

量子计算发展态势研究报告

(2024 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

2024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元，利用量子叠加和干涉等原理实现并行计算，有望在解决计算复杂问题过程中提供指数级加速，具有重大战略意义和科学价值，是未来实现计算能力跨越式发展的重要方向之一，全球主要国家持续深化布局相关技术研发、应用探索和产业生态培育，国际竞争日趋激烈。

当前，量子计算处于技术攻关和应用探索的关键阶段。超导、离子阱、中性原子、光量子、硅半导体等技术路线科研探索和原型机工程研发不断取得进展，金融、化工、生物、交通、人工智能等行业领域应用探索持续深化，量子-经典融合计算成为业界关注焦点，基准测评研究稳步推进，科技巨头和初创企业发展保持活跃，国内外积极推动产业联盟建设，业界依托量子计算云平台、公共基础设施等平台措施进一步加快构建产业生态，生态系统正逐渐壮大。

中国信息通信研究院持续开展量子计算发展态势研究。本年度报告持续跟踪近期国内外量子计算技术研究、应用探索和产业生态培育等方面的最新热点进展，分析研判量子计算技术演进方向与应用产业发展趋势，并结合量子计算发展现状、趋势和问题提出发展建议，为凝聚业界各方共识合力提供参考。

目录

一、全球持续深化量子计算布局，正进入快速发展期.....	1
（一）量子计算有望带来颠覆变革，成国际竞逐焦点.....	1
（二）技术创新持续活跃，渐成为前沿科学研究热点.....	3
（三）企业数量增速回落明显，投融资市场有望回暖.....	7
二、量子计算技术研究有序推进，依旧面临多重挑战.....	11
（一）多技术路线竞相争鸣，短期难以形成方案聚焦.....	11
（二）量子纠错研究不断深入，实用化差距依旧明显.....	16
（三）量子计算软件持续多元发展，成熟度有待提升.....	18
（四）支撑保障系统愈加重要，指标亟待进一步提高.....	21
三、量子计算应用探索持续发力，实用落地有待突破.....	24
（一）多领域应用探索并进，实用落地仍需加速突破.....	24
（二）量子计算云平台提供者渐多，功能普遍待强化.....	27
（三）基准测评研究正在稳步推进，成果与挑战并现.....	31
（四）量子-经典融合成焦点，技术体系架构至关重要.....	34
四、量子计算产业培育多方并举，生态系统逐步兴起.....	38
（一）产业生态初步形成，关键环节发展仍有待推进.....	38
（二）企业进入发展活跃期，不断推动产业生态发展.....	42
（三）联盟促进生态培育，公共设施助力产学研合作.....	46
（四）标准化已成为国内外布局热点，发展进程加快.....	49
五、总结与建议.....	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.....	3
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.....	6
图 5 量子计算不同技术路线全球专利情况.....	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硬件系统研制企业分布情况.....	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 2023 年量子计算产业投融资笔数类型分布.....	10
图 10 量子计算主要硬件技术路线关键指标对比概况.....	15
图 11 量子计算软件体系架构图.....	18
图 12 量子计算应用场景分析.....	24
图 13 国内外典型量子计算云平台概况.....	28
图 14 量子计算测评基准体系框架.....	32
图 15 量子-经典融合计算技术体系架构.....	35
图 16 量子计算产业生态概况.....	38
图 17 美、中、英量子计算产业基础能力对比.....	41
图 18 全球代表性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
表 2 代表性量子计算公共设施平台概况.....	48

一、全球持续深化量子计算布局，正进入快速发展期

（一）量子计算有望带来颠覆变革，成国际竞逐焦点

量子计算是以量子比特为基本单元，利用量子叠加和干涉等原理实现信息处理的一种计算方案，具有经典计算无法比拟的信息表征能力和超强并行处理能力，为解决特定计算复杂问题提供指数级加速。量子计算是“第二次量子革命”的重要标志，可以带动计算能力实现跨越式发展，有望颠覆和重塑传统技术体系对于信息处理和解决问题的模式，为经济社会发展带来前所未有的机遇。

量子计算已成为全球主要国家之间开展综合国力竞争，维护国家技术主权的关注焦点之一。近几年全球主要科技国家在量子计算领域的规划布局持续加强，已有 30 余个国家开展了以量子计算为重点的量子信息领域规划布局，全球主要国家的战略规划和投资概况如表 1 所示。国际竞争日趋激烈，各国均加大量子计算领域投入并争夺领先地位，这种竞争将会持续并对世界科技发展产生深远影响。

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	光量子跃迁旗舰计划	日本	投资约 1.2 亿/年
2018	量子旗舰计划	欧盟	10 年投资约 11 亿
2018	国家量子信息科学战略 国家量子倡议（NQI）法案	美国	计划 5 年投资 12.75 亿， 实际投资已达 37.38 亿
2018	量子技术从科研到市场	德国	投资约 7.1 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	投资约 19.6 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 个量子项目 1.53 亿/年
2023	国家量子战略	加拿大	投资约 2.7 亿
2023	国家量子战略	英国	10 年投资 31.8 亿
2023	国家量子战略	澳大利亚	投资约 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	国家量子任务	印度	2030 年前投资 7.2 亿
2023	量子 2030	爱尔兰	已投资 0.24 亿
2023	国家量子倡议法（二期）	美国	2024 年预算 9.68 亿
2024	国家量子战略	新加坡	5 年投资约 2.19 亿

来源：中国信息通信研究院（截至 2024 年 7 月）

美国是全球最早开展量子计算研究的国家之一，注重依托政府指导推进量子计算发展，国家战略部署围绕顶层设计、组织机制、专项计划、生态建设等多个维度展开。2023 年 12 月，美国国家科学技术委员会发布《NQI 2024 年年报》¹，报告表明美国在量子信息领域实际投资较 NQI 法案原计划五年投资 12.75 亿美元超出两倍有余，2019-2023 年累计投资 39.39 亿美元，2024 年预计投资 9.68 亿美元，其中量子计算投资占比最高，五年共计投资约 14 亿美元。

欧洲国家自上世纪九十年代开始关注并持续支持量子计算发展。近年来，欧洲国家布局并出台了一系列量子信息相关战略和专项计划，目标是在全球量子科技竞争中赢得主动。2024 年，欧盟发布新版量子旗舰计划《战略研究和产业议程》²，在量子计算等四大领域分别提出短期（2027 年）和中期（2030 年）发展目标及建议，通过开展基础科研、促进产业化以及加强基础设施建设等方式，使欧洲在量子技术、产业生态和关键使能因素等方面实现领先。

¹ <https://www.quantum.gov/the-national-quantum-initiative-supplement-to-the-presidents-fy-2024-budget-released/>

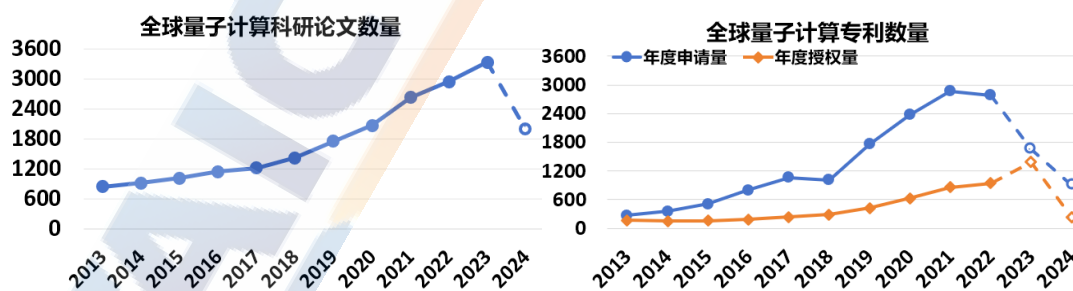
² https://qt.eu/news/2024/2024-02-14_new-roadmap-to-position-europe-as-the-quantum-valley-of-the-world

我国高度重视以量子计算为代表的量子信息领域发展，通过组建国家实验室和实施重大科技专项等措施推动形成全面科研布局。2024年《政府工作报告》中提到在积极培育新兴产业和未来产业领域，制定未来产业发展规划，开辟量子技术、生命科学等新赛道，创建一批未来产业先导区³。近年来我国已有二十余个省市在地方“十四五”科技与信息技术产业发展规划中，针对量子计算基础科研、应用探索和产业培育等方面提出规划部署，采取措施主要聚焦在量子计算技术研发、应用探索和产业培育等方向。

此外，英国、日本、加拿大、印度、澳大利亚、丹麦、韩国、爱尔兰、新加坡等国也高度重视量子计算发展，相继发布了量子信息发展战略，围绕顶层规划、专项计划、组织机制、前沿研究、应用探索、产业培育和人才培养等领域，打造量子计算竞争能力。

（二）技术创新持续活跃，渐成为前沿科学研究热点

量子计算技术创新持续活跃，正逐渐成为前沿科技领域的研究热点，近年全球量子计算科研论文发表数量和专利数量如图1所示。



来源：中国信息通信研究院（截至2024年7月）

图1 全球量子计算科研论文和专利数量年度变化趋势⁴

³ https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202403/content_6939153.htm

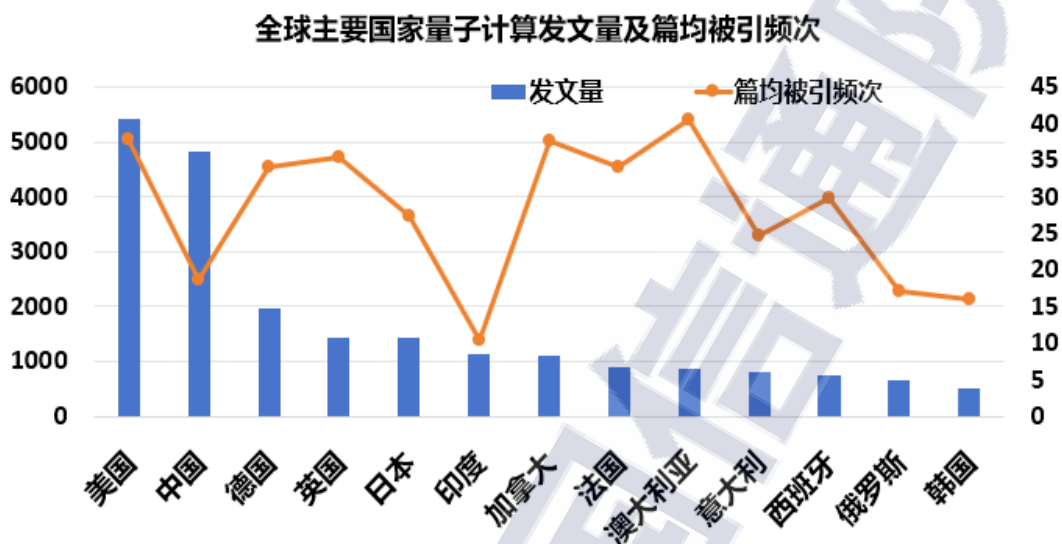
⁴ 2024年科研论文仅含7月底之前，2023-2024年专利统计有滞后效应。

全球量子计算**论文发表量**在约 10 年时间中增长了 4 倍左右，这种增速一定程度上反应了量子计算科研活跃度不断提高。从发文趋势上看，2013 年到 2017 年的论文年增长量相对较小，平均每年的增长量约为 70 篇。然而，从 2017 年开始，增长速度明显加快，尤其是从 2019 年到 2021 年，每年的增长量超过了 300 篇。根据过去的增长趋势，预计未来几年全球量子计算论文量仍将继续增长，相关研究不断增加。

2013 年至 2023 年期间，全球量子计算**发明专利申请量**共计 15437 件，全球授权总量 5417 件。从申请趋势看，2013 年起进入快速发展阶段，年度申请量呈现快速增长趋势，到 2021 年达到峰值 2866 件，2022 年申请量略微下降，2023 年度申请量受公开延迟的影响有所下降，预计仍然保持上升趋势。从授权趋势看，2013 年起呈现稳步增长状态，2023 年达到峰值 1384 件，2024 年度授权量受统计时间影响有所下降，全年授权量预计仍然保持上升趋势。

量子计算论文数量前十位国家的统计情况如图 2 所示，可反映各国量子计算科研产出和影响力。从发文量看，**美国和中国占据前两位**，分别为 5430 篇和 4813 篇，遥遥领先于其他国家，这反映了两国在量子计算科研方面的活跃度和领先地位。德国、英国和日本紧随其后，发文量分别为 1955 篇、1441 篇和 1421 篇，也显示出了强劲的研究活跃度。根据篇均被引频次（即平均每篇的被引频次）分布情况，澳大利亚以篇均被引 41 次居于首位，表明其相关研究有较高的认可度和影响力。美国和加拿大的篇均被引频次均为 38 次，德

国和英国同样展现了较高的影响力。虽然中国在论文数量上仅次于美国，但篇均被引频次相对较低，仅为 19 次，这表明我国高水平论文数量有待提升。

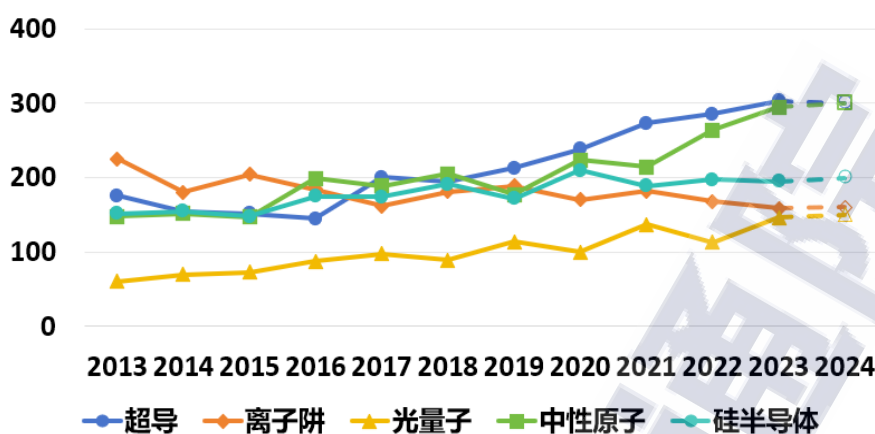


来源：中国信息通信研究院（截至 2024 年 7 月）

图 2 全球量子计算科研论文数量前十位国家情况

量子计算包括不同技术路线，超导量子计算、离子阱量子计算、中性原子量子计算、光量子计算、硅半导体量子计算等五个主流技术方向的科研论文数量统计如图 3 所示，可反映量子计算不同细分领域的受关注程度。可以看出，五条技术路线均受到广泛关注，发文量均呈现上升态势。其中，超导量子计算和中性原子量子计算的论文发表量增长尤为突出。

量子计算不同技术路线全球发文情况

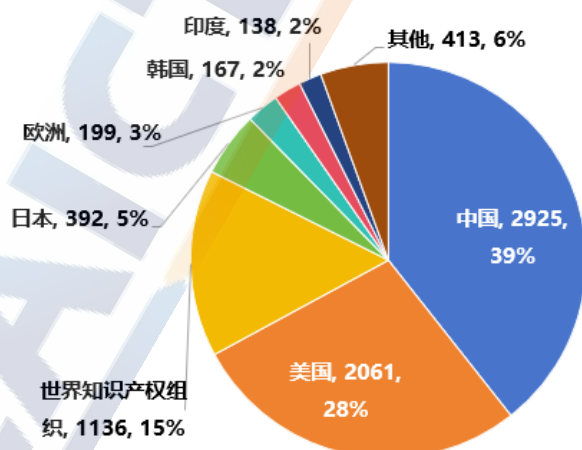


来源：中国信息通信研究院（截至 2024 年 7 月）

图 3 量子计算不同技术路线全球发文情况

量子计算专利申请的主要来源国家情况如图 4 所示，可反映主要国家/地区量子计算技术产出与贡献。量子计算专利的主要来源国家为中国和美国，分别占比 39%和 28%，此外，日本、欧洲、韩国等国家/地区也有约 5%、3%、2%占比的专利申请量。这反映了上述国家/地区在量子计算领域具有较高的技术创新能力和活跃程度，其中中国和美国的技术产出量和贡献度最为突出。

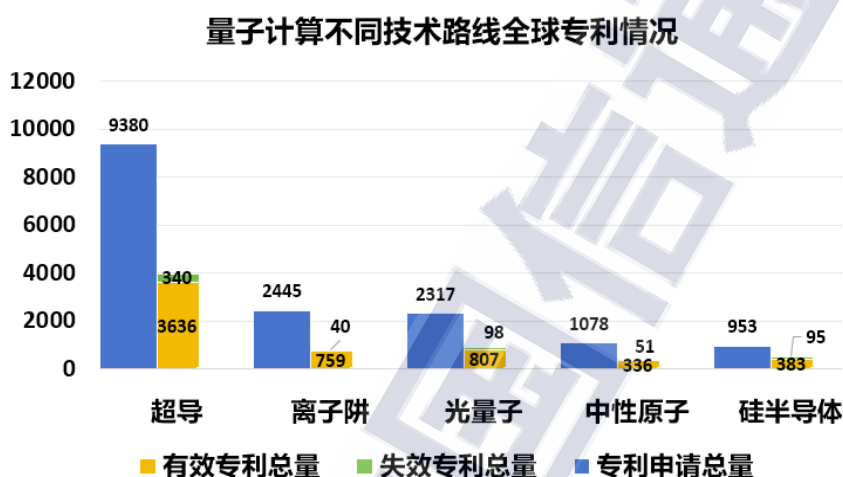
全球量子计算领域专利技术来源国统计



来源：中国信息通信研究院（截至 2024 年 7 月）

图 4 全球量子计算专利主要来源国家情况

量子计算不同技术路线的全球专利数量对比情况如图 5 所示。其中，超导量子计算路线专利的全球申请量为 9380 件，全球授权量为 3976 件。从专利申请总量和授权总量两方面均可看出，超导路线在五条技术路线中表现最为突出，这表明超导量子计算路线长期被业界寄予厚望。



来源：中国信息通信研究院（截至 2024 年 7 月）

图 5 量子计算不同技术路线全球专利情况

（三）企业数量增速回落明显，投融资市场有望回暖

依托量子计算等前沿技术构建新质生产力，需要加速其从实验室走向工程应用和产业化的进程。企业是高效推动科技成果转化的重要推动者和执行者，也是科技创新链条中不可或缺的关键环节，对推动科技成果向市场转化、促进经济增长和社会进步发挥着重要作用。量子计算企业数量、分布和投融资情况的统计分析，是观察量子计算技术产业发展态势的重要视角之一。

全球量子计算企业数量及年度增长趋势如图 6 所示。截至 2024 年 7 月，全球量子计算企业共计 329 家，包括科技企业、初创企业、

供应链企业和行业应用企业等，其中初创企业为 234 家（2013-2023 年成立且当前处于运营中的企业）。从增长趋势看，2016 年之前，量子计算企业数量增长缓慢，2016 年开始迅速增长，2018 年达到峰值，新增企业 42 家。2018-2021 年间增长稍有回落但仍保持每年新增 30 余家的高位，2022 年起企业增长数量有所回落，新增 26 家，2023 年新增企业数量仅为 9 家，2024 年 1 月至 7 月则仅新增 1 家。从不同国家看，美国共有 93 家，其中初创企业 62 家。中国共有 36 家，其中初创企业 24 家。综上所述，过去十余年间，量子计算企业数量已经历了一轮快速增长期，近两年增速出现明显回落。

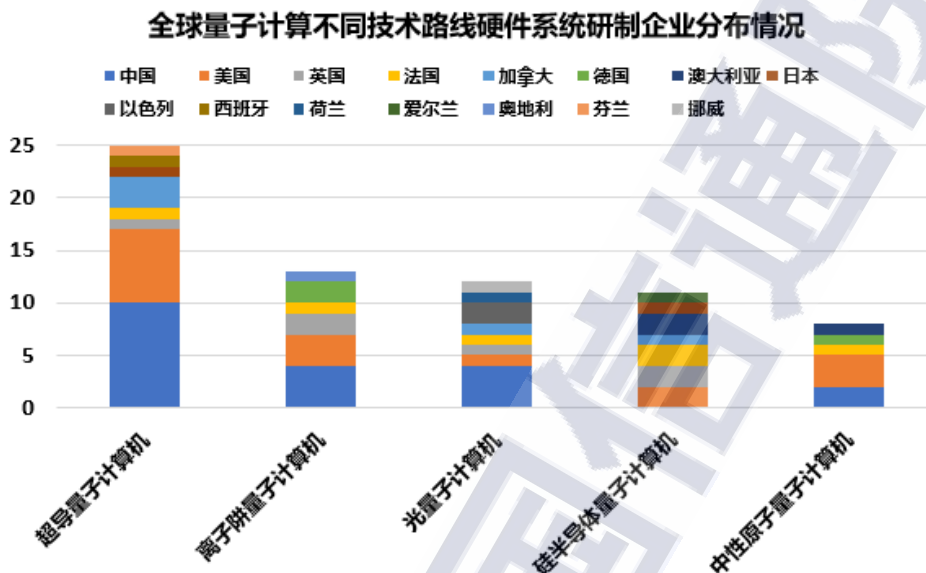


来源：中国信息通信研究院（截至 2024 年 7 月）

图 6 全球量子计算企业数量年度变化趋势

全球量子计算不同技术路线硬件系统研制企业分布情况如图 7 所示。从全球整体情况看，共有 60 余家量子计算机硬件系统研制企业，其中专注于超导路线的企业数量最多，共 25 家，占 36%，超过三分之一。离子阱、光量子 and 硅半导体路线分别为 13、12、11 家，数量相近。中性原子量子计算相对少，仅有 8 家约占 11%。从国家

分布上看，中国企业数量最多，共 20 家，占全球的 29%；其次是美国，共 17 家，占 24%；英国、法国、加拿大企业数量相近。大部分国家均是多条路线并重，同步布局不同技术方向的研究探索。

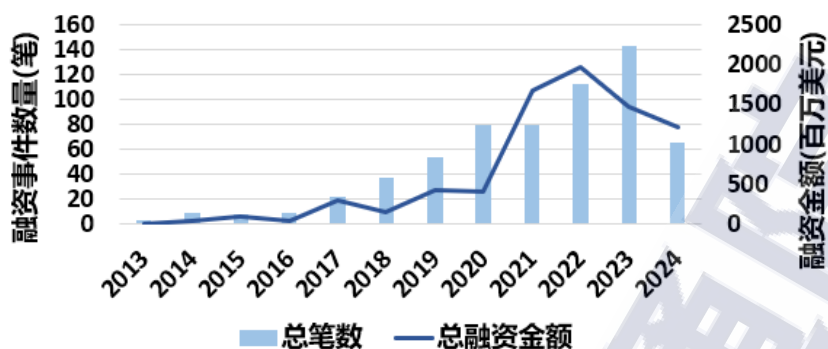


来源：中国信息通信研究院（截至 2024 年 7 月）

图 7 全球量子计算不同技术路线硬件系统研制企业分布情况

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，企业投融资事件数量及金额开始出现明显增长，2022 年和 2023 年全年投融资笔数均超 100 笔。2022 年融资金额近 20 亿美元，2023 年稍有回落，约 14 亿美元，但 2024 年上半年出现回暖迹象，仅上半年融资金额近 12 亿美元。近两年量子计算产业投融资整体趋势略微放缓，但已出现回暖迹象，这表明资本市场虽然开始趋于谨慎，但投资者对量子计算的潜在价值和未来前景依旧保持乐观，初步判断未来量子计算投融资市场仍将保持一定热度。

全球量子计算产业投融资趋势

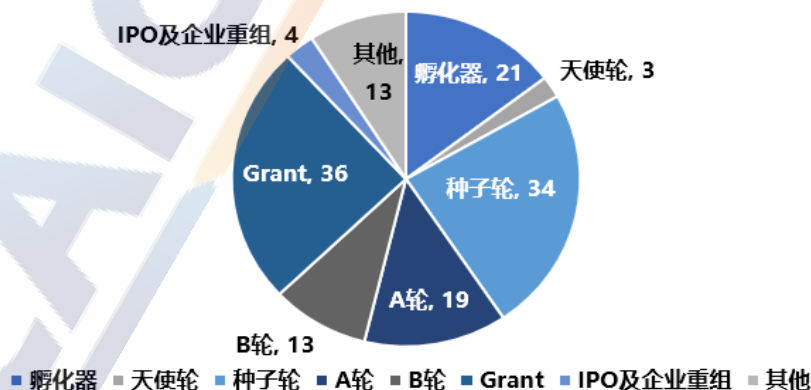


来源：中国信息通信研究院（截至2024年7月）

图8 全球量子计算企业投融资事件与金额变化趋势

2023年的143笔已披露的投融资事件中，依旧以风险投资为主，共91笔，共涉及融资金额近13亿美元，占比超60%，如图9所示。其中种子轮共有34笔，约1.2亿美元。A轮和B轮分别是19笔和13笔，金额约为8.7亿美元和3.4亿美元，投资方中全球各大电信运营商的投资力度也在不断加大。其他投融资事件里Grant（资助激励）类型笔数最多，共有36笔，超7400万美元，投资方以政府机构、军方为主，例如美国DARPA、NSF、DOE，英国Innovate UK等。整体来看，量子计算投融资市场比较活跃，但仍处于早期投资阶段。

2023年投融资笔数类型分布



来源：中国信息通信研究院

图9 2023年量子计算产业投融资笔数类型分布

二、量子计算技术研究有序推进，依旧面临多重挑战

（一）多技术路线竞相争鸣，短期难以形成方案聚焦

量子计算目前呈现多种硬件技术路线并行发展的态势。目前不同技术路线可以归纳为两类，一类是以超导路线、硅半导体路线为代表的人造粒子路线，另一类是以离子阱路线、中性原子路线、光量子路线为代表的天然粒子路线。前者在扩展性等方面占据优势，但在逻辑门保真度、量子比特控制等指标提升方面对加工工艺条件的依赖性较高。后者具有比特全同性和高逻辑门精度等优势，但实现更大规模的系统将会面临困难。近年来，多条技术路线量子比特规模、质量、退相干时间等关键指标持续优化，技术水平稳步提升，依旧保持多元化和竞争性的发展格局，路线收敛呈现出较大不确定性，短期内难以形成方案聚焦。

超导技术路线基于超导约瑟夫森结构造二能级系统，具有扩展性好、易操控和集成电路工艺兼容等优势，是关注度最高、发展较为迅速的技术路线之一。近年来，超导量子计算原型机研制不断取得新成果，2023 年年底，IBM 推出 1121 量子比特超导量子处理器 Condor 以及 133 量子比特超导量子处理器 Heron⁵。2024 年，中科院研发 504 比特超导量子计算芯片“骁鸿”⁶。北京量子院联合团队实现五块百比特规模量子芯片和经典计算资源融合，总量子比特数达到

⁵ <https://www.ibm.com/quantum/summit-2023>

⁶ https://www.cas.cn/cm/202404/t20240428_5012902.shtml

590⁷。本源量子上线 72 位超导量子比特芯片“悟空芯”⁸。基于超导路线的科研成果层出不穷，深圳量子院联合团队基于分布式超导量子处理器，验证了使用分布式量子处理器模拟拓扑相位的可行性⁹。Terra Quantum 宣布基于扭曲铜酸盐范德华异质结构实现 Flowermon 型超导量子比特¹⁰。清华大学联合团队在超导量子处理器上模拟斐波那契任意子编织，实验结果所得的斐波那契任意子量子维度十分接近理论的黄金分割率 1.618¹¹。总体而言，超导量子计算路线在比特规模、质量等技术指标突破较为迅猛，**仍然是最受瞩目的量子计算技术路线之一。**

离子阱技术路线以囚禁在射频电场中离子的超精细或塞曼能级作为量子比特载体，通过激光或微波进行相干操控，离子阱量子比特的全连接性使其在操控精度、相干时间等方面具有优势。近年来囚禁离子数量、逻辑门操控保真度等关键指标持续提升，工程技术研究不断深入。2023 年底，清华大学联合团队利用离子阱系统展示了多种量子误差缓解技术对复杂量子线路进行误差消除的能力¹²。2024 年，Quantinuum 离子阱原型机 Model H1 中单/双量子比特逻辑门保真度分别达到 99.9979%和 99.914%，量子体积达到 1048576¹³，并推出了 56 位量子比特离子阱原型机 Model H2-1，单/双量子比特逻辑

⁷ <http://www.baqis.ac.cn/news/detail/?cid=2026>

⁸ https://mp.weixin.qq.com/s/g2Jt_jwa1oa1LvJpZHE1dw

⁹ <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.132.020601>

¹⁰ <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.132.017003>

¹¹ <https://www.nature.com/articles/s41567-024-02529-6>

¹² <https://www.nature.com/articles/s41534-023-00784-8>

¹³ <https://www.quantinuum.com/news/quantinuum-extends-its-significant-lead-in-quantum-computing-achieving-historic-milestones-for-hardware-fidelity-and-quantum-volume>

辑门保真度分别达到 99.997%和 99.87%¹⁴。清华大学实现 512 离子二维阵列的稳定囚禁冷却以及 300 离子量子比特的量子模拟计算¹⁵。Oxford Ionics 将离子阱技术与硅芯片技术相结合，推出具有更优扩展性和更低噪声特性的新型电子量子比特控制技术¹⁶。离子阱量子计算路线面临量子比特大规模扩展、高集成度测控以及模块化互联等瓶颈挑战，未来在路线竞争中能否脱颖而出仍待进一步追踪。

中性原子技术路线使用光镊或光晶格进行原子的囚禁，激光激发原子里德堡态进行逻辑门操作或量子模拟演化，在相干时间、操控精度以及可扩展性方面占据一定优势。近年来在比特规模扩展和基于中性原子路线的科研成果颇多。2024 年，德国达姆施塔特工业大学发布 1305 个单原子量子比特阵列操控实验成果¹⁷。Infleqtion 发布原子量子计算路线图，计划 2024 年推出 1600 个量子比特原型机¹⁸。英国国家量子计算中心与美国 QuEra、Infleqtion 等公司签订商业合同，部署中性原子量子计算原型机并建设测试平台¹⁹。Pasqal 宣布在 2080 个陷阱位中成功捕获约 1110 个原子²⁰。近期中性原子路线研究与实验等方面表现颇为亮眼，未来有望在量子模拟应用等方面产生突破，在多技术路线竞争中迅速崛起。

光子量子技术路线利用光子的多个自由度进行编码，优点在于相

¹⁴ <https://www.quantinuum.com/news/quantinuum-launches-industry-first-trapped-ion-56-qubit-quantum-computer-that-challenges-the-worlds-best-supercomputers>

¹⁵ <https://www.nature.com/articles/s41586-024-07459-0>

¹⁶ <https://www.oxionics.com/news/oxford-ionics-breaks-global-quantum-performance-records>

¹⁷ <https://doi.org/10.1364/OPTICA.513551>

¹⁸ <https://www.infleqtion.com/news/infleqtion-unveils-5-year-quantum-computing-roadmap-advancing-plans-to-commercialize-quantum-at-scale>

¹⁹ <https://www.hpcwire.com/off-the-wire/quera-to-build-quantum-computing-testbed-in-the-uk/>

²⁰ <https://www.pasqal.com/news/pasqal-exceeds-1000-atoms-in-quantum-processor/>

干时间长、室温运行以及测控相对简单，可分为**逻辑门型光量子计算**和**专用光量子计算**两类。2024 年，玻色量子发布 550 量子比特相干光量子相干伊辛机“天工量子大脑 550W”²¹。荷兰 QuiX Quantum 在光量子芯片上演示了 GHZ 态的生成²²，验证了基于集成光子技术有望开发出大规模可扩展的光量子计算机。未来，逻辑门型光量子计算样机研发需要在加强光子间相互作用、构建双比特逻辑门以及大规模集成光子技术等方面集中攻关，专用光量子计算则有望在求解组合优化等专用实用化问题中展示优势。

硅半导体技术路线使用量子点中囚禁的单电子或空穴作为量子比特，通过电脉冲实现量子比特操控和耦合，优势体现在与成熟 CMOS 工艺技术兼容等方面。2024 年，Intel 利用 CMOS 制造技术研发硅半导体量子计算芯片新型制造与测试工艺，基于该技术制造的自旋量子芯片中量子比特的栅极保真度达到 99.9%²³。日本理化研究所基于硅量子点中两个电子自旋之间发生的自旋封锁现象，实现了量子比特的高速高精度读出²⁴。硅半导体路线受限于同位素材料加工以及栅极串扰等因素影响，规模扩展性和操控精度等指标的突破仍面临诸多挑战，**在多元路线竞争中优势尚不明确。**

量子计算多种技术路线基础科研和工程化成果不断涌现，评估路线演进趋势和分析比较关键性能指标，有助于直观分析不同技术

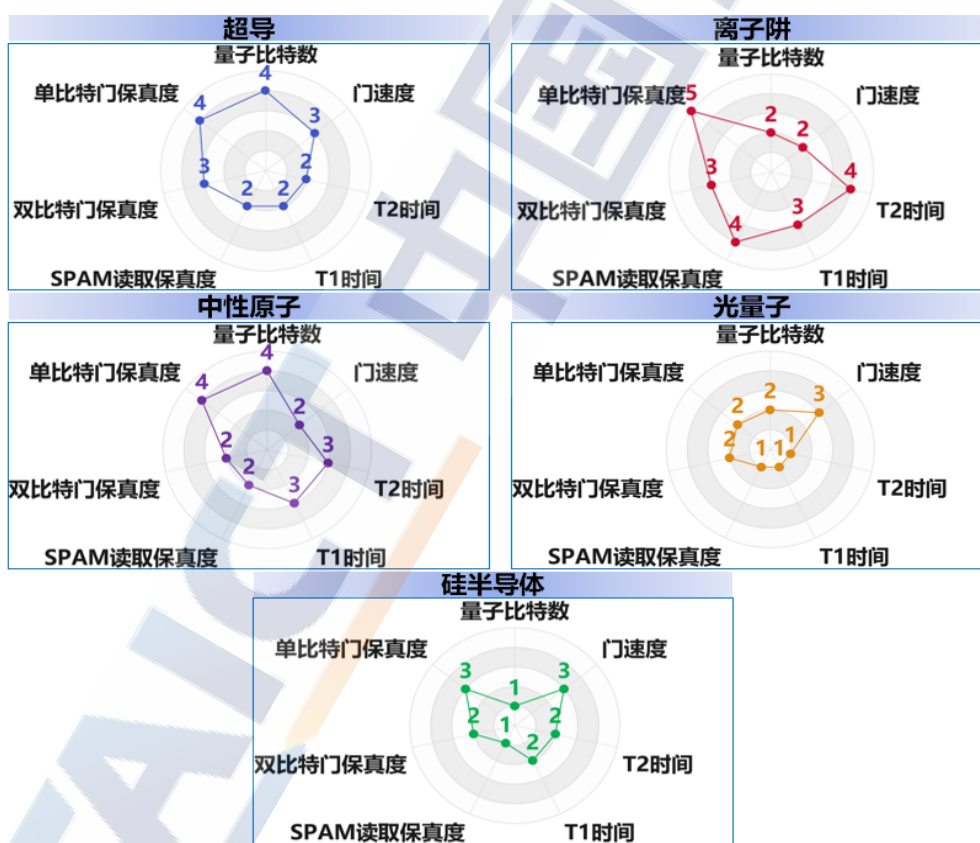
²¹ <https://www.qboson.com/newsDetail?id=233>

²² <https://www.quixquantum.com/news/quix-quantum-technology-unlocks-key-to-scaling-photonic-quantum-computing>

²³ <https://www.nature.com/articles/s41586-024-07275-6>

²⁴ https://q-portal.riken.jp/topic_detail?topic_id=T20240084&lang=ja

路线优劣势。图 10 展示了五种主流技术路线关键指标的对比情况，可以看出，由于量子计算目前处于早期发展阶段，各技术路线的关键指标发展水平不可避免地呈现参差不齐的状态。超导路线的比特数量、逻辑门保真度等指标提升迅速，其他指标发展也保持相对平衡；离子阱路线在逻辑门保真度和相干时间指标上表现突出，但比特数量扩展等方面依旧面临瓶颈挑战；中性原子路线在比特数量、门保真度和相干时间等指标上持续取得进展；光量子路线完成量子优越性验证，但与硅半导体路线类似，目前在比特数量、逻辑门保真度和相干时间等指标方面尚未显露明显优势。



来源：中国信息通信研究院

图 10 量子计算主要硬件技术路线关键指标对比概况²⁵

²⁵ 各技术路线指标统计是不同团队和系统报道的最优值，并非在同一系统中同时实现各项最优指标。

总的来说，多条硬件路线的技术突破难度和发展应用前景存在差异，各有优劣势，目前仍处于并行发展阶段，何种体系最优尚无明确定论。当前量子计算原型机的性能水平距离实现大规模可容错通用量子计算依旧存在较大差距，技术攻关的核心要素是高精度扩展量子计算原型机比特规模，这意味着量子比特的设计、制造和调控等方面均面临巨大挑战，未来仍需学术界和工程界协同努力攻关。

（二）量子纠错研究不断深入，实用化差距依旧明显

量子纠错用于保护量子比特免受噪声等干扰，是使量子计算机能够真正发挥其巨大潜力的重要环节之一。量子纠错方案的基本思路是使用冗余的量子比特来检测和纠正量子比特中的错误，从而恢复出原始的量子态。这些冗余的量子比特也即量子纠错码，其作用在于即使在环境噪声和干扰很强的情况下，仍能够保证量子计算的正确性。

相较于经典纠错码，量子纠错码的构建更为复杂，这是由量子系统本身特性导致的，例如量子态的不可克隆性会限制非正交未知量子态的精确复制，因此量子纠错码无法利用简单的复制操作来增加冗余。自从量子纠错概念被提出，目前已出现了多种采用不同原理实现的量子纠错编码方案，其中表面码作为一种二能级编码方式，具有扩展性好、仅需近邻物理比特相互作用、容错阈值高以及多路线适用等优点，因此受到业界广泛关注。

随着量子计算硬件水平的不断提升，量子纠错研究具备了更好的物理基础，研究持续深入并取得诸多新进展。2024年，

Alice&Bob 公司联合团队提出基于玻色子猫态量子比特和量子低密度奇偶校验码的纠错编码方案，基于 1500 个物理量子比特编码实现 100 个高可靠性的逻辑量子比特（错误率 $<10^{-8}$ ）²⁶。清华大学联合团队提出基于玻色编码的纠错方案，并将其应用到多个逻辑量子比特从而实现纠缠保护，使纠缠逻辑量子比特的相干时间提高了 45%，并首次在实验上利用逻辑量子比特证明贝尔不等式²⁷。IBM 提出基于量子低密度奇偶校验码的纠错方案，方案实现了 0.7%误差阈值，当假设物理错误率为 0.1%时，使用 288 个物理量子比特可保护 12 个逻辑量子比特²⁸。Quantinuum 联合团队利用 30 个物理量子比特构建 4 个逻辑量子比特，逻辑量子比特纠缠时的错误率降至 10^{-5} ，相较于纠缠物理量子比特 8×10^{-3} 的错误率降低了近 800 倍²⁹。

随着近年来量子计算硬件性能和纠错相关控制技术的迅速发展，量子纠错科研与实验验证持续深入并取得较多进展，但当前逻辑量子比特的最低错误率距离量子计算实用化要求依旧存在很大差距，未来需要在以下多个方面开展攻关：研究基于高维度量子资源带来的冗余实现量子纠错，探索分布式量子纠错架构，实现从原理上免疫特定噪声的量子系统操控，搭建切合实用化需求的量子纠错方案评价体系，探究容错量子逻辑门的相关操作等等。综上所述，实用化量子纠错已经成为业界的重点研究和攻关方向之一，基于量子纠错构建逻辑量子比特将是下一个重要里程碑，为实现这一目标，未

²⁶ <https://arxiv.org/abs/2401.09541>

²⁷ <https://www.nature.com/articles/s41567-024-02446-8>

²⁸ <https://www.nature.com/articles/s41586-024-07107-7>

²⁹ <https://arxiv.org/abs/2404.02280>

来仍需开展持续研究攻关。

（三）量子计算软件持续多元发展，成熟度有待提升

量子计算软件为开发者提供使用量子计算硬件和运行量子算法的必要工具，正处于快速发展阶段。量子计算软件作为一种结构化的工具集合，需依据量子计算原理进行开发设计，为不同技术路线提供应用开发能力、编译能力、硬件测控能力和 EDA 设计开发能力等，业界在多个方向展开布局，体系架构已逐渐形成，如图 11 所示。其中应用软件匹配不同行业诉求并进行需求映射，编译软件是实现软件开发功能的基础，测控软件为量子计算机正常高效运行提供支撑保障，EDA 软件则是提升量子计算硬件研发与制造工程化水平的关键，不同量子计算软件的功能各具特色，在用户使用过程中各司其职。



来源：中国信息通信研究院

图 11 量子计算软件体系架构图

应用软件提供创建和操作量子程序的工具集，包括算法库、开发组件和调试优化工具等，支持开发者设计和实现各类复杂的量子程序并获得执行结果。2024 年，Quantinuum 发布量子自然语言处理软件“lambeq”0.4.0 版本，改进可用性的同时提升字符串图处理速度³⁰。HQS 向莱布尼茨超级计算中心交付量子模拟仿真软件“HQS Noise App”，可用于模拟运行量子力学系统³¹。微软 Azure Quantum Elements 软件推出生成化学和密度泛函理论加速两项新功能，助力用户开展化学和材料科学研究³²。未来应用开发软件需要扩展应用场景研究，丰富计算问题类型，提升算法运行效率，提高跨硬件后端的支撑能力。

编译软件规范量子编程边界并实现量子程序的正确编译和执行，同时提供成套的语法规则用以协调和约束编译操作。2023 年底，英伟达发布量子电路模拟软件 cuQuantum 23.10 版本，更新 API 功能并提供英伟达 Grace Hopper 系统的支持³³。2024 年，IBM 推出更新版 Qiskit 软件，提升了量子硬件电路优化速度和存储资源占用量等性能³⁴。Intel 发布量子软件开发工具包 1.1 版本³⁵。Quantum Circuits 推出集成式量子软件用于在算法运行中实时管理量子比特错误检测³⁶。编译软件未来需要在持续更新迭代的基础上，提升软硬件协同编译

³⁰ <https://www.quantinuum.com/qai/lambeq>

³¹ <https://quantumsimulations.de/news/exploring-open-quantum-systems-and-noise-characteristics-in-collaboration-with-the-lrz-hqs-quantum-simulations-presents-the-hqs-noise-app-at-a-workshop>

³² <https://quantum.microsoft.com/en-us/quantum-elements/product-overview>

³³ <https://developer.nvidia.com/blog/accelerate-quantum-circuit-simulation-with-nvidia-cuquantum-23-10/>

³⁴ <https://newsroom.ibm.com/2024-05-15-IBM-Expands-Qiskit,-Worlds-Most-Performant-Quantum-Software>

³⁵ <https://www.intel.cn/content/www/cn/zh/content-details/816508/intel-quantum-sdk.html>

³⁶ <https://quantumcircuits.com/quantum-circuits-accelerates/>

能力，完善调度、优化和调试等核心功能。

测控软件主要用于量子计算硬件的控制、处理和运算，支持测量结果反馈以及芯片校准等功能。2024年，是德科技将 Q-CTRL 的 Boulder Opal 硬件优化和自动化功能集成到其量子控制系统中，以提供更优的量子处理器表征和优化功能³⁷。QuantroIOx 发布量子比特自动化控制软件平台 Quantum Edge，支持量子芯片监控、工作流程自动化和数据可视化³⁸。测控软件面临的挑战主要体现在量子纠错支持能力、物理比特和逻辑比特映射能力、自动化和流程化等方面。

EDA 软件可提供量子计算芯片的芯片设计、优化布局、仿真验证、制造测试等功能。2024年，是德科技推出面向超导量子处理器设计的 EDA 仿真工具 QuantumPro，可实现电路原理图设计、布局构建、电磁分析、非线性电路仿真和量子参数提取等功能³⁹。EDA 软件未来需要在功能完整性、仿真效率与准确性、优化效果等方面持续完善，从而实现提升量子芯片设计效率和质量的目标。

由于当前量子计算机硬件技术路线尚未最终确定、通用体系架构并未完全统一等原因，目前量子计算软件处于开发设计与生态构建的初期阶段，呈现多元化和差异化的发展态势，不同类型软件功能各异，但在技术成熟度、稳定性和用户体验等方面均远不及经典软件完善。随着硬件能力的提升和算法的改进，未来量子计算软件

³⁷ <https://www.businesswire.com/news/home/20240313371338/en/Keysight-and-Q-CTRL-Team-Up-to-Accelerate-Infrastructure-Quantum-Software>

³⁸ <https://quantrolox.com/quantum-edge/>

³⁹ <https://www.keysight.com.cn/cn/zh/about/newsroom/news-releases/2024/0227-pr24-036-keysight-introduces-quantumpro-delivering-first-i.html>

需在量子编程语言、算法库、量子中间表示、硬件接口和优化等关键环节持续推进，为后续实现更高效可靠的量子计算应用奠定基础。

（四）支撑保障系统愈加重要，指标亟待进一步提高

量子态信息易受到复杂环境噪声干扰和量子系统内部非理想特性等因素的影响而被破坏，因此量子计算机的运行需要极其苛刻的环境支撑系统，以及高精度的测控系统进行环境保障和测控支持。量子计算支撑保障系统是技术研究和样机工程研发的重要组成部分和核心控制要素，主要包括环境设备、测控系统、关键设备组件等部分，不同部分面临瓶颈挑战存在差异。

环境设备是保障量子计算机稳定运行的必要支撑部分和基础设施，主要包括超大功率稀释制冷机、GM 脉管制冷机、超高真空腔及泵组等。2024年，Bluefors 推出超紧凑版 LD 稀释制冷系统⁴⁰。近年来我国在稀释制冷机等设备方面也取得颇多成果，国盾量子 ez-Qfridge 稀释制冷机完成交付测试⁴¹，本源量子推出自研的本源 SL1000 稀释制冷机⁴²。运行不同技术路线的量子计算机所需的环境设备有所区别，未来仍需在技术水平、核心指标、设备工程化、小型化、集成化等方面突破技术瓶颈，以支持量子计算机比特数量的大规模扩展。

精确的量子控制技术和高效的读出技术，对于实现可靠的单量

⁴⁰ <https://bluefors.com/products/dilution-refrigerator-measurement-systems/ld-dilution-refrigerator-measurement-system/>

⁴¹ <http://www.quantum-info.com/News/qy/2024/2024/0320/783.html>

⁴² https://originqc.com.cn/zh/new_detail.html?newId=410

子比特操作、多量子比特逻辑门操作、量子态高保真度读出等量子操作至关重要。量子计算测控系统大致可分为低温电子学测控系统和光学测控系统两类，前者通过低温微波技术对超导、硅半导体等路线的量子比特进行操控，后者则利用光学信号囚禁或激发天然粒子来实现离子阱、中性原子、光量子等路线的量子比特操控。2024年，Intel推出mk级低温量子控制芯片“Pando Tree”⁴³。苏黎世仪器推出SHFSG+、SHFQC+和SHFQA+等三款产品用于实现高保真度的量子比特控制和读出⁴⁴。Oxford Ionics基于新型嵌入式策略，推出了新型电子量子比特控制技术⁴⁵。量子计算测控系统需要在提升测控精度和效率的基础上，持续增强稳定性、集成度、灵活性和可扩展性，才有望在未来量子计算实际应用中实现对量子比特的精确操控。

量子计算机的研发离不开与之相关的**关键设备组件**的研制与攻关。按照设备组件的应用领域大致可以分为两类，分别是量子计算研制不可或缺的特性化设备组件，以及量子计算与光电子、半导体等领域通用型设备组件。特性化设备组件主要包括高性能示波器、低温电子学器件、多通道声光调制器和特种线缆等，通用型设备组件主要包括分子束外延设备、电子束曝光设备、高品质光学镜片、CMOS/CCD相机等。2024年，QuantWare推出其下一代超低噪声量子放大器“Crescendo S J-TWPA”⁴⁶。Quantum Machines将其产品

⁴³ <https://community.intel.com/t5/Blogs/Tech-Innovation/Data-Center/Intel-s-Millikelvin-Quantum-Research-Cont-rol-Chip-Provides/post/1608558?wapkw=Pando%20Tree>

⁴⁴ <https://www.zhinst.cn/china/cn/quantum-computing-systems/qccs>

⁴⁵ <https://www.oxionics.com/news/oxford-ionics-breaks-global-quantum-performance-records>

⁴⁶ <https://www.quantware.com/product/crescendo>

Observe 与滨松公司高速 ORCA -Quest 相机进行集成，从而为冷原子和俘获离子量子比特提供超快速相机读出功能⁴⁷。中科院上海微系统所实现最大计数率 5GHz、光子数分辨率 61 的超高速、光子数可分辨光量子探测器⁴⁸。未来随着量子计算原型机比特规模的不断提升，关键设备组件的核心指标需进一步优化，与此同时还需强化设备组件的性能验证能力，以满足量子计算机工程化发展的更高需求。

量子计算所需的极端环境条件对仪器设备的精度、灵敏度、稳定性等指标提出了极为苛刻的要求，未来量子计算支撑保障系统发展仍面临瓶颈挑战。一方面由于量子计算处于发展早期阶段、技术路线尚未收敛等原因，导致支撑保障系统呈现分散化、碎片化的发展特点，这使得上游供应商难以集中有效地配置资源进而开展核心技术攻关，明确行业分工、打造量子计算支撑保障领域的“专精特新”企业可能是一条有效的发展路径。另一方面随着量子计算技术发展和原型机研制水平不断进步，未来对于支撑保障系统的性能指标提出了更苛刻的要求，这亟需业界不断攻关推动核心系统、设备、组件的关键性能指标提升。随着业界在量子计算支撑保障系统领域的持续投入和不断创新，相关技术产品的发展将为未来量子计算的大规模应用铺平道路。

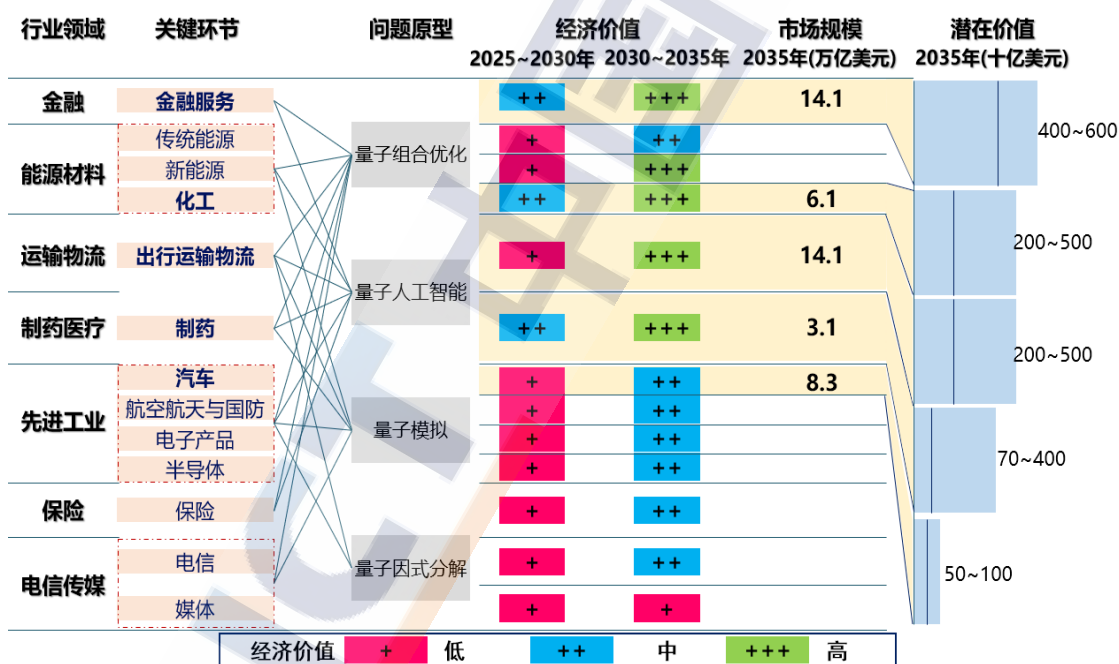
⁴⁷ https://www.quantum-machines.co/press_release/quantum-machines-and-hamamatsu-photonics-team-up-for-enhanced-quantum-computing-control/

⁴⁸ <https://opg.optica.org/prj/fulltext.cfm?uri=prj-12-6-1328&id=551302>

三、量子计算应用探索持续发力，实用落地有待突破

（一）多领域应用探索并进，实用落地仍需加速突破

目前量子计算处于从前沿研究向应用落地突破的关键阶段，广泛而活跃的多方应用探索是推动量子计算技术走向应用的关键。业界正在积极寻找匹配行业需求的特定应用场景，目标是在未来为不同行业应用领域提供服务。典型应用领域包括金融、化工、生物、交通、人工智能等。如图 12 所示，根据麦肯锡 2024 年发布的《量子技术监测》研究报告，量子计算预计在未来五到十年将加速发展，到 2035 年市场规模估值可能达到万亿美元级别。



来源：麦肯锡《2024年量子技术监测》研究报告

图 12 量子计算应用场景分析

金融领域存在大量量子计算潜在应用场景，包括金融风险管理、投资组合分析、模拟量化交易、金融市场预测等。2023 年底，Multiverse Computing 和穆迪公司联合推出 QFStudio 平台，为金融

领域应用探索提供量子计算解决方案⁴⁹。2024年，芝加哥量子交易所发布报告认为量子计算在金融领域有望实现缩短获取最优解时间、提升预测准确性等诸多作用⁵⁰。花旗银行与 Classiq 共同基于 Amazon Braket 平台研究用于投资组合优化的量子解决方案，基于预期回报和风险水平构建了性能更优的投资组合⁵¹。

化工领域量子计算应用可用于模拟化学分子结构、化学反应等，并以此为基础更高效、更低耗能地设计化学品。2024年，英国石油公司和 ORCA 使用混合量子-经典机器学习方法建模以产生分子构象，探索量子计算提升化学领域机器学习算法性能的潜力⁵²。微软与美国能源部太平洋西北国家实验室合作利用量子计算将新型电池材料筛选到少数几种，实验表明筛选时间可大幅减少⁵³。魁北克水电公司利用量子计算探索解决复杂能源问题的方案，用于预测能源需求并设计和运营可持续性的能源系统⁵⁴。

生物领域量子计算应用主要聚焦于早期疾病诊断、药物研发与筛选、药物测试、基因组数据研究、蛋白质结构预测等场景。2024年，勃林格殷格翰量子实验室发表论文探讨量子计算机在药物发现领域的应用现状，认为量子计算未来有望在药物设计领域产生实用化应用⁵⁵。IBM 和克利夫兰诊所合作利用量子-经典混合方法预测蛋

⁴⁹ <https://www.moodyanalytics.com/microsites/quantum>

⁵⁰ <https://orcacomputing.com/bp-and-orca-computing-team-up-to-quantum-powered-computational-chemistry/>

⁵¹ <https://aws.amazon.com/cn/blogs/quantum-computing/citi-and-classiq-advance-quantum-solutions-for-portfolio-optimization/>

⁵² <https://chicagoquantum.org/news/university-government-and-industry-researchers-join-forces-explore-how-quantum-computing-could>

⁵³ <https://techcrunch.com/2024/01/09/microsoft-puts-azure-quantum-elements-to-work/>

⁵⁴ <https://www.hpcwire.com/off-the-wire/pin2-collaborates-with-hydro-quebec-tapping-into-quantum-computing-for-sustainable-energy-solutions/>

⁵⁵ <https://www.nature.com/articles/s41567-024-02411-5>

白质结构并有效提升了预测精度⁵⁶。Novonosis 和 Kvantify 合作使用混合量子-经典计算方法演示碳酸酐酶的酶促反应计算，有望助力生物过程研究以及工业二氧化碳捕获⁵⁷。

交通领域量子计算应用可用于交通流量优化算法与实时预测、路径即时动态规划等场景。2024 年，IonQ 与德国基础科学研究中心将量子计算应用于航班登机口优化，在缩短旅客转机时间、飞机停靠时间的同时，提高了登机口服务效率⁵⁸。Pasqal 和泰雷兹公司基于中性原子量子处理器，展示了量子计算在解决卫星规划问题中的潜力⁵⁹。新加坡量子技术中心使用 8 个和 13 个量子比特解决 128 路和 3964 路的车辆路径问题，提高解决组合优化问题的效率⁶⁰。

人工智能领域与量子计算结合成为的量子人工智能技术，有望作为共性技术为金融、生物、交通、气象等众多行业领域提供服务。2024 年，Zapata 和 Insilico Medicine 等合作利用量子人工智能开发新型 KRAS 抑制剂分子，该分子比经典模型生成的分子具有更高的结合亲和力⁶¹。Terra Quantum 和韩国浦项集团探索量子人工智能在钢铁生产效率方面潜力，目标是优化还原剂用量并降低排放和成本⁶²。Deloitte 启动年度量子气候挑战赛，主题为应用量子机器学习研究预

⁵⁶ <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.jctc.4c00067>

⁵⁷ <https://www.kvantify.com/inspiration/worlds-first-calculation-of-enzymatic-reactions-on-a-quantum-computer>

⁵⁸ <https://investors.ionq.com/news/news-details/2024/IonQ-and-DESY-Research-Highlights-Quantums-Potential-Benefits-for-Airport-Flight-Gate-Optimization/default.aspx>

⁵⁹ <https://www.pasqal.com/news/pasqal-and-thales-tackles-satellite-planning-challenges/>

⁶⁰ <https://www.quantumlah.org/about/highlight/2024-06-vehicle-routing-efficient-qubits>

⁶¹ <https://zapata.ai/news/for-the-first-time-quantum-enhanced-generative-ai-generates-viable-cancer-drug-candidates/>

⁶² <https://terraquantum.swiss/news/terra-quantum-grows-presence-in-asian-markets-with-a-landmark-collaboration-with-posco-holdings-to-improve-steel-production-efficiency-using-quantum-ai>

测河流洪水灾害的新方法⁶³。Rigetti和穆迪公司等利用量子机器学习提出解决经济衰退预测问题的方案⁶⁴。

总体而言，业界面向具有加速潜力的量子计算应用场景开展探索和尝试十分重要，但现阶段量子计算尚未实现大规模可容错通用量子计算，已有应用案例距离实现指数级加速或提供量子计算优越性依旧存在很大距离，实用化应用落地亟需进一步加速突破。未来量子计算一旦在实用价值计算问题上实现明显加速优势，将极大推动技术产业发展。以此为目标，业界需要在提升量子计算机硬件性能的基础上，促进感兴趣的行业企业开放应用场景，挖掘适合使用量子计算的潜在应用案例，加速推动面向实际业务场景的量子计算研发和应用，从而提高量子计算科研成果向实用化、工程化转化的速度和效率。

（二）量子计算云平台提供者渐多，功能普遍待强化

现阶段，量子计算机具有软硬件使用门槛高、硬件环境要求严苛以及运维成本高昂等特点，这使得企业和个人用户难以在本地进行部署。以此为背景，量子计算云平台应运而生，融合了量子计算与经典云服务，通过网络为用户提供量子计算机的远程访问功能。量子计算云平台凭借其灵活的服务模式、便利的接入方式以及丰富的应用场景，正逐渐成为量子计算重要发展方向之一，未来有望成为提供量子计算服务的主要应用形式。全球已涌现出数十个量子计

⁶³ <https://www2.deloitte.com/de/de/pages/innovation/contents/deloitte-quantum-climate-challenge.html>

⁶⁴ <https://medium.com/rigetti/quantum-enhanced-machine-learning-with-moodys-analytics-543d37df0549>

算云平台，典型云平台如图 13 所示，发展呈现蓬勃态势。

国内外典型量子计算云平台概况										
硬件类型	超导			离子阱	光量子	半导体/超导	量子退火	云平台服务		
平台提供者	IBM	rigetti	Google	IONQ	XANADU	QuTech	D:WAVE	aws		STRANGEWORKS
平台名称	IBM Quantum	Quantum Cloud Services	Google Cloud	IonQ Quantum Cloud	Xanadu Quantum Cloud	Quantum Inspire	Leap	Amazon Braket	Azure Quantum	strangeworks QC
最新处理器	sprey	Ankaa-1	Sycamore	Forte	Borealis	Spin-2 Starmon-5	Advantage	D-Wave, IonQ, QCC, Rigetti, QuEra, Xanadu	IonQ, QCI, Rigetti, Quantinuum, Pasqal	IBM, Xanadu, Quantinuum, Rigetti,
量子比特数	433	84	72	32	216	2; 5	5000+	QPU family	QPU family	QPU family
硬件类型	超导				离子阱	中性原子	光量子	模拟器	云平台服务	
平台提供者	中科大 & 国盾量子	北京量子院 & 物理所	本源量子	中国电信	启科	武汉量子院	图灵	华为	中国移动	弧光量子
平台名称	量子计算云平台	quafu	本源量子云	天衍量子计算云平台	<QuCloud>	酷原量子云	Soft Qubit	HiQ	"五岳"量子计算云平台	弧光量子云平台
量子处理器	晓鸿176	Yunmeng, Baiwang, Baihua, Miaofeng等	本源悟空	超导176比特量子芯片	QudoorQPU 100	—	—	—	蓝色-天工量子大脑 量子科技长三角创新中心-天工1号 中国科学院物理研究所-夸父1号/2号 华翎量子-离子阱量子计算机(待上线) 启科量子-离子阱量子计算机(待上线)	超导66比特量子芯片 离子阱11比特量子芯片
量子比特数	176 (66计算比特)	156;136;113;108等, 并形成500余比特量子算力集群	72	176 (66计算比特)	20	—	—	—	100专用光量子比特 20超导量子比特 21/106超导量子比特	66; 11

来源：中国信息通信研究院（截至 2024 年 7 月）

图 13 国内外典型量子计算云平台概况

当前量子计算云平台所能提供的量子计算处理器，已有超导、离子阱、中性原子、光量子、硅半导体等技术路线。量子计算云平台后端硬件的接入模式主要可分为三类。第一类是自研设备接入模式，云平台提供者具备量子计算硬件自主研发能力，在云平台上提供自研的量子计算机或基于经典算力的量子模拟器，代表性企业或机构包括 IBM、IonQ、Xanadu、Rigetti、本源量子、国盾量子、北京量子院等。第二类是云服务接入模式，云平台提供者凭借其云服务能力，在云平台上接入其他供应商的软硬件，代表性企业或机构包括微软、亚马逊、Strangeworks、弧光量子、中国移动、中国电信等。第三类是融合型接入模式，是上述两类接入模式的综合，即在接入自研硬件的同时也支持调用其他供应商硬件资源，以 IBM 量子

计算云平台为例，该平台可接入自研量子处理器以及 Rigetti、Xanadu、AQT、IonQ 等供应商的硬件资源。

国际方面，IBM、谷歌、微软等科技巨头以及 IonQ、Xanadu、Rigetti 等初创企业纷纷布局量子计算云平台，通过提供量子计算处理器、模拟器以及开发工具等服务，吸引了大量开发者、研究者和企业用户。2023 年年底，IBM 将 Q-CTRL 公司的错误抑制技术软件 Q-CTRL Embedded 集成至其云平台上⁶⁵，测试表明错误抑制后可运行的量子算法复杂性增加了 10 倍、成功率提高了 1000 倍左右⁶⁶。IonQ 在 Amazon Braket 平台上提供 Forte 量子计算机⁶⁷。亚马逊在 Amazon Braket 云平台推出“Braket Direct”计划，用户可在设定时间段内保留特定量子处理器的算力且不需要排队等待。2024 年，AQT 与德国电信合作为用户提供其量子计算机的云端访问能力⁶⁸。

国内方面，本源量子、国盾量子、弧光量子等量子计算企业以及中国移动、中国电信等运营商也相继推出量子计算云平台，这不仅表明量子计算企业对于云平台发展十分重视，也反映出电信运营商认可量子计算在提升网络性能、加强安全通信等方面的潜在价值，致力于共同推动量子计算应用和产业化进程。2023 年底，中国移动云能力中心和玻色量子共同推出“五岳量子计算云平台——恒山光量子算力平台”。中国移动“五岳”量子计算云平台布局多制式量子算力并网、多模式量子算法程序设计和多元化量子场景算法等技术方向，

⁶⁵ <https://q-ctrl.com/blog/q-ctrl-integrates-its-error-suppression-technology-into-ibm-quantum-services>

⁶⁶ <https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.20.024034>

⁶⁷ <https://www.hpcwire.com/off-the-wire/ionq-forte-now-available-through-the-amazon-braket-direct-program/>

⁶⁸ <https://www.telecoms.com/enterprise-telecoms/deutsche-telekom-strikes-yet-another-quantum-computing-deal>

旨在拓展量子计算应用边界。2024年，北京量子院联合中国科学院物理研究所、清华大学发布 Quafu 量子云算力集群，该平台提供五块百比特规模的量子芯片资源，并融合了经典算力资源⁶⁹。中国科学院量子信息与量子科技创新研究院研发并交付 504 比特量子计算芯片“骁鸿”，后续计划通过中电信量子集团“天衍”量子计算云平台等平台向全球开放⁷⁰。启科量子上线量子-经典混合算力云平台“<Qu|Cloud>”，提供 20 比特离子阱量子计算处理器和基于 CPU/GPU 的量子计算模拟器接入，支持多种编程模式和算法库⁷¹。总的来说，国内量子计算云平台在云平台功能、应用探索、商业模式、用户影响力等方面与国际先进水平相比仍有较大差距，未来仍需进一步提升。

量子计算云平台已成为用户访问量子计算资源、开展实验验证和应用探索的重要助力工具之一。随着量子计算技术的不断进步和云平台功能的日益成熟，未来量子计算云平台将呈现出三方面发展趋势：一是服务模式的创新与拓展，从当前的基础设施服务向更加丰富的平台服务和应用服务演进；二是跨平台跨行业的深度融合与协作，推动多领域量子计算应用与落地；三是智能化、自动化的运营管理与安全防护体系构建，提升用户体验和数据安全水平。

量子计算云平台的发展需要业界在多个方向联合推动。首先，持续加大研发投入，提升量子计算技术的成熟度和稳定性，从而支

⁶⁹ <https://quafu.baqis.ac.cn>

⁷⁰ https://kcr.ahnews.com.cn/kcr/content/4657_1116037.html

⁷¹ <https://www.qudoor.com/index.php?c=show&id=172>

撑量子计算云平台的长期稳定运行；其次，加强数据安全与隐私保护机制的建设，确保用户数据的安全可控；最后，推动标准化与互操作性的发展，降低不同平台之间交互使用的门槛，促进量子计算的普及与应用。

（三）基准测评研究正在稳步推进，成果与挑战并现

随着量子计算原型机的研制和应用探索的开展，基准测评开始逐步受到重视，如何准确高效地评估量子计算系统的性能，已成为业界关注的焦点，为用户分析量子计算技术产业发展水平提供重要参考。量子计算基准测评是表征硬件性能指标和评价系统能力的关键技术，不仅助力推进量子计算底层硬件开发和应用落地，更是连接理论研究与实际应用的关键桥梁。

量子计算基准测评发展十分迅速，业界相继提出了一系列测评基准方法。这些基准方法通常包含多种具有特定功能的任务，例如量子门操作的保真度测试、量子比特的相干时间评估以及量子算法执行效率等等，旨在为不同的量子计算系统提供相对公平的对比手段，有助于研发人员更全面地了解系统的性能。

量子计算基准测评体系框架如图 14 所示，可分为量子比特级、量子电路级、系统级、算法级和应用级等层次，各层次的测评基准呈现出不同特点与侧重点。**底层基准**，例如量子比特级和量子电路级，与硬件的关联度较高，能够充分体现各种技术路线之间的差异性。底层的参数指标相对更为分散且具体，便于熟悉技术细节的研发人员精准地发现问题并提出解决方案。随着层级的上升，例如系

统级、算法级和应用级，基准变得更为集中和直观，**上层基准**往往通过少数几个关键参数，即可全面描述量子计算系统的整体性能或其在解决特定应用问题时的能力，这类基准更适合用于评估系统或产品与用户需求之间的契合程度，从而助力用户做出更优选择。



来源：中国信息通信研究院

图 14 量子计算测评基准体系框架

近年来，业界积极开展量子计算基准测评研究，致力于以更加客观的方法对量子计算系统的综合性能进行评估。2023 年底，IBM 提出了每层门误差（EPLG），可以更准确地评估串扰，也可用于估计错误缓解所需的电路数量，同时更新了每秒电路层操作数（CLOPSh）的定义，以便更真实地反映硬件性能⁷²。EPLG、CLOPSh 以及 IBM 最早提出的量子体积（QV）三个指标，可以从规模、质量和速度三个维度较为全面地评价量子计算系统的性能。

⁷² <https://arxiv.org/abs/2311.05933>

2024年，QED-C更新了面向应用（App-Oriented）的测评基准套件，扩展了面向HHL、VQE、量子机器学习等算法的测评基准，并引入计算结果质量（如最终基态能量、分类准确率等）和计算成本等参数进行量子计算性能评估⁷³。美国DARPA启动新量子基准测试计划（QBI），主要针对量子计算算法和应用进行基准测试，并评估构建工业级量子计算机的可行性⁷⁴。

随着量子计算技术的不断发展，各类测试基准研究显得尤为重要。然而量子计算基准测评研究也面临着一系列挑战，例如基准的客观性和公正性等备受业界关注。2024年，Quantinuum在其报告中指出，#AQ基准在某些情况下可能导致对量子计算机性能的高估⁷⁵，这种高估主要源于错误缓解技术和电路编译策略的应用，上述技术在特定使用场景中能够提升效率和准确性，但可能误导整体性能的评估。因此，在评估和比较不同量子计算机的性能时，研究人员必须考虑到这些因素，以确保测评结果的客观性和公正性。

量子计算基准测评研究在评估发展现状、推动行业发展、连接理论与实践应用等方面均发挥着至关重要的作用。现阶段国内外针对量子计算基准测评的研究不断深入，取得成果的同时也面对诸多挑战。未来业界需要持续完善评估体系，更新评价方案，建立评估标准，从而更精准、全面地展现量子计算机的实际性能，推动行业

⁷³ <https://arxiv.org/abs/2402.08985>

⁷⁴ <https://executivegov.com/2024/07/darpa-launches-quantum-benchmarking-initiative/>

⁷⁵ <https://www.quantinuum.com/news/debunking-algorithmic-qubits>

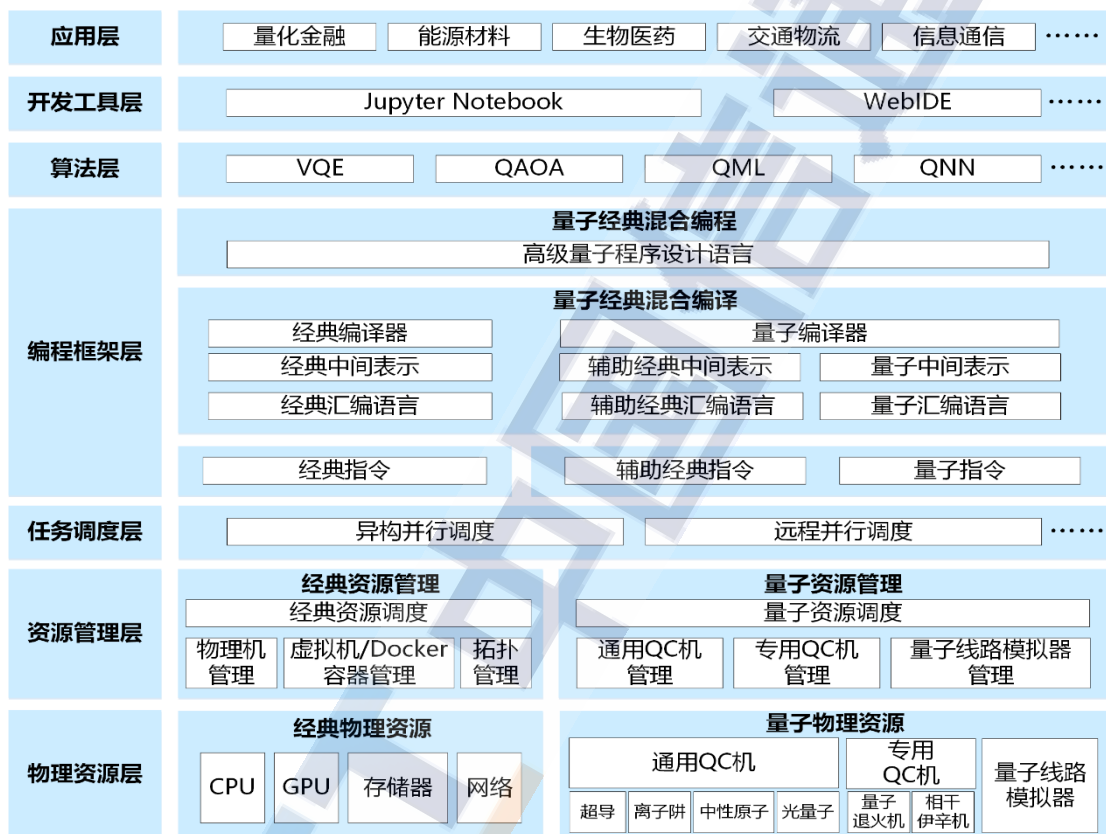
不断进步。

（四）量子-经典融合成焦点，技术体系架构至关重要

量子计算技术产业目前正处于蓬勃发展的阶段，然而当前量子计算机的操作和维护仍面临巨大挑战，未来大规模商用必须跨越从理论优势证明到实现应用价值的鸿沟。业界逐渐意识到，单纯的量子计算或经典计算均难以满足所有计算需求，因此需将两者进行有机融合，以形成更为强大的计算能力。在此背景下，量子-经典融合计算将量子计算和经典计算相结合，充分利用二者的优势共同解决复杂问题。

量子-经典融合计算作为一种新型的计算模式，具有两大基本特征：混合和协同。**混合**是指在一个系统中同时包含量子计算和经典计算，形成具有异构算力的混合计算。量子计算机可以分为通用门型量子计算机和专用量子计算机。通用门型量子计算机目前存在超导、离子阱、中性原子、光量子、硅半导体等多种技术路线，不同路线在技术原理、性能指标、成熟度等方面存在较大差异。专用量子计算机主要包括量子退火机和相干伊辛机。经典处理器主要包括中央处理器（CPU）和图像处理器（GPU）。异构算力融合既包含通用门型量子计算机与专用量子计算机之间的混合，也包含多种量子计算架构与各类经典计算架构的混合。**协同**是指量子计算机负责处理量子信息，例如量子态制备和测量，而经典计算机则负责处理经典信息，例如逻辑运算、浮点运算、算法分析和优化等。通过设计算法和接口，可使量子计算部分与经典计算部分相互协作，共同完

成计算任务。量子计算机适合解决数据的并行运算、矩阵运算、线性代数等问题，而经典计算擅长进行逻辑运算、浮点运算等操作，且具有相对完善的编程开发工具、操作系统和算法库。量子-经典融合计算的核心思想是利用量子计算的优势加速求解特定问题，同时借助经典计算的稳定性和易用性确保计算的准确性和可靠性。



来源：中国信息通信研究院

图 15 量子-经典融合计算技术体系架构

本报告研究并初步提出量子-经典融合计算技术体系架构，如图 15 所示，可划分为应用层、开发工具层、算法层、编程框架层、任务调度层、资源管理层、物理资源层等七个层级。应用层包含了量子-经典融合计算的典型应用领域，包括量化金融、能源材料、生物医药、交通物流和信息通信等，该层主要通过封装好的软件、函数，

或自定义开发的形式向行业用户提供计算服务。**开发工具层**为量子-经典融合算法提供开发和调试的工具，包括 Jupyter Notebook、WebIDE 等。**算法层**为应用层提供典型的量子-经典融合算法，代表性算法包括变分量子本征求解器（VQE）、量子近似优化算法（QAOA）、量子机器学习（QML）和量子神经网络（QNN）等。**编程框架层**为算法开发提供基本的编程语言和编译工具，为底层硬件和上层应用软件提供互联接口，同时完成量子 and 经典计算任务的拆解和互操作，最终将高级程序设计语言转化为硬件指令集，传递至底层硬件。**任务调度层**对拆解后的量子任务和经典任务进行调度，并实现各种量子 and 经典异构算力之间的协同，目前主要有两种任务调度方式，分别是异构并行调度和远程并行调度，前者实现量子-经典系统间的低时延通信，后者实现方式相对容易。**资源管理层**实现各类物理机、虚拟机、Docker 容器以及拓扑的注册、监控、调度等功能。**物理资源层**是最底层，分为经典资源和量子资源，经典资源包含各类经典算力、存力、运力基础设施，量子资源包含各种技术路线的通用门型量子计算机、专用量子计算机以及量子线路模拟器。

随着技术的不断突破，科技企业逐渐认识到量子-经典融合计算的重要性，竞相布局相关研究。**国际方面**，英伟达发布 GPU 加速的量子计算系统 NVIDIA DGX Quantum，该系统基于 NVIDIA Grace Hopper 架构超级芯片和开源量子-经典融合编程模型 CUDA Quantum，使得 GPU 和 QPU 间的通信时延降低至亚微秒级⁷⁶。微软提出批量量

⁷⁶ <https://nvidianews.nvidia.com/news/nvidia-announces-new-system-for-accelerated-quantum-classical-computin>

子计算、交互式量子计算、集成量子计算和分布式量子计算四种量子-经典融合模式，逐步从远程并行调度过渡到异构并行模式⁷⁷。亚马逊推出 Braket Hybrid Jobs 工具，实现量子-经典融合算法的完全托管编排，将经典计算资源和量子处理器的访问权限相结合，同时支持量子电路的参数化编译，可优化基于循环迭代的量子-经典融合算法的执行流程⁷⁸。IBM 在路线图中指出预计在 2025 年演示以量子计算中心的超级计算，将量子处理器、经典处理器、量子通信网络和经典网络等基础设施进行融合⁷⁹。

国内方面，中微达信推出适用于经典计算机、多路量子测控的融合计算测控单元，基于 PCIe 接口实现量子-经典测控指令之间毫秒级的调用延迟⁸⁰。本源量子发布量云融合方案架构，量子计算机通过公网与经典超算计算机远程互联，通过在量子司南操作系统与超算管理调度模块之间运行量子-经典交互协议进行协同计算⁸¹。中电信量子“天衍”量子计算云平台提供批量和交互式两种量子-经典融合模式，从而实现远程并行调度⁸²。

未来随着量子计算技术的不断突破和经典计算机性能的日益提升，量子-经典融合计算已成为推动计算产业向前发展的重要趋势之一，二者形成互补优势，是推动技术发展的关键。总体而言，量子-

⁷⁷ <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/quantum/hybrid-computing-overview>

⁷⁸ https://docs.aws.amazon.com/zh_cn/braket/latest/developerguide/braket-developer-guide.pdf#braket-what-is-hybrid-job

⁷⁹ <https://www.ibm.com/roadmaps/quantum.pdf>

⁸⁰ <https://www.quantumchina.com/newsinfo/6321779.html>

⁸¹ <https://qcloud.originqc.com.cn/>

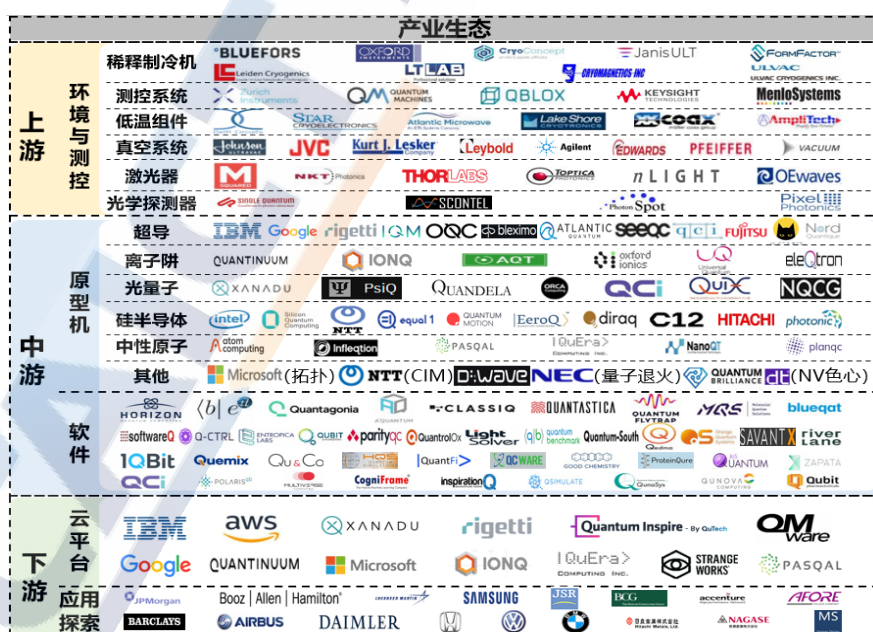
⁸² <https://qc.zdxlz.com/laboratory/>

经典融合领域将要进一步深入探索应用场景，同时不断健全完善调度机制，分步骤地逐渐建立起产业生态。硬件制造商需要研制高性能、高稳定性的量子-经典融合计算系统，为整个生态提供强大的计算基础；软件开发者则需针对融合计算的特点和需求，开发高效、易用的编程工具和软件平台，降低开发难度，提高开发效率；应用服务提供者将利用量子-经典融合计算的优势，为各行各业提供定制化的解决方案，推动产业的数字化转型和升级。

四、量子计算产业培育多方并举，生态系统逐步兴起

（一）产业生态初步形成，关键环节发展仍有待推进

随着量子计算原型机研制、软件研发、应用探索和云平台建设的发展，上中下游企业不断涌现，为量子计算技术产业发展注入充沛动力。量子计算产业生态培育稳步开展，如图 16 所示，各环节参与者逐渐增多，整体仍处于起步阶段，关键环节发展仍有待推进。



来源：中国信息通信研究院

图 16 量子计算产业生态概况

产业生态上游包括环境支撑系统、测控系统以及核心设备组件等，具体涉及稀释制冷机、真空系统、低温组件、光学器件等众多方面，是整个量子计算产业生态的基础底座。由于量子计算技术复杂性、多路线并行推进和发展趋势存在不确定性等原因，目前产业生态上游呈现分散化和多样化的特点，一方面分散化导致供应商集中开展技术攻关的难度提升，但另一方面多样化则可能有助于减少单一供应商可能造成的供应垄断等风险。国内外对比来看，欧美国家处于量子计算产业生态上游的企业数量更多且发展水平更高，在产品研制、技术创新以及市场需求等方面积累了较为优越的条件和资源。我国上游企业近几年发展迅速，相继推出各类自研产品，但在部分关键设备组件的性能指标、制造成本和市场认可度等方面仍有较大提升空间，未来仍需通过自主研发进一步提高产品技术水平。

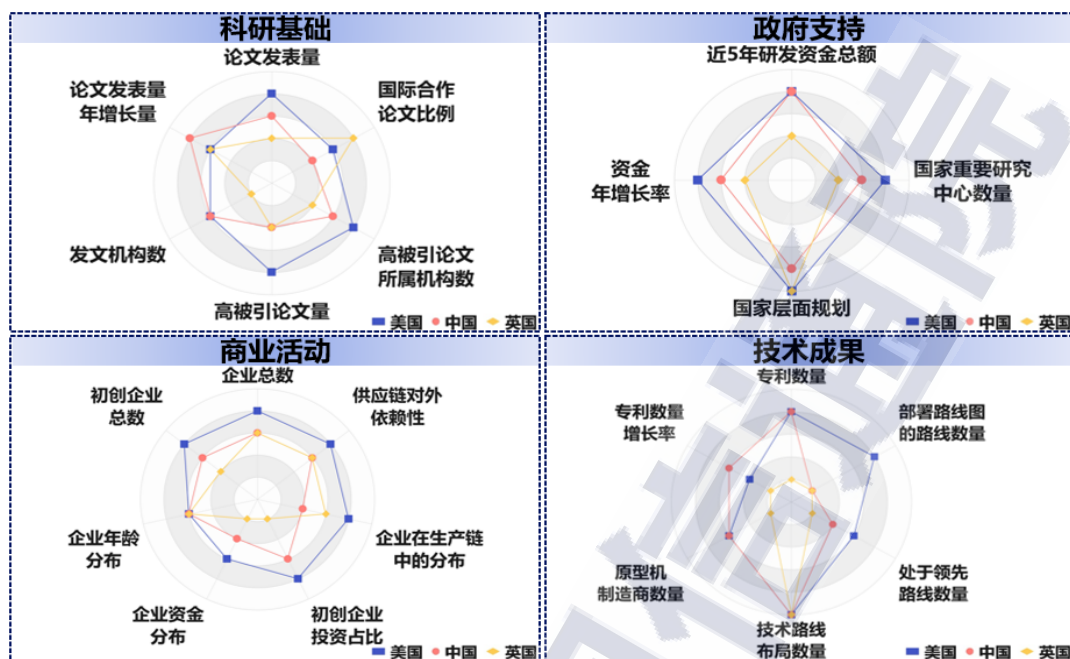
产业生态中游企业包括量子计算原型机制造商和软件供应商，是量子计算产业生态的核心环节，同时也是企业数量较为集中的部分。原型机方面，全球从事量子计算机原型机研制的企业中，专注于超导路线的企业数量最多，超过总量的三分之一，其次是离子阱、中性原子、光量子 and 硅半导体等技术路线。软件方面，众多企业致力于打造各自的量子计算软件，同时构建开源软件社区，为量子计算技术发展和应用探索提供推动力。国内外对比来看，大部分国家并行布局多种技术路线，欧美企业在数量、原型机研制能力、软件研发、开源社区建设等方面占据一定优势。我国在几条主流技术路线均有布局，近年也出现一批量子计算软件企业，但总体而言在企

业投入力度、输出成果、创新能力等方面与欧美相比仍存在差距。

产业生态下游企业包括量子计算云平台供应商和行业应用企业，是最接近用户的环节，在产业生态中扮演着至关重要的角色。云平台方面，依托互联网为各类用户提供云端接入，共享量子计算资源，促进量子计算产业提前布局与生态良性培养。行业应用方面，金融、化工、医药、交通等行业用户关注量子计算应用潜力，开放应用场景并开展应用探索，致力于寻找针对行业特定难题的解决方案。国内外对比来看，IBM、亚马逊、微软等国外科技巨头的量子计算云平台在资源共享性、硬件多样性、应用案例丰富性、服务模式商用化等方面走在全球前列。量子计算企业与不同领域行业企业积极合作，联合探索量子计算在重点行业领域的应用。我国量子计算云平台供应商在平台间协同合作、后端硬件水平、商业模式探索等方面仍有待提升。我国传统行业企业在量子计算方面的投入力度、关注程度以及与量子计算企业之间的合作机制等方面仍有待进一步加强和完善，未来需要前瞻开展应用探索，提升应用协同创新能力。

以量子计算为代表的量子信息技术已成为未来产业布局的重要关注点之一。产业基础能力支撑未来产业的布局和发展，不同国家产业基础能力的对比分析能够为评价该国在量子计算技术产业领域的综合实力和国际竞争力提供视角和工具。本报告基于**科研基础、政府支持、商业活动、技术成果**等维度构建量子计算产业基础能力分析方法，鉴于美、中、英三个国家在技术、应用和产业等方面取得诸多成果，走在全球量子计算发展的前列，具有代表性，因此选

取上述国家进行产业基础能力的对比分析，对比情况如图 17 所示。



来源：中国信息通信研究院

图 17 美、中、英量子计算产业基础能力对比

科研基础方面，我国论文年增长量较高，但高被引论文量、国际合作论文比例等存在差距，某种程度上体现了我国科研影响力与国际合作等方面仍待提升。政府支持方面，中美研发资金总额均保持较高水平，我国量子计算重要研究中心数量仍需增加，且尚未有与美国 NQI 法案、英国国家量子战略对等的国家层面量子战略。商业活动方面，美国在企业总数、资金分布、初创企业投资金额、供应链环节等方面具有一定领先优势。技术成果方面，我国专利量增长率较高，领先的技术路线数量和技术路线图等方面依旧有提升空间，侧面表明了我国未来需要在提升量子计算技术水平的同时，加强技术成果的提前规划。

全球量子计算产业生态仍处于发展初期，正逐步从理论研究走

向实际应用，规模化应用和产业化仍有待进一步推进。上游企业提供支撑配套和服务功能，中游企业发挥创新决策主体、投入主体、科研组织主体、成果转化主体等作用，下游企业则助力推进应用示范牵引。未来需要持续加大生态系统和产业基础能力的培育力度，鼓励量子计算上中下游企业共同参与、共建共担共享，在技术攻关、实验验证、应用探索等方面加强合作，打造产业可持续发展的新模式，共同构建企业紧密协作、融通发展的产业应用生态。

（二）企业进入发展活跃期，不断推动产业生态发展

近年来，量子计算已成为全球科技企业和初创企业的重点布局方向之一。科技企业主要采用局部重点发力的形式来推进量子计算技术产业发展，致力于利用量子计算实现提升企业竞争力、创造经济效益、开拓新业务、应对市场变化等目标。初创企业的成熟度逐渐提升，在软硬件研发、创新成果输出和应用探索等方面表现活跃，已成为整个量子计算产业赛道的中坚力量。

现阶段欧美是量子计算企业聚集度和活跃度较高的地区。美国IBM、谷歌、Intel、微软、亚马逊等大型科技企业凭借其公司体量庞大、技术先进、经验丰富、商业能力强等优势，在量子计算行业的第一梯队中占据一席之地。Quantinuum、Rigetti、IonQ、Infleqtion、PsiQuantum、Quantum Computing Inc等初创企业在各自技术路线上稳步发展，经过数年运营已初具规模，推出各具特色的产品，并积极探索公司产品可能的应用方向，行业影响力日渐增强。根据2023年上市公司财报可知，IonQ、Rigetti两家公司的总营业收入

入均在千万美元级别，Quantum Computing Inc 总收入则在数十万美元级别，三家上市公司均未扭亏为盈。整体来看，上市公司普遍实现营业收入持续增长但均仍处于亏损状态，这是由行业发展存在技术风险、市场认可度有待提升以及企业营业成本增加等原因共同造成的。

欧洲量子计算企业以初创企业为主，代表性企业包括 Pasqal、IQM、OQC、AQT、Oxford Ionics、ORCA Computing、Quandela、Alice & Bob 等，上述企业从事超导、离子阱、中性原子、光量子、硅半导体等多条技术路线的硬件研制、软件开发、云平台建设和应用探索，具有较大的发展潜力与动能。此外，澳大利亚的 SQC、Quantum Brilliance，加拿大的 Xanadu、D-wave 等公司也在各自技术路线上积极推进技术研究和产品研制，近几年成果颇丰。总的来说，欧美企业发展势头迅猛且合作紧密，在技术攻关、应用探索和产业推进等方面取得了诸多进展。

我国量子计算企业持续在样机研制、软件算法和应用推动等方面积极布局，推出诸多成果。腾讯、华为、中国电科等科技企业均布局量子计算方向，旨在开展技术研究，研发软硬件产品，并探索量子计算在重点行业领域中的应用。阿里和百度相继裁撤量子计算实验室也一度成为业界热点事件。中国移动、中国电信等电信运营商在近两年也积极加大量子计算领域投资和研究力度，相继推出各自的量子计算云平台，致力于联合量子计算企业共同加速推进技术产业发展。本源量子、国盾量子、华翊量子、启科量子、玻色量子、

图灵量子、量旋科技、弧光量子、中科酷源、么正量子等初创企业积极推进技术研究与应用探索，纷纷推出软硬件产品和云平台，发展进程持续加快。整体来看，我国量子计算企业的投入力度和发展水平相较欧美而言仍有提升空间。

在量子计算快速发展的背景下，全球已涌现出百余家相关企业，企业的快速发展在推进量子计算产业化中起着至关重要的作用。针对量子计算企业的发展水平进行分析，对于促进和推动整个行业的进步具有重要意义，具体来看，路线布局从侧面展示企业的核心能力，科研成果表征企业的创新水平，资本市场则是推动企业商业化发展的关键，下文从上述三个方面着重分析探讨现阶段全球量子计算企业发展现状。

从路线布局上看，全球量子计算原型机研制企业在路线选择方面呈现多样化。其中超导路线受到最多企业关注，科技企业和初创企业均有布局。布局离子阱路线的企业数量仅次于超导，且大部分为初创企业。中性原子量子计算企业数量比较有限，基本为初创企业，但企业活力普遍较高，近年来发展迅速并推出大量成果。布局光量子路线与硅半导体路线的企业数量较少，前者受到初创企业关注，后者的主要参与者既有传统半导体制造企业，也有初创企业。

从科研成果上看，论文数量方面，根据澳大利亚智库 ASPI 数据显示，在量子计算领域，全球前 10% 高被引论文中，美国企业发表的论文共占 33.9% 排名第一，中国企业发表的论文共占 15%。专利数量方面，根据智慧芽全球专利数据库统计，截至 2023 年年底，全球

量子计算发明专利前十的企业中，美国企业占六家，IBM 的专利数排名第一，而中国企业仅占一家。这一定程度上表明我国量子计算企业在高水平科研成果产出方面有待进一步提升。

从资本市场上看，上市情况方面，美国量子计算初创企业中上市公司有 IonQ、Rigetti、Quantum Computing Inc 三家上市公司，中国仅有国盾量子一家。风险投资方面，2013 年-2023 年期间美国共有 85 笔投融资事件，涉及金额超过 23 亿美元；中国仅有 22 笔，涉及金额仅 4 亿美元。对比来看，我国量子计算产业培育和企业发展仍处早期阶段，投入力度相对有限，未来仍需加快产业培育，激发企业创新活力。

量子计算企业正在经历发展活跃期，企业规模持续增长，创新能力日益提升，但由于量子计算技术路线并未收敛、发展前景存在不确定性、应用尚未落地等原因，相关企业仍需提升多个方面的能力。原型机研制方面，硬件系统研制企业需加快原型机的更新迭代速度，在更新迭代中促进量子芯片等核心技术发展。供应链方面，上游量子计算企业需加强基础设备组件研发，实现技术和工程突破，以满足未来原型机更高的技术要求。应用探索方面，量子计算企业需进一步深化与行业用户的合作，开展实用化算法研究和验证，探索量子算法的加速作用。与此同时，需要加强量子计算产业生态上中下游的交流协作，探索互惠互赢、可持续的生态模式，为量子计算赋能千行百业奠定基础。

（三）联盟促进生态培育，公共设施助力产学研合作

随着量子计算技术研发和应用探索持续推动，着眼于科研成果转化、行业应用创新、供应链建设、人才培养和公共平台建设等工作的产业生态培育，已开始成为全球主要国家在量子计算领域的聚焦点之一，加强政产学研用各方的沟通交流与协同创新正逐步成为新趋势。

近年来全球多国相继成立量子信息技术领域产业联盟，成员涵盖量子企业、研究机构 and 行业用户，持续推动产学研用多方合作，已成为推动构建应用产业生态的重要力量。全球代表性量子信息产业联盟如图 18 所示。2024 年，英国量子产业联盟（UKQuantum）发布英国量子行业宣言，为下一届英国政府提出促进量子技术发展的具体建议⁸³。韩国运营商 SK Telecom 牵头成立量子联盟 X Quantum，致力于通过探索联合的商业机会共同推动韩国量子生态发展⁸⁴。我国量子信息网络产业联盟（QIIA）目前已有 81 家成员单位，已相继开展技术研究、标准预研、测评验证、应用案例征集等方向的二十余个项目，为国内产业生态培育贡献力量。武汉量子科技产业创新联盟正式揭牌成立⁸⁵。总的来说，产业联盟正有力促进产业整体发展和产业集群的形成，产学研用多方合作开展活跃，取得多方响应。

⁸³ <https://ukquantum.org/ukquantum-launches-its-manifesto-for-the-uk-quantum-technology-sector/>

⁸⁴ <https://www.koreaherald.com/view.php?ud=20240619050568>

⁸⁵ https://www.hubei.gov.cn/hbfb/szsm/202406/t20240612_5234399.shtml

 <ul style="list-style-type: none"> • 时间：2018年12月 • 成员：286家（已扩展至39国） • 网址：quantumconsortium.org 	 <ul style="list-style-type: none"> • 时间：2021年4月 • 成员：191家（已扩展至23国） • 网址：euroquic.org 	 <ul style="list-style-type: none"> • 时间：2022年7月 • 成员：81家中国机构 • 网址：chinaqiia.cn
 <ul style="list-style-type: none"> • 时间：2020年10月 • 成员：50家加拿大企业及相关组织 • 网址：quantumindustrycanada.ca 	 <ul style="list-style-type: none"> • 时间：2021年6月 • 成员：13家德国企业 • 网址：qutac.de 	 <ul style="list-style-type: none"> • 时间：2021年9月 • 成员：96家 • 网址：qstar.jp
 <ul style="list-style-type: none"> • 时间：2021年1月 • 成员：5家荷兰机构+40合作机构 • 网址：quantumdelta.nl 	 <ul style="list-style-type: none"> • 时间：2022年8月 • 成员：141家 • 网址：techcouncil.com.au 	 <ul style="list-style-type: none"> • 时间：2022年 • 成员：48家 • 网址：ukquantum.org

来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理（截至 2024 年 7 月）

图 18 全球代表性量子信息产业联盟概况

开展量子计算加工制造、工程研发、测试验证等相关公共设施平台建设是助力产业生态发展的另一种重要方式，代表性量子计算公共设施平台建设如表 2 所示。欧美高度重视量子计算公共平台与基础设施建设。2023 年，欧盟拨出 1900 万欧元的特定资金，用于升级现有的欧洲微纳米和量子技术基础设施⁸⁶。法国在量子技术国家投资规划框架下，启动国家量子计算平台，致力于联通量子计算机和经典计算机，并面向国际上的实验室、初创企业和制造商等服务⁸⁷。英国国家量子计算中心计划将拨款 3000 万英镑用于开发量子计算测试平台⁸⁸。2024 年，芬兰国家计量研究所完成量子处理器测试与测量基础设施建设，包含自旋量子比特低温测量系统和晶圆

⁸⁶ <https://qu-pilot.eu/>

⁸⁷ <https://www.aerospacedefensereview.com/news/france-announced-the-launch-of-national-hybrid-quantum-computing-platform-nwid-914.html>

⁸⁸ <https://www.ukri.org/news/ukri-awards-45-million-to-develop-quantum-technologies/>

检测设施等⁸⁹。美国国防部高级研究计划局与伊利诺伊州合作建设量子试验场，旨在研究量子技术真正的价值⁹⁰。量子计算公共平台与基础设施的建设为研究人员开展技术研究、应用探索、测评验证等提供支持举措，有利于优化资源配置和承担共性服务，为形成高水平自主产业生态提供助力。

表2 代表性量子计算公共设施平台概况

国家地区	建设单位	平台名称	措施目标
美国	阿贡国家实验室、Intel	量子计算试验台	为研究者提供真实量子计算资源，同时获得设备组件质量及其整体运行情况的反馈，助力双方共同改进 ⁹¹
	桑迪亚国家实验室	量子科学计算开放用户测试平台（QSCOUT）	为研究人员提供量子计算系统使其免去自己建造机器的麻烦，与此同时获得有关量子性能和体系结构的意见 ⁹²
	NIST、科罗拉多大学博尔德分校	低温量子试验台	对单光子功率和毫开尔文温度的超导微波损耗进行高通量、精确测量 ⁹³
	美国能源部科学办公室、劳伦斯-伯克利国家实验室	高级量子实验平台	对业界开放，众多实验室、企业、学界提交实验申请，实验内容涵盖软硬件、算法、基准技术等多个方面，旨在推进量子计算的研发进程 ⁹⁴
欧盟	欧洲量子旗舰计划	欧洲量子计算与模拟基础设施（EuroQCS）	目标是成为欧洲经典-量子混合计算的联合基础设施，为行业应用研究者提供支持开发的公共服务 ⁹⁵
	芬兰国家计量研究所	Qu-Pilot 项目	开发量子技术基础设施，通过提供设计、开发和验证硬件产品和流程的方式，促进量子计算发展
法国	法国计算机科学和自动化研究所	国家量子计算平台	联通量子 and 传统计算机系统，面向国际实验室、初创企业和制造商等服务，促进它们获得量子计算能力
英国	英国国家量子计算中心	量子计算测试平台	提供受控环境使得研究者可操纵和研究量子比特，测试和验证量子算法、设备或技术，目标是使得量子计算在2025年左右提供量子优势
芬兰	芬兰国家计量研究所、SemiQon	量子处理器测试与测量基础设施	量子处理器与基础设施测试，实现晶圆全方位检测的探测站

⁸⁹ <https://www.semiqon.tech/news-insights/semi-qons-quantum-processor-testing-and-measurement-facilities-at-the-vtt-mikes-premises-up-and-running>

⁹⁰ <https://www.darpa.mil/news-events/2024-07-16>

⁹¹ <https://chicagoquantum.org/news/intel-install-quantum-computing-test-bed-q-next-midwest-chicago-argonne>

⁹² <https://www.sandia.gov/quantum/quantum-information-sciences/projects/qscout/>

⁹³ <https://www.nist.gov/programs-projects/quantum-characterization>

⁹⁴ <https://aqt.lbl.gov/>

⁹⁵ https://qt.eu/app/uploads/2022/02/20220202_HPC-QCS-JWP-final.pdf

来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

全球量子计算产业生态处于早期培育阶段，业界通过成立产业联盟，构建公共平台等方式积极促进各方创新协同，为相关企业和实验室等开展合作研究提供机会和平台。未来需要持续发挥产业联盟等力量促进产学研用结合，同时推动试验验证、中试等平台工程，加快研究成果向实用化、工程化转化的速度和效率，为构筑自主可控的产业生态提供引导支持。

（四）标准化已成为国内外布局热点，发展进程加快

量子计算在涉及数学、物理等基础学科的同时，也与诸多工程学科存在交叉融合，其技术水平发展和产业生态体系的构建存在争议和变化。鉴于量子计算技术发展处于早期阶段且技术路线未收敛等原因，相关标准化工作还处于非常早期的阶段。但同时由于布局量子计算方向具有重要战略意义，相关标准化工作已逐渐成为国内外标准化组织研究布局的热点，发展进程逐渐加快。

目前国际标准化组织/国际电工委员会（ISO/IEC）、国际电信联盟（ITU-T）、电气与电子工程师协会（IEEE）等国际标准组织，以及全国量子计算和测量标准化委员会（TC578）等国内标准组织，均积极开展量子计算标准化工作布局 and 标准预研等相关工作。目前主要关注和研究量子计算相关概念术语和定义，提出量子计算的性能评价的准则和方法等方面，相关技术标准研究和讨论处于初期阶段。

国际方面，2024年，ISO/IEC 成立量子技术联合技术委员会

（ISO/IEC JTC 3），负责量子技术领域的标准化工作，委员会标准制定范围涵盖量子计算、量子模拟、量子计量、量子探测器和量子通信等方向⁹⁶，目前 JTC 1 WG14 的部分标准工作已转移到 JTC3 持续研制。我国牵头制定的首个量子计算领域国际标准 ISO/IEC 4879:2024《信息技术 量子计算 词汇》正式发布，系统构建了量子计算的概念体系框架，凝练了各方对不同术语定义的概念理解与共识，对量子计算技术产业发展和生态培育等方面起到重要推动作用⁹⁷。美国 NIST 组建量子技术国家委员会，公开招募专家参加 ISO/IEC JTC3 标准工作并担任管理职位⁹⁸。

国内方面，TC578 负责全国量子计算与测量领域标准化技术归口工作，组织开展量子计算术语和定义、量子计算性能评估基准研究、量子计算云平台架构与功能要求等标准制定，以及量子计算应用发展与测评、量子计算应用场景、量子计算发展趋势与标准化需求等课题研究。

总体而言，标准化工作对于促进量子计算应用转化、形成产业竞争力有重要促进作用，将是未来推动量子计算产业布局的重要决定性因素之一，已成为国际科技和未来产业发展与竞争的前沿热点。目前由于量子计算技术产业成熟度较低、发展路径具有特殊性等原因，建议标准化工作将重点集中在基础研究、功能性能和体系框架等基础方向，以防过早针对某类特定技术路线或实现方案制定标准，

⁹⁶ <https://www.iso.org/news/new-joint-committee-quantum-technologies>

⁹⁷ <https://www.iso.org/standard/80432.html>

⁹⁸ <https://www.nist.gov/news-events/news/2024/02/new-iciso-joint-technical-committee-quantum-technologies-in-viting>

反而导致标准内容与快速发展的技术和产品需求产生脱节，这有可能对量子计算技术产业演进带来负面影响，不利于行业整体发展。

五、总结与建议

量子计算已成为当今世界最具颠覆性的前沿技术之一，已逐渐形成集基础科研、工程研发、应用探索和产业培育为一体的发展格局。当前，量子计算优越性验证已完成，超导、离子阱、中性原子、光量子、硅半导体等多种技术路线呈现多元化开放性的发展态势，这种发展态势短期内将持续存在，基础研究与工程研发不断突破，应用场景探索在多行业领域持续推进，产业生态正逐步构建。量子计算整体发展势头良好，潜力巨大，未来发展前景可期。

与此同时也需看到，当前量子计算领域发展也面临一些技术与应用瓶颈。基础研究方面，量子计算的相关科学问题、技术方案、理论算法、基础材料等方面研究有待进一步深入。原型机研制方面，不同技术路线的量子计算原型机在研发水平和核心技术指标等方面，距离实现大规模可容错量子计算均有很大差距。应用探索方面，针对现阶段量子计算原型机的实际发展情况，尚未出现具备加速能力的实用化算法，技术成果的应用转化有待持续探索。产业培育方面，量子计算产业生态建设进展稍显缓慢，未来产业规划与培育亟待进一步加强。

未来我国需进一步加强量子计算领域规划布局和统筹协调，解决技术研究、原型机研制、应用探索、产业培育等方面存在的瓶颈挑战，多方并举，共同推动技术研究和产业应用发展。一是推动基

基础科研攻关，进一步加大量子计算基础科研投入力度，完善基础理论研究、重大科技攻关和量子算法研究等同步推进的体系布局。二是加强原型机研制，重点推进主流技术路线的核心科学与工程问题研发攻关，提升量子比特规模、质量和操控精度等。三是补齐供应链短板，整合研究机构、科技企业、初创企业等各方力量，开展量子计算专用和通用设备组件攻关。四是推动行业应用探索，支持央企、大型国企、其他行业龙头企业与量子计算企业深化合作，探索量子计算在重点行业的应用。五是促进产学研深度融合，提供量子计算加工制造、测试验证和公共基础设施等公共服务，推动研发、应用、服务和产业化协同创新，形成高水平自主产业生态。

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

