

量子计算发展态势研究报告

(2025 年)

中国信息通信研究院技术与标准研究所
中移（苏州）软件技术有限公司
北京玻色量子科技有限公司

2025年9月

版权声明

本报告版权属于中国信息通信研究院、中移（苏州）软件技术有限公司和北京玻色量子科技有限公司，并受法律保护。转载、摘编或利用其它方式使用本报告文字或者观点的，应注明“来源：中国信息通信研究院、中移（苏州）软件技术有限公司和北京玻色量子科技有限公司”。违反上述声明者，编者将追究其相关法律责任。

前言

量子计算以量子比特为基本单位，基于量子叠加和量子纠缠等特性实现高效并行运算，有望为解决复杂计算难题提供指数级加速，成为推动未来算力跨域式发展重要方向，兼具重要科学价值和战略意义。量子计算已成为全球科技强国投资布局的重点方向，各国纷纷加大在前沿技术攻关、原型机研发、应用场景探索以及产业生态构建等方面投入力度，量子计算国际竞争正日趋白热化。

量子计算领域正处于技术突破、应用探索和产业培育同步推进的关键期。超导、离子阱、中性原子、光量子、硅半导体、拓扑等技术路线创新成果不断涌现，原型机性能指标持续提升。量子计算在金融、化工、生物、交通等领域的应用场景探索日益深入，基准测评体系和测试验证平台等逐步完善，量子计算与人工智能融合的双向赋能研究成为业界关注热点。科技巨头与初创企业成为推动产业创新主体，市场投融资和产业生态合作保持高度活跃。

中国信息通信研究院联合业界机构持续开展量子计算发展态势研究。本报告重点关注近一年来国内外量子计算关键技术研究、应用场景探索和产业生态培育的最新进展和热点事件，分析量子计算技术演进方向与应用产业的未来发展趋势并提出发展建议，为汇聚行业力量、构建协同生态提供参考。

目录

一、全球高度重视量子计算，推动技术产业快速发展.....	1
（一）量子计算引发技术产业变革，多国均高度重视.....	1
（二）科研探索与技术创新发展迅速，成为科研热点.....	4
（三）量子计算企业数量持续增长，投融资保持活跃.....	8
二、量子计算技术研发进展迅速，技术攻关面临挑战.....	11
（一）多硬件技术路线并行发展，竞争态势仍将持续.....	11
（二）量子纠错成为关注焦点，距离实用化仍有差距.....	16
（三）量子软件与算法多元开放探索，持续迭代演进.....	18
（四）环境测控系统多样化发展，核心指标亟待提升.....	22
三、量子计算应用探索持续推进，跨域融合渐成趋势.....	24
（一）行业应用探索广泛开展，实用化落地仍未突破.....	24
（二）量子云平台成为应用探索与跨域融合重要支撑.....	27
（三）基准测评已成为研究热点，助力推动行业发展.....	31
（四）量子-经典融合计算可能成为实用化落地突破口.....	34
（五）量子计算与人工智能协同创新是未来重要方向.....	37
四、量子计算产业初具雏形，未来发展仍需多方协同.....	39
（一）产业生态格局初成，核心环节尚需要持续攻关.....	39
（二）企业处于活力迸发期，持续推动产业生态发展.....	42
（三）联盟推动生态培育，公共平台强化产学研协同.....	46
（四）标准化取得初步进展，体系建设仍需持续推进.....	49
五、总结与展望.....	51

图目录

图 1 全球量子计算科研论文和专利数量年度变化趋势.....	4
图 2 全球量子计算科研论文数量前十位国家情况.....	5
图 3 量子计算不同技术路线全球发文情况.....	6
图 4 全球量子计算专利主要来源国家情况.....	7
图 5 全球量子计算不同技术路线专利情况.....	7
图 6 全球量子计算企业数量年度变化趋势.....	8
图 7 全球量子计算不同技术路线整机企业分布情况.....	9
图 8 全球量子计算企业投融资事件与金额变化趋势.....	10
图 9 2024 年量子计算产业投融资笔数类型分布.....	11
图 10 量子计算软件体系架构图.....	18
图 11 量子计算应用前景分析预测.....	25
图 12 全球典型量子计算云平台概况.....	28
图 13 量子计算测评体系 2.0.....	33
图 14 欧美量子计算产业生态体系概况.....	39
图 15 全球典型量子信息产业联盟概况.....	47

表目录

表 1 全球主要国家量子信息领域战略规划和投资情况.....	1
--------------------------------	---

一、全球高度重视量子计算，推动技术产业快速发展

（一）量子计算引发技术产业变革，多国均高度重视

量子计算是一种利用量子叠加和量子纠缠等量子力学原理进行信息处理的新型计算范式，以量子比特为基本运算单元，能够实现超高速的并行计算，并具有为特定问题提供指数级计算加速的潜力。量子计算作为一项具有颠覆性意义的技术，不仅有望深刻推动信息技术和科学研究的变革，也为解决经典计算难以有效处理的复杂问题提供新思路 and 可能性。

全球主要科技强国均将量子计算视为战略制高点，并通过国家战略引导与资本投入等方式展开激烈角逐。量子计算作为未来技术革命的关键领域之一，已形成多国竞争博弈的格局。全球主要国家的开展以量子计算为重点的量子科技领域战略布局与投资情况如表 1 所示。随着各国持续加大投入，以及技术研发与产业应用的不断推进，未来几年全球量子计算领域的竞争态势预计将愈发激烈。

表 1 全球主要国家量子信息领域战略规划和投资情况

时间	战略/规划/法案	国家/地区	投资规模（美元）
2014	国家量子技术计划	英国	10 年投资约 12.15 亿
2018	量子旗舰计划	欧盟	10 年投资约 11 亿
2018	国家量子倡议法案	美国	7 年累计投资达 60.78 亿
2019	量子技术发展国家计划	荷兰	7 年投资约 7.4 亿
2019	国家量子技术计划	以色列	5 年投资约 3.3 亿
2019	国家量子行动计划	俄罗斯	5 年投资约 5.3 亿
2020	国家量子技术投资计划	法国	5 年投资约 19.6 亿
2020	量子计算机研发计划	日本	10 年投资约 17.5 亿
2021	量子系统研究计划	德国	5 年投资约 21.7 亿
2022	国家量子计算平台	法国	投资约 1.85 亿
2022	芯片与科学法案	美国	4 量子项目 5 年投资 7.65 亿
2023	国家量子战略	加拿大	7 年投资约 3.6 亿

2023	国家量子战略	英国	未来 10 年投资 31.8 亿
2023	国家量子战略	澳大利亚	2030 年前投资 6.4 亿
2023	国家量子技术战略	丹麦	5 年投资约 1 亿
2023	量子科技发展战略	韩国	2035 年前投资 17.9 亿
2023	量子 2030	爱尔兰	已投资 0.24 亿
2024	国家量子任务	印度	2030 年前投资 7.26 亿
2024	国家量子战略	新加坡	5 年投资约 2.19 亿
2024	能源部量子领导法案	美国	5 年计划投资约 25 亿
2025	国家量子技术战略	芬兰	10 年投资 4.69 亿
2025	量子技术战略	西班牙	5 年投资 9.17 亿
2025	量子欧洲战略	欧盟	投资规模未公布

来源：中国信息通信研究院（截至 2025 年 8 月）

美国在量子计算领域的战略布局呈现出全方位、系统化的特点，通过协同推进基础科研攻关、硬件技术突破、应用场景拓展与产业生态培育等多种措施，构建了一套层次分明、多路径并进的战略实施体系。2024 年底，美国国家科学技术委员会发布《国家量子倡议（NQI）2025 年年报》¹，报告中总结了美国在量子信息科学领域的研发支出和预算，2019 年至 2024 年的投资分别为 4.56 亿美元、6.9 亿美元、8.51 亿美元、10.41 亿美元、10.36 亿美元、10.06 亿美元，2025 年的预算请求为 9.98 亿美元。2025 年，美国公布 2026 年预算提案²，大幅削减公共研究经费，但保留了量子领域的研究资金，一定程度上表明量子信息技术仍是美国政府重点关注的科研领域，同时，美国 IBM、谷歌、微软等科技巨头也呼吁美联邦政府继续协调资源以保持量子领域的发展势头。

欧盟通过战略政策支持、资金投入与研发基础设施建设等举措，

¹ <https://www.quantum.gov/the-national-quantum-initiative-supplement-to-the-presidents-fy-2025-budget-released/>

² <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2025/05/Fiscal-Year-2026-Discretionary-Budget-Request.pdf>

系统推进量子计算发展，支持范围覆盖从基础研究到产业培育的全链条。2025年，欧盟发布《塑造欧洲量子技术战略》报告³，内容涵盖科学研究、人才与影响、基础设施及工业化与标准化三个领域，并提出建立新的协调平台、扩大基础设施建设和增加私人投资等建议，以应对国际竞争挑战。欧盟委员会发布《欧洲量子战略》⁴，重点聚焦五大核心领域，旨在通过研发创新、基础设施建设和产业转化等举措，提升欧洲的工业竞争力和科技自主权，并强化国防、医药等领域的量子技术应用。

我国高度重视以量子计算为重点的量子信息技术领域技术发展和未来产业培育，积极推动量子信息领域总体方案、发展战略、产业行动等政策和重点任务落地实施。2025年政府工作报告⁵在2024年工作回顾中提到，创新能力有新提升，集成电路、人工智能、量子科技等领域取得新成果；在因地制宜发展新质生产力，加快建设现代化产业体系中提到，建立未来产业投入增长机制，培育生物制造、量子科技、具身智能、6G等未来产业。此外，北京、安徽、广东、上海、湖北等省市通过布局科技研发项目、设立未来产业基金、支持新型研发机构、建设公共平台设施、孵化培育初创企业、提供产品服务采购等措施，积极推动量子计算技术研究和产业生态建设。

此外，英国、加拿大、德国、日本、西班牙、意大利、澳大利亚、新加坡等国家也积极在量子计算领域开展技术产业布局，通常

³ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/shaping-european-strategy-quantum-technology-main-orientations-and-recommendations>

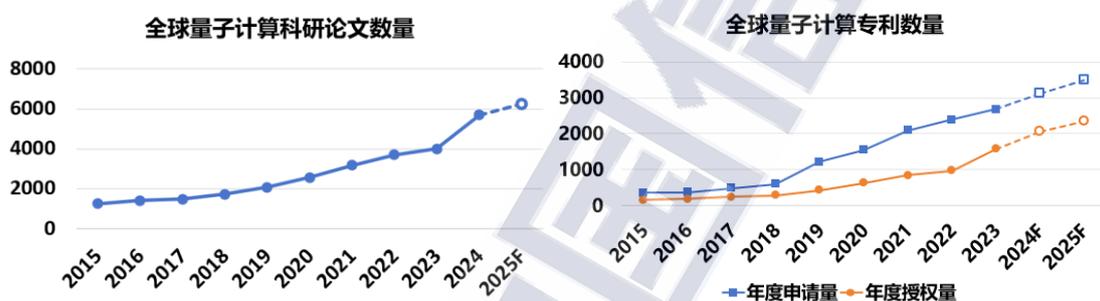
⁴ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/quantum-europe-strategy>

⁵ <http://www.qsttheory.cn/20250312/1179da8cc14a4c389e5d44444c88e8a6/c.html>

结合自身技术优势、产业需求或地缘战略，采取部分技术路线、产业链关键环节等方面的差异化布局和竞争策略，旨在通过细分领域突破构建量子计算领域的竞争优势。

（二）科研探索与技术创新发展迅速，成为科研热点

量子计算科研探索与技术创新发展较为迅速，已成为当前前沿技术领域的研究热点。近十年全球量子计算科研论文数量和发明专利数量如图 1 所示。



来源：中国信息通信研究院

图 1 全球量子计算科研论文和专利数量年度变化趋势⁶

全球量子计算科研论文数量从 2015 年的 1000 余篇增至 2024 年的 5000 余篇，其中 2019 年起进入“加速道”，2020-2021 年年增量均超 500 篇。2024 年同比增长 42%，单年论文增量达到 1600 余篇，创十年之最。基于过去的增长趋势判断，全球量子计算科研论文数量在未来几年内有望保持持续上升趋势，相关科研成果将不断涌现。

近十年，全球量子计算发明专利申请量共计 19000 余件，全球授权总量 8000 余件。专利申请方面，自 2016 年开始进入快速增长

⁶ 2024-2025 年科研论文和专利统计均存在滞后性，近 2 年数据包含预测值。

期，年申请量持续攀升，至 2022 年达到历史最高点，2023 年出现小幅回落。2024-2025 年专利数据统计有滞后性，根据现有数据判断，整体专利申请呈上升态势。专利授权方面，同样自 2016 年起保持稳定增长，2024 年创下峰值记录，尽管 2024-2025 年受统计周期影响授权量有所波动，但预计全年授权规模将继续保持增长势头。

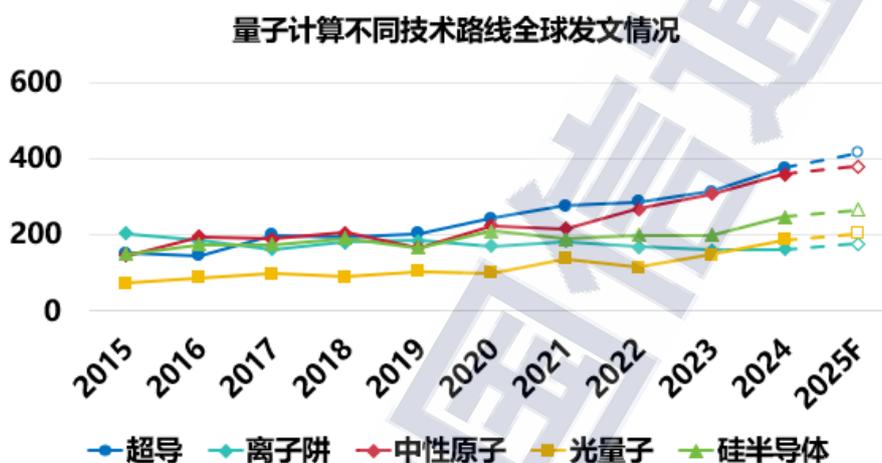
全球主要国家量子计算论文数量及篇均被引频次统计如图 2 所示，能够较为直观地体现各国在量子计算领域的科研产出水平和学术影响力。从发文量的区域分布看，美国和中国占据前两位，远超其他国家，科研活跃程度和前沿地位由此可见一斑。德国、印度和日本的发文数量紧随其后，展现出上述国家在量子计算领域的研究活力。从篇均被引频次分布看，加拿大以 37 次的篇均引用拔得头筹，彰显其研究成果的较高认可度。美国以 32 次紧随其后，德国和法国均为 28 次。值得注意的是，尽管我国量子计算论文总量高居全球第二，但 16 次的篇均被引频次相对偏低，反映出我国在高质量研究成果方面仍有提升空间。



来源：中国信息通信研究院（截至 2025 年 8 月）

图 2 全球量子计算科研论文数量前十位国家情况

现阶段不同量子计算技术路线并行发展，超导、离子阱、中性原子、光量子、硅半导体等路线的科研论文数量统计如图 3 所示，展现了各技术路线的研究热度分布。可以看出，上述技术路线均受到学术界的重点关注，发文量持续保持高位，尤其是超导量子计算和中性原子量子计算，近年来论文发表数量高于其他技术路线。

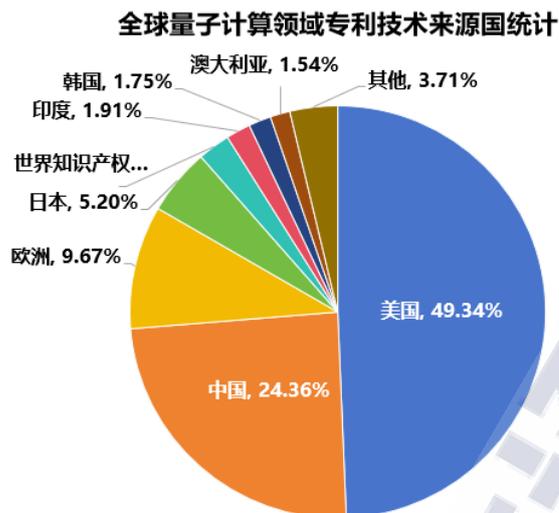


来源：中国信息通信研究院

图 3 量子计算不同技术路线全球发文情况⁷

全球量子计算专利申请的主要技术来源国统计如图 4 所示，呈现了各主要国家在量子计算领域的技术产出与贡献程度。可以看出，美国和中国是量子计算专利的主要来源国，分别占比 49.34%和 24.36%，处于领先地位。除此之外，欧洲、日本、印度、韩国等国家/地区也均有一定占比。上述数据表明，这些国家/地区在量子计算技术研发方面保持着较强的创新活力和技术产出能力，尤其是美国和中国，其专利贡献度显著高于其他国家和地区。

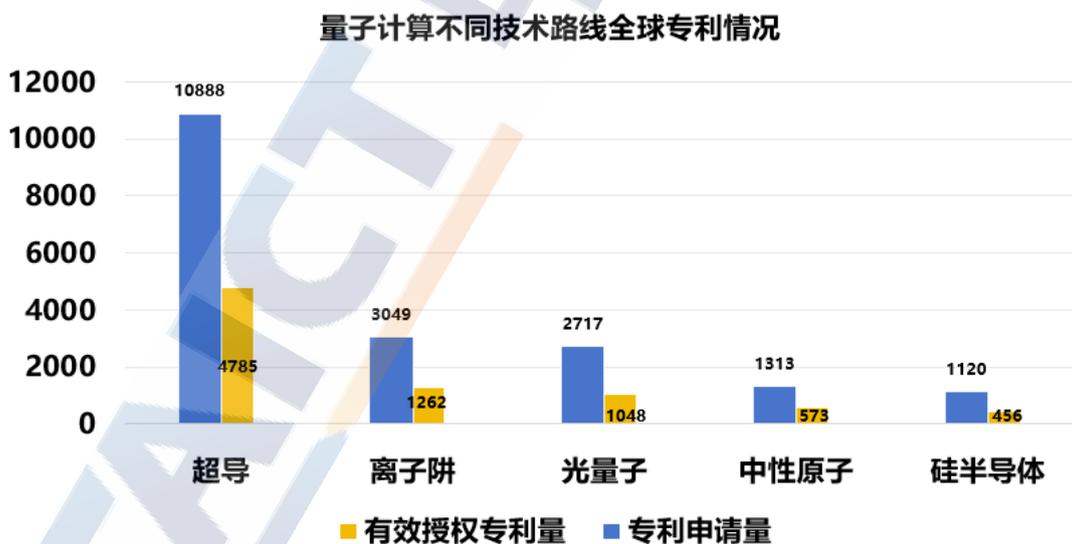
⁷ 2025 年科研论文统计存在滞后性，近 1 年数据包含预测值。



来源：中国信息通信研究院（截至 2025 年 8 月）

图 4 全球量子计算专利主要来源国家情况

全球量子计算不同技术路线专利数量对比情况如图 5 所示。从专利申请量和有效授权专利量两方面均可看出，超导技术路线的专利数量在各技术路线中占据优势，这表明了超导路线持续被业内企业和科研机构看好，现阶段具有较高的技术潜力和较好的发展前景。



来源：中国信息通信研究院（截至 2025 年 8 月）

图 5 全球量子计算不同技术路线专利情况

（三）量子计算企业数量持续增长，投融资保持活跃

量子计算企业数量持续增长，且增速依旧保持在较高水平，一定程度上表明该领域的发展潜力得到了产业界的认可。全球量子计算企业数量及年度增长趋势如图 6 所示。截至 2025 年 8 月，全球量子计算企业已超过 400 家，其中超过 300 家企业是在 2014 年之后成立的。从增长趋势来看，2017 年成为行业的重要转折点，2017 年之前量子计算企业数量增长较为缓慢，而在 2017 年后迎来了快速增长期，至 2021 年达到峰值，当年新增企业 44 家。2017-2024 年间每年新增至少 30 家，可以看出过去十年间量子计算领域的企业数量稳定增长的态势。从地区分布来看，美国以总计 107 家量子计算企业领先，其中 2014 年之后成立的企业有 78 家；中国共有 42 家，2014 年之后成立的企业为 31 家。中美两国企业数量及活跃度在全球处于领先地位，已成为推动量子计算技术产业发展的核心力量。

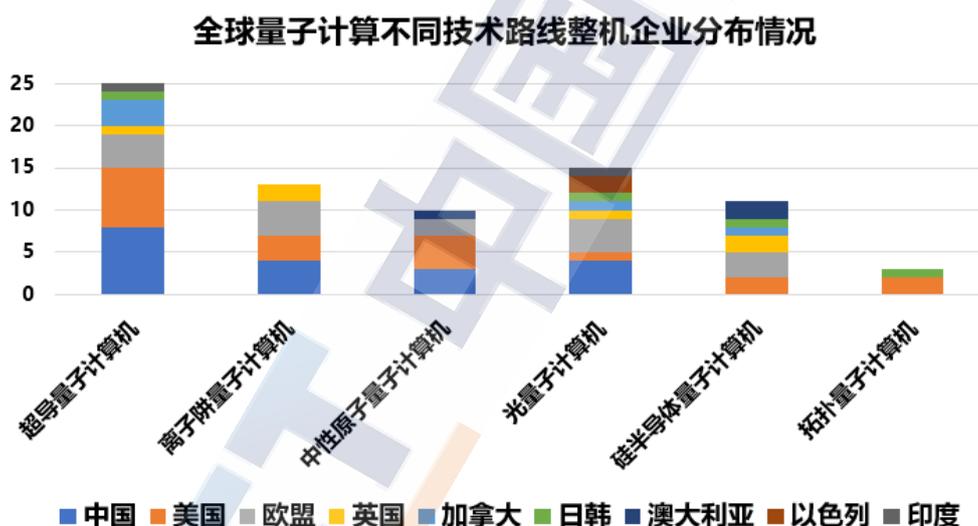


来源：中国信息通信研究院（截至 2025 年 8 月）

图 6 全球量子计算企业数量年度变化趋势⁸

⁸ 由于企业数据库更新延迟以及企业主营业务验证需要时间等原因，企业数量统计存在滞后性。

全球量子计算不同技术路线整机企业分布情况如图 7 所示。从全球整体情况来看，共有 70 余家量子计算机整机系统研制企业，其中专注于超导技术路线的企业数量最多，达到 25 家，约占总量的三分之一。从事离子阱、中性原子、光量子以及硅半导体技术路线的企业各有十余家，数量相近。拓扑路线相对较少，仅有 3 家，约占 4%。从地区分布来看，中国和美国数量相同，均占总量的 25%，欧盟地区略逊于中美，约占 22%。多数国家选择了多种技术路线并行的发展战略，积极进行不同技术方向的研发与探索，以期在量子计算的竞争中占据有利地位。



来源：中国信息通信研究院（截至 2025 年 8 月）

图 7 全球量子计算不同技术路线整机企业分布情况

量子计算领域投融资市场保持活跃，吸引了大量投资和资金注入，反映了资本市场对该领域长期价值的认可。全球量子计算企业投融资事件与金额变化趋势如图 8 所示。从 2017 年开始，随着行业关注度的提升，投融资活动显著增加，从 2021 年开始每年已公开披露的投融资金额突破 15 亿美元，从 2022 年开始每年投融资笔数均超

100 笔。2025 年上半年，随着 PsiQuantum（7.5 亿美元）、QuEra（2.3 亿美元）、Multiverse Computing（两轮共 2.85 亿美元）等业内知名企业获得大笔融资，仅量子计算领域投融资金额已超 20 亿美元，其中 1 亿美元以上的投融资事件有 7 起，预计今年有望达到新的高峰。

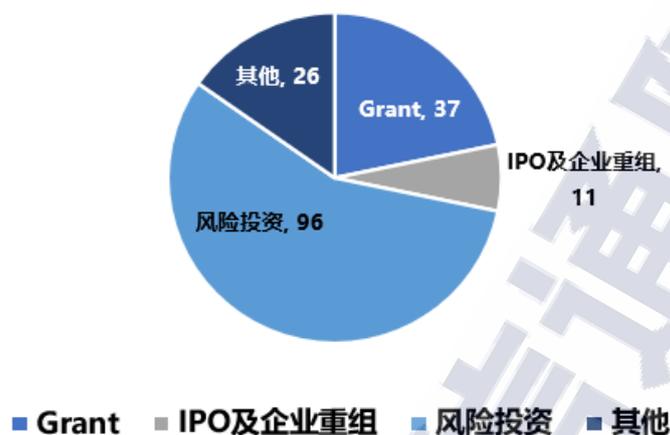


来源：中国信息通信研究院（截至 2025 年 8 月）

图 8 全球量子计算企业投融资事件与金额变化趋势

在 2024 年 170 笔已披露的投融资事件中，**风险投资**占据主导地位，共有 96 笔，涉及融资金额近 13 亿美元，金额占比超 6 成，如图 9 所示。这些投资主要集中在早期阶段，孵化器、种子轮、A 轮分别为 33、28 以及 22 笔，其中 A 轮融资金额超 6 亿美元。此外，Grant（资助激励）类型的融资也非常活跃，共有 37 笔，公开披露的金额超过 5200 万美元，投资方主要来源于政府机构（如美国能源部、国防部、空军）以及创新投资计划（如欧盟的 EIC Accelerator、France 2030，美国的 NATO DIANA Accelerator）等。整体来看，当前量子计算领域投融资比较活跃，但仍处于早期投资阶段。此外，政府支

持的创新投资计划等机制在全球范围内正发挥重要作用，推动量子计算领域的持续发展和技术进步。



来源：中国信息通信研究院

图 9 2024 年量子计算产业投融资笔数类型分布

二、量子计算技术研发进展迅速，技术攻关面临挑战

（一）多硬件技术路线并行发展，竞争态势仍将持续

量子计算发展正处于技术攻坚的关键时期，其核心任务之一是研制实用化的量子计算原型机。当前，多种技术路线正并行发展、相互竞争。不同路线各有优势与局限性，差异体现在物理实现载体、比特操控方式、环境要求及大规模扩展瓶颈等多个方面。近年来，各技术路线在量子比特规模、逻辑门精度及退相干时间等关键指标上持续取得进展，科研成果亮点频出，但尚未有任何单一技术路线展现出压倒性优势，未来何种技术路线能在竞争中胜出尚不明确。

超导量子计算基于约瑟夫森效应形成二能级结构，具备易扩展、操控性好以及兼容半导体工艺等技术优势，是现阶段关注度较高的技术路线之一。近年来超导量子计算原型机研制不断取得突破，

2024 年年底，谷歌发布 105 比特超导量子芯片 Willow，关键指标较上一代 Sycamore 有所提升，并基于该芯片再次验证量子优越性⁹。中科大联合团队研制 105 比特超导量子芯片“祖冲之三号”，单/双比特门和读取保真度分别达到 99.90%、99.62%和 99.18%¹⁰。2025 年，中科大联合团队等基于“祖冲之三号”求解随机线路采样任务并获得比超级计算机 Frontier 高 15 个数量级的求解速度¹¹。日本理化学研究所与富士通合作研发具有可扩展连接架构的 256 比特超导量子计算机¹²。除关键指标提升外，超导路线相关的科研成果也不断涌现。中科院物理所联合团队实验验证用于超导量子处理器中高保真双量子比特门的脉冲校准方案，简化校准过程的同时提高了磁通控制的精度和稳定性¹³。哈佛大学联合团队开发微波-光学量子转导器，可实现光学驱动的超导量子比特相干操控，光-微波转换效率达到 1.18%¹⁴。浙江大学等联合团队基于“天目 2 号”百比特超导量子芯片，在非无序、存在热激发的有限温量子体系中展示拓扑边缘态的稳定性，为保护脆弱的量子信息提供新可能¹⁵。**超导技术路线目前仍是业界重点关注的路线之一**，未来需持续攻关规模扩展中的布线互联与制造工艺等难题，提升逻辑门保真度、读取保真度等关键性能指标，同时研究更高效的量子纠错编码方案。

⁹ <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08449-y>

¹⁰ <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.11924>

¹¹ <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.090601>

¹² https://www.riken.jp/en/news_pubs/news/2025/20250422_1/index.html

¹³ <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.23.024059>

¹⁴ <https://doi.org/10.1038/s41567-025-02812-0>

¹⁵ <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09476-z>

离子阱量子计算利用被捕获在电磁阱中的带电离子作为量子比特，具有相干时间长、保真度高、全连接性等优势。近年来囚禁离子数量、量子体积等指标稳步提升，2025 年，牛津大学实现相距 2 米的两个离子阱量子计算系统之间的预报式远程量子纠缠和受控 Z（CZ）逻辑门传送，保真度为 86%¹⁶。Quantinuum 离子阱量子计算原型机 System Model H2 的量子体积达到 8388608¹⁷。摩根大通联合团队选用 56 比特的 Quantinuum H2-1 离子阱量子处理器执行基于随机电路采样的可认证随机数协议，可生成比输入更为随机的结果¹⁸。离子阱技术路线受到业界持续关注，未来需要提升稳定囚禁并精确操控的离子数量，优化激光控制与集成光学等量子比特测控技术，开展模块化设计等工程领域探索。

中性原子量子计算基于光镊阵列捕获中性原子，利用里德伯激发等技术实现量子比特的操控和纠缠，具有扩展性强、相干时间长、适合量子模拟等优势。近年来在比特规模扩展、操控方案等方面科研成果颇多，2025 年，NIST 基于超精细结构在光镊中捕获两原子之间共振-偶极子的相互作用，为控制冷原子提供新思路¹⁹。Pasqal 发布 2025 年产品与技术路线图，计划于 2025 年底实现 1000 物理量子比特，到 2028 年达到 10000 物理量子比特，此外计划到 2027 年、2030 年分别实现 20 个、200 个逻辑量子比特²⁰。哈佛大学联合团队利用光

¹⁶ <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08404-x>

¹⁷ <https://www.quantinuum.com/blog/quantum-volume-milestone>

¹⁸ <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08737-1>

¹⁹ <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.013202>

²⁰ <https://www.pasqal.com/newsroom/pasqal-releases-2025-roadmap/>

腔实现中性原子量子操作的新方案，量子比特的读取保真度为 99.96%，产生的 Bell 纠缠态的保真度为 91%²¹。中科大联合团队构建了 2024 个原子的无缺陷二维和三维原子阵列，为大规模中性原子量子计算奠定了关键基础²²。中性原子技术路线作为后起之秀，近年来发展势头强劲，但也存在无缺陷阵列制备、原子囚禁稳定性、操控精度与串扰、硬件集成与工程化等技术难题。

光量子计算利用光子作为量子比特来进行信息处理，优势在于可室温运行、光子相干性好、抗噪声能力强，按照实现原理可分为逻辑门型光量子计算和专用光量子计算。2025 年，Xanadu 构建 12 比特光量子计算机 Aurora，通过光子互连技术实现网络化连接²³。北京大学实现基于集成光量子芯片的连续变量簇态量子纠缠，为光量子芯片大规模扩展奠定基础²⁴。PsiQuantum 推出 Omega 光量子芯片组，实现单光子源、超导纳米线探测器与钛酸钡光学开关的集成，单量子比特态制备与测量保真度和双量子比特保真度分别为 99.98% 和 99.22%²⁵。Xanadu 利用多层氮化硅晶体制造出超低损耗集成光子芯片，并结合高性能单光子探测器产生 GKP 量子态²⁶。玻色量子于中关村论坛发布 1000 量子比特光量子相干伊辛机，相较上一代天工量子大脑 550W 具有更强的计算能力和扩展性²⁷。光量子技术路线主要面临高保真度的双量子比特纠缠门实现、高效单光子源按需制备、

²¹ <https://doi.org/10.1103/2ym8-vs82>

²² <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adr7075>

²³ <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08406-9>

²⁴ <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08602-1>

²⁵ <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08820-7>

²⁶ <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09044-5>

²⁷ <https://www.qboson.com/newsDetail?id=303>

系统集成与工程化等挑战，后续发展前景还需持续跟进。

硅半导体量子计算以电子自旋或核自旋作为载体构造量子比特，优势在于相干时间长且兼容半导体工艺。2025 年，新南威尔士大学等基于硅半导体量子系统实现 97.17% 的贝尔态保真度，为量子纠缠态存储和操作提供参考²⁸。悉尼大学联合团队研发低温互补金属氧化物半导体电路控制技术，可高效执行自旋量子比特的通用逻辑操作，为芯片上硅半导体量子比特的数量扩展提供路径²⁹。硅半导体技术路线成熟度较低，突破性进展有限，面临高纯度材料制备、量子测控复杂性、兼顾高操控速度与长相干时间等挑战。

拓扑量子计算将量子信息编码在拓扑物态的全局特性中，优势在于理论上拥有天然的容错能力，具备突破现有技术格局的巨大潜力，目前处于基础研究和关键技术攻关阶段。经过长期理论研究和实践探索，近年取得突破性进展。2025 年，微软基于砷化铟-铝异质集成新材料构造拓扑超导纳米线作为 MZM 载体，通过量子点耦合进行比特操控，采用奇偶校验微波干涉测量实现量子态读取，推动拓扑量子计算从理论走向实践，并发布了拓扑量子计算芯片扩展架构和纠错路线图³⁰。虽然上述成果仍在经历同行的讨论与审视，但仍是拓扑技术路线近年来重要研究成果。未来攻关方向包括马约拉纳零模自由态制备、提升拓扑编织操作精度、克服退相干效应等。

量子计算硬件技术路线呈现并行发展格局，各技术路线科研成

²⁸ <https://doi.org/10.1038/s41467-025-57987-0>

²⁹ <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09157-x>

³⁰ <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08445-2>

果不断涌现，整体技术水平持续提升。然而，当前量子计算原型机无法满足可容错通用量子计算的规模与精度要求，在量子比特的稳定性、扩展性、操控精度和纠错能力等层面仍存在诸多挑战，同时集成化水平、环境控制等工程化瓶颈也亟待突破。未来，推动量子计算硬件发展需从量子比特制备、软硬件协同优化、支撑保障系统研制、材料与工艺创新以及供应链整合等多个维度协同发力。

（二）量子纠错成为关注焦点，距离实用化仍有差距

量子纠错是利用冗余量子比特编码等方式保护脆弱的量子信息免受环境干扰的技术，是实现大规模可容错量子计算的核心基础。量子纠错的基本原理是利用额外的量子比特对信息进行冗余编码，在计算过程中识别和纠正因环境噪声或操作失误引起的误差，从而实现量子态的精确操控。量子纠错的核心思想在于设计能够应对各类错误的量子纠错编码方案，同时保障量子信息的完整性以及计算过程的可操作性。

随着量子计算硬件技术的持续突破和算法研究的不断深入，量子纠错研究成果竞相涌现，成为业界关注焦点。2024 年年底，深圳量子院实现对量子比特及其耦合器上泄露的同时抑制，并展示该方案与量子纠错的兼容性及其抑制纠错线路中关联错误方面的性能³¹。谷歌在 Willow 芯片上使用码距为 7 的物理量子比特构建逻辑量子比特，实现了纠错码码距每增加 2，错误率下降 2.14 倍，并呈现指数

³¹ <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.170601>

下降趋势³²。2025 年，清华大学提出适用于量子模拟的量子错误缓解方法，可有效抑制幺正错误和随机错误对模拟量子计算能谱求解的影响³³。亚马逊等利用级联玻色子量子比特实现量子纠错编码，错误率从每个周期 1.75%降低到 1.65%³⁴。耶鲁大学联合团队基于 GKP 玻色子码构建三维/四维量子存储器，实现了超过盈亏平衡的量子比特错误校正，纠错增益为 $1.82 \pm 0.03 / 1.87 \pm 0.03$ ³⁵。谷歌提出高密度级联奇偶校验表面纠错编码，在与算法相关的逻辑错误率下，耦合表面码每个逻辑量子比特所需的物理量子比特数量仅为标准表面码的三分之一³⁶。微软提出新型四维拓扑几何纠错码，将物理量子比特的错误率降低几个数量级，并具备单次纠错能力³⁷。Atom Computing 在中性原子量子处理器上开发新型纠错技术，提高逻辑量子比特质量，并通过在不干扰其余算法运行的情况下替换电路中途丢失的量子比特实现了增强系统的鲁棒性³⁸。QuEra 等联合团队在中性原子量子计算机上演示利用逻辑量子比特实现魔态蒸馏，为实现大规模通用逻辑量子计算提供关键支持³⁹。

量子纠错目前仍处于理论与实验验证的初期阶段，尚未达到极低错误率等实用化要求。未来量子纠错研究需在多个关键技术方向实现突破，包括降低资源开销、实现高精度逻辑门操作、设计

³² <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08449-y>

³³ <https://doi.org/10.1038/s41534-025-00969-3>

³⁴ <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08642-7>

³⁵ <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08899-y>

³⁶ <https://doi.org/10.1038/s41467-025-59714-1>

³⁷ <https://arxiv.org/html/2506.15130v1>

³⁸ <https://arxiv.org/abs/2506.09936>

³⁹ <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09367-3>

应用软件面向用户或行业需求，利用量子计算软硬件工具求解特定问题，实现功能模块的场景化封装。美国 Quantinuum 推出量子化学软件 InQuanto 的 4.0 版本，允许编译和执行更复杂的量子线路用于实现量子化学模拟⁴⁰。韩国 Qunova Computing 公司将其 HI-VQE 量子算法部署到 IBM 的 Qiskit 函数目录中，可面向化学、制药及工业工程领域实现量子模拟⁴¹。未来应用软件需要在提供高层次编程接口、量化应用算法性能、丰富应用案例等方面实现突破。

编译软件用于执行量子程序并将高级量子程序语言转换为硬件可执行指令。IBM 发布 Qiskit SDK v2.1 版本，扩展了 Qiskit SDK 对 C 语言 API 的支持，以促进量子计算与高性能计算之间的协同工作⁴²。法国 Welinq 公司推出为分布式量子计算而设计的编译器 araQne，助力区分大规模算法并进行分布式处理⁴³。未来编译软件需要解决不同种类硬件匹配、优化算法运行、提升可扩展性和可迁移性等挑战。

测控软件用于控制和调节硬件的运行和行为，可支持量子线路控制、硬件反馈与校准以及同步实践控制等功能。中微达信推出岷江测控软件系统 2.0 版本，可实现自动化标定、可视化呈现和多体系兼容⁴⁴。Quantum Machines 推出专为量子计算机校准而设计的开源框架 QUALibrate，可显著缩短校准时间⁴⁵。测控软件未来需要在实时监

⁴⁰ <https://www.quantinuum.com/blog/introducing-inquanto-v4-0>

⁴¹ <https://www.qunovacomputing.com/news/121>

⁴² <https://www.ibm.com/quantum/blog/qiskit-2-1-release-summary>

⁴³ <https://welinq.notion.site/araQne-Welinq-s-Compiler-for-Distributed-Quantum-Computing-17b97107255580af8908d11a849675e3?pvs=25>

⁴⁴ <https://www.prnewswire.com/news-releases/quantum-machines-launches-qualibrate-an-open-source-framework-that-cuts-quantum-computer-calibration-from-hours-to-minutes-302458926.html>

⁴⁵ <https://mp.weixin.qq.com/s/zO4byuFaoN36bBcPdPKMFA>

测和纠错机制、测量反馈控制、编程框架兼容性等方面持续优化。

EDA 软件提供量子计算硬件设计、仿真和优化等功能，通常用于量子芯片及其他量子硬件的设计和测试。先进计算与智能工程国家级重点实验室联合国内多家单位推出了超导量子芯片自动化设计工具（EDA-Q），实现了超导量子芯片的全流程设计，在专用量子芯片设计、器件映射、制造工艺映射等关键环节具有优势⁴⁶。未来 EDA 软件需要在量子比特布局设计、仿真过程优化、硬件调试效率等方面不断完善。

管理软件提供管理量子计算资源并完成任务调度等功能。Q-CTRL 公司通过 IBM 发布的 Qiskit Functions Catalog 提供性能管理和优化求解器两项新功能⁴⁷，此外，公司将其量子计算性能管理软件 Fire Opal 集成到 IBM、Rigetti、OQC 以及 Diraq 等四家公司的量子计算平台中⁴⁸。管理软件未来发展需求主要体现在不同硬件平台间的资源协调和互操作性、提高资源调度利用率等方面。

量子算法是依托量子力学原理构建的计算方法，有望在特定计算任务上实现指数级加速或更高的计算效率，为解决传统计算机难以处理复杂问题开辟了新路径。近年来，量子算法研究持续迭代演进，在算法设计、性能优化以及面向具体场景的应用实践等方面均取得了诸多成果。

⁴⁶ <https://github.com/Q-transmon-xmon/EDA-Q>; <https://ieeexplore.ieee.org/document/11037474>

⁴⁷ <https://q-ctrl.com/blog/q-ctrls-fire-opal-among-first-qiskit-functions-delivering-utility-scale-performance-to-the-global-quantum-developer-community>

⁴⁸ <https://q-ctrl.com/blog/q-ctrl-integrates-fire-opal-with-four-leading-quantum-computing-hardware-platforms-to-deliver-unprecedented-capabilities-to-end-users>

量子算法设计方面，Phasecraft 公司开发名为 THRIFT 的新型量子模拟方法，可在提升模拟效率的同时降低计算成本⁴⁹。Algorithmiq 公司提出新型算法框架，可提高对费米子电路的经典模拟效率⁵⁰。量子算法优化方面，Classiq 公司等联合团队利用其量子电路压缩工具将量子蒙特卡洛模拟算法的电路深度减少 95%，提升资源利用效率⁵¹。IonQ 与美国橡树岭国家实验室合作开发一种基于量子虚时演化原理的新型混合量子算法，在求解时间和电路深度方面均优于量子近似优化算法⁵²。应用算法实践方面，亚马逊与加州理工学院联合提出量子算法，可模拟自然冷却过程并利用其预测了量子多体系统的局部最小值⁵³。美国太平洋西北国家实验室设计量子算法用于模拟流体动力学，有望提供比经典计算方法更快的量子优势⁵⁴。

量子计算软件研发和生态培育目前仍处于早期阶段，软件工具呈现明显碎片化和多元化。这是由量子硬件尚未成熟、量子计算理论复杂性高、标准化框架缺失以及市场需求尚不明确等多方面因素共同造成的。未来需重点解决高层次编程接口设计、跨硬件资源协调、算法运行优化、编程框架的兼容性与可迁移性等一系列关键问题。近几年量子算法层出不穷，但普适性和计算效率仍较为有限，面向复杂实用场景的高效量子算法仍需持续探索与迭代。量子计算领域的发展不仅依赖于硬件层面的攻关，也亟需软件与算法的协同

⁴⁹ <https://www.phasecraft.io/research/thrift-algorithm>

⁵⁰ <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.18939>

⁵¹ <https://quantumzeitgeist.com/classiq-achieves-95-quantum-circuit-compression-for-financial-monte-carlo-simulations-with-sumitomo-and-mizuho-dl/>

⁵² <https://ionq.com/blog/ionq-and-oak-ridge-national-laboratory-demonstrate-a-novel-scalable-and>

⁵³ <https://doi.org/10.1038/s41567-025-02781-4>

⁵⁴ <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.7.013036>

发展，通过软硬件结合的方式，才能共同推动技术突破。

（四）环境测控系统多样化发展，核心指标亟待提升

量子计算机的正常运行高度依赖低温、真空等环境测控系统，以抵御外部环境噪声和量子系统内部非理想特性对量子态信息的干扰。环境测控系统是量子计算技术研究与原型机研发的重要支撑，也是量子计算机工程化核心要素，由环境设备、测控系统和关键组件等多个部分组成，现阶段各部分仍有诸多技术瓶颈亟待突破。

环境设备是量子计算机的关键支撑保障，其性能直接决定了量子计算机的稳定性和计算可靠性。代表性设备包括稀释制冷机、脉冲管制冷机、预制冷设备、真空系统、超导磁体系统等。2025 年，Bluefors 推出新型两级脉冲管低温冷却器 Cryomech PT205，提升可靠性和使用寿命的同时大幅降低振动水平⁵⁵，此外，该公司还推出了新型超紧凑型 LD 稀释制冷系统，采用多重减振解决方案以实现低振动运行⁵⁶。IonQ 实现可维持极高真空水平的小型化离子阱真空包，显著减少系统复杂性和维护成本⁵⁷。由于不同硬件技术路线对环境设备的要求各异，未来需进一步提升技术指标、优化工程化设计，并推动小型化和集成化发展，以满足量子计算机比特规模扩增的需求。

测控系统基于高精度的量子调控技术与高效率的量子态读取技术，实现量子比特精确操控、量子比特逻辑门准确操作以及量子态高保真度测量。根据量子比特操控方式的不同，量子计算测控系统

⁵⁵ <https://bluefors.com/products/pulse-tube-cryocoolers/pt205/>

⁵⁶ <https://bluefors.com/news/ultra-compact-ld-system-now-available/>

⁵⁷ <https://ionq.com/news/ionq-announces-innovations-in-compact-room-temperature-quantum-computing>

可分为两类，一类是基于低温微波技术的微波测控系统，主要用于超导和硅半导体技术路线的量子比特操控；另一类是基于光学调控技术的光学测控系统，适用于离子阱、中性原子以及光量子等技术路线。2025 年，是德科技的量子控制系统因其模块化、可扩展性及射频性能等特点，被富士通与日本理化学研究所嵌入其联合开发的 256 量子比特量子计算机中⁵⁸。德国帕德博恩大学演示利用极低温超导电路高速操控光子，有效减少物理测控中的损失和时延⁵⁹。未来量子计算测控系统需在不断提高测量精度和控制效率的同时，进一步提升稳定性、集成化程度、系统灵活性及可扩展性，才能适应未来大规模量子计算的需求。

关键设备组件是开展量子计算原型机研制的重要基础。既包括量子计算特有的专用设备组件，同时也涉及与传统技术相通的通用设备组件。其中代表性的专用设备组件包括低温电子学器件、光学调控组件、光电信号探测设备、离子源/原子源等。2025 年，英国启动为期三年的 FIRETRACE 项目，旨在克服在极低温条件下运行量子控制电子设备的挑战⁶⁰。瑞典查尔姆斯理工大学开发新型量子放大器，大幅降低功耗⁶¹。上海微系统所研制出集成泵浦滤波与单光子探测功能的纠缠接收芯片，并完成低温光量子芯片间的纠缠分发应用演示⁶²。在量子计算机向更大规模发展的过程中，既要优化这些关键设备组

⁵⁸ <https://www.keysight.com.cn/cn/zh/about/newsroom/news-releases/2025/0515-pr25-073-keysight-quantum-control-system-embedded-within-fujitsu-and-rikens-world-leading-256-qubit-quantum-computer.html>

⁵⁹ <https://doi.org/10.1364/OPTICA.551287>

⁶⁰ <https://www.strath.ac.uk/whystrathclyde/news/2025/firetrace/>

⁶¹ <https://www.chalmers.se/en/current/news/mc2-smart-amplifier-enabler-for-more-qubits-in-future-quantum-computers/>

⁶² <https://opg.optica.org/prj/fulltext.cfm?uri=prj-13-4-1067&id=569923>

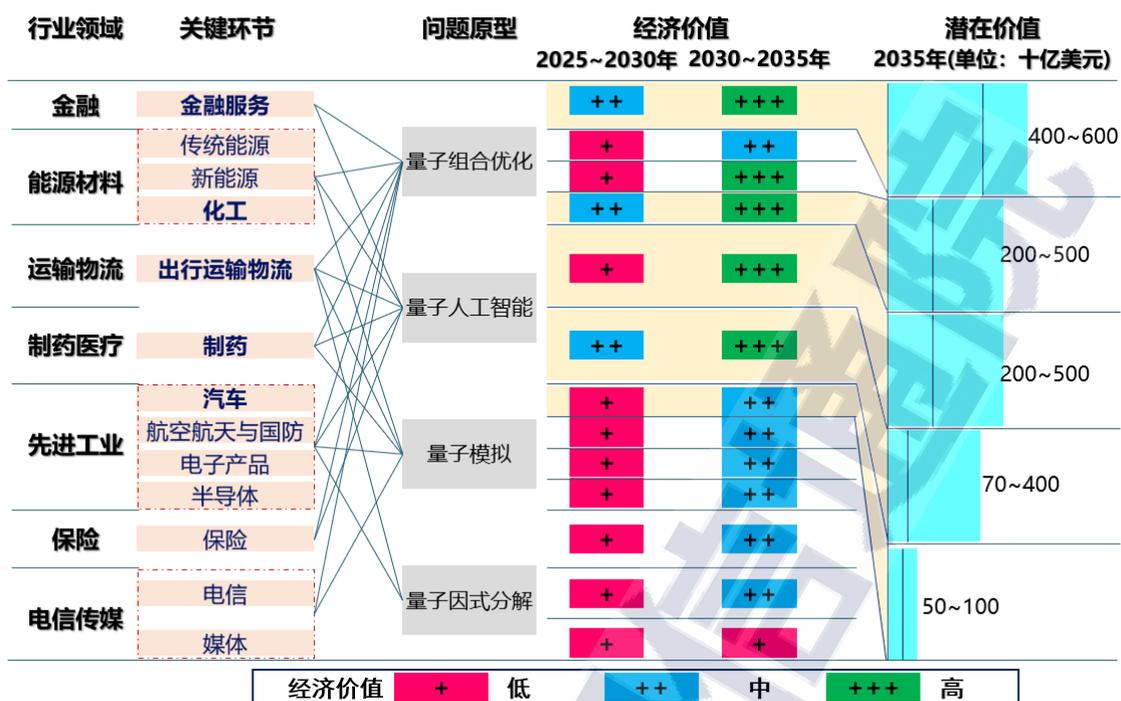
件的核心参数，又要建立更为严格的验证标准，从而满足未来量子计算机工程化应用的需求。

量子计算环境测控系统作为量子计算机工程化的核心要素，发展面临碎片化发展和指标需求迅速提升的双重挑战。首先，由于量子计算技术路线尚未收敛，环境测控系统展现出多样化和碎片化的发展格局，导致产业链资源分散，制约了核心技术攻关效率。在此背景下，培育一批专注于量子计算支撑系统的高新技术企业，构建专业化的产业分工体系，有望成为破局的关键。其次，随着量子计算原型机规模持续扩大，环境测控系统的性能需求急剧提升，亟需推动核心设备组件在关键性能指标上实现突破。长远来看，环境测控系统的持续创新不仅将推动量子计算技术的发展进程，甚至可能孕育出一个全新的高技术产业生态。

三、量子计算应用探索持续推进，跨域融合渐成趋势

（一）行业应用探索广泛开展，实用化落地仍未突破

量子计算正处于从理论研究向应用落地探索转化的关键阶段。在此过程中，跨行业、多场景的应用探索已成为推动应用落地突破的核心驱动力。业界持续挖掘与量子计算技术匹配的垂直应用场景，寻找面向金融、化工、生物、交通等不同行业领域的解决方案。根据麦肯锡 2025 年发布的《量子技术监测》研究报告，如图 11 所示，预计到 2035 年全球量子技术市场规模将达到 970 亿美元，其中量子计算最具潜力并将占据最大份额，收入规模预计将从 2024 年的 40 亿美元增长至 2035 年的 720 亿美元。



来源：麦肯锡《2025 年量子技术监测》研究报告

图 11 量子计算应用前景分析预测

金融领域是量子计算极具应用前景的方向之一，主要源于其复杂非线性的系统特性和对大规模数据处理的迫切需求。2025 年，Quantum Motion 公司与高盛合作探索在金融服务中使用量子计算执行期权定价等复杂计算，将算法分解为多个同时运行的小任务并有效减少运算时间⁶³。DATEV 公司与 IQM 合作研究量子计算在投资组合优化中的潜力，利用 Markowitz 模型获得 DATEV 产品组合在给定预算下的最优资源配置，助力产品组合优化⁶⁴。玻色量子与龙盈智达合作研究应用量子计算解决金融反欺诈核心挑战的方案，助力识别交易网络中隐藏的“欺诈社群”，有望为智能风控体系提供支持⁶⁵。

⁶³ <https://quantummotion.tech/quantum-motion-and-goldman-sachs-identify-quantum-applications-in-financial-services-project/>

⁶⁴ <https://meetiqm.com/press-releases/iqm-and-datev-advance-quantum-solutions-for-portfolio-optimisation/>

⁶⁵ <https://doi.org/10.3390/e26121026>

化工领域量子计算的应用主要体现在对分子结构和反应过程的精确模拟上，为化学品的设计与开发提供了全新的研究视角和技术支撑。2025 年，Classiq、德勤集团和三菱化学公司合作探索化学领域的材料开发，利用 QPE 算法和 QAOA 算法分别实现 97% 和 54% 的电路压缩，为化学领域计算资源的优化提供思路⁶⁶。克利夫兰诊所创建更能准确预测质子亲和力的化学模型，展示了利用量子计算解决复杂化学问题的潜力⁶⁷。马普所与化工公司 Covestro 合作开发利用费米子量子模拟器来模拟化学模型的新方法，优势在于可以用于直接模拟分子行为⁶⁸。

生物领域量子计算应用方向包括疾病诊断、药物研发、基因组学研究、蛋白质结构预测等关键环节。2025 年，芝加哥大学获得由美国 Wellcome Leap 提供的 200 万美元资助，用以推进“多模态癌症数据的量子生物标志物算法项目”第三阶段研究⁶⁹。英国国家量子计算中心发布《医疗制药与量子计算的融合：医学新前沿》报告，探讨量子计算未来在医学领域的变革性潜力，认为量子计算有望解决全球医疗系统面临最复杂和紧迫的挑战⁷⁰。Fermioniq、Moderna 和 IBM 合作开发可预测 mRNA 二级结构的量子算法，有望助力 mRNA 类药物设计⁷¹。

⁶⁶ <https://www.classiq.io/insights/classiq-deloitte-tohatsu-and-mitsubishi-chemical-compress-quantum-circuits-by-up-to-97>

⁶⁷ <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jctc.4c01609>

⁶⁸ <https://www.mpq.mpg.de/7061172/03-quantum-maps-for-molecules>

⁶⁹ <https://cs.uchicago.edu/news/university-of-chicagos-fred-chong-awarded-2-million-for-innovative-quantum-computing-cancer-research-project/>

⁷⁰ <https://www.nqcc.ac.uk/quantum-computing-for-healthcare-and-pharmaceuticals/>

⁷¹ <https://www.fermioniq.com/post/rna-secondary-structure>

交通领域量子计算应用探索有望突破传统交通管理模式，为交通流量优化、出行预测与路径规划等提供创新解决方案。2025 年，墨尔本大学与福特汽车利用量子近似优化算法缓解交通拥堵，有望减少共享道路上的交通拥堵问题⁷²。Q-CTRL、英国国营铁路公司 Network Rail 和英国交通部合作开发用于铁路调度的量子增强型求解器，利用 103 个量子比特在 18 分钟内为伦敦桥车站的 26 列火车实现了精确的路径规划⁷³。

业界在多个行业领域开展量子计算应用场景探索，但现有实践尚未真正展现出量子计算在指数级加速或量子优越性方面的突破，实用转化亟需进一步探索。理想与现实的落差由技术攻关、应用探索以及产业生态等多个维度的瓶颈共同造成。未来应在技术上持续提升量子计算机性能，同时在应用层面建立“场景驱动”的推进措施，聚焦于商业价值明确、量子优势显著的关键场景，并通过建设开放平台、联合实验室等协同机制，加速技术转化与产业融合。

（二）量子云平台成为应用探索与跨域融合重要支撑

量子计算云平台正逐渐发展为量子计算领域的核心基础设施，有效降低了量子计算机的实际使用门槛。当前，量子计算机在实际应用中面临多重使用壁垒，包括复杂的软硬件操作要求、极端环境运行条件和高昂的维护成本，这些因素制约了其本地化部署与应用。量子计算云平台通过云端集成与远程接入技术，实现了量子计算资

⁷² <https://arxiv.org/html/2504.08275v1>

⁷³ <https://q-ctrl.com/case-study/accelerating-the-schedule-for-quantum-enhanced-rail>

源的网络化共享与便捷访问，具备弹性服务模式、简化的用户接入流程以及多样化的应用支持等特点。未来，量子计算云平台有望成为实现量子计算能力输出的重要载体。

目前，全球量子计算云平台汇聚了超导、离子阱、中性原子、光量子、硅半导体等多种技术路线的通用量子计算处理器，以及量子退火机等专用量子计算处理器。从技术路线分布来看，以超导技术路线为主，占比约 59.3%；其次为离子阱和光量子技术路线，占比分别为 14.8% 和 9.3%。由此表明，超导技术路线相比其他技术路径具备更高的工程化水平。从时间发展脉络来看，加拿大企业 D-Wave 率先为量子退火机提供云平台服务。随着其他技术路线的不断发展，2022 年前后，大批不同技术路线的通用量子计算处理器陆续开始提供云服务。截至 2025 年 8 月底，全球量子计算云平台接入的量子处理器数量已超过 50 台，典型量子计算云平台如图 12 所示。

硬件类型	超导		离子阱		光量子	半导体/超导	量子退火	云平台集成服务		
提供商	IBM	rigetti	IONQ	QUANTINUUM	XANADU	QUTOS	D-WAVE	aws	azure	STRANGEWORKS
平台名称	IBM Quantum	Quantum Cloud Services	IonQ Quantum Cloud	Quantinuum Nexus	Xanadu Quantum Cloud	Quantum Inspire	Leap	Amazon Braket	Azure Quantum Cloud	Strangeworks
量子处理器	ibm fez, ibm torino, ibm brisbane, ibm brussels, ibm kyiv, ibm nazca, ibm quebec,	Ankaa-2, Ankaa-3, Aspen-M-3, Aspen-M-2, Aspen-11, Aspen-10, Aspen-9.....	Forte, Aria1, Aria2, Harmony,	Quantinuum H1, Quantinuum H2	Borealis, x8	Spin-2, Starmon-7	D-Wave Advantage, D-Wave 2000Q, D-Wave 2X, D-Wave Two,	IonQ, IQM, QuEra, Rigetti	Quantinuum, QCI, Pasqal, ...	IBM, IQM, QuEra, IonQ, Quantinuum, Rigetti, Xanadu, Atom Computing, NVIDIA,
硬件类型	超导			离子阱	光量子(CIM)	云平台集成服务				
提供商	中电信量子集团	北京量子信息科学研究院	本源量子	国盾量子	SPINQ	QUDCOR	BosonIQ	5G 移动云	ARC LIGHT	
平台名称	天衍量子计算云平台	Quafu	本源量子云	国盾量子计算云平台	量旋云平台	<Qu Cloud>	玻色量子云	五岳纪元量子云平台	弧光量子云平台	
量子处理器	骁鸿; 祖冲之2号	Baihua Dongling Haituo ScQ-P21	本源悟空	骁鸿1号	超导量子芯片	<Aba Qu>100	CPQC-1000	超导: 天工1号 超导: 悟空102 超导: 五岳1/2/3号 超导: 夸父1/2/3/4/5号 CIM: 相干光量子计算机 离子阱: <Aba Qu>100 中性原子: 汉原1号	超导量子芯片 离子阱量子芯片	

来源：中国信息通信研究院（截至 2025 年 8 月）

图 12 全球典型量子计算云平台概况

量子计算云平台发展呈现量子-经典计算协同创新，共同推动技

术融合和平台演进的发展特点，旨在突破单一技术栈的性能瓶颈。ColibriTD 公司发布 QUICK-PDE 多物理场求解器，基于量子-经典混合微分方程求解器算法在 IBM 量子硬件上实现不粘伯格方程和一维机械变形问题的模拟，在流体动力学和材料科学等领域初步展现出效率优势⁷⁴。此外，盲量子计算技术与云平台的结合成为另一类创新方向。NanoQT 与 VeriQloud 合作开发基于硬件集成的可扩展盲量子计算架构，支持在网络量子处理器上进行安全计算，通过加密协议实现客户端数据隐私保护，有望为金融、医疗等对数据隐私敏感行业提供可行的量子计算云服务方案⁷⁵。

量子计算云平台全球化部署加速，呈现多区域协同发展态势。

2025 年，全球多国通过采取跨国或跨地区合作与本土技术相结合等方式，推进量子计算云平台的全球化部署。韩国 Norma 与美国 Rigetti 合作推出 84 量子比特超导量子云服务，依托 Rigetti 的 Ankaa-3 处理器与 Norma 的 Q Platform，旨在建立服务韩国国防领域的量子计算生态系统⁷⁶。法国 OVHcloud 计划于 2025 年 9 月上线 Pasqal 的 100 比特中性原子量子处理器，于 2027 年底接入至 7 个来自欧洲的量子处理器，以“即用即付”模式构建泛欧量子云服务生态⁷⁷。荷兰 Quantum Inspire 的量子计算云平台发布由 QuTech、TNO、QuantWare、Qblox、Orange Quantum Systems、Delft Circuits 联合开发的开放式架

⁷⁴ <https://www.colibrityd.com/blogs-posts/h-des-on-ibm-quantum-computers>

⁷⁵ <https://quantumcomputingreport.com/nanoqt-and-veriqloud-partner-on-blind-quantum-computing-architecture-with-eureka-globalstars-japan-support/>

⁷⁶ <https://quantumcomputingreport.com/norma-and-rigetti-to-deploy-84-qubit-superconducting-quantum-system-for-south-koreas-defense-sector/>

⁷⁷ <https://corporate.ovhcloud.com/en/newsroom/news/france-quantum-2025/>

构量子计算系统“Tuna-5”，集成了可互操作的硬件和软件组件⁷⁸。

基于量子计算云平台的产业生态体系逐步构建，展现出服务模式分层与开源生态共建的发展格局。服务模式方面，量子即服务（QaaS）成为主流，欧美的 OVHcloud、Pasqal 等企业推出即用即付的订阅模式，降低企业使用后端量子计算硬件的门槛⁷⁹。SEALSQ 与 ColibriTD 合作推出 QaaS 服务，针对半导体行业提供按需扩展的量子计算资源，实现量子与经典算法的混合计算，助力推动量子计算技术向中小企业渗透⁸⁰。开源生态方面，富士通推出开放式量子工具链（OQTOPUS），允许用户根据需求定制开发，旨在解决量子计算机云端部署的软件壁垒，推动量子计算云平台的标准化与普及化⁸¹。Quantum Inspire 量子计算云平台升级至 2.0 版本，通过云端服务和开源 SDK 集成，降低量子计算的学习与使用门槛，构建起良性生态循环，为量子计算云平台的商业化提供可持续发展路径⁸²。云平台对接方面，长三角枢纽芜湖集群算力公共服务平台与中国移动五岳纪元量子云平台实现对接，助力用户选择合适的算力类型，实现资源和任务的更优匹配⁸³。

量子计算云平台正逐步成为获取硬件资源、开展应用探索以及推进跨领域技术融合的关键基础设施。随着量子硬件性能的不断提升和云服务体系的持续完善，推动量子计算云平台进一步发展需要

⁷⁸ <https://qutech.nl/2025/05/15/delft-quantum-ecosystem-launches-open-architecture-quantum-computer/>

⁷⁹ <https://corporate.ovhcloud.com/en/newsroom/news/france-quantum-2025/>

⁸⁰ <https://www.sealsq.com/investors/news-releases/sealsq-and-colibrityd-launch-quantum-cloud-computing-as-a-service-qaas-to-expand-access-to-quantum-solutions-for-enterprises-and-research-institutions>

⁸¹ <https://www.fujitsu.com/global/about/resources/news/press-releases/2025/0324-01.html>

⁸² <https://qutech.nl/2025/02/25/quantum-inspire-2-0-is-live-with-updated-software-and-hardware/>

⁸³ <https://www.c114.com.cn/news/118/a1289624.html>

产业各方协同发力。在技术层面，应持续投入研发资源，着力突破量子计算核心瓶颈，提升后端硬件系统的可靠性与稳定性，为云平台提供坚实的技术基础。在安全层面，需构建完善的数据加密与隐私保护机制，采用先进安全技术切实保障用户的数据主权。在标准化层面，应加快推动接口协议的统一、云平台间的互联互通，促进量子计算云平台的普及推广，提升用户使用体验。

（三）基准测评已成为研究热点，助力推动行业发展

基准测评体系已成为推动量子计算从理论研究走向实际应用的重要基础支撑，近几年受到业界广泛关注。量子计算基准测评体系作为连接理论与工程实践的关键纽带，通过量化表征量子计算系统的关键性能指标，为技术路线选择、硬件系统优化、应用场景适配和产业投资决策提供客观依据。

量子计算基准测评体系研究逐渐深入，基准测评体系和平台建设加速推进。2025 年，美国国防部高级研究计划局（DARPA）宣布启动量子基准测试计划（QBI）第一阶段⁸⁴，选定 18 家涵盖超导、离子阱、光子等多技术路线的公司参与评估，目标是验证 2033 年前能否实现“价值超过成本”的实用化量子系统。工信部组织开展未来产业创新任务揭榜挂帅工作⁸⁵，其中包含量子计算基准测试公共服务平台任务，旨在面向量子计算基准测评与产品服务测试验证场景，开展量子计算测评体系研究、多源平台综合接入、软硬件接口适配，

⁸⁴ <https://www.darpa.mil/news/2025/companies-targeting-quantum-computers>

⁸⁵ https://www.miit.gov.cn/gyhxxhb/jgsj/gxjss/wjfb/art/2025/art_587709ccf5354eb192886d410fbc33dd.html

自动化测试用例开发等关键技术攻关，构建量子计算测评验证公共服务平台，支持不同硬件技术体系、编程框架、应用软件、中间件和云平台等技术、产品和平台服务测试验证。

量子计算基准测评的指标与方法创新逐步向着细分方向发展。

2025 年，IBM Quantum 发布 Benchpress 基准测试套件⁸⁶，通过 1000 余项测试对量子计算软件开发工具包的电路创建、操作和编译性能进行系统性评估，共测试 Braket、Qiskit、Tket 等 7 个 SDK，实验结果表明各 SDK 性能差异显著，Qiskit 是唯一通过电路构建实验所有测试的套件，用时仅 2 秒，Tket 在多控制电路分解中生成的 2Q 门数量最少，Staq 则是转译速度最快。细分方向的测试不仅为开发者优化 SDK 提供方向，也帮助用户根据需求选择工具。南加州大学提出一种用于量子门基准测试的新协议，可更高效地识别相干和非相干误差，目前已在超导量子比特上验证有效性，有望助力量子化学等领域研究⁸⁷。

中国信通院于 2024 年发布量子计算测评体系 1.0 并联合国内多家研究机构与企业，持续推进相关技术研究与实践验证，不断对该体系进行完善。2025 年中国信通院推出量子计算测评体系 2.0，如图 13 所示，覆盖硬件、测控系统、编译工具、算法、云平台和应用软件 6 个层级，可对量子计算软硬件系统、产品开展功能性能测评。

⁸⁶ <https://www.nature.com/articles/s43588-025-00792-y>

⁸⁷ <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.4c00870>



来源：中国信息通信研究院

图 13 量子计算测评体系 2.0

在硬件层面，测评对象涵盖各技术路线的通用和专用量子计算原型机，以及基于经典计算实现的量子线路模拟器，核心测试指标包括量子比特级、逻辑门级、线路级、系统级、应用级等，此外还包括系统功耗和长期性能测试。在测控系统层面，从测控时延、测控精度、兼容性、可靠性等维度对测控软件、脉冲序列生成器等关键测控软硬件组件进行测评。在编译工具层面，关注量子高级程序设计语言、中间表示、汇编语言、编译器、指令集优化器、量子-经典代码转换器等对象的兼容性、编译速度、编译效率、资源占用情况、结果一致性、错误处理能力、可扩展性等功能、性能指标。在算法层面，相较 1.0 版本增加了量子-经典混合框架的兼容性，以适配日益受到关注的量子-经典融合计算应用场景。在云平台层面，增加了服务性能的测试评估，重点关注任务响应时间、任务并发度、复杂均衡恢复时间、可用服务数量、吞吐量、新建连接速率等关键性能指标。在应用软件层面，除了传统的功能测试、集成测试、性

能测试、安全性测试、用户体验测试、软件成熟度评估等常规测评项目以外，增加了行业场景适配性测试，用来推动量子计算在实际问题场景下的求解应用。

量子计算基准测评研究与平台建设已成为推动技术应用与产业发展的关键支撑。目前，全球范围内的基准测评研究及实验验证已取得阶段性进展，初步建立测评体系架构，并逐步构建测评验证平台。未来，业界需持续完善能够动态演进的测评体系，通过优化测评体系、创新评价方法、完善标准规范、搭建测评平台等途径，实现对量子计算机功能与性能的精准评估与全面呈现，从而为技术迭代与应用落地提供科学依据与方向指引。

（四）量子-经典融合计算可能成为实用化落地突破口

量子-经典混合计算模式通过创新的资源协同机制，融合量子计算与经典计算的优势，正逐渐成为推动量子计算实现实用化价值的关键路径。当前，量子计算技术产业已进入创新突破的关键阶段，然而量子计算硬件在操控精度和系统稳定性方面仍存在技术瓶颈，要实现从实验室验证到实用化落地的跨越，必须突破其在进行实际价值创造方面的障碍。近几年的业界实践表明，单纯依赖量子计算或经典计算架构均存在固有局限，量子-经典混合计算模式有望为关键应用领域提供切实可行的解决方案。

量子计算与超级计算协同成为量子-经典融合计算重要发展方向。加州理工学院、IBM、日本理研团队联合开发量子-经典混合架构，调用 Heron 量子处理器共计 77 个量子比特，并结合富岳超级计算机

完成铁硫分子簇的电子能级计算，其电路深度达到 10570 个量子门，为量子化学模拟提供新思路⁸⁸。欧洲高性能计算联合体（EuroHPC JU）在波兰部署了 PIAST-Q 系统，将 20 个量子比特的离子阱量子计算机与 ALTAIR 超级计算机集成，实现混合架构下的低功耗运行，有望为解决复杂多体物理等应用问题的求解提供硬件基础⁸⁹。

量子-经典融合计算逐步从理论研究向多行业应用场景探索渗透，覆盖化学、材料、医药等多个高价值应用领域。IonQ、阿斯利康公司、亚马逊合作将量子加速引入药物研发，通过量子混合 workflow 将铃木-官浦反应的模拟时间从数月缩短至数天，速度提升超过 20 倍⁹⁰。北京量子院与清华大学合作在密码分析量子算法领域提出基于量子-经典混合架构的 HAWI 算法，并演示了容错学习问题（LWE）的求解，有效提高成功率⁹¹。

构建量子-经典融合生态、降低技术使用门槛逐渐成为发展趋势，开发平台化工具与开源框架等方式在这一过程中发挥重要作用。英伟达的量子-经典融合计算架构 CUDA-Q 已集成至 Grace Blackwell 200 芯片，支持量子算法与 GPU/CPU 的协同计算，其与 Alice & Bob 合作的量子模拟库 Dynamiqs 通过 GPU 加速实现了 75 倍加速效果的量子动力学模拟⁹²。Quandela 公司开发 MerLin 框架，通过 GPU 加速

⁸⁸ <https://www.science.org/doi/full/10.1126/sciadv.adu9991>

⁸⁹ https://eurohpc-ju.europa.eu/inauguration-piast-q-leap-european-quantum-computing-2025-06-23_en

⁹⁰ https://ionq.com/blog/ecosystem-innovation-ionqs-life-sciences-application-workflow-accelerates?utm_source=press-release&utm_medium=blog&utm_campaign=AWS-AZ-NVIDIA&utm_content=blog-post&utm_term=45809

⁹¹ <https://www.nature.com/articles/s42005-025-02126-w>

⁹² <https://www.hpcwire.com/off-the-wire/alice-bob-boosts-quantum-simulation-performance-with-cuda-q-integration/>

的光子量子电路模拟器，使用户能在 24 个量子比特以上的虚拟系统中测试算法⁹³。Terra Quantum 公司推出的 TQ42 Studio 平台，包含无代码平台 QAI Hub 和编程接口 Qode Engine，允许用户构建量子-经典混合计算模型⁹⁴。

多国政府与科研机构科研项目布局推动量子-经典融合计算发展。新加坡启动“混合量子经典计算（HQCC 1.0）”计划，拨款 2450 万新元用于量子-经典融合计算中间件、混合算法研发及人才培养，旨在实现量子计算与高性能计算的无缝集成⁹⁵。日本产业技术综合研究所实验室与 QuEra Computing 合作，将量子计算机与 ABCI-Q 超级计算机集成形成混合算力平台，聚焦药物发现与气候建模等方面应用探索⁹⁶。欧洲通过“EuroHPC JU”计划推进八台量子计算机的部署，覆盖中性原子、离子阱等多种技术路线，其中波兰 PIAST-Q 系统已向欧洲用户开放计算资源⁹⁷。

量子-经典融合计算有望成为推动量子计算应用落地的突破口。量子计算硬件技术的持续突破与经典计算性能的不不断提升，使得两者形成的优势互补效应日益凸显，共同构成未来量子-经典融合计算技术演进的双轮驱动。未来，需持续深化应用场景挖掘、推动资源调度机制的智能化升级、并逐步构建完善的产业生态，为量子计算技术的实用化与产业化提供持续动力。

⁹³ <https://www.quandela.com/about-us/newsroom/merlin-unveiled-photonics-quantum-layer-for-ai/>

⁹⁴ <https://terraquantum.swiss/news/announcing-our-closed-beta-for-tq42-studio-qai-hub-takes-quantum-ai-mainstream>

⁹⁵ <https://www.cqt.sg/highlight/2025-03-hybrid-quantum-classical-computing/>

⁹⁶ <https://www.hpcwire.com/off-the-wire/quera-installs-1st-offsite-quantum-computer-in-japan/>

⁹⁷ https://eurohpc-ju.europa.eu/inauguration-piast-q-leap-european-quantum-computing-2025-06-23_en

（五）量子计算与人工智能协同创新是未来重要方向

量子计算与人工智能融合是前沿科技领域重要探索方向之一。

两者的结合不仅为量子计算注入了新动力，也为人工智能的发展开辟了新路径，有望共同推动技术突破与产业变革。人工智能推动量子计算发展方面，随着深度学习、模式识别等技术的持续演进，人工智能有望增强研究人员对量子理论的理解，加速量子芯片设计、量子态测控等环节的研发进程，优化并提出更高效的量子纠错方案与算法，提升算法运行的可靠性与稳定性，拓展量子计算在更多行业中的应用场景，从而进一步促进量子计算技术的发展。量子计算推动人工智能发展方面，量子计算凭借其数据并行处理能力，在计算海量数据、加速机器学习算法训练、优化人工智能模型等方面展现出巨大潜力，有望显著提升计算效率、缩短训练时间、提高模型精度，从而使得人工智能系统实现更高效、更精准的学习与推理。

业界在量子计算与人工智能融合应用研究方面开展了大量创新性探索。人工智能赋能量子计算发展方面，2025 年，马普所提出机器学习算法构建物理状态的本征局域模型，从而使实验预测最大限度接近量子力学预测，助力深化对量子多体系统的理解⁹⁸。RIKEN 提出利用深度学习优化 GKP 态的方法，优势在于保持纠错能力的同时减少对大振幅压缩态的使用需求，有望提升量子纠错效率⁹⁹。量子计算支撑人工智能发展方面，维也纳大学基于构建的光量子处理器

⁹⁸ <https://mpl.mpg.de/news/article/using-machine-learning-to-understand-fundamental-structures-of-quantum-mechanics>

⁹⁹ https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/tr/20250509_2/index.html

运行机器学习算法，实验表明小型光量子处理器可以比传统算法表现得更好，验证了小规模量子计算处理器在提升机器学习算法性能方面的潜力¹⁰⁰。鸿海研究院等合作提出量子参数适应方法，提升了参数高效微调（PEFT）在大语言模型上的应用能力，相较于传统方法可有效减少参数需求，同时保持甚至提升文本生成性能¹⁰¹。

量子人工智能有望作为一种共性技术，为不同行业领域提供新型解决方案。2025 年，芝加哥大学通过训练量子启发式算法来区分癌症患者和健康个体的外泌体，该方法优于传统方法，有望通过这种方式将量子机器学习应用在癌症早期检测当中¹⁰²。电子科技大学与华为公司合作定量评估了高维互文量子态的模拟成本，实验结果表明强量子互文性有助于降低量子人工智能算法的运行资源需求¹⁰³。多伦多大学和 Insilico Medicine 通过结合量子计算、生成式 AI 及传统计算方法，设计出一种癌症驱动蛋白 KRAS 分子，有望革新药物研发流程并为癌症治疗带来新希望¹⁰⁴。

量子计算与人工智能的协同发展未来前景广阔，已在多个行业领域展现出初步的应用前景，有望在机器学习、数据处理与优化算法等方面实现突破。然而，二者的融合距离成熟应用依旧存在诸多技术瓶颈与挑战，主要包括量子硬件性能的限制、人工智能模型与量子架构适配不足，以及缺乏统一的评估标准等，仍需业界持续攻

¹⁰⁰ <https://medienportal.univie.ac.at/en/media/recent-press-releases/detailansicht-en/artikel/quantum-computers-bost-machine-learning-algorithms/>

¹⁰¹ <https://www.honhai.com/zh-tw/press-center/press-releases/latest-news/1545>

¹⁰² <https://pme.uchicago.edu/news/quantum-ai-creates-better-liquid-biopsy-cancer>

¹⁰³ <https://doi.org/10.1038/s42005-025-02127-9>

¹⁰⁴ <https://www.nature.com/articles/s41587-024-02526-3>

关。随着关键技术的进一步成熟，量子计算与人工智能的深度融合将为更多领域带来深远变革，开拓科技与产业发展的新空间。

四、量子计算产业初具雏形，未来发展仍需多方协同

（一）产业生态格局初成，核心环节尚需要持续攻关

量子计算产业生态呈现蓬勃发展的态势，从硬件研发到应用探索的全链条创新能力持续增强。上游企业在环境测控系统方面不断实现技术突破，中游企业在量子计算原型机研制与软件算法开发方面稳步推进，下游企业则积极拓展应用场景并加快建设量子计算云平台，共同形成了产业生态雏形。与此同时，各类创新主体持续涌入量子计算领域，产业生态体系如图 14 所示，包括科技企业、初创企业等在内的多元参与者共同推动产业化进程。



来源：中国信息通信研究院

图 14 欧美量子计算产业生态体系概况

产业生态上游是量子计算产业生态发展的基础支撑，主要包括环境测控系统、核心硬件组件等设备，具体涵盖了超低温制冷设备、高真空维持系统、低温电子学器件、光学元件等核心技术装备。由于量子计算技术本身的高度复杂性，加之多种技术路线并行发展且前景尚不明朗，导致上游产业呈现出明显的技术路线分化和市场细分特征，这种多元化格局虽然在一定程度上增加了技术协同攻关的难度，但客观上形成了良性的市场竞争环境，有效避免了技术垄断可能带来的风险。从全球发展情况来看，欧美国家在量子计算上游产业生态具有先发优势，体现在企业数量、技术创新能力、市场应用基础、产业链配套等多个方面。对比来看，虽然近年来我国在上游产业生态的自主研发方面取得颇多进展，多类关键设备实现国产化突破，但在核心技术指标、量产成本控制以及国际市场份额等方面仍存在差距，未来突破方向应聚焦基础材料与核心工艺研发、产学研协同创新、培育专精特新企业等方面。

产业生态中游是量子计算产业发展的核心支柱，同时也是企业较为集中的区域，主要由量子计算机整机制造商和量子软件开发商两类主体组成。在整机制造领域，全球量子计算机研发呈现多元化技术布局，其中从事超导路线的企业数量占据主导，离子阱、中性原子、光量子、硅半导体和拓扑等技术路线也在持续发展。在软件研发领域，各企业积极打造各具特色的量子计算软件工具，并通过生态社区建设加速软件迭代。从全球发展情况来看，欧美国家凭借庞大的企业集群、更高水平的整机研发能力、更为活跃的软件开源

社区等，保持相对领先。对比来看，我国在整机研制方面已实现主流技术路线全覆盖，同时涌现出一批软件开发企业，但仍存在研发投入强度不足、创新成果转化效率待提升、产业协同效应尚未充分发挥等问题。

产业生态下游作为连接技术与市场的关键纽带，主要由量子计算云服务提供商和行业应用方构成，直接面向终端用户需求，在产业生态中发挥着关键作用。云平台建设方面，基于互联网架构搭建量子计算资源的共享平台，实现计算资源的云端开放共享，推动产业生态的早期培育并加速技术市场化进程。行业应用探索方面，不同行业的用户逐步开始关注量子计算应用潜力，通过开放实际业务场景、联合开发定制化解决方案等方式验证量子计算实用价值。从全球发展情况来看，国际科技巨头 IBM、谷歌、亚马逊、微软等已建立多硬件接入的开放平台，具备相对丰富的应用案例库和相对成熟的商业服务模式，形成跨行业的合作网络，共同探索量子计算在重点行业中的应用。对比来看，我国在量子计算云平台领域需提升硬件兼容能力、平台协同效应、服务创新水平等方面能力，行业应用探索方面则需在提升企业投入力度与认知深度、培育示范性标杆案例、完善产学研协同机制、培育商业化服务生态等维度持续发力。

目前全球量子计算产业生态仍处于发展早期。上游聚焦基础装备与支撑服务，中游专注于原型机研制、软件开发等核心技术研发与产品转化，下游则推动场景验证与行业应用探索。未来需要在强化量子计算基础能力建设的同时，探索建立联合攻关和利益共享的

合作机制，深化产业生态上中下游协同，共建量子计算实验验证平台和应用示范先导区，加速量子计算技术研究与产业应用探索，最终实现全产业链的协同共进和价值共赢。

（二）企业处于活力迸发期，持续推动产业生态发展

量子计算正迎来发展热潮，科技巨头与初创企业凭借各自优势积极参与其中。大型科技企业主要采取聚焦突破策略，依托量子计算技术创新强化核心竞争力、培育新增长点，并构建业务护城河。与此同时，一批新兴的量子计算初创企业迅速崛起，在核心技术攻关、应用场景探索和产品迭代等方面展现出显著活力，正逐渐成为推动产业发展的重要引擎。

当前全球量子计算产业呈现区域集聚特征，欧美逐渐形成产业集聚地。美国科技巨头诸如 IBM、谷歌、亚马逊等，具备雄厚的研发实力、丰富的工程经验以及相对完善的商业体系，展现出显著的竞争优势，近年来成果不断涌现。2025 年，IBM 与加州理工等基于 IBM Heron 量子处理器，利用量子-经典混合的方式获取复杂分子的电子能级，有望应用于量子化学、材料科学和药物研发等领域¹⁰⁵。谷歌在 69 比特超导量子处理器悬铃木中使用量子逻辑门和高保真度模拟演化方法，模拟 Kibble-Zurek 模型的热平衡演化和相变过程，为开展高能物理等领域的量子模拟提供新思路¹⁰⁶。亚马逊推出量子计算芯片 Ocelot，将猫量子比特技术与其他量子纠错组件整合到同一

¹⁰⁵ <https://www.caltech.edu/about/news/new-hybrid-quantumclassical-computing-approach-used-to-study-chemical-systems>

¹⁰⁶ <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08460-3>

芯片上，降低量子纠错成本，为构建容错量子计算机提供新方法¹⁰⁷。此外，Rigetti、IonQ、Quantinuum 等初创企业发展迅速，基于差异化的技术路线持续输出研究成果和软硬件产品，行业影响力持续提升。2025 年，Rigetti 等公司利用光学换能器读取超导量子比特的能力，可保护量子比特免受在运行过程中引入杂散光子等造成的退相干影响¹⁰⁸。IonQ 与华盛顿大学合作利用离子阱量子系统 Forte Enterprise 模拟无中微子双 β 衰变过程并观测到轻子数守恒破坏现象，有望助力探索物质和反物质之间的不平衡物理过程¹⁰⁹。Quantinuum 推出生成式量子人工智能框架 Gen QAI，用以推动新药研发、金融市场精准预测、物流和供应链实时优化等领域的行业应用¹¹⁰。

欧洲量子计算产业呈现出以创新型初创企业为主导的发展格局，多家技术特色鲜明的初创公司正推动着行业进步，业务布局围绕量子处理器研发、量子计算软件开发、云服务平台搭建以及行业解决方案探索等多个方面，大部分专注细分领域的技术突破，研发成果持续涌现。2025 年，Pasqal 将其 100 量子比特中性原子量子处理器接入谷歌云市场，用户能够在 Pasqal 量子处理器上运行计算并获得运行结果¹¹¹。Oxford Ionics 公布实现可扩展容错量子计算的发展路线图，分为基础、企业级和规模化价值三个阶段，在关注量子比特数量增

¹⁰⁷ <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08642-7>

¹⁰⁸ <https://doi.org/10.1038/s41567-024-02742-3>

¹⁰⁹ <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.05757>

¹¹⁰ <https://www.quantinuum.com/press-releases/quantinuum-announces-generative-quantum-ai-breakthrough-with-massive-commercial-potential>

¹¹¹ <https://www.pasqal.com/newsroom/pasqals-neutral-atom-quantum-computer-available-on-google-cloud-market-place/>

加的基础上，降低物理量子比特的错误率¹¹²。OQC 展示一种可减少大量硬件要求的新量子错误检测方法，大幅削减纠正逻辑量子比特错误所需的硬件开销，助力实现容错量子计算¹¹³。当前，欧美量子企业通过优势互补、全产业链协同的模式，在核心技术突破、产品迭代升级和商业化应用等方面取得进展，展现出强劲的发展活力，推动全球量子计算产业生态持续发展。

我国不同类型的量子计算企业在技术研发和产业应用方面取得颇多进展。腾讯、华为、中国电科等科技企业将量子计算作为关键前沿技术方向开展布局，重点投入基础研究、软硬件产品开发以及行业应用场景探索等方向。中国移动、中国电信等运营商近年也持续发力，通过建设量子计算云平台、联合行业用户开展应用探索等方式，推动产业协同创新。本源量子、华翊量子、玻色量子等初创企业在完成多技术路线布局的同时不断推出创新成果。2025年，中国移动发布“五岳量智”量子人工智能平台，并同步推出《量子 AI 赋能金融与生物医药应用白皮书》及“量智融合算力开放计划”¹¹⁴。玻色量子与广州国家实验室合作开发蛋白质结构预测量子算法，基于量子玻尔兹曼机变分自动编码器预测蛋白氨基酸残基接触图¹¹⁵。量旋科技等联合团队提出基于长短期记忆的机器学习模型，实现了量子系统参数与动态演化的双向解析，为量子硬件调试、噪声表征及

¹¹² <https://www.oxionics.com/announcements/oxford-ionics-unveils-development-roadmap-to-scalable-fault-tolerant-quantum-computing>

¹¹³ <https://oqc.tech/company/newsroom/oqc-announces-dual-rail-dimon-research>

¹¹⁴ <https://mp.weixin.qq.com/s/COsCyFnILc3WB5qBZNr3yw>

¹¹⁵ <https://arxiv.org/abs/2508.11190>

算法优化提供了新思路¹¹⁶。总体而言，我国量子计算企业积极开展技术攻关和应用探索，逐步提升在全球量子计算产业中的竞争力，未来仍需在研发投入强度、技术创新程度、产业成熟度等方面缩小与国际先进领先水平的差距。

量子计算相关企业已成为推动产业生态发展的重要力量。深入分析这些企业的发展状况，对把握行业脉搏、促进技术进步具有关键意义。技术路线布局反映企业的战略定位与核心竞争力。量子计算硬件研发呈现出显著的技术路线多元化特征，超导路线是最受企业青睐的技术路线，参与者涵盖了科技巨头和初创公司，产业发展进程相对领先。布局离子阱路线的企业以创新型初创企业为主体，技术成熟度稳步提升。专注于中性原子路线的企业数量比较有限，基本由初创企业推动，但创新活跃度高且近几年技术突破频现。从事光量子路线的企业参与者相对较少，主要由初创企业主导。布局硅半导体路线的企业数量也较少，呈现传统半导体厂商与初创企业共同推进的混合格局。

资本市场表现展现出企业的商业化能力与市场前景。市场投融资方面，量子计算领域市场融资持续保持高位，欧美的 IonQ、Quantinuum、PsiQuantum、Alice&Bob、Planqc、QuEra 等初创企业的投融资保持活跃，获得资本市场青睐，国内的华翊量子、玻色量子、图灵量子、中科酷原等初创企业也在今年获得不同轮次和金额的投融资，显示出投资者对实力强劲的初创企业的持续看好，同时

¹¹⁶ <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.120202>

也反映出对风险缓解和近期回报日益增长的重视。但在市场盈利方面，绝大多数量子计算初创公司目前都处于研发投入远高于营收的亏损状态。未来量子计算上游基础设施和器件制造商，中游硬件制造商和软件开发商，以及下游的云服务和应用软件供应商，仍需进一步开拓商业化市场和提升盈利能力。

全球量子计算企业发展进入快车道，助力推动量子计算产业生态发展。然而，受限于技术路线尚未统一、商业化前景不明朗和实际应用落地困难等因素，国内外企业仍需进一步提升自身实力。供应链建设方面，上游企业应当加速突破关键设备组件技术瓶颈，提升工程化制造能力，满足量子计算机所需的严苛需求。硬件研发领域，量子计算原型机研制企业需要推动核心部件技术突破，提升系统整体性能指标，加速原型机研发的技术演进。应用探索层面，量子计算企业需要深化与行业龙头合作，持续开展实用算法验证，尽早在实用化问题上证明量子计算加速优势。在产业生态建设方面，亟待强化上中下游协同创新，打造可持续发展的产业环境，为量子计算技术在各行业的规模化应用创造必要条件。

（三）联盟推动生态培育，公共平台强化产学研协同

随着量子计算技术研究和应用探索的不断深入，全球量子计算发展已进入产业生态培育关键阶段，主要科技国家纷纷在联盟协作机制和公共设施平台建设等方面开展布局，致力于打造技术研发与产业应用相互促进、良性循环的产业生态系统。



来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理（截至2025年8月）

图 15 全球典型量子信息产业联盟概况

全球多个国家陆续组建量子信息领域产业联盟，联盟成员结构呈现多元化特征，涵盖量子科技企业、科研机构、重点行业应用企业等，主要采取建立常态化合作平台、制定技术标准、组织应用场景对接等措施，旨在促进技术协同攻关、推动成果转化应用和培育产业生态体系。全球典型量子信息产业联盟如图 15 所示。2025 年，Horizon Quantum 加入 QuEra 量子联盟，二者后续将在量子软硬件集成方面进行合作，推动量子计算技术的普及与发展¹¹⁷。俄罗斯鞑靼斯坦量子联盟正式成立，其中量子计算被列为重点发展领域，旨在通过发展量子技术推动制药、物流、金融等多个行业的发展¹¹⁸。我国量子信息网络产业联盟（QIIA）目前已有 104 家成员单位，组织开展三届量子信息技术与应用创新大赛，推动量子信息领域协同创

¹¹⁷ <https://www.quera.com/press-releases/horizon-quantum-joins-the-quera-quantum-alliance-strengthening-quantum-software-ecosystem>

¹¹⁸ <https://thequantuminsider.com/2025/03/17/tatarstan-quantum-consortium-a-new-era-for-russian-quantum-technologies/>

新平台建设，开展技术产业报告撰写、标准实施测试验证、应用案例征集发布等多项活动，致力于推动我国量子信息领域逐步构建自主产业体系和产业生态。综上所述，产业联盟作为推动量子计算技术产业化发展的关键引擎，其价值主要体现在创新协同、生态构建与产业聚合等多方面，有望持续推动整个产业生态的蓬勃发展。

建设量子计算公共设施平台是培育产业生态的关键举措，有望通过共享高端设备、降低研发门槛、统一技术标准等方式，解决量子计算产业发展过程中出现的重复建设、资源浪费以及技术碎片化等问题。近几年，欧美国家通过设立专项建设资金、建立跨部门协调机制、产学研联合运营等举措，提升量子计算公共平台与基础设施建设的战略高度，在加速技术成果转化、降低企业研发成本的同时，促进产业集群形成。2025 年，OQC 与 Riverlane 宣布将合作构建量子纠错测试平台，用以实现量子纠错相关测试，并开发容错量子纠错解码和进行资源估计¹¹⁹。英国国家科研与创新署（Innovate UK）拨款 165 万英镑，旨在开发采用开放式架构的量子测试平台¹²⁰。澳大利亚量子与先进技术商业化基础设施计划（QCIP）资助约 600 万澳元支持昆士兰州国家量子计算测试台（NQCT）项目，Rohde & Schwarz 公司被选为主要合作伙伴，旨在打造未来产业生态¹²¹。量子计算公共设施平台作为产业发展的关键基础设施，在提供实验验证

¹¹⁹ <https://oqc.tech/company/newsroom/oqc-riverlane-quantum-error-correction-testbed>

¹²⁰ <https://quantumzeitgeist.com/innovate-uk-awards-1-65-million-to-treq-led-consortium-for-open-architecture-quantum-testbed-development/>

¹²¹ https://www.rohde-schwarz.com.cn/about/news-press/all-news/zurich-instruments-and-rohde-schwarz-to-back-the-national-quantum-computing-testbed-facility-in-australia-press_releases_detailpage_229356-1562762.html

环境、降低试错成本、构建测试基准等多个方面发挥重要作用。

当前，全球量子计算产业正处于生态培育的关键阶段。产业界正通过积极组建联盟组织、加快布局公共基础服务平台等措施，推动创新合作与成果转化，为产学研各方提供联合研发的载体与机会。未来，应持续强化联盟的枢纽功能，完善量子计算公共设施平台的服务能力，构建高效的软硬件资源共享机制，从而为构建自主可控、安全可靠的量子计算产业生态奠定坚实基础。

（四）标准化取得初步进展，体系建设仍需持续推进

全球主要标准化组织逐步启动量子计算研究并取得初步成果。作为一门高度交叉的学科，量子计算既深度依赖于数学、物理等基础学科的突破，也紧密融合电子工程、计算机科学等应用学科的技术成果，其技术演进与产业培育呈现动态发展特征。此外，由于量子计算技术整体仍处于发展初期，在技术路径选择和生态建设方面仍存在诸多不确定性，量子计算标准化整体仍处于起步阶段。

国际标准化组织与国际电工委员会（ISO/IEC）、国际电信联盟电信标准化部门（ITU-T）、电气与电子工程师协会（IEEE）等国际标准组织，全国量子计算与测量标准化技术委员会（TC578）等国内标准组织，均布局推进量子计算标准化工作与标准预研等相关活动，在构建统一概念术语体系、明确定义边界的同时，初步构建性能评价体系，探索测试验证方法。

国际方面，ISO/IEC 于 2024 年成立量子技术联合技术委员会（JTC3），目前有在研项目 1 项，即 ISO/IEC AWI TR 18157《信息技

术—量子计算简介》¹²²。2025年，意大利大学与研究部联合制造部等多部门联合公开了《量子技术国家战略草案》，该战略作为意大利履行《欧洲量子技术宣言》的重要组成部分，强调了制定欧洲标准的重要性，旨在确保技术的安全性和可靠性¹²³。欧洲量子产业联盟（QuIC）发布《2025年版量子技术战略产业路线图》，强调了标准化的重要性，呼吁欧洲各国政府和企业共同推动量子技术发展¹²⁴。

国内方面，2025年，工信部印发《2025年工业和信息化标准工作要点》，在“以标准引领现代化产业体系建设”中提到，加强未来产业标准建设，开展元宇宙、脑机接口、量子信息等标准研究¹²⁵。TC578负责量子计算与量子测量领域的国家标准研究，2024年年底，《量子计算服务平台 第1部分：架构与功能要求》、《量子计算服务平台 第2部分：性能评估》、《量子计算系统性能测试方法》、《超导量子计算专用极低温极低噪声系统》等4项量子计算领域国家标准正式获批立项¹²⁶，各标准起草组积极开展相关工作，初步构建包含量子计算硬件系统、软件平台以及支撑设备的标准框架。

量子计算标准化工作已取得初步进展，需循序渐进稳步推进。

当前量子计算标准体系建设仍面临多方面挑战，包括技术快速迭代带来的标准适应性要求、多种技术路线并存带来的选择压力，以及产业成熟度不足所形成的制约等。为应对上述挑战，建议采取分层

¹²² <https://www.iso.org/standard/85203.html?browse=tc>

¹²³ <https://www.mur.gov.it/it/news/mercoledi-26022025/tecnologie-quantistiche-al-la-consultazione-pubblica-sulla-strategia>

¹²⁴ <https://www.euroquic.org/strategic-industry-roadmap-2025/>

¹²⁵ https://www.miit.gov.cn/jgsj/kjs/wjfb/art/2025/art_95e3fd1b99104dc5b3db7308390b6137.html

¹²⁶ <https://www.tc578.com.cn/portal/article/index/cid/3/id/306.html>

推进、动态调整的标准体系建设策略。首先应优先制定基础通用标准，涵盖术语定义、功能指标与体系架构等基本内容，避免过早锁定特定技术路线而抑制创新。在此基础上，可分阶段持续推进其他方向的标准研制工作。渐进式策略有助于防范技术路线固化风险，为量子计算技术创新保留灵活空间，同时提供必要的产业规范引导，实现技术快速演进与产业规范发展之间的平衡，从而推动技术创新与标准化建设形成良性互动。

五、总结与展望

作为引领新一轮科技革命的核心技术，量子计算已初步构建起贯穿基础理论研究、工程技术攻关、应用场景探索、产业生态构建的协同发展体系。基础理论研究方面，科学研究与工程技术攻关相互促进，持续取得进展。工程技术攻关方面，超导、离子阱、中性原子、光量子、硅半导体等技术路线并行发展，拓扑路线也在近期实现突破，呈现出开放、多元的技术竞争格局。应用场景探索方面，多个重点行业正积极推进量子计算应用场景的探索实践。产业生态培育方面，产业生态格局初步形成，上中下游各关键环节尚待进一步完善。总体来看，量子计算技术进步迅速，产业生态整体发展态势稳健，未来发展与应用前景令人期待。

然而也需认识到，量子计算领域仍存在多重发展瓶颈亟待突破。基础理论研究方面，量子态制备与控制、纠错编码设计等核心科学问题仍需突破，基础材料的研究与应用处于初级阶段，量子算法理论有待持续完善。工程技术攻关方面，目前各技术路线原型机在量

量子比特规模、逻辑门保真度等关键指标上，距离大规模可容错通用量子计算机仍有数量级差距。应用场景探索方面，能展现量子计算优越性的实际应用案例仍未出现，面向实际应用场景的技术成果转化仍需加速推进。产业生态培育方面，供应链成熟度、市场接受度和商业模式创新都处于早期阶段。

我国量子计算发展水平处于国际第一梯队，但也面临外部环境复杂，技术竞争激烈等挑战，需要进一步完善体系化布局，多维度协同突破当前发展瓶颈，凝聚产学研用各方合力共同推进技术研究和产业应用发展。一是深化基础科研攻坚，逐渐建立基础理论研究、基础材料探索和量子算法研究等多方面的协同推进机制，进一步加快基础科研发展。二是加快量子计算原型机研制，在提高核心设备组件研制能力的基础上，破解不同技术路线的工程化难题，加速提升量子比特数量、操控精度、保真度等核心技术指标。三是促进行业应用探索，通过设立行业示范项目、共建应用验证平台等方式，持续探索量子计算在重要行业领域中的应用潜力。四是推进产业生态建设，依托产业联盟等平台促进产学研用协同，加强公共服务平台建设，通过加快量子计算标准化研究促进专业分工和产业协作，共同形成技术研发和产业培育良性互动的创新发展格局。

中国信息通信研究院 技术与标准研究所

地址：北京市海淀区花园北路 52 号

邮编：100191

电话：010-62300383

传真：010-62304980

网址：www.caict.ac.cn

