奠定坚实基础。第二，谷歌Willow芯片的纠错成就，促使对专用量子计算机的推出时间表更为乐观。第三，至2035年，量子计算行业尚处于相对早期的阶段，利润主要集中在中游更符合同类行业的发展规律。第四，随着量子计算技术的不断演进，以及AI技术等领域的快速发展，量子计算的应用边界被不断拓展，从而使量子计算的商业潜力更加广泛和深远。

图表 全球量子计算产业规模（2024~2035E）（单位：十亿美元）



ICV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2025.2

注：CAGR即复合年均增长率；
在此表示在一定连续年度期间的增长情况。

2024年，全球量子计算产业规模达到50.37亿美元，2024至2030年的年平均增长率（CAGR）达到87.64%。2027年，专用量子计算机预计将实现性能突破，带动整体产业规模达到111.75亿美元。在2028年至2035年，产业规模将继续迅速扩大，受益于专用量子计算机在特定领域的广泛应用和通用量子计算机的技术进步，到2035年总产业规模有望达到8077.50亿美元。这一接近万亿级别的产业规模标志着量子计算会在此进入全面成熟和商业化的关键阶段，预示着未来量子计算将在各个领域带来深远而持久的影响。

02 主要地区产业规模预测：欧美领先，中国量子计算产业份额增长显著

全球量子计算市场呈现出动态变化的趋势。2024年，全球量子计算产业规模达到50.37亿美元，其中北美占比29.73%、欧洲占比28.83%、中国占比25.30%、亚太地区（除中国外）占比12.24%、其他地区占比3.90%。受益于其深厚的研发基础、科研机构的活跃以及政策支持等因素，北美占比最大，反映了当前北美在量子计算领域的较为显著的影响力。

2035年，随着量子计算市场的不断成熟和发展，全球产业规模飙升至8077.50亿美元。在这一时期，中国的产业份额显著增加到29.49%。亚太地区（除中国外）略微下降至8.22%，其他地区占比1.72%，北美进一步上升在33.81%，欧洲则维持在26.76%。

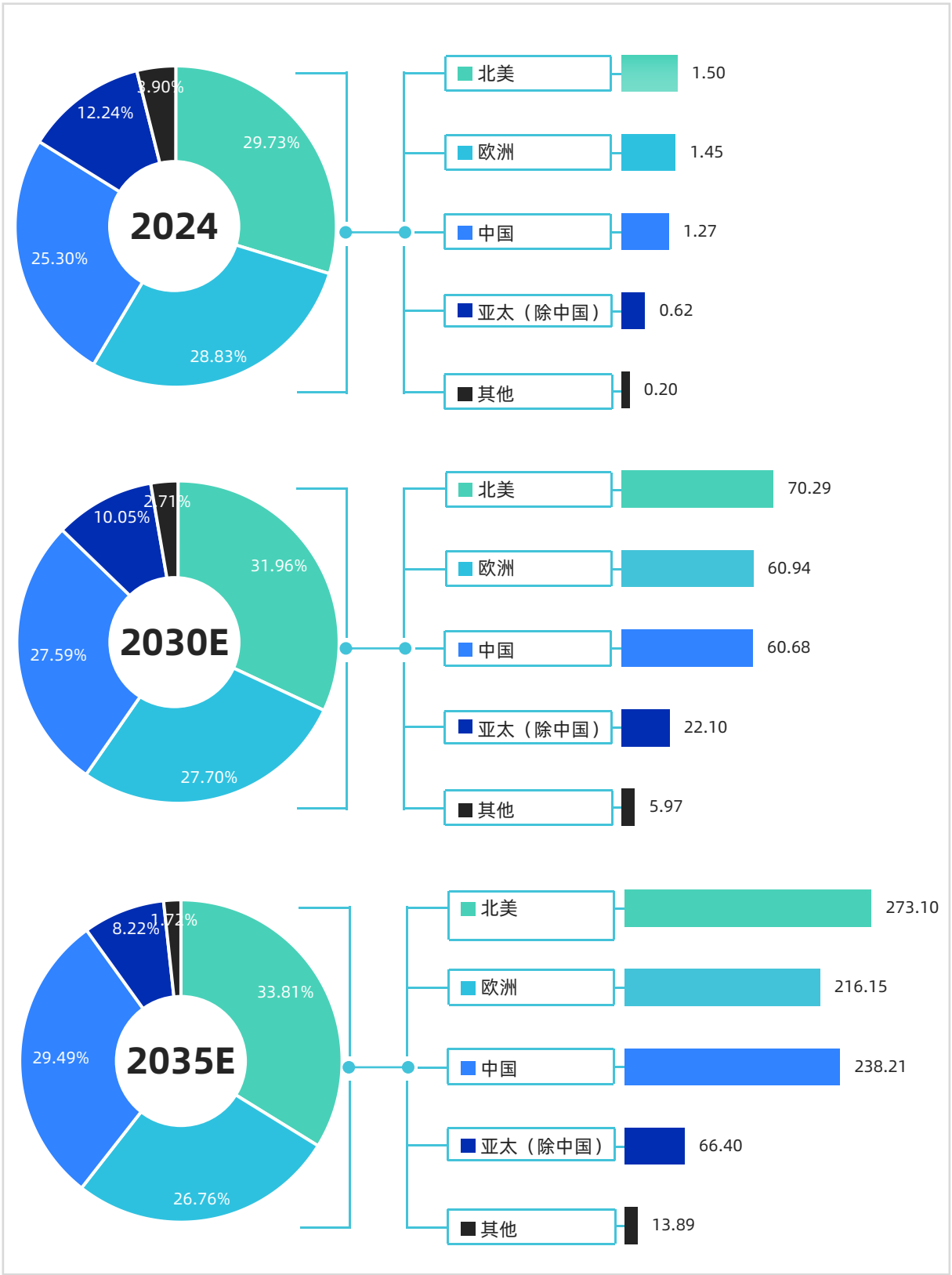
中国产业规模的增加，首先要归功于其在科技创新和研发投入方面的强大实力。中国政府一直在积极推动科技创新，通过资金投入、政策支持和研究机构建设，努力提高国家在量子计算领域的科研水平。这种支持在高校、研究机构和企业中形成了协同创新的生态系统，推动了量子计算领域的技术突破。

亚太地区（除中国外）尽管产业份额下降，但整体产业规模依然增长迅速，说明该地区在量子计算领域依然保持强劲的发展势头。

北美地区一直是全球科技创新的中心，其在2035年仍然保持较大的产业份额，反映了该地区在量子计算领域一直处于领先地位。美国拥有众多世界一流的科研机构、企业和创新中心，持续投入巨额资金进行量子计算的研究和开发，确保了其在市场上的竞争力。

欧洲产业份额的上升则源于其持续的研发投入、政策支持以及创新生态系统的繁荣。欧洲各国积极构建科研合作网络，推动合作和知识共享，使得欧洲在量子计算领域形成了有力的联合力量。

图表 2024、2030E、2035E年全球量子计算各地区产业规模（单位：%，十亿美元）



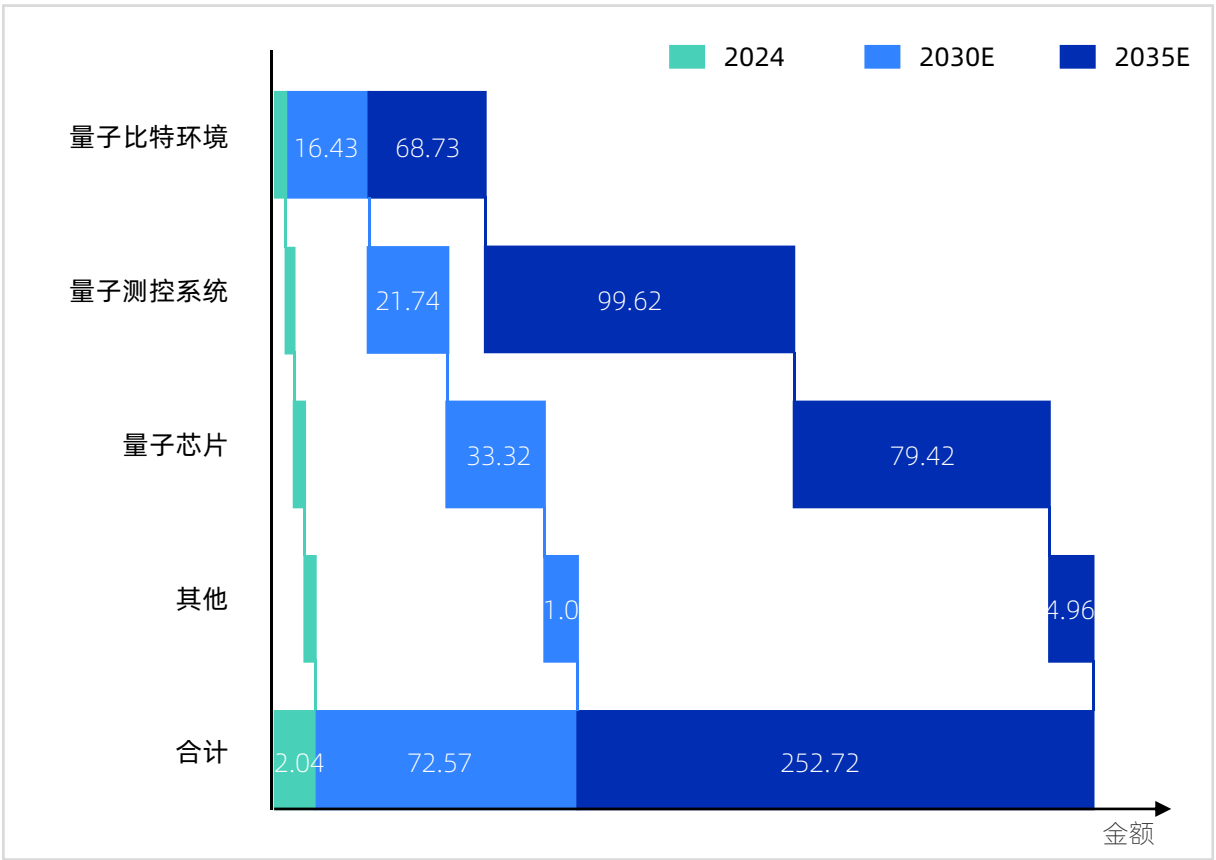
ICV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2025.2

03 上游硬件细分市场规模预测：量子比特测控系统增长最迅猛

上游市场在量子计算领域的发展至关重要，主要分为量子比特环境、量子比特测控系统、量子芯片以及其他。技术进步、应用领域的扩大、政策支持、投资增加以及商业化的挑战和机遇等因素，共同推动了量子计算市场的快速发展。从2024年到2035年，上游市场规模呈现出显著的增长趋势，市场总规模由2024年的20.4亿美元增长到2035年2527.2亿美元。

量子比特环境的市场规模的高速增长表明，在量子计算的演进中，提供稳定、可控的环境成为至关重要的因素。技术的不断进步推动了对量子比特环境的不断增加的需求，包括低温环境、低噪声等。在这一过程中，投入在创造适宜的量子比特环境上不断增加。

图表 全球量子计算上游市场规模（2024、2030E、2035E）（单位：十亿美元）



ICV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2025.2

与此同时，量子比特测控系统的市场规模增长最为迅猛，从2024年的几亿美元到2030年的217.4亿美元，最后增长到2035年的996.2亿美元，跨越了近3个数量级。测控系统对于保持量子比特的相干性和实现量子计算任务至关重要，而技术的发展推动了对更为精密、高效的测控系统的持续需求增加，从而推动了市场规模的巨大增长。

同样，量子芯片的市场规模到2030年以及2035年均有指数级别的增长。量子芯片作为量子计算的核心组件，对实现量子计算任务具有至关重要的作用。随着对量子计算性能要求的提高，对更先进、可扩展的量子芯片的需求持续上升，推动了上游市场规模的显著增长。

04 下游应用市场规模预测：金融领域潜在市场巨大

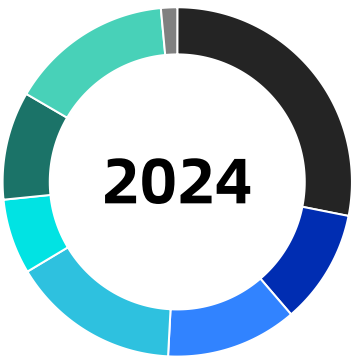
量子计算的行业应用合作部分涵盖了多个领域，如国防军工、金融服务、生物医药、化工材料、物流优化等。在这些领域，已经深耕多年的大型企业或行业巨头与量子计算软硬件公司展开合作，以解决当前面临的实际问题和挑战。

值得注意的是，这些合作伙伴并非专门的量子软件公司，而是各行各业多年来积累的经验丰富的巨擘。他们在各自领域深谙行业发展的方向和需求，通过与量子计算软硬件公司合作，能够针对当前需要大规模计算能力来解决的实际问题，开展合作探索。这些合作伙伴对各自行业的发展方向和痛点有深入了解，通过与量子计算软硬件公司的合作，可以共同探索和开发适用于自身行业的量子计算解决方案。

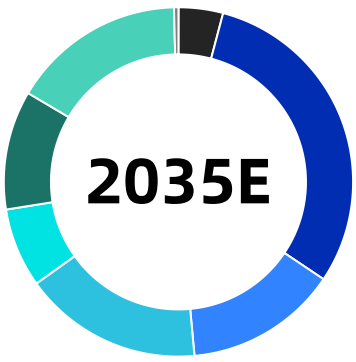
通过行业间合作，用户和企业可以充分利用量子计算的能力，解决复杂问题和优化各种业务流程。这种合作模式推动了量子计算技术的应用落地，并为不同行业带来了巨大的潜力和机遇。

当前，全球量子计算机的主要应用场景为科研，即高校院所、国家实验室及大型科技公司等购买真机，用于学习量子计算机的运作原理并开展相应研发活动，或是用于数学、物理、化学等基础学科中的研究。随着量子计算机的成熟以及其他应用场景的成熟，科研市场的占比将快速下降。2035年，科研领域的应用规模达到83.50亿美元，较2030年的77.92亿美元、2024年的0.70亿美元显著提升。

图表 全球量子计算下游应用市场规模（2024 & 2035E）（单位：十亿美元）



0.07	科研	8.35
0.03	金融	61.37
0.03	医药	28.66
0.04	化工	33.60
0.02	能源	14.90
0.03	物流	22.33
0.04	国防	32.63
0.01	其他	0.83



ICV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2025.2

2035年，金融服务领域的应用规模达到613.67亿美元，较2030年的110.57亿美元、2024年的0.26亿美元显著提升。这一变化主要源于金融行业对量子计算技术的深刻认可，特别是在风险管理、投资组合优化等方面的应用。量子计算的强大计算能力赋予其在解决金融难题上的优越性能，这使得金融领域对量子计算需求快速上升，市场份额得以快速扩大。

2035年，生物医药领域的应用规模达到286.57亿美元，较2030年的68.60亿美元、2024年的0.30亿美元显著提升。这一变化主要源于生物医药行业对量子计算技术的深度应用，特别是在药物研发和个性化医疗等方面。量子计算的高效处理能力能够显著加速药物分子的模拟和筛选过程，从而大幅缩短研发周期和降低成本。

2035年，化工材料领域的应用规模达到336.02亿美元，较2030年的83.61亿美元、2024年的0.39亿美元显著提升。这一变化主要源于化工材料行业对量子计算技术的广泛应用，特别是在新材料研发和生产工艺优化等方面。量子计算的强大多变量处理能力能够显著加速新材料的分子结构设计和性能预测过程，从而大幅缩短研发周期和降低成本。



11
产业展望

目录 11 产业展望

01 新结构、新工艺、新材料提升量子处理器的性能

02 分布式量子计算助力量子比特规模扩展

03 量子计算机群助力量子网络建设

04 人工智能赋能量子软硬件

05 纠错算法进展迅速，加快量子应用软件落地

06 混合算力平台是量子云平台中短期内的主要发展方向

07 标准化建设需要全球共同参与

08 投资与政策推动产业发展、助力成果转化

09 全球多个主要经济体追求上游产业链自主可控

10 量子人才培养已成全球基本共识

01 新结构、新工艺、新材料提升量子处理器的性能

量子处理器作为量子计算机的核心部件，其性能对量子计算系统的计算能力和应用前景起着决定性作用。目前，传统量子比特结构在实验室中虽已取得显著成果，但在实际应用中仍面临诸多技术难题，例如退相干现象易导致量子比特状态不稳定，噪声干扰影响计算准确性，可扩展性不足限制了量子计算机规模的扩大。因此，从芯片架构设计、制备工艺、封装技术到测试流程等多个维度，推动量子计算处理器的迭代更新迫在眉睫。

新结构助力量子芯片性能提升

在新型量子处理器结构设计方面，目前在提升量子比特性能上，已取得了不少成果。以超导量子比特为例，为了改善超导量子比特性能，Unimon、Gatemon、Flowermon等多种新型超导量子比特结构应运而生。不过，像Flowermon这类新结构，目前在性能表现上短期内还难以超越Transmon、Fluxonium方案，后续还需更多时间和研究来验证其发展潜力。

新工艺提高量子比特良率

新工艺的进步也为量子处理器制造带来了变革，促使其朝着更高效、更可靠的方向发展。当前，量子处理器制造工艺尚不成熟，量子比特的集成度和稳定性依旧是亟待解决的关键问题。但随着半导体技术和纳米制造技术的不断突破，未来量子处理器的制造工艺将得到持续优化。

新材料为提升性能创造了有利条件

材料科学的新进展同样为量子处理器开发开辟了新路径。超导材料性能的改进、新型半导体材料的应用以及基于二维材料的量子器件研发，都为提升量子处理器性能创造了有利条件。特别是石墨烯、拓扑绝缘体等新材料的出现，有望大幅提高量子比特的操作效率和稳定性。例如，斯坦福大学研发出一种制备铌基量子比特的新方法，成功实现了6200万分之一秒的相干时间，相比此前性能最佳的铌基量子比特，相干时间延长了150倍。

未来，随着研究的逐步深入和技术的日益成熟，有望诞生性能更加卓越、稳定且具备良好可扩展性的量子处理器，为量子计算在更多领域的广泛应用筑牢根基。

02 分布式量子计算助力量子比特规模扩展

量子比特的高效扩展是量子计算获取量子加速优势需要解决的基本问题。按照当前的发展趋势，单块量子芯片上的比特数很快便能达到容错量子计算所需要的数量级，但事实并非如此。在扩展量子比特规模时，存在三个制约因素，它们这决定了扩展之路不会一帆风顺，但分布式量子计算能够更快地实现量子比特规模扩展。

量子比特扩展中的三大难点

首先，离子阱与中性原子需要高真空、超导则需要超低温，而保证这些理想环境的容器体积有限，而更大容器不仅需要更多的资金投入，也更难保证环境的稳定性，严重降低能效比。

其次，随着芯片上比特数量的增多，控制系统的复杂度急剧上升，控制线会占用容器的大部分空间，其布局和噪声控制等变得更加困难；比特热噪声增大、比特间串扰增多，退相干现象愈发严重，也更难支撑信息的有效传递，反而降低了系统的信息处理效率。

此外，由于系统参数偏移导致性能下降，量子芯片需要经常校准，而这项工作非常耗时，将严重制约大规模量子芯片的有效利用时间。

由此可见，短期内在单块芯片上集成数十万甚至数百万个量子比特是不太现实的，需要采用其他可行的比特拓展方法，而分布式量子计算因其高度可行性和灵活性，成为解决量子比特扩展问题的关键技术之一。

两类分布式量子计算各有优势

根据芯片间通信方式的不同，分布式量子计算可以分为基于量子隐形传态和基于量子线路拆分这两种类型。

第一类分布式量子计算通过量子隐形传态进行芯片间通信，同时包含量子信道和经典信道。经典信道用于传输测量操作引起的量子信道丢失的信息，表征整个系统状态的量子态始终处于纠缠态。

第二类分布式量子计算仅通过经典信道实现芯片间通信，各芯片上的子系统分别处于纠缠态，各子系统之间原本的量子信道被完全分解为经典信道，当前主要以量子线路拆分技术为代表。

第一类主要面向容错量子计算，而第二类被认为可在NISQ时代有效提升量子计算机算力。

多维度成果频出，前景可期

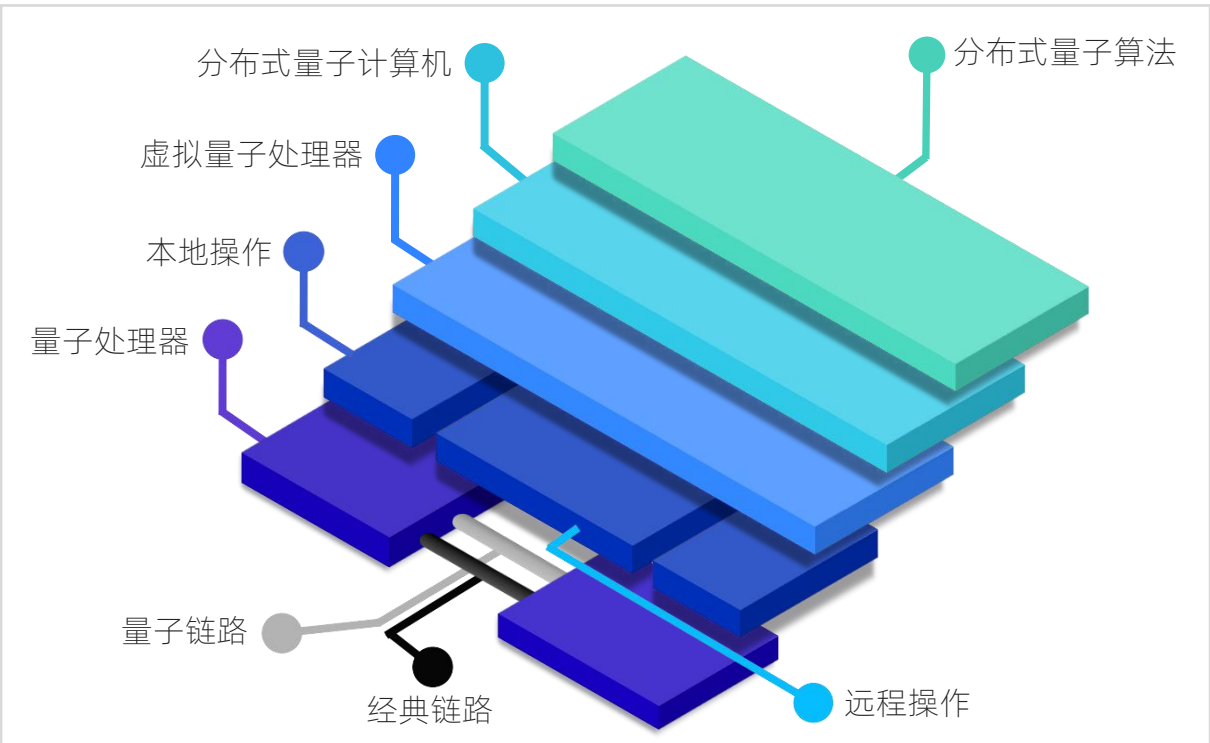
目前，各研究机构已开展对分布式量子计算的研究。例如，2023年，IBM推出了采用第二类分布式架构的系列超导量子计算机Quantum System Two，同时实现了两块具有133量子比特的Heron芯片的连接，2024年，IBM将连接的芯片升级为具有156量子比特的Heron R2，还规划于2025年推出连接7块Heron R2的量子计算机Flamingo，届时量子比特数将达到1092个；2024年，IonQ的研究人员探索出了离子-光子纠缠、离子-离子纠缠的方式，实现了不同离子阱量子计算系统之间的远距离量子纠缠；马克斯·普朗克量子光学研究所与苏黎世联邦理工学院在光腔中使用光镊组装量子网络寄存器。接下来，将会有更多企业投入分布式量子计算的研究。

硬件方面，关键难题之一是在增加量子比特数量的同时，维持对每个量子比特的精确控制和相互连接。对此，已有多种解决方案提出。例如，华翊量子与清华大学合作演示了双类型量子比特方案中的一个囚禁离子量子网络节点，其中两种类型的量子比特以两个不同超精细结构能级编码，最终在数百毫秒的典型时间尺度内生成离子-光子纠缠，并在验证其小串扰，相干时间超过几秒钟。

算法方面，除了并行传输方法外，还可以通过设计分布式量子算法或采用其他编译优化方法来降低节点间通信复杂度。例如，启科量子与中山大学提出了一种分布式精确广义Grover算法（DEGGA），可实现100%成功率的多目标精确搜索，同时降低了每个计算节点的量子门和量子比特数量需求，加快了搜索过程。

从长远角度来看，作为量子网络的主要应用之一，分布式量子计算可以更好地整合接入量子网络的海量量子计算机，从而解决高难度问题。

图表 分布式量子计算生态系统架构



光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2025.2

03 量子计算机群助力量子网络建设

作为支撑分布式量子计算、量子安全通信、增强量子传感的基础设施，量子网络通过多节点量子资源协同机制，构建起量子信息传输与处理的新型范式。

量子网络建设分三阶段演进

量子网络的技术演进路径呈现三阶段发展特征：1.0阶段聚焦量子点对点链路构建，实现网络协议栈物理层突破；2.0阶段攻克量子链路层技术，建立具备多节点连接管理与动态纠缠供给能力的量子交换架构；3.0阶段实现网络层技术突破，通过量子中继与长程传输技术的协同创新，构建覆盖广域空间的弹性量子网络，并最终形成包含计算、通信、传感的量子互联网。

政策合力，推动量子网络远景目标

政策方面，全球主要科技体已形成战略共识，并制定了相应的政策。2020年至今，美国、荷兰、日本等国家相继出台《美国量子网络战略愿景》、《量子网络基础设施法案》、《量子技术国家议程》、《量子计算网络安全防范法案》、《东京量子合作声明》等重要量子技术战略性文件，均把量子网络/量子互联网作为远景目标。

全球科研院所与企业积极布局

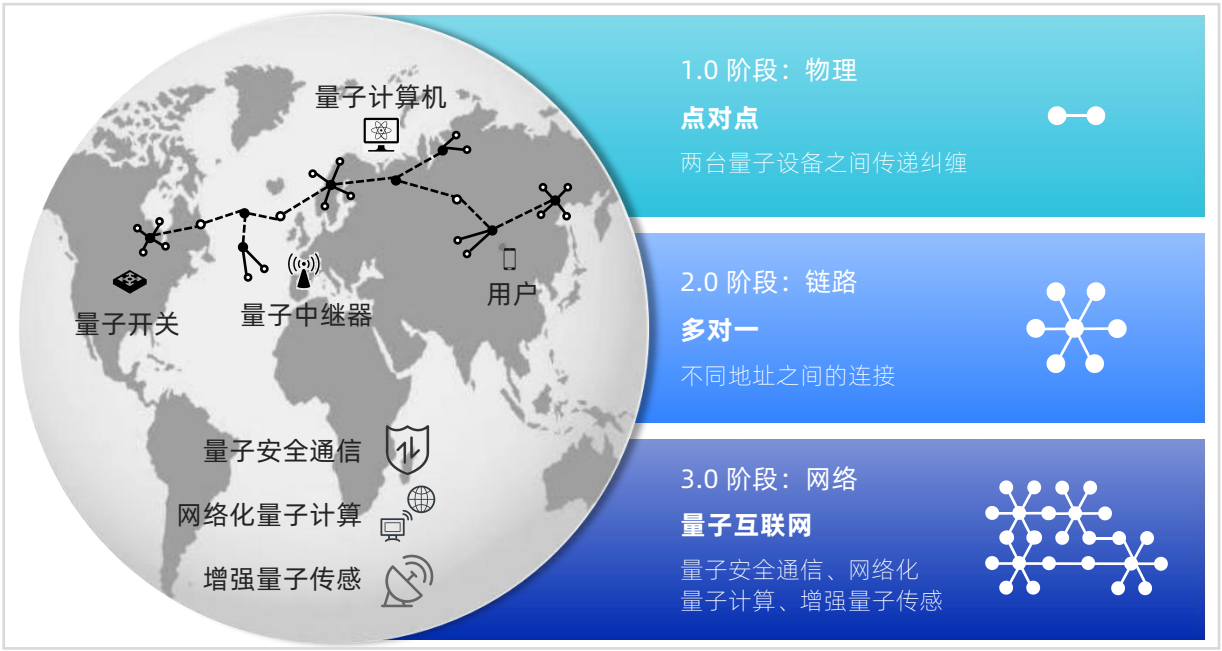
科研布局方面，量子网络建设已经逐步开展。荷兰代尔夫特理工大学QuTech、美国哈佛大学、德国联邦物理技术研究院、中国科学技术大学、清华大学等众多院校已开展量子网络研究。欧美也已经成立相关公司开展研究，比如美国Aliro Quantum、美国Cisco、美国Qubitekk（已被IonQ收购）、美国memq、法国VeriQloud、瑞士ID Quantique。与此同时，欧盟成立了“量子互联网联盟”（Quantum Internet Alliance）助力量子网络建设。

为量子计算网络发展注入新动力

技术方面，分布式量子计算的发展或将首先解决量子比特的扩展难题，而后将用于构建量子计算网络，推动算力飞跃。此外，量子盲计算协议可实现计算任务的隐私保护委托；量子集群架构借鉴经典超算的节点互联经验，探索量子信息交换路由新范式。

整体来看，目前量子网络发展仍呈现非均衡特征——量子通信网络进入工程验证阶段，量子计算与传感网络尚处探索初期，因此真正实现三网融合的量子互联网仍旧遥远。

图表 量子网络示意图及三个发展阶段



光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2025.2

04 人工智能赋能量子软硬件

随着人工智能（AI）与量子计算的迅猛发展，二者的融合正逐渐成为科研领域的重要研究方向。“AI+量子”的组合能够优化量子计算的软硬件设计，为量子计算迈向更高效、更实用的阶段提供强大助力。

AI辅助提高硬件设计效率

在量子计算硬件设计环节，AI发挥着至关重要的作用，尤其是在量子线路设计和量子门操作的优化上。以T门为例，它是量子计算中不可或缺的逻辑门，在众多量子算法的实现中扮演关键角色。然而，T门的操作较为复杂，如何有效减少其使用数量成为量子计算领域的关键问题。Quantinuum、Google DeepMind等机构利用AlphaTensor，自动对量子线路中T门和π/8门的使用进行优化，通过深度强化学习来探索更高效的量子计算方式。此外，借助AI技术，量子EDA软件能够智能识别并优化量子线路设计中的缺陷，有望进一步提高量子计算芯片设计工作效率。

量子AI模型有望为图像识别、自然语言处理等领域带来颠覆性突破

AI与量子计算的融合还促使了新的量子AI模型的涌现。量子AI模型是量子计算与人工智能的融合产物，其核心在于利用量子计算的并行性和高效性来处理传统计算机难以解决的复杂问题。例如，量子神经网络是量子AI模型的一种典型形式，通过量子比特的叠加和纠缠特性，可以显著提升模型的计算能力和效率，尤其是在大数据处理、图像识别和自然语言处理等领域，量子AI模型有望为其带来颠覆性突破。

“AI+量子”促进量子算法和量子应用创新

AI+量子技术的融合不仅体现在量子计算的软硬件优化上，还促进了量子算法和量子应用的创新发展。通过AI算法的辅助，研究人员可以更快地设计和验证新的量子算法，并找到最适合量子计算的应用场景。这种协同作用将推动量子计算从理论研究向实际应用加速过渡，为解决诸如复杂优化问题、药物设计、金融风险分析等现实问题提供新的解决方案。例如，德国奔驰与西班牙Ayesa合作开发了基于经典和量子AI的解决方案Q4Real，该方案能够在汽车进入生产线前自动检测异常。

未来，随着量子计算机技术的不断成熟，量子计算有望反哺AI领域，助力减少AI模型中的训练参数，进一步提升AI模型的性能和效率，开启二者相互促进、协同发展的全新局面。

05 纠错算法进展迅速，加快量子应用软件落地

2024年，Heron_R2、Willow、祖冲之三号等量子处理器的发布，使得从业者能够调用更多高品质的量子比特来测试算法的性能。但量子计算机中存在大量难以避免的错误，因此需要量子纠错来降低量子线路的错误率。

量子纠错进展显著，逐步迈向实用化

2023年初，Google与南方科技大学先后实现突破盈亏平衡点的量子纠错。自此，量子纠错进入“越纠越对”的时代。2024年，多家机构在量子纠错领域取得突破性进展，推动了量子计算机迈向实用化。例如，Google采用表面码纠错，并测试了从3x3到5x5再到7x7的物理量子比特阵列，每次错误率均降低一半，取得了量子纠错领域的巨大进步。Google还推出了解码器AlphaQubit，其基于transformer的递归神经网络来学习解码表面码。其在码距为3和码距为5的表面码方面优于其他最先进的解码器。

量子纠错助力逻辑量子比特数量纪录频刷新

量子纠错技术的进步使得逻辑量子比特数的记录不断被刷新。例如，微软与Quantinuum通过改进和优化Quantinuum的56物理量子比特H2机器的量子比特虚拟化系统，创建了12个逻辑量子比特。微软与Atom Computing推出了一款具有24个逻辑量子比特的中性原子量子计算机。Quantinuum用52个物理量子比特构造出50个纠缠逻辑量子比特的GHZ态，保真度为98.09%到99.06%。

处理器性能提升加速量子应用软件研发

量子比特数量的增加与质量的提升使得一部分原本只能在理论上探讨的复杂量子算法有了实际实现的可能。目前，一部分量子算法研究人员将精力投入能够在NISQ计算机运行的算法，推动量子计算实用化。例如，在金融、材料科学、药物设计等领域，量子计算的潜力已经开始显现。通过利用大量量子比特，研究人员可以模拟更复杂的分子结构、优化投资组合、甚至在人工智能领域进行深度学习模型的训练。这些应用场景的探索，标志着量子计算正在从实验室走向实际应用。例如，加拿大OLED技术开发商OTI Lumionics和加拿大量子纠错公司Nord Quantique正在利用量子模拟进行电子结构计算、振动电子光谱和从头算分子动力学，旨在确定先进材料开发效率的提高方法，这些材料可能应用于显示器以外的多个行业，包括半导体、制药和特种化学品。

跨学科合作驱动算法软件创新与应用拓展

算法、软件的设计离不开跨学科合作。首先，量子计算是一门交叉学科，涉及到物理、计算机、数学等多个领域，本就离不开跨领域的交流。其次，要想将量子计算的优势拓展并应用到化学、医学、金融、气象等更多领域，实现量子计算技术的全面发展和普及，那就少不了跨学科合作。例如，花旗银行创新实验室与以色列量子软件公司Classiq建立合作，双方将借助Amazon Braket平台共同研究用于投资组合优化的量子解决方案。只有与不同行业开展合作，才能让量子算法更好更快地取得创新。

未来，随着硬件和软件技术水平的不断进步，量子计算将逐步走向成熟，并在更多实际应用中展现其巨大潜力。

06 混合算力平台是量子算力中短期内的主要发展方向

在量子计算领域，由于目前量子计算机性能有限、实用量子算法稀缺等原因，量子-经典混合算力平台正在成为各大机构发展量子计算云平台的主要方向。混合算力平台根据经典计算和量子计算各自的优势，对计算任务进行分配，为用户提供了更强大的计算能力和更广泛的应用场景，成为量子计算中短期内发展的重要趋势。

通过在云平台上集成量子计算资源，混合算力平台能够以相对较低的价格，随时向用户提供量子计算服务，不仅有助于推动量子计算技术的普及，还为量子计算在科研、金融、医疗等领域的应用提供了更多可能。

全球各大机构积极推动混合算力平台建设

目前，全球各大科技公司、研究机构、超算中心都在积极发展混合算力平台。例如，IBM、Google和微软等公司已经在其量子计算云平台中引入了混合算力解决方案，为用户提供量子-经典混合计算服务。启科量子携手劢亚科技联合发布天基量子混合算力平台的架构以及未来的发展路线图，该平台将劢亚科技的星脑系统与启科量子的离子阱量子计算机结合，最终实现天地一体化混合算力融合。这些混合算力平台不仅提供了强大的计算资源，还通过开发者工具和教育资源，促进了量子计算生态系统的建设。

混合算力平台的优势尚未充分彰显

不过，目前混合算力平台的优势尚未充分彰显。一方面，量子计算硬件性能欠佳，难以支撑大规模运算任务；另一方面，量子-经典混合算法及框架在实际应用中尚未凸显出显著优势，加之任务分配、数据整合等流程较为复杂，使得混合算力仍处于探索尝试阶段。另外，混合算力涉及多个不同算力领域，而此前各领域人才之间几乎没有交集，在融合过程中出现诸多沟通协作与技术适配等问题。

总的来说，混合算力平台作为量子计算与经典计算的有机结合体，已然成为量子计算云平台中短期内的主要发展方向。但不可忽视的是，混合算力目前面临诸多难题，从数学理论层面也尚未证实量子-经典混合算法相较于纯经典算法或纯量子算法具有绝对优势。因此，当务之急是尽快构建一套科学合理、针对性强的混合算力系统评价体系，以此推动混合算力平台的健康发展。

07 标准化建设需要全球共同参与

标准对于量子信息科技成果转化、产品应用推广和产业生态建设具有重要推动作用。

标准化建设引导和促进产业健康发展

技术标准通过规范产品和应用的功能及性能一致性，可提升产业链分工合作水平与研发效率，降低系统成本。通过行业规范，可以增强企业市场竞争力和用户认可度，引导和促进产业健康发展。因此，量子信息技术标准化也是全球主要国家在发展战略布局中的关注重点之一。2024年7月，美国白宫发布涵盖量子信息技术在内的《关键和新兴技术国家标准战略》实施路线图，提出增加政府项目支持，加大标准化前期研究投入，提升利益相关者参与度，加强政府机构间和公私部门间沟通协调，开展标准化领导者和人才培养，加强与盟友国家合作，提升国际标准组织影响力，推动标准化评估与认证等战略目标和具体任务。

逐步推进，构建全球量子计算标准体系

全球量子计算标准方面，2024年1月，ISO/IEC成立量子技术联合技术委员会（JTC3），工作职责涉及量子信息技术（量子计算与量子模拟）、量子计量、量子源、量子探测器、量子通信和基础量子技术。目前，JTC3已设立1个战略规划顾问组和6个技术方向特设组，在研项目1项。

中国量子计算标准方面，TC578负责量子计算和量子传感领域，目前已发布国家标准8项，其中量子计算1项；在研国家标准项目7项，其中量子计算4项。

目前，全球量子计算仍处于开放探索和快速迭代阶段，技术成熟度不足，应用场景有限，使得当前标准化需求主要集中于统一术语定义及翻译、提供表征不同技术路线的基准测试、研究系统和平台功能框架等初级阶段。2021年4月，美国国防高级研究计划局（DARPA）推出“量子基准”项目，发明可测试的量子计算关键指标。2024年1月，上海量子软件技术研究与验证中心发布《量子计算软件质量测评框架2.0》。2024年2月，美国Rigetti和英国Riverlane宣布参与由美国能源部橡树岭国家实验室牵头的项目，以探索将量子计算机与大型超级计算中心相结合所面临的挑战。为了评估将量子计算机集成到HPC环境中的可行性，将构建首个基准测试套件（QStone），用于测量HPC+Quantum联合系统的性能。

未来，全球各地区将依托国家标准、行业标准、团体标准、企业标准、定制化测试方案等，开展量子计算整机及云平台的功能完备性测试、接口一致性测试、硬件资源性能测试、安全性测试、差异化功能验证以及云服务能力分级测试等。

08 投资与政策推动产业发展、助力成果转化

在全球科技竞争愈发激烈的当下，投资与政策成为量子计算产业发展的重要驱动力。量子计算作为下一代信息技术的前沿领域，蕴含着颠覆性的发展潜力。然而，其发展进程面临诸多挑战，所需资金与资源规模庞大，技术攻关难度极大，实现产业化的周期也相对漫长。因此，长期稳定的投资注入和政策扶持至关重要。

投资发力，助力量子计算突破关键技术

量子计算技术的研发离不开大规模投资。量子计算机的研发涉及量子物理、计算机科学、材料科学、电子工程等多学科交叉领域，需要长时间的研究积淀以及大量的实验设备。与其他信息技术相比，量子计算在发展过程中对资金的需求更为迫切，尤其是在硬件制造环节，量子芯片的研发、冷却系统的搭建以及实验室的建设，都需要巨额的资本投入。

基于此，来自政府、企业和风险资本的投资就显得尤为关键。各国政府在推动量子计算发展中扮演着至关重要的角色，既是引导者，也是投资者。例如，美国政府通过立法设立专门的量子研究专项基金。据《国家量子倡议法案》（National Quantum Initiative Act）官网报告，美国2019至2024财年在量子信息科技领域的研发预算支出分别为4.49亿美元、6.72亿美元、8.55亿美元、10.31亿美元、9.32亿美元（预算授权）、9.68亿美元（预算授权）。这类政府资金不仅直接支持了大学和研究机构的科研项目，还带动了企业的技术创新和初创公司兴起。

中国在其“十四五”规划中，将量子科技作为战略重点，投入了大量资源，并设立量子科技专项基金，推动相关领域的突破性进展。这些国家级的投资项目，为量子计算的基础研究提供了稳定的资金支持，帮助相关研究机构突破关键技术。

此外，许多全球知名的风投公司，如法国Quantonation Ventures、瑞士QuantumBasel等，纷纷聚焦量子计算初创公司，或直接投资入股，或成立孵化器，推动了量子初创公司的发展。

政策引领，加速成果转化

政策支持在推动量子计算技术成果转化方面同样发挥着不可替代的作用。除了上述提到的资金支持，各国政府还通过政策制定来引导行业健康发展，推出有针对性的、满足国家需求的研发项目，同时以政府资助的形式予以拨款。此外，政府还通过税收减免、研发补贴等政策，减轻企业在成长过程中的压力，助力量子初创企业快速发展，将科研成果转化为实际生产力。

随着各国对量子计算领域投入的不断加大，未来有望见证更多量子计算技术从实验室走向市场，为产业升级和科技进步贡献力量。这种资本与政策的协同效应，将成为量子计算技术在全球范围内实现大规模应用的关键驱动力。

09 全球多个主要经济体追求上游产业链自主可控

在全球贸易环境日趋复杂、科技竞争愈发激烈的形势下，量子计算作为极具变革性的新兴战略技术，已成为各主要经济体角逐的关键领域。为巩固并提升自身在量子计算领域的竞争力，保障核心技术安全，全球各主要经济体积极推进产业链自主可控，尤其是在量子计算上游领域，这一举措凸显了各国对量子技术自主发展的高度重视。

多国关注量子计算上游产业链自主能力

量子计算上游领域的自主可控，核心涵盖量子芯片制造、量子材料研发以及测控设备等关键环节。这些环节不仅是构建量子计算机的根基，更是整个产业中技术壁垒较高的部分。当前，全球量子计算上游市场主要由少数欧洲科技企业所主导，如芬兰Bluefors、英国Oxford Instruments、德国Rohde & Schwarz等企业在相关技术和产品供应上占据优势。然而，随着地缘政治形势的紧张，部分国家实施禁运政策，使得其他国家，如中国等，深刻认识到技术依赖所潜藏的风险，纷纷加大对本国量子计算上游产业的投入，力求实现技术自主可控。例如，欧美11国的36个合作方联合开展ARCTIC项目，其目标是构建完整、全面的欧洲低温量子处理器供应链，并研发可扩展、可靠且创新的控制基础设施，以此提升欧洲在量子计算上游领域的自主能力。

此外，各国在量子计算产业链自主可控方面的竞争，还体现在知识产权和标准制定领域。在追求技术自主的同时，各国积极参与国际标准的制定，试图使本国技术在未来全球市场中占据主导地位。知识产权保护和专利布局也成为各大经济体竞争的焦点，拥有更多核心专利意味着在未来市场竞争中更具优势。因此，各国不仅在量子计算技术研发上投入大量资源，还在知识产权保护和标准制定方面展开了激烈角逐。

国际合作与本地化生产的平衡至关重要

在推进产业链自主可控的进程中，国际合作与本地化生产的平衡至关重要。尽管量子计算研发具有高度国际化特征，但在关键技术和设备方面，各国都在强化本地化生产能力，以降低对外部供应链的依赖。以中国为例，国盾量子推出量子计算机稀释制冷机ez-Q Fridge，在交付客户后完成性能测试，实际运行指标达同类产品国际主流水平，打破了欧美在该领域的技术封锁。

寻求自主可控需要单独面对更多挑战

然而，推动产业链自主可控也面临诸多挑战。首先是技术壁垒的突破，量子计算的上游领域技术复杂、研发成本高；其次，人才的培养与储备也是关键挑战，量子计算作为前沿科技，对专业人才的需求极高，各国需要建立健全的人才培养体系，吸引和留住微波电子学、光学等领域顶尖科技人才，为自主可控提供智力支持。

未来，随着技术的进步和产业链的不断完善，量子计算的自主可控将成为各国科技战略的重要组成部分，对全球科技和经济格局产生深远影响。

10 量子人才培养已成全球基本共识

量子计算作为前沿科技领域，其发展离不开量子专业人才的智慧与创新。但如今，量子人才面临严重的短缺问题，每3个专业岗位的空缺只有1名对应的合格候选人。因此，加强量子人才建设，是推动量子计算技术突破、应用拓展的关键。

多维度教育举措助力量子计算人才培养

加强基础教育普及。在中小学阶段引入量子计算科普内容，通过趣味科普活动、校本课程等形式，激发学生对量子计算的兴趣，培养基本概念和科学素养。例如，可以开发量子计算科普读物、线上课程等，让学生初步了解量子比特、叠加态等基础概念。例如，美国K-12量子教育计划的重点之一在于促使学生了解并参与量子信息科学，即向初中、高中学生介绍量子技术和科学的概念。量旋科技开设了以“量子计算”为主题的高中课程，并在深圳中学的教室中开讲，通过与理论知识紧密配合，学生可以使用这些能摆在桌面上、迷你打印机大小的核磁量子计算机，在实践中开始量子计算世界的探索。

优化高等教育专业设置。2020年，中国教育部首次增设量子信息科学专业，标志着中国量子教育政策的正式启动。2024年，中国教育部高等教育司发布了《关于开展2024年度普通高等学校本科专业设置工作的通知》，强调了对高校在量子科技等关键领域的专业设置的支持。高校应进一步优化量子计算相关专业的课程设置，增加实践教学环节，培养学生的实际操作能力和创新思维。如成立专门的量子科学与工程专业，开设量子力学、量子计算算法、量子编程等课程，并配备先进的实验设备和实践平台。

开展跨学科教育项目。量子计算涉及物理、数学、计算机科学等多个学科，高校和研究机构应开展跨学科教育项目，培养复合型人才。例如，可以设立量子计算与人工智能、量子计算与金融等跨学科研究方向，引导学生在不同学科领域之间建立联系，为量子计算的应用和创新提供更广阔的空间。

构建生态，促进量子计算人才持续成长

建立多元培养模式。除了传统的学术培养模式，还应鼓励企业、科研机构与高校合作，开展联合培养项目。例如，企业可以为学生提供实习和实践机会，让学生参与实际的量子计算项目，了解行业需求和技术应用；高校和科研机构可以为企业人员提供理论培训和学术指导，提升其科研水平和创新能力。

完善人才评价机制。针对量子计算领域人才需求的多样化，应建立合理灵活的人才评价机制。对于基础研究人才，可以以论文、项目及经费等为主导评价标准；对于工程师类人才，可以注重其实际项目经验和技术创新能力，为其提供稳定职位和上升通道。

加强国际交流与合作。量子计算是全球性的科技竞争领域，人才建设也应具有国际视野。通过国际会议、联合研究项目、留学与访学等形式，加强与国际顶尖高校和研究机构的交流与合作，培养具有国际竞争力的量子计算人才。



12

附件

目录 12 附件

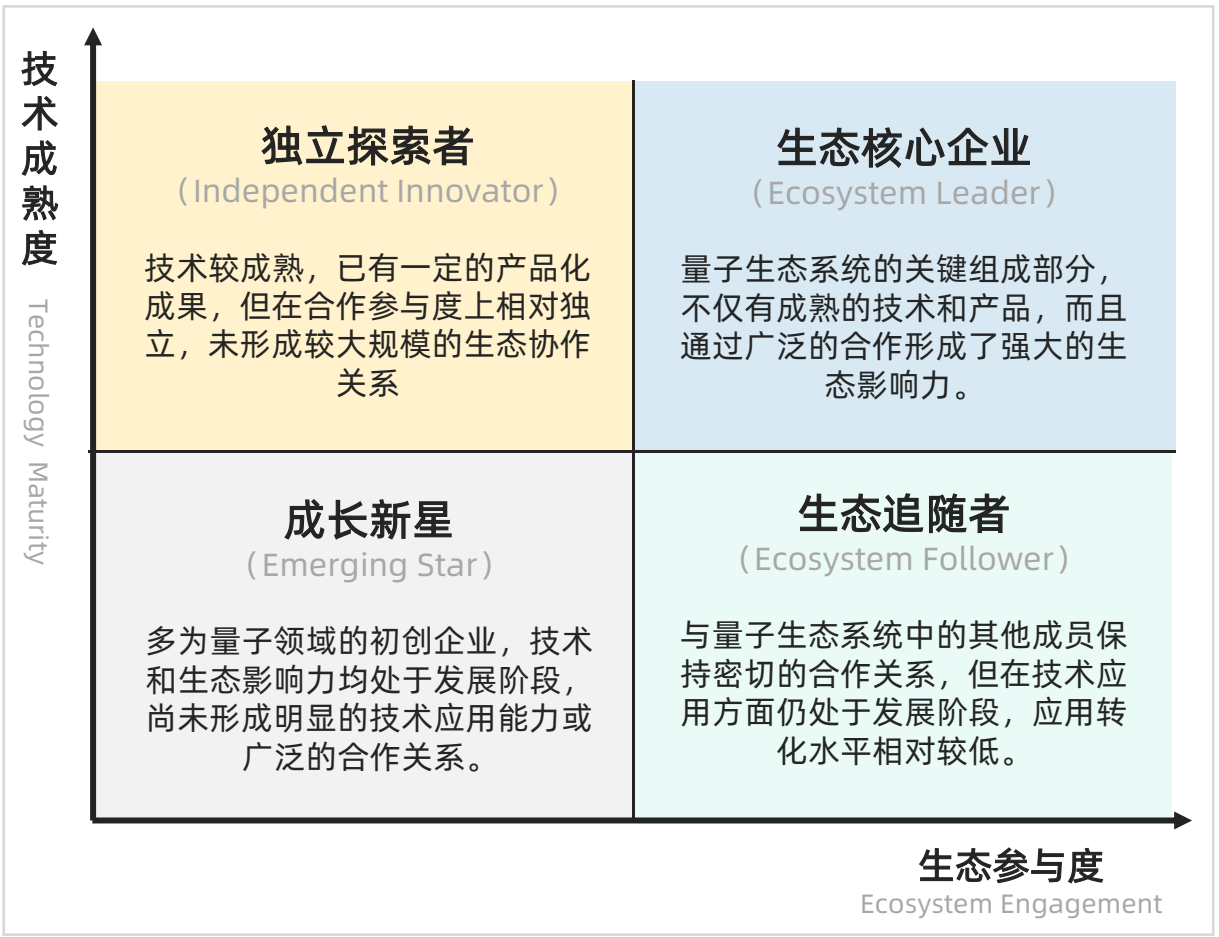
01 量子生态成熟度罗盘（Q-EMC）模型

02 参考链接

01 量子生态成熟度罗盘（Q-EMC）模型

本报告提出一个二维矩阵评价模型——量子生态成熟度罗盘（Quantum Ecological Maturity Compass，Q-EMC），该模型通过技术成熟度（纵轴）和生态参与度（横轴）两个维度，系统性评估量子计算领域参与者（企业、研究机构或技术路线）的综合竞争力，揭示其技术能力与生态整合能力的动态平衡关系。

图表 量子生态成熟度罗盘（Q-EMC）模型



光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2025.2

模型详解

横轴：生态参与度

衡量公司在量子生态系统中的合作深度和广度。高生态参与度的公司通常与其他企业、高校、研究机构甚至政府有广泛合作，积极融入产业生态，并善于整合资源、形成协作网络。低生态参与度的公司则多倾向于独立运作，或由于处于早期发展阶段而缺乏大范围合作关系。

纵轴：技术成熟度

反映公司在量子技术方面的成熟程度，包括其核心技术的研发深度、可靠性和稳定性。这一维度评估公司在技术积累上的深厚程度，以及其量子技术是否具备标准化和可扩展性。高技术成熟度的公司通常具有经过验证的技术能力，能够提供高质量的产品或服务，并为进一步的应用转化和市场化奠定坚实基础。

模型应用

- **独立探索者**：可以考虑增加生态合作，借助外部资源进一步推动技术应用；
- **生态核心企业**：可通过技术突破和扩展合作网络，巩固核心地位；
- **生态追随者**：可以重点提升技术及其应用能力，以增强自身市场竞争力；
- **成长新星**：可以选择重点发展技术应用或增加生态合作，尽快找到合适的切入点以提升市场影响力。

在《2025全球量子计算产业发展展望》报告中。技术成熟度具体权重指标包括量子硬件性能（量子比特数、门保真度、退相干时间等）、软件栈完备性（量子算法库、编译器、纠错等）、工程化能力、知识产权、2024年技术进展等。生态参与度具体权重指标包括2024年合作进展情况、标准制定情况、开源贡献、联盟情况等。

02 参考链接

https://www.nature.com/articles/s41567-023-02290-2
https://www.nature.com/articles/s41567-023-02319-6
https://www.taipeitimes.com/News/front/archives/2024/01/20/2003812354
https://ionq.com/posts/how-we-achieved-our-2024-performance-target-of-aq-35?utm_source=press+release&utm_medium=paid&utm_campaign=AQ+35
https://alice-bob.com/2024/01/25/more-quantum-computing-with-fewer-qubits-meet-our-new-error-correction-code/
https://www.nature.com/articles/s41586-023-06846-3
https://www.nature.com/articles/s41567-023-02334-7
https://www.quera.com/press-releases/quera-computing-releases-a-groundbreaking-roadmap-for-advanced-error-corrected-quantum-computers-pioneering-the-next-frontier-in-quantum-innovation
https://www.science.org/doi/10.1126/science.adk7560
https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2313754120
https://www.nature.com/articles/s41567-023-02282-2
https://www.nature.com/articles/s41567-023-02321-y
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.132.036602
https://www.nature.com/articles/s41567-023-02328-5
https://www.nature.com/articles/s41567-023-02337-4
https://mp.weixin.qq.com/s/g2Jt_jwa1oa1LvJpZHE1dw
https://thequantuminsider.com/2024/01/30/swedish-company-conscience-ab-launch-first-generation-quantum-device/
https://www.cqc2t.org/setting-a-new-standard/
https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.14.011007
https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.020601
https://opg.optica.org/optica/fulltext.cfm?uri=optica-11-2-222&id=546378https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.21.024047
https://www.nature.com/articles/s41586-023-06934-4
https://www.nature.com/articles/s41534-024-00803-2
https://quantumcomputinginc.com/news/press-releases/quantum-computing-inc.-launches-quantum-optimization-machine
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.132.017003
https://nordquantique.ca/en/news/nord-quantique-demonstrates-quantum-error-correction-first-company-to-make-a-logical-qubit-out-of-a-physical-qubit
https://www.meetiqm.com/newsroom/press-releases/iqm-achieves-20-qubit-benchmark-result
https://www.nature.com/articles/s41567-023-02351-6
https://www.science.org/doi/10.1126/science.aay0600
https://www.nature.com/articles/s41586-023-06986-6
https://arxiv.org/abs/2401.16177
https://www.quantware.com/press/generation-d-quantum-processors
https://arxiv.org/abs/2402.14396
https://www.nature.com/articles/s41467-024-45368-y
https://doi.org/10.1364/OPTICA.513551
https://www.science.org/doi/10.1126/science.adk1270
https://www.formfactor.com/press-release/formfactor-and-tabor-electronics-collaborate-to-demonstrate-a-full-stack-5-qubit-quantum-computer-powered-by-quantware/
https://www.nature.com/articles/s41467-024-45305-z
https://arxiv.org/abs/2402.04994
https://arxiv.org/abs/2310.09191
https://arxiv.org/abs/2310.11400
https://www.nature.com/articles/s41567-023-02290-2
https://www.nature.com/articles/s41567-023-02319-6
https://www.taipeitimes.com/News/front/archives/2024/01/20/2003812354

https://www.nature.com/articles/s41586-023-06997-3
https://arxiv.org/abs/2307.06617
https://www.nature.com/articles/s41586-024-07111-x
https://arxiv.org/abs/2403.12021
https://www.nature.com/articles/s41586-024-07160-2
https://pubs.aip.org/aip/apl/article-abstract/124/13/134002/3279666/Hot-ion-implantation-to-create-dense-NV-center?redirectedFrom=fulltext
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.132.100802
https://www.taborelec.com/Tabor-Electronics-and-FormFactor-Collaborate-to-Demonstrate-a-Full-Stack-5-Qubit-Quantum-Computer-Powered-by-QuantWare
https://www.fz-juelich.de/en/ias/jsc/systems/quantum-computing/juniq-facility/news/epiq-pioneering-the-quantum-future-in-nrw
https://www.meetiqm.com/newsroom/press-releases/julich-to-install-iqm-spark
https://orcacomputing.com/quantum-experts-revolutionize-european-quantum-computing/
https://thequantuminsider.com/2024/03/19/lightsolver-laser-computing-system-empowers-enterprises-to-solve-optimization-problems/
https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.14.011051
https://www.prnewswire.co.uk/news-releases/quobly-partners-with-nanoacademic-technologies-inc-to-enhance-silicon-spin-qubits-for-quantum-computing-302096940.html
https://blogs.microsoft.com/blog/2024/04/03/advancing-science-microsoft-and-quantinuum-demonstrate-the-most-reliable-logical-qubits-on-record-with-an-error-rate-800x-better-than-physical-qubits/
https://www.quantinuum.com/news/quantinuum-extends-its-significant-lead-in-quantum-computing-achieving-historic-milestones-for-hardware-fidelity-and-quantum-volume
https://journals.aps.org/pra/abstract/10.1103/PhysRevA.109.042205
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.132.133603
https://arxiv.org/abs/2404.02658
https://www.quera.com/press-releases/local-qubit-control-brings-new-capabilities-to-queras-quantum-computer
https://www.nature.com/articles/s41467-024-47354-w
https://www.nature.com/articles/s41586-024-07244-z
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.132.160201
https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adj0993
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.132.143601
https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.14.021018
https://mp.weixin.qq.com/s/SvFsd2r1ieuqSBCDi-amGQ
https://www.pasqal.com/news/pasqal-and-welinq-partnership/
https://www.extropic.ai/future
https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/21_HPE/press-release/quantum-machines-and-hamamatsu-photonics-team-up-for-enhanced-quantum-computing-control-april-2024.pdf
https://www.nature.com/articles/s41586-024-07275-6
https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevX.14.021024
https://arxiv.org/abs/2405.05481
https://www.nature.com/articles/s41586-024-07304-4
https://originqc.com.cn/zh/new_detail.html?newId=406
https://www.quantware.com/press/quantware-ferromon
https://alice-bob.com/newsroom/alice-bob-cat-qubit-on-google-cloud/
https://www.nature.com/articles/s41586-024-07294-3
https://www.nature.com/articles/s41598-024-62446-9
https://www.nature.com/articles/s41563-024-01887-z
https://www.nxp.com/company/about-nxp/nxp-eleqtron-and-parityqc-reveal-their-first-quantum-computing-demonstrator-for-the-dlr-quantum-computing-initiative:NW-NXP-ELEQTRON-AND-PARITYQC-FIRST-QUANTUM?cid=iea_pro240013_tac1726350_dsmn8
https://www.gz-ichip.com/news-detail.html?id=23
https://www.nature.com/articles/s41586-024-07459-0
https://www.nature.com/articles/s41586-024-07371-7

https://photonic.com/news/photonic-demonstrates-distributed-entanglement-between-modules/
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.132.230601
https://www.quantinuum.com/news/quantinuum-launches-industry-first-trapped-ion-56-qubit-quantum-computer-that-challenges-the-worlds-best-supercomputers
https://www.sure-core.com/2024/06/05/surecore-announces-low-power-cryogenic-memory-technology-for-quantum-computing-operates-at-temperatures-as-low-as-4-kelvin/
https://www.quandela.com/wp-content/uploads/2024/06/Quandela-Pilot-Line_PR_EN.pdf
https://www.nature.com/articles/s41467-024-49057-8
https://www.nature.com/articles/s41467-024-48791-3
https://www.diraq.com/newsdesk/diraq-produces-device-using-semiconductor-infrastructure
https://news.fnal.gov/2024/06/fermilab-opens-new-quiet-underground-quantum-information-science-laboratory/
https://mp.weixin.qq.com/s/0YliFVwqDZEKzLW1UfOFew
https://www.nature.com/articles/s41534-024-00829-6
https://www.nature.com/articles/s41467-024-49182-4
https://asia.nikkei.com/Business/Technology/IBM-and-Japan-institute-team-up-to-develop-next-gen-quantum-computer
https://www.vttresearch.com/en/news-and-ideas/vtt-begins-search-innovation-partner-scaling-finlands-next-quantum-computer-towards
https://www.nature.com/articles/s41567-024-02530-z
https://www.nature.com/articles/s41598-024-64558-8
https://www.nature.com/articles/s41567-024-02556-3
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.132.250604
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.132.250204
https://blog.google/technology/research/introducing-googles-new-academic-research-awards/
https://www.pasqal.com/news/pasqal-exceeds-1000-atoms-in-quantum-processor/
https://www.zhinst.cn/china/cn/news/norma-kaist-kriss-press-release
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.132.263602
https://www.nature.com/articles/s41467-024-49690-3
https://medium.com/rigetti/quantum-enhanced-machinelearning-with-moodys-analytics-543d37df0549
https://www.pasqal.com/news/pasqal-and-mila-partnership/https://q-ctrl.com/blog/q-ctrl-partners-with-usgs-to-pioneer-quantum-sensing-and-computing-applications
https://coingeek.com/us-air-force-turns-to-quantum-computing-for-military-logistics/https://ir.dwavesys.com/news/news-details/2024/D-Wave-Joins-Forces-with-Deloitte-Canada-to-Advance-Quantum-Adoption/default.aspx
https://www.psiquantum.com/news-import/psiquantum-mitsubishi-ufj-financial-group-and-mitsubishi-chemical-announce-partnership-to-design-energy-efficient-materials-on-psiquantums-fault-tolerant-quantum-computer
https://www.fujitsu.com/global/about/resources/news/press-releases/2024/0125-02.html
https://thequantuminsider.com/2024/01/09/sandboxaq-acquisition-has-good-chemistry-teams-say-move-could-accelerate-drug-development-and-material-innovation/
https://newsroom.ibm.com/2024-01-29-Korea-Quantum-Computing-and-IBM-Collaborate-to-Bring-IBM-watsonx-and-Quantum-Computing-to-Korea
https://www.dwavesys.com/company/newsroom/press-release/d-wave-and-zapata-ai-announce-strategic-technical-and-commercial-collaboration-to-advance-quantum-enabled-machine-learning/
https://www.iotworldtoday.com/quantum/australian-army-improves-convoy-logistics-with-quantum-computing-
https://multiversecomputing.com/resources/multiverse-computing-and-single-quantum-launch-materials-science-research-contract-with-german
https://www.classiq.io/insights/citi-and-classiq-advance-quantum-solutions-for-portfolio-optimization-using-amazon-braket
https://cloudblogs.microsoft.com/quantum/2024/02/08/darpa-selects-microsoft-to-continue-the-development-of-a-utility-scale-quantum-computer/

https://q-ctrl.com/blog/q-ctrl-teams-up-with-wolfram-qblox-and-others-to-deliver-a-complete-quantum-computing-toolset-for-researchers-and-enterprises
https://in.newsroom.ibm.com/2024-02-28-LTIMindtree-Joins-Forces-with-IBM-to-Advance-the-Quantum-Innovation-Ecosystem
https://terraquantum.swiss/news/terra-quantum-grows-presence-in-asian-markets-with-a-landmark-collaboration-with-posco-holdings-to-improve-steel-production-efficiency-using-quantum-ai
https://www.pasqal.com/news/pasqal-university-of-calgary-and-quantum-city-initiate-new-quantum-partnership/
https://investors.ionq.com/news/news-details/2024/IonQ-and-Seoul-National-Universitys-Center-for-Quantum-Information-Science-Education-CQISE-Enter-Agreement-to-Support-Quantum-Workforce-Development/default.aspx
https://ionq.com/news/ionq-and-south-koreas-sungkyunkwan-university-renew-international-quantum
https://www.infleqtion.com/news/infleqtion-builds-uks-quantum-advantage-delivering-practical-solutions-with-a-world-leading-quantum-computer
https://www.infleqtion.com/news/infleqtion-to-lead-quantum-thrust-in-defence-cyber-marvel-3-event
https://diraq.com/newsdesk/diraq-opens-new-commercial-laboratory-in-sydney-to-propel-era-of-fault-tolerant-quantum-computing
https://www.c4isrnet.com/battlefield-tech/2024/03/07/french-defense-ministry-picks-startups-to-develop-quantum-computers/
https://oqc.tech/company/newsroom/chevron-joins-oqc-100-million-round/
https://www.intelligentcio.com/me/2024/03/18/itqan-and-quera-announce-partnership-to-enhance-uaes-quantum-computing-application/
https://investors.ionq.com/news/news-details/2024/IonQ-and-South-Carolina-Quantum-Enter-Strategic-Agreement-to-Advance-a-Quantum-Ecosystem-in-South-Carolina/default.aspx
https://www.infleqtion.com/news/infleqtion-announces-collaborations-with-qusteam-and-wolfram-research-to-accelerate-quantum-education-innovation-and-workforce-development
https://newsroom.ibm.com/2024-04-05-Rensselaer-Polytechnic-Institute-and-IBM-unveil-the-worlds-first-IBM-Quantum-System-One-on-a-university-campus
https://www.kvantify.com/inspiration/worlds-first-calculation-of-enzymatic-reactions-on-a-quantum-computer
https://scquantum.org/f/xanadu-and-sc-quantum-partner-to-build-quantum-smart-workforce
https://ionq.com/news/oak-ridge-national-laboratory-collaborates-with-ionq-to-drive-critical
https://www.classiq.io/insights/classiq-and-quantum-intelligence-corp-qic-korea-partner-on-quantum-accelerated-drug-development
https://www.sydney.edu.au/news-opinion/news/2024/04/29/university-of-sydney-awarded--18-4-million-for-national-quantum-.html
https://newsroom.ibm.com/2024-04-30-RIKEN-Selects-IBMs-Next-Generation-Quantum-System-to-be-Integrated-with-the-Supercomputer-Fugaku
https://chicagoquantum.org/news/network-technology-company-quantum-corridor-joins-cqe
https://www.quantum-machines.co/press_release/opx1000-to-power-the-quantum-computing-lab-at-skku/
https://chicagoquantum.org/news/purdue-university-joins-chicago-quantum-exchange-tapping-regions-efforts-advance-us-leadership
https://www.bbva.com/en/innovation/bbva-runs-successful-trial-of-distributed-quantum-simulation-in-the-cloud/
https://q-ctrl.com/blog/q-ctrl-and-hamad-bin-khalifa-universitys-college-of-science-and-engineering-partner-to-equip-the-next-generation-quantum-workforce-in-qatar
https://ir.dwavesys.com/news/news-details/2024/D-Wave-and-the-University-of-Southern-California-Renew-Multiyear-Agreement-to-Advance-Annealing-Quantum-Computing-Research-and-Adoption/default.aspx
https://www.meetiqm.com/newsroom/press-releases/iqm-to-build-a-fabrication-facility-in-france
https://orcacomputing.com/psnc-and-orca-computing-announce-collaboration-with-nvidia-to-accelerate-the-development-of-hybrid-quantum-classical-high-performance-computing/

https://www.pasqal.com/news/pasqal-and-thales-tackles-satellite-planning-challenges/
https://www.pasqal.com/news/Pasqal-first-quantum-computer-in-saudi-arabia/
https://chicagoquantum.org/news/global-internet-technology-company-cisco-joins-chicago-quantum-exchange-corporate-partner
https://www.meetiqm.com/newsroom/press-releases/iqm-expands-to-poland
https://www.pasqal.com/news/pasqal-and-tech-mahindra-join-forces-to-advance-quantum-computing-applications-globally/
https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.jctc.4c00067
https://quantum-south.com/quantumcomputing/kipu-quantum-and-quantum-south-announce-strategic-partnership/
https://orcacomputing.com/montana-state-university-selects-orca-computing/
https://newsroom.clevelandclinic.org/2024/06/06/cleveland-clinic-ibm-and-the-hartree-centre-collaborate-to-advance-healthcare-and-life-sciences-through-artificial-intelligence-and-quantum-computing
https://www.dwavesys.com/company/newsroom/press-release/d-wave-extends-agreement-with-aramco-europe-to-explore-quantum-powered-optimization-of-geophysical-problems/
https://secretary.nptu.edu.tw/p/406-1013-172121,r2710.php?Lang=zh-tw
https://www.quera.com/press-releases/venturus-and-quera-announce-a-partnership-to-develop-quantum-computing-in-latin-america
https://ionq.com/news/ionq-and-south-carolina-quantum-scq-launch-faculty-and-researcher-quantum
https://www.globenewswire.com/news-release/2024/06/11/2896862/0/en/OTI-Lumionics-Selects-Nord-Quantique-to-Test-New-Quantum-Computing-Applications-for-Materials-Science.html
https://www.riverlane.com/news/riverlane-joins-the-quantum-energy-initiative
https://ir.dwavesys.com/news/news-details/2024/D-Wave-to-Deploy-Second-US-Based-Advantage-Quantum-Computer-at-New-Davidson-Technologies-Global-Headquarters/default.aspx
https://www.unilever.com/news/news-search/2024/future-rd-how-unilever-is-transforming-innovation-with-microsoft/
https://www.quantum-machines.co/press_release/quantum-machines-opens-the-israeli-quantum-computing-center/
https://www.fujitsu.com/global/about/resources/news/press-releases/2024/0618-01.html
https://ir.zapata.ai/news-releases/news-release-details/zapata-ai-publishes-research-findings-phase-ii-darpas-quantum
https://multiversecomputing.com/resources/eu-funded-ai-boost-project-selects-multiverse-computing-to-develop-and-train-large-scale-ai
https://multiversecomputing.com/resources/eu-funded-ai-boost-project-selects-multiverse-computing-to-develop-and-train-large-scale-ai
https://www.nature.com/articles/s41567-024-02539-4
https://www.meetiqm.com/newsroom/press-releases/iqm-achieves-new-technology-milestones
https://www.nature.com/articles/s41598-024-65086-1
https://www.nature.com/articles/s41534-024-00860-7
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/PhysRevResearch.6.033074
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/PhysRevResearch.6.033107
https://www.nature.com/articles/s41467-024-50763-6
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.050402
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.060602
https://www.nature.com/articles/s41534-024-00868-z
https://www.nature.com/articles/s41598-024-68353-3
https://www.nature.com/articles/s43246-024-00596-z
https://www.nature.com/articles/s41467-024-51434-2
https://idrw.org/tifr-nears-completion-of-indias-first-quantum-computer/
https://www.nature.com/articles/s41565-024-01770-7
https://pib.gov.in/PressReleaseIframePage.aspx?PRID=2049356
https://www.ipms.fraunhofer.de/en/press-media/press/2024/quantum-computer.html
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.106001

https://news.usask.ca/articles/research/2024/usask-partners-with-pinq-to-access-canadas-only-ibm-quantum-system-one.php
https://www.meetiqm.com/newsroom/press-releases/iqm-reaches-production-milestone-of-30-quantum-computers
https://www.keysight.com/us/en/about/newsroom/news-releases/2024/0917-pr24-116-keysight-introduces-quantum-circuit-simulation-the-first-circuit-environment-with-frequency-domain-flux-quantization.html
https://www.nature.com/articles/s41586-024-07941-9
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.120802
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.140402
https://ir.dwavesys.com/news/news-details/2024/D-Wave-Receives-Notice-of-Non-Compliance-with-NYSE-Trading-Share-Price-Listing-Rule/default.aspx
https://www.nature.com/articles/s42005-024-01812-5
https://quantrolox.com/news-quantrolox-collaboration-with-anyon-technologies
https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.ado9094
https://www.nature.com/articles/s43246-024-00659-1
https://www.nature.com/articles/s41467-024-53140-5
https://www.nature.com/articles/s41534-024-00892-z
https://www.nature.com/articles/s41467-024-53077-9
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.160602
https://nordquantique.ca/fr/nouvelles/nord-quantique-secures-semiconductor-supply-chain-through-two-new-partnerships
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.170601
https://www.nature.com/articles/s41567-024-02661-3
https://www.nature.com/articles/s41598-024-74071-7
https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.14.041030
https://ir.dwavesys.com/news/news-details/2024/D-Wave-Achieves-Significant-Milestone-with-Calibration-of-4400-Qubit-Advantage2-Processor/
https://www.nature.com/articles/s41467-024-52629-3
https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.22.054021
https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.14.041041
https://www.ibm.com/quantum/blog/qdc-2024
https://www.meetiqm.com/newsroom/press-releases/iqm-quantum-computers-unveils-development-roadmap-focused-on-fault-tolerant-quantum-computing-by-2030
https://pubs.aip.org/aip/apl/article-abstract/125/20/204003/3320226/In-situ-mixer-calibration-for-superconducting
https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.22.054043
https://www.anyoncomputing.com/post/anyon-technologies-and-sdt-inc-deliver-advanced-hybrid-quantum-classical-computing-systems
https://quantumcircuits.com/resources/quantum-circuits-accelerates-momentum/
https://www.nature.com/articles/s41586-024-08178-2
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.217001
https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.14.041049
https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.14.041050
https://www.etu.edu.tr/tr/haber/turkiye-nin-ilk-kuantum-bilgisayari-quant-tanitim-toreni-gerceklestirildi
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/PhysRevResearch.6.043196
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.220801
https://www.nature.com/articles/s41534-024-00918-6
http://www.chinatelecom.com.cn/news/02/202412/t20241206_85551.html
https://alice-bob.com/newsroom/alice-bob-quantum-computing-roadmap/
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.240601
https://blog.google/technology/research/google-willow-quantum-chip/
https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.22.064038
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/PRXQuantum.5.040342
https://www.calcalistech.com/ctechnews/article/h1xntkceje
https://arxiv.org/abs/2412.11924

https://www.planckian.co/2024/12/increasing-efficiency-of-globally-driven-superconducting-quantum-processor/
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/PhysRevResearch.6.043298
https://www.globenewswire.com/news-release/2024/12/23/3001239/0/en/Rigetti-Computing-Launches-84-Qubit-Ankaa-3-System-Achieves-99-5-Median-Two-Qubit-Gate-Fidelity-Milestone.html
https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.22.064084
https://arxiv.org/abs/2407.21415
https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.22.064095
http://www.sasac.gov.cn/n4470048/n29955503/n32427314/index.html
https://www.nature.com/articles/s41567-024-02539-4
https://www.meetiqm.com/newsroom/press-releases/iqm-achieves-new-technology-milestones
https://www.nature.com/articles/s41598-024-65086-1
https://www.nature.com/articles/s41534-024-00860-7
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/PhysRevResearch.6.033074
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/PhysRevResearch.6.033107
https://www.nature.com/articles/s41467-024-50763-6
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.050402
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.060602
https://www.nature.com/articles/s41534-024-00868-z
https://www.nature.com/articles/s41598-024-68353-3
https://www.nature.com/articles/s43246-024-00596-z
https://www.nature.com/articles/s41467-024-51434-2
https://idrw.org/tifr-nears-completion-of-indias-first-quantum-computer/
https://www.nature.com/articles/s41565-024-01770-7
https://pib.gov.in/PressReleaseIframePage.aspx?PRID=2049356
https://www.ipms.fraunhofer.de/en/press-media/press/2024/quantum-computer.html
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.106001
https://www.meetiqm.com/newsroom/press-releases/iqm-reaches-production-milestone-of-30-quantum-computers
https://www.keysight.com/us/en/about/newsroom/news-releases/2024/0917-pr24-116-keysight-introduces-quantum-circuit-simulation-the-first-circuit-environment-with-frequency-domain-flux-quantization.html
https://www.nature.com/articles/s41586-024-07941-9
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.120802
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.140402
https://ir.dwavesys.com/news/news-details/2024/D-Wave-Receives-Notice-of-Non-Compliance-with-NYSE-Trading-Share-Price-Listing-Rule/default.aspx
https://www.nature.com/articles/s42005-024-01812-5
https://quantrolox.com/news-quantrolox-collaboration-with-anyon-technologies
https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.ado9094
https://www.nature.com/articles/s43246-024-00659-1
https://www.nature.com/articles/s41467-024-53140-5
https://www.nature.com/articles/s41534-024-00892-z
https://www.nature.com/articles/s41467-024-53077-9
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.160602
https://nordquantique.ca/fr/nouvelles/nord-quantique-secures-semiconductor-supply-chain-through-two-new-partnerships
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.170601
https://www.nature.com/articles/s41567-024-02661-3
https://www.nature.com/articles/s41598-024-74071-7
https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.14.041030
https://ir.dwavesys.com/news/news-details/2024/D-Wave-Achieves-Significant-Milestone-with-Calibration-of-4400-Qubit-Advantage2-Processor/
https://www.nature.com/articles/s41467-024-52629-3
https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.22.054021
https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.14.041041

https://www.meetiqm.com/newsroom/press-releases/iqm-quantum-computers-unveils-development-roadmap-focused-on-fault-tolerant-quantum-computing-by-2030
https://pubs.aip.org/aip/apl/article-abstract/125/20/204003/3320226/In-situ-mixer-calibration-for-superconducting
https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.22.054043
https://www.anyoncomputing.com/post/anyon-technologies-and-sdt-inc-deliver-advanced-hybrid-quantum-classical-computing-systems
https://quantumcircuits.com/resources/quantum-circuits-accelerates-momentum/
https://www.nature.com/articles/s41586-024-08178-2
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.217001
https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.14.041049
https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.14.041050
https://www.etu.edu.tr/tr/haber/turkiye-nin-ilk-kuantum-bilgisayari-quant-tanitim-toreni-gerceklestirildi
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/PhysRevResearch.6.043196
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.220801
https://www.nature.com/articles/s41534-024-00918-6
http://www.chinatelecom.com.cn/news/02/202412/t20241206_85551.html
https://alice-bob.com/newsroom/alice-bob-quantum-computing-roadmap/
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.240601
https://blog.google/technology/research/google-willow-quantum-chip/
https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.22.064038
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/PRXQuantum.5.040342
https://www.calcalistech.com/ctechnews/article/h1xntkceje
https://arxiv.org/abs/2412.11924
https://www.planckian.co/2024/12/increasing-efficiency-of-globally-driven-superconducting-quantum-processor/
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/PhysRevResearch.6.043298
https://www.globenewswire.com/news-release/2024/12/23/3001239/0/en/Rigetti-Computing-Launches-84-Qubit-Ankaa-3-System-Achieves-99-5-Median-Two-Qubit-Gate-Fidelity-Milestone.html
https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.22.064084
https://arxiv.org/abs/2407.21415
https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.22.064095
http://www.sasac.gov.cn/n4470048/n29955503/n32427314/index.html
https://www.oxionics.com/news/oxford-ionics-breaks-global-quantum-performance-records
https://universalquantum.com/knowledge-hub/universal-quantum-develops-key-enabler-of-million-qubit-quantum-computer
https://ionq.com/news/ionq-unveils-accelerated-roadmap-and-new-technical-milestones-to-propel
https://www.nature.com/articles/s41467-024-50864-2
https://www.oxionics.com/news/oxford-ionics-kicks-off-international-expansion-with-new-us-office
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.090802
https://arxiv.org/abs/2409.05805v1
https://www.quantinuum.com/blog/quantinuum-accelerates-the-path-to-universal-fault-tolerant-quantum-computing-supports-microsofts-ai-and-quantum-powered-compute-platform-and-the-path-to-a-quantum-supercomputer
https://ionq.com/news/ionq-achieves-industry-breakthrough-first-trapped-ion-quantum-system-to
https://www.oxionics.com/announcements/oxford-ionics-wins-multimillion-dollar-contract-with-cyberagentur
https://journals.aps.org/pra/abstract/10.1103/PhysRevA.110.033116
https://www.nature.com/articles/s41567-024-02637-3
https://ionq.com/posts/achieving-remote-ion-ion-entanglement-paving-the-way-for-scalable-quantum
https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adr9527
https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.14.041017

https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.173201
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.180601
https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.14.041028
https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.22.054003
https://ionq.com/news/ionq-announces-third-quarter-2024-financial-results
https://ionq.com/news/ionq-announces-partnership-with-nkt-photonics-for-next-generation-laser
https://ionq.com/news/ionq-to-increase-performance-and-scale-of-quantum-computers-with-photonic
https://www.nature.com/articles/s41467-024-53405-z
https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.14.041046
https://www.infineon.com/cms/en/about-infineon/press/press-releases/2024/INFXX202411-025.html
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.223201
https://ionq.com/news/ionq-unveils-its-first-quantum-computer-in-europe-online-now-at-a-record
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.266502
https://www.quandela.com/news-press-release-welinq-x-quandela/
https://www.nature.com/articles/s41534-024-00861-6
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.050201
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.050605
https://www.globenewswire.com/en/news-release/2024/08/06/2925013/0/en/LightSolver-Awarded-12-5M-from-the-European-Innovation-Council-to-Advance-its-All-Optical-Supercomputer.html
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.090601
https://www.nature.com/articles/s41467-024-52086-y
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.103601
https://www.nature.com/articles/s41566-024-01524-w
https://www.nature.com/articles/s41467-024-52912-3
https://www.nqcc.ac.uk/updates/the-nqcc-and-nuquantum-announce-project-idra-to-pave-the-way-for-distributed-quantum-computing/
https://www.nu-quantum.com/news/qubit-photon-interface-qpi-towards-unlocking-modular-and-scalable-distributed-quantum-computing
https://www.nature.com/articles/s41566-024-01545-5
https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.22.044038
https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.22.034003
https://www.nature.com/articles/s41377-024-01627-7
https://www.nature.com/articles/s41534-024-00910-0
https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.22.054011
https://www.nu-quantum.com/news/nu-quantum-announces-collaboration-with-cern-to-adopt-white-rabbit-timing-technology-to-enable-data-centre-scale-quantum-computing-networks
https://www.quandela.com/about-us/newsroom/quandela-the-cnrs-universite-paris-saclay-and-universite-paris-cite-join-forces-to-accelerate-research-and-innovation-in-quantum-photonics/
https://www.nature.com/articles/s41467-024-54931-6
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.230603
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.233805
https://nqcg.com/
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/PRXQuantum.5.040339
https://quantumcomputinginc.com/news/press-releases/quantum-computing-inc.-announces-concurrent-offerings-of-common-stock-for-aggregate-proceeds-of-50-million
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/PRXQuantum.5.040341
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.253601
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.260602
https://www.nature.com/articles/s41586-024-07689-2
https://www.science.org/doi/10.1126/science.ado6471
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/PhysRevResearch.6.033104

https://www.nasa.gov/general/nasas-first-ever-quantum-memory-made-at-glenn-research-center/
https://www.nersc.gov/news-publications/nersc-news/science-news/2024/collaboration-exploring-neutral-atom-technology-extended-for-second-year/
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.123202
https://www.nature.com/articles/s41534-024-00884-z
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.123403
https://www.nature.com/articles/s41567-024-02638-2
https://www.quera.com/press-releases/quera-computing-announces-investment-from-key-strategic-partner-to-accelerate-development-of-large-scale-fault-tolerant-quantum-computers
https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6633/ad847e
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.183403
https://www.nature.com/articles/s41534-024-00898-7
https://www.planqc.eu/news/20241113-1000_qubit_quantum_computer_for_lrz/
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.203401
https://www.nature.com/articles/s41567-024-02676-w
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/PhysRevResearch.6.L042046
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/PhysRevResearch.6.L042051
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.243401
https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.14.041062
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/PRXQuantum.5.040343
https://www.nature.com/articles/s41567-024-02702-x
https://thequantuminsider.com/2024/12/29/russia-unveils-its-first-50-qubit-quantum-computer-prototype/
https://www.nature.com/articles/s41534-024-00945-3
https://www.nature.com/articles/s41467-024-49358-y
https://www.science.org/doi/10.1126/science.ado5915
https://www.nature.com/articles/s41598-024-67787-z
https://www.nature.com/articles/s41534-024-00869-y
https://www.nature.com/articles/s41524-024-01361-z
https://www.nature.com/articles/s41567-024-02614-w
https://www.nature.com/articles/s41467-024-52010-4
https://www.nature.com/articles/s41467-024-52795-4
https://www.nature.com/articles/s41534-024-00882-1
https://www.nature.com/articles/s42005-024-01806-3
https://www.nature.com/articles/s41534-024-00897-8
https://arxiv.org/abs/2410.16583
https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.nanolett.4c03646
https://archerx.com.au/wp-content/uploads/2024/10/20241030_Archers-12CQ-Quantum-Project-Hits-Key-Milestone-ASX-Release.pdf
https://www.nature.com/articles/s41565-024-01817-9
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.203603
https://www.semiqon.tech/news-insights/first-ever-cmos-transistor-fully-optimized-for-cryogenic-conditions-released-by-semiqon
https://www.nature.com/articles/s41467-024-54606-2
https://www.equal1.com/post/equal1-new-major-quantum-computing-breakthrough
https://www.nature.com/articles/s41567-024-02694-8
https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.22.064029
https://parityqc.com/quantum-brilliance-and-parityqc-win-contract-to-build-worlds-first-mobile-quantum-computer
https://www.nature.com/articles/s41534-024-00893-y
https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adp6442
https://pawsey.org.au/pioneering-room-temperature-quantum-computing-in-wa/
https://www.nature.com/articles/s41534-024-00912-y
https://www.nature.com/articles/s41566-024-01573-1
https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.22.064007
https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.110.L220505
https://www.ibm.com/quantum/blog/qdc-2024

ICV TA&K
Technology Advisory
& Knowledgebase

在ICV，我们对新技术充满好奇，我们努力提供最强大的市场数据和洞察力，以帮助我们的客户做出正确的战略决策。

我们在最广泛的资本密集型行业和市场中汇集了最深入的情报。通过连接不同变量的数据，我们的分析师和行业专家为我们的客户提供了一个更丰富、高度整合的世界观。

光子盒研究院

QUANTUMCHINA

光子盒研究院是一家专注于前沿科技与未来产业发展的创新型研究机构，以“探索科技边界、赋能产业升级”为使命，致力于成为全球科技创新生态系统中不可或缺的智库力量。研究院以前沿技术演进为观察坐标，以量子科技为核心研究领域，深度布局人工智能、先进计算、未来材料等战略方向，构建起“技术前瞻-产业应用-政策研究”三位一体的研究体系。

【核心定位与研究领域】

作为量子科技领域的专业研究平台，研究院聚焦量子计算、量子通信、量子传感三大技术主航道，持续跟踪全球量子科技关键技术突破。通过建立覆盖“基础研究-技术转化-产业应用”的全链条分析框架，研究院定期发布量子计算硬件发展路线图、量子安全通信应用白皮书等权威报告，为行业提供具有前瞻性的技术评估与产业化路径建议。

【智库服务与价值创造】

研究院构建了独特的“产学研政资”协同创新网络，为政府部门提供科技创新政策制定咨询，协助构建量子科技产业园区规划；为科研机构搭建技术转化评估模型，推动实验室成果与产业需求对接；为企业客户定制技术路线选择、市场竞争策略及专利布局方案；为投资机构建立科技项目价值评估体系，甄别具有突破潜力的早期技术项目。目前已形成季度产业研究报告、年度技术趋势预测、专项政策建议书等系列知识产品。

【研究特色与竞争优势】

依托跨学科研究团队（涵盖物理学、计算机科学、产业经济学等领域专家），研究院创新性采用“技术成熟度曲线+产业生态图谱”双维分析法，结合专利大数据挖掘与全球科研动态监测，确保研究成果的客观性与时效性。通过建立量子科技企业数据库（覆盖全球600+相关机构）、搭建院士专家委员会、主办国际量子产业峰会等举措，持续强化在量子科技领域的资源整合能力与行业影响力。

光子盒研究院始终秉持“以科技洞见未来”的核心理念，通过深度行业洞察、精准趋势研判和务实解决方案，助力客户把握量子革命带来的战略机遇。在科技创新加速重构全球产业格局的当下，研究院将持续输出具有决策价值的智库成果，推动前沿科技与实体经济的深度融合，为人类科技文明进步贡献智慧力量。

2025全球量子计算产业发展展望
量子科技年度系列报告

光子盒研究院
QUANTUMCHINA

北京市海淀区上地三街中黎科技园1号楼618室

扫码关注光子盒

扫码与研究员交流

2025/02

量子科技年度系列报告