

iCV TA&K
Technology Advisory
& Knowledgebase

光子盒研究院
QUANTUMCHINA

Q-STAR

Quantum Strategic Trends Annual Report

2026 全球量子计算产业发展展望

2026-02

序言

跨越临界 工程质变

2025年成为量子计算发展的关键元年。这一年，瑞典皇家科学院将诺贝尔物理学奖授予超导量子计算领域先驱，既是对量子计算科学的最高致敬，更是技术走向成熟的重要标志。量子技术彻底告别实验室探索，完成从理论到工业应用的质变，科学界确认微观操控可行性，产业界通过纠错架构与系统解耦，推动人类从微观旁观者进阶为算力规则主导者，技术、产业与地缘战略的交织，正重塑全球量子计算格局。

科学突破迅速转化为地缘博弈，中美两国均将量子计算推向战略核心。美国凭借底层技术积淀，通过《国家量子倡议法案》再授权与升级构筑技术封锁，试图将先发优势转化为战略优势。中国在“十五五”规划中，历史性地将量子科技置于国家科技任务首位，明确其作为新质生产力核心引擎的地位，稳步推进核心技术与产业生态自主可控。这场双极对垒已成为决定未来全球科技主权的关键博弈。

2025年也是我们定义的硅基半导体量子计算产业元年，这条路线也成为当前量子计算工业化落地的核心突破口，直接推动全球量子计算竞争逻辑发生根本性重构。当下算力竞赛核心彻底告别单纯物理比特规模堆砌，全面转向逻辑比特质量提升、软硬系统深度解耦及全产业链工程化一致性打磨，各大技术路线同步迎来突破性进展，而硅基半导体路线更是凭借先天产业优势，成为本轮量子技术产业化的核心领跑赛道。

其他主流技术路线同步实现关键进阶：超导路线摆脱对单一优势的片面追求，IBM发布最强量子处理器——“Nighthawk”，可执行更深的量子线路；谷歌在“Willow”量子处理器上实现“量子回声算法”，确立可验证性量子优势；离子阱、中性原子、光量子路线分别在保真度，规模化，模块化上同步突破。此外英伟达发布“NVQLink”推动量子计算融入人工智能与高性能计算体系，以量子为中心的超级计算融合架构正经历深刻务实转型。

我坚信其终极价值不在于零和博弈的技术霸权，而在于突破人类算力与认知边界。本报告从供应链、整机架构、异构融合、资本流向等维度，剖析量子计算向容错计算的跃迁，探寻量子计算从实验室技术转化为数字文明基础设施的路径。

时代从不眷顾懈怠者。2026年，量子计算正稳步踏入工业化发展的关键征程。

顾成建

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2025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2025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2025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（2026年全球量子计算产业发展展望 [R]. 光子盒研究院. 2026.02）。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，不构成投资建议，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和全球前沿科技咨询机构ICV TA&K联合撰写与发布。

感谢包括但不限于以下公司给予技术和素材的支持：

IBM Q
Google AI Quantum
QUANTINUUM
中电信量子集团 CHINA TELECOM QUANTUM GROUP
国盾量子 QuantumCTek
华翊量子
IONQ
QONE 量羲
幺正量子 UNITARY QUANTUM
atom computing
硅臻 SILICON EXTREME
XANADU
SPINQ 量旋科技
两仪萬象 Qosmos
PASQAL
intel
XGM
IQM
中微达信
PsiQuantum
玻色量子
CryoPride 中船鹏力超低温
中科酷原 CAS COLD ATOM
Q-CTRL
ZL CRYOGENIC
西部超导 WESTERN SUPERCONDUCTING
光腾激光 QUANTUM LASER

目录

01. 2025年量子计算产业发展概览	8
02. 全球政策与战略环境	24
03. 上游核心设备与关键器件	36
04. 量子计算硬件进展	72
05. 软件、算法与量子+AI	98
06. 混合算力与量子云平台	119
07. 下游应用与场景探索	137
08. 投融资与产业生态	150
09. 量子计算整机竞争格局分析	174
10. 产业分析与预测	201
11. 2026年发展趋势与前瞻研判	211
12. 附件	227

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

2025产业发展概览

目录

01
2025产业发展概览

01 上游核心器件加速工程化适配

02 中游整机系统迈入规模化迭代阶段

03 下游应用由探索验证走向场景试点

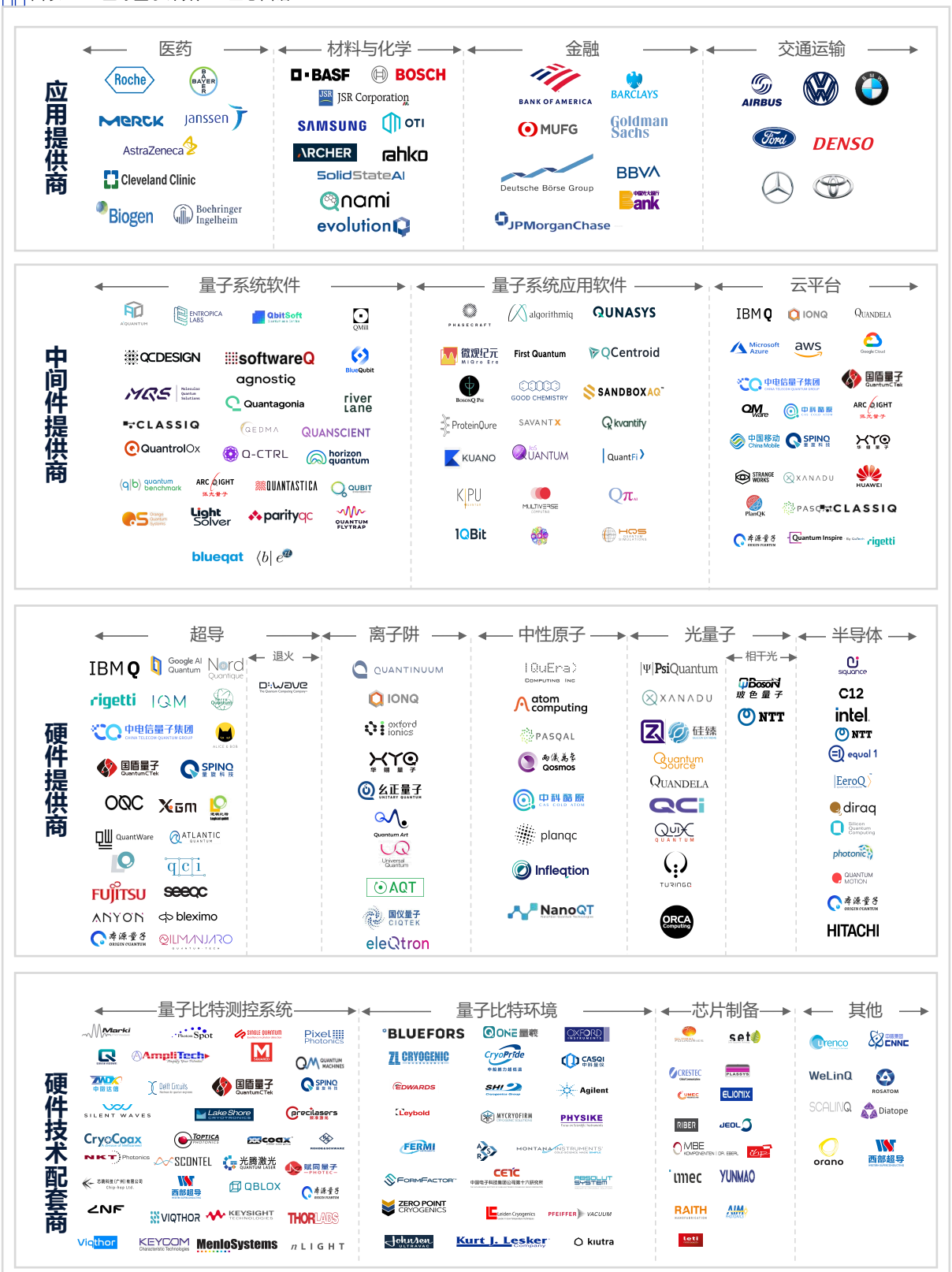
04 量子计算体系：从量子芯片到云的软件栈分层架构

05 云端量子—超算—AI融合计算成为主流路径

06 全球资本投入史上之最，资本配置更趋集中

07 产业由长期培育期进入工程化加速窗口期

图表 2025全球量子计算产业生态图谱



iCV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2026.2

01 上游核心器件加速工程化适配

2025年，量子计算产业上游的供应链环节的发展重点仍然集中在如何提高各个技术路线量子计算整机的性能提升，同时在产品的性能一致性和稳定性等方面提出了更高的要求。随着量子计算系统规模扩大与纠错闭环进入连续运行阶段，低温环境、测控链路、互连与布线、激光器功率、封装一致性、材料与工艺窗口、以及长期维护体系共同构成整机扩展的刚性约束。上游供给的稳定性与一致性，直接影响整机系统扩展节奏以及系统集成与调试的周期与成本，是技术路线与技术团队之间竞争的核心要素。

极低温环境基础设施的产品目标发生结构性调整。稀释制冷机不再主要围绕极限温度指标进行竞争，而是更强调有效空间、可用热预算、布线与器件装配密度、模块化安装、维护可达性与长期可靠性等系统性指标，以满足更密集的读出/控制通道与更复杂的低温器件组合。面向规模化部署的低温系统，评价口径更接近数据中心与超算机房的基础设施要求，即交付一致性、可维护性与可扩展性优先于单点性能最优。以Oxford Instruments为代表的设备迭代方向，集中体现了低温装备从科研设备向工程基础设施形态迁移的趋势。

测控与控制电子学的工程化路径同样清晰。系统规模扩大后，校准、漂移补偿、参数寻优、误差建模与回归测试的工作量呈非线性增长，依赖人工经验的调试方式难以支撑交付节奏。控制系统正在把自动化校准、数据驱动建模与软件化流程固化为标准能力，并与经典侧算力（GPU/FPGA）形成更紧密的协同，以满足纠错循环对实时反馈和时序确定性的要求。由此，控制链路的关键指标从可完成控制扩展为可在确定性时延内完成测量—计算—反馈，并要求接口标准化与可观测性能力同步完善。

供应链与产能体系成为上游能力成熟度的重要组成。随着交付对象从少量科研用户扩展至更多平台与机构，制造体系建设、关键部件可获得性、备件与服务体系、以及产能规划对交付确定性的影响显著提升。上游环节的工程化能力，已由单件交付能力转为连续供给能力，并对整机迭代效率形成直接约束。

02 中游整机系统迈入规模化迭代阶段

2025年是全球量子计算整机系统从“比特数量竞赛”向“逻辑质量与系统解耦”转型的关键一年。整机研发的重心已从单纯追求物理量子比特的堆砌，转移到通过架构创新实现计算单元与物理噪声的有效解耦，以及通过工程化手段提升逻辑比特的保真度与稳定性。如表所示，全球共有10余家头部企业及科研机构完成了关键技术节点的突破与产品迭代，包括美国的IBM、Google、Quantinuum、IonQ，以及中国的中国科大-中电信量子集团-国盾量子联合团队、北京量子院、华翊量子、幺正量子、中科酷原、硅臻等。

超导量子计算：架构分歧与噪声隔离的极致。在超导路线中，规模化与连接性带来的串扰问题成为主要技术瓶颈。2025年，行业领军企业通过架构重构实现了关键突破。IBM于2025年底交付的Nighthawk（夜鹰）处理器标志着其架构设计的重大转型，放弃了沿用多年的重六边形结构，转而采用连接性更强的方格阵列（Square Lattice）布局。Nighthawk在120个量子比特中引入了218个下一代可调耦合器，通过物理层面的“静默”机制，在不进行门操作时切断比特间相互作用，从而有效抑制了ZZ串扰，使得处理器能够运行深度达到5,000个逻辑门的量子电路。

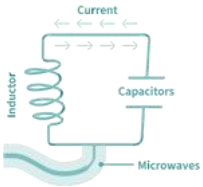
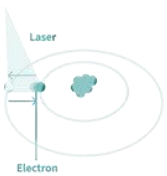
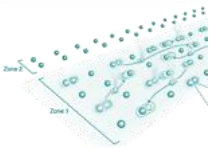
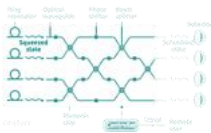
与此同时，Google Quantum AI发布的Willow芯片（105量子比特）则侧重于逻辑层面的解耦验证。此外还证明了随着物理比特规模的增加，逻辑错误率呈现指数级抑制。这一突破验证了表面码纠错在现实硬件上的可行性，将逻辑比特的相干时间提升至前代Sycamore芯片的20倍。中国团队在这一年也取得了显著进展，中国科大团队联合国盾量子构建的“祖冲之3号”原型机凭借105个可读取比特和182个耦合比特的架构设计，在量子随机线路采样任务上展示了超越经典超算15个数量级的处理速度，并在量子纠错领域取得了令全球瞩目的关键里程碑。

离子阱与中性原子：精度与规模的双重突围。离子阱路线继续保持其在逻辑保真度上的优势。Quantinuum的Helios系统利用98个全连接物理量子比特，实现了极高的两比特门保真度，确立了其在早期容错阶段的标杆地位。IonQ则加速了商业交付步伐，与韩国KISTI签署协议，将100量子比特的IonQ Tempo系统集成至国家级超算集群中，开启了离子阱量子计算机的数据中心化部署。

中性原子路线在2025年展现了极强的可扩展性，依旧可被视为年度“黑马”。QuEra联合哈佛大学团队，利用光镊阵列成功操控了数千个中性原子，刷新了单系统物理比特规模的纪录。莫斯科国立大学发布的72比特中性原子原型机则创新性地采用了“计算-存储-读取”三区物理架构，有效解决了读取操作对计算量子态的干扰问题。

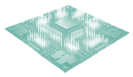
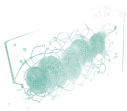
半导体路线在今年出现了标志性突破。新南威尔士大学与硅量子计算公司（SQC）联合工作验证了其硅基原子量子比特架构在扩展量子比特数量的同时仍能保持、并有望提升器件质量，并构建了由两个多核自旋寄存器互联组成的 11 量子比特原子处理器，完成了高保真度的单、双量子比特门操作。这一进展为半导体量子计算从单点器件走向模块化系统集成提供了关键支撑，也为后续面向容错量子计算的工程化推进打下了基础。

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	Nighthawk	2025.11	120
	Google	Willow	2024.12	105
	Rigetti Computing	Cepheus-1-36Q	2025.07	36
	QuantWare	Tenor	2023.02	64
	IQM	Crystal 150	2025.11	150
	OQC	OQC Toshiko Gen 1	2023.11	32
	Alice & Bob	Helium 2	2025.09	12
	日本理化学研究所	-	2025.04	256
	中国科大、中电信量子集团、国盾量子	祖冲之三号	2024.12	105
		天衍287	2025.11	287
	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	少微	2025.11	103
 离子阱	Quantinuum	Helios	2025.11	98
	IonQ	Tempo	2025.9	100
	AQT	PINE	2023.02	30
	华翊量子	HYQ-B100	2024	100
	幺正量子	UQM1	2024.09	30
 中性原子	QuEra Computing	Gemini	2025.12	260
	Atom Computing	AC1000	2023.01	1200+
	Pasqal	Orion Gamma	2025	140+
	中科酷原	汉原一号	2024.06	100+
 光量子	中国科大	九章四号	2025.08	3050
	Xanadu	Aurora	2025.1	12
	QCi	Dirac-3	2024.03	949（变量数）
	QC82	-	2021	40
	硅臻	-	2024.02	32
	PsiQuantum	Omega	2025.2	-
	ORCA Computing	ORCA PT 2	2024.10	90

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。

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
 半导体	Quantum Motion	-	2025.9	-
	Intel	Tunnel Falls	2023.6	12
	Equal1	UnityQ	2025	6
	Silicon Quantum Computing	-	2025.12	11
 拓扑	Microsoft	Majorana 1	2025.2	8

iCV TA&K | 2026.2

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 下游应用由探索验证走向场景试点

2025年量子计算的下游应用发生的主要变化，是推进方式逐渐从探索性验证向可运行的场景试点与流程化交付进行转变。但总体来看，应用验证仍然以单次演示为主要方式，可重复运行、可对照评估、可集成上线与可审计期望在未来几年逐步成为实现目标。但很明确的是，量子计算在应用体系中的定位更为清晰，即作为异构加速单元嵌入既有计算流程，通过量子—经典混合工作流在特定环节提供可衡量的增量价值。

材料、化学等方向仍是量子计算尝试应用的主要领域，选择这两个行业的主要原因是问题结构更利于量子计算系统，以及与混合计算的解决方案的匹配度。如，经典算力侧承担数据准备、结构搜索与多数可计算环节，量子算力侧聚焦强关联、采样或高精度瓶颈子任务，以获得精度提升或效率改善。例如，三井物产联合Quantinuum发布的QIDO平台，利用混合策略将强关联电子系统的计算剥离至量子端，实现了比开源软件高出10倍的模拟精度。应用试点的关键约束由能否运行算法扩展为能否运行端到端流程，包括数据接口、任务拆解、结果校验、回写业务系统、以及跨后端复现实验趋势等工程要素。

中间件与工作流编排能力的重要性显著提升。多硬件路线并存背景下，应用侧更依赖统一抽象、统一调度与可观测性能力，以降低后端切换成本，并提升对照评估效率。软件体系在应用推进中的作用由提供编程框架转为提供可交付工作流，其关键能力集中在跨CPU/GPU/QPU的统一编排、低时延运行时、编译优化与资源估算、以及面向纠错/缓错的实时数据通路。

04 量子计算体系：从量子芯片到云的软件栈分层架构

量子计算体系架构已演变为一个高度分层、软硬协同的复杂计算系统。下图描述了当前主流的量子计算硬件与软件全栈架构：

图表 量子计算体系图



iCV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2026.2

物理层：位于最底层，包含量子处理器（QPU）及其运行所需的极端物理环境核心组件，包括：量子芯片（超导/离子阱/中性原子等）、稀释制冷机（提供mK级低温）、真空腔体、光路系统。核心功能是提供物理量子比特的生存环境，执行底层的物理门操作。

控制层：连接量子物理世界与经典数字世界的桥梁。核心组件包括：任意波形发生器(AWG)、数字采集卡(Digitizer)、微波源、激光控制器、FPGA/ASIC实时控制器。核心功能有：将数字指令转换为模拟脉冲信号以操控量子比特，并读取量子态信号。2025年的趋势是将部分控制电路（Cryo-CMOS）集成至低温环境以减少热负载。

运行时层：负责实时任务调度与纠错反馈的核心软件层。核心组件：实时纠错解码器(QECDecoder)、量子操作系统(QOS)、脉冲级编译器。功能：处理微秒级的测量-反馈循环，执行动态电路指令，管理量子资源的分配与校准。

应用接口层：面向用户的开发与交互环境。核心组件：云平台API(如AWSBraket, IBMCloud)、SDK(Qiskit,PennyLane)、领域专用算法库(QIDO,CUDA-Q)。功能：提供高级编程语言接口，支持混合量子-经典工作流的编排与部署。

量子计算体系已经演变为分层协同的全栈架构：底层是量子芯片及其低温、真空、光路等物理环境；其上是测控与接口，将数字指令转换为微波/激光等模拟脉冲并完成读出；再往上是运行时层，负责任务调度、校准管理以及测量—反馈闭环下的纠错与资源协调；最上层是面向用户的开发与云端接入，用于编排量子—经典混合流程并调用底层能力。结合近年的工程化进展，一个清晰趋势是量子计算的系统能力越来越由控制层与运行时层决定：只有把低延迟测量反馈、实时解码/纠错循环与可验证的运行时机制做扎实，物理比特规模的增长才更可能转化为稳定、可复现、可持续提升的有效算力。

05 云端量子—超算—AI融合计算成为主流路径

目前，量子计算在异构融合计算中的地位正式确立为“以量子为中心的超级计算”（Quantum-CentricSupercomputing,QCSC）。量子计算机作为一种极度专用的加速器，深度集成到现有的高性能计算（HPC）和人工智能（AI）基础设施中。

硬件级互连标准的建立实现这一融合的关键在于解决了高带宽、低延迟的互连瓶颈。NVIDIANVQLink技术在2025年成为行业事实标准，该技术基于RDMAoverEthernet协议，能够提供高达400Gb/s的带宽，并将往返延迟控制在4微秒以内。这一突破使得经典GPU能够直接读取量子控制器的内存，支持了实时纠错（QEC）所需的微秒级“测量-解码-反馈”循环。

全球主要的超级计算中心在2025年纷纷部署混合架构。在美国，能源部（DOE）依托橡树岭和阿贡等国家实验室，着力开发跨层级的“量子-经典操作系统”，旨在攻克HPC与量子处理器（QPU）间的低延迟通信瓶颈，深度赋能高能物理与复杂材料科学的实时混合模拟；在欧洲，EuroHPC JU联盟通过统一部署，将多条物理路线的量子计算机与LUMI、JUPITER等顶级超算节点互联，并在软件层统一了OpenQASM等调用接口，构建起覆盖全欧的联邦式混合算力网；在中国，“超量协同调度”已成为新型算力基础设施的重要抓手，各大国家级超级计算中心与本土量子企业深度绑定，实现了超导、离子阱等异构量子算力与经典超算的云端并网，直接应用于气象预测、新药发现与金融风险模型的求解；日本的FugakuNEXT项目正规划将量子计算机作为核心模块深度嵌入超算集群，剑指“Zetta-scale”级混合算力平台；韩国KISTI则将IonQ Tempo系统直接集成至“汉江”HPC集群，实现了量子资源与经典算力的物理共置。

这种席卷全球的混合架构不仅突破了复杂变分量子算法（VQA）在经典算力下的优化瓶颈，更为AI大模型的训练开辟了全新的数据生成范式——即利用量子处理器原生的高维纠缠特性，生成高维希尔伯特空间的概率分布数据。这一范式有望打破经典计算在合成数据上的维度诅咒，极大增强生成式AI模型的泛化能力与表示上限，真正实现量子计算与人工智能的底层共振。

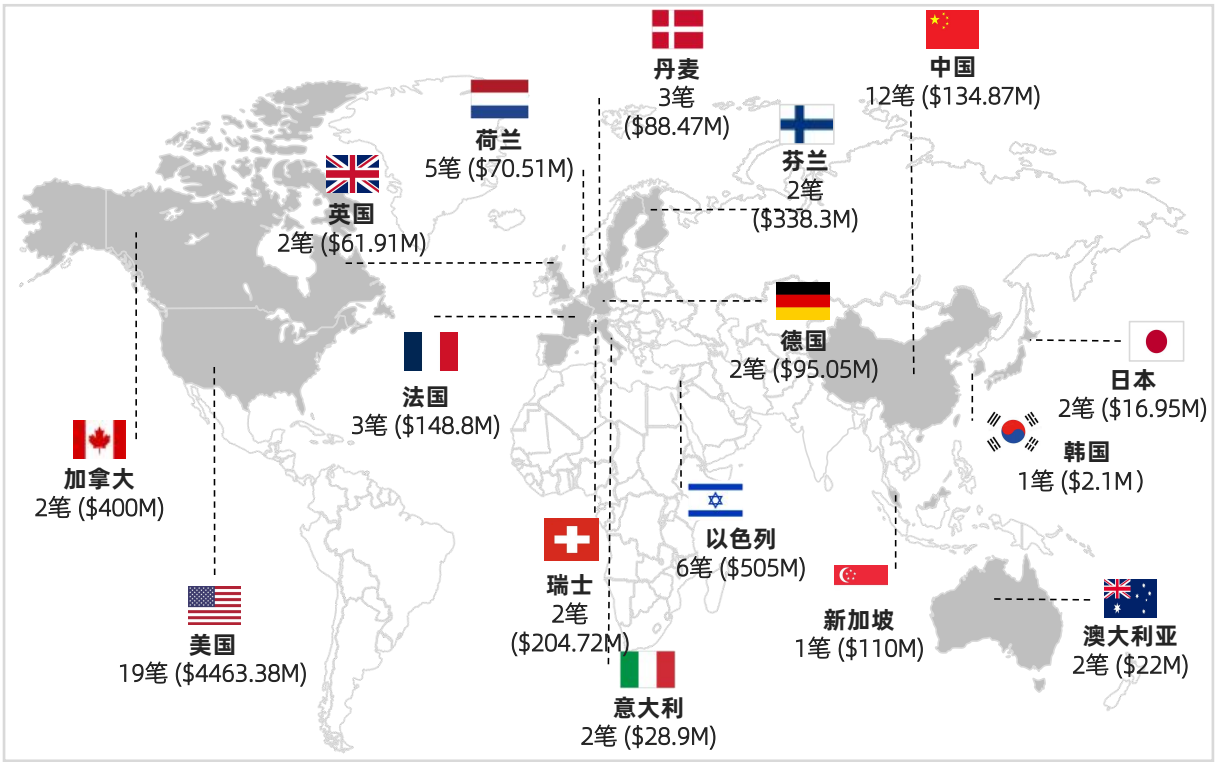
06 全球资本投入史上之最，资本配置更趋集中

2025年，全球量子计算产业的资本投入达到历史最高水平。资本加速流入带来了更多关注与资源投入，有利于支持关键技术攻关和工程化迭代，同时也抬高了市场对进度与成果的预期。在这一背景下，资本与技术兑现节奏之间的匹配问题更值得持续跟踪。与早期更多围绕概念热度或物理比特数量不同，2025年的投资逻辑更加重视企业的技术领先性、交付确定性以及工程化落地进度；中国市场在资金来源与项目筛选偏好上存在一定差异，整体更偏审慎。

在融资方面，2025年全球量子计算融资总额为53.95亿美元，集中在美国（44.63亿美元）、以色列（5.05亿美元）和加拿大（4.00亿美元）等地区。中国融资约1.35亿美元，排名全球第七，仅为美国的3.0%。这表明中国资本对量子计算的投入较为谨慎，集中于可执行项目。

2025年全球共有66笔融资交易，美国以19笔领先，其次是中国12笔。以色列6笔，荷兰5笔。美国不仅融资规模领先，还具备较高的资本活跃度。中国交易数量较多，但单笔融资规模偏小，更多表现为分散投入。欧洲（包括英国、法国、荷兰等）合计融资10.37亿美元，交易21笔，尽管仍保持较高参与度，但与美国相比差距明显。

图表 2025年全球量子计算企业融资笔数与金额

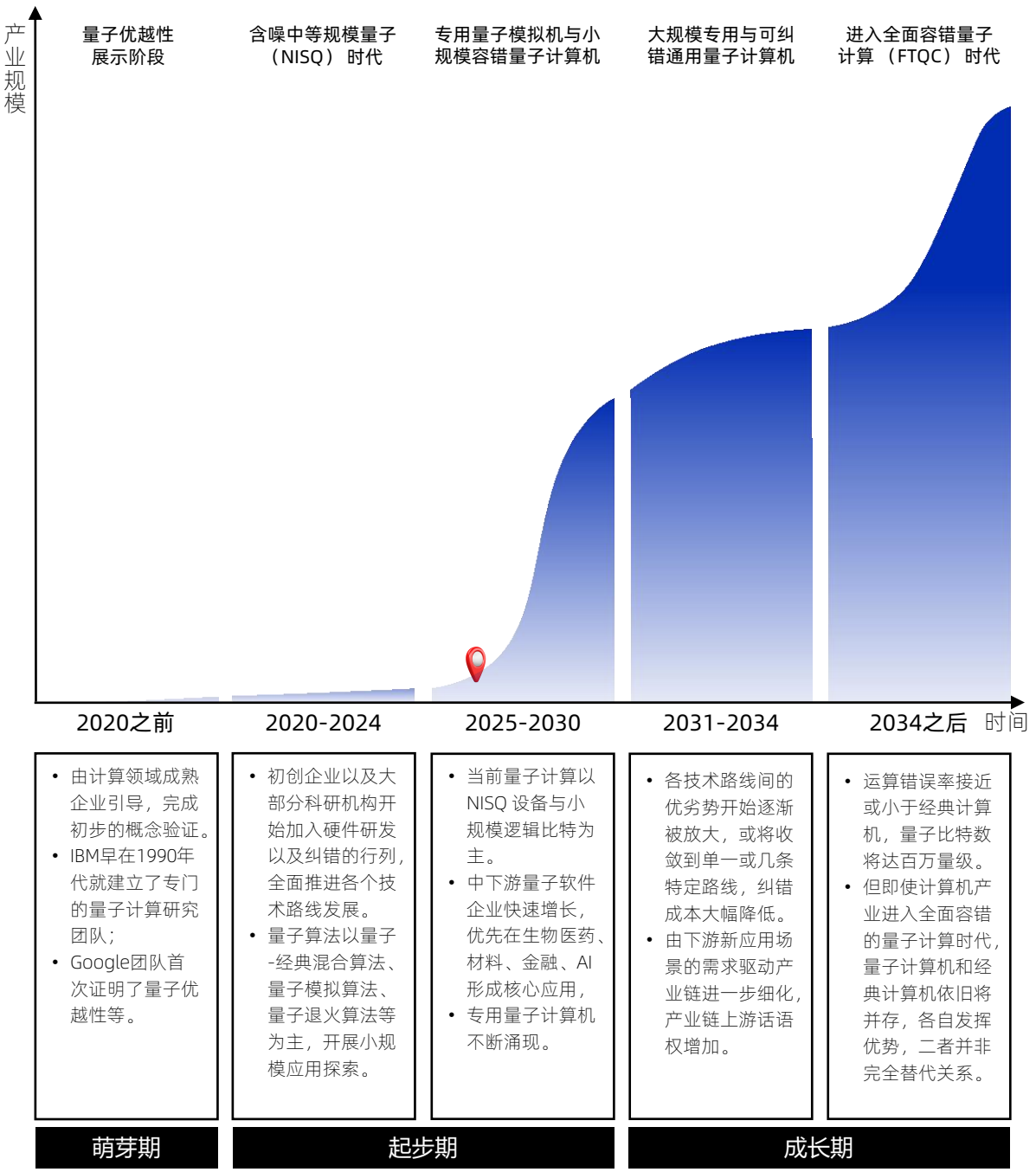


总体来看，2025年全球资本对量子计算的配置呈现两条主线：一是资金继续向美国等少数市场集中，二是欧洲与亚洲市场在交易活跃度上保持存在感，但整体融资体量仍受制于项目规模、退出预期与产业牵引能力，本年度地区分布的差异化进一步拉大。

07 产业由长期培育期进入工程化加速窗口期

现阶段，量子计算正处在从 NISQ 走向容错量子计算的过渡阶段。各条技术路线开始围绕纠错闭环和系统可靠性逐步收敛。量子计算在这一轮平台期的发展似乎已接近关键节点：无论是技术推进的信号，还是资本市场的反馈，都在暗示行业可能进入更快的发展阶段。

图表 量子计算发展生命周期示意图



iCV TA&K | 2026.2

这一阶段的显著特征是“解耦”范式的确立——即在架构设计上实现计算逻辑与物理噪声的解耦，在应用开发上实现业务逻辑与底层硬件的解耦。产业焦点从单一的“量子优越性”实验，转向了构建稳定、可靠、可维护的工业级系统。无论是上游供应链的连续供给能力，中游整机的规模化迭代，还是下游应用的场景试点，全产业链都在为即将到来的逻辑量子计算时代积蓄力量。随着IBM、Google、QuEra等技术路线图的逐步兑现，以及量子-超算-AI混合架构的成熟，量子计算正逐步褪去科幻色彩，成为驱动未来数字经济发展的坚实底座。

各技术路线的专用量子计算机将持续推出，中下游的量子软件与解决方案企业也会在这一阶段加快增长。这一趋势会反过来拉动硬件侧的推进：算法与软件工具的进步，会把需求更直接地传导到纠错码、解码与闭环控制等关键方向，促使硬件围绕可运行的纠错能力加速迭代；同时，更可落地的专用量子计算机有望率先形成可验证的商业价值，并在应用牵引下推动系统规模与可靠性进一步提升。在此基础上，面向百级逻辑比特目标的系统也将更快进入工程化实现与对外验证阶段。

从产业规模来看，2025年全球量子计算产业规模达到66.1亿美元，产业发展根基日益稳固。预计到2027年，产业规模将增长至105.4亿美元，呈现稳步上升态势。2029年作为关键的技术爆发年，将带动行业在2030年迎来规模激增，预计达到1795.2亿美元。此后，随着通用容错量子计算技术的逐步成熟与商业化普及，产业将进入高速扩张期，至2035年全球量子计算产业规模有望突破6817.1亿美元，实现从技术积累向全面商业繁荣的跨越。



02

全球政策与战略环境

目录

02
全球政策与战略环境

01 全球量子科技政策态势：从科研突破到产业化竞赛

02 美国：全球引领，巩固量子计算技术主导地位

03 中国：自主创新，推动量子计算全链条能力建设

04 欧洲与其他国家：协同竞争，共同迎接量子科技的未来挑战

01 全球量子科技政策态势：从科研突破到产业化竞赛

2025年标志着全球量子技术正式迈入从基础科研向产业化落地与战略博弈转型的关键阶段，各主要经济体密集发布政策以强化技术主权、供应链安全及基础设施建设。

美国作为行业领跑者，依托《国家量子倡议法案》与《芯片与科学法案》持续深化布局，通过NIST发布首批后量子密码学标准确立技术基准，并由《2026财年国防授权法案》等立法推动联邦系统向抗量子网络安全标准迁移，在构建公私合作典范的同时吸引了全球密集的私人资本；

中国在“十五五”规划的顶层设计下，通过设立首期510亿元的中央企业战略性新兴产业发展专项基金注入资本动能，并由工信部、市场监管总局等多部门协同，密集推进量子信息标准化技术委员会筹建、未来产业创新任务揭榜挂帅以及计量支撑产业发展行动方案（2025-2030年），全面部署量子计算、通信与精密测量的标准研制、核心技术攻关与产业应用生态构建，共同折射出全球量子赛道正加速向工程突破与生态竞争演进的宏大图景。

与此同时，欧盟通过《量子欧洲战略：变化世界中的量子欧洲》及2025年军民两用物项出口管制清单的更新，旨在解决当前技术短板，推动量子芯片试点产线建设以提升工业竞争力和科技自主权；英国、西班牙、芬兰等国纷纷出台国家级战略或算力路线图，如西班牙计划投资超8亿欧元、芬兰布局2025-2035长远目标，确立了向混合计算架构演进、实现千位纠错逻辑量子比特的具体工程化路径；G7发布的《卡纳纳斯基斯量子技术未来共同愿景》与全球行业组织（ITI）发布的《量子技术政策指南》，则共同致力于构建可信的供应链、人才体系及治理框架。

从整体趋势看，2025年的量子计算政策呈现出三个明显特征：

- 工程化优先，围绕容错架构、系统集成与可扩展能力展开布局；
- 算力融合，将量子计算纳入国家计算基础设施体系，而非孤立发展；
- 生态竞争加剧，通过资金支持、平台建设与产业协同，加快形成可持续的技术与产业能力。

02 美国：全球引领，巩固量子计算技术主导地位

美国长期将量子计算视为保持科技领先和产业竞争优势的关键战略领域。进入2025年，在新一届联邦政府上任后，美国并未对既有量子战略进行方向性调整，而是在延续《国家量子倡议法案》等制度框架的基础上，进一步强化顶层统筹能力、提升政策执行效率，并以长期稳定投入牵引系统工程突破，同时通过国防场景牵引、基础设施与平台化建设、以及对外规则塑造等方式，系统性巩固其在全球量子计算领域的领先地位。总体来看，2025年美国量子计算相关政策呈现出顶层统筹更强、投入节奏更稳、工程导向更实、竞争约束更硬、生态联动更深的综合特征。

图表 2025年美国量子科技相关重要政策与项目概览

时间	政策/项目	发布机构	政策与量子计算相关内容
2025-01-14	QuantumCapital	马里兰州/UMD/IonQ等	公私合作项目，提出10亿美元投入目标，配套设施与人才计划。
2025-01-23	PCAST重组（行政命令与简报）	白宫/特朗普总统	启动改组后的总统科学技术顾问委员会，将量子计算列为关键变革性技术方向。
2025-02-21	AmericaFirstInvestmentPolicy	白宫	提出将考虑在量子等敏感领域对对华境外投资实施新的或扩大的限制。
2025-04-03	QuantumBenchmarkingInitiative（QBI）	DARPA	启动量子基准测试计划，分阶段审查并引入独立验证与确认（IV&V）。
2025-07-22	HARQ（异构量子计算架构）	DARPA	发布项目通知，覆盖异构编译与异构互连，并提出互连性能指标。
2025-09-04	NQVL设计阶段	NSF	NQVL进入设计阶段，支持团队规划全国共享资源平台。
2025-11-04	NQISRC五中心续期资助	DOE科学办公室	宣布拨款6.25亿美元续延五个国家量子信息科学研究中心运营，落实《国家量子倡议法案》。

美国量子计算的领先并不只来自单点技术突破，更依赖一套可持续的推进条件。

需求牵引方面，美国国防、金融、医药、能源等领域对新型算力有持续需求，能够形成真实问题与项目牵引，并反向推动软件栈、系统稳定性与工程指标的改进。

企业体系方面，美国头部科技企业与量子初创企业数量多、分工细，既有长期投入能力，也能通过并购、合作与生态联盟把研发、平台、应用验证连接起来，形成更完整的产业组织能力。

政策供给方面，美国更强调制度连续性：以国家级研究中心体系提供长期稳定资助，以DARPA项目把评测与验证制度化，以NSF推进共享平台扩散研发能力，再叠加高层协调机制提升跨部门一致性。

资本支撑方面，美国风险投资与资本市场活跃，能够为长周期研发提供多轮融资承接；政府资金通常用于托底与稳预期，社会资本更擅长放大规模与加速迭代，两者共同支撑企业持续投入。

综合来看，2025年的美国量子计算政策更像是在把既有优势做实：通过高层统筹、长期资助、可验证的国防牵引和平台化扩散，把量子计算推进从分散项目推进，转向更稳定、更可评估的国家能力建设路径。

03 中国：自主创新，推动量子计算全链条能力建设

中国将量子计算作为未来产业与战略性前沿技术的重要组成部分，政策目标更强调关键核心技术攻关、产业链自主可控、重大任务牵引与示范应用带动的组合推进。与美国路径相比，2025年中国量子计算相关政策，主线不是围绕某一个单项工程，而是把量子计算放在未来产业和新质生产力的统筹部署里推进：国家层面给出方向与投入机制的政策空间，同时用揭榜挂帅这类组织方式，把关键共性技术、核心器件设备、公共支撑能力和示范应用按任务拆解推进；标准化与计量工作则在为后续规模化应用提供统一口径与基础条件；在资金侧，国家创业投资引导基金等安排强调耐心资本，引导社会资本更多进入早期、小型、长期、硬科技方向，为量子计算这类长周期投入提供更稳定的承接。总体上看，政策更关注把研发组织、工程化推进、评价口径、应用牵引和资金供给放到同一套安排中，减少各环节脱节带来的推进成本。

图表 2025年中国量子科技相关重要政策与项目概览

时间	政策/项目	发布机构	政策与量子计算相关内容
2025-01-11	《计量强基工程总体方案》	市场监管总局	在计量支撑新质生产力行动中，将量子科技纳入重点产业领域，强调围绕产业链难点堵点卡点凝炼项目、依托机构开展能力建设与协同。
2025-01-17	《关于组织开展2025年未来产业创新任务揭榜挂帅工作的通知》	工业和信息化部办公厅	面向量子科技等未来产业组织揭榜挂帅；量子方向围绕量子计算、量子通信、量子精密测量部署任务，强调共性关键技术攻关、核心器件设备研制与公共服务能力提升。
2025-10-24	《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》	中共中央	提出前瞻布局未来产业，推动量子科技等成为新的经济增长点，并提出建立未来产业投入增长和风险分担机制等安排。
2025-12-05	工业和信息化部量子信息标准化技术委员会筹建方案（公示）	工业和信息化部	公示筹建量子信息相关标准化组织，业务范围覆盖基础共性、量子计算等方向，指向术语、功能模型、关键技术、核心组件、测试评估等标准研制。
2025-12-26	国家创业投资引导基金启动	国家发展改革委等	引导金融资本投向早期、小型、长期、硬科技方向，公开信息中提到在集成电路、量子科技等领域布局相关子基金与直投。

中国量子计算的推进也不只取决于单点技术突破，更依赖一套可持续的产业化条件组合。

方向牵引方面，中国把量子科技放在未来产业和新质生产力的框架下统筹推进，通过“十五五”、政府工作报告等上位政策给出长期布局与投入增长、风险分担的制度空间，使量子计算具备稳定的政策预期和跨周期推进条件。

任务组织方面，中国更强调用任务清单把工程化抓手落到可执行层面。工信部以揭榜挂帅方式围绕量子计算等方向部署任务，明确共性关键技术攻关、核心器件设备研制、公共支撑能力提升和应用落地导向，有利于把研发、工程队伍、供应链协同和阶段性成果交付组织成连续链条。

公共底座方面，中国正在用标准与计量把规模化所需的统一口径补齐。一方面推进量子信息标准化技术委员会筹建，将量子计算相关的关键技术、核心组件、环境测控、硬件系统、软件算法、平台服务、应用场景、测试评估等纳入标准化范围；另一方面在计量强基、制造业计量创新、计量支撑新质生产力等安排中把量子科技列入重点领域，强调围绕产业链难点堵点卡点形成项目并开展能力建设，为后续跨机构协作、测试评估一致性和平台化交付提供基础条件。

资金承接方面，国家层面开始更明确地强调耐心资本与引导机制，通过国家创业投资引导基金等安排，引导金融资本投向早期、小型、长期、硬科技方向，并与政府投资基金、风险投资机制建设相衔接，为量子计算这类长周期领域提供更适配的资金供给结构。

综合来看，2025年中国量子计算相关政策更像是在把推进条件系统化：上位框架给方向与预期，任务机制把研发与工程化组织起来，标准计量把评价口径和公共底座立起来，再用创投引导把长周期资金承接住，从而把量子计算推进从分散推进，转向更连续、更可验收、更便于规模化复制的产业化路径。

04 欧洲与其他国家：协同竞争，共同迎接量子科技的未来挑战：

除了美中两强，欧洲各国、日本及其他主要经济体在2025年也纷纷加码量子科技政策，形成你追我赶的局面。欧盟通过统一战略谋求整体跃升，欧洲多国各出实招布局细分领域；而亚洲的日本、韩国以及大洋洲的澳大利亚等国，则结合自身优势制定中长期规划，并通过国际合作融入全球量子创新网络。

欧洲：协同发展，多国布局形成竞争合力

欧盟整体战略：2025年7月，欧盟委员会发布了迄今最全面的《欧洲量子战略》，提出到2030年使欧洲成为全球量子技术的领导者。该战略的总体导向是建立具有韧性和主权的量子生态系统，把欧洲在量子领域的卓越科技成果转化为市场应用，同时维护欧洲的科学和产业竞争力。这一强调韧性和主权的措辞反映出欧盟希望在量子时代摆脱对外部的依赖，实现技术自主可控。量子技术被欧盟视为未来经济和安全的双重支柱，欧委会指出量子创新将为解决医疗、气候、安全等复杂挑战提供革命性工具，并创造大量高技能就业机会，预计到2040年全球量子产业价值将超过1550亿欧元。

欧盟希望通过以上举措，形成科研-产业-人才的良性循环，提高欧洲量子初创企业的融资和成长能力，提升私人资本在量子投资中的比重。为配合战略实施，欧盟计划于2026年出台《欧洲量子法案》，进一步提供政策和立法保障，推动量子技术的工业化努力。此外，在安全管制方面，欧盟已率先行动：2025年9月更新的欧盟双用途出口管制清单新增了对量子计算机、低温电子器件等的出口限制，以确保对敏感量子技术的统一管控。欧盟强调通过统一规则既保护国际安全又保持公平竞争。欧盟层面的量子战略体现出强烈的统筹与自主色彩——通过协调27国行动，集中力量办大事，同时确保欧洲不在量子革命中落于人后、受制于人。

在欧盟统一战略指引下，欧洲各主要国家也制定了各具特色的国家量子政策，加大投入以在本国建立竞争优势：

英国：算力体系牵引，量子计算纳入公共算力底座

2025年7月，英国政府发布英国算力路线图，明确把量子计算作为新兴计算范式纳入国家算力体系规划。路线图强调动态、敏捷的推进方式：在国家高性能计算基础设施中为研究者和开发者提供试验空间，用公共算力孵化量子计算等新技术。资金安排上，英国计划未来5年投入超过20亿英镑，用于扩充AI研究算力、建设新的国家超算中心，并预留部分算力支持量子计算、类脑计算等高潜力方向。

机制上，英国以计算桥梁计划连接量子研究基地、测试平台与应用案例，推动量子技术规划与算力战略协同落地。路线图提出到2027年，把量子计算、神经形态芯片和AI混合系统等纳入公共计算基础设施，使其逐步成为常规算力体系的一部分。同时，2014年启动的国家量子技术计划继续推进，2025年新增资金支持多个量子卓越中心和区域量子网络建设，为产业界提供试验平台和人才供给。

德国：工程制造导向，围绕样机平台补齐硬件产业链

德国政府在2025年继续实施《量子技术发展计划》，投入数亿欧元建设多个量子计算机原型试验平台。德国重点扶持本土企业和科研机构研发超导量子计算机和离子阱系统，目标是在2030年前后建成初步容错的量子计算样机。同时，德国发挥其工业优势，在精密光学、低温制冷、激光控制等量子计算关键配套上投入研发，力求打造完整产业链。德国还与法国等合作建立了跨境量子通信试验网络（法国领导量子安全通信项目），加强欧盟内部协同。作为欧洲经济领头羊，德国的挑战在于转化其强大的工程实力来制造稳定可靠的量子硬件。

法国：企业培育叠加国防牵引，以优势方向参与欧盟协同

法国早在2021年发布5年量子计划，2025年该计划进入中期，法国政府继续给与了Pasqal、Alice&Bob等本土明星企业资金支持，前者研发中性原子量子计算，后者研究纠错超导比特。此外，法国注重在国防领域应用量子技术，2025年成立专门工作组研究量子传感在军事情报、潜艇探测方面的应用。法国与德国、奥地利合作的QCI项目也在推进，体现出法国在欧盟框架内以自身技术特长（如高精度测量）参与整体布局。

西班牙：后发补课型战略，集中投入做生态与人才平台

值得一提的是，西班牙于2025年4月发布了首个《国家量子技术战略》，计划2025-2030年投入8亿欧元加强量子科技生态系统。该战略由西班牙数字转型部和科学创新部联合推出，目标是强化西班牙量子生态系统，兼顾科研与市场，并为社会应对技术变革做好准备。该计划获得部长会议批准，显示出政府高层的支持力度。西班牙的重点在于补齐国内量子研究的短板，培养人才并吸引国际合作，争取在欧洲整体布局中占据一席之地。8亿欧元将用于资助国内大学和企业的量子项目，建立国家量子实验室和创业孵化器，以及在巴塞罗那等地成立量子研究中心。西班牙希望通过后发赶超策略，在特定应用（如量子算法金融应用、西语区量子教育）形成优势。

芬兰：小国集约推进，公共投资机制带动本土硬件与软件生态

芬兰在2025年由经济事务和就业部发布了《量子技术发展战略》（通过官方新闻稿公布要点）。芬兰将量子技术视为新的增长驱动力，计划构建持续的公共投资机制支持量子计算机、量子通信和量子传感等应用，实现可持续发展。此前芬兰的VTT研究中心已开发出本国第一台量子计算机（Helmi），作为一家专注于提供可定制化、本地部署型量子计算机的公司，IQM正通过一系列紧密的资本运作、技术突破和战略合作，成为全球量子计算浪潮中一支不容忽视的欧洲力量。新战略将进一步推动量子硬件改进和软件生态培养。瑞典也投资于高性能量子计算试验（与Chalmers理工合作研发超导量子比特），并在量子加密通信上与欧盟项目接轨。北欧国家虽规模不大，但通过区域合作（如NordicQuantumCooperation）集合同步推进。

荷兰：网络与创新集群协同驱动，用项目化平台推动商业化

荷兰作为欧洲量子研究的先锋之一，主导的QuantumDeltaNL项目在2025年进入新阶段。荷兰政府给予该项目新一轮投资，目标是在2030年前后建成容错量子计算机的雏形。当前荷兰在量子互联网（量子中继）和硅基量子点计算等方面具有世界领先团队，QuantumDeltaNL将这些研究与初创公司（如QuTech孵化的公司）结合，促进技术商业化。荷兰政府希望保持其在量子算法、量子网络标准制定上的话语权，并通过欧盟旗舰计划获得更多资源。

可以发现，欧洲各国在量子领域各有侧重又开展合作：英国偏重算力基础设施融合，德国深耕量子硬件制造，法国注重国防和企业培育，北欧重视研究和开放协作，荷兰专注量子网络和中小企业驱动。同时，为避免各自为政，欧洲还通过跨国平台加强协同，如欧盟QuantumFlagship旗舰计划下建立的QuantumPillar（量子枢纽）项目，就汇集了德国、法国、奥地利、西班牙等国的研究机构和企业共同攻关。又如欧盟量子经济发展委员会亦由多国参与，定期交流政策经验。这些举措确保了欧洲一盘棋：在争取引领地位的同时，尽量发挥协同效应，避免内部过度重复竞争。

亚洲及大洋洲：合作突破，专注细分领域加速追赶

日本：产业孵化加速，示范机牵引，争取标准与国际合作话语权

日本政府在2025年通过了新的《量子未来战略》，作为其2019年量子技术创新战略的延续和升级版本。日本继续实施量子创新战略推进项目，并宣布投入约500亿日元（约合3.4亿美元）用于扶持量子技术初创企业，加速产业孵化。日本的计划包括在2026年前后建成超导和光量子通用计算机的示范装置，作为验证平台向产学界开放。此外，日本强调量子人才培养和标准制定。2025年日本在G7框架下积极参与量子合作，牵头制定量子密码、量子通信的国际标准草案，力求在下一代信息技术竞赛中保持领先。可以说，日本的策略是发挥其电子产业和精密制造优势，在硬件上取得突破，同时通过国际合作获取最新进展。日本国内已形成以理化学研究所（Riken）、东京大学、大阪大学为核心的量子研究网络，并有日立、东芝、富士通等企业投入量子计算和量子加密通信开发。政府政策的支持使学界和产业界更紧密结合，如建立量子技术创新hubs将大学成果快速转移给企业。日本深知仅凭国内市场难以支撑量子产业，因此非常注重国际合作和标准话语权，以便未来其产品和技术更易进入全球市场。

韩国：先做可落地场景，通信网络示范带动产业平台，外部合作补基础短板

韩国在2025年发布了《量子基础与产业战略（2025-2035）》，勾勒未来十年韩国量子科技的发展蓝图。韩国政府将首先建立国家量子通信网络示范，在首尔等地铺设量子密钥分发网络，用于政府和金融数据传输安全。与此同时，韩国计划设立量子计算技术孵化平台，支持量子计算初创公司成长。为弥补自身基础研究稍弱的不足，韩国积极寻求国际合作：近年已与美国、英国、新加坡等签署量子合作协议，内容包括科研机构互访、联合项目资助、标准互认等。

2025年韩国尤其加强与美国的联系，美韩在量子算法和人才培训方面展开协作（例如韩国参与美国主导的Q-12教育倡议）。韩国政府还投入资金在高校设立量子研究院，培养相关硕博士，提高国内人才供给。总体来看，韩国希望通过政府引导和国际合作双轨，在量子通信、量子传感等应用领域占据一席之地，并为本土ICT产业（如三星、LG）赋能量子技术。

澳大利亚与新西兰：安全与行业需求驱动，押注太空量子通信切口

澳大利亚近年来将量子科技视为国家安全和经济的新重点之一。2025年澳大利亚政府加强了国防部与工业界的合作，资助本土量子初创公司，并建设国家级量子实验室和测试设施。澳大利亚拥有SouthernQuantum、Q-CTRL等一批领先初创企业，专注量子控制、量子传感等。政府提供资金帮助这些公司将技术应用于国防情报（如高精度磁感应探测、量子雷达）和矿产勘探等领域。澳洲各大学（新南威尔士大学、悉尼大学等）也与政府合作建立量子计算中心，吸引国际人才。新西兰则发挥小而灵活的特点，与美国（联合量子研究所）、韩国的顶级机构合作：2025年4月，新西兰与美国科罗拉多州签署协议，提出在航天、量子等方向拓展合作机会（包括科研合作、产业交流与投资对接等）。2025年12月，新西兰与韩国启动联合资助项目，围绕量子通信的长距离能力验证与工程化实现开展三项合作研究，体现出其量子政策在项目化落地与可交付成果方面的推进。新西兰希望在量子通信和量子导航方面取得突破，从而加入这一高科技竞赛。同时，新西兰政府也投入人力物力参与国际量子标准的制定，确保在新兴规则层面占有一席之地。

总的来看，欧美之外的主要经济体对量子科技高度重视且行动迅速。欧洲国家依托欧盟大平台谋篇布局，并辅以各自擅长领域的政策支持，力图整体提升欧洲在量子时代的地位。日本、韩国等则以国家计划为牵引，结合国际合作尽快追赶；澳大利亚、新西兰等国发挥区域和特色优势，在特定应用上寻求突破。可以预见，未来全球量子科技生态将不是单极垄断，而是多极竞争合作并存：美国、中国、欧盟、日本等各有强项，彼此既合作（如在国际标准、科研项目上），又竞争（人才、市场、专利等）。这对于技术的发展未必是坏事，不同思路的竞赛可能催生更快的进步。不过，对于资源有限的中小国家而言，如何定位自身角色、融入大国主导的合作体系，也是需要平衡的课题。



03

上游核心设备与关键器件

目录

03
上游核心设备与关键器件

01 量子芯片与材料

02 低温设备

03 真空系统

04 控制电子学与测控系统

05 光学与激光器件

01 量子芯片与材料

量子芯片是量子计算系统性能、规模化与可制造性的基础环节，其发展态势主要体现在以下几个方面：

- 纠错牵引架构：纠错码的选择开始反向决定芯片的连线拓扑、测量回路与模块边界；非表面码/非二维最近邻的架构讨论明显升温。
- 设计工具链升级：量子EDA的重心从器件级版图与电磁验证扩展到系统级协同设计与验证前移，通过统一平台将电磁/电路建模与量子时域动力学、低温链路噪声等系统因素纳入设计闭环，减少低温反复试错并加速系统收敛。同时，开源化工具降低大规模版图与仿真对接门槛，工具链以项目制方式补位，形成并行推进态势。
- 工艺工业化与异构集成：3D/Chiplet、高密度封装、300mmCMOS先导验证，使规模化路径从实验室经验转向可复制的工业流程；材料创新也从追极限转为兼顾工艺窗口与系统集成。

架构设计：纠错回路牵引拓扑与测量网络，架构约束下沉到版图

2025年，量子纠错对芯片物理架构的影响开始从码与阈值的理论层面，转向对器件耦合拓扑、测量回路时序与版图连线的直接约束：在错误检测/纠错实验中，为了降低测量回路深度、提高并行度并抑制串扰，硬件架构越来越多地采用非二维最近邻的耦合网络（如星形/中心总线类拓扑），并把稳定子测量所需的读出链路、滤波与耦合结构固化为可复用的芯片单元。

纠错驱动的布局优化成为核心设计原则

IQM

IQM利用量子比特—谐振器星形拓扑开展错误检测实验，通过在星形耦合结构中组织稳定子测量回路，使错误检测所需的连接关系由芯片拓扑直接承载，而非依赖额外的测量调度与搬运；该工作表明，为满足纠错/检测回路的测量组织需求，量子芯片的耦合与读出布局正在由纠错目标直接牵引设计。

QuantWare发布面向纠错研究的Contralto-AQPU：以距离-3表面码等纠错实验需求为目标，在处理器规格中固化17个可调比特、可调耦合器及专用读出链路，使为稳定子测量预留连线与器件结构的架构选择从实验室定制，演进为可复用、可采购的硬件模块。极大地降低了科研团队构建纠错实验系统的门槛与成本。

随着纠错编码从表面码扩展到颜色码与振子/玻色编码，硬件架构不再是通用底座，而需要在耦合结构、测量并行性与器件类型上对该种纠错编码提供原生支持。

谷歌研究院与合作者在Nature上在超导量子处理器中实现颜色码的尺度扩展与逻辑操作，证明该类非表面码并非仅停留在理论层面；实验显示，颜色码对芯片提出了不同于二维最近邻表面码的要求，包括更复杂的连线拓扑、稳定子测量的并行组织以及晶格手术操作支持，从而推动面向颜色码的耦合与测量结构需在硬件层面原生支持的架构讨论。

耶鲁大学与费米实验室将线性量子耦合器用于洁净玻色子模式控制，为振子/玻色编码（包括GKP思路）提供关键器件基础；该工作表明，此类编码对硬件的核心要求不再是比特数量，而是高品质谐振子、可控耦合结构以及连续变量读出与反馈能力，进一步强化纠错编码选择直接决定器件类型与控制架构的趋势。

进一步扩展系统规模时，瓶颈往往从芯片内部的连线组织转向模块之间如何互连与协同。围绕这一方向，业界一方面在器件层面推进纠缠分发与自旋—光子接口等关键连接能力，使跨芯片互连有明确的物理实现载体；另一方面在系统层面强调可部署、可维护的模块形态，通过更清晰的接口与集成边界，为后续规模化集成与更高密度封装打下工程基础。

QuTech在2×4锗量子点二维阵列中实现了对4个量子比特的编码与独立控制，并首次以完整电路形式演示了非直接相连量子比特之间的纠缠分发，把纠缠分发能力作为量子点规模化的关键构件之一，强化模块内扩展与模块间互连的系统路线。

三方在NaturePhotonics报道硅中电触发自旋-光子器件，把固态自旋与光子接口做成可工程化器件形态，该技术通过将固态T-center缺陷与光子接口集成在可工程化的硅芯片上，为实现芯片间或模块间的光互连提供了关键支撑。

OxfordIonics向英国NQCC交付并安装全栈系统QUARTET，声明其采用ElectronicQubitControl（用电子学而非激光控制量子比特），并将俘获与控制所需的一切集成到由标准半导体代工制造的标准电子芯片上；同时强调其QPU为信用卡大小、即插即用、可现场升级替换，而无需改变任何周边基础设施。体现芯片模块化+封装可维护的工程化思路。

芯片设计：EDA软件迈向系统级与开源化

随着芯片规模与系统复杂度上升，量子芯片设计从专家经验驱动转向工具链驱动：系统级仿真把大量试错前移到设计阶段；开源化降低版图生成与仿真对接门槛。

Keysight发布了系统级仿真解决方案QuantumSystemAnalysis（ADS2026），以统一平台连接电磁/电路建模与系统级量子动力学仿真，并提供时域演化模拟与稀释制冷机输入线热噪声建模能力，降低对低温反复试验的依赖，为超导量子芯片从器件级到系统级的协同设计提供工具链支撑。

AWS开源发布量子芯片设计工具DeviceLayout.jl，支持模块化版图生成并对接仿真流程，降低大规模芯片设计与复用门槛，推动可共享、可复现的量子版图工程实践。

国盾量子公告拟委托曲泉科技研发国盾量子EDA软件，以进一步完善量子芯片设计工具链，推动中国量子EDA技术从实验室研究向产业化转型。

制备工艺：3D集成与工业级标准全面引入

2025年制备与封装的核心变化是：把量子芯片纳入成熟半导体工业的可复制流程。3D/高密度封装直接回应扇出与冷机空间约束；300mmCMOS线验证一致性与可量产性；光子芯片开始正面解决封装与晶圆加工问题，推动从器件展示走向规模制造。

IBM宣布其Loon、Nighthawk及后续路线图量子芯片转入NYCREATES Albany Nano Tech Complex，采用300mm半导体晶圆工艺完成标准化前道制造；同时由IBM York town承担量子器件相关的定制后段处理与集成步骤，以半自动化工具链提升迭代速度并支撑更高物理复杂度的量子芯片开发。

富士通与理研发布具备可扩展3D架构的256量子比特超导量子计算机，将高密度实现与可扩展封装作为系统升级核心。

SEEQC与ITRI宣布合作建设先进超导电子芯片制造线，强化超导系统量子芯片+低温控制电子学的协同制造能力，为大规模系统提供供应链与制造基础。

QuantWare发布面向更大规模系统的万比特量子芯片，3D封装架构，计划于2028年实现交付。

UNSW/Diraq/imec/Ghent University/KU Leuven在工业兼容的300mm CMOS流程中制备硅自旋量子比特单元，并在此基础上实现高保真单、双比特门操作，显示关键器件参数（如量子点形成、读出结构与耦合行为）能够在晶圆尺度内保持可控分布。

Quantum Motion交付业界首台全栈硅CMOS量子计算机，部署于英国国家量子计算中心（NQCC）。采用行业标准300毫米CMOS晶圆技术制造，未来目标是提供商业可行、实用规模且容错的百万个量子比特系统。

Xanadu与DISCO合作推进光量子芯片晶圆加工与封装能力，旨在实现光子芯片封装在量子及其他前沿领域的大规模扩展。

技术路线成熟：材料与制造集成的平衡

近年来，量子芯片材料的进展不再仅仅关注性能提升，而是更加注重在不影响制造工艺和集成性的前提下优化材料性能。例如，铌酸锂（LNOI）平台通过低损耗波导与高效开关的结合，推动了光量子计算的可扩展性和可制造性；超导量子计算则通过钽薄膜与硅基底的结合，提升了量子比特的相干时间，同时保持了制造的简便性。这表明，量子芯片的未来发展将更加依赖材料、工艺与系统需求的协调，而不仅仅是追求单一性能的极限。

过去十多年里，铌酸锂从传统体材料电光调制器逐步演化为可规模制造的薄膜集成平台，其关键拐点并不在于电光效应本身，而在于LNOI/TFLN晶圆与深刻蚀工艺带来的高折射率对比度与微纳尺度光场约束：一旦波导截面可缩小到微米量级，铌酸锂同时具备的Pockels电光效应（高速可调）、二阶非线性$\chi^{(2)}$（片上光子对源）、宽透明窗口与低损耗潜力，就能在同一平台上形成生成—操控—复用的系统级闭环。围绕这一点，领域在2017-2019年先后完成了两个工艺层面的地基验证：一类工作证明LNOI可实现超低传播损耗波导并支撑高品质因数Q器件；另一类工作把低损耗能力扩展到可见波段并给出高品质因数Q微环与高速调制实例，这两类结果共同把TFLN/LNOI从可做器件推进到可做大规模光路网络的工程窗口。

在此基础上，2025年产业侧的关注点开始从器件指标最好能做到多低损耗转向大规模可编程网络的可制造性与封装形态。

XANADU

HYPERLIGHT

Xanadu与Hyper Light在2025年7月的联合进展中，明确将薄膜铌酸锂定位为面向可扩展光量子计算的关键硬件底座，并以TFLNChiplet作为模块化形态推进，强调在低损耗波导与开关等关键器件上刷新/逼近工程边界，为大规模可重构线路的可复制制造提供支撑。

ETH zürich

苏黎世联邦理工学院在薄膜铌酸锂（LNOI）平台上实现了可重构的集成量子光子芯片：在单芯片中集成两个光子对源并结合可编程干涉仪，实现任意最大纠缠贝尔态的片上制备；实验中光子对源亮度达到26 MHz nm^{-1} mW^{-1}，符合—偶然比高于100，片上两光源干涉可见度99.0±0.7%，制备的贝尔态保真度均超过90%，验证了LNOI平台在高亮度、低损耗、可编程集成量子光子器件方面的工程可行性。

与光子路线侧重功能集成能力的演进不同，超导量子计算芯片与材料在2025年的成熟度提升，更多体现为损耗机制被材料与工艺工程持续压缩，从而在不改变基本电路架构的前提下拓宽可制造窗口。传统超导量子比特的性能提升长期受限于界面缺陷、杂质诱导的两能级系统（TLS）以及高温工艺条件带来的制造复杂度，使高相干性与宽松制造条件难以兼得。

AWS量子计算中心/NIST/Brookhaven（NSLS-II）在室温条件下生长钽薄膜并制备低损耗超导谐振器的结果，显示即便在更宽松的沉积条件下，器件仍可达到接近最先进水平的品质因数（Q）。该结果为超导电路提供了一条兼顾低损耗与制造友好性的可复制材料路径，有利于多层集成与封装兼容工艺的展开。

Princeton University提出了一种基于钽（Ta）超导薄膜与高电阻率硅衬底的量子比特制造方法：通过在硅基底上逐原子生长高质量钽薄膜并抑制界面缺陷，在最多48个量子比特的芯片中实现了最长1.68ms的相干时间，该数值约为此前实验室先进结果的3倍，并约为当时Google与IBM现役超导处理器中量子比特寿命的15倍。更重要的是，该性能提升是在不改变2D transmon基本电路结构的前提下实现的，意味着材料与衬底工程的改进可直接继承到既有芯片设计与控制体系中，从工程角度显著降低了路线迁移成本。

综合薄膜铌酸锂与钽薄膜超导体系的进展可以看到，量子芯片制造的成熟度，已不再主要由单点性能纪录定义，而是由材料、工艺与系统需求之间是否形成稳定且可迁移的工程窗口所决定。

在光子路线中，这一窗口体现在低损耗、电光可编程与非线性量子功能在同一平台内的协同集成；在超导路线中，则体现在损耗抑制与制造条件之间的重新平衡。两者共同指向一个趋势：只有当材料改进能够在不牺牲可制造性与系统兼容性的前提下放大为系统能力，技术路线才真正进入可持续演进阶段。

02 低温设备

稀释制冷机：从绝对零度到工业热管

在量子计算迈向容错时代的关键节点，稀释制冷机作为超导、硅自旋及拓扑量子计算的物理底座，其角色正在发生根本性重构。2025年的市场动态清晰表明，这一领域已不再仅仅关注能达到多低的温度，而是转向了如何在大规模、高密度、连续运行的工业场景下维持低温。稀释制冷机正在褪去实验室精密仪器的外衣，穿上数据中心基础设施的工装。

高效能与稳定性

目前行业内的公司在提升稀释制冷机性能方面进行了大量创新，尤其是在提升换热效率和稳定性的技术突破上。

上海量羲技术有限公司：将稀释制冷机与高密度多通道信号传输链路、14T高场磁体及矢量高场磁体、光学访问等进行了系统化集成，开发了电学、磁学、热学、光学等各种综合极端条件测试子系统。在接近绝对零度极其严苛的总体制冷功率预算下，精准抑制高密度多通道信号传输链路在各温区引入的焦耳热与传导热，实现上千通道链路从室温到各级冷盘之间的多级热负载分配与动态平衡控制，同时采用多级滤波噪声抑制技术等手段，保障复杂大系统的极低温精准获取及极低信噪比条件下微弱量子信号的完整性与高保真度。应用工业化先进制造手段提高系统长时间连续运行的稳定性及极低振动，从基础物理研究迈向工程化应用。

全球低温巨头Bluefors在超大冷量与大规模扩展性上的最新参数依旧领跑业界。以其面向大规模量子计算的旗舰机型(如XLD1000及全新的KIDE架构平台)为例，系统在100mK温区可提供高达1000uW(1mW)的惊人制冷量，并配备了强悍的脉冲管压缩机组，在4.2K阶段即可输出2.0W的冷却能力。在物理承载力上，依托创新的模块化设计与高密度微波布线(HDW)系统，这些大型平台彻底打破了传统空间的通道瓶颈，单台设备便能支持超过1000个量子比特的布线与信号读写。这种庞大的冷量储备与海量信号通道的高效热管理，才是真正支撑当今科技巨头向“千比特级”量子芯片冲刺的核心硬实力。

合肥知冷低温科技有限公司在此基础上，采用干式无液氦技术路线，重点攻克了极低温下的热交换难题，其自主研发的具有大比表面积的纳米烧结银粉换热器，有效解决了流体与固体壁面间热阻（Kapitza热阻）过大的问题，大幅提升了换热效率。基于该技术突破，知冷低温研制的ZL-DR400型量子计算用极低温稀释制冷机性能卓越，其连续运行最低温度可达4.93mK，制冷功率分别为21μW @20mK、690μW@100mK；ZL-DR1000型稀释制冷机，连续运行最低温度达9.1mK，制冷功率分别为30μW @20mK、1060μW@100mK各项技术指标均处于国际一流水平。

中船鹏力超低温作为中国首家拥有G-M制冷机自主知识产权并实现产业化的企业，成功突破欧美技术壁垒，成为领先的超低温制冷设备与解决方案提供商。2025年，公司研发成功了100W@25K高效G-M制冷机，并发布了性能升级版脉管制冷机，提升了二级制冷量至1.9W。此外，凭借自主研发的30K深低温氦纯化器，公司成功实现了99.9999%（6N级）超纯氦气的生产，为行业提供了更高效、稳定的制冷与气体净化技术。

稀释制冷机迈入量子数据中心基础设施阶段

在含噪声中等规模量子计算（NISQ）时代，制冷机仅需容纳几十到几百个量子比特；而随着量子纠错需求的迫近，物理比特数向数千乃至数万跃升，传统的圆柱形、实验台式制冷机已成为物理空间上的最大瓶颈。2025年，以Oxford Instruments为代表的头部厂商推动了制冷机形态的巨型化与方型化变革，标志着低温系统正式成为量子数据中心（QDC）的标准机柜级基础设施。

全球低温技术领导者Oxford Instruments宣布成功交付并安装了其旗舰级型号——Proteox QX。这是目前商用市场上物理尺寸最大的模块化稀释制冷机之一。

Proteox QX的问世打破了传统杜瓦（Dewar）的尺寸限制，其核心系统测量高度超过3米，宽度超过1.5米。除了巨大的混合室（Mixing Chamber）空间外，其最具工业价值的创新在于模块化与可维护性。该系统支持多达6个独立的可拆卸二级插槽（Secondary Inserts）。这种设计逻辑源自服务器热插拔理念：科研人员或运维工程师可以在离线状态下完成复杂的微波布线、放大器安装及芯片封装，然后像插入服务器刀片一样将整个模块装入制冷机。Proteox QX的方形截面设计也并非偶然，而是为了适应标准数据中心的机房布局，便于多台设备并联拼接，与以往的系统相比，它能够支持部署更多的量子比特，满足量子计算领域日益增长的需求，形成低温算力墙。

英国量子计算独角兽Oxford Quantum Circuits(OQC)在纽约正式部署了其开创性的量子-AI数据中心。在该项目中，基于Oxford Instruments ProteoxLX平台的稀释制冷机不再是独立的孤岛，而是与NVIDIA的高性能计算（HPC）集群实现了物理空间的同址部署（Co-location）。

这一事件的里程碑意义在于算力融合。在ProteoxLX提供的20mK极低温环境下，OQC的超导量子比特与室温下的GPU/CPU集群通过高带宽低延迟链路协同工作，处理复杂的混合量子-经典算法。为了支撑这种数据中心级的应用，制冷机本身在制冷功率上进行了激进的优化，ProteoxLX在20mK能够提供超过25μW的制冷功率，以抵消海量同轴电缆和信号传输带来的热负荷。这标志着稀释制冷机已完全融入现代算力基础设施的版图，成为支撑AI与量子融合计算的物理基石。

制冷机从低温容器走向计算—控制共生架构

2025年，稀释制冷机的发展趋势不仅体现在技术的持续进步上，还反映了整个量子计算产业的基础设施转型。随着量子比特数从几十个增长到数千个乃至数万个，传统的实验室制冷机已经无法满足需求，制冷机的发展逐渐从单纯的冷却设备向量子计算中心基础设施转变。行业领先厂商通过推出更加模块化、紧凑化和可扩展的制冷系统，打破了传统设计的限制，极大提升了设备的适用性和部署效率。制冷机系统不仅仅满足更低温度的需求，还优化了体积和空间利用，满足了量子数据中心的要求。通过更大的冷却空间和模块化设计，用户可以根据需求自由扩展，提升系统的灵活性和可维护性，逐步实现低温系统的工业化与标准化。

BLUEFORS

全球低温巨头Bluefors发布了Ultra-CompactLD系列。这款设备将制冷机主体、第二代气体处理系统（GHS Gen2）以及脉冲管压缩机全部高度集成在一个单一的、紧凑的机箱内。

Bluefors的这一动作精准打击了空间受限与易用性两大痛点。Ultra-CompactLD预留了10U的标准机架空间，专门用于安装低温测控电子设备，实现了开箱即用的一体化交付。更重要的是其工业级静音与隔振设计，运行声级较标准系统降低了8-14dB，这意味着它不再需要专门的噪音屏蔽室，可以直接部署在普通的HPC机房甚至办公级实验室中。这种高度集成化设计，标志着稀释制冷机正从复杂的定制化实验装置向标准化的工业电子设备转型，极大地降低了量子计算节点的部署门槛。

理化学研究所 RIKEN

FUJITSU

在与日本理化学研究所（RIKEN）合作的256比特超导量子计算系统中，Fujitsu（富士通）展示了教科书级的热管理工程能力。

面对几百个比特及其配套线路产生的热量，Fujitsu并未单纯依赖增加制冷功率，而是进行了系统性的热设计优化。他们精选了低功耗的低温低噪放大器（HEMT/TWPA），并对4K温区及各级冷盘的信号链路布局进行了流体力学与热力学仿真优化。

稀释制冷机正从单纯的冷却设备升级为量子计算系统架构的有机组成部分。集成度与系统协同取代了单一的制冷参数，成为衡量设备竞争力的核心指标。

运行模式与资源逻辑重构

随着量子计算规模的扩展，制冷机也进入了服务化和平台化的阶段。越来越多的量子研究团队不再仅仅依赖于购买并维护高成本的制冷机设备，而是选择通过实验室即服务（LaaS）模式租赁制冷机。这种服务化转型不仅降低了资金门槛，还能加速量子技术的商业化进程。通过提供一站式解决方案，包括设备运行、维护和技术支持，服务模式显著提高了量子计算研发的灵活性和效率。

BLUEFORS

2025年，Bluefors在芝加哥等地正式运营其Bluefors Lab，开启了实验室即服务（Lab-as-a-Service）的新商业模式。

稀释制冷机正从重资产专用设备，向共享化、服务化的公共基础设施转型，通过集约化运维与场景化服务，大幅降低量子研发前期投入，推动量子硬件生态快速迭代。与此同时，核心稀缺资源的供应链约束日益凸显，产业竞争已从单一技术比拼，延伸至资源保障与全球产业链协同层面，行业发展进入技术创新与资源战略并重的新阶段。

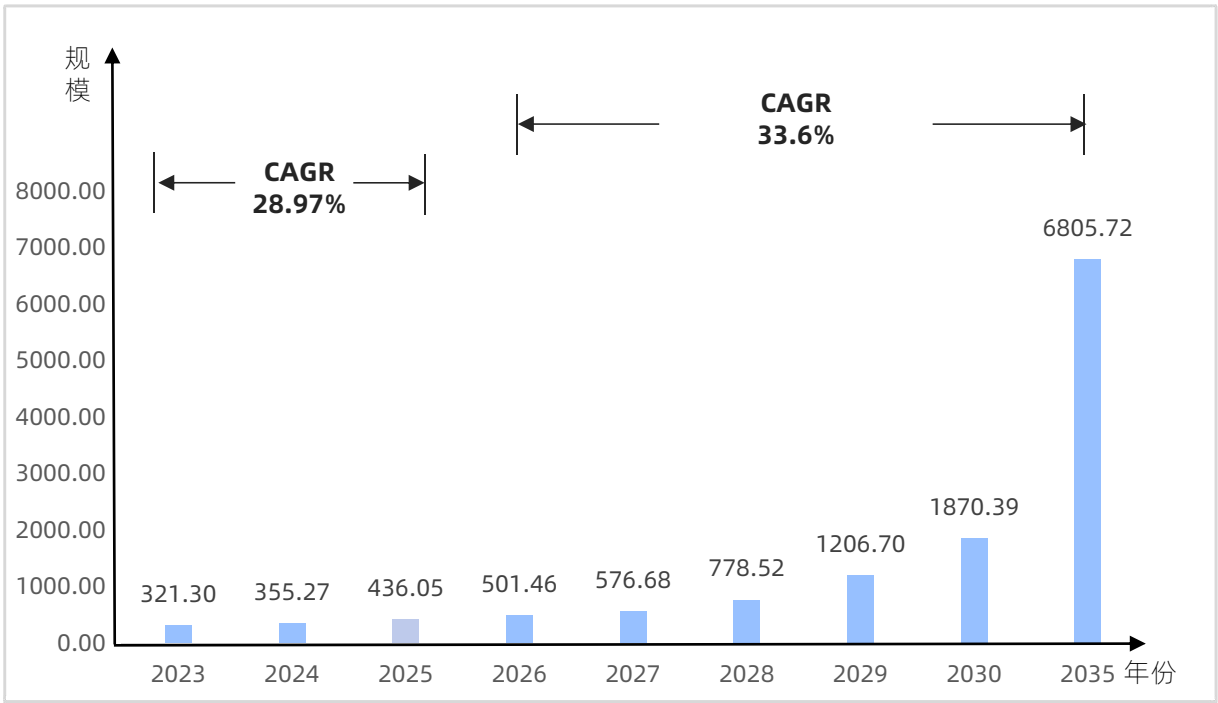
Maybell

Maybell Quantum凭借其高密度BigFridge方案（体积更小、容纳比特更多）崭露头角，并于2025年5月与太空资源公司Interlune签署了震撼业界的商业协议——预订2029-2035年间来自月球的氦-3。

中国市场强力复苏

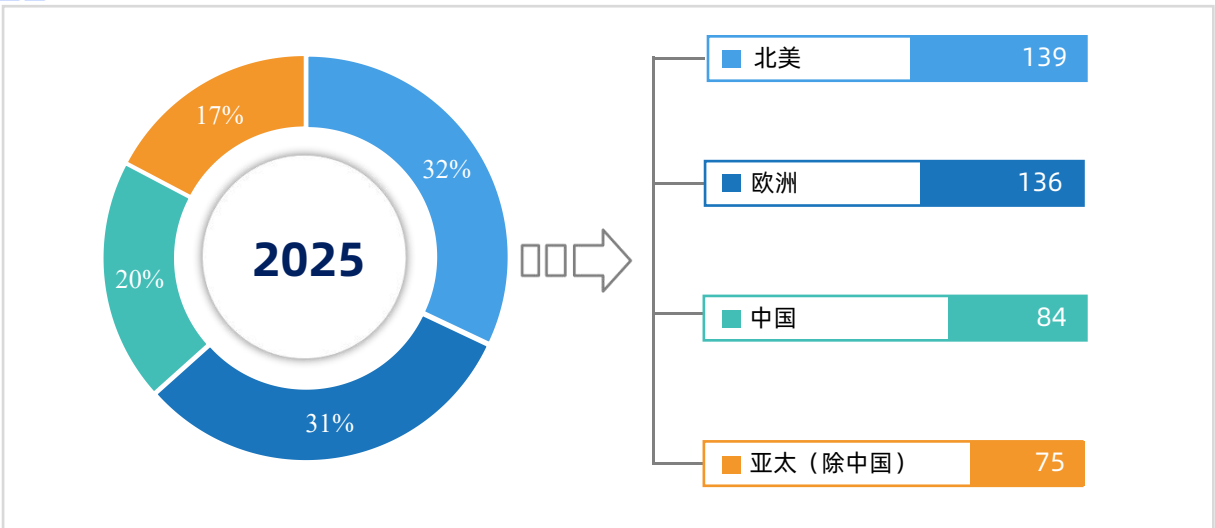
稀释制冷机作为超导量子计算不可或缺的低温环境支撑平台，其市场表现与量子计算硬件研发进度呈高度正相关。2025年，尽管量子纠错（QEC）尚未实现完全突破，但随着千比特级超导量子处理器的工程化落地，以及科研侧对低温电子学需求的增加，全球稀释制冷机市场保持了稳健的线性增长态势。

图表 2023-2035年全球稀释制冷机市场规模（单位：百万美元）



iCV TA&K | 2026.2

图表 2025年全球稀释制冷机各地市场规模（单位：百万美元）



iCV TA&K | 2026.2

以实际交付验收金额为统计口径，2025年全球10mK级稀释制冷机市场规模达到4.36亿美元，市场规模预计将在2035年突破68亿美元，呈现出近29%的年均增长率。区域市场格局在此期间发生了显著重构：北美地区受益于头部科技企业持续的硬件研发投入，市场规模由2024年的1.15亿美元增长至1.40亿美元，重回全球最大单一市场地位；欧洲地区受地缘政治因素导致的出口受限及存量市场高基数影响，市场规模出现阶段性回调，由1.47亿美元小幅收缩至1.36亿美元；其他地区（含日韩、澳洲等）增长迅猛，市场规模翻倍至0.76亿美元。

中国市场则在2025年迎来了关键的转折点，完成了供应链的自主化闭环，成为全球增速最快的区域。该地区市场规模从2024年的0.58亿美元增长至0.85亿美元，同比增长超45%。这一增长并非简单的触底反弹，而是中国的国产设备完成了从样机研制到工业化批量交付的转变。此前，受供应链禁运影响，中国市场曾经历短暂的供给侧收缩。但经过两年的技术攻关，中国厂商攻克了极低温循环、气体控制等核心工艺，建立了独立于欧美之外的供应链体系。2025年，随着科研院所及量子计算初创企业需求的集中释放，中国市场全年交付稀释制冷机约80至100台。这一数据表明，本土化设备已实质性解决了良率与产能瓶颈，有效支撑了当地超导技术路线的研发。中国稀释制冷机本土供应核心厂商包括量曦科技、知冷低温、鹏力低温等。

低温链路：介质、工艺与架构的协同升级

在量子计算机从科学实验走向工程化算力系统的过程中，连接室温控制端与低温芯片端的信号链路正在成为规模扩展的关键约束。随着比特数量和I/O通道数快速增长，传统同轴电缆体系同时暴露出空间占用大、装配复杂、维护成本高以及热泄漏显著等问题：线缆既挤占冷盘与布线通道，又不可避免地把室温热负荷带入低温级，抬升系统热预算压力。2025年的产业实践表明，低温链路正在发生两类结构性转变：一是介质层面的转变，传输从以电子为主逐步走向光电融合，以降低热负载并提升吞吐潜力；二是工程维度的转变，制造从依赖手工装配走向可批量制造的微纳工艺与标准化组件，同时互连架构从单机内部优化进一步迈向跨模块、跨制冷机的分布式互连，为量子数据中心的持续扩展提供新的技术路径。

介质变革：微波-光子转导与热力学解耦

2025年，低温链路与互连技术的演进，已从器件层面的性能改良转向系统级工程约束下的介质与架构重选。当量子处理器从百比特走向万比特，I/O数量与读出带宽呈结构性增长，传统金属同轴电缆所带来的热负载、布线体积、装配复杂度与振动耦合开始同时逼近上限，链路系统的主要矛盾不再是能不能传，而是能不能在热预算内、以可维护方式传。在此背景下，行业将光纤引入低温链路，不是简单地换一种介质，而是试图实现信号传输与热管理的解耦：以光纤的低热导率与高带宽潜力替代金属的热泄漏与空间占用，从而为高密度I/O和规模化部署释放系统余量。

奥地利科学技术学院（ISTA）研究团队成功研发出在毫开尔文（mK）温区工作的三共振回音壁模式电光（EO）收发器。该器件实现了在极低温下同步进行微波信号与光信号的相互转换（上/下变频），且无需任何有源或无源的庞大微波器件。

量子转导初创公司QphoX与全栈硬件商Rigetti及英国国家量子计算中心（NQCC）达成深度合作。双方通过微波-光转导接口，成功在Rigetti的9比特Novera QPU上实现了多通道全光学信号读取。

光学读出通过在低温器基温下的微波转光换能实现。该换能过程将微波读出脉冲中的信息转换为光纤传输的光信号。这种方法最终有望取代传统微波放大器和同轴布线，作为量子比特信号处理链的一部分，从而因换能器耗散较小且电信光纤产生的被动热负荷极小，提供显著的扩展优势。通过利用光学介质替代金属并叠加去有源化/低损耗设计读取超导量子比特的状态，链路有望在更低热负载下承载更高吞吐，进而为后续向十万/百万级超导量子比特规模迈进提供可扩展的互连底座。

工艺转型：高密度柔性微波电路的标准化

与此同时，随着量子处理器复杂度提升，低温布线正在从工程装配问题转变为制造工艺问题。过去依赖手工半刚同轴电缆的方案，天然存在一致性不足、装配不可控、维护成本高等问题，难以支撑规模化交付；而基于半导体光刻工艺的高密度柔性电路则把互连从线缆工艺推进到可批量制造的器件工艺，其意义在于：用制造一致性替代人工经验，用标准接口替代定制装配，从而显著提升布线密度并压缩系统体积，同时改善可维护性与良率。

专注于低温I/O的Delft Circuits宣布其Cri/oFlex®柔性电缆取得重大进展，单通道密度达到传统同轴系统的8倍。同时发布激进路线图：计划18个月内将密度提升至32倍，并定于2029年实现单个加载器支持4096个通道。

通过提供像芯片一样可批量制造、易于集成的柔性传输组件，这一模式显著提升了量子计算机内部空间利用率和信号传输可靠性，消除了传统手工半刚性电缆在相位匹配与机械应力上的不确定性，为量子纠错（QEC）所需的极高密度反馈控制提供了可扩展的物理层解决方案。

互连架构重构：分布式量子计算牵引架构革新

除引入光子作为新介质外，基于微波的互连架构也在同步演进，以适配分布式量子计算的工程需求。过去，微波链路通常被限定为芯片内或同一冷盘内的短距离互连，核心原因在于传输损耗、模式耦合引发的串扰以及由此带来的门保真度衰减，使其难以承担模块间的量子态传输任务。2025年的一类代表性进展表明，微波互连的能力边界并非只能依赖换介质，还可以通过控制协议与波导结构的协同优化实现显著扩展：在一定距离尺度内（例如冷盘之间、同一系统的跨模块连接），微波链路有机会以更低的系统复杂度，提供可工程化的高保真量子互连，从而成为构建短程分布式量子集群的一条现实路径。

IBM Research在2025年5月展示其在芯片级长距离互连上的成果。在长度为60厘米的超导共面波导（CPW）微波传输线上，实现保真度98.8%的量子态传输。

针对长导线中微波光子的退相干与模式耦合问题，团队采用超绝热无跃迁驱动（Superadiabatic Transitionless Driving）等脉冲成型方法，抑制由高阶模式引起的中间激发与能量泄漏，从而提升长距离传输的可控性与稳定性。该传统微波链路方案在近距离场景下更直接，减少新增器件、封装与标定环节，有利于提升整机集成速度与运维可维护性。

这一成果证明了在米级尺度内（如跨制冷机或跨冷盘），微波互连依然是比光电转换更直接、更具成本优势的方案。它验证了基于微波链路的模块化架构的可行性，即利用标准化的高保真微波线缆，将多个独立的量子处理单元在物理上级联，构建无需复杂光电转换接口的分布式算力集群。

同时也需要注意，这一路线走向工程化仍取决于后续是否能在更复杂的系统环境中保持稳定指标，包括跨连接器/跨温区接口的损耗控制、长期漂移与可重复标定能力，以及与纠错所需门保真度门槛的匹配程度。

低温微波器件：从分立链路到集成化量子信号处理

在超导量子计算中，mK温区的微波前端负责将微弱信号放大至室温电子设备能够处理的水平，并抑制反向噪声和寄生耦合对量子比特的干扰。随着系统规模从几百比特向几千、几万比特发展，行业面临的核心挑战逐渐从能否达到量子极限噪声转向在有限冷量预算下，如何支撑足够多的读出通道，同时保持系统的可维护性、可标定性和可复现性。因此，低温微波元器件的评价标准也发生了变化：尽管单个器件的最低噪声仍然是关键，但更多的工程决策开始关注单位通道热耗、动态范围、隔离能力、带宽与增益平坦度，以及制造和封装的一致性。

读取速度与信噪比的双重跃升

在超导量子计算向容错时代（FTQC）迈进的进程中，实时量子纠错对读取链路提出了极为严苛的要求：系统必须在微秒级的时间窗口内完成比特状态的精准判读，并迅速反馈纠正信号。然而，传统的约瑟夫森参量放大器（JPA）面临着极其敏感的饱和功率瓶颈，即一旦输入信号稍强，放大器便会进入非线性区导致增益压缩，这迫使读取脉冲必须非常微弱且漫长，严重拖慢了整个反馈回路的速度。2025年，匹兹堡大学、NIST与耶鲁大学的联合突破，通过rf-SQUID阵列架构彻底解决了这一动态范围难题，标志着微波前端终于具备了支持高功率、快节奏工业级纠错的能力。

匹兹堡大学、NIST与耶鲁大学研究人员利用嵌入在低品质因数谐振器中的25个射频超导量子干涉器件（rf-SQUID）阵列，开发了一种高饱和功率的约瑟夫森参量放大器（JPA）。该器件在保持量子效率（62%）的同时，实现了高达–91.2dBm的输入饱和功率，以及20dB的增益和28MHz的瞬时带宽。

高饱和功率对于实现量子非破坏（QND）测量至关重要。在量子纠错（QEC）过程中，系统需要频繁地向比特发送强读取脉冲以实现快速反馈。该器件证明了超导放大器可以在不牺牲量子极限噪声性能的前提下，承受高功率泵浦，为实时纠错提供了坚实的硬件支持。

非互易功能的片上化

在传统读出链路中，为抑制反射噪声对量子比特的影响，通常需要在放大器前级配置铁氧体环行器与隔离器等磁性非互易器件，但其体积、磁环境要求与装配复杂度在高通道密度场景下构成工程约束。2025年相关研究与工程实践开始更多探索利用行波参量放大器（TWPA）等超导非线性电路的机理，在芯片尺度实现放大与隔离能力的功能耦合，以减少分立磁性组件的使用并降低链路集成负担。

NIST团队开发了一种集成了宽带前向放大与后向隔离功能的创新行波参量放大器。该方法依赖于非线性传输线，通过波混频（Wave Mixing）机制，支持前向传播信号的参量放大；同时，巧妙地利用后向传播信号的频率转换（Frequency Conversion）机制来实现隔离。

未来一段时间，低温链路中非互易功能的技术路线可能更侧重以超导电路与频率转换等方式实现片上隔离或等效隔离能力，从而减少对分立磁性环行器/隔离器的依赖，降低体积占用与装配复杂度。该方向能否形成工程化路径，关键不在于单次实验展示的隔离度或增益指标，而在于系统条件下的可控性与可验证性，包括泵浦泄漏与串扰抑制、杂散混频产物管理、在多通道复用条件下的稳定性、以及跨封装与跨批次的一致性；上述因素将影响其在高通道密度读出链路中的替代范围与部署节奏。

多路复用牵引的宽带化与频谱效率提升

行波约瑟夫森参量放大器（JTWPA）是一类基于超导约瑟夫森结非线性传输线的低温微波放大器，通常能够在较宽频段内提供接近量子极限的低噪声增益，因此被认为是实现多路复用读出与高通道密度测量的重要候选器件。复用读出对放大器提出了更明确的工程要求，即在更宽频带内保持稳定可用的增益、可控的纹波水平与较低的插入损耗；相应地，传统JTWPA的主要瓶颈集中在介质损耗控制、相位匹配设计以及增益纹波的可预测性。进入2025年，相关工作更集中地围绕低损耗传输线架构优化、相位匹配的窗口化与平滑化设计、以及更高均匀性的约瑟夫森结工艺改进推进，使JTWPA的技术重心由实现可用增益进一步转向宽带条件下的工程可用性与可重复性，为多路复用读出场景提供更可部署的器件基础。

理研（RIKEN）与富士通双方开发了基于集总元件共面波导（CPW）架构的JTWPA。通过采用开路短截线电容和曼哈顿结构结，以及引入Tukey窗调制技术进行精细的相位匹配。该器件在高达12GHz的频率下实现了低于1dB的插入损耗，并成功在5GHz的超宽带内实现了20–23dB的增益，附加噪声逼近量子极限（仅高出0.18个光子）。如此宽的带宽意味着单条链路可同时支持数百个比特的读出。

耶鲁、谷歌与亚马逊联合研发宽带SNAIL放大器。该放大器集成了集总元件阻抗匹配网络和片上泵浦端口滤波器，在250MHz带宽内实现了极高平坦度的增益（纹波<1dB）。实验证明，它能同时执行两个Transmon量子比特的高保真度读出，态分配保真度分别达到99.51%和98.55%。其对制造和封装误差的鲁棒性，使其具备了作为工业级标准组件的潜力。

未来的读取系统将不再依赖堆砌线缆，而是依赖高性能的宽带放大芯片。通过理研/富士通定义的广阔频谱来容纳海量比特，并依靠耶鲁/谷歌定义的平坦增益来确保每个比特的读取精度——这两者的结合，构成了未来百万比特级量子计算机高密度、高保真读出系统的完整技术拼图。

03 真空系统：小型化封装加速，关键部件走向标准化与批量交付

量子计算硬件对环境有极高要求，其中真空系统是重要的测控基础设施之一。不同量子比特技术路线对真空环境的需求差异显著：

超导量子比特主要依赖极低温的稀释制冷机，在接近绝对零度的环境下工作，以降低热噪声。由于低温下残余气体分子几乎全部凝结，超导比特对超高真空（UHV）的依赖较小，仅需真空隔热即可（通常冷却系统自身提供所需的高真空环境）。相比之下，光量子比特（纯光子电路）通常在室温大气条件下即可运行，不需要真空环境（除非涉及到需要低温的单光子探测器等）。

固态自旋量子比特（如半导体量子点、NV色心等）通常也在低温下工作，但主要关注温度对晶格振动的抑制，其环境真空需求不若原子体系严格。总体而言，这些不需要原子悬浮的体系通过低温或材料隔离来实现对环境的屏蔽，不以维持高真空为核心目标。

离子阱和中性原子量子比特则高度依赖超高真空环境。它们直接利用带电原子或中性原子作为量子比特，必须将原子悬浮于近零气压的空间中，以避免空气分子碰撞导致量子态毁损。典型的离子阱量子计算实验需要将离子捕获在超高真空腔体中的电磁阱里。

AQT

Alpine Quantum Technologies(AQT)的IBEXQ1系统采用钙-40离子，在射频离子阱中被限制于超高真空腔室内；真空的稳定性直接决定了离子晶体的形成质量和量子门操作的高保真度。

同样，中性原子量子计算（如利用铷、铯原子形成的光镊阵列或玻色-爱因斯坦凝聚）也要求在真空玻璃腔体中用激光冷却原子到超低温，从而形成可控的原子阵列。如果真空度不够，高速运动的残余气体分子会破坏光阱中的原子布局或提升原子的退相干率。一般而言，离子阱通常需要达到10^{-11}Torr量级的真空（超高真空甚至进入极高真空XHV范畴），以保证离子在阱中数小时甚至更长时间稳定存在；中性原子系统常工作在10^{-9}～10^{-10}Torr左右的真空，如果原子偶有损失可以通过原子炉或磁光阱重新加载。

量子计算的真空测控系统通常包括真空获得与维持设备（真空泵）、真空容器（真空腔体或玻璃真空室）、以及各种真空接口组件（阀门、视窗和电学/光学馈通件等）。真空获得通常先使用机械泵和涡轮分子泵将腔体抽至高真空，再依靠离子泵、非蒸发型吸气剂（NEG）泵等无振动装置长期维持超高真空度。

许多量子芯片实验采用组合型泵，例如SAES Getters公司的NEXTorr复合泵，它将离子泵和NEG吸气剂集成，可在小型封装中实现高抽速的超高真空维护，被视为原子捕获系统的新标杆泵。

真空容器方面，一些专业厂商（如Kimball Physics、Johnsen Ultravac等）提供定制的UHV真空腔体，带有多个光学视窗和端口，以便引入激光束和安装电极。真空视窗通常采用抗反射涂层的石英或玻璃，既要密封真空又要尽量减少对激光的损耗。电学馈通与连接器（如MPF等公司提供的真空馈通件）用于将电信号导入腔体内，例如为离子阱电极提供射频和直流电压，同样需要高度密封和低泄漏。真空阀门（如VAT等公司的产品）则用于在初始抽空后隔离真空腔与泵浦，或实现多段腔体的模块化隔离。这些真空设备与组件的持续改进，为量子计算提供了日益可靠和易用的环境保障。

需要指出的是，不同量子计算技术在真空和低温方面的选择，体现了隔离外界噪声的不同策略。早期离子阱方案有的借助低温手段提升真空（例如Quantinuum的某些离子阱系统将阱置于低温腔体内，以利用低温获得极高真空并抑制红外辐射影响），但低温增加了系统复杂度和能耗。而目前业界正探索在室温下实现同等的真空隔离度，从而兼顾性能和工程实用性。随着量子计算从实验室走向更大规模和更高集成度，真空系统也正经历类似测控系统其他部分的变迁——从繁杂、人工维护的实验设备，逐步演进为模块化、工业级的关键组件。下面我们结合2025年的行业进展，分析量子计算真空系统的几大重要趋势。

离子阱量子计算真空系统的小型化与常温集成

2025年，离子阱量子计算机在工程实现上取得了小型化、常温运行的重要进展。长期以来，离子阱系统被认为需要庞大的光学平台和复杂的实验架设，而最新的进展表明，这一切正在被高度集成的装置所取代。小型化真空腔体与紧凑光学、电控系统的结合，使离子阱量子计算机从实验室搬入机架成为现实。

常温运行（无需低温制冷）也是一大亮点：这意味着系统功耗和基础设施要求大幅降低，利于在数据中心等环境部署。更高的集成度也提升了系统稳定性——封装更紧凑的真空腔体泄漏面更少，受环境干扰也相对更低。

此外，小型化还为日后扩大量子比特数提供了可行途径：通过制造多个模块并行组合，而每个模块都保持相对小的真空体积，降低规模化时真空维护的难度。总体而言，离子阱硬件正朝着机架化、模块化方向演进，其背后的关键支撑便是将真空系统从庞大笨重的独立设备，缩减为可封装进箱体的小型部件，同时仍满足超高真空要求。



2025年初，离子阱领域的领先厂商IonQ宣布成功研发新一代离子阱真空封装技术。该方案通过极高真空（XHV）技术在室温下实现了传统需要低温才能达到的真空水平，其真空度与月球表面真空相当。IonQ在其西雅图工厂部署了专用的装配真空腔（assembly chamber），可在超高真空环境中对微型离子阱组件进行组装密封，实现真空中的真空封装工艺。这一工艺省去了多级泵浦过程，仅使用针对XHV的泵浦机制，使封装体积大幅缩小。

除了厂商自主研发小型真空封装，商用离子阱系统部署也在2025年取得突破。



AQT公司的IBEXQ1量子计算机作为欧洲首个商用离子阱机型，通过Amazon Braket云服务对外提供使用。这套12量子比特的系统采用钙离子链方案，整机安装于两个19英寸标准机架内，功耗不足2千瓦，在普通室温机房环境即可运行。

IBEXQ1的成功上架，标志着离子阱量子计算硬件在可靠性和紧凑度上达到一个新高度,随着真空腔体及其维生系统（泵、监测等）的缩小和无人值守运行，未来可以平行部署多套离子阱模块来扩大量子比特数，而无需同比增加运维复杂度。

大规模量子系统推动真空技术的协同创新与产业整合

随着量子计算系统朝着更大规模、更高量子比特数目演进，对真空系统长期稳定性和规模化集成能力提出了更高要求。当一个量子处理器包含数千甚至更多的离子或原子时，真空腔体的体积和复杂度都会显著增加，任何一点微小的泄漏或局部真空不佳都可能引发更多的粒子碰撞，累积造成量子比特失误。为支持大规模量子架构，需要构建起贯穿整个量子处理器的真空骨干：既要在物理空间上联通多个量子模块，又要在真空环境上保持一致的超高真空水准。这对真空设备的工程设计和供应链都提出了挑战。

例如，多模块离子阱量子计算机需要复杂的真空管路连接不同芯片区域，并确保离子在不同模块间移动时不暴露于不良真空环境。此外，大型系统对真空泵浦能力和冗余设计也有要求，以防止单点故障。

2025年的行业趋势显示，量子计算公司开始与传统真空/低温产业展开深度合作，联合开发定制化的真空解决方案。这种跨界合作一方面利用了真空行业数十年的技术积累（如更高效的泵浦技术、更低逸出的材料工艺），另一方面也为真空厂商开辟了新兴市场，使其产品更好地匹配量子计算独特需求。可以预见，在这种协同下，未来量子计算的真空系统将从试验装置转变为可批量生产、具有工业级可靠性的子系统。

在地区层面，真空技术的供应链安全也受到重视：一些国家和地区支持在本土建立完整的量子真空设备生产线，以满足战略性计算项目的需求。这进一步推动了量子公司与大型真空企业的合作。

英国的离子阱初创公司Universal Quantum（UQ）宣布与真空技术巨头Atlas Copco集团签署战略合作备忘录，联合开发面向实用规模量子计算机的集成真空解决方案。根据协议，双方将把各自技术路线对接，围绕UQ的大规模模块化离子阱架构开发定制的真空系统。UQ的架构特点是在一台机器内包含多个硅基离子阱芯片模块，这些模块置于连续相连的极高真空环境中，并通过公司自研的UQ Connect离子输运连接技术，实现离子在芯片间的移动。

中性原子量子真空平台的成熟与商品化

中性原子量子计算在2025年也展现出真空系统成熟化、标准化的态势。

一方面，利用中性原子（如铷、铯原子）作为比特载体的量子计算原型不断扩充规模，已经从几十个原子发展到数百个原子的可控阵列，性能和稳定性取得长足进步。另一方面，围绕中性原子所需的超高真空冷原子平台，出现了模块化商品化的解决方案——研究人员和企业用户不再需要从零开始搭建复杂的真空系统，而可以采购现成的核心部件乃至整套系统。

这种标准化产品的出现意味着中性原子技术正迈出实验室，变成可重复制造、易于部署的装置。同时，供应链的完善也降低了进入这一领域的技术门槛：高校实验室、小型创业公司都可以通过购买成熟的真空腔体和配套控制系统，更快速地开展中性原子量子研究，而不用投入大量时间调试真空。

本年度还体现出云服务对中性原子硬件成熟度的验证——一些中性原子量子处理器已经接入云平台，对外提供计算服务。这表明其真空系统等基础硬件已经达到足够的可靠性，能支持远程多人使用而不需要频繁维护。

这一系列迹象都指向一个结论：中性原子量子计算的底层硬件技术（尤其是真空系统）在2025年变得更加稳健和易用，为后续性能提升和规模扩展奠定了基础。

PASQAL

法国公司Pasqal作为中性原子量子计算的领先者，在2025年将其量子处理器全面推向云端。继2023年起在微软Azure等提供服务后，Pasqal于2025年先后接入欧洲OVHcloud和Scaleway的量子云平台，并推出自有云平台，使其中性原子量子处理器面向全球用户开放使用。能够提供这种商业云服务，标志着Pasqal硬件系统的稳定性和自动化程度已非常高：其真空腔体、激光控制和电子控制可长期连续运行，而原子损失等可通过自动重装填机制处理，不需要人为实时干预。

Infleqtion

美国公司Infleqtion（原ColdQuanta）在2025年推出了第二代mini MOTV2产品。这是一个紧凑型、一体化的磁光阱真空系统：内含超高真空腔体、离子泵和吸气剂等主动/被动真空维持元件，以及产生磁光阱所需的磁线圈和控制电子学。

04 控制电子学与测控系统

量子计算测控系统作为经典电子设备与量子比特之间的桥梁，担负着控制、执行逻辑门操作和读取量子态的核心职能。早期量子实验多依赖通用仪器（如AWG、射频源等）进行量子比特控制。然而随着量子比特数量的提升和操作复杂度的增加，通用AWG很难在数百个通道间保持严格的相位相干，专用、集成度高的量子测控平台成为趋势。现在的设备集成了强大的FPGA，可以在纳秒级时间内处理读取（Readout）信号，并根据结果立即发射反馈脉冲，这是实现量子纠错（QEC）和主动复位（Active Reset）的必备功能。

当前国际主流供应商包括 Zurich Instruments、Quantum Machines、Keysight 等企业。与此同时，中国在量子测控领域也实现快速发展，中微达信、国盾量子、量旋科技、相干科技等一批本土企业在专用测控装备研发与技术创新方面取得显著进展。量子算法对复杂脉冲序列生成与高速信号处理的需求持续提升，也进一步推动测控系统向更高集成度、更低时延和更强实时处理能力方向升级。

超导量子测控系统：高密度集成、实时反馈与量子-经典混合控制

量子比特规模持续扩大，量子计算控制系统面临严峻挑战，超导量子平台对成百上千比特的高效控制已成为核心难题。为此，量子测控系统正向高密度、大规模、低延迟方向升级。量子-经典混合架构将 GPU、FPGA 等经典计算单元与测控平台深度融合，结合 AI 技术优化控制决策，实现量子系统的自动化高效校准与误差修正。

QUANTUM MACHINES

rigetti

Quantum Machines(QM)与Rigetti Computing展示了AI驱动量子校准的突破性成果：基于QM的OPX1000控制器和NVIDIA DGXQuantum（内含GPU的量子-经典一体机），合作团队Quantum Elements和Qruise成功自动完成了一台9比特Rigetti iNovera超导量子处理器的全套校准，单比特门保真度达99.9%、双比特门98.5%。这一成果表明AI算法能够在几小时内达到人工团队数周调校才能实现的指标，显著缓解大规模量子系统校准难题。

Quantum Machines于5月推出了开源校准框架QU Alibrate，将量子计算机完整校准时间从数小时缩短到几分钟；在以色列量子计算中心的演示中，QU Alibrate用140秒完成了多比特校准，验证了其高效性。

此外，硬件厂商也在推动混合架构标准化：Keysight宣布支持NVIDIA的新型NVQLink架构开发，将其测控系统与GPU通过高速链路连接，以实现量子处理器与AI超级计算低延迟协同。

实现对千比特及更大规模量子芯片的稳定控制，已成为量子测控系统的关键目标。随着量子比特数量的迅速增长，测控系统需要提供大量的通道，并确保信号精确同步和低噪声。

目前主要形成两种策略：一是构建超高密度、一体化的测控平台，通过模块化机箱扩展通道；二是采用分布式控制架构，通过网络协同多个控制器管理不同区域比特。无论哪种方式，核心挑战依然是实现纳秒级同步和实时反馈。多个控制模块必须精确对齐触发并在亚微秒内响应量子态变化，支持实时算法。为此，测控技术在高速背板同步总线、FPGA并行架构、低延迟反馈算法等方面持续创新，以确保系统在更高比特数下的稳定性和可扩展性。

KEYSIGHT TECHNOLOGIES

Keysight 向日本AIST的G-QuAT中心交付了全球首个千比特级商业量子控制系统，支持控制1000多个超导量子比特。经测试，该系统在噪声、时间对齐、相位一致性等方面都满足严格要求，成为首个证明可扩展至千比特的商用测控平台。AIST专家评价其实现了复杂多通道信号的精确同步与读出，使大规模比特操控成为可能。

中电信量子集团 CHINA TELECOM QUANTUM GROUP

国盾量子 QuantumCTek

中电信量子集团联合国盾量子于2025年中完成ez-QEngine2.0测控系统的交付，这是面向千比特超导量子机设计的国产平台。该系统硬件集成度较上一代提升10倍，每台机箱最高支持128个数据比特和256个耦合比特，通过8台机箱即可支持上千比特同步操控。在保持指标国际先进的同时，单比特控制成本降至国外同类产品的一半以下，使大规模量子系统部署更为经济。

中微达信发布了新一代ZW-QCS580常温测控系统，具备单次触发多次测量和复杂快速反馈控制能力；实测表明其在量子比特状态异常发生后300ns内即可响应并完成纠错，从而有效保护脆弱的量子计算过程。该系统已为用户提供累计上千通道服务，覆盖中国国内大部分量子计算科研机构，加速了量子技术的工程化进程。

在架构创新方面，中国国防科大等提出了Distributed-HISQ分布式量子控制方案，引入基于预约的指令同步协议（BISP），让多个FPGA控制器提前协调时间表，实现同步点零延迟触发；同时设计通用硬件指令集HISQ，将量子操作抽象为时间点-端口-码字形式，方便不同硬件适配。这种架构在实验中将多控制器程序执行时间平均缩短了22.8%，量子门错误率降低5倍，展现出优秀的扩展潜力。

综上，2025年的成果表明，无论是单机柜千通道集成还是多控制器协同，超导量子技术路线已初步攻克了千比特测控的关键技术瓶颈；配合亚微秒级反馈能力，这为实现量子纠错和更大规模量子计算打下了必要基础。

离子阱、中性原子测控系统：光学链路的集成化、互联化与高速调制

离子阱和中性原子等平台的核心操控依赖激光：需要把不同波长、不同功率与不同调制方式的光稳定地送到每个量子比特，并在运行中保持相位、频率与指向的稳定。早期系统主要基于光学台搭建自由空间光路，特点是可快速迭代，但对准复杂、漂移敏感、扩展时需要大量光学元件与人工维护。随着比特规模提升，测控系统的矛盾集中到三点：

› 光路分发与寻址的扩展性：通道数增加后，光学元件数量与对准工作量呈非线性增长；

› 高速、并行调制能力：阵列比特需要在微秒甚至更快的尺度上完成束形更新与并行寻址；

› 读出与互联的工程约束：尤其在低温平台中，走线、热负载与带宽成为系统瓶颈。

传统的离子阱和中性原子量子计算系统依赖大量的透镜和反射镜，将激光精确引导至每个量子比特。这种自由空间光学系统的稳定性有限，且难以进行大规模扩展。为了解决这一问题，研究者们正在将光学元件集成到芯片上，通过波导将光直接送到量子比特附近，构建更加紧凑且稳定的测控系统。芯片级光子学技术能够显著减少光路对准和漂移误差，同时也能并行地控制更多的量子比特，从而实现系统的模块化扩展。各国的研究团队纷纷探索在量子芯片上集成波导、分束器和相位调制器等器件，以替代传统体积庞大的光学系统。

Quora

AMO

德国启动了SmaraQ项目，由QUDORA、AMO等机构合作，在离子阱芯片上集成紫外波导。SmaraQ以铝镓材料的纳米波导取代上百个独立元件，将紫外激光lithography式刻入芯片，实现对离子量子比特的精确寻址。研究人员在离子阱电极上直接集成AlN/Al_2O_3波导，使激光以纳米尺度精度送达数十微米外的离子，从而大幅提升系统紧凑度和稳定性。

中国中科院精密测量院则提出利用二维光纤阵列来控制中性原子。在该架构中，每个原子被一根光纤提供的陷阱光和操控光同时作用，实现完全独立的单原子寻址，并利用共模抑制大幅降低光束指向噪声。实验展示了在二维阵列中捕获并控制10个原子，单比特门操作保真度达0.9966，且可对任意4个比特同时施加门操作，平均保真度仍达0.9961。这证明了光纤/波导架构在扩展原子量子比特数目上的可行性。

中性原子阵列作为量子计算领域备受关注的平台，在实现数百甚至上千原子的可控纠缠方面，光镊（光学阱）和光束调制技术起到了关键作用。随着量子计算系统规模的不断扩展，控制大规模原子阵列的精度和速度成为了一大挑战。为了提升阵列的相干性和控制能力，研究者们正优化光镊技术并引入新型调制器件，其中，“魔法波长”（magic wavelength）技术通过减少光学阱对原子内部能级的干扰，从而有效延长原子和分子态的相干时间；同时，传统的空间光调制器（如AOM和SLM）在速率和规模上存在瓶颈，而新兴的MEMS相位调制器则以其高速和高集成度的特点，成为大规模原子阵列快速寻址的关键。

这些进展使得原子阵列的控制精度和速度有了显著提升，为更加复杂的量子算法的实现打下了基础。

英国杜伦大学的研究团队在双原子分子体系中取得突破性成果——利用魔法波长光镊实现了长寿命的分子纠缠。通过选取特殊波长的镊光，他们使分子两个旋转能级受到的Stark位移相等，从环境噪声中隐形。实验生成的两个冷RbCs分子Bell态纠缠保真度达到0.924，经漏误差校正可提升至0.976。更令人瞩目的是，纠缠态相干寿命达秒级别，在0.5秒观测时内未见可测退相干。这是迄今分子体系最高保真的纠缠，并且证明通过魔法波长抑制环境扰动可以将分子的量子操纵稳定性提高一个数量级。该成果展示了在更复杂的分子量子比特上实现高精度操控的可能，为将来开发基于分子的新型量子计算和传感器铺平道路。

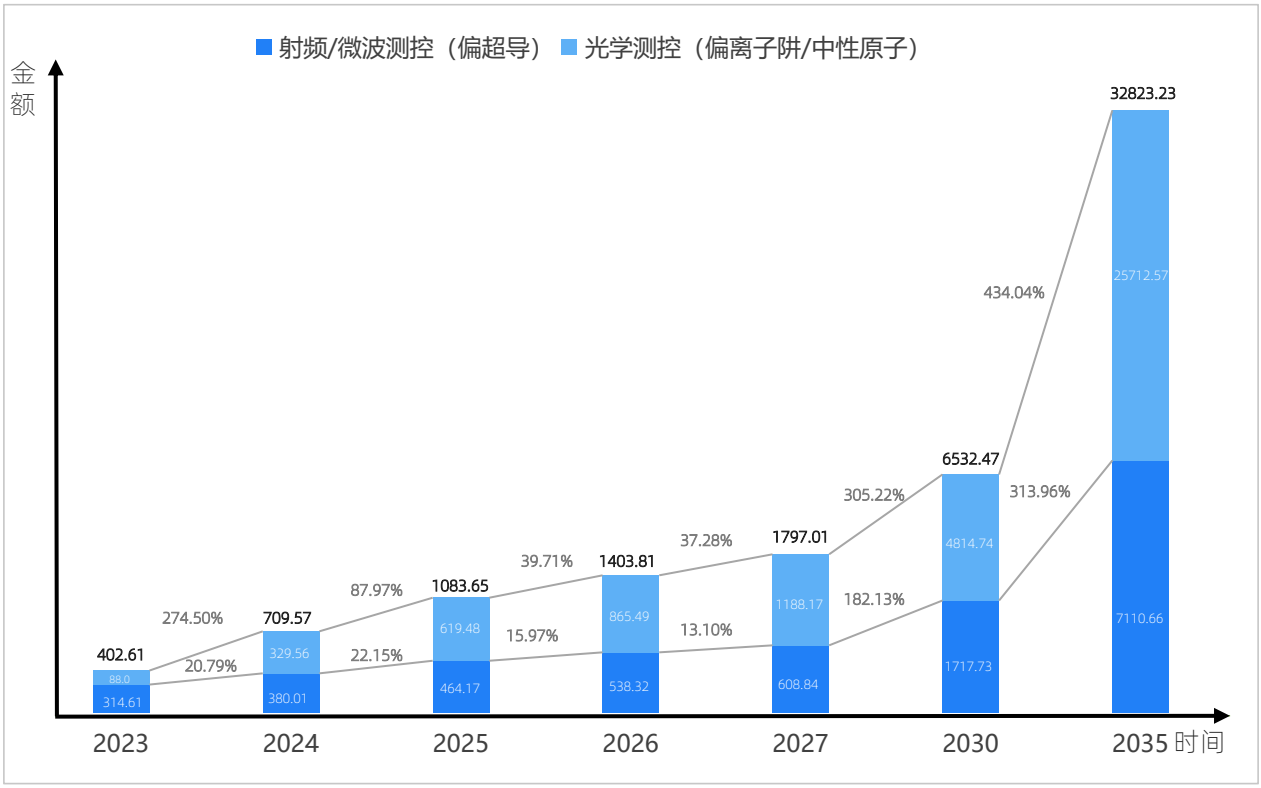
在光束调控方面，美国Infleqtion公司携手Silicon Light Machines（SLM）推出了MEMS位移相位调制器（DPM）用于原子阵列。这种硅锗MEMS阵列在CMOS驱动下工作，具有32×256个独立相位调制单元，可实现250kHz刷新率（帧周期仅4微秒）。相比传统AOM的行扫描方式，DPM能够在微秒内更新整个二维相位图案，使光束指向切换时间接近原子门操作时间尺度（~100ns）。这意味着阵列中各原子的逐个寻址切换几乎不再增加额外时延，可极大提高量子门并行执行的速度，减少算法的总运行时间。Infleqtion计划将该调制器集成到其中性原子量子计算系统中，以突破当前单光束控制速度的瓶颈，从而支持更大规模的原子并行操纵。

在测控系统中，读出探测技术和光子源的进展是密切相关的。随着量子比特数目的增加，对光子探测的要求也愈加严格。传统的探测系统可能面临的挑战包括高计数率、广泛的动态范围以及更高的信噪比需求。为了满足这些要求，探测技术正从单像素探测器向多像素阵列发展，同时通过创新电路设计解决多光子事件的解析问题。多像素探测阵列使得量子系统能够同时探测多个光子，并准确区分它们的到达时间和数量，这对量子态的高效测量至关重要。

中科院上海微系统所（SIM）研发出一款超导纳米线双光子符合计数器。研究者设计了特殊的两端口SNSPD读出电路，引入组合时间逻辑与振幅复用的方案，将16个像素的探测阵列输出组合。该器件能够同时解析16像素中任意两个像素发生光子计数的情况。在实验中，所有可能的单光子和双光子事件（总计152种组合）均被成功区分。相较传统多像素同时触发时无法分辨是哪几个像素有光子的难题，这一方案通过信号延迟编码和幅值编码，将组合事件一一对应映射为独特的电信号，从而彻底解决了多光子定位的挑战。这对于未来在大规模光量子芯片上实现高通量并行读出具有重大意义，可应用于量子成像、光子测量等需要辨别多光子事件的场景。

从产业规模看，光学测控（离子阱/中性原子）与射频微波测控（超导）在中长期呈现出明显分化。2025年两者规模接近，光学测控约为6.19亿美元，超导测控为4.64亿美元；到2030年，光学测控增至48.14亿美元，超导测控为17.17亿美元。整体上，光学测控扩张更快、体量更大，2030年约为超导测控的3倍。造成差异的主要原因在于：离子阱/中性原子系统扩容往往需要同步增加多波长激光链路、光束分发与调制器件、光纤与准直组件，以及相应的稳定与标定环节，新增投入更容易随通道数和波长数直接增加；而超导测控的扩展更多依靠电子测控平台提升通道密度并迭代系统能力，软硬件更容易形成标准化与复用，扩容对整体投入的推升相对平缓，但在更大规模下对实时反馈计算与自动化校准的依赖增强，因此仍保持持续增长。

图表 量子计算测控系统市场规模（单位：百万美元）



iCV TA&K | 2026.2

05 光学与激光器件：稳定光场、时频基准与量子光源小型化

如果将测控系统看作“链路与接口”，那么光源与激光器件则承担着“供给与基准”的角色。量子计算系统中的光源和激光器为量子比特提供了必要的激发和控制信号，因此，它们的性能对整个系统的稳定性和可扩展性至关重要。

对于中性原子、离子阱技术路线，激光器的线宽、频率噪声、强度噪声和长期漂移直接影响到量子门操作的精度。量子比特在操作过程中依赖激光脉冲的精确控制，其中，线宽越窄，激光频率的稳定性越高，量子门操作的保真度就越高。此外，频率噪声和强度噪声会导致量子比特的误操作，进而影响量子计算的精度。长期漂移则会导致量子比特随时间的变化而失去控制，这对量子计算的长期稳定性构成挑战。

对于光量子技术路线，片上光源和纠缠源的稳定性、可校准性和对工艺波动的适应性决定了系统是否能从实验阶段转向实际应用。在光量子计算中，光子源用于生成量子比特，并通过纠缠生成量子态。而片上光源通过集成光子学技术使得光源更加紧凑，减少了传统光学设备的体积和复杂度，具有更高的稳定性和可重复性。对于纠缠源而言，能够在光子芯片上实现高效、稳定的纠缠制备，确保光子比特间的纠缠质量，是实现大规模量子计算和量子通信的基础。同时，光源和纠缠源必须能够抵抗生产工艺的波动，确保在大规模生产过程中依然能提供可靠的性能。

在此基础上，光源和激光器的稳定性不仅决定了量子计算机的操作精度，还直接影响到系统的扩展性和可实现的比特数量。随着技术的发展，这些组件的精确控制能力变得尤为重要，它们需要满足量子计算系统中对低噪声、高稳定性以及大规模集成的要求。

窄线宽高稳定激光走向更高功率与更强长期稳定性

随着比特数的增加，单台激光需要在“足够稳定”和“足够强”的基础上，还能在更长的时间尺度上保持一致性。常见的工程挑战包括：功率放大引起的噪声上升、锁频系统对环境的敏感性以及高维护成本等。近年来的代表性进展在于：实现高功率和低噪声的平衡，并在更加复杂的环境下验证其稳定性。

光腾激光团队研制推出LAPIS系列高性能窄线宽半导体激光器及核心模组，公司自建高可靠性半导体芯片封装产线，集成光束整形、温度调节、驱动控制和光纤耦合等功能，实现了从芯片封装到系统集成的全链条自主可控，以及量子行业场景所需求激光器的小型化、轻量化、高集成的设计。在满足量子计算客户需求体验上，其针对量子计算商用化开发的小型化半导体激光器为客户提供自定义尺寸与功能设计，单模块板卡级产品在量子计算系统中可即插即用，多模块配置可实现高功率，满足量子计算紧凑设计与光源功率自主可灵活配置的企业需求。

美国JILA团队研制出一台698nm高功率窄线宽钟激光器，最大输出功率达4W。该激光器将频率噪声抑制在kHz量级频带内，并实现3.5x10-17的长期稳定度。凭借这一超静激光，他们在光学钟实验中同时驱动了3000个原子量子比特，仍取得了平均单比特门保真度0.99964的纪录。这是迄今大规模光学比特中最高的门操控精度。

英国Covesion公司开发了坚固锁频激光系统，并在海上冷原子惯导试验中成功验证。他们提供的锁频激光器在三米海浪和50mph阵风条件下依然保持频率稳定，用于冷原子干涉仪的制冷和探测光，性能几乎无衰减。这证明新型锁频激光器可以经受严苛环境考验，为将量子传感和测控系统部署到移动平台乃至空间提供了可能。

微梳与光频分频推动时频基准的小型化与系统化分发

对于多通道量子系统，时频基准不仅仅是单一激光的性能指标，而是如何管理多个激光源、多种波长和多个通道之间的一致性。激光的稳定性和精度在这里起到了至关重要的作用。随着量子计算向大规模系统发展，如何保持不同激光源之间的协调一致，成为了系统设计的一个关键挑战。

微梳技术和光频分频技术的进展，提供了一种解决方案。这些技术可以将高频光学参考信号转换为可用的微波或射频参考，帮助确保多个量子比特的操作能够同步进行。同时，这些技术正在向集成化和小型化方向发展，使得这些系统可以更加紧凑，减少复杂性，并实现更高的性能。

通过微梳和光频分频的集成，量子系统能够更加高效地管理时频基准，同时降低了对庞大设备和外部光学基准链路的依赖。这种发展不仅提升了量子比特操作的稳定性和精确度，也为大规模量子计算系统的扩展和集成奠定了基础。

普渡大学等演示了一种Vernier双微梳方案，可将871nm处的连续激光频率准确分频至~235MHz的射频信号。这一片上平台由两个SiN微谐振器组成：一个产生全光谱的宽频梳，另一个作为游标微梳，用于选取适当梳齿进行频率合成。该方案成功实现了对镱离子光钟参考光的光频分频（OFD），且由于双梳设计灵活选取频率组合，无需依赖复杂光学腔即可完成f-2f自参考。

这一进展对量子计算具有重要意义，871nm正好对应镱离子（171Yb+)）量子计算中关键能级跃迁的倍频波段。通过提供极低相位噪声的频率基准，该系统能显著提升量子比特的相干时间和逻辑门保真度。此外，该平台的片上集成特性解决了离子阱量子计算机规模化扩展中的“激光资源瓶颈”，为实现单芯片集成化量子处理器提供了关键的时钟与频率控制基础。研究人员指出，该系统未来可与片上离子阱结合，实现芯片级光学原子钟，有望用于高稳定度的移动时频基准及便携式量子计算系统。

量子光源：从实验室演示到稳定输出与便于部署

量子光源技术在近年来经历了两大主要发展方向：一方面，片上光源和多模光源正在发展，重点是将复杂的量子态制备过程集成到单一芯片上，以实现更高效的控制和操作。另一方面，单光子源的产品化正在推进，目标是提供稳定的输出、标准化接口，并降低实际部署的复杂度。这两种技术方向分别满足了量子科研和工程部署的不同需求，最终的目标是将量子光源从实验室演示阶段转向可稳定、高效的系统化输出。

在量子光源方面，北京大学等利用集成光学芯片上的量子微梳，确定性地产生了连续变量八模纠缠光场。这是全球首次在片上实现多模光子纠缠簇态，填补了集成光子芯片在大规模纠缠制备上的空白。这一成果标志着基于芯片的光量子计算和网络有了坚实的硬件基础，可用于构建可扩展的量子光源阵列和量子网络节点。

在单光子源领域，丹麦Sparrow Quantum公司推出了名为Sparrow Nest的即插即用单光子源系统。该系统基于Sparrow Core芯片（一种高性能量子点单光子源），能够在机架式盒子中产生高纯度、不可区分且高效率的单光子流。Sparrow Nest提供标准光纤接口，用户无需搭建复杂的光路，即可将单光子源接入量子计算、量子通信或科研实验中。其Photon纯度、干涉不可区分性等指标达到业界领先水平，满足量子干涉和纠缠实验的严格要求。这一商业化产品的发布，将单光子获取的门槛大大降低，有望加速各大实验室和超算中心部署量子光学试验，为探索光量子计算和量子网络提供便利。同时，这也标志着欧洲在量子光子供应链方面迈出关键一步，通过产业化确保关键器件的自主可控和易获取。



04

量子计算硬件进展

目录

04
量子计算硬件进展

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

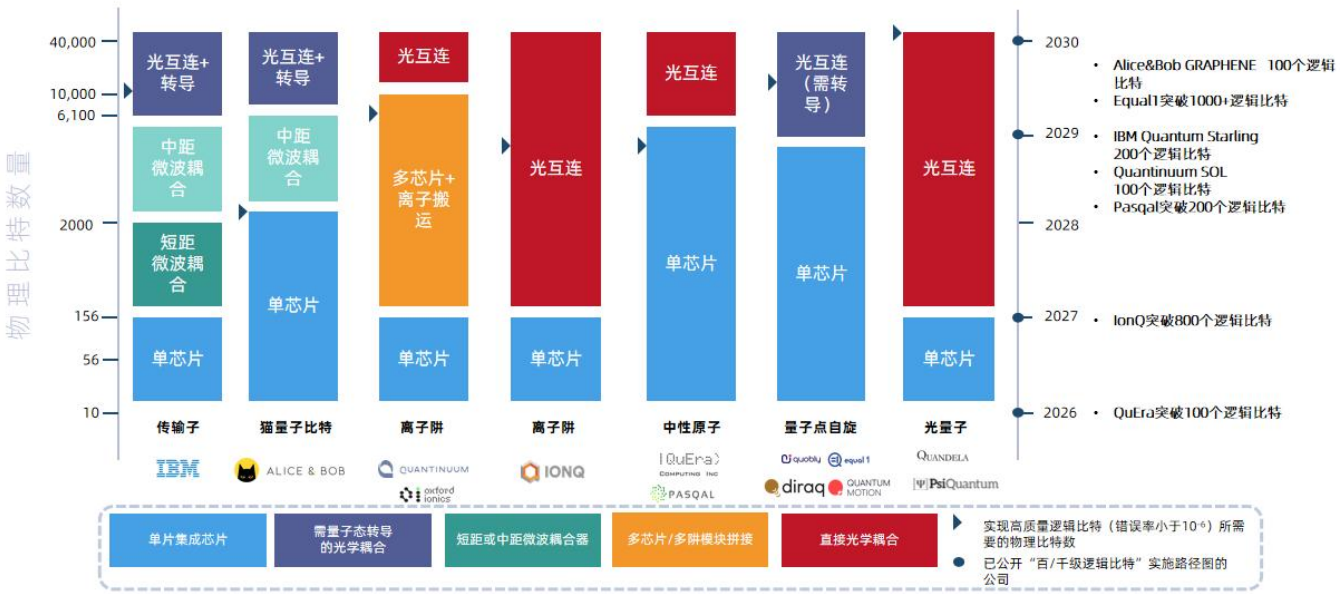
06 其他量子计算路线

量子计算硬件进展

2025年量子计算硬件的发展主线出现了清晰的评价体系迁移：行业不再将物理量子比特数量和单器件相干指标作为唯一核心指标，而是转向以纠错闭环能力、逻辑纠错增益、系统级可扩展性与可制造性为共同约束来推进。

各技术路线在同一年呈现出不同的工程化演化阶段：超导路线以表面码、玻色编码与硬件解码等为抓手，将量子纠错从原理展示推进到真实噪声与缺陷条件下的系统能力验证，并同步在连通性、统一控制与晶圆级制造上补齐扩展瓶颈；离子阱路线在高保真操控基础上率先完成纠错保护下的通用逻辑运算演示，将从物理比特到容错计算的闭环在实验上走通；中性原子路线以无缺陷阵列与连续运行能力为底座，把纠错从存在性证明推进到可持续优化与低开销容错架构探索；光子路线在模块化、网络化架构与连续变量/GKP编码上形成高度收敛的技术主线，但对损耗与良率的工程约束更为敏感；半导体自旋路线在温区、读出与CMOS兼容性上快速补课，进入为规模化重构底层架构的关键阶段。总体而言，2025年硬件进展的共同特征是：把容错的关键矛盾前移到硬件与系统工程层面，用可复现实验与可迁移工艺路径来验证路线的长期可扩展性。

图表 量子计算各技术路线扩展路径和里程碑



iCV TA&K | 2026.2

01 超导量子计算：纠错驱动，迈入早期容错时代

2025年，超导量子计算继续领跑，率先进入早期容错阶段。增加物理比特数量不再只是规模堆叠，而是能够通过纠错编码换来计算精度的指数提升，而非噪声累积。美中两国团队在量子纠错赛道上形成双寡头领跑格局。

从原理到工程：量子纠错在真实硬件上落地生效

超导体系的量子纠错实现了从理论可行到硬件工程实效的跨越。行业关注焦点从物理比特数转向逻辑纠错增益。今年多项突破解决了实际硬件中的非理想因素，使纠错从数学协议变成可长期稳定运行的系统能力：

亚马逊网络服务公司（AWS）联合多所高校，验证了级联玻色子量子比特在量子纠错中的资源效率优势。该方案通过玻色编码与级联结构，在显著减少物理量子比特数量的情况下，实现了更高效的逻辑纠错效果。

在谷歌willow实现低于纠错阈值的量子纠错后，差不多一年的时间，中国科大团队联合国盾量子等科研团队基于107比特祖冲之3.2号量子处理器，结合全微波量子态泄漏抑制架构，实现了码距为7的表面码逻辑比特，逻辑错误率随码距增加显著下降，错误抑制因子达到1.4。这表明，中国的量子纠错在纠错阈值之下，实现了越纠越对，为更先进的量子纠错实现铺平了道路。

耶鲁大学等团队实现超越盈亏平衡点的逻辑纠错。在超导体系中利用GKP玻色子码实现了纠错逻辑量子三元组和四元组，纠错增益分别达到1.82和1.87。这一里程碑标志着未来量子计算机可能通过高维量子系统实现更高效的硬件架构和容错计算。

Google团队在Willow处理器上演示三种动态表面码（六边形晶格表面码、行走表面码、iSWAP表面码）实现。研究团队展示了软件定义的动态表面码纠错架构，使纠错编码结构能够在运行过程中根据噪声情况动态调整，打破传统静态表面码的硬件限制。为超导、中性原子等不同体系的量子处理器提供了定制化纠错路径。

riverlane公司发布Collision Clustering硬件解码器。推出基于FPGA/ASIC的实时解码技术，在支持超过1,000个量子比特规模的同时，实现了兆赫兹级的解码速度，符合超导量子比特等快速操作模式的要求。

算法验证逻辑性能，越算越准成为新评判标准

超导量子计算正在从比拼器件参数转向系统级性能验证。今年的工作表明，逻辑量子比特的效果可以在扩展规模的过程中逐步摆脱物理噪声的限制，证明量子纠错确实能带来指数级的计算精度提升。这种转变下，算法基准测试和物理模拟优越性取代单纯的比特数量，成为衡量系统容错潜力和商业价值的核心：

Google利用量子回声算法测量了所谓的OTOC（Out-of-Time-Order Correlators），这是一种能够敏锐捕捉量子混沌和信息置乱的物理量。通过这一算法，Willow不仅展示了其在模拟复杂物理系统（如核磁共振NMR）方面的能力，更重要的是验证了系统在规模扩展时，其逻辑性能与物理噪声的去关联化能力。这表明，Google的解耦策略更侧重于通过算法基准来验证和优化逻辑比特的稳定性。

浙江大学与哈佛大学等团队利用随机测量工具箱，在超导处理器上直接测量了谱形状因子（SFF），用以探测多体量子混沌的普适信号。这种通过探测能谱和本征态关联来识别混沌相与局域相的方法，展示了量子处理器作为研究复杂物理规律工具的成熟度，而不仅仅是执行简单的逻辑门。

Q-CTRL在超导硬件上演示了利用错误检测增强长程纠缠生成的协议，在多达75个量子比特上生成了具有真多体纠缠的GHZ态。这种通过算法层面的硬件感知优化，证明了即便在逻辑编码尚未完全成熟时，利用算法辅助也能获得实质性的计算增益。

扩展瓶颈转向连通性与控制复杂度，长程门和统一控制崭露头角

随着超导芯片的物理比特规模迈向百位、千位，比特间连通性受限和控制线复杂度成为系统扩展的新瓶颈。2025年出现了一批解决方案，旨在在不显著增加误差的情况下提高互连范围，并简化控制架构：

IBM通过测量辅助的方式，实现了芯片上相距较远的超导量子比特之间的高效纠缠连接，且操作深度不随距离增加，为突破平面超导架构的连通性限制提供了新路径。

北京量子信息科学研究院、合肥国家实验室、中国科学院物理研究所、清华大学等。团队基于统一控制方案的任意两比特门高效实现。相关团队在超导量子处理器上实验演示了一种统一且通用的两比特门控制方案，仅通过交换相互作用和量子比特驱动即可生成任意两比特门。该方案实现了平均99.38%的两比特门保真度，并成功制备B门和多体纠缠态，显著降低了算法到硬件映射的复杂度。

超导硬件由实验室器件向可制造、可扩展系统演进

超导量子芯片从实验室定制迈向工业级量产：在保持高相干性能的同时，开始采用标准半导体工艺的大规模生产和封装，从而支持百比特以上系统：

IBM转向300毫米晶圆制造工艺。宣布全面转向300毫米晶圆设施生产，通过提高结的一致性实现芯片复杂度十倍提升，并推出Loon处理器利用跨芯片耦合器实现规模扩展。

RIKEN与Fujitsu合作研发256比特超导量子计算机。采用创新的3D可扩展架构，通过4比特单元的立体配置实现高密度集成，验证了百比特级系统在稀释制冷机内提高安装强度的工程可行性。

多能级体系与新型量子态被主动纳入超导路线能力版图

超导路线不再局限于简单的二能级比特，而是主动将多能级体系（qudits）和复杂拓扑量子态纳入能力版图，以提高计算效率和稳健性：

智利圣地亚哥大学研究团队将数字化反绝热量子计算范式拓展至高维系统，特别针对二次型优化问题中的量子三态（qutrit）求解质量最高可提升90倍，验证了高维系统在复杂问题编码上的独特潜力。

浙江大学等研究团队在100个可编程超导量子比特阵列中观察到一种由涌现对称性保护的拓扑边缘模式。通过预热化（Prethermalization）机制，实验成功抑制了边缘模式与体激发之间的相互作用，使其在整个能谱中持续存在。该团队利用该机制制备了即使在有限温度下仍具备持久相干性的逻辑贝尔态，展示了在无序自由系统中构建鲁棒边界量子比特的路径。

德国于利希研究中心针对多能级系统（qudit）高能级相干性退化快的痛点，于利希研究中心（PGI-8）提出了一种阶梯门（Laddergates）通用脉冲构造方法。该方案在所有能级间实现了统一的相干误差标度，达到了接近量子速度极限的10–4误差水平。这一突破显著提升了多能级控制的可扩展性，解决了qudit架构迈向实用化的核心控制瓶颈。

南加州大学研究团队基于Heisenberg-Weyl群开发了适用于高维系统的动态解耦（DD）协议。通过在超导处理器上对三维（d=3）和四维（d=4）量子比特执行DD序列，成功将其与热浴诱导的退相干及有害的跨克尔（Cross-Kerr）耦合解耦。这一成果显著提升了时间演化过程中高维贝尔态的保真度，证明了DD技术在实现基于高维比特的可扩展计算中的实用价值。

超导量子计算在2025年通过量子纠错驱动实现了质的飞跃。从逻辑比特性能越纠越好，到硬件架构越造越大，再到计算资源越用越丰富，这一系列突破牢固确立了其在早期容错时代的领先地位。接下来，其竞争力将取决于逻辑纠错增益能否随着码距持续提升、互连与控制复杂度能否保持可管理、以及300mm制造和异质集成能否实现良率优势。

可扩展架构确立，剑指容错计算

超导量子计算领域正式从单纯追求物理比特数量的线性增长，转向以提升逻辑比特质量为核心的架构重塑期。行业技术路线呈现出显著的分化趋势：巨头们不再单一遵循传统的二维表面码扩展模式，而是根据各自对纠错理论（如qLDPC、玻色编码）的全新理解，在硬件拓扑与底层架构上进行了根本性的革新，形成了多条通往容错计算的差异化路径。

›基于方形晶格与多级耦合的高效容错架构

IBM在2025年调整了其硬件扩展逻辑，确立了以连通效率换取纠错低开销的架构路径。在物理层，新推出的Nighthawk处理器摒弃了以往的重六边形结构，转而采用连接度更高的方形晶格（SquareLattice）布局，将每个量子比特的物理连接数提升至4，使得有效电路深度相比前代Heron处理器提升了约16倍。为突破最近邻连接的限制，IBM在Loon处理器中引入了c-耦合器（c-couplers）技术，在芯片内部实现了长程连接，从而在硬件上直接支持量子低密度奇偶校验码（qLDPC）即双变量自行车码的运行。这种架构设计显著降低了纠错冗余，实现了仅需288个物理比特即可构建12个逻辑比特的高效编码（相比表面码降低约10倍开销）。此外，配合用于跨芯片模块化互连的l-耦合器（l-couplers），共同明确了通往2029年Starling大规模容错系统的工程路径。

Google Quantum AI

›二维方格架构与单片扩展的物理极限挑战

Google发布的Willow处理器（105量子比特）坚定地验证了基于二维方格网格（SquareGrid）与表面码的架构路径。该体系并未采用行业日益主流的分布式模块化互联方案，而是坚持通过高质量物理比特换取逻辑质量的单片扩展逻辑。在物理架构上，Willow采用结构均一的超导Transmon量子比特构建标准二维阵列，通过将相干时间（T1）提升至100微秒级并优化控制保真度，成功将物理错误率压制在纠错阈值之下，实验证明了随着码距增加，逻辑错误率呈指数级下降。然而，这种依靠在单芯片上不断扩大阵列规模（Patch Size）的策略也潜藏着远期风险：与模块化架构相比，单一大芯片在迈向万级物理比特时，其物理尺寸将显著膨胀。这不仅对晶圆级制造的均匀性与良率提出了极限要求，也对稀释制冷机的冷盘空间与布线密度构成了严峻挑战，其在超大规模下的工程可扩展性仍需通过后续的工艺突破来证明。

aws

›基于异构物理特性的高资源效率架构

AWS推出的Ocelot芯片确立了一种以硬件资源效率为核心的扩展路径，旨在通过底层物理架构的异构化创新，用最少的物理资源构建高质量逻辑单元。该架构的基础单元是高度依赖高质量钽薄膜工艺制造的猫量子比特，利用振荡器中光子数量（模拟能量）的物理特性天然抑制位翻转错误，从而避免了传统架构中为应对所有错误类型而消耗的大量硬件资源。这种物理层面的免疫特性使得复杂的二维纠错网格简化为一维线性链条，仅需辅助Transmon比特专注于处理相位翻转。这种混合架构虽然展现了极高的编码效率，但其大规模扩展仍面临未知的物理屏障：由于猫态维持需要连续微波驱动且谐振器物理尺寸较大，系统面临的热负载与集成密度挑战远高于传统架构。因此，亚马逊目前尚未披露迈向千级或万级比特的具体阵列方案，其下一步或将聚焦于解决异构模块间的高保真度互连与热管理难题。



>垂直互连打破二维布线瓶颈

独立芯片制造商Quant Ware致力于解决通用布线瓶颈，推出了VIO垂直互连架构，支撑了单芯片集成超过10,000个量子比特。这种3D封装架构使得I/O接口密度与芯片面积成正比，而不再受限于周长。该技术改变了传统从芯片边缘引线的平面扇出方式，采用类似于半导体TSV（硅通孔）的工艺，允许控制信号线从芯片背面直接垂直穿透连接至量子比特。

02 离子阱量子计算：操控最优，容错领先却扩展受限

2025年，离子阱量子计算在保持极高操控精度的同时，首次在实验上实现了完整容错逻辑运算，成为最早构建从物理比特到容错计算闭环的技术路线之一。

微波驱动与全电子控制

芯片化陷阱的新范式为了摆脱对大规模激光系统的依赖，2025年的研究重点转向了微波驱动和全电子控制的芯片化陷阱（Microwave Chip Traps），这被视为离子阱实现大规模集成的关键路径：

牛津大学研究团队利用囚禁钙离子（Ca^+）的超精细“时钟”态，结合高稳定性的全电子微波控制技术，展示了对量子比特的极致精准操控。他们在室温且无磁屏蔽的实验条件下，实现了仅为0.000015%的单比特门误差率，即每670万次操作才发生一次错误，将现有精度纪录提升了近一个数量级。这一成果证明了微波电子控制方案在无需昂贵激光系统的情况下也能达到甚至超越光学方案的顶尖性能，为构建实用化容错量子计算机扫清了关键障碍。

微波电子驱动与集成优势：该团队采用微波信号替代传统激光进行量子态操控，这种电子驱动方式不仅从根本上消除了光束指向抖动带来的误差，还显著降低了硬件成本与体积，极大地提升了系统在芯片层面的集成度与扩展性。

环境鲁棒性与纠错效率：实验在室温及无磁屏蔽环境下取得突破，验证了该方案卓越的抗干扰能力。如此低的物理误差率意味着实现逻辑量子比特所需的物理比特冗余度将大幅降低，从而显著减少了未来大规模量子计算系统的纠错开销与资源需求。

极致操控

99.99%双量子门保真度与无需基态冷却在门操作精度方面，2025年离子阱刷新了多项行业纪录，特别是通过新的控制技术降低了对环境的严苛要求

IonQ通过其专有的电子量子比特控制技术，在离子阱平台上实现了全球领先水平的双量子比特门性能，保真度超过99.99%，显著降低了复杂量子算法执行过程中的错误率，为未来大规模离子阱系统奠定了高精度操控基础。

IonQ与澳大利亚国立大学合作，展示了一种新型的高速混合种类（mixed-species）量子逻辑门，实现了数量级的物理门速度提升，这对于需要辅助离子进行协同冷却和测量的复杂算法至关重要。

德国于利希研究中心等团队展示强驱动下Mølmer-Sørensen门的修正公式。针对强驱动场条件下MS门出现的非理想动力学行为，研究团队提出了修正理论公式，对门操作过程中的误差来源进行了系统分析，为在高驱动强度下维持高纠缠门保真度提供了关键理论依据。

俄罗斯量子中心等实现载波补偿的快速Mølmer-Sørensen门。研究团队通过优化控制脉冲设计并引入载波补偿机制，实现了更快速的MS纠缠门操作，从而有助于在有限的相干时间内执行更多量子计算步骤，提高系统整体计算效率。

幺正量子与中科大郭光灿院士团队共同实现的光偏振梯度离子纠缠门。该研究创新性地利用光学马格努斯效应，通过紧聚焦的光流（光镊）为离子提供横向力，从而在离子之间创建量子纠缠。这种方案大大简化了传统的激光束配置，降低了操作复杂性，且可以与离子光镊架构兼容，极大提升了量子操作的效率和稳定性。成功地在镱离子阱中实现了高达98.7%的贝尔态保真度，并在四离子链中保持了超过97.2%的保真度，展现了极高的操作精度。

光互连与分布式计算

由于每个离子链的规模有限，离子阱系统必须走并行化和模块化的路线来扩展比特数。今年的研究重点包括减小串扰、提升并行操作，以及研制可通过光互连的模块化节点：

清华大学、华翊量子、合肥国家实验室等研究团队提出了一种基于双类型离子方案的多离子量子存储器，并将量子比特编码于无退相干子空间（双离子纠缠态），在纠正常主导的泄漏错误后实现了超过两小时的相干存储时间。该方案减轻了对超稳频率参考的依赖，并通过质量匹配的亚稳态存储离子与基态冷却离子设计，具备良好的可扩展性，有效克服了室温离子阱中离子随机位置跳变对量子存储稳定性的限制，为分布式量子计算与量子网络中的节点级量子存储提供了关键支撑。

奥地利因斯布鲁克大学研究团队实现了一个包含10个量子比特、并集成光子互连接口的囚禁离子寄存器，为模块化、分布式离子阱量子计算架构提供了重要的硬件示范。

新型编码与复杂多体物理模拟持续拓展离子阱应用边界

在推进容错计算的同时，离子阱平台也积极用于探索新型编码和复杂量子体系模拟，体现其高度可控的优势：

Quantinuum团队在其Helios离子阱量子计算机上模拟费米-哈伯德模型的不同参数区域，测量到了显著的超导配对关联，证明量子计算机能够可靠地生成并探测与超导性相关的多体物理态，为利用量子计算机研究强关联物理问题开辟了新路径。

Quantinuum与哈佛大学等研究三能级托里克码和囚禁离子中的帕拉费米子。研究团队在离子阱平台上探索了基于帕拉费米子的三能级托里克码拓扑编码方案，为在离子阱硬件上实现更高级别逻辑量子比特保护提供了新的思路。

离子阱量子计算在2025年稳扎稳打，精准操控的优势依旧无出其右：极高的门保真度和长相干时间使其成为首个完成容错运算闭环的体系。但与此同时，它的规模化瓶颈也愈发明显，需要通过并行冗余、模块网络等架构创新来突破。未来离子阱的看点在于：如何在保持高精度的同时，通过更多光-离子接口和更复杂离子排列，实现比特数量的指数扩张。

03 中性原子量子计算：光机电深度融合，筑基高保真门操作与规模化阵列

2025年是中性原子量子计算承前启后的关键一年。在2023年解决了原子阵列的捕获与重排，2024年实现了高精度里德堡激发之后，2025年的技术重心转向了提升阵列中门操作的保真度。为了解决这一难题，并为2026年更复杂的量子纠错码编码做铺垫，底层硬件出现了重要革新：通过引入光学腔和高数值孔径物镜技术，整个系统的发展不再仅限于增加比特数量，而是更加注重对原子的精准操控和信号的高效读取。

光学架构革新：光学腔阵列显微镜与增强连接

为了突破传统光镊阵列中原子间连接和读出速度的瓶颈，2025年研究人员开始将光学腔（Optical Cavity）深度集成到原子阵列中，这成为提升门操作保真度的关键一步：

斯坦福大学研究团队开发了“腔阵列显微镜”（Cavity Array Microscope）。这一创新装置通过在二维网格内为每个粒子分配独特的光学腔模式，利用腔内透镜替代传统纳米光子学手段，实现了对超过40个通道的同时高速、非破坏性读出。这一突破解决了以往原子共享单一全局模式的限制，极大地提升了系统的可寻址性和扩展性。

美国QuEra Computing等研究团队针对中性原子平台的物理特性，设计了一种专用的低资源开销横向容错架构，使得在更少物理量子比特条件下即可构建逻辑量子比特，显著降低了中性原子容错计算的工程门槛。

极致观测与控制：高性能物镜与独立寻址

为了追求高保真度门操作，对单原子的观测精度和控制能力提出了更高要求。先进的光学物镜系统和独立控制技术成为实现这一目标的基础：

美国Infleqtion等研究团队实现了对阵列中任意单个原子的独立光学控制和非破坏性状态读取，使中性原子平台具备了执行纠错循环和通用量子算法所需的核心操作能力。

中科酷原公司提出的一种无需专用波前传感器的像差校正方法，通过SLM分区测量与迭代重建，实现了光学镊子阵列的高效原位补偿。这一创新显著提升了阵列的均匀性与原子装载效率，降低了硬件要求并提高了计算效率，从而为量子计算提供了坚实的光学支持。这一方法不仅适用于量子计算，还可推广到显微、光刻等光学系统，展示出其重要的实用价值与广阔的应用前景。

规模化基座：超表面光镊与超大阵列生成

为了支撑未来大规模纠错码的编码需求，阵列生成的工程化能力在2025年也取得了突破性进展，超表面（Metasurface）技术开始取代传统光学器件：

哥伦比亚大学利用全息超表面生成的光镊阵列实现单锶原子捕获。该研究突破了传统光镊阵列的规模限制，实现了含36万个陷阱的超高密度阵列，较现有技术提升两个数量级，同时保持了优异的陷阱均匀性，为中性原子量子计算、量子模拟等领域的规模化应用扫清了关键障碍。

清华大学团队用单个超表面直接生成包含78,400个光镊阵列。研究团队发展出利用光学超表面直接投射大规模光镊阵列的新技术，使中性原子量子计算的比特数扩展不再受限于传统光镊生成能力，为未来更大规模纠错系统提供了关键工程手段。

中国科学技术大学等研究团队攻克了原子装载和重排过程中的关键技术瓶颈，成功构建了包含数千个原子的无缺陷完美阵列，为大规模并行纠错和容错量子计算奠定了坚实的硬件基础。

哈佛大学Mikhail Lukin教授领衔成功展示首个可连续运行的相干3000量子比特系统。该成果标志着中性原子量子计算从脉冲式实验向连续式工程化运行的重大转变，为执行长时间纠错循环、以及未来运行持续数天甚至数周的容错量子计算任务奠定了系统基础。

迈向容错的桥梁：从门操作优化到早期纠错

在掌握了高保真度门操作和先进光学控制的基础上，2025年的研究开始尝试将这些能力转化为早期的容错优势，为2026年的全面纠错码编码蓄力：

美国QuEra Computing等研究团队针对中性原子平台的物理特性，设计了一种专用的低资源开销横向容错架构，使得在更少物理量子比特条件下即可构建逻辑量子比特，显著降低了中性原子容错计算的工程门槛。

中国科学技术大学等研究团队通过引入预报存储机制，有效解决了原子阵列中纠缠连接成功率偏低的问题，实现了里德堡超原子之间的高质量纠缠，为可扩展纠错和并行操作提供了关键技术支撑。

中性原子量子计算在2025年实现了后发先至式的发展：一方面，它凭借先天的规模和并行优势，在纠错循环、低开销架构上后来居上，证明了越纠错越正确的趋势；另一方面，它的工程复杂度也前所未有地显现——需要将数千上万的原子精确驾驭，还要保持长时间稳定运行。未来该路线的关键在于：如何将光学、冷原子与电子控制深度融合，进一步提升纠错效率，同时逐步降低系统复杂度，实现规模和精准的双突破。

04 光量子计算：架构清晰，容错可期但挑战最大

2025年，光量子计算在总体架构和纠错路径上已经较为清晰，聚焦于模块化网络架构和连续变量（CV）/GKP抗错编码。今年首次出现了多模块互联的系统级样机，证明了在光子平台上实现通用与容错所需组件的可行性。然而，光量子路线要走向实用容错仍面临最高的工程难度：光学损耗、器件一致性和逻辑资源开销成为决定性瓶颈。

模块化、网络化体系初现，但复杂度与损耗积累

光量子技术的天然优势是室温工作、可通过光纤连接、易于模块化扩展。今年最标志性的进展是：首个由多个光量子芯片组成并通过光纤互连的量子计算原型问世。这被视为光量子计算从单芯片走向数据中心架构的开端：

XANADU

Xanadu研究团队构建了一个由35个光量子芯片组成的模块化量子计算系统，通过光纤互联将离散功能模块网络化集成。该系统包含84个压缩源和36个光子数分辨探测器，在每个时钟周期提供12个物理量子比特模式，并在跨芯片体系中生成了包含864亿模式的时空簇态，演示了距离为2的重复码以及实时解码能力。该工作验证了光量子计算在系统架构层面实现通用性与容错所需构件的可行性，同时也指出光学损耗是跨越容错阈值的主导瓶颈。

连续变量与GKP编码成为容错主线，但实验容错裕度极小

2025年，光量子计算在纠错与容错路径上高度收敛于连续变量（CV）体系与GKP抗错编码。围绕这一主线，研究工作补齐了从资源态生成、逻辑测量到通用逻辑门的关键能力，但该路线对实验条件的要求极为苛刻，使其工程冗余度显著低于离散比特体系。

北京大学、北京量子信息科学研究院、山西大学、合肥国家实验室在集成微梳中实现连续变量多部纠缠。研究团队在集成光学芯片上利用量子微梳确定性地产生连续变量八模纠缠态，验证了多模不可分性，并通过违反van Loock-Furusawa准则证明了跨数百MHz边带频率的多部纠缠结构。该成果展示了连续变量光子体系在片上生成簇态结构、支撑纠错与量子计算的潜力。

Xanadu团队成功将GKP抗错编码集成到光子芯片之中，实验验证了在集成光子平台上实现抗错量子比特的可行性，标志着光量子计算从理论容错方案迈向芯片级实现的重要一步。统提供了关键工程手段。此外Xanadu团队提出并实验验证了一种基于同调测量（Homodyne Measurement）的容错逻辑测量方案，用以应对光子损耗引入的误差问题，进一步完善了连续变量光量子计算中的容错操作链条。

悉尼大学研究团队在光子GKP编码体系中实现了完整的通用逻辑门操作，补齐了连续变量光量子计算在容错逻辑运算层面的关键能力，使基于GKP的光量子计算具备了执行通用算法的基本条件。

可制造与半导体兼容性显现，但尚未转化为系统良率优势

光量子计算被寄予厚望的一个原因是：其核心器件（光源、干涉仪、探测器）可以利用成熟的半导体工艺制造，有望继承电子工业的规模优势。今年多项工作展示了这种制造兼容性，但离真正的系统良率提升仍有距离：

PsiQuantum系统性展示了一套基于单片集成硅光子的量子计算模块，验证了高保真双轨量子比特制备与测量、独立光源间的高可见度Hong-Ou-Mandel干涉、高保真两比特融合操作以及芯片到芯片的量子互连，并提出多项下一代低损耗与高一致性器件方案。

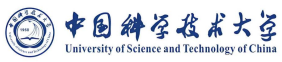


波士顿大学、加州大学伯克利分校展示电子-光子-量子集成芯片系统。研究团队首次利用标准45nm半导体工艺，将量子光源与稳定的电子控制电路集成在单一芯片之上，表明商业半导体代工体系具备构建可重复、可控量子光子系统的潜力。

需要指出的是，虽然制造上取得突破，但这些系统良率优势尚未在大规模量子机上体现。毕竟，当前光子逻辑层面的成败仍由每一束光子的损耗和干涉精度决定，而制造工艺只能减小但无法完全消除那些损耗。因此，光子计算的制造友好性更多是为将来铺路，短期内并不能立刻解决容错面临的阈值挑战。

量子存储突破瓶颈，但仍是光子短板

光量子具有易长距传播的优点，却难以驻留存储，这长期制约了光量子网络和纠错循环的实现。今年在光量子存储方面有一项引人注目的突破：



中国科学技术大学研究团队在集成光子芯片上实现了毫秒级量子存储时间（对光子而言属于极长时间尺度），有效缓解了光子体系中飞行易、存储难的关键瓶颈，为光量子网络和分布式量子计算提供了重要基础组件。

2025年光量子计算在方向正确和困难重重这两方面都达到了新高度。一方面，模块化多芯片系统和CV/GKP容错方案的成功，说明光子路线的理论框架已搭建完成，证明只要技术指标满足，光子计算完全可以实现容错和通用计算。但另一方面，正如Aurora系统揭示的那样，要实现那些所需指标，需要克服累积损耗和复杂度指数上升这两个硬仗。未来光子路线的突破点可能在于新型抗损耗技术、全新编码方法（如基于时间频率混合模式的编码）以及与成熟光通信产业的深度融合。如果这些难题能够逐一解决，光量子计算凭借其制造和网络优势，有望在更长远的规模上后来居上。

05 半导体量子计算：工程化起步，半导体元年开启

2025年被誉为半导体自旋量子计算的元年。今年该路线在降低运行温区、提高读出效率、验证CMOS兼容制造等方面取得重大进展，表明半导体量子比特正从实验室迈向工程实用。不过，目前整体仍处于架构重塑阶段：为了实现大规模扩展，半导体路线需要重新设计比特连接和控制方案，其通往容错计算的蓝图尚未完全闭环。

工作温区和读出条件显著放宽

过去，硅自旋量子比特通常需要在毫开尔文极低温下工作，一旦温度提高就难以保持相干。2025年多项成果打破了这一限制，使系统运行温区提高一个量级，同时实现快速高保真读出，大幅降低系统复杂度：

澳大利亚新南威尔士大学（UNSW）、Diraq和庆应义塾大学研究人员利用预示初始化和门集层析成像（GST）校准，将完整的双比特门保真度提升至99%以上。实验证明，即便在1.1K的温度下，系统依然能通过贝尔信号（S=2.731）打破贝尔不等式，确证了量子纠缠在高温硅量子点系统中的稳健性。

澳大利亚新南威尔士大学（UNSW）、硅量子计算有限公司（SQC）团队突破了自旋量子比特通常需要在低于1K条件下工作的限制，在3.5K的高温环境中实现了快速且高保真的单次电子自旋读取，为降低稀释制冷机复杂度和系统成本提供了关键技术支撑。

CMOS工艺兼容性验证，但系统良率尚待观察

半导体量子比特的一大潜在优势是可以利用现有半导体制造基础实现规模量产。2025年这一点开始从概念走向现实，但距离成规模产出高良率的量子芯片还有差距。

Equal1验证了利用现有成熟CMOS半导体制造工艺生产量子芯片的可行性，展示了半导体量子计算向大规模工业化制造演进的现实路径。

HRL发布了面向自旋量子比特的开源测控平台spin QICK，实现了固态自旋量子比特精准控制，降低了半导体量子点测控的研发门槛，推动了相关控制技术的标准化与社区化。

尽管这些进展证明半导体量子比特在制造和工具链上具备工业化潜力，但目前还没有证据显示能以高良率产出大型一致性芯片。例如，相比超导或光子芯片可以一片晶圆做出几十上百个量子处理器，硅自旋芯片由于需要单原子掺杂等工艺，良率和一致性尚存疑。因此，半导体路线真正的良率优势还有待后续更多晶圆实验数据来验证。

连接方式与操控架构重构，缓解高密度扩展瓶颈

与超导/原子不同，半导体自旋比特的一个挑战在于：在微纳米尺度上密集排列的上万个量子点如何实现有效互连和并行操控。2025年一些有益探索在这方面展开：

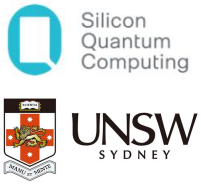
荷兰代尔夫特理工大学等团队提出无独立势垒门的半导体量子比特操控方案，显著简化了量子点栅极结构，减少控制线数量，为实现更高比特密度集成提供了新方案。

德国于利希研究中心等研究团队开发了电子自旋穿梭（Shuttling）技术，使电子能够在芯片上移动并传输量子信息，从而增强芯片内部的连接性与灵活性。

高保真模块和原子级阵列初现，但距容错闭环尚远

2025年，半导体路线在单比特和小规模多比特操作精度上取得显著进展，也开始出现模块化原型的苗头：

Intel首次将交叉熵基准测试（XEB）引入基于半导体技术的量子系统，实现了对两个纯交换量子比特的高效并行操作，为未来大规模半导体量子计算机的性能评估提供了新工具。



新南威尔士大学和硅量子计算有限公司团队在基于硅中磷原子的原子处理器平台上，实现了11个量子比特99.99%高保真度操作，标志着该路线从单点实验突破迈向模块化系统集成的新阶段，但其系统级纠错能力仍有待进一步验证。

2025年对半导体量子计算而言是关键的转折起点。一方面，首次有迹象表明它可以好用——在更宽松条件下运行、由现成工厂制造、用高水平控制手段达到容错所需精度。这些进展让人看到了半导体路线未来突飞猛进的希望。另一方面，目前它依然难用——宏观上还没有明确的容错架构路径，比特间的互连和并行仍是硬伤，需要进一步创新。可以预见，随着主流半导体公司（如Intel、三星等）加大投入，以及学界对新材料（如量子点调控材料、超导-半导体混合结构等）的探索，半导体量子计算有潜力复制经典半导体工业从实验室器件到海量芯片的奇迹。但在达到那一步之前，它还有许多基础性的工程难题需要攻克。

06 其他量子计算技术路线：各守一隅，前景诱人却高度不确定

除上述主流路线外，2025年一些非门型或新型物理载体的量子计算也取得了有趣进展。这些路线往往瞄准特定应用，如量子网络、专用模拟或天然抗噪等。尽管它们短期内不太可能直接与主流竞争通用量子计算规模，但每条路线都在其细分领域展示出诱人前景，同时也面临高度的不确定性。

固态色心（NV/SiV）自旋：定位量子网络与分布式计算节点

以金刚石氮空位(NV)和硅空位(SiV)为代表的固态自旋体系，2025年在量子网络节点方向取得显著进展。它们不追求单芯片上比特数量，而是强调超长相干时间、自旋-光子接口和多量子比特协同，以构建高性能的量子通信和网络节点：

哈佛大学、苏黎世联邦理工学院、波士顿大学、麻省理工学院与Lightsynq等研究团队利用纳米光子金刚石腔中的硅空位（SiV）色心，在双节点网络上演示了由单量子比特与双量子比特盲门构成的通用量子门组，并执行了带盲操作的分布式算法，首次在物质量子比特平台上实现通用盲量子计算，展示了该体系在安全分布式计算中的独特价值。

清华大学、合肥国家实验室、上海期智研究研究团队在单一节点内实现了电子自旋、核自旋与光量子比特的协同控制，并通过重复编码和实时反馈纠正比特翻转错误，在多轮纠错后显著提升了逻辑态与光子纠缠的保持能力，验证了构建具备纠错能力的量子网络中继节点的可行性。

阶段判断：金刚石色心路线已在量子网络节点层面形成清晰技术闭环，但其发展目标并不指向单体通用量子计算机，而更像未来模块化量子体系中的基础设施。

拓扑量子计算：物理实现与理论论证并进，工程化尚远

拓扑量子计算（例如利用马约拉纳零模的非阿贝尔任意子）以其天然抗噪特性被视为终极方案之一。2025年该方向在硬件演示和理论稳定性两个方面都有进展，但两者之间仍有明显的工程断层：

微软发布了首个基于马约拉纳费米子（Majoranafermions）的拓扑量子处理器，标志着拓扑量子比特首次在硬件层面得到实现，为天然抗噪声量子比特提供了现实物理载体。

美国加州理工学院等研究团队从理论上论证了非阿贝尔任意子在存在退相干条件下的稳定性，为拓扑量子计算的抗噪特性提供了更坚实的理论基础。

量子退火与模拟：特定问题上显优势，通用性有限

量子退火（例如D-Wave系统）和模拟专用机不同于门模型，它们瞄准特定类型的优化或物理问题。2025年这一领域首次在真实科学问题上展示了超过经典的能力：

D-Wave等合作团队实现超越经典计算的量子模拟。利用量子退火机模拟复杂磁性材料的相变过程，在特定物理模型中实现了经典计算难以企及的结果，验证了量子退火在材料科学研究中的实际应用价值。

量子退火和模拟器已经在专用量子模拟领域找到了清晰定位：解决特定类型的问题（优化、材料相变等）。但由于其计算模型不通用，无法执行任意算法，因此它们更适合作为量子计算生态的补充工具，而非主力。在通用量子计算机成熟之前，这些专用机可以先期为某些行业提供量子加速服务。

新奇载体探索：分子体系等验证物理可行性

除了上述路线，2025年还有一些探索全新量子载体的尝试，虽然处于非常初级阶段，但为未来提供了可能的惊喜方向：

英国杜伦大学等研究团队利用分子体系的多能级结构，实现了分子对之间的长时间纠缠保持，验证了分子作为量子信息载体的物理可行性。

新奇载体的探索仍非常超前，目前操控复杂度和可扩展性都不明确。但它们提醒我们，量子计算并不一定局限于几种主流方案，也许某天一种现在看似冷门的载体会带来革命性突破。因此，保持多样化探索对整个领域长期健康发展有益。

2025年的量子计算硬件进展呈现出更工程化的特征，各路线都在思考如何将理论上的容错能力落实到实际系统中。共同的体现是量子纠错不再只是软件层的协议，而是受制于硬件泄漏、制造缺陷、读出并行度、经典解码时延、互连深度乃至热噪声等多个因素的系统能力。因此，各路线开始从底层技术到系统架构全方位协同，确保扩展不引入不可控问题。

展望未来，各路线的竞争与协同将更加聚焦于三类硬指标：

1. 逻辑纠错增益-随着编码距离或系统规模的扩大，逻辑错误率能否持续指数级下降。如果哪条路线率先证明可稳定扩展到比如距离11、距离13且逻辑错误率不断降低，那将取得决定性领先。

2. 互连与控制复杂度-在扩展中保持可管理是容错的前提。解决方案包括长程门、模块互联、简化控制线、自动化校准等。如果某路线能实现上千比特仍可高效校准和操控，而无指数增长的串扰/噪声，那么它就掌握了规模化的钥匙。

3. 材料与工艺窗口-真正走向实用，需要找到一个可量产、可复现的工艺窗口。在这方面，光子和半导体路线具有天然优势（借力现有晶圆厂），但前提是它们得证明量产件性能不输实验室器件。超导和原子路线则需逐渐把器件制造标准化，让良率和一致性提升一个量级。



05

软件、算法与量子+AI

目录

05
软件、算法与量子+AI

01 量子计算软件体系

02 量子计算算法

03 量子纠错与缓错技术

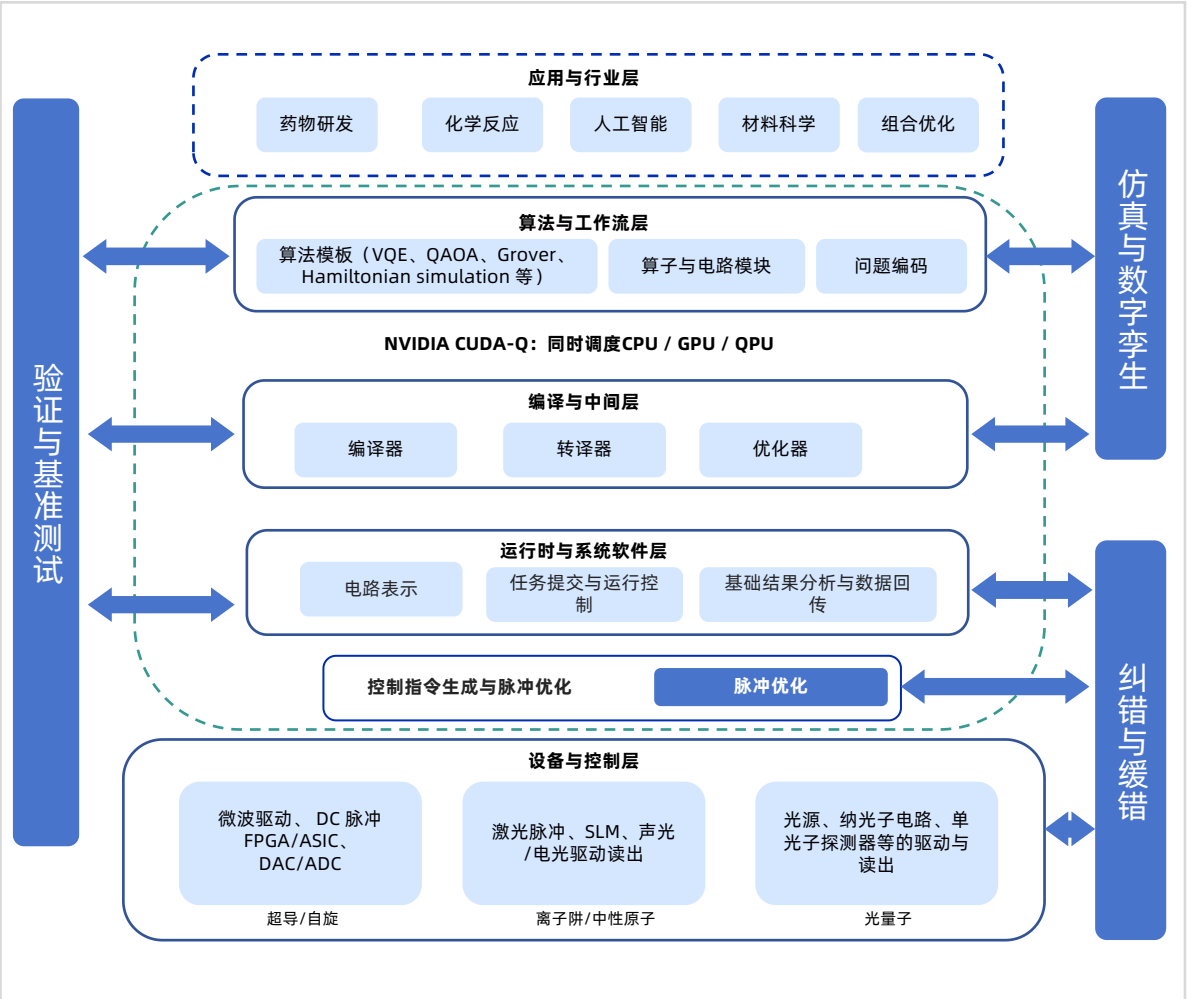
04 AI赋能量子

05 量子赋能AI

01 量子计算软件体系

量子计算软件体系正在从单一编程框架+单机实验设备的形态，演进为面向数据中心与超算环境的全栈工程体系。其核心目标不再只是能跑电路，而是以可移植、可验证、可扩展、可运维为约束，在多硬件路线并存的条件下形成统一的软件抽象与稳定交付能力。特别是在混合计算成为主流的背景下，量子软件栈的关键能力集中在：跨CPU/GPU/QPU的统一编排、低时延运行时、编译优化与资源估算、以及面向纠错的实时数据通路。

图表 量子计算软件体系结构示意图



软件体系概括为自上而下五层+横向三能力

- 应用与行业层：面向化学、材料、金融优化、机器学习等领域的工作流封装（数据准备—任务拆解—结果校验—回写业务系统），强调可重复与可审计。
- 算法与工作流层：以VQE/QAOA/量子动力学模拟、组合优化等混合算法为主，同时引入误差缓释、采样策略、主动学习等算法外壳来提升有效性。
- 编译与中间表示层：完成电路变换、门集合适配、路由与调度、噪声感知优化，并输出资源估算（物理比特、循环次数、时序预算）。
- 运行时与系统软件层：负责异构资源调度、作业队列、低时延反馈通路、数据采集与日志；对接超算/云环境的作业系统与容器化部署。
- 设备与控制层：连接QPU控制电子学与测量系统，输出脉冲与时序，并将测量数据以流式方式回传到经典侧进行解码/反馈。

横向能力通常包括：1）验证与基准测试（性能、保真度、漂移、吞吐、成本）；2）仿真与数字孪生（GPU加速仿真成为评估与调参的重要基础）；3）纠错/缓错支持（实时解码、在线噪声建模、闭环控制）。

在这一体系中，NVIDIA的定位具有代表性：其以CUDA-Q作为异构编程与编排底座，强调在单一量子程序中同时调度CPU/GPU/QPU，并保持对不同量子硬件的可移植与可插拔。

2025年，量子计算软件的进展呈现出明显的工程化与平台化特征：软件栈不再以提供一套能写电路的框架为主要目标，而是围绕数据中心与超算场景的真实约束，系统性强化可移植、可验证、可扩展与可运维能力。行业共识正在形成—在硬件路线长期并存、混合计算成为主流的条件下，量子软件的核心竞争力集中在三条主线：其一，以统一抽象将QPU纳入CPU/GPU的异构调度与编排体系，降低跨平台迁移成本；其二，以编译—运行时协同提升端到端吞吐与低时延反馈能力，使动态电路与作业级优化成为常态；其三，以纠错/缓错为牵引构建实时数据通路与闭环控制能力，使软件从结果后处理转向系统运行环节。在这一演进过程中，NVIDIA以CUDA-Q为代表的异构编排底座强化了平台化趋势，进一步推动量子软件从实验系统走向可规模化交付的工程体系。

操作与互连

在测控系统软件控制方面，目前控制底层设备不再是简单的API调用，而是使用专门的底层语言，例如：QUA(Quantum Machines):一种能让硬件实时执行经典逻辑和量子操作混合指令的语言。Open Pulse(IBM):允许用户直接在脉冲包络层面定义门操作。今年量子计算的操作软件明显从实验室控制工具向数据中心级系统软件靠拢：强调对设备控制、状态管理、日志与诊断的统一运维能力。

- OQTOPUS开源计划：覆盖前端程序转换（QURI Parts）、后端执行引擎（OQTOPUS Engine）与设备网关，目标是形成可复用的全链路系统软件开源底座。
- HRL实验室开源spin QICK：对Fermilab QICK平台的扩展，面向半导体自旋量子比特的精确控制，体现控制栈对多硬件路线的适配与开源化推进。
- Orange QS Juice：面向full-stack研发实验室的统一操作与研发管理，强调组件状态与量子比特行为的关联分析能力，提升调试与运维效率。

编译与运行

编译软件的竞争点正在从电路变换扩展为编译—运行时一体化的端到端效率：包括用系统级语言重构核心数据结构、把量子作业通过标准接口嵌入传统HPC工作流、以及通过作业打包与调度降低运行时开销。同时，运行时对低时延反馈（动态电路、条件控制）的支持正在成为更接近标配的系统能力。

- IBM Qiskit v2.0/v2.2性能重构与HPC集成：核心数据模型迁移至Rust；引入C接口支持将量子负载嵌入C++/Fortran等HPC环境，并强调混合计算与误差校正相关开销的显著压缩。

纠错与缓错

纠错与缓错软件正在从离线分析转向在线闭环系统：实时解码、低时延数据通路与自动化控制协议成为主线；同时，行业更关注可验证的工程指标，例如逻辑层错误率是否在软件协议与系统闭环配合下实现相对物理层的净收益。缓错技术则更强调可产品化、可迁移与低先验依赖，以便在不同硬件与不同任务中形成稳定的交付能力。

- AI驱动的高性能实时解码器（NVIDIA × QuEra）：基于Transformer的AI解码器结合低时延互连，在典型容错电路场景下将推理延迟压到毫秒级，并在准确性上优于传统MLE解码器。

- Quantinuum：逻辑门组首次实现纠错净增益特征（H2）：演示容错逻辑门组，使关键非克利福德门的逻辑错误率低于物理门基准，体现软件协议与系统控制对纠错收益的决定性作用。

- Q-CTRL Fire Opal集成至Rigetti Ankaa-3：通过自动化误差抑制协议，在金融组合优化类任务上实现显著的解质量提升，展示缓错软件在商业算例中的价值。

- 噪声不可知误差缓解模型（DAEM）：不依赖先验噪声特征或无噪训练数据，仅利用硬件统计量进行误差缓解，提高跨硬件环境的鲁棒性与可迁移性。

应用与开发

应用软件正在同时沿两条路线推进：对专业开发者，重点是提升编程模型的表达能力（循环、分支、面向对象）以适配更复杂的系统级工作流；对更广泛用户，重点是平台化交付、无代码/低代码与AI助手降低门槛，并把量子能力更直接地嵌入主流AI/数据科学生态（例如PyTorch），以便在现阶段形成可试用、可集成、可复现的探索性应用。

- Cqlib：2025年，中电信量子集团自主研发的量子计算软件开发工具包Cqlib实现了全面升级。该工具包基于中国量子指令集（QCIS）构建，集成量子电路生成、量子电路仿真、量子算法库与量子应用库等核心功能模块。依托“天衍”量子计算云平台，Cqlib可为用户提供量子计算真机接入与高性能模拟计算服务，支持一站式完成量子算法的构建、编译与运行。它帮助开发者简化了量子应用的开发过程，形成了覆盖开发、编译、执行全流程的中国量子计算工具链。

- Quantinuum与Horizon Quantum的编程语言推进：Guppy支持循环与分支等动态结构；Beryllium强调硬件无关与面向对象编程，使量子开发更接近传统系统级软件工程。

- Terra Quantum无代码与AI辅助平台：TQ42 Studio的图形化构建与TQ Copilot（AI助手）降低非物理背景开发者门槛，推动量子-经典混合模型以平台方式交付。

- D-Wave开源量子AI工具包纳入Ocean，并与PyTorch直接集成：推出开源工具包，使开发者可在PyTorch工作流中调用D-Wave退火量子处理器训练受限玻尔兹曼机（RBM），面向图像生成、模式识别等机器学习任务。

- Kaiwu-PyTorch-Plugin：今年，玻色量子发布中国首个量子玻尔兹曼机（Quantum Boltzmann Machine，QBM）及开源编程套件（KPP），创新性地将PyTorch与相干光量子计算机相结合。该插件打破了常规硬件仅支持受限玻尔兹曼机(RBM)的限制，支持任意节点全连接与灵活拓扑；使开发者可在 PyTorch中无缝调用工具链，自由定义并高效训练能量神经网络，目前已在单细胞转录组学分析(QBM-VAE)、mRNA序列采样等复杂场景中展现出卓越的数据表征与生成能力。

02 量子算法

2025年，量子算法的研究重心发生了显著位移。随着硬件侧逻辑比特雏形的出现，算法设计不再仅仅追求理论上的指数加速，而是全面转向解决统计成本、优化回路瓶颈及资源开销等硬骨头问题。

以下是量子算法在当前阶段的三个关键技术演进路径：

从变分优化转向固定参数协议

长期以来，变分量子算法（VQA）因其对NISQ硬件的适配性而被寄予厚望。然而，变分回路高度依赖经典优化器，在实践中常遭遇贫瘠高原（Barren Plateaus）和极高采样开销的掣肘。2025年的研究显示，行业正尝试通过去优化来规避这些工程瓶颈。

线性斜坡协议（LR-QAOA）的标度优势：最新的研究证明，采用固定参数的线性斜坡调度（Linear-ramp schedules）在处理MaxCut、TSP等组合优化问题时，不仅展现出明确的标度优势（其成功概率随层数增加而显著优化），且能完全跳过耗时的经典迭代步骤。

非变分随机访问优化（QRAO）：在针对工业级组合优化问题的探索中，非变分路径开始崛起。例如针对MaxCut问题，研究者通过实例无关的固定参数配置，在无需变分训练的情况下即获得了优于传统回路的性能。这有效消除了传统算法中最为沉重的参数优化开销。减少对经典优化器的依赖，本质上是降低了量子-经典通讯频率和采样总数（Shots），从而规避了硬件噪声诱发的梯度消失问题，使算法在嘈杂环境下更具鲁棒性。

量子机器学习（QML）的理论奠基与架构创新

QML正在摆脱早期的试错模式，转而构建具有严谨数学支撑的理论大厦，其核心关注点在于如何高效处理具有量子特性的复杂分布。

量旋科技联合团队提出的一种基于长短期记忆（LSTM）的机器学习模型，首次实现了量子系统参数与动态演化的“双向解析”——既能从实验观测数据中逆向推断哈密顿量参数，也能基于参数预测量子系统的动态行为。这一成果为量子硬件调试、噪声表征及算法优化提供了新思路，目前已通过理论模拟与多平台实验验证。

高斯过程对应关系：2025年发表于Nature Physics的研究证明，在希尔伯特空间趋于极限时，深度强随机QNN的输出会收敛为高斯过程。这一发现为量子平台执行精确的贝叶斯推理提供了理论底层，使QML具备了可预测的数学行为。

数据重复上传与泛化性提升：在城市交通预测等时间序列任务中，数据重复上传技术不仅增强了非线性映射能力，还被证明能有效克服特定架构下的贫瘠高原问题。实验数据显示，这种架构在受限的量子资源下能输出更优的泛化指标。

量子启发式张量网络：利用具有对数树宽（Logarithmic tree width）的张量网络，研究者在自然语言处理和生物信息识别领域实现了突破。这种方法在保留量子空间表达能力的同时，利用了经典计算的高效收缩特性。

2025年的共识是，QML的优势区并非对经典数据的简单分类，而是利用量子干涉和纠缠特性，对具有强非线性或强关联特征的量子原生数据进行降维打击。

复杂物理系统模拟的实用化进展

薛定谔化算法的降维打击：该原创算法通过将微分方程动力学转化为量子演化，理论上可将高维（如9维）方程的计算效率提升超1万亿倍。这实现了量子计算与经典科学工程计算的高效衔接，为能源、医疗等行业的复杂动力学模拟提供了全新路径。上海交通大学发布的Unitary Lab（联核实验室）是这一领域的先行者。平台的核心技术在于薛定谔化系列量子算法的创新应用。该算法通过将经典偏微分方程转化为量子系统可直接处理的数学形态，成功搭建起经典计算与量子计算之间的桥梁，解决了长期困扰行业的算法适配难题。

第一量子化框架下的算法突破：研究者实现了在第一量子化框架下使用任意基组进行化学模拟。这一进展的工程意义在于：它显著降低了托佛利门（Toffolicount）的渐近复杂度，使模拟大型分子系统的资源需求下降了数个数量级。

高温超导体与强关联系统模拟：通过对门集合和比特布局的精密协同设计，费米-哈伯德模型的模拟开销已被压缩至早期容错硬件（FTQC）可承载的范围内。这为在短期内解析高温超导机制提供了可行的工程路径。

量子Zeno蒙特卡洛（QZMC）：这是一种将量子测量与经典随机采样相结合的全新的混合路径。通过利用量子Zeno效应逐步逼近未知特征态，该算法无需传统模拟所需的初态重叠或复杂的变分参数优化，天然具备极强的噪声抗性，是近中期模拟动态演化的有力工具。

通过混合编码方案：通过结合离散量子比特与连续玻色子自由度，研究者成功将复杂化学动力学模拟所需的电路深度大幅缩短。这种以“物理换深度”的思路，正成为2025年物理模拟的主流方案。

03 量子纠错与缓错技术

量子纠错（Quantum Error Correction,QEC）是解决量子比特退相干问题的核心手段，其核心原理为：将多组存在噪声的物理量子比特（即非理想量子比特）进行编码组合，构建出稳定的逻辑量子比特（即理想无错量子比特），以此保障量子计算机执行各类量子计算任务时的运行可靠性。

但量子纠错会带来明显的资源开销：一方面，单个逻辑量子比特的编码实现，需要耗费大量物理量子比特；另一方面，要在逻辑层面完成一项可靠的量子操作，物理层面需执行大量基础量子门操作。物理量子比特错误率越高，构建逻辑量子比特所需的物理比特数量就越多。此外，对实现量子加速至关重要的非克利福德量子门，难以通过量子纠错实现有效纠错，这也是当前量子纠错实际应用中的核心瓶颈之一。

自1995年以来，量子纠错已发展成为内容丰富、发展迅猛的量子技术子领域，主流量子纠错方案包含肖尔码、各类稳定子码，以及拓扑码（环面码、平面码、表面码）。目前多数量子纠错实践都基于表面码开展，其各类变体已被长期研究。表面码借助量子纠缠多次复制邻近量子比特信息，在算法输出端比对结果，保留统计占优的正确结果，全程无需直接读取量子比特数值，避免了量子态坍缩问题。

从物理噪声控制到逻辑比特质量的阶跃

2025年是量子计算发展的关键转折点，行业正式告别单纯比拼量子比特数量的NISQ时代，迈入以纠错能力为核心衡量标准的容错量子计算（FTQC）起步阶段。

2025年以前，量子计算行业的核心关注焦点集中在物理量子比特层面，可物理量子比特本身受环境噪声干扰、退相干效应的双重限制，错误率大多维持在10^{-2}至10^{-3}区间，根本无法支撑复杂量子算法的稳定运行。直到2025年，行业内形成统一共识：逻辑量子比特才是衡量量子算力的核心标准。借助量子纠错码，将成百上千个物理量子比特编码整合为单个逻辑量子比特，能够把错误率降至10^{-12}甚至更低，进而打通药物研发、新材料模拟等量子计算实用化落地场景。

量子纠错技术存在特殊的阈值效应：只有物理操作的保真度突破特定临界值，增加物理量子比特数量才能有效压制运算错误；反之，额外添加的冗余比特反而会引入更多噪声干扰。理论与实际存在明显差距：表面码的理论容错阈值接近99%，但2025年实验数据证实，想要实现具备商业应用价值的资源开销配比，物理量子比特保真度必须达到99.9%（即错误率10^{-3}）。

2025年成为重要行业里程碑：超导、离子阱、中性原子这三大主流量子技术路线，均通过实验稳定突破上述保真度门槛，从物理原理层面验证了容错量子计算的可行性。

随着各技术路线物理比特保真度普遍突破99%临界线，不同技术路径在量子纠错方案的选择与实施上，开始呈现出明显的差异化特征：

图表 2025年量子纠错码技术路线与关键进展概览

技术路线	核心纠错码方案	2025年关键进展描述	资源开销特征(Overhead)
超导量子	表面码(Surface Code)	Google团队在Willow处理器上演示三种动态表面码 “祖冲之3.2号”突破表面码阈值	较高；逻辑:物理比例约为1:1000
中性原子	qLDPC码	QuEra与哈佛实现448比特平台，展示逻辑比特性能超越物理比特	较低；利用高连接性实现1:100左右开销
离子阱	全连接纠错码	Quantinuum实现99.92%门保真度，利用全连接特性简化纠错逻辑。	极低；高保真度显著降低冗余需求
玻色子编码	连续变量/猫态码	AWS实现级联玻色子纠错	硬件高效；在单个物理单元内实现初步纠错

qLDPC码：资源效率的破局者

目前行业内存在一种强烈的趋势，即从传统的表面码向量子低密度奇偶校验（qLDPC）码转型。qLDPC码的核心优势在于其极高的编码效率。

IBM的战略转折：IBM已全面转向双变量自行车码（qLDPC的一种），旨在将存储量子信息所需的物理比特数降低一个数量级。Relay-BP解码架构来了极高的编码效率，相比于主流的表面码，qLDPC能用少10倍的物理量子位来编码和保护一个稳定的逻辑量子位。

因为qLDPC算法大幅降低了实时解码的经典计算复杂度，原本必须依赖定制ASIC才能在几十微秒时限内完成的纠错任务，现在可以转移到商用的通用硬件（如AMD的FPGA芯片）上运行，并实现纳秒级的实时响应。为此，IBM开发了名为Relay-BP的新型解码器架构，其效率比其他主流解码器提升了5到10倍，从而无需大型高性能计算（HPC）集群即可完成实时解码。

协同设计：Alice&Bob等公司将qLDPC码与玻色子猫量子比特相结合，利用硬件内生的相位翻转抑制能力，配合上层纠错算法，Alice&Bob提出了一种极低开销的架构。假设在物理相位翻转误差约为0.1%的条件下，仅需758个猫态量子比特即可实现100个逻辑量子比特显著降低了实现容错计算所需的硬件开销。

软硬结合：实时解码与系统集成

量子纠错不仅是数学算法，更是严苛的系统工程。随着逻辑比特数量的增加，如何实时处理海量的错误信息成为行业关注的焦点。

量子纠错过程需要不断测量伴随式（Syndrome）数据，并由经典处理器快速计算出错误位置。对于高速运行的超导系统，解码必须在微秒级完成。如果解码速度滞后，错误将迅速累积导致计算崩溃。

硬件加速器：以Riverlane的Deltaflow为代表的实时纠错栈，正推动解码器从纯软件向FPGA甚至ASIC芯片演进。这种硬件化的解码方案能够处理每秒数太比特（Tbps）的数据流，为百万次可靠逻辑操作（Mega QuOp）提供了可能。

未来，量子比特的物理布局必须与纠错码的拓扑结构深度对齐。这意味着量子芯片的设计将不再孤立，而是与纠错软件、实时解码硬件进行协同设计。PlanQC等机构提出的小规模免测量纠错方案，通过提取冗余校验子信息并利用标志位量子比特，为线路级噪声提供了适度开销下的容错能力。随着全球战略投资的加大，量子计算机正从独立原型机演变为HPC中心里的量子加速单元。逻辑比特的可靠性将取代物理比特的数量，成为衡量量子算力的普适标准。通过抑错技术的物理加固、缓错技术的软件补偿以及纠错技术的逻辑重构，量子计算正在跨越噪声的鸿沟，稳步迈向实用化的容错新纪元。

从量子缓错（QEM）到量子纠错（QEC）的跨越

当下量子计算行业正处在从含噪声中等规模量子（NISQ）设备向容错量子计算（FTQC）转型的核心阶段，在这一转型过程中，量子缓错与量子纠错是两种路径完全不同的问题解决思路。

量子缓错（QEM）主要依托软件层面实现，通过搭建对应的噪声模型，在完成量子测量后开展数据后处理，从带有噪声干扰的计算结果中推导还原出准确数值。这类缓错技术在浅量子线路中能发挥一定优化效果，可一旦计算规模持续扩大，对应的经典算力开销会呈现指数级暴涨。

量子误差缓解（Quantum Error Mitigation,QEM）是多类技术的总称，核心逻辑为：融合经典后处理手段（大多依托多次量子计算结果分析）与量子电路优化方案

（比如编译流程优化），通过重复运行同一量子算法，对单次运行结果做统计平均处理，以此降低量子计算过程中的误差。QEM属于折中过渡性方案，核心目标是提升NISQ时代量子计算机的实际可用算力。目前行业内常用的量子误差缓解技术主要有：随机化编译、测量误差缓解、概率性误差消除（PEC）、零噪声外推（ZNE）。

以上各类量子误差缓解技术都会产生相应的经典计算开销，但和量子纠错不同，这类技术不需要借助辅助量子比特就能实现。需要明确的是，量子误差缓解与量子误差抑制并非同一概念（详见下图），后者可通过量子计算机固件层面的优化完成，或是依靠针对性设计的量子算法直接规避误差。

图表 量子误差缓解与量子纠错技术对比

对比维度	QEM 量子误差缓解	QEC 量子纠错
目标	利用**经典后处理**技术降低电路误差	创建具有更长寿命的**逻辑量子比特**，实现更低的表面误差率
技术方法	**概率方法**、电路修改、多次运行、回归分析和机器学习	**表面码**、颜色码、qLDPC码、Floquet码、Steane码、CSS码等
性能指标	电路采样开销、经典计算开销	逻辑量子比特目标误差率、物理/逻辑量子比特比率、经典开销
额外开销	**更多的电路采样次数**，经典后处理	**更多的物理量子比特**、更长的电路执行时间
适用阶段	**短期**，适用于NISQ（含噪声中等规模量子）时代	**长期**，适用于FTQC（容错量子计算）时代

04 AI赋能量子：从静态算法到实时自适应神经解码

在量子计算迈向容错阶段的过程中，AI的作用正在从一般意义上的辅助分析工具，转向量子纠错解码器与自适应控制系统的关键能力组成部分。随着物理比特规模增长、纠错循环频率提升，以及噪声形态更加复杂，仅依赖传统静态算法与固定参数策略，越来越难以满足实时性与鲁棒性要求。2025年的最新进展表明，AI正在以解码加速、噪声建模、算法生成与验证评估等多条路径，嵌入量子纠错的核心流程，并直接影响系统层面的纠错闭环效率与可扩展性。

量子纠错（QEC）的核心挑战在于必须在极短时间内（微秒级）识别并修复大量物理比特产生的错误，否则量子信息会迅速退相干。AI的引入改变了纠错流程中经典计算的处理方式，使其更接近可持续运行的实时闭环。

AI驱动的高速解码器

传统纠错解码算法（如最小权重完美匹配MWPM）在比特规模扩大时会面临显著的计算开销与延迟压力，进而影响纠错循环的节拍。2025年的进展显示，基于神经网络与机器学习的解码器成为缓解该瓶颈的重要方向。

- 一方面，实时硬件加速正在成为工程落地的重点。英国Riverlane公司在荷兰新设研发中心，聚焦AI解码器研发，通过机器学习优化其实时纠错技术Deltaflow，目标是缓解纠错过程中的经典计算带宽限制，使系统能够匹配超导量子比特的高工作频率。

- 另一方面，低开销与高性能解码也在编码侧协同推进。亚利桑那大学团队开发的QLDPC（量子低密度奇偶校验）编码和解码算法，通过AI优化，显著减少了检测与纠正错误所需的物理比特数量，从而在资源效率与纠错能力之间形成更有利的平衡。

噪声自适应纠错：AI的数字孪生能力

量子比特所处环境噪声往往存在漂移与非平稳特征，固定策略在长期运行中容易失配。AI的优势在于能够以数据驱动方式进行在线学习与预测，从而支持纠错参数的持续调整。

在噪声表征方面，研究人员利用随机森林、支持向量机和前馈神经网络，实现了对非马尔可夫量子噪声特性的自动化高精度表征。这类实时噪声建模能力，使纠错系统能够根据噪声变化趋势进行动态调整。与此同时，面向误差建模的数字孪生方法也在提升校准与评估精度。查尔姆斯理工大学等机构提出的基于错误矩阵数字孪生的增强型过程层析技术，通过AI学习态制备与测量中的误差，将保真度提升了一个数量级以上，为量子门操作提供更精确的纠错依据与误差预算输入。

跨层级全栈协同：AI赋能的算法生成

AI的作用不仅体现在硬件层级对错误的检测与修复，还开始在算法与电路生成阶段直接减少错误累积的源头压力。其核心思路是通过自动化生成更短、更少门的电路，降低在含噪硬件上的累积误差风险。

典型进展来自Quantinuum与Hiverge的合作，其利用大语言模型驱动的系统自动生成量子化学算法。这些算法在精度上可匹配人工设计，同时电路深度与门数量减少1-2个数量级。通过减少物理操作次数，AI在算法源头降低了总误差积累，为在早期容错与高噪声环境下实现可用计算提供了更现实的工程路径。

纠错码的自动化验证与评估

随着逻辑比特运行与纠错流程复杂度上升，验证纠错是否成功本身也成为高难度任务。传统验证方法在测量噪声、采样成本与在线评估等方面面临限制，因此需要更高效、鲁棒的评估框架。

清华大学等机构提出的量子子空间验证通用框架，能够利用AI辅助的高效验证算子，对纠错逻辑态的保真度进行快速估计，并对测量噪声具有一定鲁棒性。这类方法为逻辑量子比特在含噪硬件（NISQ）上的实际运行提供了更可操作的在线评估手段，有助于将纠错效果从离线分析推进到运行时监测与反馈调参。

总体来看，2025年AI与量子纠错的结合呈现出从点状算法改进向系统级闭环能力嵌入的趋势：在解码侧解决实时性与带宽瓶颈，在噪声侧实现在线建模与自适应策略，在算法侧通过自动生成降低电路复杂度，在验证侧提供更快速且鲁棒的评估框架。这些进展共同指向同一工程目标，即在更大规模、更高频率与更复杂噪声条件下，形成可持续运行的纠错循环与可扩展的容错系统架构。

05 量子赋能AI：从算力替代设想转向高维数据供给

2025年，量子赋能AI的讨论呈现出更务实的产业路径。与其期待量子计算直接承担大模型训练与推理，不如将量子硬件的优势集中在其更擅长的环节，例如物理、化学体系的高保真模拟，以及复杂概率分布采样等，生成高价值且经典计算不可模拟（Non-simulable）的数据，再由经典AI完成训练与推理，从而形成可落地的协同模式。这一路径的重点不在于用量子算力替代现有算力体系，而在于把量子计算转化为面向AI的数据供给能力，并嵌入现有工程流程实现早期交付。

核心逻辑：量子输出分布作为AI的高维数据供给

2025年的研究进一步明确了量子赋能AI的底层逻辑：即便是门密度较低的量子电路，其输出分布在经典模型下也可能表现出不可学习性，例如基于能量的模型无法有效学习其输出。由此形成一种更清晰的技术链条，即由量子生成数据，再由经典AI完成训练与推理。

在这一框架下，Quantinuum发布的Generative Quantum AI方向利用量子计算产生具有独特概率分布的信息，用于增强经典机器学习模型的泛化能力。其工程价值在于，量子算力暂无法独立完成端到端任务的限制可以被绕开，通过将量子计算能力转化为高质量数据供给，使其能够在现有业务流程中形成可交付的增量价值，并为后续更深层次的量子计算参与打下数据与方法基础。

先行场景：量子化学与材料的高价值数据链条

以化学与材料为代表的领域具备三个优势：问题结构更适合量子表达；数据价值密度高；且行业对局部精度提升敏感，便于形成阶段性成果。因此，围绕分子数据生成、反应路径与催化模拟等方向，量子参与的数据供给模式更容易率先规模化。

2025 年，Quantinuum 与 Hiverge 证明了利用大语言模型（LLM）驱动的系统可以自动发现优化的量子化学算法，从而形成 AI 设计量子算法、量子生成物理数据、经典 AI 吸收数据的闭环。与此同时，行业对分子与材料研发中的筛选效率提升有明确需求，量子参与生成的高保真模拟数据能够直接提高经典 AI 在新材料研发中的预测与筛选效果，使量子计算以数据增益的方式更快进入产业化验证阶段。

应用导向：量子采样推动生成建模落地验证

量子采样驱动的生成学习（Quantum Sampling for AI）是量子机器学习中较为清晰的一条技术支线，其出发点并不是让量子计算直接承担端到端的模型训练，而是把量子硬件在采样上的潜在优势用于生成模型与概率学习的关键瓶颈环节。

玻色量子基于量子玻尔兹曼机（QBM），巧妙利用了伊辛模型与玻尔兹曼机在数学上的等价性，以量子采样替代传统的Gibbs Sampling方法，在人工智能领域展现出了独特优势：通过量子并行特性解决经典计算机无法应对的NP-Hard问题，显著提升AI模型的训练效率；在生物制药领域中，通过构建量子玻尔兹曼机增强的深度变分自编码器（QBM-VAE）模型，缩短药物筛选时间、进一步极大节省药物发现阶段的成本，将技术价值加速转化为产业的真实效益。

信任根基：量子存储器辅助的数据验证

量子赋能AI的关键挑战之一是数据真实性与可验证性。2025年，研究人员提出了维度扩展技术，利用量子存储器显著提高了量子态验证的效率。这意味着在量子生成数据的流程中，可以更高效地验证量子算力生成的原始数据是否符合预期的量子特性，例如GHZ态验证，从而提升数据链条的可信度与可复核性，为工程化采用提供更扎实的质量控制手段。

明确边界：AI for Quantum与Quantum for AI

在产业重心上，当前更可验证、也更容易形成阶段性成果的路径，是量子增强AI的数据层融合，而非直接追求量子版反向传播算法。在协同关系上，AI主要承担量子计算的运维与控制能力，包括解码、校准、噪声建模与调参等，属于AI for Quantum；量子计算则更多承担AI的极端数据源角色，通过不可模拟分布与高保真物理数据为经典模型提供增量信息，属于Quantum for AI。两者在2025年通过异构计算平台（如NVIDIA CUDA-Q）进一步走向架构统一，为未来在同一计算栈内实现更紧密的软硬件协同提供了工程基础。



06

混合算力与量子云平台



目录

06
混合算力与量子云平台

01 量子云平台发展现状

02 量子—经典混合计算架构

03 云端应用与开发者生态

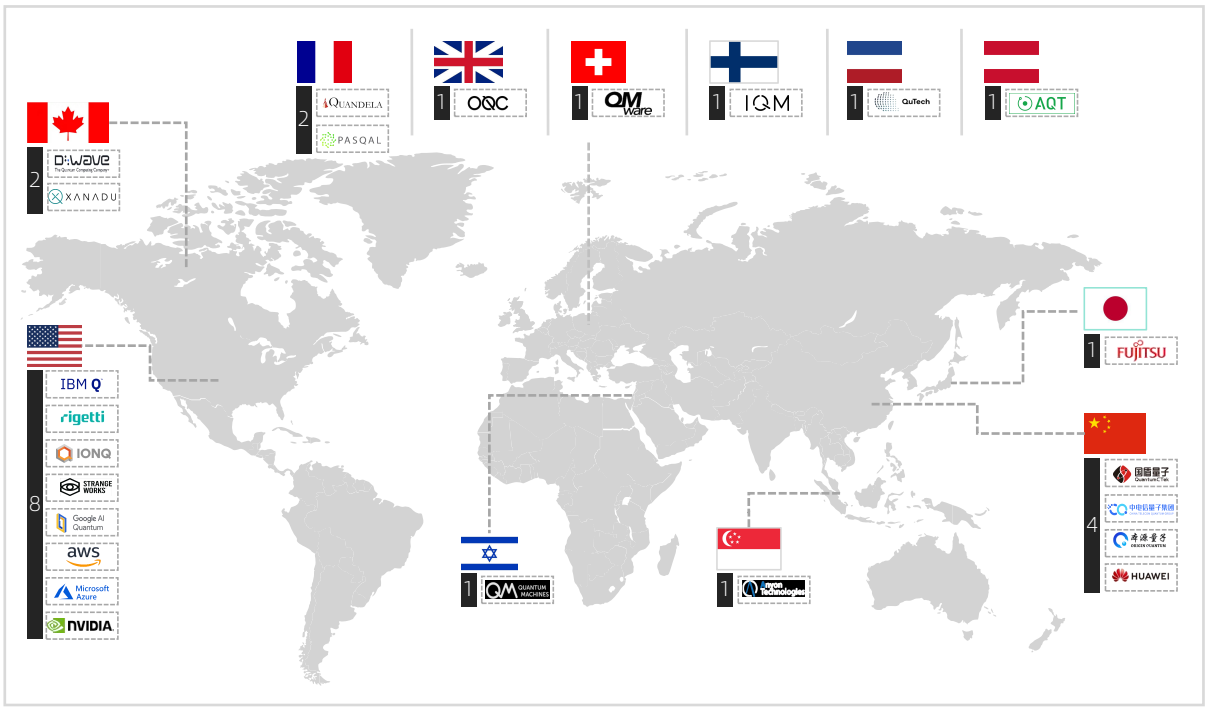
01 量子云平台发展现状

量子计算云平台（Quantum Computing as a Service，QCaaS）已成为当前量子计算资源供给的主渠道。其核心价值在于：通过云端封装量子硬件、控制与编译工具链、开发环境和计费体系，将高成本、强专业的量子计算能力转化为可规模触达的在线服务，支撑科研试验、算法迭代与行业场景验证，并逐步向量子—经典—AI—HPC协同的综合算力平台演进。以IBM Quantum、Amazon Braket、Azure Quantum等为代表的平台，正在从提供QPU远程访问升级为提供可编排的混合计算工作流，并在政府项目、国家实验室、超算中心与产业园区落地，形成量子算力基础设施的雏形。

目前，全球量子计算云平台领域发展快速，约有24家公司开放了量子计算云平台，包括美国的的IBM Quantum Experience、Google AI Quantum、微软-AzureQuantum、AWS-Braket、Rigetti-QCS、加拿大的D-Wave-Leap、Xanadu Cloud、StrawberryFields、芬兰的IQM-Resonance、日本的富士通、新加坡的Anyon Technologies、中国的中电信“天衍”量子计算云平台、国盾量子计算云平台、“量旋云”量子计算云平台、本源量子云平台等。这些云平台在后端硬件上、模拟器和定价结构等方面呈现出显著的多样性，全方位反映了量子计算行业商业化进程中的动态发展趋势，持续推动量子技术从理论走向实际应用场景。

当前，全球量子计算云平台的竞争格局呈现出以北美、欧洲和亚洲为核心的三足鼎立之势。北美地区凭借其在半导体、软件生态系统和云计算领域的绝对优势，由IBM、Google、Microsoft（通过Azure Quantum平台聚合多家硬件商）和AWS（Braket服务）等科技巨头主导，构建了以云接入为核心、推动开发者生态建设的成熟商业模式。与此同时，加拿大的Xanadu公司凭借光量子计算路线也在全球云服务市场中占据一席之地。欧洲的发展路径则更具特色，其优势根植于深厚的科研底蕴。除了法国的Pasqal（中性原子路线）等初创公司快速成长，英国OQC等企业也在超导量子计算领域积极推进商业化，加上美国公司IonQ（离子阱路线）在欧洲设立研发中心吸纳人才，共同构成了产学研紧密联动的创新集群。

图表 全球量子计算云平台地理分布情况



iCV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2026.2

在亚洲，中国正以坚定的自主创新姿态快速崛起，展现出与北美和欧洲不同的发展路径。中国强调技术自主与生态闭环，已形成以企业为主体、产学研协同推进的完整产业链。代表性企业包括提供全栈式解决方案的，推动量子计算+保密通信融合创新的中电信量子集团，以及专注于核心元器件与系统集成的国盾量子。这种由国家战略引领、市场多元参与的格局，正加速推动中国量子计算从研发走向实用化的进程。

中电信量子集团目前已完成超导量子计算机“天衍-287”的搭建，该系统搭载祖冲之三号同款芯片，并具备量子计算优越性能力。在特定问题上，其处理速度可比目前最快的超级计算机快4.5亿倍。该系统后续将接入“天衍”量子计算云平台，计划首次面向全球开放应用服务。同时，“天衍”平台已形成规模化在线服务能力，平台累计访问量超过4400万，覆盖60多个国家用户，累计实验任务数超过340万。

国盾量子以云端开放真实量子计算资源为核心，提供多台真实量子计算机与量子模拟器的组合服务，并配套较完整的开发与实验环境，包括SDK/工具箱、图形化实验室、线路转换（如QASM↔QCIS）、硬件映射，以及Pulse脉冲层控制能力；同时提供信号分析、数据管理、在线解模与反馈控制等工程支撑工具，支持用户在云端完成程序开发、运行验证与数据处理流程。

下面列举了与量子计算云平台相关的最新进展：

- NVIDIA
  - 成立NVAQC，建加速量子研究中心，配强大算力，联合多方攻关纠错、应用及量子-AI集成；
  - 与MITRE合作，借CUDA-Q与超算优化量子成像模拟，将耗时从数天缩至1小时内；
  - 与Q-CTRL和Oxford Quantum Circuits合作，三方借助英伟达的GPU和相关加速库优化布局排序，通过CPU多线程、GPU布局级和量子比特级并行等方式提升效率。
- IBM Q
  - 与TCS等计划在印部署156量子比特Heron处理器，提供云访问，助力国家量子任务与行业应用。
- IONQ
  - 宣布其旗舰量子计算机Forte Enterprise可通过Amazon Braket及IonQ量子云实现全球商用；
  - 与G-QuAT合作，G-QuAT可通过IonQ云平台使用Forte量子计算机推动研发；
  - KISTI牵头建韩国首个量子卓越中心，联合IonQ、Megazone Cloud建混合云环境，支持远程访问。
- IQM
  - 升级量子云计算平台IQM Resonance。
- QUANTINUUM
  - Quantinuum的Reimei量子计算机在RIKEN投用，将与富岳建混合平台，为科研提供算力支撑。

北京量子信息科学研究院 Beijing Academy of Quantum Information Sciences 中国科学技术大学 University of Science and Technology of China

- 发布QSteed编译系统，集成虚拟化管理与编译器，已在Quafu量子云集群验证可用。

QBoson 玻色量子 Alibaba Cloud

- 玻色量子与阿里云达成深度合作，双方依托阿里云领先的云原生架构与算力调度平台，将玻色量子自主研发的千比特级相干光量子计算机接入云端。

EuroHPC Joint Undertaking QILIMANJARO We do quantum computing

- EuroHPC JU的Mare Nostrum-Ona量子退火计算机将于2025年安装，将整合进Mare Nostrum 5。

NTT Research 東北大學

- 合作在新加坡部署量子AI测试平台。

QCentroid INNSOMNIA BUSINESS ACCELERATOR

- QCentroid与Innsomnia合作，使后者生态系统用户可通过QuantumOps平台解决复杂问题。

Quantum Rings

- Quantum Rings核心产品接入NVIDIA CUDA-Q平台，借其云算力加速量子模拟，缩短复杂系统模拟时间。

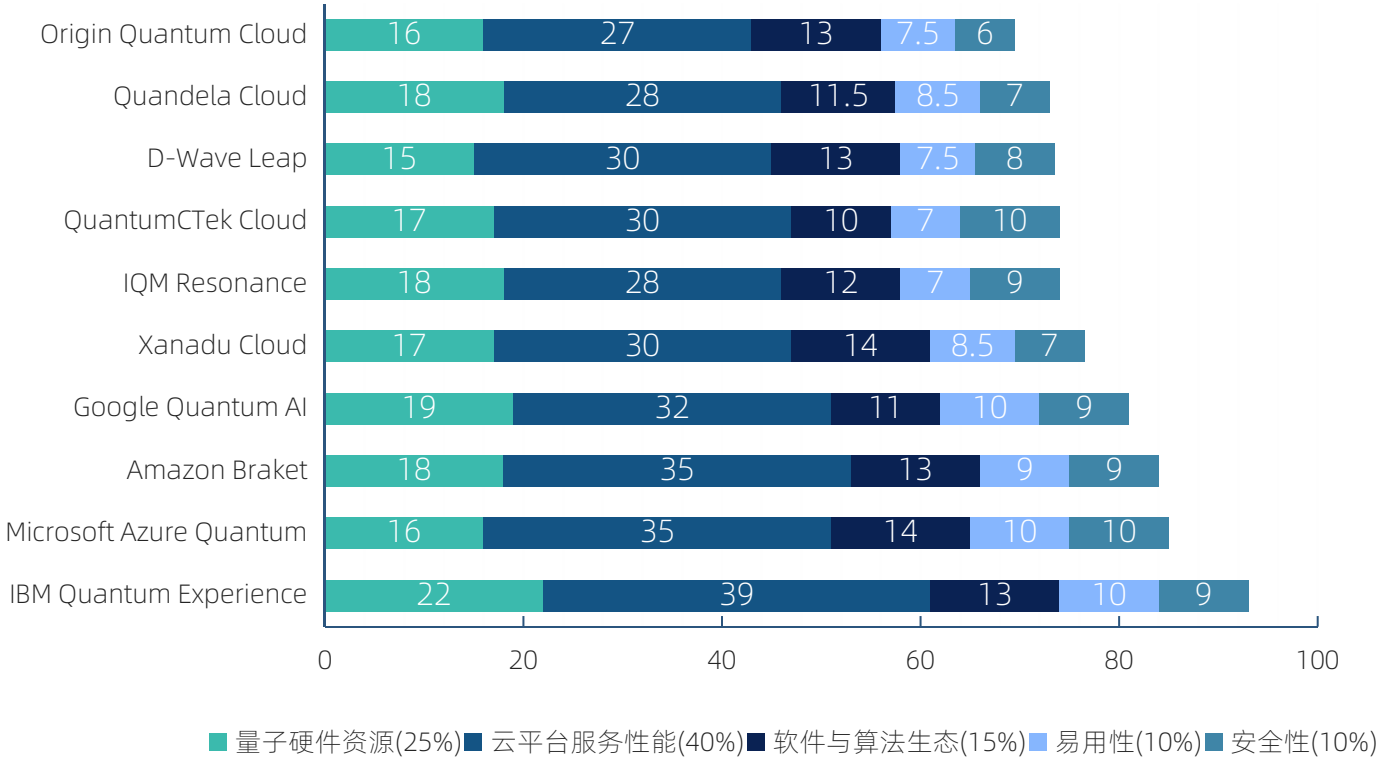
equal1

- 建立爱尔兰首个AI-量子测试平台。

BDX ANYON

- 合作在新加坡部署量子AI测试平台。

图表 全球量子云平台综合评分对比图



iCV TA&K | 2026.2

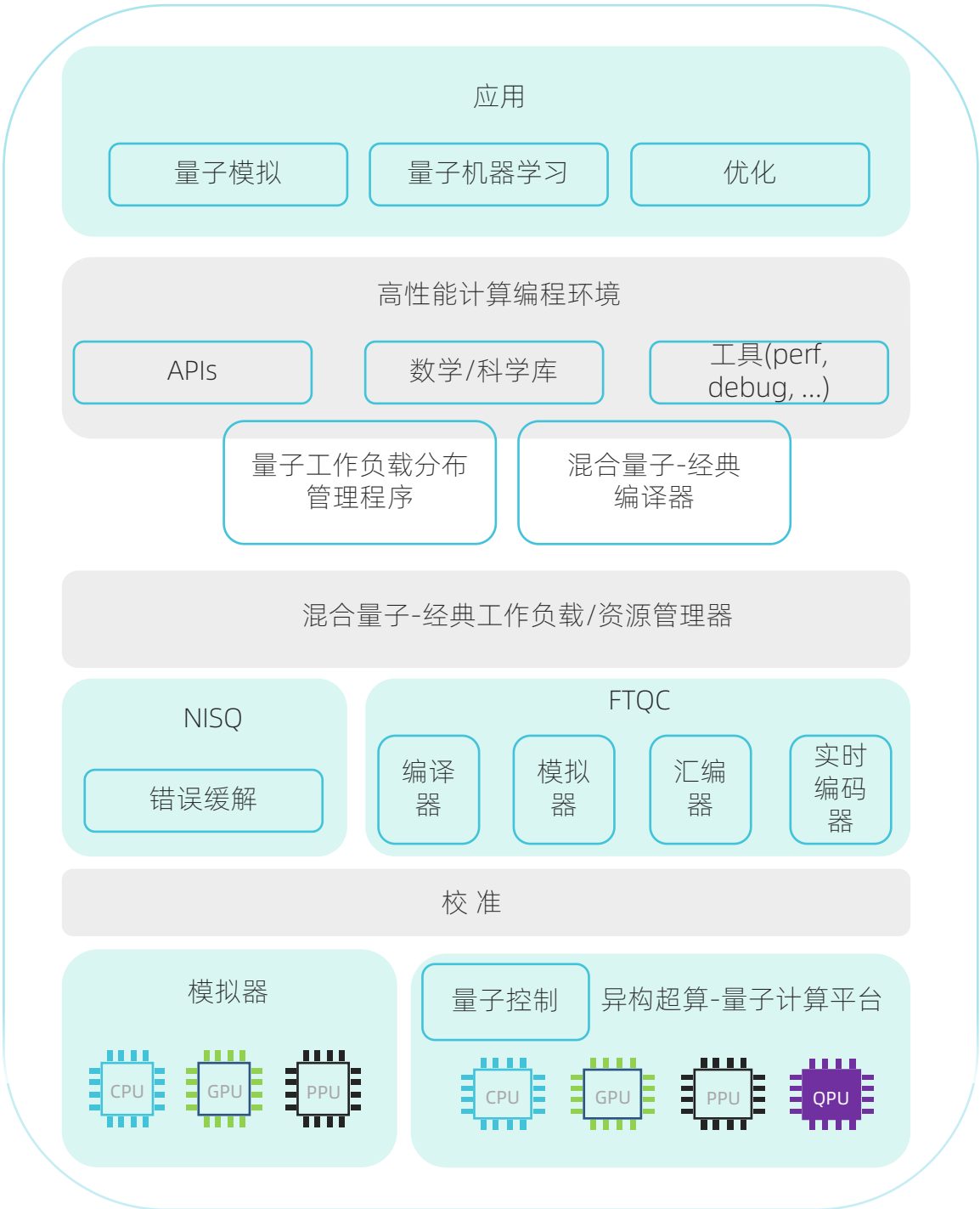
为直观呈现各平台综合实力差异，通过构建多维评价模型，对全球10家代表性量子计算云平台进行了深度横向对比。上图中的得分结果既反映了平台在“硬件性能-服务体验-生态建设”全链条的表现，也凸显了不同技术路线（超导、离子阱、中性原子、光量子）与运营模式的差异化竞争力，可为用户选择平台、厂商优化方向提供直接参考。

从多维度综合比较可见：在硬件性能上，IBM明显领先于其他平台，Google与IQM紧随其后；在生态完善度上，IBM、Azure与Braket占据主导；在易用性与文档支持方面，国际平台整体优于中国厂商；而在安全与合规性上，IBM、Azure与国盾量子表现最为突出。整体而言，全球量子云平台正在形成“国际巨头领跑+本土体系崛起+新兴路线突破”的多极格局。未来的竞争焦点将逐渐从量子比特数量转向高保真纠缠态的可扩展性、逻辑比特纠错能力以及跨平台SDK的互操作性。这些指标将成为下一阶段量子云平台综合实力的关键，也将决定未来量子计算生态的技术方向与竞争格局。

02 量子—经典混合计算架构

量子—经典混合计算架构的目标是将QPU（量子处理器）作为异构加速单元纳入既有的CPU/GPU数据中心与超算工作流，使量子电路执行、测量、反馈控制、误差缓解与（面向容错的）纠错解码等链路，能够在统一编排下以确定性时延完成。其工程关键不在于单次电路能否运行，而在于端到端数据通路、时序确定性、软件抽象与可运维性。

图表 量子-经典混合计算架构示意图



架构分层与关键数据通路

应用接口层：HPC编程环境的无缝扩展

为了降低量子算力的使用门槛，该架构并未创建孤立的开发环境，而是直接扩展了主流HPC编程环境（如HPE Cray Programming Environment）。

- 量子接口库(Quantum Interface Library)：通过引入标准化的量子接口库，架构支持在C/C++、Fortran等传统HPC高性能语言中直接调用量子内核（Quantum Kernels）。这意味着现有的超算应用无需重写，即可像调用数学库一样“无感”地使用量子加速能力。

- 多SDK兼容性：该层提供了极高的兼容性，支持对接CUDA-Q、Qiskit、Penny Lane等多种主流开发工具包，使开发者能在熟悉的工具链中完成混合算法的开发。

编排与调度层：智能混合工作负载管理

该层负责把上层任务逻辑落到具体资源与执行计划上，是连接应用侧与执行侧的关键枢纽，重点解决资源分配与规模受限两类问题。

- 其一，自适应线路编织超管（Adaptive Circuit Knitting Hypervisor）面向“单芯片物理量子比特规模有限”的现实约束，通过线路切分（Partitioning）与结果重组的方式，将更大规模的问题拆解并分配给多个分布式QPU并行执行，再对输出进行组合，以扩展可处理问题的规模边界。

- 其二，混合资源调度器（Hybrid Workload Manager）面向多用户共享的超算场景，对CPU、GPU与QPU等异构资源进行统一排队、分配与动态调整，使量子资源能够在整体工作负载中被更有效地占用与复用，减少因等待、空闲或不匹配造成的利用率损失。

容错核心层：迈向FTQC的软件支撑栈

- 围绕噪声与误差控制，该层提供面向容错量子计算（FTQC）的关键软件能力，突出“硬件感知”和“闭环控制”两点。

- 在编译链方面，编译器（Compiler）、汇编器（Assembler）与仿真器（Emulator）以真实的硬件噪声配置（Hardware Noise Profiles）为输入进行针对性映射与优化，尽量避免只在理想模型下成立、但在实际设备上效果不稳定的电路生成方式。

- 在运行时方面，实时解码器（Real-time Decoder）用于接收纠错码的综合信息（Syndrome），并在尽可能短的时间尺度内给出修正决策与反馈指令。该能力通常需要与专用硬件配合，以满足微秒级响应的时延约束，是维持逻辑量子比特稳定运行的重要环节。

控制与校准层：高精度模拟前端

- 在该架构中，校准与控制不再作为量子设备的独立流程运行，而是与HPC计算资源形成更紧密的协作关系。校准产生的数据由HPC侧算力参与处理与建模，再通过专用控制硬件将校准结果回写到量子控制链路中，以支持更高并行度、更自动化的校准与控制流程，从而提升多通道系统在长期运行中的一致性与可维护性。

物理硬件层：异构算力平台

- 底层物理平台强调异构算力单元的组合与紧耦合，并通过高速、低时延的互联网络（Scale-up Interconnect）实现跨单元的数据交换与协同。系统通常包含承担通用计算的CPU、承担并行计算与加速任务的GPU，以及执行量子逻辑运算的QPU。

此外，架构中还可以引入概率处理单元（Probabilistic Processing Units,PPU）作为补充型加速资源。PPU以概率比特（p-bit）为基础，面向组合优化与采样类任务提供加速能力，并与FPGA及定制ASIC等共同构成异构加速底座，使不同类型的计算任务能够在更合适的硬件单元上完成分工与协作。

目前量超融合架构已经较为成熟，量子计算产业正逐渐走向可落地实施的系统工程阶段。通过复用成熟的半导体制造工艺和HPC软件生态，该架构大幅降低了量子计算机的研发成本与应用门槛。全球范围内多个量子计算公司正在着力构建混合计算架构，例如，IBM围绕量子—经典混合工作流持续完善运行时与编程工具链，便于将量子程序以作业形态纳入更大的计算流程；PennyLane等软件生态则长期聚焦混合量子—经典算法与自动微分等关键能力，降低科研与工程团队在算法验证阶段的集成成本；NVIDIA则从异构计算与互联出发，推动GPU侧与量子控制/量子系统的协同基础设施建设，面向需要低时延协同的混合计算场景提供系统级选项。中国电信量子正以“四算融合”为抓手推进量子计算与经典算力的统一纳管与调度，并以天翼云（安徽）智算中心为基础建设新一代融合计算系统，面向金融服务、生物化学、大数据与人工智能等领域开展应用探索。



英伟达路线分析:从AI霸主到量子神经中枢

在量子计算进入噪声中等规模量子（NISQ）时代向容错量子计算（FTQC）转型的关键节点，英伟达的战略布局展现出了极高的前瞻性。英伟达创始人黄仁勋指出，未来的超级计算机将是QPU-GPU系统，通过量子计算机模拟自然的能力与GPU的大规模并行处理能力深度结合，构建一个统一、连贯的计算体系。英伟达并非试图制造单一的量子处理器，而是致力于成为连接量子与经典世界的罗塞塔石碑。通过CUDA-Q软件平台和NVQLink互连架构，英伟达正在将量子处理器（QPU）从实验室的精密仪器转化为数据中心内的标准加速器，使其成为高性能计算环境中的一等公民。

英伟达路线的技术灵魂在于其提出的逻辑QPU（Logical QPU）概念。它将物理量子比特、控制读出电子设备以及经典计算资源（GPU/CPU）整合为一个统一的系统模型。在这个模型中，GPU不再是外部的辅助插件，而是QPU环境中的一等公民，直接参与实时校准和量子纠错（QEC）等核心运行负载。这种深度集成使开发者能通过统一的高性能编程环境，同时编排量子和经典资源，打破了传统量子系统与超算集群之间的通信壁垒。NVQLink是英伟达实现量子-GPU混合架构的物理桥梁。它针对量子纠错（QEC）循环中极其严苛的低延迟要求，提供了行业领先的连接性能。

在2025年的技术演进中，NVQLink展示了其作为工业级容错量子系统基础设施的实力：

图表 2025年NVQLink 技术指标及量子容错系统性能

性能指标	规格参数	工程意义与应用场景
GPU-QPU吞吐量	400 Gb/s	支持大规模量子纠错码（如表面码、qLDPC码）产生的海量校验子（Syndrome）数据的实时流式传输。
往返延迟(Round-Trip Latency)	<4.0微秒(FPGA-GPU-FPGA)	这是系统的“生死线”。该延迟包含了信号从量子控制器（FPGA）发出，经由网络到达GPU，GPU计算完成并返回控制指令的全过程。4微秒的时间窗口足以覆盖超导量子比特的相干需求，使得在GPU上运行复杂的纠错算法成为可能。
算力密度	40 PFLOPS(AI性能)	基于NVIDIA GB200 Grace Blackwell超级芯片，提供处理复杂解码算法（如基于张量网络的解码器）所需的算力。
互联协议	RDMA over Ethernet	采用标准的以太网RDMA技术，而非专有总线，确保了与现有数据中心基础设施的兼容性和可扩展性。
时钟域(Time Domains)	4级时钟域同步	NVQLink引入了从最快（皮秒级脉冲生成）到最慢（秒级经典调度）的四级时钟域概念，解决了异构系统中的同步难题。

实证突破：Quantinuum Helios实现纠错

- 英伟达路线的有效性已通过与Quantinuum的深度合作得到了有力印证。Quantinuum的Helios量子处理器集成了NVQLink与NVIDIA GH200 Grace Hopper超级芯片，成功演示了首个针对qLDPC（量子低密度奇偶校验码）的可扩展实时解码方案。

- 在传统的架构下，解码延迟往往成为瓶颈。而借助NVQLink的并行处理能力，Helios的解码器中值响应时间仅为67微秒，比硬件要求的2毫秒标准快了32倍。这种极速的反馈控制使系统能实时纠正量子比特错误，最终使逻辑内存的错误率比纠错前改善了5.4倍。这一成果标志着量子计算正从实验室的科学奇迹迈向量子超算中心的生产力工具。

全球生态：计算文明的战略分野

- 英伟达通过技术溢出和标准定义，正在全球范围内构建由其主导的混合计算生态。目前，全球已有十余家顶尖超算中心（包括日本AIST、韩国KISTI、意大利CINECA等）以及17家QPU制造商采用了NVQLink技术。

图表 英伟达NVQLink在量子计算硬件生态中的应用与合作伙伴

硬件技术路线	核心合作伙伴	合作动因与技术整合点
超导量子计算	IQM,Rigetti,Oxford Quantum Circuits(OQC),Alice&Bob,Anyon Computing,Quantum Circuits Inc.	超导比特速度极快（纳秒级门操作），对控制延迟最敏感。NVQLink是目前唯一能满足其<4us反馈需求的商用接口，用于实现复杂的表面码解码。
离子阱	Quantinuum,IonQ	离子阱相干时间长但计算操作慢，适合运行极其复杂的纠错算法。结合GPU算力可实现如qLDPC等高级编码的实时解码（如Helios案例）。
中性原子	QuEra,Pasqal,Atom Computing,Infleqtion	中性原子阵列通过移动原子（Shuttling）实现逻辑门，需要实时处理相机图像以决定原子移动路径。GPU的图像处理能力通过NVQLink直接赋能原子重排。
光量子	ORCA Computing,Quandela	ORCA在2025年展示了在数据中心内部署光量子处理器，利用CUDA-Q实现分布式量子神经网络。光量子需要处理海量探测器数据，依赖GPU的高吞吐。
硅基/自旋	Silicon Quantum Computing,Diraq,Quantum Motion	硅基量子点集成度高，需要处理密集的读出信号。NVQLink提供了这一高密度数据流的传输通道。

03 云端应用与开发者生态

2025年，量子计算云平台正在经历一场深刻的演变。随着底层工具链通过高度抽象化逐步屏蔽复杂的物理机理，开发者开始摆脱特定硬件架构的束缚，将研发重心转向真实业务场景的算法实现。在这一进程中，量子技术迅速跨越学科门槛，一个支持异构接入、多端调度且以价值为导向的新型产业生态正加速成型。

主流框架的持续迭代

IBM的Qiskit、谷歌的Cirq以及Xanadu的Penny Lane已经确立了三足鼎立的格局。2025年，Qiskit推出了针对大规模QPU调度的性能优化版本，大幅降低了大型量子电路的编译延迟。而PennyLane则在量子机器学习这一细分赛道上展现出统治力，其领先地位源于其提出的量子微分编程（Quantum Differentiable Programming）理念。它将量子电路视作可微的神经网络层，使用户能够利用PyTorch、Tensor Flow或JAX等主流机器学习框架，像训练深度学习模型一样优化量子算法。

传统方法（如参数移位规则）在比特数增加时开销巨大。Penny Lane通过PennyLane-Lightning MPI等高性能模拟器插件，实现了在分布式CPU集群上的大规模并行计算，支持高达41个以上量子比特的完整状态向量模拟。劳斯莱斯等工业巨头正是利用这类成熟的SDK，在云端通过量子模拟器与真机协作，将发动机气流动力学模拟的计算周期从数周压缩至数小时，验证了量子云服务的实战价值，同时也凸显了优化混合量子-经典结构以实现计算优势的必要性。

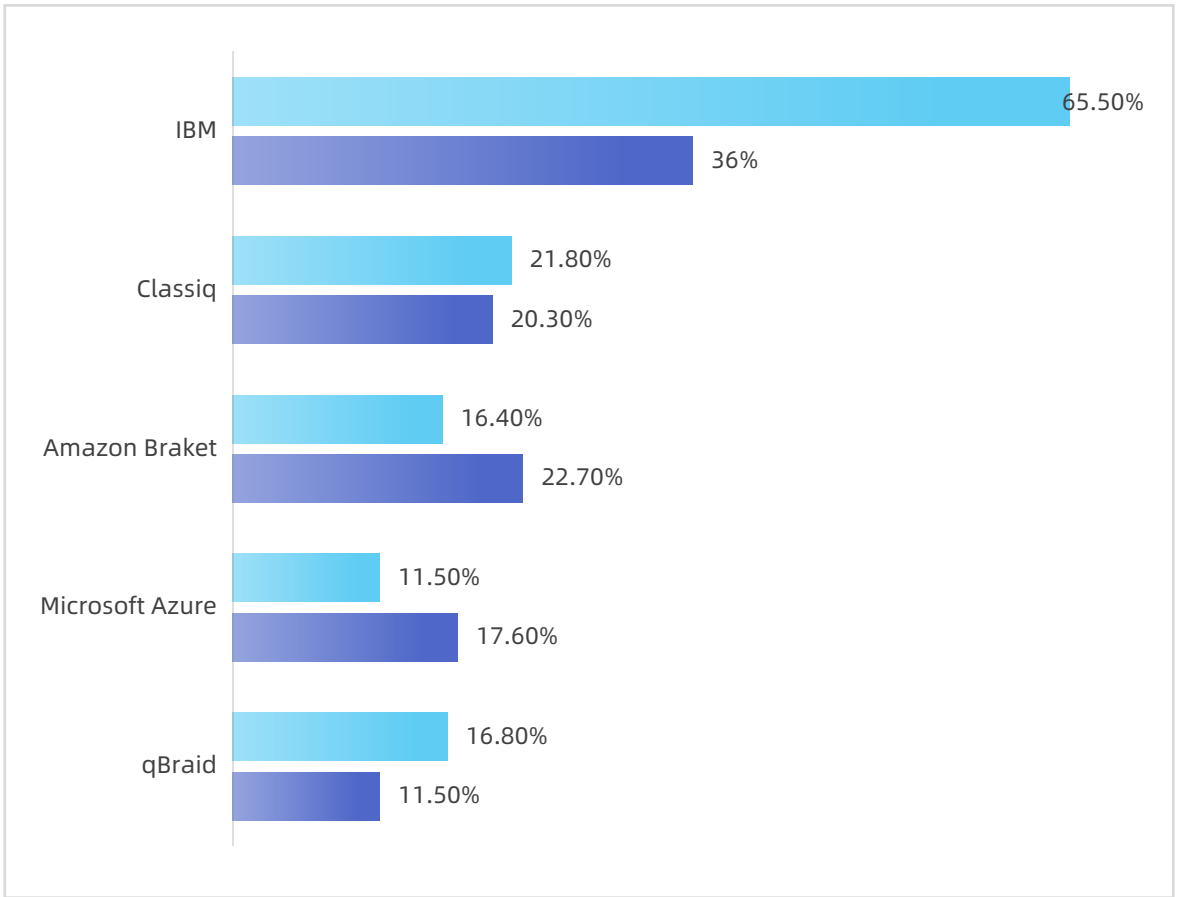
多后端的云服务平台需求提升

在2025年的行业格局下，异构算力的统一管理成为云平台的核心竞争力。以AWS Braket、Microsoft Azure Quantum平台为代表，领先的服务商已成功实现了对超导、离子阱、中性原子及光量子等多种主流技术路线硬件的统一接入和任务调度。通过构建高度抽象化的量子抽象层（QAL），云平台能够为开发者屏蔽不同底层物理架构的差异。这意味着算法工程师在进行组合优化或分子动力学模拟时，无需再针对特定硬件重新编写底层指令，而是可以根据实时算力需求，在同一套代码逻辑下灵活切换至最适合的硬件环境。这种硬件无关性的提升，极大地促进了量子算法在不同物理体系间的交叉验证与应用迁移。

Qunova Computing将其混合量子-经典化学算法HI-VQE以产品形态上架AWS Marketplace，并通过Amazon Braket提供运行入口。HI-VQE是面向NISQ设备的量子—经典混合算法。相比传统VQE需要大量泡利字测量带来的高开销，Qunova的切换式迭代减少了量子到经典的数据传输与测量负担，从而降低资源需求，使分子建模与材料反应模拟在更少量子资源下更接近化学精度，并宣称相对标准变分求解器有数量级的效率提升。用户在同一套云端流程下即可调用该算法，同时在Braket支持的多家量子硬件之间进行选择与切换，例如IonQ、IQM、QuEra、AQT、Rigetti等不同提供方的系统，从而体现统一接入、多后端可调度的资源池化能力。

根据Unitary Foundation发布的《2025年量子开源调查报告》（2025 Quantum Open Source Survey），在对852名受访者的调研中，目前的量子云服务市场呈现出明显的一超多强格局。IBM Quantum Platform目前以65.5%的使用率在行业中占据绝对主导地位。尽管这一数字相比2024年的69.3%出现了小幅回落，但它依然是全球开发者开展量子实验的首选平台。与此同时，市场上其他新兴平台也在快速成长。调研数据显示，Classiq以21.8%的使用率位居市场第二，紧随其后的是使用率为16.8%的qBraid以及16.4%的Amazon Braket。这些数据反映出开发者正在逐渐改变仅依赖单一硬件厂商云的习惯，转而投向集成度更高、能够支持多后端运行的云服务平台，量子计算的生态环境正向着多元化和标准化的方向演进。

图表 2025年全球量子计算云平台使用率Top5



数据来源： Unitary Foundation, *2025 Quantum Open Source Survey*

此外，开发者的关注点已从量子门的物理保真度转移到具体业务场景的实现，PennyLane（30.79%）、Qiskit Machine Learning（27.57%）及Qiskit Optimization（26.18%）等面向机器学习和优化的专用SDK使用率均大幅提升，而像Classiq这样主打功能合成而非手动设计门电路的平台也已获得21.8%的生态渗透率，有力地证明了底层复杂性正被有效地隐藏在简洁的工程接口之下。

2025年的量子计算云端生态已经形成了一个向上支撑应用场景、向下屏蔽硬件复杂性的坚固架构，未来两到三年内，随着容错量子计算进程的推进，我们预计将看到更多基于逻辑量子比特的云端应用。届时，量子计算将真正从算力的补充变为智能时代的核心引擎。

开发者生态与工具链：

屏蔽底层复杂性，聚焦实用价值落地

2025年，量子计算的开发者生态正经历着一场深刻的范式转移。早期的量子编程高度依赖于对量子门、比特相干性及物理噪声的底层认知，而现在的生态体系则通过高度抽象化的工具链，将这种复杂性隐藏在简洁的接口之下。这一转变的核心标志是开发者群体的大规模扩张——从物理学家和量子工程师，跨越到了更广泛的软件工程师、数据科学家乃至业务分析师。

根据Unitary Foundation 2025年量子开源软件调研报告（QOSS Survey）最新收到的1,400份调研结果，数据统计显示，尽管拥有量子研究背景的人员占比为56.4%，但具备经典编程与软件技术背景的开发者比例已攀升至52.3%。这组近乎对等的占比标志着量子计算已正式告别物理学家特权时代。量子工程师的定义正在泛化，一个融合了物理认知与经典软件工程能力的复合型人才库，正成为支撑2025年产业落地的第一动力。



07

下游应用与场景探索

目录

07
下游应用与场景探索

01 科学研究与材料模拟：量子优势的桥头堡

02 生物医药与化学计算：量子产业的价值高地

03 金融服务：从研究验证到实证应用

04 人工智能与消费级应用：量子算力的产品化探索

05 能源电网与基础设施：复杂系统的量子调度

06 国防、航空航天与国家安全：双用途技术的战略方向

下游应用与场景探索

2025年标志着量子计算行业发展进入关键转折阶段。过去十年的主线主要集中在物理实验层面的原理验证，而2025年更加明确地迈向功能性实用阶段。尽管容错量子计算（FTQC）的全面实现仍需时间，但本年度的一系列进展表明，基于混合架构的早期量子系统已具备解决特定高价值商业问题的能力。

从产业组织与合作关系来看，2025年的应用推进更呈现出“分工协作”的特征：在化工、医药、金融等方向，行业头部企业围绕具体业务问题牵头立项，与量子计算公司共同推进验证，并引入软件/平台方将方法与流程沉淀为可复用的工具与服务；在部分项目中，云与算力生态企业进一步参与集成与运行环境支持，提升与既有计算体系的兼容性与交付效率；与此同时，在能源、电网与国防等领域，量子企业与国家实验室或政府科研机构的联合研究与验证仍是重要形态，为关键场景提供工程条件与组织支撑。

在应用层面，行业呈现出明显的集成化趋势：量子计算不再以独立系统形态存在，而是作为高性能计算（HPC）工作流中的关键加速能力，被集成到材料发现、药物设计、金融风控及国防仿真等既有工业体系中。量子-经典混合计算模式的成熟，使得各国行业头部机构——如三菱化学、礼来制药、汇丰银行及国家电网——能够从概念评估转向更具体的试点部署。

01 科学研究与材料模拟：量子优势的桥头堡

材料科学与计算化学在2025年继续巩固其作为量子计算优先落地应用方向的地位。分子与材料的微观行为本质上遵循量子力学规律，利用量子计算机进行模拟在2025年取得了从理论探索向工业工具推进的进展。

工业级化学平台的崛起与范式重构

- 2025年8月，三井物产（Mitsui & Co.）、Quantinuum与QSimulate联合发布的 QIDO（Quantum-Integrated Discovery Orchestrator）平台，代表了量子计算在化学领域商业化落地的重要进展。其意义在于降低了量子技术在化学研发中的使用门槛，使其更接近工业研发人员可直接使用的工具形态。
- QIDO平台并非将经典软件直接迁移到量子端，而是采用了更深度的混合策略。平台利用QSimulate的经典引擎处理大多数非强关联体系的计算（如数千个原子的骨架结构），并将经典计算难以处理的强关联电子系统（Strongly Correlated Systems）——例如催化剂活性中心的金属原子轨道——分离出来，由Quantinuum的H系列离子阱量子计算机处理。据测试数据显示，该混合模式在模拟复杂分子和材料时的精度比开源软件高出10倍。

这一进展反映出两个关键趋势：

1）中间件层价值提升：能够自动识别分子中需要量子加速的活性空间（Active Space）并完成任务分发的中间件，正在成为连接底层硬件与上层应用的重要环节。

2）用户侧门槛进一步降低：终端用户（如JSR、松下等企业的化学家）无需理解量子门操作细节，即可通过图形界面获得量子计算带来的精度提升。这类面向用户的工程化体验，是技术扩散的重要信号。

多孔材料设计的算法突破

在碳捕获和氢能存储领域，多孔材料（如金属有机框架MOF）的设计长期受到组合规模急剧增长的限制。2025年9月，韩国科学技术院（KAIST）团队取得重要进展，首次利用量子计算实现了对多变量多孔材料（MTV-MOF）的高效设计。

深层分析：从试错到理性设计

- 传统方法在筛选海量有机配体与金属节点组合时，通常依赖大规模穷举筛选或经验选择。KAIST团队将材料拓扑结构映射为图论问题，并将组分、结构与平衡约束直接嵌入哈密顿量中。团队在IBM的127量子比特处理器上运行变分量子特征求解器（VQE），在大规模化学空间中锁定了基态配置（即更稳定的材料结构）。

该结果表明，即便在含噪声的中等规模量子（NISQ）设备上，量子组合优化算法也可能在离散变量空间中体现出对经典启发式算法的竞争力。这为能源行业探索碳中和相关材料研发提供了新的技术路径，并提示材料研发周期存在进一步缩短的可能性。

光敏材料与量子模拟的高精度需求

在更前沿的能源材料方向，三菱化学集团与PsiQuantum（在三菱日联金融集团MUFG支持下）的合作在2025年进一步深化，聚焦于光致变色分子（Photochromic Molecules）的激发态模拟。

光致变色材料在智能窗户、高密度光存储及太阳能调节等方向具有应用潜力，但预测分子在光照下的电子跃迁（激发态）难度很高，原因在于涉及高度纠缠的电子波函数，经典密度泛函理论（DFT）在部分情况下可能出现定性偏差。PsiQuantum基于其光量子容错架构路线图，目标是提供更高的化学精度能力。该合作表明，头部化工企业正在提前布局更高精度的计算工具体系，并希望通过量子模拟能力提升未来材料研发与专利布局的竞争力。

与此同时，D-Wave在2025年3月宣布利用Advantage2原型机在磁性材料相变模拟上实现了超越经典计算的结果。通过模拟可编程自旋玻璃（Spin Glasses）的动力学演化，D-Wave展示了量子退火在求解复杂物理系统基态问题上的速度优势——在经典超算Frontier上需耗时百万年的任务，在量子退火机上可实现分钟级。这不仅具有学术意义，也为磁性传感器及新型存储介质研发提供了可参考的仿真方法。

图表 2025年材料模拟方面应用进展概览

应用方向	关键合作/突破	技术核心	行业影响
药物/材料发现平台	Mitsui / Quantinuum / QSimulate (QIDO)	混合量子-经典工作流，自动化活性空间选择	降低工业界使用门槛，加速催化剂与电池材料研发
多孔材料设计	KAIST	变分量子算法 (VQE)，哈密顿量嵌入约束	解决组合规模增长问题，支持碳捕获与氢能存储材料筛选
光敏/光致变色材料	三菱化学 / PsiQuantum / MUFG	基于光量子容错架构的高精度激发态模拟	解决经典DFT在高度纠缠电子波函数下的偏差，提前布局材料专利。
磁性材料相变模拟	D-Wave(Advantage2)	量子退火模拟自旋玻璃动力学	在复杂系统基态求解上实现超越经典超算（Frontier）的速度优势。

02 生物医药与化学计算：量子产业的价值高地

2025年，生物医药领域的量子计算应用推进到更具体的商业合作阶段。药企对量子技术的定位从技术储备逐步转向面向核心能力建设的投入。

寡核苷酸疗法的量子推进

本年度最受关注的商业事件之一，是礼来制药（Eli Lilly）与Creyon Bio达成的总价值可达10亿美元的战略合作。合作聚焦核酸药物（RNA/DNA疗法）研发，体现了量子计算在基因医学研发环节的深入参与。

➢ 技术解构：AI与量子化学的融合

Creyon Bio的核心能力在于寡核苷酸工程引擎（Oligo Engineering Engine）。与小分子药物不同，核酸药物设计需要精确预测长链分子的三维折叠及其与靶标RNA的结合动力学。传统AI模型更多依赖实验数据训练，但在微观数据不足或噪声较大的复杂场景中容易受限。

该合作的关键逻辑在于利用量子化学模拟生成高精度分子相互作用数据，作为基准真值（Ground Truth）用于训练AI模型。这种量子生成数据 + AI推理的方式，有助于缓解生物数据稀缺与噪声问题。礼来的投入反映出该混合范式在开发针对难治性疾病（如神经退行性疾病）的RNA疗法方面的商业潜力。

催化反应动力学的快速模拟

在药物制造环节，IonQ、阿斯利康（AstraZeneca）、英伟达（NVIDIA）和AWS组成的联盟在2025年6月展示了重要进展。团队针对制药工业关键反应Suzuki-Miyaura偶联反应，利用量子计算机模拟了其镍催化过程中的氧化加成步骤。

该项目采用QC-AFQMC（量子-经典辅助场蒙特卡洛）算法，并结合Matchgate Shadows技术降低测量开销。在IonQ的Forte离子阱量子计算机上运行，同时由NVIDIA GPU处理张量网络收缩，实现了比现有最先进方法快20倍的求解速度。

其工业意义在于，量子计算不仅可能用于药物分子设计，也可用于优化合成路径。通过更快筛选催化剂与反应条件，药企有机会降低生产成本并减少化学废料，对绿色制造与成本控制具有直接价值。

光量子计算在肿瘤学中的前瞻

公开信息相对有限，但Xanadu在2025年披露的关于利用光量子计算加速癌症药物研究的进展值得关注。光量子计算在处理连续变量与玻色子采样相关问题上具备特点，可用于模拟生物分子的振动光谱（Vibrational Spectra）。通过更精确模拟药物分子与癌细胞受体结合时的振动模式变化，有助于更准确评估药物的亲和力与特异性，为靶向抗癌药研发提供补充方法。

量子计算+AI制药

玻色量子与广州国家实验室共同研发的基于QBM-VAE的量子增强的高保真深度学习方案，在单细胞组学数据分析这一关键任务上，评估了模型的系统性能。全面基准测试表明，在所有数据集的生物保护性和批次校正方面，QBM-VAE始终优于所有基线方法，展示了其卓越的整合能力。此外，在模型训练方面，相对于需要更长时间训练才能达到次优峰值的标准VAE模型，QBM-VAE仅经过50个训练周期就达到了较高的整合评分（在胰腺数据集上），收敛性大幅超越经典VAE。

03 金融服务：从研究验证到实证应用

金融行业对数值计算依赖程度高，且对边际优势敏感，因此长期作为量子计算应用的重要探索方向。2025年，该领域出现从衍生品定价研究走向实证交易效果评估的进展。

汇丰银行与IBM的债券交易实证

2025年9月，汇丰银行（HSBC）与IBM发布研究成果，展示在欧洲公司债券市场开展算法交易试验的结果。研究显示，量子增强模型在预测客户询价（RFQ）成交概率方面，相比经典行业标准模型提升了34%的准确率。

债券市场具有流动性较低、数据稀疏且噪声较高等特点，经典机器学习模型在高维稀疏数据上易出现过拟合或欠拟合。该工作利用IBM Heron处理器运行量子机器学习（QML）核函数，将市场数据映射到更高维空间，以提升可分性并改进预测表现。该案例增强了市场对近期量子设备在特定任务中可产生业务价值的预期。

投资组合优化的混合架构

除交易执行外，投资组合优化在2025年也出现工具链推进。随着NVIDIA CUDA-Q平台推广，金融机构更广泛采用混合计算架构。在该架构中，量子处理器作为协处理单元用于求解组合优化问题，经典GPU集群负责大规模数据预处理与回测。该分工模式正在成为金融工程应用的常见实现方式。

04 人工智能与消费级应用：量子算力的产品化探索

2025年，量子计算开始出现面向更广泛用户的产品化尝试，目标是降低使用门槛并拓展应用触达范围。

ChatQLM与量子AI助手

SuperQ于2026年CES发布消费级量子AI应用ChatQLM。其产品定位为增强数理逻辑与决策优化能力，通过专有量子杠杆模型（QLM），在后端调用量子退火机或优化求解器处理用户自然语言请求。应用场景包括资源配置、投资组合优化与路径规划等，目标输出更明确的可执行决策结果与可视化图表，而非仅提供文本。

软银的量子-AI生态

软银（SoftBank）在2025年继续推进量子与AI融合布局。除与Quantinuum建立战略合作外，软银也利用通信基础设施开展量子技术验证。例如，利用伊辛机（Ising Machine）优化5G基站参数设置，实现下行速率提升10%与传输容量提升50%的效果。这表明电信运营商可能成为量子优化技术的早期应用方与推动方。

05 能源电网与基础设施：复杂系统的量子调度

随着可再生能源并网比例提升与电动汽车普及，电网系统复杂性持续增加。2025年，能源行业开始尝试用量子优化算法应对不确定环境下的调度与规划问题。

机组组合问题的量子进展

IonQ与橡树岭国家实验室（ORNL）的合作项目展示了量子计算在电网调度问题上的能力。双方围绕机组组合（Unit Commitment, UC）问题开展研究。

UC问题需要在满足负荷需求、传输限制和机组物理约束（如爬坡率）条件下制定启停计划以最小化成本，属于混合整数线性规划（MILP）中的NP-hard问题。IonQ团队采用量子虚时演化（QITE）算法，相比更常见的QAOA，QITE在近期硬件上表现出更强的噪声鲁棒性与收敛特性。

在IonQ Forte Enterprise系统上，团队优化了包含26台发电机组、24小时周期的调度方案。该规模尚未达到国家级电网量级，但可覆盖微电网或区域子网需求，并验证了量子算法在处理分布式能源（DERs）并网带来的组合规模增长问题上的潜力。

浙江国网的量子应用探索

在中国，国网浙江电力在2025年展示了其在量子技术相关方向的布局。公开信息更多聚焦于数字化保障与AI助手（如e点通），但结合其过往在量子加密通信与配网安全方面的投入，可以看出电网企业正采取安全能力优先、计算能力逐步推进的路线：一方面通过量子通信提升控制指令安全保障能力，另一方面探索量子算法在局部配网优化与潮流计算中的应用。

06 国防、航空航天与国家安全：双用途技术的战略方向

2025年，量子计算在国防领域应用呈现更强的任务牵引特征。地缘竞争加速双用途技术转化，仿真与无人系统成为重点方向。

航空航天级数字孪生

美国初创公司BQP（BosonQ Psi）在2025年获得美国空军研究实验室（AFRL）合同，并完成近500万美元种子轮融资。其产品BQPhy平台利用量子启发式（Quantum-Inspired）算法与混合求解器，面向计算流体动力学（CFD）仿真。

高超音速飞行器与新一代航空装备设计需要高精度空气动力学模拟，常受制于经典算力瓶颈。BQP的求解器在现有GPU硬件上实现10倍加速，并为后续接入量子硬件预留接口（预计可达1000倍加速）。这类能力有助于提升数字孪生模型的计算效率，并缩短研发验证周期。

无人系统与边缘量子计算

ZenaTech成立量子计算部门，并在路易斯安那州建立研发中心，面向国防需求开发量子AI系统，目标是利用量子算法处理无人机群在复杂环境下的传感器数据，实现GPS受限环境下的自主导航与路径规划。

IonQ与Heven AeroTech合作聚焦将量子计算能力集成到氢动力重型无人机中，目标是提升无人机在物流补给或侦察任务中的决策效率，并增强在复杂电磁环境中的适应能力。

天基量子网络与安全

IonQ收购Capella Space是2025年航天与量子交叉方向的重要事件。Capella Space以合成孔径雷达（SAR）卫星星座业务为主，IonQ的收购意图与构建天基量子密钥分发（QKD）网络相关。

在低轨卫星部署量子载荷可突破光纤传输距离限制，推动全球覆盖的量子安全通信网络建设。这对国家安全级通信的长期安全保障具有意义，也反映出量子计算公司在基础设施层面的纵向整合趋势。



08

投融资与产业生态

目录

08
投融资与产业生态

01 全球投融资总体情况

02 重点企业融资与并购

03 巨头企业全栈布局趋势

04 初创企业与细分赛道

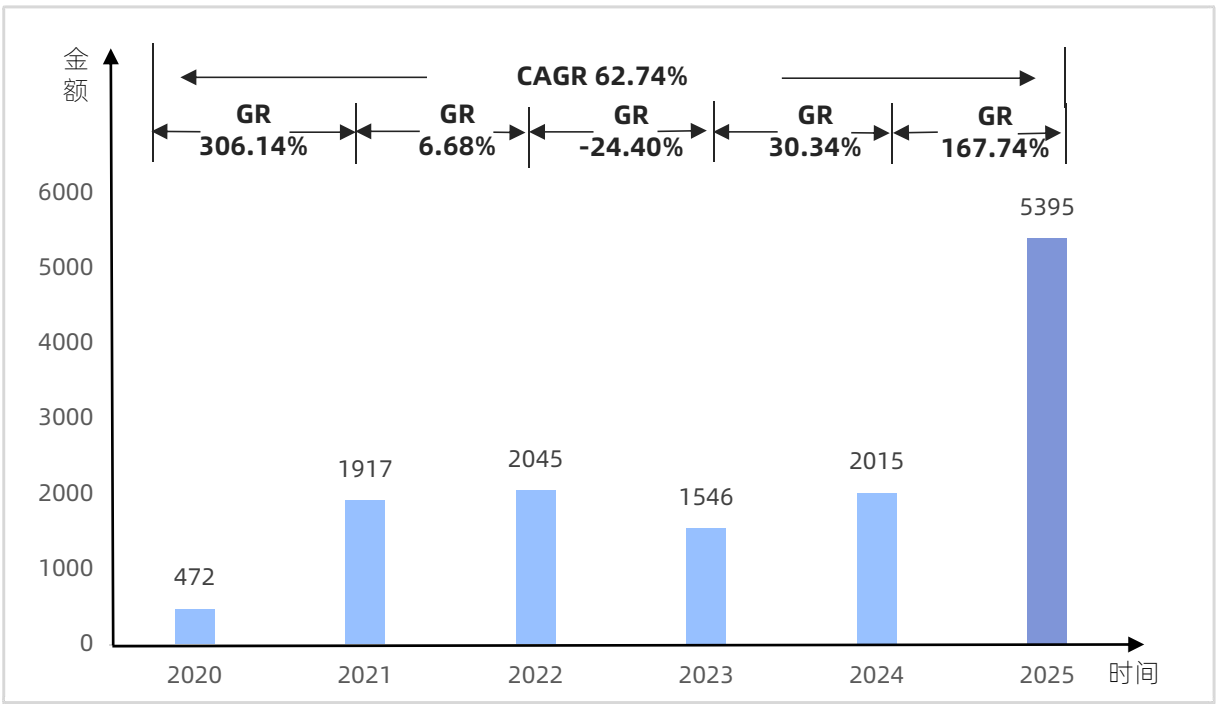
05 独角兽企业状况

01 全球投融资总体情况：显著增长，结构性上行

全球量子计算领域的投资规模在 2020—2025 年总体呈波动上行趋势。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，2023 年下降到了 15.46 亿美元，2024 年回升至 20.15 亿美元，2025 年进一步增长至 53.95 亿美元。2020 至 2025年，各年度融资总额的复合增长率（CAGR）为 62.74%。从同比看，2025 年较 2024 年增长约 167.74%，增幅明显高于前两年，反映本年度量子计算领域融资规模显著扩大。

需要注意的是，2025 年融资增幅较大，通常与大额融资事件增多、资金向头部企业集中等因素相关，融资规模的扩大更多体现在部分主体与部分方向；同时，中早期项目融资难度未必同步下降，行业内部仍存在分层。总体上，资金配置更偏向技术路线相对清晰、阶段性成果可验证、工程化推进较快的项目。

图表 2020-2025年全球量子计算融资总额（单位：百万美元）

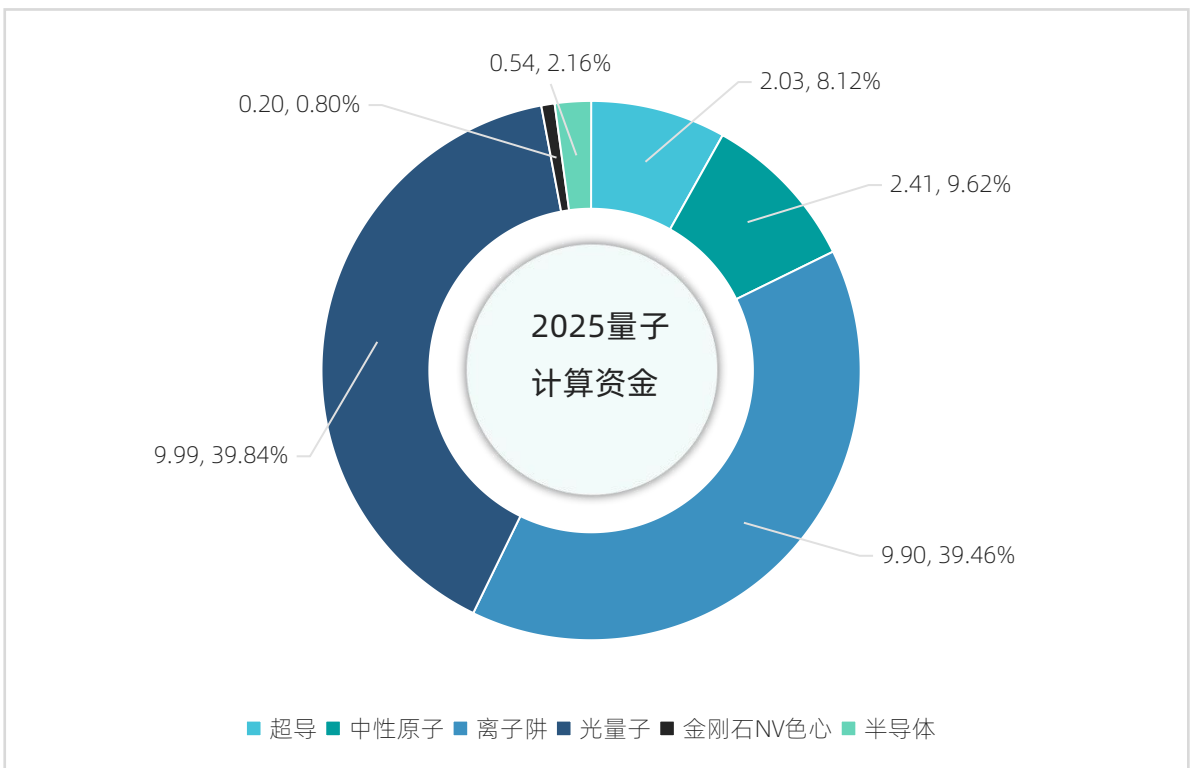


iCV TA&K | 2026.2

2025 年融资规模上升的原因主要包括以下方面。首先，外部宏观环境对长期科技投资的影响仍在，但投资机构在风险偏好与配置节奏上出现一定程度的边际改善；在政策支持、产业协同推进、技术进展持续释放的背景下，部分资金对量子计算领域的投入有所增加。其次，投资关注点进一步向工程化与系统化能力集中，资金更倾向于支持具备扩展路线、制造一致性路径、系统集成与交付能力的主体；这类项目融资体量通常更大，对年度总额拉动更明显。再次，2025 年软硬件资金分布呈现硬件主导特征，硬件融资占比超过七成，软件占比不足三成，说明行业仍以硬件平台能力为核心约束，软件生态的扩张在较大程度上依赖底层硬件的可用算力供给、系统稳定性与成本优化进展。

从技术路线分布看，资金进一步集中于少数更具可扩展性与工程化推进优势的硬件路线，其中光量子与离子阱占据主导份额；中性原子与超导处于第二梯队；半导体与金刚石色心等方向占比较低，更多体现为特定环节验证或细分应用牵引。该分布反映融资资金在选择上更强调扩展路径的明确性、工程进展的可验证性以及与产业化目标的匹配程度。

图表 2025量子计算技术路线融资占比图（单位：亿美元）

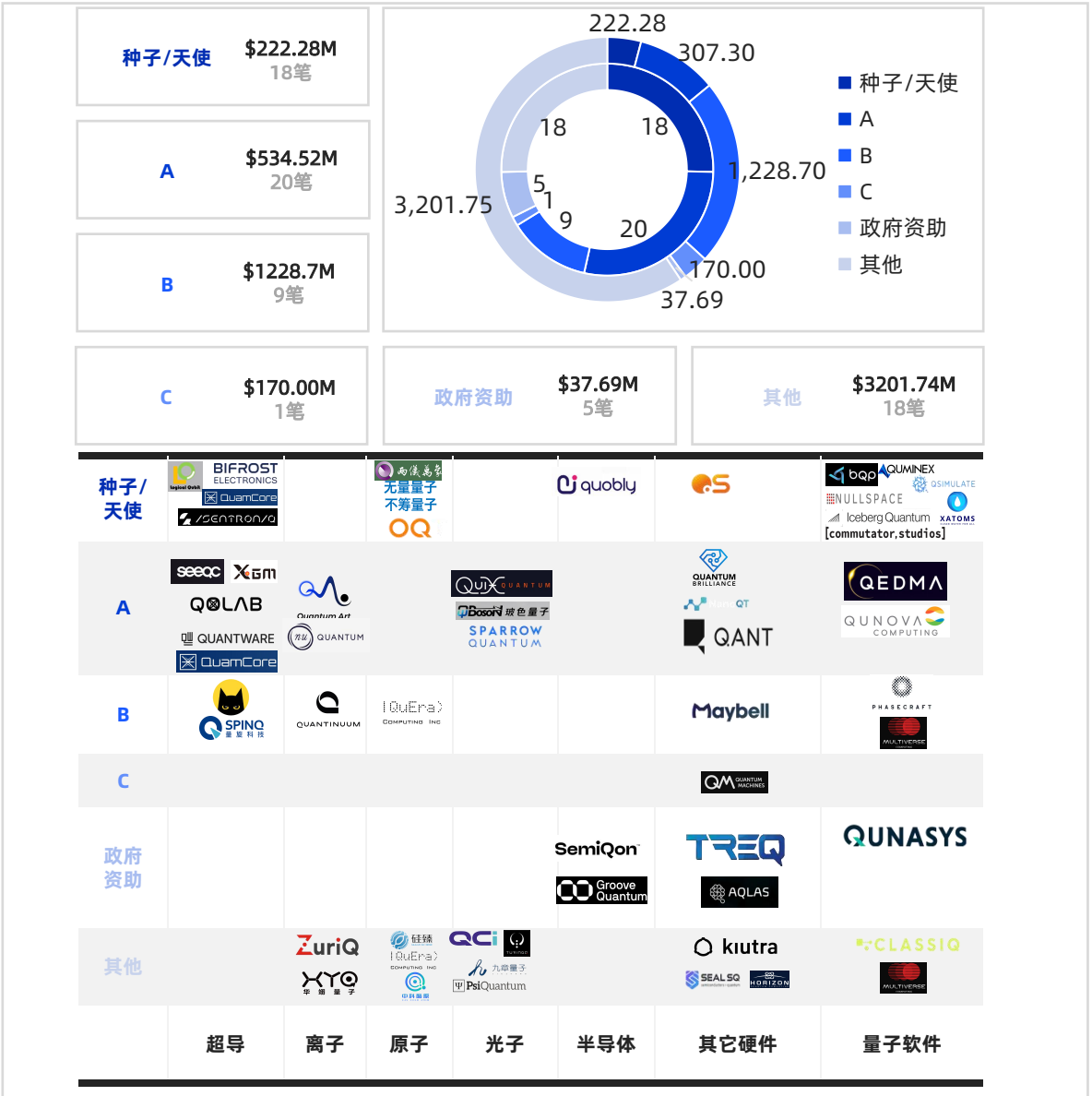


ICV TA&K | 2026.2

同时需要将 2025 年融资规模的增长放在整体科技投融资环境中观察。人工智能及相关方向仍在持续吸收大量资金与产业资源，量子计算总体仍处于研发投入与工程化验证阶段，商业化落地周期相对较长。因此，社会融资能否延续，取决于后续能否持续交付可量化、可复现的技术与工程里程碑，并在系统可靠性、可扩展性与成本等关键指标上形成更明确的阶段性进展。预计未来一段时间内，投融资仍将呈现头部集中与项目分层并存的格局：扩展路线清晰、容错与逻辑比特目标明确、系统工程与交付能力突出的主体更容易获得大额融资支持；而技术差异化不足、产业协同与客户牵引较弱的中小项目融资压力仍将存在。

量子计算投融资在 2025 年呈现出明显的修复与跃升态势

图表 2025年全球量子计算公司融资概览



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。

2025 年量子计算领域共发生融资事件 71 笔，融资总额达 53.95 亿美元，较 2024 年的 51 笔、20.15 亿美元，融资笔数增加 20 笔，融资规模同比大幅增长 33.8 亿美元，增幅约 167.7%，资本回暖趋势显著。

从融资笔数结构看，2025 年量子计算投融资呈现出早期项目活跃、中后期融资集中的特征。种子/天使轮共 18 笔，早期技术和新团队持续进入；A/B/C 轮合计 30 笔（其中A轮20笔，B轮9笔，C轮1笔），成为融资事件最为集中的阶段，反映头部企业在技术路线和商业模式上获得持续验证，跟投与加注行为明显。政府资助共 5 笔，在推动特定项目方面发挥了作用；其他或未披露轮次融资达到 18 笔，占比处于较高水平，显示产业资本、战略投资及非标准化融资方式在量子计算领域中的参与度不断提升。

从融资金额结构看，2025 年资金分布高度集中。“其他”类型融资金额高达 32.02 亿美元，占全年融资总额的 59.4%，成为拉动年度融资规模扩张的关键因素，显示并购整合、战略投资及多元化资本介入明显增强。A/B/C 轮融资合计 19.33 亿美元（其中A轮5.35亿美元，B轮12.29亿美元，C轮1.70亿美元），中后期单笔融资规模持续放大，反映企业估值水平和资本认可度同步提升。种子/天使轮融资金额为 2.22 亿美元，整体规模显著增加，体现了早期市场资本支持的力度正在加强。政府资助金额为 0.38 亿美元，在定向支持关键技术研发方面起到了引导作用。

综合来看，2025 年量子计算投融资呈现出融资规模显著放大、资金集中度提升、资本配置重心向中后期和产业落地方向转移等特征。资本投入开始更明确地围绕工程化能力、系统集成水平和商业化前景进行布局，标志着量子计算产业正加速迈向以规模化应用和产业整合为核心的发展阶段。

02 重点企业融资与并购：全球量子产业的工业化转型与版图重塑

2025年至2026年，全球量子计算行业已经从基础理论研究阶段进入了大规模工程化实施阶段。这一时期的重点企业，如PsiQuantum、Quantinuum和IonQ，都在通过数亿乃至十亿美元规模的融资和并购，试图在硬件制造、软件生态和通信网络上占据主导地位。

整体趋势表现为资本的高度集中化。过去由大量初创企业分散研发的局面正在消失，代之以少数几家资金雄厚、掌握全产业链资源的巨头。行业的发展重心已经从实验室里的物理特性验证，转移到了洁净室里的半导体制造工艺、低温超导线的量产以及跨地域量子网络设施的铺设。这种转变意味着量子计算正正式成为一种高端制造业和基础设施行业。

资本高度向全栈硬件巨头集中

目前的投资逻辑已经发生了显著变化。投资者不再倾向于小额投资多家初创企业，而是选择将巨额资金投入到那些已经完成技术原型验证、具备规模化生产能力的头部企业中。这些企业通常拥有从底层硬件设计到上层应用开发的全栈能力，能够为用户提供完整的计算解决方案。

|Ψ|PsiQuantum

QUANTINUUM

光量子路径的企业PsiQuantum获得了10亿美元的E轮融资，投后估值达到70亿美元。

离子阱技术路线的Quantinuum也完成了6亿美元的融资，估值高达100亿美元。IonQ则通过股权发行筹集了10亿美元。

这种资本流向反映出市场对容错量子计算的迫切需求。因为只有投入极高的资金，才能覆盖建设实用化量子计算中心所需的高昂硬件成本和工程支出。这也意味着新进入者的门槛被大幅度抬高，行业正在形成明显的梯队。

战略投资者深度嵌入生态

传统科技巨头和半导体企业正通过其投资部门，深度参与到量子计算企业的融资中。他们不再仅仅是量子算力的使用者，而是成为了量子公司的股东，旨在将量子计算技术整合进现有的高性能计算和人工智能架构中。

NVIDIA通过其风险投资部门NVentures，同时投资了中性原子路径的QuEra和离子阱路径的Quantinuum、光量子路径PsiQuantum。Google、AMD和英特尔资本也分别参与了QuEra、Classiq以及Quantum Machines的融资。

这种深度嵌入说明量子计算不会取代现有的经典计算，而是会作为一种特殊的加速器存在。科技巨头们通过投资，实际上是在提前锁定量子处理器与GPU、CPU之间的互联标准和软件协议，确保自己在混合计算时代的领导地位。

从研发投入向产能扩建转型

早期的资金主要用于支付科研人员的工资和购买实验设备，而2025年以后的资金流向则更偏向于工业基建。企业开始建设属于自己的量子芯片加工厂、大规模洁净室和自动化组装线。

欧洲的IQM利用3.2亿美元融资扩建芬兰的生产设施，目标是实现量子计算机的年产量。超导领域的Quobly、QuantWare以及提供低温配套设施的Maybell Quantum，其融资用途也明确指向了建立芯片量产线和提升低温系统的供应能力。

标志着量子产业正式进入了工业化生产的转折点。硬件的稳定性、一致性和良品率取代了单次的实验成功，成为了评价一家企业核心竞争力的重要指标。

并购策略由技术互补转向构建横向生态栈

领先的量子企业正在通过并购来拓宽业务边界，试图构建一个涵盖计算、传感和通信的完整量子技术栈。这种并购不再只是为了获取某项缺失的小技术，而是为了占领整个量子生态位的上游和下游。

IonQ通过收购Oxford Ionics获取了半导体控制技术，收购Vector Atomic切入了高精度导航和原子钟领域，收购Capella Space则是为了布局卫星基础设施。此外，BTQ Technologies收购QPerfect，也使其从安全加密专家转型为涵盖计算硬件的全栈公司。

这种横向扩张策略可以有效降低企业的供应链风险，并为其客户提供一站式的量子技术服务。当一家公司同时掌握了如何计算数据、如何精确测量环境以及如何安全传输信息时，其在政府和国防市场的议价能力将显著增强。

政府资金作为风向标与托底资本

在全球范围内，公共资金正在成为推动量子产业发展的重要力量。政府通过直接投资、政府采购协议和专项研究计划，为私有资本进入量子领域提供了信心保证。

加拿大政府的量子冠军计划、英国的量子任务试点，以及澳大利亚政府对PsiQuantum的联合投资。在中国，社保基金中关村专项基金、北京信息产业发展投资基金联合君联资本，领投华翊量子数亿元股权增资；玻色量子先后完成两轮融资：A + 轮由北工投资管理的北京市级政

府引导基金 —— 北京高精尖产业发展投资基金领投，该企业也是此基金投资的唯一量子计算公司，后续又完成数亿元 A++ 轮融资，由南山战新投联合领投、湖南财信产业基金等跟投。

由于量子计算的投资周期长、风险高，政府资金的介入起到了一种托底作用。这种公私合营模式确保了关键技术的持续迭代，同时也体现了量子算力作为一种战略资源的属性，各国都在竞相建立自主可控的量子产业链。

SPAC成为主要上市路径但风险并存

由于量子计算公司普遍处于营收前期，传统的IPO门槛较高。通过与特别目的收购公司（SPAC）合并，成为了许多量子初创企业进入公开市场的选择。Horizon Quantum、Infleqtion以及Xanadu均计划或已经通过SPAC合并方式实现上市。

这种模式可以快速获取二级市场的大规模资金，支持长期的研发投入。然而，SPAC模式也伴随着巨大的挑战，例如公开市场对公司业绩的严苛要求、投资者的赎回权以及股价的大幅波动。

在二级市场参与度上，中美两国呈现出截然不同的特征。在美国，SPAC（特别目的收购公司）成为许多量子初创企业进入公开市场的选择，如Horizon Quantum、Infleqtion以及Xanadu均计划或已经通过该方式上市。

相比之下，中国市场在短期内不会让量子计算公司实现IPO。这主要是因为量子技术路线尚未完全收敛，技术成熟度仍需长期磨炼，且中国资本市场的制度环境目前并不允许这类仍处于高研发投入、无盈利阶段且技术路径不确定的硬科技公司大规模上市。因此，中国企业更多依赖于政府引导基金和耐心资本的长期支持。

这一年的并购活动中，最为突出的特征是巨头企业对核心资产的快速收缴。在离子阱领域，IonQ的系列收购具有代表性。其以约10.75亿美元收购Oxford Ionics，核心意图在于将其专利的电子控制技术与自身的系统集成能力相结合。通过对Vector Atomic和Capella Space的收购，IonQ完成了一次从地面计算到卫星组网的跨维度整合。这种做法旨在构建全球首个天基量子密钥分发网络，直接面向未来的全球通信安全市场。

超导领域同样发生了重要的整合。Google Quantum AI收购了麻省理工学院孵化的Atlantic Quantum。此次收购的核心价值在于强化超导量子硬件的模块化扩展路线，Atlantic Quantum在提高量子比特相干时间方面的技术积累，补齐了Google在硬件耐用性上的短板，为其长期纠错路线图提供了保障。

此外，软件与算法层面的整合也在同步进行。量子软件平台Classiq通过C轮融资吸引了包括AMD、IonQ和高通在内的战略方。这类并购或深度投资，反映了硬件企业对软件兼容性的渴望，旨在建立一种通用的量子编程标准。

2025-2026年的投融资并购潮，是量子计算行业走向成熟的必经阶段。资本不再追逐虚幻的科学承诺，而是要求企业提供可量化的工程进度和明确的产能规划。

未来的竞争将不仅仅是不同技术路线（超导、离子阱、中性原子等）之间的竞争，更是全产业链整合能力的竞争。那些能够同时调动海量资本、整合上下游硬件资源、并获得政府战略支持的企业，将最终演变为量子时代的算力基础设施服务商。对于中小型企业来说，通过细分技术领域进入巨头的供应链体系，或是在软件算法等垂直赛道建立壁垒，将是其生存和发展的核心策略。

03 巨头企业全栈布局趋势

2025年以来，量子计算产业的竞争重心正在从单一硬件路线的性能提升，转向围绕可用能力构建可交付的平台。所谓全栈布局，核心不在于同时覆盖所有技术方向，而在于把量子计算的关键环节（硬件规模化、网络互连与安全、传感与授时、软件工具链、云端交付与政府市场）纳入同一商业与工程闭环，通过并购、联合研发与生态绑定，缩短从技术到场景落地的路径。

IonQ的全域生态战略

IonQ的全栈路径具有较强的并购驱动特征，其目标是把离子阱计算能力与量子网络、安全与传感能力打包为可持续迭代的平台型供给。

- 硬件层：在离子阱主航道上引入芯片化制造与控制能力

IonQ在自有离子阱体系基础上，以约10.75亿美元交易对价收购Oxford Ionics，获取其基于标准半导体工艺的离子阱芯片化路径与相关专利与团队，用于提升可制造性、集成度与扩展路线的确定性。

- 网络与安全层：构建量子网络、量子安全产品与天基链路

IonQ通过连续并购补齐网络与安全能力：完成对量子网络企业Qubitekk的收购，增强纠缠分发与多节点网络基础能力；收购ID Quantique的控股权益，切入量子密钥分发（QKD）与量子随机数等量子安全产品化体系；收购Lightsynq，获取量子存储与光子互连相关技术与专利；并通过收购Capella Space推进天基量子密钥分发网络计划，同时宣布收购Skyloom Global以补足空间光通信链路与天地一体化的高带宽连接能力。

➢ 传感与精密测量层：以收购切入PNT与国防航天需求

IonQ收购Vector Atomic，将精密原子钟、惯性传感、同步硬件等授时—导航—定位（PNT）相关能力纳入平台，使其在国家安全、航空航天与高可靠同步等场景拥有更直接的交付抓手。

➢ 软件与应用层：通过工具链合作降低开发与迁移门槛

在软件侧，IonQ通过参与Classiq的战略融资并建立合作关系，强化高层次建模与电路生成等能力，意在降低企业用户进入量子算法与混合工作流的工程门槛。

➢ 市场与政府服务：组织形态面向订单与标准体系

IonQ成立IonQ Federal，将政府与盟友客户相关的业务统筹在独立组织内，以更集中方式对接国防、科研与国家级项目需求，并强化在互操作标准与安全要求方面的话语权。

IonQ的全栈布局不是业务线扩张的简单叠加，而是围绕分布式量子计算与量子安全网络的长期路径，将计算、互连、安全与传感能力以并购方式快速拼接为可交付平台，并通过政府市场牵引形成更稳定的订单与生态约束。

其他巨头的全栈路径：差异化分工正在成形

➢ IBM：以量子中心超级计算为主线，强化软硬协同与纠错工程化

IBM与AMD推进量子中心超级计算合作，探索把GPU/FPGA等经典加速器纳入量子系统，实现面向容错所需的实时解码与调度；同时持续发布Nighthawk等新一代处理器并迭代软件与算法体系，强调从芯片—系统—云端调用的一体化路线。

- NVIDIA：定位为异构算力连接与加速平台，锁定混合计算入口

NVIDIA的重点是通过CUDA-Q与NVQLink把QPU接入GPU/CPU资源池，面向实时控制、校准、量子纠错与混合应用提供低时延互连与统一编排能力，并形成覆盖多家量子硬件厂商的合作网络。

- Microsoft：以底层物理路线+云生态并行推进，并强调企业量子就绪迁移

Microsoft发布Majorana 1（基于拓扑量子比特叙事的处理器），同时依托Azure Quantum组织多硬件资源与开发服务，并推出Quantum Ready计划推动企业在人才、流程与安全迁移方面提前布局。与此同时，围绕其拓扑路线也存在外部质疑与讨论，行业对其工程可验证性仍保持跟踪。

全栈布局的四个趋势特征

- 纵向深度整合成为默认选项：从芯片与系统到软件栈、云端交付与运维工具链的协同，被视为提升可用性与压缩迭代周期的关键。
- 横向能力扩张聚焦网络安全+分布式与传感授时两类高价值能力：IonQ的连续并购显示，量子网络、安全与传感正在从外围探索进入平台核心能力包。
- 异构混合算力加速落地：量子处理器被纳入HPC/AI体系的加速器矩阵，实时纠错与低时延控制推动GPU/FPGA与QPU的系统级耦合。
- 自主供应链与产能保障进入战略层：面向未来规模化交付，企业开始强化制造与关键资源可获得性，例如Quant Ware建设Kilofab、IQM扩建生产设施，以及围绕氦-3等低温关键资源的长期供给安排。

04 初创企业与细分赛道

2025年前后，量子计算领域的初创公司在硬件、软件、算法和传统超算融合等各层面均获得了显著的融资支持，反映出行业正从概念验证迈向规模化应用，各方资本正围绕完整生态布局。

Quobly（法国）-硅基量子计算硬件先锋

融资情况

2025年5月，Quobly宣布获得2100万欧元的融资包，用于加速其Q100T项目，即首款100个物理比特硅量子芯片的工业化。这笔资金包括法国国家投资银行Bpifrance在法国2030计划下提供的1500万欧元无偿拨款，以及股东追加的600万欧元股权投资。此前2023年，Quobly曾获创纪录的1900万欧元种子轮融资（欧洲量子硬件初创中规模最大）。充裕的资金为其硅量子处理器的研发和生产奠定基础。

技术路线与目标

Quobly专注硅自旋量子比特技术，走基于成熟半导体工艺实现量子芯片的路线。其量子处理器将在300毫米FD-SOI晶圆上制造，完全兼容现有CMOS工艺和设备。公司已在300mm晶圆上演示了单个量子比特的制备，证明技术可用现有晶圆厂量产。这一独特路径有望以较低成本扩展量子比特数量，官方规划到2027年实现百比特芯片的产业化投产，并远期瞄准百万量级量子比特的大规模量子计算机。正如其CEO所言，此轮融资标志着公司进入工业化冲刺阶段，大规模、可控、可扩展的硅量子计算愿景正在成为现实。

产业合作与生态

为了走通硅量子计算的产业化之路，Quobly积极构建产业伙伴关系：首先在制造端，与欧洲芯片巨头意法半导体(STMicroelectronics)建立独家战略合作，借助其300mm晶圆厂协同开发量子芯片工艺并负责代工生产。材料方面，联合硅晶圆供应商Soitec定制同位素纯化的28Si FD-SOI晶圆，以降低量子比特退相干噪声、提高保真度（首批晶圆已投入ST晶圆厂生产循环）。在软件与控制层面，Quobly与法国国家数字科研机构Inria签署战略合作，联合开发面向硅基量子硬件的中间件和量子纠错协议，实现硬件与低层软件的协同设计。此外，Quobly与初创公司QPerfect合作开发了GPU加速的量子电路仿真器QLEO：该模拟器集成了NVIDIA CUDA-Q支持，可将量子电路仿真速度提高两个数量级，为算法开发提供强大工具。在安全应用方面，Quobly与SEALSQ开展原生量子安全架构研发，探索将后量子密码安全芯片（Root-of-Trust模块）与可扩展硅量子处理器深度融合，为国防、金融等高安全领域打造安全可靠的量子计算解决方案。这一系列合作表明，Quobly正在构建从材料、制造到控制、应用的完整生态体系，以支撑其量子计算技术商业落地。

最新进展

Quobly在基础设施上也有重大投入：2025年2月，公司在法国格勒诺布尔高科技园区BHT3新建了量子芯片处理和测试中心。借助这一临近CEA-Leti、CNRS等研究机构的战略位置，新设施使Quobly的芯片测试速度提升了10倍，晶圆处理能力提高50倍，设计到测试的周期缩短至原来的三分之一。这大幅提高了研发迭代效率，加快从实验室技术向工业产品转化的进程。短短数年内，该公司凭借其借助半导体成熟工艺大幅提升量子芯片规模的独特战略，已成长为欧洲量子硬件领域的领军初创之一。

Classiq（以色列）-量子软件开发平台微软

融资情况

Classiq是一家定位为量子计算软件基础平台的以色列初创公司。2025年5月，该公司宣布完成1.10亿美元的系列C融资，这创下量子软件公司单轮融资额的纪录，使其成立以来总融资达到1.73亿美元。这一轮融资由Entrée Capital领投，参投方包括Norwest、NightDragon、三星Next等众多国际知名风投和企业投资者。随后在2025年11月，Classiq又获得了一批战略追加投资：量子硬件厂商IonQ以及AMD Ventures、Qualcomm Ventures等芯片巨头的风投部门纷纷入股，追加了数千万美元资金，使Classiq的累计融资额突破2亿美元。大型科技企业的加入表明行业对量子软件生态的重视，以及对Classiq平台前景的信心。

定位与技术特色

Classiq被誉为量子计算界的微软。公司致力于构建跨硬件的量子软件开发平台，通过自动化工具将高级算法需求转换为底层量子电路。其核心技术类似于电子设计自动化（EDA）在量子领域的应用：开发者只需在高层次上描述想实现的功能，Classiq的平台就能自动综合出优化的量子门电路，实现由高阶功能模型到硬件优化量子电路的一键式转化。这一方法极大降低了量子编程的门槛，帮助没有深厚量子背景的工程师和科学家也能构建量子应用。Classiq平台具备硬件无关性，支持主流的超导、离子阱等不同类型量子硬件后端，以及Azure Quantum、AWS Braket等云服务接口。平台还拥有60余项核心量子软件专利（已授权或申请中），体现了深厚的技术积累。

商业化进展

Classiq在市场上发展迅速。据报道，公司自2020年成立以来已连续三年实现用户和收入规模每年三倍的增长。其企业客户涵盖汽车、金融、咨询等行业的龙头（例如BMW、Rolls-Royce、Citigroup、Deloitte等），并与Microsoft、NVIDIA、AWS等科技巨头建立了合作关系，共同推动量子软件生态。Classiq的平台也被世界各地顶尖高校采用，纳入量子计算课程，用于培养下一代量子开发人才。本次融资后，Classiq正加速全球扩张，在欧洲、北美和亚洲增设业务据点，并计划将员工规模从65人再扩大一倍，以满足快速增长的客户需求。值得注意的是，产业投资方的入股也反映出一个趋势：软硬件协同正成为量子领域共识。例如AMD Ventures表示对Classiq的投资是看重其在量子与经典异构计算融合方面的关键作用，未来高层次量子软件将有助于量子计算与经典超算的无缝集成。展望未来，Classiq希望其平台成为各行业、政府和学术界开发量子应用的标准开发环境。凭借雄厚的资金和领先的技术定位，Classiq正朝着这一量子软件基础设施提供商的角色快速迈进。

Phasecraft（英国）-聚焦实际问题的量子算法公司

融资情况

Phasecraft成立于2019年，由多位量子计算和计算机科学教授创立，是英国领先的量子算法初创公司。2023年该公司完成种子轮和A轮累计约2000万美元融资后，在2025年9月宣布获得3400万美元的B轮融资，将公司总融资额推高到5000万+美元（含科研经费）。本轮由欧洲著名天使基金Plural以及Novo Holdings的量子基金联合领投，Playground Global等原有投资方继续跟投。Plural合伙人Ian Hogarth评论称：Phasecraft正在用以前被认为不可能的方法革新量子领域，可见投资界对其技术潜力的高度认可。充裕的资金将用于加速其量子算法研发和扩充团队，把更多理论突破转化为商业应用。

核心定位与技术优势

Phasecraft专注于开发超高效的量子算法，立志让量子计算早日发挥实用价值。该公司的算法具有硬件无关性，并与谷歌量子AI、IBM、Quantinuum等顶尖量子硬件团队建立了合作伙伴关系。Phasecraft的策略是充分利用当前NISQ（噪声中等规模）量子设备，通过优化算法设计，使其在现有有噪声硬件上就能解决原本需容错量子机才能解决的问题。例如，Phasecraft开发的量子增强算法可以与经典计算协同，利用如今有限规模的量子芯片，加速解决特定复杂问题，而无需等待远期完美无误的量子计算机。这使得一些原本无法触及的问题能够提前得到处理。Phasecraft的技术源于深厚的科研积累：其三位联合创始人（Toby Cubitt、Ashley Montanaro、John Morton）均是伦敦大学学院（UCL）和布里斯托大学的量子计算领军学者，在物理、计算机科学方面有多年研究成果。这种产学研背景使Phasecraft擅长将理论突破转化为实用算法。公司已在材料模拟、能源网络优化、药物分子研究等领域取得进展：例如其算法将材料模拟效率提高百万倍；在生物医药中用量子计算模拟关键生化过程，加速新药研发；并能优化国家电网等能源网络的结构以提升韧性。这些领域的早期成功案例证明了Phasecraft算法的价值。

商业应用与前景

Phasecraft正与多家终端用户开展合作研发，包括特殊材料公司Johnson Matthey、太阳能电池公司Oxford PV、英国国家电网运营商NESO以及英国电信公司BT等。通过与行业伙伴共同验证，其算法在实际问题上已展现出显著效果。随着硬件逐步提升，比特数和保真度不断提高，Phasecraft开发的算法有望率先在这些领域实现量子优越性或实用量子优势，为行业带来变革性突破。在硬件竞赛激烈的当下，Phasecraft则提供了另一条路径：通过算法创新弥补硬件短板，提前释放量子计算对现实世界的价值。



BQP（BosonQ Psi，印度/美国）-量子原生工程仿真与超算融合

融资与背景

BQP（商号BosonQ Psi）是一家跨美国纽约和印度班加罗尔运营的量子仿真软件初创公司，聚焦将量子计算引入工程仿真和数值模拟领域。2025年7月，该公司宣布完成500万美元的超额认购种子轮融资。本轮融资由Monta Vista Capital领投，纽约州创投基金New York Ventures以及Arc Ventures、Armory Square等多家风投参与。截至目前，公司累计融资约660万美元（包括此前孵化项目的资助）。值得注意的是，融资消息公布前，BQP已与美国空军研究实验室（AFRL）签署合作开发协议，共同推进量子加速的数字孪生模拟平台，这彰显了其技术在国防航天领域的潜在价值。BQP创始人兼CEO Abhishek Chopra因成功完成此轮融资还获得了2025年纽约上州创业大奖的年度风投交易奖项，显示出业界对其商业潜力的认可。

产品与技术定位

BQP的核心产品是BQPhy平台——一个面向混合架构（CPU+GPU+量子处理器）的工程仿真/数字孪生软件框架。与一般量子软件不同，BQPhy从诞生之初就定位为量子优先（quantum-first）的模拟平台，但又能在当前无量子硬件依赖的条件下运行。。BQP聚焦的应用包括计算流体力学(CFD)、有限元分析等复杂物理仿真，以及结合量子加速的机器学习(如物理引导的神经网络,PINN)。这些领域计算需求巨大，也是航空航天、汽车、电信等行业的关键瓶颈。通过量子计算与经典HPC并行，BQP希望打造模拟领域的黑石(BlackRock)——即支撑各种模拟软件的底层加速引擎。

市场进展与融合趋势

BQP的量子仿真方案受到航空航天与国防领域的浓厚兴趣：除了与美国空军实验室合作外，其设计伙伴还包括数家航空航天防务巨头（其中有全球最大飞机制造商）以及印度重工业部、ABB集团等。这些合作旨在将BQPhy融入现有仿真工作流，实现传统超算与量子计算并行运行：即在数据中心里，让经典HPC和量子加速器肩并肩工作。这种量-超融合模式能够在短期内通过量子启发算法解决经典计算的瓶颈（例如更快地训练流体力学仿真中的物理神经网络），同时也为将来量子硬件上线做好准备。本轮融资的领投方评价称：BQP瞄准了一个快速增长的220亿美元规模的仿真市场中的关键瓶颈，其量子驱动框架有望成为模拟生态系统的基础设施。这代表了投资界对量子计算融入主流仿真前景的看好。总的来看，BQP的探索体现了量子计算商业化的一条重要路径：先在软件层打通与经典体系的融合，用量子算法赋能现有工业应用，随硬件演进逐步提高加速比。从长远看，随着真正容错量子机出现，像BQP这样的平台或将成为数据中心的新常态，使量子计算成为关键任务模拟和大规模数值计算的有机组成部分。

05 独角兽企业状况

过去两年，量子计算独角兽群体的内涵发生了明显变化：资本市场不再只为物理量子比特规模买单，而是更关注可持续的工程化路径、面向纠错的系统能力、以及与国家级算力与安全基础设施的结合程度。以Quantinuum、QuEra、Atom Computing与IQM为代表的头部私营企业，正在把量子计算从实验室设备推进为可交付、可部署、可验证的产业化系统，并在地缘竞争与主权算力建设中占据战略位置。Quantinuum在2025年披露以100亿美元投前估值完成约6亿美元融资，成为当前估值最高的私营量子计算公司之一；IQM则在2025年完成约3.2亿美元（2.75亿欧元）B轮并跨越10亿美元估值门槛，标志欧洲在量产型全栈超导路线上形成独角兽级企业。

图表 前沿领域头部独角兽：市场进展与资本锚点概览

企业	资本与估值信号	关键技术/产品进展	产业化与全球化动作
Quantinuum	约6亿美元融资、100亿美元投前估值（2025/9披露）	Helios：98个全连接物理比特；同时推进软件栈与Guppy语言	与卡塔尔成立合作框架并推动区域生态；与新加坡国家量子机构合作，计划2026年落地Helios并设立研发与运营中心
QuEra	超2.3亿美元融资（2025/2披露），由Google Quantum AI与软银愿景基金2号领投，NVentures参与	中性原子门型路线；参与容错架构验证与算法级纠错研究	在日本AIST部署实验室外首台系统，与ABCI-Q形成混合算力平台；参与DARPA QBI推进可验证路线
Atom Computing	以逻辑量子比特交付为叙事核心，带动主权基金/科研基础设施投资	171Yb核自旋量子比特高保真门与中期测量/复用能力；与微软联合推进Magne	丹麦EIFO与诺和诺德基金会出资8000万欧元成立QuNorth，计划到2026年底运行50逻辑比特的Magne
IQM	3.2亿美元B轮并进入10亿美元估值区间（2025/9披露）；累计融资约6亿美元	面向纠错的Halocene产品线，起步150比特并规划扩展	投资超4000万欧元扩建芬兰产线，目标年产约30台系统，Q1 2026完成扩建

Quantinuum
高估值背后的全栈闭环能力

Quantinuum的资本溢价，核心来自其硬件高保真+软件栈升级+全球交付能力的组合。2025年9月，霍尼韦尔披露Quantinuum以100亿美元投前估值完成约6亿美元融资，并引入（或强化）多类产业资本与金融资本参与，释放产业化加速的强信号。

- 在产品侧，Quantinuum于2025年发布Helios，强调98个全连接物理量子比特及高门保真，并同步推动以Guppy为代表的新软件栈，目标是降低混合编程门槛，使量子与经典控制在同一开发范式下协同。

- 在市场侧，Quantinuum将主权量子基础设施作为出海抓手：一方面在卡塔尔推动合资与生态合作框架，形成面向区域应用与人才体系的长期投入预期；另一方面与新加坡国家量子机构达成合作，计划2026年在当地安装Helios并设立研发与运营中心，强化海外落地交付的确定性。

QuEra
中性原子路线的产业绑定与可验证化

QuEra的定位更接近可扩展架构的工程化承包商：2025年披露完成超过2.3亿美元融资，由Google Quantum AI与软银愿景基金2号领投，并获得NVentures等战略资本参与，资金用途明确指向大规模容错系统的开发与制造能力建设。其产业化动作具有标志性：QuEra获得日本AIST约65亿日元合同，系统在AIST现场部署并与NVIDIA加速的ABCI-Q超级计算平台并置，形成面向科研与产业的混合算力环境。这一模式把量子机从云端远程访问推进到超算中心/研究机构的本地设施，对后续运维、调度与混合工作流具有示范意义。

在技术路径上，QuEra参与的448中性原子容错架构工作强调将关键纠错元素集成到同一体系中，并以可验证的阈值行为来论证扩展性；同时QuEra进入DARPA QBI的阶段性推进体系，使其路线具备更强的第三方评估框架与里程碑约束。

Atom Computing
以逻辑比特交付为牵引的主权计算路径

Atom Computing的差异化在于把逻辑量子比特交付作为对外叙事核心，并借此与主权基金、国家级科研基础设施深度耦合。丹麦EIFO与诺和诺德基金会出资8000万欧元成立QuNorth，并计划引入由Atom提供硬件、微软提供软件与云栈集成的Magne系统，目标是在2026年底实现50个逻辑量子比特的运行能力。这类以逻辑比特为验收口径的投资结构，正在成为欧洲主权量子项目的重要范式。

在技术论据上，Atom围绕171Yb核自旋量子比特的高保真门操作与可重复的中期测量、复位与复用能力开展成果发布，直接对应容错体系所需的纠错循环与资源复用机制。

IQM
欧洲超导独角兽的生产线与纠错双主线

IQM的独角兽地位主要来自融资规模+量产能力建设+纠错产品化。2025年9月，IQM披露完成约3.2亿美元B轮融资并使估值跨越10亿美元，路透社等也披露其累计融资约6亿美元。与许多以单机指标为中心的公司不同，IQM把资本开支明显投向制造体系：2025年11月披露投资超4000万欧元扩建芬兰生产设施，目标把芯片制造与整机装配能力提升到年产约30台量子计算机，并预计2026年一季度完成扩建。

同时，IQM发布面向纠错研究的Halocene产品线，起步150量子比特并规划向更大规模演进，试图把纠错研究平台做成可交付产品，而非单次定制项目。



09

量子计算整机竞争格局分析

目录

09
量子计算整机竞争格局分析

01 硬件整机供应商评价

02 硬件整机代表性厂商

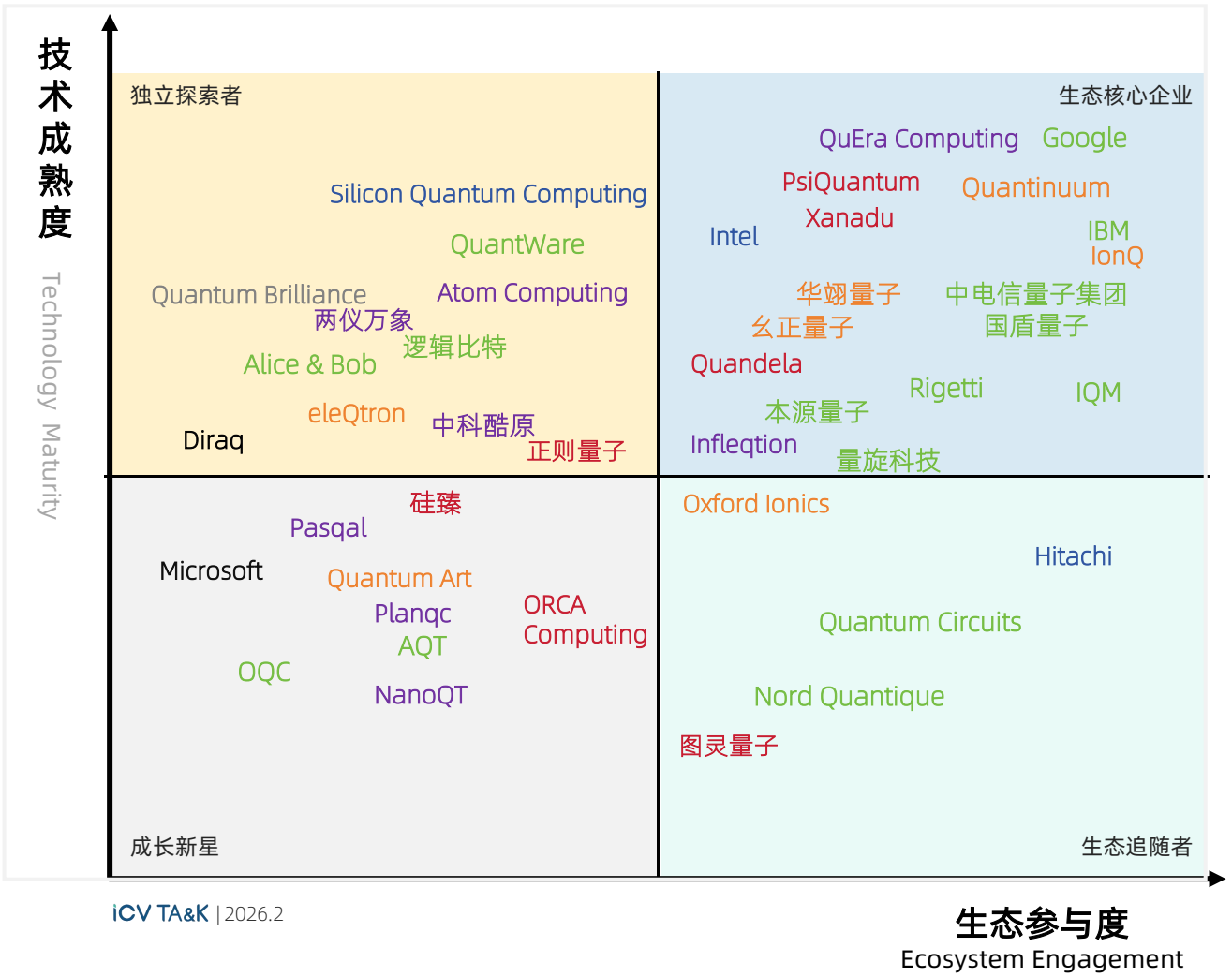
03 量子计算上游代表性厂商

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



iCV TA&K | 2026.2

Q-EMC模型：2025-2026全球量子计算产业竞争格局分析：

- 生态核心企业的护城河加深：位于右上象限的生态核心企业，如IBM、Google、IonQ、Quantinuum、QuEra、Xanadu、PsiQuantum及中电信量子集团、国盾量子、华翊量子、幺正量子 、量旋科技、本源量子等，在2025年进一步巩固了其领军地位。这一年，这些企业不再仅通过比特数量确立优势，而是致力于系统纠错与生态整合。这些企业拥有最高的硬件成熟度，并通过开放云平台与开源软件栈，吸引了全球最广泛的开发者群体，构建了难以逾越的生态壁垒。

- 独立探索者的垂直突围：左上象限的独立探索者，如Silicon Quantum Computing、QuantWare、Atom Computing、Alice&Bob、两仪万象、正则量子等，在2025年展现了极强的单点突破能力。这类企业虽然未像核心企业那样构建庞大的全栈生态，但在特定技术指标上往往能实现反超。这一象限的企业通过深耕底层硬科技和垂直整合，保持着极高的技术自主性，成为细分领域中不可替代的关键力量。

- 生态追随者的路径择优：右下象限的生态追随者，包括Quantum Circuits、Hitachi、图灵量子，主要采取融入巨头生态或专注于应用层开发的策略来弥补硬件成熟度的相对短板。这些企业显示出极高的生态参与度，是量子计算技术向实际商业场景渗透的重要推动者。

- 成长新星的潜力释放：左下象限的成长新星，如Oxford Ionics、Pasqal、Quantum Art、ORCA Computing、Microsoft、硅臻量子等，虽然它们在目前的技术成熟度或生态广度上尚有提升空间，但凭借颠覆性的技术路线成为了资本与关注的焦点。

透视各象限企业的分布，可以清晰观察到2025年五大技术路线的演变特征：

- 超导路线：依然是生态核心象限的基石。IBM、Google与国盾量子等巨头通过工程化迭代，确立了该路线在通用计算领域的标准地位。QuantWare等独立探索者的加入，进一步推动了超导芯片的标准化与代工模式，使得该路线的产业链最为成熟。

- 离子阱路线：呈现出两极分化的强劲态势。IonQ与Quantinuum在核心象限稳扎稳打，持续提升保真度；而Oxford Ionics与Quantum Art作为成长新星，通过电子控制与多核架构创新，正在解决该路线难以扩展的传统痛点，展现出极高的成长性。

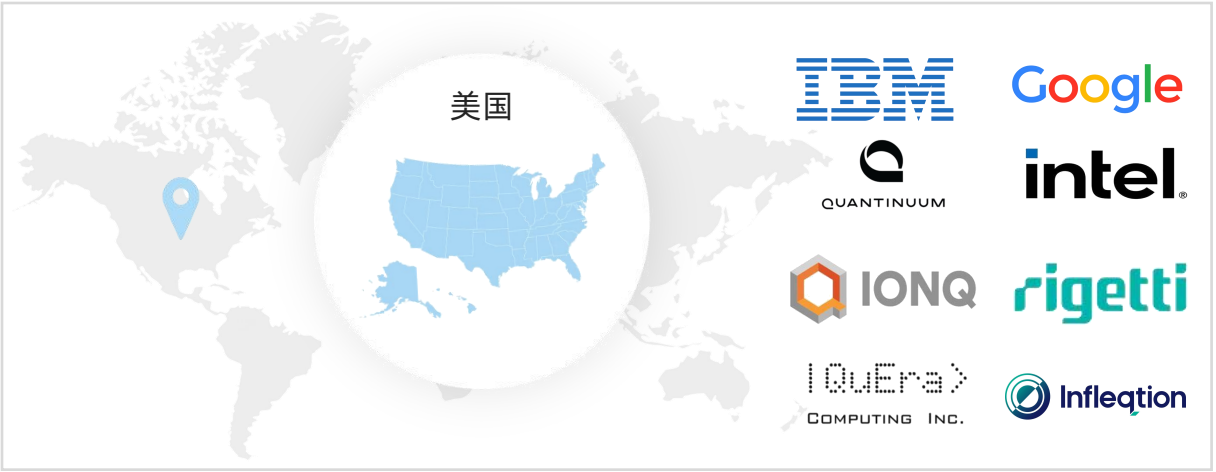
- 中性原子路线：是2025年跨越象限最广的黑马。从核心象限的QuEra到独立探索的Atom Computing，再到成长新星中的Pasqal与中科酷原，该路线凭借在大规模纠缠与长相干时间上的天然优势，正在全面向实用化迈进，成为挑战超导地位的最强竞争者。

- 光量子路线：保持着独特的竞争生态。Xanadu与PsiQuantum在核心象限引领容错计算的探索，而图灵量子与ORCA Computing则在新星象限通过专用光芯片在AI与安全领域寻找落地场景，显示了该路线在特定任务上的不可替代性。

- 硅基与拓扑路线：主要集中在探索与新星象限。Silicon Quantum Computing与Microsoft代表了这一阵营，虽然工程化难度大，但凭借与半导体工艺的兼容性及理论上的免纠错潜力，依然被视为终极通用量子计算的最有力候选者。

02 硬件整机代表性厂商

图表 美国硬件整机代表性厂商



iCV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2026.2

美国：头部公司集中度高，路线与标准多由少数企业主导

IBM于1911年创立，是全球混合云与AI领域的领军者。在量子计算方面，其战略重点已转向提升电路深度与容错能力，发布了120比特的Nighthawk处理器以在2026年实现量子优势，并推出了验证容错关键技术的Loon处理器。结合Qiskit新增的C-API接口以深度融合高性能计算（HPC），以及新的300毫米晶圆制造工艺，IBM更新了技术路线图，计划于2029年上线首台大规模容错量子计算机Starling。

Google于1998年创立，是全球科技与量子计算领军企业。2025年，Google Quantum AI取得重大突破：利用Willow超导量子处理器，通过量子回波算法实现了可验证的量子优势，其复杂物理模拟速度比超级计算机快1.3万倍。在纠错方面，团队实验演示了动态表面码，实现了领先的错误抑制因子。战略布局上，Google入选DARPA量子基准测试计划（QBI），并收购了Atlantic Quantum以加速容错量子计算机研发。子公司Sandbox AQ持续深化量子安全与模拟布局。

Quantinuum由2021年霍尼韦尔量子解决方案部门与英国Cambridge Quantum合并而来。2025年，Quantinuum推出通用商用量子计算机Helios，集成98个全连接物理量子比特，并深化与NVIDIA的合作。在H2-1系统上，其量子体积（Quantum Volume）达到2 23，刷新行业纪录。更关键的是，团队利用8量子比特纠错码，使逻辑非克利福德门的错误率（≤2.3×10−4）首次低于物理门基准，成功跨越纠错盈亏平衡点。此外，公司完成约6亿美元融资，估值达100亿美元，计划于2029年交付全容错量子计算机Apollo。

Rigetti Computing成立于2020年，由前IBM研究人员Chad Rigetti创办，是全栈量子计算先驱。2025年，公司全面推出业界最大的多芯片模块化量子计算机Cepheus-1-36Q，实现了99.5%的中位双量子比特门保真度，较此前Ankaa-3系统的错误率降低两倍。其9比特Novera系统也获得多份商业订单。公司更新路线图，计划于2026年底部署保真度达99.7%的150+比特系统。

IonQ成立于2015年，是首家上市的量子计算公司。2025年，IonQ通过收购Oxford Ionics、Vector Atomic及Capella Space等企业，加速构建涵盖计算、网络与传感的全生态布局。技术上，其Tempo系统提前达成算法量子比特#AQ 64里程碑，并利用电子量子比特控制技术实现了99.99%的双量子比特门保真度。商业化方面，IonQ与韩国KISTI签署协议交付100比特量子系统，并与Toyota Tsusho、芝加哥大学等机构建立战略合作，持续引领全球量子商业化进程。

Infleqtion是全球领先的中性原子量子计算公司。2025年，公司宣布与Churchill Capital Corp X合并上市，投前估值达18亿美元。在技术层面，Infleqtion推出了基于中性原子的新架构Sqale，展示了创纪录的1600个物理量子比特阵列，实现了99.73%NVIDIA（通过NVQLink）及橡树岭国家实验室深化合作，推动量子与高性能计算（HPC）的集成。

Intel是全球半导体领军企业，依托大规模制造优势深耕硅自旋量子比特。2025年，Intel在6个量子点组成的线性阵列中实现了两个仅交换（exchange-only）量子比特的并行操作，单比特门保真度超99.9%，并首次演示了此类量子比特的iSWAP门及电荷锁定读取技术。此外，Intel与学术界合作，深入研究了Si/SiGe量子阱中的能谷劈裂关联，并开发了基于势垒栅脉冲的单次锁存读取技术。这些进展进一步验证了利用工业级300mm半导体工艺构建可扩展、高保真量子处理器的潜力。

QuEra由哈佛大学与MIT联合创立，是中性原子量子计算领军企业。2025年，公司完成2.3亿美元B轮融资。技术上，QuEra利用448个原子的可重构阵列展示了通用容错架构的关键要素，实现了逻辑魔态蒸馏及2.14倍的错误抑制增益。商业化方面，QuEra向日本AIST交付了首台本地部署的量子计算机，并与Dell及Deloitte达成战略合作。此外，公司入选DARPA量子基准测试计划（QBI），加速构建实用级容错量子计算机。

图表 中国量子计算硬件整机代表性厂商



iCV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2026.2

中国：多路线企业持续推进，真机发布、交付与云端开放同步推进。

中电信量子集团
CHINA TELECOM QUANTUM GROUP

中电信量子集团成立于2023年，是中国电信股份有限公司全资子公司。2023年11月发布“天衍”量子计算云平台，提出超算与量子算力融合的混合架构，并将“天翼云”超算资源与176比特超导量子算力纳入统一服务体系。2024年5月发布“四算融合试验场”，同年12月推出“天衍-504”真机。2025年11月完成“天衍-287”系统搭建（105数据比特、182耦合比特）。同年上线教研平台，围绕课程、实验与实践训练构建一体化学习体系，并与多所高校共建量子相关创新生态。2025年举办量子科技与产业大会，吸引117家企业参展，进一步提升其在产业协同与生态组织方面的影响力。

国盾量子成立于2009年，长期深耕量子信息领域，是中国量子信息产业化的核心企业。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。2025年，公司推出ez-Q Engine 2.0测控系统最高支持128个量子比特、256个耦合比特，可通过多机箱扩展到千比特规模，并支持并行读出与低时延反馈。ezQ-Fridge500/1000/1500等稀释制冷机可提供≤10 mK环境并已实现多套交付，用于多比特系统搭建。2025年，公司参与祖冲之3.2号表面码（码距7）量子纠错相关工程工作，多名同事署名论文，并承担部分芯片标定筛选、室温电子学软硬件与整机搭建运维支持。

量旋科技 2018 年成立，已构建涵盖超导量子芯片、芯片设计 EDA、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的全栈自主研发体系。2025 年，公司产品销售网络覆盖全球 40 多个国家和地区，全球化布局持续推进。产品方面，推出百比特级 S100、S25 Pro 超导量子计算机，发布量旋三角座 II 、上线 AI 量子智学系统，实现教学产品向基础科研领域延伸。软件算法上，研发出可处理 1000 + 比特规模的新一代分布式量子优化算法，药物反应模拟量子算法取得业界领先高精度突破，双向解析量子机器学习模型成果入选顶刊。公司与湖北大学、路邦科技等达成合作，推动量子计算在教育与产业落地。同年，量旋科技连续完成数亿元 B 轮、C 轮融资，并与 Google、IBM 一同入选全球十大最具影响力量子公司。

相干科技依托来自北京量子信息科学研究院的顶尖人才团队、卓越的超导量子计算科研实力与深厚的工程化经验，在量子计算测控与整机研发赛道中崭露头角，成为一股备受瞩目的创新力量。目前，公司已取得一系列技术进展与商业化成果，包括高密度量子测控线路（SMA/SSMP/SMP3系列）；量子计算测控电子学一体机包括微波直发直采模块、量子直接读取模块、高精度电压源模块，以及100+量子比特超导量子计算机（预计于2026年夏天发布）。2025年1月，相干科技宣布完成3000万元的天使轮融资，获得中科创星投资。此次融资旨在加速助力相干科技研发第一代量子计算整机，构建百比特级超导量子计算平台，并致力于打造商业化量子算力服务平台。

逻辑比特科技于2022年6月在杭州成立，公司以实现超低错误率的“逻辑比特”为目标，致力于研发规模化超导量子计算系统。核心团队源自浙江大学超导量子计算团队，具备深厚的技术积累与研发实力。公司创始人兼CEO王震为浙江大学特聘研究员；首席科学家王浩华教授曾于2007至2010年间在John Martinis（2025年诺贝尔物理学奖获得者）实验室从事超导量子芯片研究，为团队奠定了扎实的技术基础；法人代表郭秋江博士作为团队核心技术骨干，先后参与研发“莫干一号”“天目一号”等超导量子芯片，并于2022年主导实现比特数超过100、平均相干时间超过100微秒的“天目2号”芯片。团队已形成覆盖芯片设计、微纳加工、射频操控到量子计算与模拟的全流程技术能力。

本源量子成立于2017年，是中国首家量子计算独角兽企业，也是中国目前唯一同时具备超导及半导体量子计算机整机交付能力的公司。公司业务涵盖芯片设计与制造、核心硬件及软件体系。本源量子公司对外宣传其创造了数项全球及中国全国第一，包括：全球首个硅基半导体量子计算云平台、中国首款量子计算编程框架Qpanda、首个量子计算学习工具本源量子学习机、全球首个量子化学应用系统ChemiQ、中国首个量子计算全球开发者平台、中国首个专用于量子芯片生产的激光退火仪、中国首个量子芯片高真空存储箱、中国首款量子计算超低温温度传感器、中国首条量子 AI 芯片产线、中国首款量子计算机操作系统、中国首个量子芯片设计工业软件、中国首个“量超协同学习” 量子算法开发工具。以上信息均来自本源量子官网。

两仪万象科技有限公司成立于2024年7月，孵化自“清华大学原子量子计算研究团队”，专注于原子量子计算的整机研制、产品研发和技术创新，致力于构建完整的量子计算产业生态。公司第一代原子量子计算机为全球领先的光镊囚禁超冷铷原子阵列平台，搭载多项突破性技术：通过动态重排技术构建数百比特无缺损可编程原子阵列，支持千比特扩展;依托自主研发的快速FPGA重排、高保真里德堡激发与全连通两比特门操控，核心指标达国际领先水平。两仪万象将以原子量子计算整机研制为牵引，开展相关元器件及副产品的设计与开发，链接上下游企业，实现从硬件到软件的全栈技术自主可控与产业引领，探索在精密测量、人工智能、材料化学、生物医药等行业的示范应用。

中科酷原依托中国科学院精密测量科学与技术创新研究院的顶尖人才团队、深厚的中性原子科研积淀与卓越的工程化能力，在量子计算与量子精密测量双赛道中强势领跑。目前，公司已取得一系列突破性技术进展与商业化成果，包括发布中国首台百比特原子量子计算机汉原1号，并成功斩获超4000万元订单及首个海外出口订单，在云端服务方面，公司上线了首个原子量子计算云平台并实现真机互联，由武汉大学、武汉量子技术研究院与中科酷原共同开发，提供在线中性原子量子计算真机任务提交，并集成量子线路模拟、量子动力学模拟与量子材料模拟等功能，形成面向科研与开发者的一站式入口。

华翊量子依托清华大学量子信息中心段路明院士领衔的顶尖人才团队与深厚科研积淀，在离子阱量子计算领域持续领跑，已研发出全球首个基于二维离子量子比特阵列的通用技术架构。目前，公司取得了突破性技术进展与商业化成果，不仅于2025中关村论坛发布了百比特离子阱量子计算原型机，还联合发布了无极一号离子阱装置。2025年，华翊量子宣布完成数亿元的新一轮（A轮）股权融资，由社保基金中关村自主创新专项基金、北京信息产业发展投资基金与君联资本联合领投,。此次融资旨在加速核心量子计算技术的研发迭代，深化量子计算在人工智能、金融及生物医药等领域的产业化落地。

幺正量子成立于2022年7月，由中国科学院量子信息重点实验室郭光灿院士团队孵化，是中国唯一一家专注于QCCD（量子电荷耦合器件）技术路线的离子阱量子计算企业。公司以离子阱系统为核心，以实现分布式量子计算为长远目标，致力于提供模块化、标准化、规模化的量子计算系统及高端光电测控仪器。2025年，幺正量子在核心硬件与服务生态上取得了里程碑式突破。在硬件方面，公司成功完成中国首台4K低温QCCD芯片型离子阱量子计算系统的组装调试。在服务方面，幺正量子面向全球正式开放12比特（全连通）离子阱量子计算云服务；同时推出了多光子纠缠源系统平台开放服务方案，为高校与科研机构提供定制化的实验验证支持。

玻色量子成立于2020年底，依托来自斯坦福、清华等顶尖学府的人才团队，在实用化专用光量子计算领域处于领军地位，技术居于国际领先水平。公司致力于打造实用化量子计算机，核心产品包括相干光量子计算机、相干光量子计算云平台及中国首个量子玻尔兹曼机（QBM）及开源编程套件KPP，相干光量子计算机具备室温稳定运行、设备体积小、全连接架构及高能效比等独特优势。2025年，玻色量子迎来了技术与产业化的爆发。公司正式发布了1000量子比特的相干光量子计算机，并于深圳落地了中国首个规模化专用光量子计算机制造工厂。在商业落地方面，其1000量子比特相干光量子计算机真机已成功交付北京电子城(南京)有限公司，550量子比特相干光量子计算机真机部署于国家超级计算成都中心，实现了量超融合的实质性应用。

硅臻量子成立于2020年，依托中国科学技术大学顶尖团队，是一家专注于集成光量子芯片设计的高新技术企业。研发团队致力于将量子光源、操控及测量等核心部件集成至芯片，推动量子计算微型化与实用化。2025年，硅臻发布中国首台基于硅光集成芯片的通用可编程光量子计算机启明，该系统获评首台套重大技术装备认证，单双比特保真度均超99.4%，具备室温运行及云平台接入能力。目前，硅臻已携手甘肃庆阳融入国家东数西算工程，旨在构建量子-经典混合计算体系，面向人工智能、金融及生物医药等领域提供先进算力服务。

正则量子（北京）技术有限公司成立于2022年10月，是一家硬软算协同的全栈式光量子计算公司，蓄力应对后摩尔时代算力挑战。正则量子结合了中国优秀的光量子计算硬件科学家团队和量子算法科学家团队，通过成熟的工程化团队实现硬软算协同的全栈式光量子计算。团队希望从光量子核心器件入手，短期研发专用光量子计算机，中长期实现实用化通用光量子计算机。同时通过整合量子计算硬件和量子算法，实现有价值的应用量子计算云平台，实现量子计算在银行、物流、制药等行业的赋能。

图灵量子成立于2021年，技术起源于上海交通大学集成量子信息技术研究中心。目前，图灵量子拥有自主知识产权的三维和超高速光量子计算芯片核心技术和工艺。

通过与 PsiQuantum 的 FBQC 架构及 Xanadu 的 CV 路径对比可见，图灵量子的技术叙事表现出明显的'架构真空'。图灵量子缺乏类似国际同行的系统性技术白皮书。这种'重工艺、轻架构'的状态，其更倾向于被定义为一家'光子计算硬件供应商'，而非真正意义上的'通用量子计算机厂商'。在缺乏高质量学术论文背书与原型机实证的前提下，其通用化路线的成熟度仍需打上问号。

香港灵光量子计算科技有限公司（简称“灵光量子”）成立于2024年7月，总部位于香港新界沙田香港科学园，是一家专注于光量子计算技术研发与产业化的前沿科技企业。其母公司浙江九州量子信息技术股份有限公司成立于2012年，灵光量子核心研发或依赖母公司协同，其技术实力与商业化潜力仍需后续专利、第三方验证报告、稳定订单等实质性证据支撑。

中器无量量子科技有限公司（“中器无量”）成立于2025年3月3日，是专注于中性原子量子计算的科技创新企业。公司创始团队源自国际顶尖学府，致力于将量子计算从实验室研究推动至产业化应用。科研团队汇聚了全球领先的量子科学家，掌握中性原子光镊架构的控制方法。公司具备强大的全栈硬件工程体系，关键部件自研率高，能实现从实验样机到工业系统交付的工程能力。同时，软件与系统集成同步推进，确保技术从原型机到大规模系统的顺利过渡。公司核心团队拥有十五年以上的量子领域投资经验，成功参与三家量子科技企业的投资并上市，并具备从零搭建量子团队到实现商业化的实战经验，深入了解量子技术产业化路径。

图表 加拿大硬件整机代表性厂商



iCV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2026.2

加拿大：企业数量少但路径集中

Xanadu公司专注于压缩态与硅光子器件的技术路径。2025年，公司取得里程碑式突破，正式发布了名为Aurora的模块化、可联网光量子计算机。该系统由35个光子芯片通过光纤互连构成，在864亿种模式上成功实现了簇态纠缠。在底层硬件层面，Xanadu通过与HyperLight合作，成功验证了损耗低于2dB/m的薄膜铌酸锂（TFLN）光子芯片，投建千万美元级先进封装产线。在应用端，公司联合劳斯莱斯与Riverlane，利用量子-经典混合工作流将喷气发动机的气流模拟时间从数周大幅缩短至一小时内；此外，针对光动力癌症治疗的药物研发，公司也已开发出专门的容错量子计算框架。

D-Wave公司为全球首家商业量子计算机企业。2025年，D-Wave全面推出了、Advantage2退火量子计算机，并实现了在美国国防承包商Davidson Technologies等客户现场的本地部署。其退火量子计算机在优化问题上展现出对经典算法的可扩展优势，可高效训练神经网络、加速偏微分方程求解。公司还推出了开源AI工具包，并与合作伙伴开发了用于自动驾驶农业车辆路径规划的混合量子应用。商业上，D-Wave完成了4亿美元融资，年度预订量同比增长约120%。

图表 欧洲硬件整机代表性厂商



ICV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2026.2

欧洲：路线多、主体分散，国家级平台与托管云是主要对外出口

Pasqal是中性原子量子计算领域的领军企业。继2023年推出Orion Alpha及2024年实现千原子装载突破后，2025年Pasqal在商业落地与混合计算集成方面取得重大进展。公司正式推出了名为Jade和Ruby的量子处理器，并将其集成到高性能计算（HPC）环境中，以支持复杂的混合工作流。在全球布局上，Pasqal与Aramco合作部署了沙特首台200量子比特工业级量子计算机，并将Orion Beta处理器接入Scaleway和OVHcloud云平台，提供广泛的云端访问。此外，公司获得LG电子战略投资，并宣布在伊利诺伊州建立美国总部，加速推动中性原子技术在材料科学与多物理场仿真中的工业应用。

IQM成立于2018年，目标是在欧洲打造强大的量子计算机，媲美谷歌和IBM等美国科技巨头的相关成果。继推出54比特处理器后，2025年IQM发布了专注于量子纠错研究的Halocene产品线（首发150比特），并推进向芬兰交付300比特全栈系统的计划。星形架构（Star Architecture）以实现高效错误检测，并联合合作伙伴推出了实时量子纠错平台SurgeonQ。商业化方面，IQM宣布投资超4000万欧元扩建产能，其54比特Radiance系统已在西班牙部署并上线亚马逊云服务。

图表 澳大利亚硬件整机代表性厂商



ICV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2026.2

澳大利亚：以硅基路线见长，优势在工艺与制造体系衔接

Silicon Quantum Computing（SQC）致力于硅基量子计算，曾创下相干时间与保真度的多项世界纪录。继2023年布局零自旋硅材料、2024年制造四量子比特设备后，2025年SQC取得了重大技术突破，构建了由多核自旋寄存器组成的11量子比特原子处理器。该处理器实现了高达99.99%3.5K温度下实现了高保真单次电子自旋读出，大幅降低了制冷要求。产品与商业化方面，SQC利用其量子储备系统Watermelon协助Telstra进行网络预测，并与SkyWater合作推进混合计算芯片制造，同时获澳大利亚国防部合同开发量子机器学习处理器。

Diraq专注于利用硅量子点技术研发量子处理器。依托新南威尔士大学（UNSW）二十余年的技术积淀，公司致力于通过兼容CMOS的硅制造工艺实现低成本、大规模的商业化落地。2025年，Diraq迎来技术爆发：其在工业级300毫米代工厂生产的器件，成功实现了超过99%的单/双量子比特门保真度，并刷新了长达9.5秒的自旋寿命纪录。商业层面，Diraq成功入选美国国防高级研究计划署（DARPA）的量子基准测试计划（QBI），并正式加入伊利诺伊州量子园区。通过这一系列战略布局，公司正加速迈向量子比特规模化量产的新阶段。

OQC成立于2017年，利用专利3D架构构建超导量子处理器，提供量子计算即服务并接入亚马逊Braket。继2024年获雪佛龙投资后，2025年OQC推出专利的Dimon™双轨超导量子比特架构，并联合Riverlane打造英国首个集成高性能计算的量子纠错测试平台。商业化方面，OQC与Digital Realty及NVIDIA合作，在纽约启动全球首个量子AI数据中心，部署其GENESIS量子计算机，该系统集成NVIDIA GH200超级芯片以加速混合工作流。此外，公司还通过优化约瑟夫森结制造工艺进一步提升了硬件性能，持续引领量子与AI算力设施的融合。

AQT是囚禁离子量子计算领域的奥地利领军企业。继2021年推出首台机架式系统PINE及后续的激光控制系统ROWAN和光学基准BEECH后，2025年AQT的IBEX Q1系统正式上线Amazon Braket，成为首个通过主要云服务商提供的欧盟托管囚禁离子系统。在技术突破上，AQT展示了量子弹簧阵列（QSA）架构，通过线性离子串组成的矩形二维晶格实现了关键的二维连接性，并成功演示了径向分离区域间量子比特的纠缠门操作。此外，AQT还利用其处理器实现了可验证的基于测量的量子随机采样，从随机簇态中进行采样并有效估计保真度，验证了该技术证明量子优势的潜力。

Oxford Ionics致力于利用专利的电子量子比特控制（EQC）技术开发高性能囚禁离子量子计算机，无需复杂激光器即可在标准半导体芯片上实现量子比特控制。继2024年实现创纪录的99.999%单比特门保真度后，2025年公司向英国国家量子计算中心（NQCC）交付并安装了全栈量子计算机QUARTET，该系统支持现场升级QPU，验证了其技术在商业用例中的潜力。技术上，公司公布了迈向百万量子比特的路线图，并与Iceberg Quantum合作引入qLDPC码以推进容错计算。2025年9月，Oxford Ionics被IonQ正式收购，其EQC技术及团队将融入IonQ的硬件堆栈，通过结合电子控制与离子阱架构，加速构建高性能、可扩展的商业量子系统。

ORCA Computing致力于开发室温下运行的光纤模块化量子处理器。继2023年推出PT系列光量子计算机后，2025年ORCA在量子AI数据中心与混合计算集成方面取得突破。公司利用NVIDIA CUDA-Q平台及NVQLink互连架构，提供了构建量子AI集成数据中心的蓝图，并将两台PT-1光量子处理器与NVIDIA GPU协同部署于波兰PCSS数据中心，实现了室温下的无缝混合运算。商业落地方面，ORCA已在蒙大拿州立大学正式运行其光子系统，并与丰田通商达成合作以拓展日本及亚太市场。此外，公司联合ST Engineering开发基于量子机器学习的网络异常检测技术，积极推动光子计算在网络安全等领域的实际应用。

Quandela专注于光量子计算领域，凭借其核心的高质量单光子源Prometheus及MOSAIQ平台构建了深厚的技术护城河。2025年，公司在商业化进程上取得长足进步：正式推出高性能12量子比特光子计算机Belenos，并向法国原子能委员会（CEA）交付了全栈系统Lucy，标志着光量子计算正式接入高性能计算（HPC）混合工作流。在架构创新层面，Quandela提出了一种基于融合（Fusion-based）的模块化量子计算架构。该方案通过确定性单光子源与重复直至成功（Repeat-until-success）纠缠门的协同，将生成Shor编码等容错资源态所需的硬件开销降低了数个数量级。与此同时，Quandela积极拓展全球版图，在韩国首尔设立了研发中心，并联合Mila实验室共同推进量子机器学习的应用探索。

03 量子计算上游代表性厂商

Bluefors成立于2008年，是芬兰领先的低温技术公司，专注于生产量子计算不可或缺的稀释制冷机。为满足全球需求，公司通过收购美国Cryomech和日本Rockgate扩大了版图，并在荷兰设有实验室。2024年，Bluefors推出了专为核磁共振装置设计的氦气再液化器Cryomech HeRL02-RM，以及无制冷剂的XLDHe测量系统，为1K温区实验提供极高冷却功率。2025年，Bluefors进一步巩固了其在工业级量子基础设施中的地位，被选定为Alice&Bob在巴黎新建的5000万美元量子实验室的主要供应商，将交付20台稀释制冷机。这一大规模部署将支持下一代猫态量子比特处理器的研发，验证了Bluefors在大规模、高性能低温环境构建方面的技术实力，助力容错量子计算的商业化进程。

Oxford Instruments成立于1959年，是科学仪器与超低温设备领域的领军企业。继2024年推出模块化Proteox制冷机后，2025年公司部署了其最大的稀释制冷机ProteoxQX，该系统具备3米高工作空间及六个侧面加载插件，专为大规模量子计算扩容设计。ProteoxLX系统成功集成至纽约全球首个量子AI数据中心，为OQC的量子计算机提供关键超低温环境，有力支撑了量子与AI算力设施的融合应用。

Maybell Quantum成立于2021年，致力于革新量子低温基础设施。2022至23年推出了Icebox和Big Fridge稀释制冷机，成功将传统大规模设备压缩至标准服务器机架大小，并提供低于10mK的极低温环境。其核心技术优势在于高密度Flexlines布线，单台设备可支持4500条超导线路，显著提升量子比特容纳密度。2025年，Maybell完成了4000万美元B轮融资，推进下一代低温与射频系统的商业化。公司与Interlune签署长期氦-3供应协议，并与Norma及Entanglement Inc.达成战略合作，支持全球量子计算设施的规模化部署。

中国电科16所又名“合肥低温电子研究所”，创建于1966年，是中国专业从事低温制冷、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。作为最早开展稀释制冷机研究的单位之一，该所2022年交付首台工程化稀释制冷机，2024年完成13台批量交付，并在世界制造业大会上作为“撷英十品”成果发布。至2025年，其制冷产品在国际低温装备竞争格局中持续提升性能指标，国产化程度不断强化。

量羲技术专注于极低温极微弱信号测量与调控设备的研发、生产与销售，主要应用于超导量子计算、表面物理研究、拓扑超导等领域，其中超导量子计算是其核心应用。2024年，量羲技术推出了1000μW大冷量无液氦稀释制冷机，可搭载超过1500路高密度射频测量线路及高密度滤波、衰减模组，并成功中标中科院理化技术研究所等多个单位。2025年，禾信仪器收购量羲技术56%的股权，标志着两家公司在技术研发、市场拓展等方面的深度合作。此次收购有助于整合双方的技术与资源，加速量羲技术产品的研发与产业化，推动超导量子计算等领域的发展，并提升在高端科学仪器市场的竞争力。

Kiutra成立于2018年，源自慕尼黑工业大学，专攻磁制冷技术以解决量子计算对稀缺氦-3资源的依赖。其核心技术突破在于连续绝热去磁制冷（cADR），实现了完全无需液氦的固态超低温冷却，彻底消除了对氦-3供应链的依赖。2025年，Kiutra完成了1300万欧元B轮融资，加速其无氦-3冷却系统的全球部署。在产品方面，公司推出了L-Type Rapid低温恒温器，凭借独特的快速加载机制，能在3小时内降至毫开尔文温区，是市场上最快的测试恒温器之一。此外，Kiutra启动了LEMON项目，旨在开发满足大规模量子计算需求的高功率模块化冷却系统，并发布了kiutra.io云平台，实现了低温设备的自动化控制与远程监控，推动了低温即服务的商业模式。

中船鹏力超低温成立于2014年，隶属于中国船舶集团第八研究院，是国家级专精特新小巨人企业。作为中国首家实现G-M制冷机自主产业化的企业，公司打破了欧美长期垄断，G-M制冷机累计发货量已突破5000台。2025年，公司荣膺南京市瞪羚企业，并在核心技术与重大装备上取得多项突破：自主研发的30K深低温氦纯化器成功产出6N级超纯氦气，斩获中国氦气产业链年度十大成果；成功推出100W@25K高效G-M制冷机及升级版脉管制冷机；自主研制的1.5t/h大型LNG船用深冷再液化装置顺利交付。此外，公司深度参与《无液氦稀释制冷机》国家标准制定，标志着国产稀释制冷机迈入标准化新时代。

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、销售为一体的高科技企业，致力于打破中国极低温设备依赖进口的局面。目前，公司已构建起覆盖从科研快速迭代型(ZL-DR400/SE)到大规模量产型(ZL-DR1000/3000)的全谱系无液氦稀释制冷机产品矩阵。公司研制的ZL-DR400型量子计算用极低温稀释制冷机，连续运行最低温度达4.93mK,制冷功率分别为21uW@20mK、690uW@100mK;ZL-DR1000型稀释制冷机连续运行最低温度达9.1mK，制冷功率分别为30uW@20mK、1060uW@100mK，各项技术指标同样处于国际一流水平。

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年推出支持百比特量子计算测控系统；2022年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年推出全新可扩展低延迟反馈量子计算测控系统及蜀山系列低温CMOS量子测控芯片组。2025年，公司低温量子计算测控成果成功入选ISSCC 2025；中国首个大规模快速反馈量子计算测控系统ZW-QCS580完成集成验证，全系产品累计服务数千通道；同年发布岷江测控操作系统v2.0，并推出性能超越国际竞品的低温低噪声放大器（噪声温度低至1.5K）及量子与经典混合测控组件V2.0，有力支撑了量超智融合发展。

西部超导材料科技股份有限公司成立于2003年，是中国航空用钛合金及高温合金研发生产的核心基地，也是全球唯一的超导锭棒、线材、磁体全流程生产企业。其低温超导材料产品性能全球领先，2024年产量超3000吨，广泛应用于MRI、核聚变及大科学装置等领域。在量子计算关键配套领域，西部超导近期实现重大突破。公司全面实现了量子计算机用超导同轴电缆的稳定批量生产，并依托自主搭建的全流程低温性能检测平台，提供质量可追溯、即插即用的成品组件，为整机集成提供了关键支撑。此外，公司成功开发的柔性超导同轴电缆，兼具灵活弯折特性与极低热导率、信号衰减优势，有效解决了整机内部特殊布线难题。这些成果有力推动了国产量子计算核心部件的自主可控与工程化应用。

光腾激光技术（德清）有限公司成立于2023年，作为中国首家实现激光器量产出货商用弱磁精密测量领域的企业，公司致力于打破国际高端激光器技术垄断，在商用量子科技领域窄线宽激光器累计交付量已突破200台，并且在客户端稳定工作实现零客诉的优异表现。2025年，公司在量子科技业务布局与核心激光芯片自研，以及高端光源整机系统开发上取得多项突破：自主研发的LAPIS系列产品成功赋能中国多家头部院校量子实验室的科研工作；全新锥形放大半导体激光器顺利通过省级工业新品鉴定；自主研制的激光器及配套产品在量子精密测量领域原子钟客户中实现批量交付。此外，公司窄线宽蝶形激光器产品得到国盾量子、问天等头部量子科技企业认证通过，标志着其高性能半导体激光器系统在量子产业化应用中迈入新时代。



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 上游硬件细分市场规模预测

04 下游应用市场规模预测

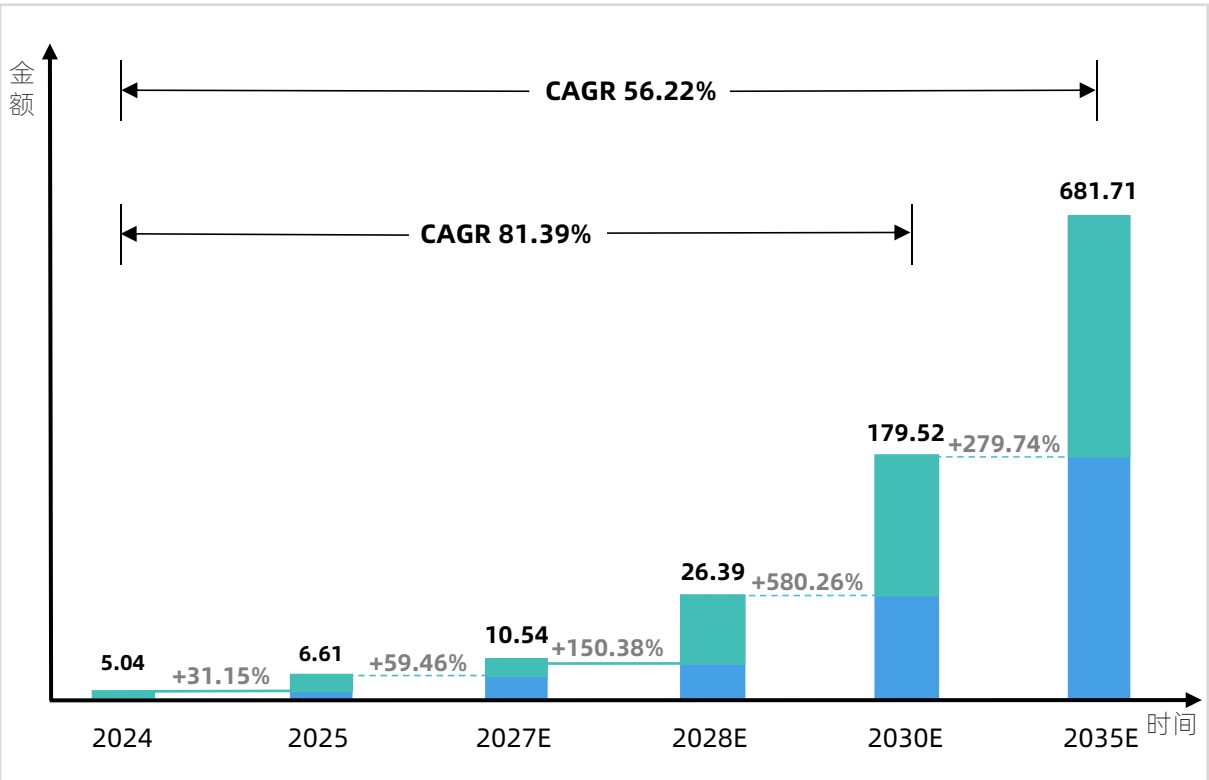
01 产业规模预测：技术积淀推迟增长拐点

随着IBM、Google、Quantinuum及IonQ等企业稳步推进工程化路线图，我们仍然维持2028-29年将成为全行业的一个关键时间点的观点，预计5年内全球通用量子计算技术将实现质的突破，从而带动金融、医药及材料设计等领域的商业化落地。

本报告对量子计算产业规模预期进行了调整，在2025年报告的基础上推迟了产业爆发的节点，从27年延后到28年。原因主要包括以下四个方面。

第一，参考了IBM、Google、IonQ及欧洲独角兽IQM等最新的工程化进展，预计到2029年，量子纠错与系统集成技术将达到成熟阶段，为实际的大规模商业化应用奠定坚实基础。第二，Maybell Quantum与Kiutra在制冷基础设施领域的融资与新品发布，推高了短期市场的设备采购需求，但也反映出整机交付仍需更长的工程周期。第三，至2035年，量子计算行业仍将处于基础设施筑基期，利润主要集中在上游制造与中游硬件环节，符合同类硬科技行业的发展规律。第四，英伟达发布的NVQLink互连标准与CUDA-Q平台，确立了量子-经典混合计算的统一工业架构，使得量子处理器能作为标准化加速组件无缝嵌入数据中心，极大地降低了商业准入门槛并打开了异构算力服务的广阔市场。

图表 全球量子计算产业规模（2024~2035E）（单位：十亿美元）



iCV TA&K | 2026.2

2025年，全球量子计算产业规模达到了66.1亿美元，2024至2030年的年平均增长率（CAGR）达到81.39%。2029年，随着容错技术的成熟，预计将带动整体产业规模迎来显著增长。在2030年至2035年，产业规模将继续迅速扩大，受益于通用量子计算机的技术进步和全行业渗透，到2035年总产业规模有望达到6817.1亿美元。这一增长路径标志着量子计算将在跨越技术积累期后，进入全面成熟和商业化的关键阶段。

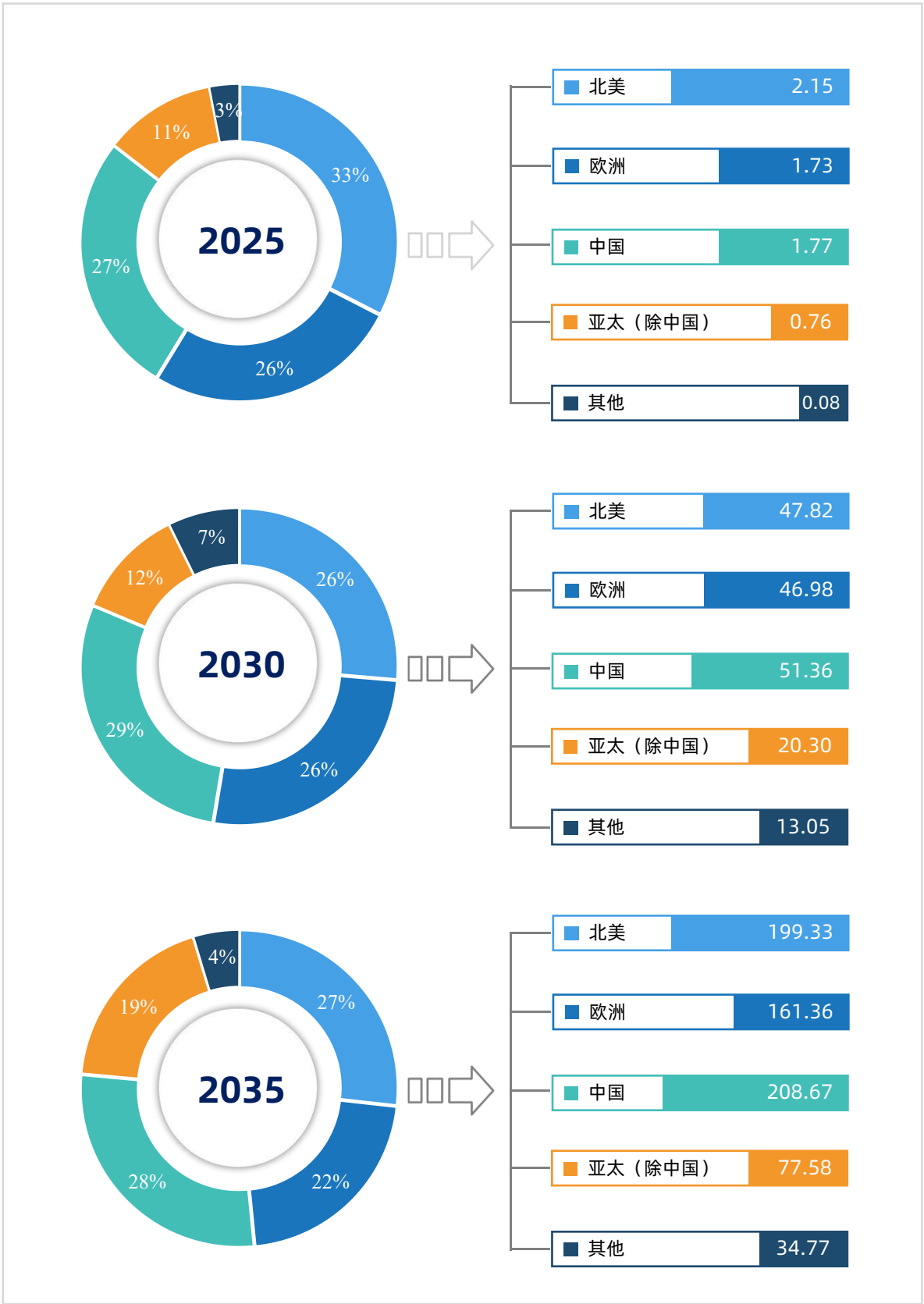
02 主要地区产业规模预测：区域竞争格局重塑，中国与亚太份额显著攀升

全球量子计算市场正处于动态重构的关键时期。2025年，全球量子计算产业规模达到66.1亿美元。从区域分布来看，北美以32.54%的市场份额暂时保持领先，中国与欧洲分别以26.81%和26.17%的占比紧随其后，亚太地区（除中国外）占比11.45%，其他地区占比3.0%。当前北美市场的优势主要得益于其活跃的商业航天与初创企业融资环境，以及在稀释制冷机等关键基础设施领域的快速部署能力，反映了其在产业链上游的深厚积淀。

至2035年，随着通用量子计算技术的成熟与全行业渗透，全球产业规模预计将攀升至6817.1亿美元。在此期间，全球产业版图将发生深刻变化。中国市场的全球份额预计将持续稳步增长，至2030年达到28.61%并超越北美，最终在2035年以30.61%的占比确立全球领先地位。与此同时，亚太地区（除中国外）展现出惊人的后发优势，其市场份额将从2025年的11.45%跃升至2035年的20.61%，成为未来十年增长最快的区域板块。北美与欧洲市场份额虽受新兴市场崛起影响在数据上呈现相对回调，分别调整为29.24%与23.67%，但仍维持着核心技术输出地的重要地位。

然而，展望至2030年，全球产业版图将发生历史性转折。预计到2030年，中国产业的全球份额将增长至28.61%，首次超越北美的26.24%成为全球最大的单一市场。中国产业规模的显著扩张，主要归因于国家战略层面对未来产业的系统性布局与资本引导。随着中央企业战略性新兴产业发展专项基金的设立以及未来产业创新任务揭榜挂帅机制的实施，中国成功构建了资金链与创新链深度融合的产业生态。在市场端，不同于北美主要依靠技术输出获取价值，中国庞大的工业体系为量子计算提供了无可比拟的落地场景。电网调度、金融风控、生物制药以及新能源材料研发等领域对算力的巨大需求，将在2029年技术成熟后迅速转化为规模化的采购订单，这种由下游应用反向拉动的市场爆发力是推动中国份额跃升的核心引擎。

图表 2025、2030E、2035E年全球量子计算各地区产业规模（单位：%，十亿美元）



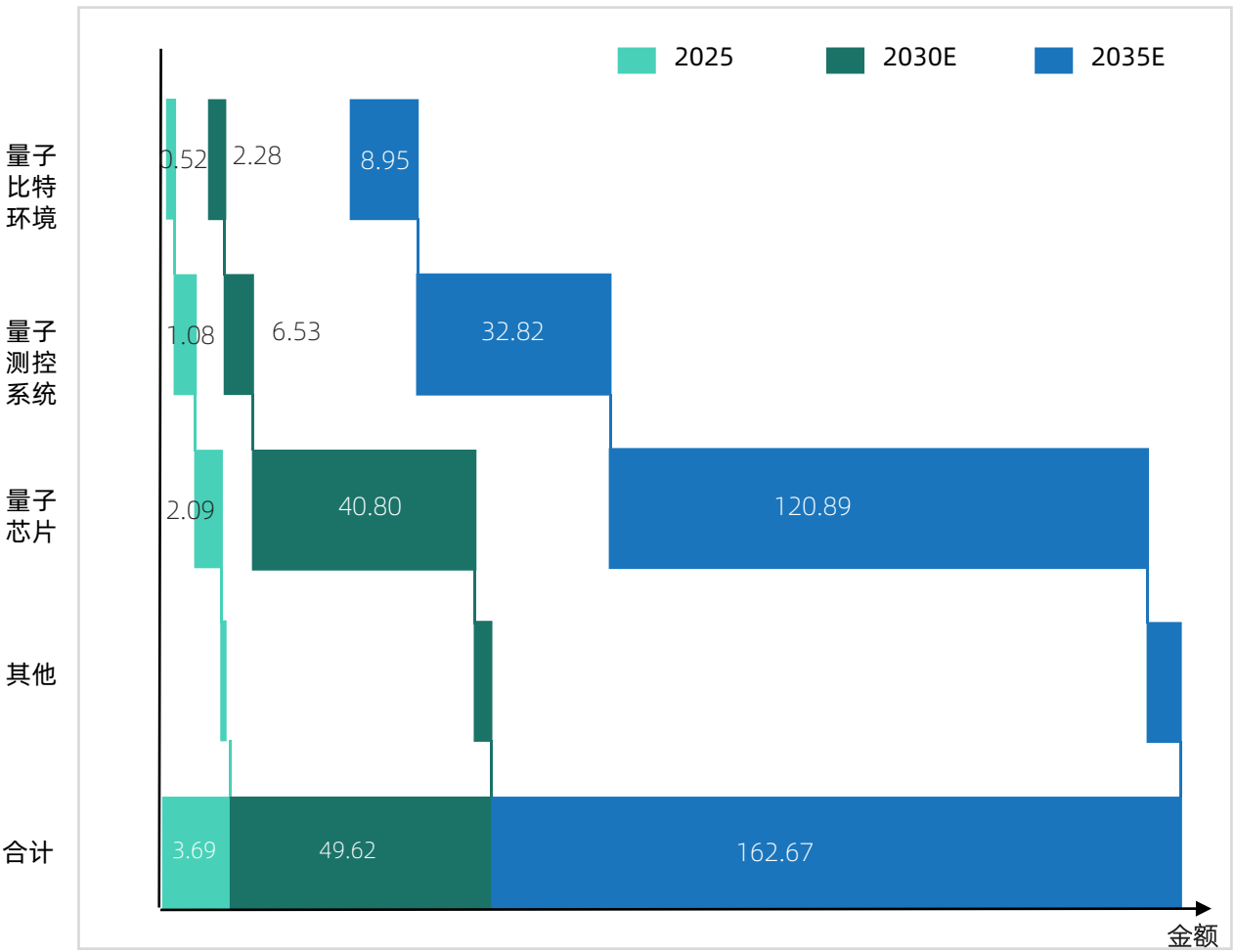
至2035年，全球量子计算产业规模预计将飙升至6817.1亿美元，区域格局将进一步趋于多极化。届时，中国将以30.61%的占比继续巩固其全球领先地位。与此同时，亚太地区（除中国外）将成为增长最快的区域，其市场份额预计从2025年的11.45%跃升至2035年的20.61%。这一增长主要得益于日本、韩国及新加坡等经济体在量子通信与半导体制造领域的深厚积累，以及数字化转型对异构算力的迫切需求，促使该地区成为全球量子技术应用的重要增长极。

相比之下，北美与欧洲在2035年的市场份额分别调整为29.24%与23.67%。北美市场的份额回调反映了全球技术扩散的客观规律，但其在通用量子计算架构、纠错算法及开发工具链等高附加值环节仍将保持核心竞争力，通过技术授权与生态主导权维持其产业影响力。欧洲则通过加强跨国科研合作与标准化建设，在量子传感与专用模拟机领域保持稳健增长，成为全球产业链中不可或缺的创新高地。

03 上游硬件细分市场规模预测：量子芯片主导增长，测控系统构筑关键基石

上游硬件市场作为量子计算产业的物理基础，在2025年至2035年间将经历从科研定制向工业化量产的结构性转变。受容错技术突破及商业化部署加速的驱动，全球量子硬件市场总规模将呈现强劲增长态势，预计由2025年的36.91亿美元攀升至2030年的496.16亿美元，并最终在2035年达到1626.67亿美元。

图表 全球量子计算上游市场规模（2025、2030E、2035E）（单位：十亿美元）



iCV TA&K | 2026.2

量子芯片核心价值的指数级释放在细分市场中，量子芯片将成为未来十年增长最快的核心领域。数据显示，量子芯片市场规模预计将从2025年的20.90亿美元激增至2030年的408.02亿美元，并在2035年达到1208.90亿美元，占据硬件市场的主导份额。这一爆发式增长的逻辑在于，随着2029年行业迈入容错计算阶段，通用量子芯片将进入大规模量产与商业部署阶段。随着CMOS兼容制造工艺的成熟以及光刻、蚀刻等半导体技术的复用，量子芯片的性能与良率将大幅提升，从而支撑起千亿美元级别的市场空间，与测控系统共同构成了驱动上游产业腾飞的双引擎。

此外，测控与环境系统高密度基础设施的配套升级与量子芯片的爆发相呼应，量子比特测控系统与低温环境设备表现出稳健且关键的增长特征。2025年，随着稀释制冷机企业在稀释制冷机及无氦冷却技术上的融资扩产，行业正加速构建适应大规模量子处理器的基础设施。面对量子比特规模的快速扩展，市场对能够实现高密度布线、低热负载及模块化部署的测控环境需求急剧上升。受此推动，测控系统市场规模将从2025年的10.83亿美元快速扩张，预计2030年达到65.32亿美元，至2035年增长至328.23亿美元。这一增长轨迹反映出精密测控与极低温环境技术已成为支撑算力扩展不可或缺的工业底座，其标准化程度将直接决定下游应用的落地效率。

04 下游应用市场规模预测：多行业协同深化，商业化价值逐步释放

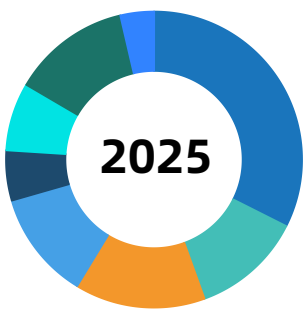
量子计算的行业应用合作已广泛覆盖国防军工、金融服务、生物医药、化工材料及物流优化等核心领域。在这些赛道中，拥有深厚行业积淀的大型企业或行业领军者正与量子计算软硬件公司建立紧密的合作关系，共同致力于解决传统算力难以应对的实际业务挑战。

值得注意的是，这些合作伙伴并非单纯的技术采购方，而是各领域经验丰富的行业专家。他们深谙自身行业发展的方向与痛点，通过与量子计算企业的深度耦合，能够精准定义那些急需大规模计算能力介入的实际问题，并开展针对性的合作探索。这种“领域知识+量子算力”的合作模式，不仅加速了量子解决方案的孵化，也为各行业带来了解决复杂问题的新路径。

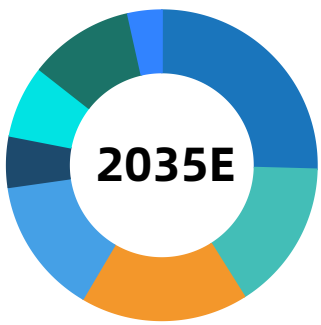
通过跨行业的协同创新，企业能够充分利用量子计算的潜能优化业务流程。这种合作推动了量子计算技术从实验室走向应用落地，并为不同行业的数字化转型注入了新的动力。

当前，全球量子计算机的主要应用场景仍集中在科研领域，高校院所、国家实验室及大型科技公司通过购买真机或云服务，探索量子计算运作原理及基础学科研究。随着技术的成熟及商业场景的拓展，科研市场的占比将呈现逐步下降趋势，但绝对规模仍将持续增长。数据显示，2035年，科研领域的应用规模预计达到74.71亿美元，较2030年的52.84亿美元、2025年的0.13亿美元有显著提升，继续发挥其作为基础创新底座的重要作用。

图表 全球量子计算下游应用市场规模（2025 & 2035E）（单位：十亿美元）



2025		2035E
0.13	科研	74.71
0.05	金融	45.95
0.06	医药	51.20
0.05	化工	41.83
0.02	能源	15.63
0.03	物流	22.12
0.05	国防	32.05
0.01	其他	10.28



2035年，金融服务领域的应用规模预计将达到45.95亿美元，较2030年的32.50亿美元、2025年的0.05亿美元实现大幅增长。这一变化源于金融行业对量子计算技术优势的深刻认知，特别是在高频交易、风险管理及投资组合优化等场景中，量子计算强大的并行处理能力能够显著提升决策效率与精度，从而推动金融领域对量子算力需求的快速释放。

2035年，生物医药领域的应用规模预计将达到51.20亿美元，较2030年的36.22亿美元、2025年的0.06亿美元增长显著。这一趋势反映了生物医药行业对量子模拟技术的深度应用，特别是在药物发现与个性化医疗方面。量子计算的高效处理能力能够加速分子结构模拟与药物筛选过程，有望大幅缩短新药研发周期并降低研发成本。

2035年，化工材料领域的应用规模预计将达到41.83亿美元，较2030年的29.59亿美元、2025年的0.05亿美元提升明显。这一增长主要得益于化工行业对量子计算在复杂分子模拟与催化剂设计方面的广泛应用。量子计算在处理多变量复杂系统方面的优势，能够有效加速新材料的性能预测与工艺优化，为材料科学的突破提供关键算力支撑。



2026年发展趋势与前瞻研判

目录

11 2026年发展趋势与前瞻研判

01 技术路线收敛与分化

02 容错量子计算关键窗口期

03 量子与AI深度融合趋势

04 商业化节奏与现实约束

05 地缘科技竞争与自主可控

2026年发展趋势与前瞻研判

根据2025年市场数据显示，量子计算企业的估值体系正经历强烈割裂。尽管截至2025年8月，全球已有11家量子计算企业登陆资本市场，且美国上市企业的平均市值一度达到67亿美元，但这种高估值与极度匮乏的营收能力之间形成了显著的剪刀差。IonQ作为首家市值突破100亿美元的量子计算公司，其市销率（P/S）在特定波动期内甚至超过了300倍，这种财务指标在历史上仅见于互联网泡沫时期。市场参与者必须警惕，过度投资可能导致类似过去量子通信领域曾出现的波动，即在缺乏大规模商用落地的产品支撑下，资本的撤退可能引发估值泡沫的消散。

历史经验显示，2017年至2021年间，量子通信领域曾因标准不统一和应用场景受限而遭遇商业化进程不及预期的情况。2025年的量子计算领域呈现出类似的特征：技术原型机频出，但缺乏能够真正商用的成熟产品。英伟达（NVIDIA）首席执行官黄仁勋等行业领袖曾多次指出，量子计算真正具备商业实用性的时间节点可能远比分析机构预测的更久，这种审慎的态度在2025年一度引发了量子板块股价的深度回调。2026年，投资者开始转向关注那些具备耐心资本特征的长期投资，例如中国新设立的510亿元中央企业战略性新兴产业发展专项基金，以及加拿大和美国持续追加的政府预算，这些资金的介入旨在为长周期的技术研发提供托底，防止因短期市场情绪崩溃导致的产业链中断。

01 技术路线收敛与分化

2026年的量子科技版图将呈现多路线并行与工程目标趋同同时存在的态势。一方面，量子计算硬件实现仍处于多样化探索阶段：超导电路、离子阱、中性原子、光量子、量子退火以及拓扑量子比特等方案同步推进，各路线在物理机制、工程约束与风险收益上差异明显。拓扑量子比特试图以更低的纠错开销实现容错；离子阱强调全连接与高保真门操作；超导路线押注晶圆级制造与高密度集成；中性原子在大规模阵列与并行操控方面持续扩展；退火路线则以特定优化场景为牵引形成差异化商业路径。这种分化反映出量子硬件尚未出现统一的工程标准，短期内仍允许多路线通过工程实践并行试错。

另一方面，不同技术路线在终极目标和实现路径上出现“收敛”趋势：各主流路线图均将“逻辑量子比特”和“容错量子计算”作为本年代末的共同里程碑。例如，IBM、谷歌、Quantinuum等公司的路线图尽管实现节奏有别，但大都瞄准在2028-2030年左右实现可用的纠错原型机。可靠性重于规模已成为行业共识：过去单纯以物理比特数量论英雄的做法正让位于提升比特稳定性、一致性和纠错能力的新范式。各路线图纷纷强调在未来5年内从当前的噪声中尺度(NISQ)过渡到初步可扩展的逻辑比特阶段。这意味着量子计算正从探索期进入精炼期：与其追求堆砌更多不稳定的物理比特，不如确保少量比特可反复、可靠执行运算。

更重要的是，这种收敛在短期内往往不会首先表现为“物理路线减少”，而是先体现在系统工程层面的接口统一与集成交付方式上：模块化全栈集成、可替换的软硬件边界、开放接口与开源工具链正在成为不同路线共同采用的工程方法。随着量子芯片、低温与测控电子、软件与校准算法等专业分工加深，产业开始以参考设计与预验证模块的方式提供更接近“可部署系统”的解决方案，使科研机构和企业无需从零搭建全栈即可获得可运行平台，并在保持可替换性的前提下逐步升级关键部件。这种模块化体系也降低了被单一封闭生态锁定的风险，为形成行业接口标准创造条件。

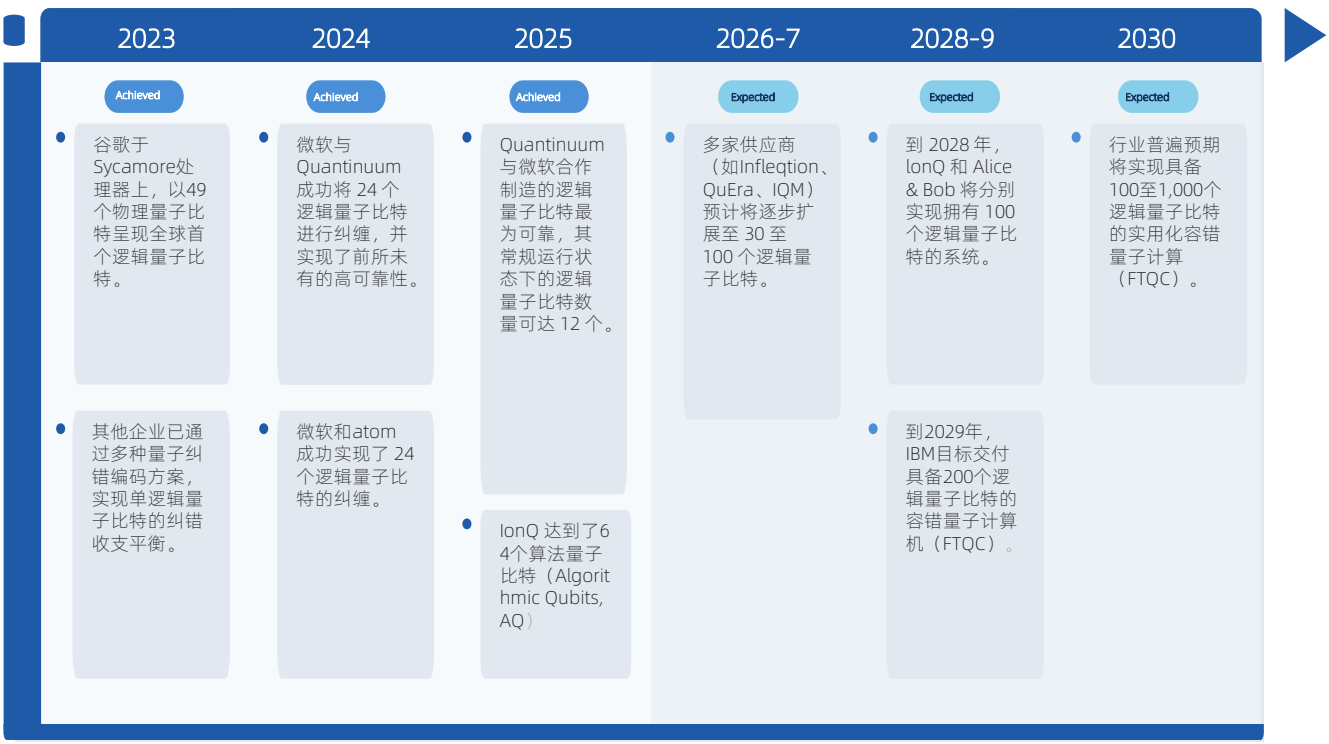
2025年的若干进展已经体现出这种趋势。例如，QuantWare、Qblox与Q-CTRL联合发布的量子实用模块QUB，提供预验证的全栈参考实现，把量子处理单元、控制堆栈与软件工具以模块方式组合，面向不同规模给出可复用配置；类似思路也被用于开放架构测试平台建设，如Q-PAC项目基于参考设计搭建可通过云端开放的试验床，由Elevate Quantum等机构推动落地。与此同时，测控领域的开源标准也在增强可迁移性：Fermilab开放的QICK控制套件在社区中形成可复用的软硬件接口，并通过本地制造与分发增强供应链韧性；HRL Laboratories进一步发布面向固态自旋体系的spinQICK扩展，使开源控制框架向更多硬件路线延伸，降低不同平台在测控方法上的重复开发成本。面向教育与研发的开放架构系统也开始出现，例如QuantrolOx推出的VIDYAQAR教学平台尝试把低温、测控、处理器与软件整合为可定制系统，服务人才培养与快速实验验证。

综上，量子计算的“路线分化”与“目标趋同”并不矛盾：物理实现层面仍将多线并进，但在系统层面已经开始围绕逻辑比特、纠错闭环与混合计算形成共同的工程约束；而模块化全栈集成与开源接口生态，正在成为推动这种收敛最先发生的现实路径。

02 容错量子计算关键窗口期

量子计算要真正超越经典计算，必须跨越当前 NISQ 设备的固有局限，实现容错量子计算。2026 年前后被普遍视为迈向容错的关键窗口期：业界需要在未来几年内证明量子纠错（QEC）的可行性与有效性，否则商业预期与资本耐心都可能面临更严格的检验。各国路线图多将 2027-2030 年作为容错演示的集中节点，因此 2025-2030 年是奠定容错基础的攻坚阶段。

图表 逻辑量子比特发展历程



iCV TA&K | 2026.2

在这一窗口期，专用量子计算机正在成为从“可运行原型”迈向“可交付系统”的重要过渡形态。与通用容错路线相比，专用量子计算机往往围绕特定问题结构与特定算子集合进行系统化设计，更容易在较低纠错负担下形成可验证的效用结果：它以应用牵引倒逼硬件在稳定性、标定、长时运行与工程可维护性上达标，同时沉淀控制、互连、软件工具链与系统集成经验，并通过可量化的业务回报为通用容错的长期研发提供资本与组织支撑。以玻色量子为代表的中国力量正在推动该路径加速落地：公开进展显示，玻色量子在相干光量子计算方向实现了1000 专用量子比特与 int8 耦合精度等关键能力突破，形成了更贴近工程交付的系统样本。专用量子计算机若能形成持续商业闭环，将在“硬件迭代—系统交付—应用验证—资金回流”的正循环中，为通用容错所需的长期投入与复杂工程组织提供关键支撑，因此它并非通用容错的替代路线，而是通往终极量子计算能力的必要跳板。

与此同时，QEC 正从理论走向实验验证：超导平台上表面码相关结果、离子阱平台上逻辑编码存储与纠错收益的早期展示，均表明“纠错闭环”正在成为行业共同优先项。但距离实用容错仍存在硬门槛——一是误码率与规模的乘法约束：物理门错误率仍在 10^{-3}–10^{-4} 量级，而有价值算法对整体可靠性要求更高，现实系统在“比特数”和“比特质量”上都需继续提升；二是系统工程复杂度：大规模纠错要求高密度互连、低温与封装能力、以及微秒级实时读出与反馈，使容错天然成为量子—经典融合的系统工程，GPU/FPGA 等加速硬件在译码与反馈中的作用愈发突出。随着表面码、颜色码、XZZX、量子 LDPC 等方案加速与硬件适配，产业路线也将更明显地走向“编码—硬件—控制—软件”一体化协同。整体而言，未来 3–5 年的关键不只在于单点指标刷新，而在于能否用可复现、可运行、可维护的系统级能力，把纠错与工程化推进到可持续迭代的轨道上。

为什么2026年前后是关键期？一方面，过去几年基础研究已证明“容错有可能”：逻辑比特的诞生让业界看到了黎明曙光。另一方面，各机构雄心勃勃的时间表将逼近验证：DARPA在2025年启动“量子基准倡议(QBI)”，提出2033年前打造一台价值10亿美元的实用量子计算机的目标；美国能源部2025年宣布“创世计划(Genesis Mission)”，试图以“曼哈顿工程”式投入加速容错技术攻关。这些计划表明各国不约而同把本十年末视为容错竞争的胜负手。如果到2028-2030年还无法展示可靠运行的容错量子演示机，不仅上述宏愿难以交代，还可能动摇资本和公众对量子计算可行性的信心。因此，接下来3-5年是验证容错量子计算“梦幻转折点”的窗口：领先企业势必全力攻关，以争取率先构建出哪怕由少数逻辑比特组成、但可以连续执行一定深度算法的容错计算原型。Riverlane预测领先硬件团队将在2026年前后宣布构建“首台容错量子计算机(FTQC)”的雏形。这种原型或许规模很小（可能只有几个逻辑比特），但具有里程碑意义：证明多个有缺陷的物理比特可组合成一个“容错系统”，可在噪声中可靠执行计算任务。这相当于从会造“零部件”跨越到能造出简易飞机——开启了真正端到端容错的工程化探索。

总之，当前我们正站在容错量子计算的临界点上。在这一窗口期，学界和业界需要协力攻克上述比特数量、误码率、工程实现和算法架构等各方面挑战。只有如此，才能在接下来的几年中跨越“实用量子计算”门槛，避免量子技术陷入停滞或“寒冬”。好消息是各方正投入前所未有的资源和智力攻坚，比如通过更聪明的软件优化、更高质量的器件，以及量子与AI辅助的方法，曾经估计需要两千万比特才能完成的任务如今被预测只需一百万比特即可实现——显示出通过多领域创新，“容错”大山正在被逐步削低。可以预见，在2030年前后迎来真正可用的容错量子计算，2026年前后的努力将功不可没。

03 量子与AI深度融合趋势

在新一轮科技浪潮中，量子计算与人工智能（AI）的深度融合正成为显著趋势。2023年以来生成式AI的爆发一度使量子计算的关注度相对黯淡，但两大前沿领域实际上呈现出互促互补的发展格局。进入2025-2026年，业界从基础设施到算法层面都在积极将量子技术与AI技术结合，以释放协同效应：

计算架构融合

主流观点认为未来的高性能计算将是“量子+经典”异构体系，量子处理器（QPU）将作为特殊加速器嵌入超级计算机架构，辅助完成经典计算机无法高效解决的部分，而经典超算则为量子计算提供必要的控制和纠错支持。NVIDIA在2025年推出的NVQLink高速互连就是这一趋势的标志性进展。NVQLink能够在量子处理器和GPU之间建立高速低延迟链接，实现量子计算与AI超级计算资源的直接耦合。通过这一创新，量子计算可借助GPU强大的并行计算能力加速纠错和噪声抑制，而AI超级计算平台则可调用量子协处理器探索更广阔的解空间。截至2025年底，美国已有包括洛斯阿拉莫斯、橡树岭等9家国家实验室采用NVQLink构建量子-经典混合计算平台；欧洲和亚洲也有十余家超级计算中心跟进，将量子芯片通过该互连接入现有HPC基础设施。例如，日本理研宣布新建一套集成540颗GPU的量子专用超级计算机，用于量子算法和混合仿真的研究。NVIDIA的愿景是：“未来每台超算都将调用量子处理器拓展可计算问题，每个量子处理器也需依赖超算来实现稳定运行”——量子与AI算力的融合将成为新常态。

系统与软件融合

量子计算的发展迫切需要AI在系统控制上的助力。2024年前后，多个团队开始使用深度学习模型来优化量子操作：利用强化学习自动调优量子逻辑门的控制参数，以最大化保真度；采用卷积神经网络实时解析纠错码的综合测量结果，从而更快速地定位并纠正量子比特错误。这类AI辅助量子控制显著提高了量子硬件性能和可操纵性。例如，谷歌量子团队在优化其量子芯片校准时引入了AI算法，以减少串扰和提高门保真。

另一方面，AI领域也开始汲取量子计算的灵感：所谓量子机学习（Quantum ML）尝试利用量子算法处理海量数据或提高模型训练效率。一些研究探索了量子态的叠加和纠缠特性来实现新的模型表示，如量子卷积网络、量子支持向量机、量子关联算法等。在小规模实验中，量子算法已被用于执行简单的模式分类、聚类等任务，并与经典深度学习结合形成混合模型。尽管受制于当前硬件规模，这些量子AI算法尚未超越经典方法，但它们为未来提供了潜在路径：一旦量子硬件足够强大，某些机器学习的子流程（如大矩阵运算、组合最优化、快速采样等）有望通过量子加速实现飞跃。

应用层融合

产业界也在积极寻求量子与AI在应用中的结合点。许多先行试点项目表明，二者融合可以拓展计算能力边界。例如，在新药研发中，研究人员将量子化学计算用于模拟候选分子相互作用，同时利用AI模型预测分子属性，两者结合加速了药物筛选流程。在金融科技中，一些机构尝试用量子算法优化投资组合、风险分析，并辅以机器学习进行市场预测，构建更强大的决策引擎。另外，量子仿真可为AI提供丰富的训练数据：利用量子计算模拟特定物理过程（如材料的量子行为），生成经典计算难以得到的数据，再用于训练AI模型，从而提升模型对复杂量子系统的认知能力。这些探索虽然仍属前沿实验性质，但展现了量子与AI融合在实际场景中的巨大潜力。

产业生态融合

主流云服务商正将量子计算纳入其AI和大数据平台，打造一体化的创新生态。微软Azure Quantum、亚马逊Braket等平台提供量子计算云服务的同时，无缝对接其AI云工具，使用户能够在同一框架下编写混合工作流：经典机器学习算法调用量子子程序进行计算密集部分，再将结果返回后续AI流程。这种接口级融合降低了量子技术的使用门槛，使更多AI研究者可以方便地试验量子加速方案。硬件厂商方面，2025年谷歌收购了量子初创公司Atlantic Quantum，据悉部分原因在于其量子纠错和误差缓解技术可与谷歌现有AI硬件优势互补，加强谷歌在量子+AI融合方向的整体实力。IonQ则在2023年收购了专攻量子联网技术的Oxford Quantum Circuits（OQC），以期构建大规模量子模块并通过AI优化控制，实现云端AI与量子设备的高速连接。类似的并购整合显示出大厂通过吸纳创新团队，加速量子与AI融合的产业趋势。

综上，量子技术与人工智能正加速走向融合共生。一方面，AI作为赋能工具帮助克服量子计算当前的技术瓶颈，从芯片校准、误码诊断到算法设计都发挥了关键作用；另一方面，量子计算则被视为未来拓展AI能力的新途径，有望在算力极限上提供突破。随着硬件互连、软件平台和应用实践的不断推进，2026年我们将看到更加紧密的“量子+AI”协作：几乎每一台先进量子设备背后都运行着智能算法，每一个AI超级计算中心或将配备量子协处理器。这种深度融合趋势不仅是技术使然，也是战略使然——融合发展有望创造“1+1>2”的倍增效应，使人类同时站上量子革命和AI革命的浪潮之巅。

04 商业化节奏与现实约束

量子计算产业正处于从实验室原型向工业级产品转化的关键过渡期，其商业化进程表现出明显的基础设施先行与应用场景渐进渗透特征。2025年，全球量子计算产业规模达到66.1亿美元，显示出市场对这一前沿技术的持续投入。然而，相较于未来万亿美元级别的市场潜力，当前产业仍处于早期积累阶段，技术成熟度与工程化挑战依然是制约其大规模商业爆发的主要现实约束。

商业化节奏

基础设施筑基与混合计算先行当前市场的增长动力主要源于产业链上游的基础设施建设与中游的混合计算架构探索。2025年，随着Maybell Quantum与Kiutra等企业在稀释制冷及低温测控领域的融资扩产，高性能制冷系统与高密度布线技术成为市场交付的重点。这一趋势表明，行业正集中资源解决大规模量子芯片运行所需的物理环境问题，基础设施的标准化与工业化是整机商业交付的必要前置条件。

算力交付层面

商业模式正从单一的云端租赁向异构混合计算演进。随着NVIDIA推出CUDA-Q平台以及Pasqal将量子处理器接入主流云服务商，量子计算作为数据中心加速组件的技术路径日益清晰。这种将量子算力无缝融入现有高性能计算集群的模式，显著降低了商业用户的使用门槛，使得金融模拟、材料设计等领域的领军企业能够以较低成本开展算法验证，推动了商业应用的初步落地。

现实约束：工程化瓶颈与标准化挑战尽管产业规模稳步增长，但实现全面商业化仍面临多重客观约束：

- 供应链与工程化挑战：随着量子比特数量向千位级扩展，系统集成的复杂度呈指数级上升。如何在极低温环境下实现数千根控制线的精密互连，同时解决大规模芯片的散热与信号串扰问题，依然是阻碍通用量子计算机大规模量产的核心物理瓶颈。目前，工业级系统的交付周期较长且维护成本高昂，限制了其在非科研客户中的快速普及。
- 应用场景的价值验证周期：虽然金融与生物医药被视为最具增长潜力的应用领域，但目前的量子系统在解决实际业务问题时，相较于成熟的经典超级计算机，尚未在性价比与稳定性上建立绝对优势。大多数企业用户的投入仍属于战略性技术储备，尚未转化为大规模、持续性的生产业务采购。

- 标准体系与人才储备短板：随着全球技术竞争加剧，供应链的不确定性有所增加。同时，行业内部缺乏统一的硬件接口标准与性能评测体系，导致不同技术路线间的软件生态难以互通。此外，兼具量子物理理论与微波电子工程经验的复合型人才严重短缺，也制约了产品迭代与应用开发的效率。

综上所述，2025年的量子计算产业呈现出理性务实的发展态势。投资者与企业的关注点已从早期的理论优越性转向工程化落地能力与供应链掌控力。在突破容错技术与完善产业链条的过程中，保持战略定力并持续投入底层研发，是产业跨越商业化临界点的必由之路。

05 地缘科技竞争与自主可控

2025年标志着全球量子技术正式迈入从基础科研向产业化落地与战略博弈转型的关键阶段，各主要经济体密集发布政策以强化技术主权、供应链安全及基础设施建设。美国作为行业领跑者，依托《国家量子倡议法案》与《芯片与科学法案》持续深化布局，通过NIST发布首批后量子密码学标准确立技术基准，并由《2026财年国防授权法案》等立法推动联邦系统向抗量子网络安全标准迁移，在构建公私合作典范的同时吸引了全球密集的私人资本；欧盟通过《量子欧洲战略》及2025年两用物项出口管制清单的更新，旨在打造主权自主的量子生态，推动量子芯片试点产线建设以提升工业竞争力；英国、西班牙、芬兰等国纷纷出台国家级战略或算力路线图，确立了向混合计算架构演进、实现千位纠错逻辑量子比特的具体工程化路径；G7发布的《卡纳纳斯基斯共同愿景》则致力于构建可信的供应链与人才体系。与此同时，中国在“十五五”规划建议的顶层设计下，通过设立首期510亿元的中央企业战略性新兴产业发展专项基金注入资本动能，并由工信部、市场监管总局等多部门协同，密集推进标准研制、未来产业“揭榜挂帅”及计量支撑行动，全面部署量子计算、通信与精密测量的产业应用生态构建，折射出全球量子赛道正加速向工程突破与生态竞争演进的宏大图景。

» 从政策目标与执行路径看，主要国家的量子科技战略大致涵盖以下四个维度：

- 各国均将量子科技视为关乎国家安全与未来经济的战略制高点。中国在 “十五五”规划中明确前瞻布局未来产业，将量子科技列为新经济增长点，依托新型举国体制，在墨子号、九章、祖冲之号、本源悟空等重大项目上屡创突破，政府相关投入已达百亿美元量级，论文产出领先，并在合肥、沪杭等地形成产业生态。
- 美国则采用 “官民结合” 模式，由 NSF、DOE、DARPA 等机构牵头，联合谷歌、IBM 等企业开展研发，争夺量子计算主导权，计划 2033 年推出可交付的容错量子计算机原型。

- 研发投入与人才梯队的全链条培育。资金规模已从早期的千万级跃升至十亿、百亿级。欧洲通过“量子旗舰计划”追加国家预算，德国投入20亿欧元，法国推出15亿欧元计划，英国则宣布十年25亿英镑战略。人才培养方面，中国已在17所高校增设“量子信息科学”本科专业，进入规模化输送阶段；欧盟则计划于2026年成立欧洲量子人才学院。这种从基础教育到产业资本的闭环，旨在为长期技术博弈储备核心力量。
- 安全保障与标准体系的国际话语权争夺。随着量子计算对现有加密体系的潜在威胁，后量子密码（PQC）算法迁移成为政策焦点。美国NIST已抢先制定新一代抗量子密码标准，要求政府机构在2035年前完成系统升级。中国同样在密码相关规划中推进PQC研制，并依托新成立的量子信息标准化技术委员会，在ITU等国际组织积极提交提案。谁先掌握成熟的防御技术与通信协议标准，谁就在未来的信息安全博弈中占据主动。
- 技术封锁下的供应链自主可控。地缘竞争已延伸至关键元件与资本领域。美国自2025年1月起生效的对华投资禁令，涵盖量子计算、网络及传感等敏感领域，并持续扩大出口管制清单。面对压力，中国在“十五五”期间更加强调关键核心技术的自主可控，致力于实现从超低温制冷机、高性能ADC/DAC到激光测控电子等全产业链国产化。同时，美国通过AUKUS协议强化盟友间技术协作，欧洲则利用《量子法案》立法巩固供应链治理。全球量子领域正呈现出合作与竞争并存、技术封锁与自主更替深度交织的新常态。

总体而言，2025-2026年的全球量子政策将进入成熟与理性的新阶段。各国将不满足于实验室阶段科研指标的领先，而是围绕量子芯片、算法、标准和应用场景展开全方位的国家级布局。地缘政治张力虽对学术交流产生了一定限制，但也倒逼了各国加速构建独立且有韧性的技术体系。未来五年内，具备“量子-经典”混合算力部署能力与掌握标准规则制定权的国家，将在新一轮全球科技变革中占据绝对战略制高点。



12

附件

目录 12 附件

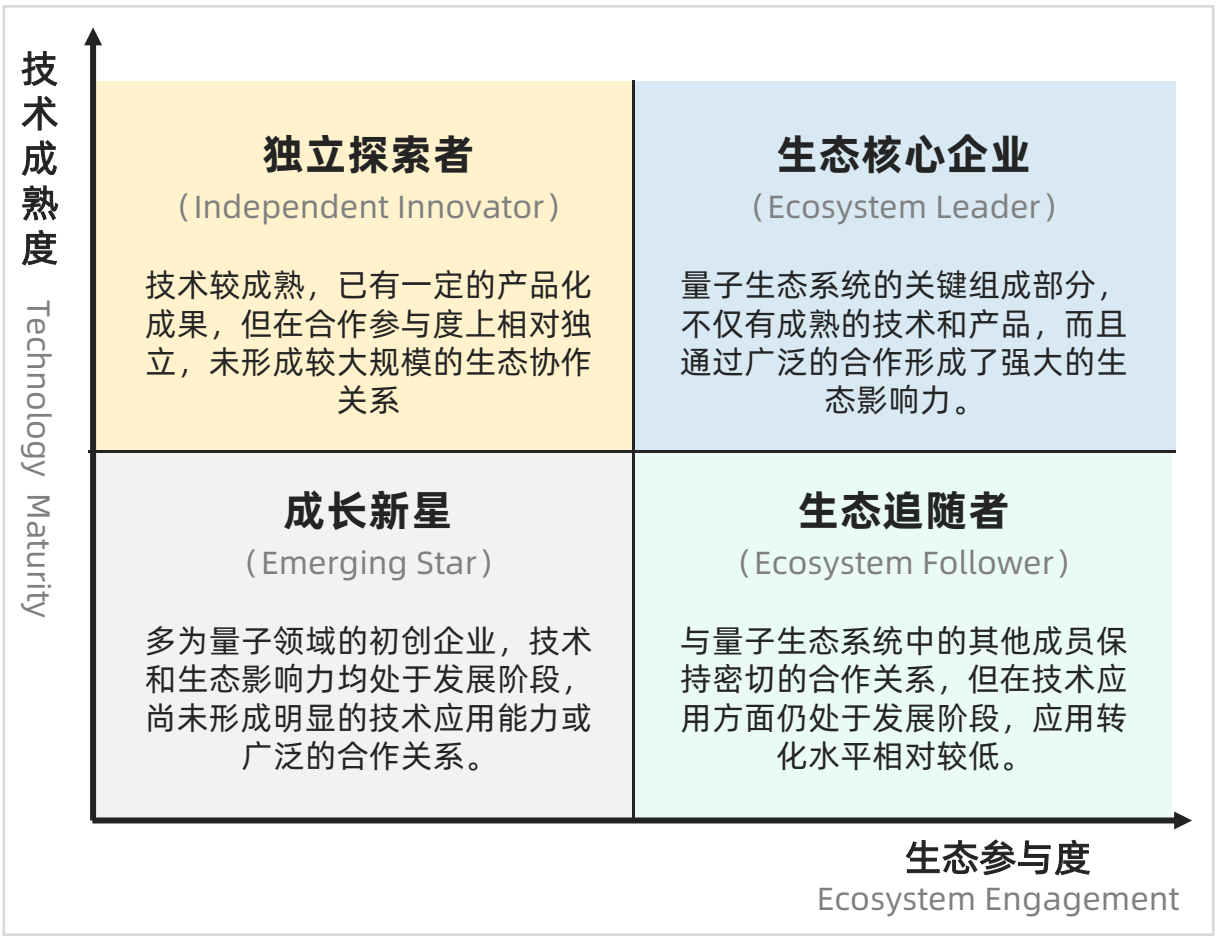
01 量子生态成熟度罗盘（Q-EMC）模型

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



iCV TA&K | 2026.2

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《2026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、2025年技术进展等。生态参与度具体权重指标包括2025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://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/PRXQuantum.6.010308
https://timesofindia.indiatimes.com/city/chennai/global-tamil-scholars-to-mentor-students-in-quantum-computing-evs-and-biotech/articleshow/117180719.cms
https://www.jomfruland.net/unlocking-the-future-nuclear-power-vs-quantum-computing/
https://baijiahao.baidu.com/s?id=1820864227077396024&wfr=spider&for=pc
https://www.dwavesys.com/company/newsroom/press-release/d-wave-announces-fiscal-year-2024-bookings-will-exceed-23-million-up-approximately-120-over-fiscal-year-2023/
https://www.nature.com/articles/s41534-024-00951-5
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/PhysRevResearch.7.013036
https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=73698&pNid=0
https://www.newscientist.com/article/2463346-quantum-computers-get-automatic-error-correction-for-the-first-time/
https://www.nature.com/articles/s41567-024-02708-5
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/PhysRevResearch.7.L012006
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/PhysRevResearch.7.013035
https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.23.014021
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/PRXQuantum.6.010306
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/PRXQuantum.6.010305
https://phys.org/news/2025-01-discovery-class-particles-quantum-mechanics.html
https://www.idquantique.com/elmos-and-id-quantique-join-forces-to-develop-the-worlds-smallest-qrng-solution/
https://quantumcomputinginc.com/news/press-releases/quantum-computing-inc.-announces-private-placement-of-common-stock-for-proceeds-of-100-million
https://quantumcomputinginc.com/news/press-releases/quantum-computing-inc.-secures-third-and-fourth-purchase-orders-for-tfln-photonic-chip-foundry-concluding-2024-pilot-launch-program
https://www.nature.com/articles/s41467-024-55346-z
https://www.bloomberg.com/news/articles/2025-01-08/quantum-computing-stocks-drop-as-nvidia-ceo-sees-use-years-away
https://www.prnewswire.com/news-releases/wimi-develops-fpga-based-homogeneous-and-heterogeneous-digital-quantum-coprocessors-302344276.html
https://consultqd.clevelandclinic.org/machine-learning-and-quantum-computing-predict-which-antibiotic-to-prescribe-for-utis
https://thequantuminsider.com/2025/01/07/riverlane-reports-new-decoder-tech-sets-new-standard-in-quantum-error-correction/
https://www.nature.com/articles/s41534-024-00944-4
https://www.nature.com/articles/s42254-024-00796-z
https://www.nature.com/articles/s41928-024-01319-5
https://www.nature.com/articles/s41928-024-01304-y
https://www.c4irsaudiarabia.org/docs/Quantum
https://www.prnewswire.com/news-releases/microcloud-hologram-inc-launches-a-new-computing-paradigm--digital-analog-quantum-computing-daqc-302343073.html
https://www.forbes.com/sites/petercohan/2025/01/06/rigetti-computing-stock-is-up-1756-why-shares-could-fall/
https://quantumzeitgeist.com/researchers-develop-quantum-search-simulation-technology-ussing-llms-say-hello-to-grovergpt/
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.134.010602
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.134.010603
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/PhysRevResearch.7.013014
https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.23.014015
https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.23.014012
https://interestingengineering.com/innovation/cat-qubits-for-fault-tolerant-quantum-computing
https://www.nature.com/articles/s41598-024-84211-8

https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/PRXQuantum.6.020325
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.134.180602
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/PhysRevResearch.7.023123
https://www.reuters.com/business/media-telecom/cisco-shows-quantum-networking-chip-opens-new-lab-2025-05-06/
https://qphox.eu/news/qphox-rigetti-and-the-nqcc-announce-collaboration-on-multi-channel-optical-readout-of-quantum-processors/
https://www.siliconrepublic.com/machines/equal1-ceadar-ai-quantum-mou
https://setr.stanford.edu/sites/default/files/2025-01/SETR2025_web-240128.pdf
https://qoroquantum.net/wp-content/uploads/2025/05/May-2025-QORO-and-CESGA-Collaboration.pdf
https://news.mit.edu/2025/mit-engineers-advance-toward-fault-tolerant-quantum-computer-0430
https://www.science.org/doi/10.1126/science.adu6894
https://www.nature.com/articles/s41746-025-01597-z
https://terraquantum.swiss/news/terra-quantum-announces-strategic-partnership-with-siemens-unlocking-quantum-advantage-for-sovereign-automotive-and-drone-systems
https://physicsworld.com/a/india-must-boost-investment-in-quantum-technologies-to-become-world-leader-says-report/
https://today.umd.edu/new-national-quantum-hub-to-be-based-at-umds-applied-research-laboratory-for-intelligence-and-security
https://www.nature.com/articles/s41467-025-59296-y#Abs1
https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.23.044064
https://newsroom.ibm.com/2025-04-28-ibm-unveils-150-billion-investment-in-america-to-accelerate-technology-opportunity
https://blogs.microsoft.com/on-the-issues/2025/04/28/investing-in-american-leadership-quantum/
https://www.globenewswire.com/news-release/2025/04/28/3069162/0/en/Rigetti-Granted-Air-Force-Office-of-Scientific-Research-Award-to-Further-Develop-Breakthrough-Chip-Fabrication-Technology.html
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/PRXQuantum.6.020319
https://ionq.com/news/ionq-announces-usd22m-deal-with-epb-establishing-chattanooga-tennessee-as
https://www.ulvac.co.jp/en/news/20250424a/
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/PRXQuantum.6.020318
https://www.businesswire.com/news/home/20250424928607/en/IQM-to-Deploy-Polands-First-Superconducting-Quantum-Computer
https://www.pnnl.gov/news-media/scientists-speed-groundwork-essential-quantum-computing
https://www.dwavequantum.com/company/newsroom/press-release/d-wave-and-davidson-technologies-near-installation-completion-of-alabama-s-first-on-site-annealing-quantum-computer/
https://www.oxinst.com/news/oxford-instruments-nanoscience-installs-two-of-its-largest-modular-dilution-refrigerators/?sbms=nanoscience
https://ionq.com/news/ionq-signs-historic-agreement-with-toyota-tsusho-corporation-to-advance
https://oqc.tech/company/newsroom/oqc-riverlane-quantum-error-correction-testbed
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.134.160601
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.134.163601
https://www.fujitsu.com/global/imagesgig5/20250422-01f.pdf
https://www.einpresswire.com/article/804206296/innovate-uk-awards-treq-led-consortium-1-65-million-to-create-open-architecture-quantum-testbed
https://investors.rigetti.com/news-releases/news-release-details/rigetti-wins-innovate-uks-quantum-missions-pilot-competition
https://www.nature.com/articles/s41467-025-59198-z
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/PhysRevResearch.7.023076
http://photo.china.com.cn/2025-04/22/content_117836865.shtml
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/PhysRevResearch.7.023073

https://www.businesskorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=248757
https://www.globenewswire.com/news-release/2025/08/04/3126601/0/en/QuamCore-Secures-26M-Series-A-to-Build-1-Million-Qubit-Quantum-Computer-in-a-Single-Cryostat.html
https://www.dwavequantum.com/company/newsroom/press-release/d-wave-introduces-new-developer-tools-to-advance-quantum-ai-exploration-and-innovation/
https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adx6857
https://www.nature.com/articles/s41534-025-01082-1
https://www.nature.com/articles/s41598-025-04365-x
https://www.nature.com/articles/s41598-025-12515-4
https://www.nature.com/articles/s41467-025-62275-y
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/msm2-vmg7
http://www.miciusprize.org/
https://www.nature.com/articles/s41598-025-08392-6
https://www.nature.com/articles/s43246-025-00898-w
https://www.nature.com/articles/s41598-025-08787-5
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/h7pq-s159
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/7dkh-crjj
https://www.quantum-art.tech/resources/quantum-art-demonstrates-200-ion-linear-chain-in-trapped-ion-system
https://www.investing.com/news/transcripts/earnings-call-transcript-microsoft-reports-q4-2025-earnings-beat-stock-rises-93CH-4161549
https://ionq.com/news/ionq-partners-with-oak-ridge-national-laboratory-demonstrating-quantum-power?utm_source=linkedin&utm_medium=social&utm_campaign=GRID-Q&utm_content=press-release&utm_term=45839
https://thesouthfirst.com/karnataka/chief-minister-siddaramaiah-speaks-at-the-inaugural-ceremony-of-the-quantum-india-bengaluru-2025/
https://global.fujitsu/en-global/newsroom/gl/2025/08/01-01
https://www.keysight.com/us/en/about/newsroom/news-releases/2025/0729-pr25-keysight-installs-worlds-largest-commercial-quantum-control-system-at-aists-leading-edge-g-quat-center.html
https://www.classiq.io/insights/softbank-vision-fund-2-makes-strategic-investment-in-classiq-expanding-series-c
https://www.dwavequantum.com/company/newsroom/press-release/d-wave-quantum-announces-strategic-development-initiative-for-advanced-cryogenic-packaging/
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/npr7-b7kq
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/ch5r-cnfq
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/g9f9-p8ks
https://news.uchicago.edu/story/uchicago-partners-ibm-strengthen-quantum-computing-startups-illinois
https://xanadu.ai/press/xanadu-and-hyperlight-unveil-groundbreaking-advancements-in-photonic-chips-setting-new-benchmarks-for-quantum-computing-performance
https://www.softbank.jp/en/corp/news/press/sbkk/2025/20250729_01/
https://www.nature.com/articles/s41534-025-01041-w
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/yx15-jyl7
https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.24.014052
https://www.nature.com/articles/s41467-025-62224-9#Abs1
https://www.nature.com/articles/s41377-025-01919-6#
https://www.nature.com/articles/s41534-025-01067-0#
https://www.horizonquantum.com/updates/news/horizon-quantum-joins-the-quera-quantum-alliance-strengthening-quantum-software-ecosystem
https://www.nature.com/articles/s41567-025-02944-3#Abs1
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/9pbp-jzr9
https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/np2t-48rm
https://www.superq.co/news/superq-quantum-announces-initial-revenue-from-d-wave-collaboration-on-quantum-powered-robotic-motion-planning-at-scale
https://arxiv.org/pdf/2507.17952
https://www.nature.com/articles/s41534-025-01076-z

https://nmpoliticalreport.com/2025/09/02/new-mexico-partners-on-120-million-quantum-computing-initiative/
https://investors.rigetti.com/news-releases/news-release-details/rigetti-and-indias-centre-development-advanced-computing
https://quantumcircuits.com/resources/quantum-circuits-integrates-with-nvidia/
https://www.nature.com/articles/s41534-025-01094-x
https://www.nature.com/articles/s41534-025-01101-1
https://www.nature.com/articles/s41467-025-63214-7
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/2lyd-8swv
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/dtlf-2q82
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/j4bk-tvhc
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/pvn4-ct5m
https://www.ornl.gov/news/ornl-study-plans-quantum-hpc-software-stack
https://www.prnewswire.com/apac/news-releases/norma-completes-quantum-ai-algorithm-validation-on-nvidia-302541638.html
https://www.nature.com/articles/s41598-025-17651-5#Abs1
https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/b9hf-gx4f
https://qt.eu/news/2025/2025-08-28_eu-gives-unprecedented-access-to-quantum-computers
https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/rbhx-3fjd
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/cslt-x32n
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/3l96-41xf
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/c661-yr2z
https://www.nature.com/articles/s41467-025-63042-9
https://www.nature.com/articles/s41598-025-13923-2
https://www.nature.com/articles/s41598-025-13923-2
https://www.quantinuum.com/blog/quantum-computing-joins-the-next-frontier-in-genomics
https://ionq.com/news/ionq-highlighted-in-12-events-and-4-scientific-papers-at-2025-ieee
https://www.nature.com/articles/s41598-025-13417-1
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/5n4p-bxhm
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/fl9b-4h4v
https://www.nature.com/articles/s41598-025-17075-1
https://www.nature.com/articles/s41586-025-09476-z
https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/n73t-7q1n
https://qci.dlr.de/en/d-fine-planqc-partner-support-qcmobility-for-more-efficient-and-reliable-rail-transport/
https://www.riken.jp/en/news_pubs/news/2025/20250822_1/index.html
https://newsroom.ibm.com/2025-08-26-ibm-and-amd-join-forces-to-build-the-future-of-computing
https://www.nature.com/articles/s41534-025-01097-8
https://www.nature.com/articles/s41928-025-01445-8
https://www.nature.com/articles/s41467-025-63398-y
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/npp4-b1xb
https://journals.aps.org/pra/abstract/10.1103/jt8s-hzhd
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/zkpl-hh28
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/11lg-bqbm
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/66s8-jj18
https://www.nature.com/articles/s42005-025-02270-3
https://www.nature.com/articles/s41567-025-03004-6
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/zpjv-bm5c
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/4s4k-rf6x
https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/3cmg-5rk7
https://www.einpresswire.com/article/841237639/entanglement-and-maybell-quantum-announce-strategic-partnership-to-accelerate-quantum-computing-innovations
https://www.quantinuum.com/blog/built-for-all-introducing-our-new-software-stack
https://www.nullspaceinc.com/news/nullspace-raises-seed-round
https://dinsight.ai/board/board_view?code=gallery&no=57
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/z2jq-1rxp
https://www.qtlaser.cn

https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/f9mm-vz8w
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/1x1x-j1xl
https://sparrowquantum.com/post/sparrow-quantum-launches-sparrow-nest
https://www.hpe.com/us/en/newsroom/press-release/2025/11/hpe-and-partners-launch-quantum-scaling-alliance-to-accelerate-quantum-computing-breakthroughs.html
https://www.globenewswire.com/news-release/2025/11/10/3185067/0/en/Rigetti-Computing-Reports-Third-Quarter-2025-Financial-Results-Provides-Technology-Roadmap-Updates-for-2026-and-2027.html
https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/v11m-dbhm
https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/zbcs-jdq2
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/qt55-7d6r
https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/ls5r-vj7r
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/f8xg-w57m
https://www.nature.com/articles/s41598-025-22950-y
https://qilimanjaro.tech/qilimanjaro-launches-worlds-first-multimodal-quantum-data-center-paving-the-way-for-the-computing-of-the-future/
https://qudora.com/news/smaraq-integrates-quantum-optics-on-a-chip-paving-the-way-for-next-generation-quantum-computers/
https://www.nature.com/articles/s41534-025-01111-z
https://www.nature.com/articles/s41467-025-64757-5
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/d8rx-srpn
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/vpyw-nszk
https://www.pasqal.com/newsroom/pasqal-and-lg-electronics-forge-strategic-partnership-to-advance-quantum-innovation-and-industrial-applications/
https://www.hartree.stfc.ac.uk/news/2025/11/06/alice-bob-and-stfc-hartree-centre-integrate-cat-qubit-quantum-computers-into-standard-hpc-workflow-and-job-scheduling-software-slurm/
https://www.darpa.mil/research/programs/quantum-benchmarking-initiative
https://cn.wicinternet.org/2025-11/07/content_38396812.htm
https://www.nature.com/articles/s41467-025-64872-3
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/rd56-b8tc
https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/xptl-hx1j
https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/b9s1-6r44
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/7rnm-rxhh
https://www.science.org/doi/10.1126/science.adq0278
https://www.quantinuum.com/press-releases/quantinuum-announces-commercial-launch-of-new-helios-quantum-computer-that-offers-unprecedented-accuracy-to-enable-generative-quantum-ai-genqai
https://news.bloomberglaw.com/business-and-practice/fidelity-invests-in-10-billion-honeywell-backed-quantinuum
https://www.oxinst.com/news/news/oxford-instruments-contributes-technology-to-oqc-quantum-ai-data-centre/
https://www.quantinuum.com/press-releases/singapores-national-quantum-office-and-quantinuum-forge-strategic-partnership-to-accelerate-quantum-computing
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/gk5h-l7q4
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/1gjs-2rhx
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/8ypw-c8t4
https://www.nature.com/articles/s41565-025-02043-7
https://www.nature.com/articles/s41586-025-09687-4
https://www.westofengland-ca.gov.uk/news/uk-first-as-west-of-england-signs-tech-agreement-with-us-quantum-leaders/
https://aws.amazon.com/marketplace/pp/prodview-qhcdigrffndr2
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/xkqs-grnd
https://www.whitehouse.gov/articles/2025/10/the-united-states-signs-technology-prosperity-deals-with-japan-and-korea/
https://www.keysight.com/us/en/about/newsroom/news-releases/2025/1029_pr25-129-keysight-advances-quantum-engineering-with-new-system-level-simulation-solution.html

https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/d896-mktn
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/wsnf-prwl
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/zlp8-rz9n
https://www.thehindu.com/news/national/andhra-pradesh/sitam-college-signs-mou-with-qubitech/article70338736.ece
https://www.nature.com/articles/s41534-025-01133-7
https://www.nature.com/articles/s41467-025-65761-5
https://www.nature.com/articles/s41467-025-65765-1
https://www.science.org/doi/10.1126/science.adp6802
https://www.nature.com/articles/s41467-025-66722-8
https://www.nature.com/articles/s41534-025-01144-4
https://www.nature.com/articles/s41534-025-01130-w
https://www.nature.com/articles/s41534-025-01132-8
https://www.iaf.fraunhofer.de/de/medien/pressemitteilungen/inqubator-quantencomputing-testzentrum.html
https://mp.weixin.qq.com/s/G38O7N5-uvCoMnHSLBhlPA
https://meetiqm.com/press-releases/iqm-to-invest-over-e40-million-to-expand-finland-production-facility-accelerate-innovation-and-fuel-growth/
https://www.nature.com/articles/s42005-025-02384-8
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/9yxv-tdqr
https://craneharboracquisition.com/news/news-details/2025/Xanadu-Rolls-Royce-and-Riverlane-unlock-dramatic-improvements-for-applications-to-jet-engine-airflow-simulations-using-quantum-computing/default.aspx
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/425n-6k9s
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/yfwq-yqmk
https://www.pasqal.com/newsroom/aramco-and-pasqal-make-history-with-saudi-arabia-first-quantum-computer/
https://www.nature.com/articles/s41598-025-25271-2
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/52xz-3hpc
https://www.businesswire.com/news/home/20251120658111/en/Infleqtion-Chief-Scientist-Dr.-Mark-Saffman-Wins-Prestigious-2026-Norman-F.-Ramsey-Prize
https://news.sjtu.edu.cn/jdyw/20251123/217088.html
https://www.nature.com/articles/s41467-025-65198-w
https://www.nature.com/articles/s41534-025-01143-5
https://www.nature.com/articles/s41598-025-27219-y
https://www.nature.com/articles/s41467-025-65083-6
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/56vj-z7h1
https://newsroom.ibm.com/2025-11-20-ibm-and-cisco-announce-plans-to-build-a-network-of-large-scale,-fault-tolerant-quantum-computers
https://www.skywatertechnology.com/skywater-technology-and-silicon-quantum-computing-team-to-advance-hybrid-quantum-classical-computing/
https://kjt.ah.gov.cn/kjzx/mtjj/123191131.html
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/m9kq-wrln
https://www.nature.com/articles/s42005-025-02423-4
https://www.ensilica.com/news/ensilica-to-develop-quantum-resilient-secure-processor-chip-for-critical-national-infrastructure-applications-backed-by-5m-uk-government-contract-for-innovation/
https://www.kvantify.com/blog/danish-company-kvantify-releases-transformative-chemistry-software-qrunch-for-quantum-computers
https://www.riverlane.com/press-release/riverlane-report-reveals-scale-of-the-quantum-error-correction-challenge
https://www.globenewswire.com/news-release/2025/11/19/3190889/0/en/Classiq-and-BQP-Demonstrate-Hybrid-Quantum-Classical-Breakthrough-for-Scalable-Digital-Twin-and-CFD-Simulation-with-NVIDIA.html
https://www.nature.com/articles/s42005-025-02360-2
https://www.nature.com/articles/s41534-025-01120-y
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/fkh5-b669
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/ktb3-gcxr

https://mp.weixin.qq.com/s/foEJa3ZEUxq6PQh8gYxyiw
https://www.nature.com/articles/s41598-025-32572-z
https://tass.com/science/2063765
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/w5l6-wmrl
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/ggp1-byj1
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/6d6n-3trh
https://www.nature.com/articles/s41467-025-67768-4
https://www.nature.com/articles/s41598-025-32484-y
https://investors.ionq.com/news/news-details/2025/IonQ-and-KISTI-Finalize-Agreement-to-Deliver-100-Qubit-Quantum-System-in-South-Korea/default.aspx
https://meetiqm.com/press-releases/spains-cesga-selects-iqm-and-telefonica-to-deploy-advanced-quantum-computing-infrastructure/
https://www.superq.co/news/superq-to-launch-chatqlm-at-ces-2026
https://www.venturesquare.net/1021387
https://www.nature.com/articles/s41467-025-67766-6
https://www.nature.com/articles/s41598-025-30092-4
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/yhyv-xnwq
https://www.dwavequantum.com/company/newsroom/press-release/d-wave-to-bring-commercial-quantum-computing-to-ces-2026/
https://www.nature.com/articles/s43588-025-00895-6
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/8m33-wn4g
https://global.fujitsu/en-global/technology/research/article/topics/202512-quantum-simulator-challenge
https://www.sealsq.com/investors/news-releases/sealsq-unveils-strategic-plan-for-2026-2030-to-develop-silicon-based-quantum-computing-using-cmos-compatible-semiconductor-technologies
https://www.xanadu.ai/press/xanadu-pioneers-the-use-of-quantum-computers-in-photodynamic-cancer-therapy-research
https://static.sse.com.cn/disclosure/listedinfo/announcement/c/new/2025-12-20/688027_20251220_ZIIE.pdf
https://www.nature.com/articles/s41598-025-32780-7
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/5lm1-2kpk
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/ndc3-bdwt
https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/6nxd-nsvg
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/hrph-dbv7
https://www.globenewswire.com/news-release/2025/12/18/3207974/0/en/QubitSolve-Wins-1-2M-NSF-SBIR-Grant-to-Unlock-Faster-More-Affordable-Product-Development-with-Quantum-CFD.html
https://universalquantum.com/knowledge-hub/uq-and-atlas-copco-forge-partnership-to-build-utility-scale-quantum-computers
https://www.keysight.com/us/en/about/newsroom/news-releases/2025/1218_pr25-096-keysight-joins-forces-with-singapores-quantum-leaders-to-advance-capabilities-in-the-design-and-control-of-qubits.html
https://www.nature.com/articles/s41598-025-27675-6
https://www.nature.com/articles/s41534-025-01151-5
https://www.aboutamazon.com/news/company-news/andy-jassy-peter-desantis-amazon-leadership-update
https://quantumcomputinginc.com/news/press-releases/2025/quantum-computing-inc.-confirms-dr.-yuping-huang-as-chief-executive-officer-to-lead-global-growth
https://www.nature.com/articles/s41586-025-09827-w
https://www.nature.com/articles/s41467-025-66773-x
https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/jr7l-2cfb
https://qilimanjaro.tech/qilimanjaro-and-oxigen-data-center-to-explore-the-integration-of-multimodal-quantum-computers-within-commercial-data-centers/
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/8hkk-2c6d
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/x52w-4rbs
https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/yflv-3s7t
https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/czph-xpzs

ICV TA&K
Technology Advisory
& Knowledgebase

ICV TA&K（全称 (Technology Advisory & Knowledgebase)，中文常译为“智能与知识智库”或“ICV 前沿科技咨询”）已成为定义未来产业标准与评估体系的领军机构。

1. 机构定义：未来产业的“导航者”与“评估者”

ICV TA&K 是一家专门从事前沿技术（Frontier Tech）战略咨询、市场研究及产业评价的国际化智库。不同于传统的会计师事务所或通用型咨询公司，ICV 的核心基因在于“技术深度”。目前已将业务触角延伸至量子信息、具身智能、生物制造、低空经济、6G 通信以及脑科学等九大关键颠覆性领域。它被公认为全球“未来产业”布局的风向标，为各国政府制定产业政策及财富 500 强企业进行战略投资提供底层数据支持。

2. 核心竞争力：Q-EMC多维指标评价体系

ICV 公司最显著的贡献在于其自主研发的**Q-EMC**核心技术评估模型。这套模型不仅是您所使用的全球城市排名的基础，也是衡量一家企业或一个地区“未来竞争力”的国际标准。

数据驱动： ICV 整合了包括 WIPO（世界知识产权组织）、OECD、IEEE 以及全球主流高性能计算中心（HPC）的实时数据，确保每一份排名和指数（如 2025 全球未来城市排名）都具备严谨的科学依据和行业公信力。

3. 业务版图：从“前沿智库”到“战略加速器”

ICV 的业务模式分为三大板块，构成了其完整的知识生态系统：

前沿智库： 每年发布超过 50 份深度的全球行业报告，涵盖从量子芯片制程路线图到 L5 自动驾驶责任法典等关键课题。

战略咨询与评估： 协助波音、特斯拉、丰田等巨头在全球范围内进行供应链韧性评估，并为新加坡、北京、旧金山等城市的智慧城市建设提供顶层设计建议。

金融情报服务： 针对风险投资（VC）和私募股权（PE），ICV 专门设立了“量子独角兽”与“具身智能明星”追踪系统，通过分析初创企业的技术专利护城河（Filing Strength）来预测其商业潜能。

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

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。

联系我们

iCV TA&K
Technology Advisory
& Knowledgebase

Canada

5250 Fairwind Dr.
Mississauga, Ontario,
L5R 3H4,
Canada

Singapore

101 Upper Cross Street,
#04-17,
People's Park Centre,
Singapore

infer@icvtank.com

https://www.icvtank.com/

光子盒研究院
QUANTUMCHINA

扫一扫
关注光子盒

扫一扫
咨询研究员

网址：https://www.quantumchina.com/

总部：北京市海淀区信息路26号中关村创业大厦7层701

分部：上海市长宁区仙霞路317号远东国际广场B栋613

分部:成都市高新区天府软件园G区G1栋803