

量子信息技术发展与应用 研究报告 (2023 年)

中国信息通信研究院

2023年12月

版权声明

本报告版权属于中国信息通信研究院，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”。违反上述声明者，本院将追究其相关法律责任。



前 言

以量子计算、量子通信和量子测量为代表的量子信息技术是量子科技的重要组成部分，也是培育未来产业、构建新质生产力、推动高质量发展的重要方向之一。经过四十余年发展，量子信息领域逐步从基础研究走向基础与应用研究并重，开始进入科技攻关、工程研发、应用探索和产业培育一体化推进的发展阶段。至 2023 年 10 月，全球 29 个国家和地区制定和发布了量子信息领域的发展战略规划或法案，公开信息不完全统计投资总额超过 280 亿美元。加快技术研发攻关，推动创新成果应用，构建供应链、人才队伍和未来产业竞争力，成为全球主要国家在量子信息领域布局规划的普遍共识。

近年来，量子信息三大领域科研与应用探索发展活跃，学术界重要科研进展与产业界样机产品研发成果亮点纷呈，产业生态培育成为各方关注热点，技术标准布局和研究取得阶段性成果。我国高度重视量子信息领域发展，在政策布局、基础科研、工程研发、应用探索和生态培育等方面，取得了诸多重要进展。

自 2018 年起，中国信息通信研究院每年组织编写和发布《量子信息技术发展与应用研究报告》，成为管理部门和业界掌握量子信息国内外发展动态和趋势的重要参考。本报告对近一年来全球量子信息领域的总体发展态势、最新研究应用进展、行业热点趋势问题等进行分析探讨，希望为业界凝聚发展共识合力持续做出贡献。

目 录

一、 量子信息技术总体发展态势.....	1
(一) 量子信息技术是未来产业发展重要方向之一	1
(二) 全球主要国家量子信息政策布局进一步加强	3
(三) 量子信息三大领域科研与技术创新持续活跃	6
(四) 量子信息企业数量和投融资规模的增长放缓	9
二、 量子计算领域研究与应用进展.....	14
(一) 硬件多技术路线并行发展，创新成果不断涌现	14
(二) 量子纠错突破平衡点，环境测控系统仍有瓶颈	20
(三) 软件与云平台发展迭代迅速，成熟度有待提升	23
(四) 应用探索广泛开展，组合优化或有望率先实用	28
(五) 量子计算产业链初具雏形，标准化成布局热点	32
三、 量子通信领域研究与应用进展.....	35
(一) QKD 科研成果亮点纷呈，实验系统指标获提升	35
(二) QKD 应用持续探索，标准研制取得阶段性成果.....	38
(三) 量子信息网络关键核心技术研究取得一定进展	42
(四) 欧美积极推动量子信息网络组网技术试验验证	45
(五) PQC 首批算法标准发布，应用推广仍任重道远	48
四、 量子测量领域研究与应用进展.....	52
(一) 基础研究成果亮点纷呈，量子优势越发明显	52
(二) 量子 PNT 战略价值突出，成为各国关注热点.....	55
(三) 量子探测成像具备高灵敏度，应用前景广阔	58
(四) 能源领域探索量子测量应用，助力双碳达标	61
(五) 量子测量产业链形成，规模化商用仍有挑战	63
五、 量子信息技术与应用前景展望.....	66
(一) 三大领域研究发展迅速，应用探索进一步拓展	66
(二) 培育量子信息未来产业需加强政产学研用协同	69

图 目 录

图 1 全球量子信息科研论文和专利申请的年度变化趋势.....	6
图 2 量子信息领域科研论文数量前十位国家情况.....	7
图 3 量子信息领域主要国家科研国际合作情况.....	8
图 4 量子信息领域不同技术方向专利数量对比.....	8
图 5 量子信息领域中美专利申请主体情况分析.....	9
图 6 (a) 量子信息全球企业数量及 (b) 年度增长趋势.....	10
图 7 (a) 量子信息各领域企业数量及 (b) 国家分布情况.....	11
图 8 量子信息领域企业投融资事件与金额变化趋势.....	12
图 9 量子计算技术体系框架.....	14
图 10 量子计算比特数和量子体积指标发展趋势.....	19
图 11 量子计算云平台功能架构图.....	25
图 12 2023 年 Gartner 量子计算技术成熟度预测.....	31
图 13 量子计算产业链与国内外代表性企业概况.....	32
图 14 2023 年 QKD 系统实验的代表性成果.....	37
图 15 美国 NIST 后量子加密 (PQC) 算法标准化历程.....	49
图 16 量子测量实验体现量子优势的代表性成果.....	53
图 17 量子时频同步研究的代表性进展成果.....	56
图 18 量子探测成像应用探索代表性进展成果.....	60
图 19 量子测量产业链与代表性企业概况.....	64

表 目 录

表 1 全球主要国家量子信息领域战略规划与投资概况.....4

表 2 全球量子信息初创企业十大融资事件（金额降序）13

表 3 量子计算主要技术路线关键指标现状.....15

表 4 国内外代表性量子计算云平台发展概况.....26

表 5 近年来 QKD 实验系统传输距离提升趋势36

表 6 2023 年量子信息网络科研进展概况（发表时间排序）43

表 7 近期欧美地区 QIN 项目、测试平台及组网实验列表46

一、量子信息技术总体发展态势

（一）量子信息技术是未来产业发展重要方向之一

量子信息技术是量子科技重要组成部分，以量子力学原理为基础，通过对微观量子系统中物理状态的制备、调控和测量，实现信息感知、计算和传输。量子信息技术主要包括量子计算、量子通信和量子测量三大领域，在提升计算困难问题运算处理能力、加强信息安全保护能力、提高传感测量精度等方面，具备超越经典信息技术的潜力。未来，量子信息技术有望在前沿科学、信息通信和数字经济等诸多领域引发颠覆性技术创新和改变游戏规则变革性应用。

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，能在某些计算复杂问题上提供指数级加速，是未来计算能力跨越式发展的重要方向。当前，量子计算存在超导量子线路、离子阱、光量子、超冷原子、硅基量子点、金刚石色心和拓扑等七大技术路线并行发展，处于中等规模含噪声量子处理器阶段。量子计算应用场景探索广泛开展，但尚未实现“杀手级”应用突破。大规模可容错通用量子计算仍需长期艰苦努力，业界尚无实现时间预期。

量子通信利用量子叠加态或纠缠效应，在经典通信辅助下实现密钥分发或信息传输，理论层面具有可证明安全性。基于量子密钥分发（QKD）和量子安全直接通信（QSDC）等方案的量子保密通信初步实用化，新型协议和实验系统的研究持续活跃，样机产品研制和示范应用探索逐步开展，但应用与产业发展面临诸多挑战。基于量子隐形传态和量子存储中继等技术构建量子信息网络是未来重要发展方向，

科研探索与试验取得一定进展，但距离实用化有很大差距。

量子测量对外界物理量变化导致的微观系统量子态变化进行调控和观测，实现精密传感测量，精度、灵敏度和稳定性等核心指标比传统技术有数量级提升。主要技术方向包括用于新一代定位/导航/授时的光学原子钟、光学时频传输、原子陀螺仪与重力仪等，以及用于高灵敏度检测与目标识别的光量子雷达、磁场精密测量、物质痕量检测等。主要应用场景涵盖国防军工、航空航天、地质/资源勘测和生物医疗等众多行业领域，多种样机产品进入实用化与产业化阶段。

经过四十余年的发展，量子信息技术已从仅有学术界关注的基础科学研究和前沿技术探索，逐步开启产业界共同参与的工程应用研究和未来产业培育。量子信息三大领域的前沿科研与工程研发亮点成果不断涌现，技术成熟度持续提升，应用探索加速发展，进入科技攻关、工程研发、应用探索和产业培育一体化推进的发展阶段。

以量子信息技术为代表的量子科技，已成为未来产业布局和发展的关注重点之一。“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要提出，在量子信息等前沿科技和产业变革领域，组织实施未来产业孵化与加速计划，谋划布局一批未来产业。习近平总书记提出，整合科技创新资源，引领发展战略性新兴产业和积极培育未来产业，加快形成新质生产力，以高质量发展推动中国式现代化。工信部高度重视量子科技发展，推动量子科技等前沿领域研究，鼓励各地方先行先试，加快布局未来产业。近年来，多地陆续发布科技和信息产业规划，部署支持量子信息领域发展。2023 年，北京市发布《北京市促进未来产业创新发展实施

方案》¹，部署量子物态科学、量子通信、量子计算、量子网络、量子传感等方向的核心技术攻关、行业应用拓展、产业生态和用户群体培育等工作。合肥市政府工作报告²提出，合肥国家实验室入轨运行，量子信息未来产业科技园入列首批国家试点，后续进一步加快建设量子信息未来产业科技园，打造“世界量子中心”。湖北省设立 20 亿元量子科技产业投资基金³，发布《湖北省加快发展量子科技产业三年行动方案（2023—2025 年）》，打造全国量子科技产业高地。

（二）全球主要国家量子信息政策布局进一步加强

量子信息技术是挑战人类调控微观世界能力极限的世纪系统工程，是对传统技术体系产生冲击、进行重构的重大颠覆性创新，将引领新一轮科技革命和产业变革方向。量子信息技术发展与应用已成为大国间开展科技、经济等领域综合国力竞争，维护国家技术主权与发展主动权的战略制高点之一。截至 2023 年 10 月，29 个国家和地区制定和推出了量子信息领域的发展战略规划或法案文件，据公开信息不完全统计的投资总额已超过 280 亿美元。全球主要国家在量子信息领域的战略规划和投资概况如表 1 所示，以 2018 年欧盟“量子旗舰计划”和美国《国家量子倡议（NQI）》法案为重要标志，近五年来各国在量子信息领域的规划布局持续加速。2023 年 6 个国家相继发布量子信息相关国家战略和投资规划，计划投资总规模达到 67 亿美元。总体而言，量子信息领域的国际科技竞争正日趋激烈。

¹ https://www.beijing.gov.cn/zhengce/gfxwj/202309/t20230908_3255227.html

² <https://www.hefei.gov.cn/ssxw/zwyw/108461121.html>

³ http://www.hubei.gov.cn/zwgk/hbyw/hbywqb/202311/t20231116_4947889.shtml

表 1 全球主要国家量子信息领域战略规划与投资概况

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（NQS）	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

来源：中国信息通信研究院（截至 2023 年 10 月）

2023 年 1 月，美国国家科学技术委员会发布《NQI 2023 年报》⁴显示，NQI 法案五年来的实际投资远超原计划规模。2019-2023 财年投资累计达 37.38 亿美元，超出原计划的 12.75 亿美元近两倍，投资覆盖量子计算、量子网络、量子传感/计量、量子基础科研和量子工程技术五大领域。其中，量子计算投资占比最高，共计约 10 亿美元，量子网络投资增速最快。美国能源部（DOE）、美国国家科学基金会（NSF）和国家标准与技术研究院（NIST）是 NQI 法案主要实施部门，其中 DOE 和 NSF 五年来分别累积投资超过 12 亿和 10 亿美元。

⁴ <https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2023/01/NQI-Annual-Report-FY2023.pdf>

NSF 资助了 1500 余项量子信息领域科研项目，DOE 则重点支持国家实验室体系的五个量子信息研发中心建设。此外，2022 年 8 月通过的《芯片与科学》法案⁵，还包含了量子科学网络、科学和技术量子用户扩展计划、量子网络和通信研究与标准化、下一代量子领导者领航计划四个量子信息相关项目，总投资金额为 1.53 亿美元/年。

美国 NQI 法案第一阶段于 2023 财年结束，多方就第二阶段法案实施和投资问题进行广泛讨论。NQI 咨询委员会发布《更新国家量子计划：维持美国在量子信息科学领域的领导地位建议》报告⁶，战略与国际问题研究中心发布《量子不可照旧：国家量子计划法案重新授权的问题》报告⁷，信息技术与创新基金会发布《美国的量子政策方针》报告⁸，上述报告分析了量子信息领域技术产业竞争和国际竞争态势，建议 NQI 法案在 2024 至 2028 财年至少每年拨款 5.25 亿美元（不含芯片研发资金），持续加大基础科学投资、打造量子人才队伍、深化产业界合作、建设关键基础设施、维护国家安全和推进盟友国际合作，确保美国在量子信息领域的领先地位。8 月，拜登政府签署行政令⁹，将半导体和微电子、量子信息技术以及人工智能界定为涉及美国国家安全利益的军民两用敏感技术和产品，禁止美国实体与中国大陆、香港和澳门的实体进行交易和开展投资。

英国作为全球科技强国，在 2014 年率先出台全球首个量子信息

⁵ <https://www.quantum.gov/quantum-in-the-chips-and-science-act-of-2022/>

⁶ <https://www.quantum.gov/nqiact-report-on-renewing-the-national-quantum-initiative>

⁷ <https://www.csis.org/analysis/quantum-cant-be-business-usual-issues-reauthorization-national-quantum-initiative-act>

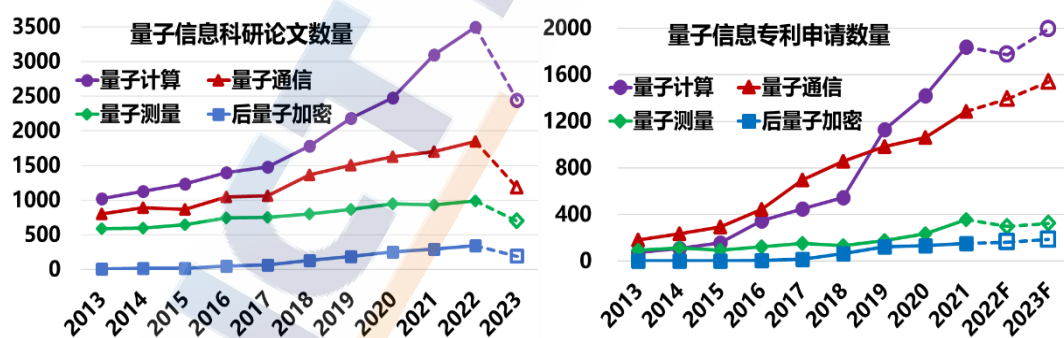
⁸ <https://itif.org/publications/2023/10/10/the-us-approach-to-quantum-policy/>

⁹ <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2023/08/09/executive-order-on-addressing-united-states-investments-in-certain-national-security-technologies-and-products-in-countries-of-concern/>

国家级发展政策《国家量子技术计划》，通过两个五年期规划，累积投资超 10 亿英镑，建立了量子计算、模拟、通信、传感和成像五大科技研究中心推动技术攻关，支持量子初创企业产品研发与应用推广。3 月，在计划实施十年之际，英国政府组建科学创新与技术部，发布《国家量子战略（NQS）》¹⁰，开启未来十年 25 亿英镑投资和新一轮量子信息技术产业发展规划。NQS 提出了四大发展目标：确保英国拥有领先的量子信息科技与工程技术；支持量子技术企业发展，促进投资、供应链和人才队伍建设；加快量子信息技术应用转化；加强量子信息技术产业监管和国际治理合作。

（三）量子信息三大领域科研与技术创新持续活跃

近十年，量子信息科学研究和技术创新保持快速发展趋势，量子计算、量子通信、量子测量、后量子加密（PQC）等领域科研论文和专利申请数量逐年递增，如图 1 所示。



来源：中国信息通信研究院（截至 2023 年 9 月）

图 1 全球量子信息科研论文和专利申请的年度变化趋势¹¹

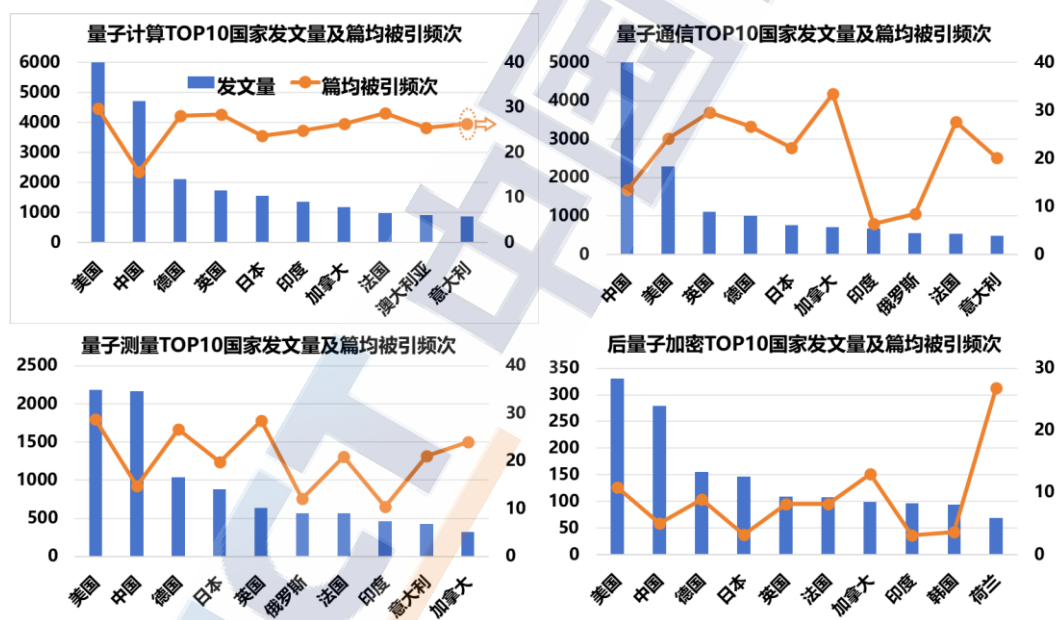
论文方面，量子计算是最大热点，论文数量增速明显加快，近年

¹⁰ <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy>

¹¹ 2023 年科研论文仅含前三季度，2022 和 2023 年专利统计有滞后效应，数量呈现包含预测值。

来超过其他领域总和，量子通信和量子测量保持平稳增长，PQC 从 2016 年起逐步成为研究热点，2023 年有 340 余篇相关论文。专利方面，量子通信专利的增长趋势较为稳定，量子计算专利申请在 2019 年超过量子通信并持续保持快速增长，PQC 专利近年来开始快速增长，2023 年数量预计将达到 200 项。

量子信息各领域的科研论文数量前十位国家统计如图 2 所示，中美占据前两位，在科研输出方面表现突出，量子通信我国论文数量远超其他国家。但从论文被引频次看，我国与欧美相比仍有一定差距，高水平论文数量有待提升。

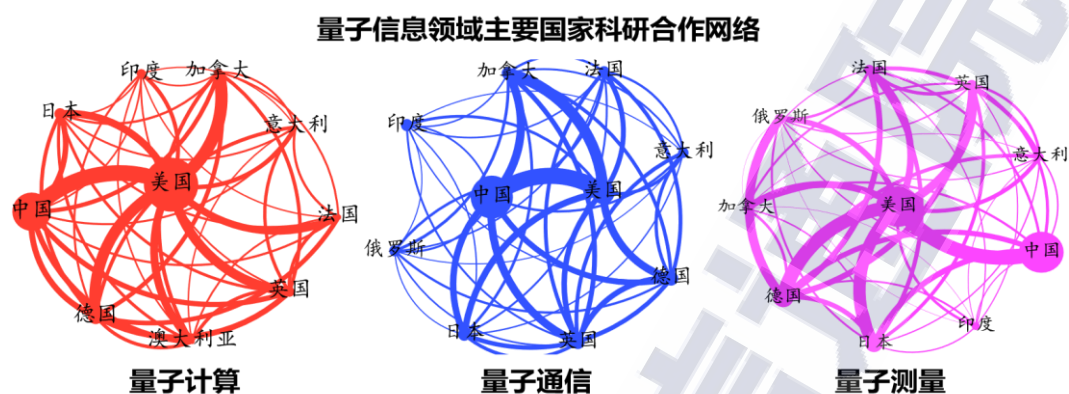


来源：中国信息通信研究院（截至 2023 年 9 月）

图 2 量子信息领域科研论文数量前十位国家情况

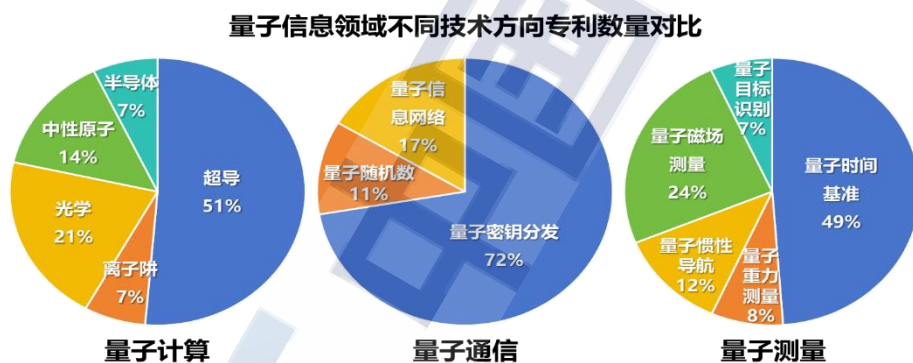
量子信息领域主要国家的科研国际合作概况如图 3 所示，量子计算领域的国际科研合作较为广泛和均衡，量子通信领域形成了美国、中国等重点合作节点，量子测量领域国际合作相对较少。在量子信息

科研国际合作方面，美国在三大领域中均处于中心位置，显示出在国际学术交流与科研合作方面的领先优势。



来源：中国信息通信研究院（截至 2023 年 9 月）

图 3 量子信息领域主要国家科研国际合作情况

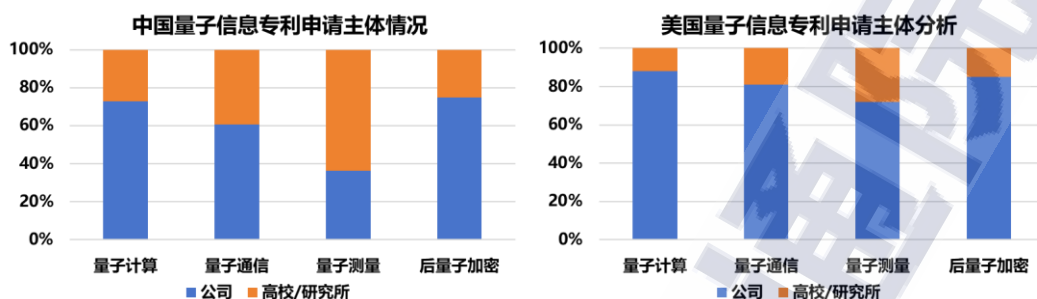


来源：中国信息通信研究院（截至 2023 年 9 月）

图 4 量子信息领域不同技术方向专利数量对比

量子信息领域包括不同技术路线和发展方向，其中专利申请数量的对比情况如图 4 所示。在量子计算硬件技术路线中，超导路线专利数量占比超过 50%，光量子 and 中性原子路线技术创新热度高于离子阱和硅半导体。量子通信领域中量子密钥分发技术专利占比超过 70%，器件、设备等系统研发类专利数量众多，量子信息网络技术成熟度不足，相关专利尚未大量涌现。量子测量领域中以原子钟为代表的时频

基准方向专利占比接近 50%，是技术创新与应用主力，磁场测量和惯性测量方向也有较多创新成果积累。



来源：中国信息通信研究院（截至 2023 年 9 月）

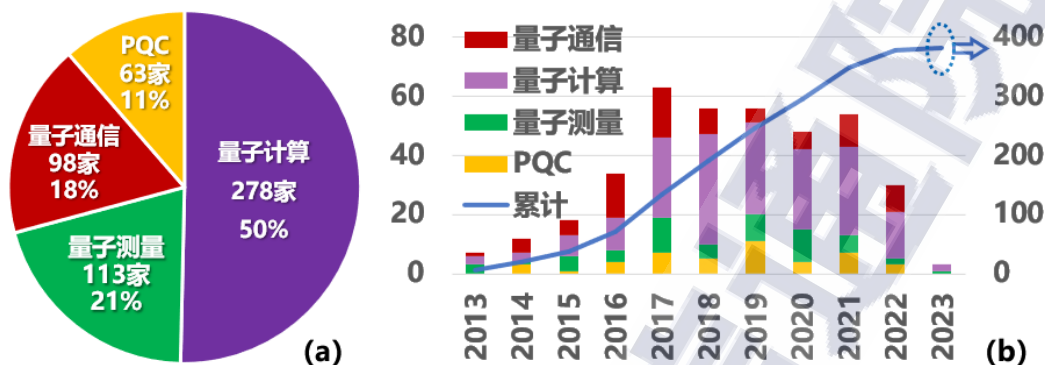
图 5 量子信息领域中美专利申请主体情况分析

中美量子信息各领域专利申请主体情况对比如图 5 所示。我国量子计算和 PQC 的专利申请中，公司申请数量占比超过 70%，企业开展专利布局推动力较强，量子测量领域专利主要来自高校和科研院所，科技成果还需进一步向产业转化。对比来看，美国量子信息各领域专利中，企业申请数量占比均超过 70%，量子计算和 PQC 领域的占比接近 90%，显示出产业界的创新引领实力。

（四）量子信息企业数量和投融资规模的增长放缓

量子信息要从前沿技术走向未来产业，进而形成新质生产力，成为赋能经济社会增长的新引擎，离不开企业推动的科技成果转化、技术产品研发与产业化应用推广。企业是推动量子信息技术工程化研发、应用赋能和产业化发展的创新主体，也是各国构建量子信息技术产业竞争优势，赢得发展主动权的主力军。量子信息企业数量、分布和投融资情况，是观察量子信息技术产业发展态势的重要视角，中国信息通信研究院对全球量子信息相关企业及投融资情况进行了调研统计

分析，为业界提供参考。PQC 作为应对量子计算信息安全威胁的主流技术方案，与量子信息领域关系密切，一并进行了统计分析。



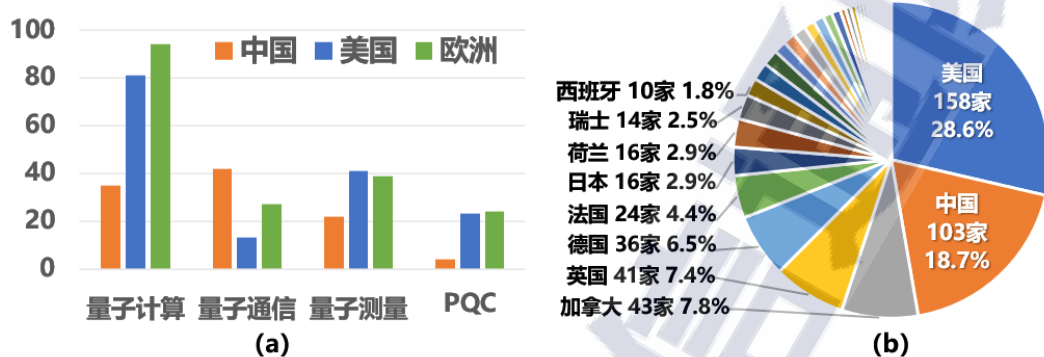
来源：中国信息通信研究院（截至 2023 年 9 月）

图 6 (a) 量子信息全球企业数量及 (b) 年度增长趋势¹²

全球量子计算、量子通信、量子测量和 PQC 领域的企业数量及年度增长趋势如图 6 所示。截至 2023 年 9 月，共统计上述四大领域的全球相关科技企业、初创企业、供应链企业和行业应用企业等共 552 家，其中量子计算相关企业 278 家，占比超过 50%，凸显出量子计算是全球技术产业竞争的关注焦点。全球量子测量和量子通信企业数量均在百家左右，占比约为 20%。随着 PQC 算法评选和标准制定进程的逐步明朗，PQC 相关企业数量达到 63 家。2016 年之前，量子信息企业数量呈缓慢增长态势，2016 年开始迅速增长，2017 年达到峰值，新增初创企业 63 家，其中量子计算企业 27 家。2018-2021 年间增长稍有回落但仍保持每年新增 50 余家的高位，2022 年起企业增长数量大幅放缓，新增 31 家，量子计算仍然是行业热点，新增 17 家。今年前三季度新增企业数量仅为 3 家，虽然当年新成立企业数量统计会有

¹² 企业数量统计依据互联网公开信息，包含了量子信息三大领域和后量子加密（PQC）的初创企业，以及涉及上述四个领域中上下游业务的科技企业、供应链企业和行业企业等。

一定滞后性，但增长趋势不及往年已基本明确。总体而言，过去十年间，量子信息初创企业数量经历了一轮爆发式增长，量子计算是创新创业热点，近两年来初创企业数量增长趋势明显放缓。



来源：中国信息通信研究院（截至 2023 年 9 月）

图 7 （a）量子信息各领域企业数量及（b）国家分布情况¹³

全球量子信息各领域企业数量及国家分布情况如图 7 所示。从不同领域看，量子计算企业欧美聚集度最高，共有 175 家，全球占比超过 60%，反映出美国和欧洲是量子计算产业生态的活跃地区，中国量子计算领域相关企业共有 35 家，不及美国一半。量子通信领域中国相关企业数量最多，共有 42 家，美国仅有 13 家，欧洲有 27 家，从一个侧面反映出不同国家和地区在量子通信领域，主要是进入初步实用化阶段的量子密钥分发和量子保密通信的投资和推动力度差异。量子测量领域也是欧美企业数量最多，共有 80 家，全球占比超过 60%，中国量子测量相关企业共有 22 家，约为美国一半。PQC 领域欧美平分秋色，共有相关企业 47 家，中国 PQC 企业数量仅有 4 家，数量差距明显，未来 PQC 技术产业全球竞争中恐难与欧美比肩。

¹³ 企业地区分布统计中欧洲包含俄罗斯、英国和爱尔兰，企业数量统计包含上中下游相关性较强企业。

从企业国家分布看，美国共有 158 家量子信息相关企业，全球占比超过四分之一。其中，谷歌、IBM、英特尔等科技企业已成为量子计算领域业界标杆，IonQ、Quantinuum、PsiQ、AOSense 等初创企业创新驱动能力突出，在量子信息技术产业中拥有较为明显的先发优势。中国量子信息相关企业共有 103 家，但科技企业投入推动力度，供应链企业支撑保障能力，以及初创企业创新成果等方面还有一定差距。全球量子信息领域企业数量较多的国家还有加拿大、英国、德国、法国、日本、荷兰等，在未来技术产业发展中也拥有较强竞争力。



来源：中国信息通信研究院（截至 2023 年 9 月）

图 8 量子信息领域企业投融资事件与金额变化趋势¹⁴

全球量子信息企业投融资事件与金额年度变化趋势如图 8 所示。从投融资事件数量看，2017 年起，企业投融资事件数量开始出现明显增长，与企业数量爆发式增长的时间趋势吻合。大量初创企业获得了政府的赠予投资（Grant）和不同轮次的股权融资等风险投资。美国

¹⁴ Grant 为赠与投资，主要来自政府部门和高校等，IPO 及并购包含上市、增发和收购等多种类型，风险投资包含不同轮次融资，其他投资包含战略投资和贷款等。部分投融资事件未披露具体金额。

DOE、NSF 和国防部（DOD）等政府部门的合同赠予投资占比较高，从 2018 年开始，每年都有约 20 笔赠予，占全部投融资数量 20%左右。风险投资中，种子轮和 A 轮占比最高，合计每年约占整体投融资事件数量的 40%~50%，孵化器（Incubator）数量也在逐渐增加。可以看出，资本市场对量子信息领域关注度持续提升，但大多数企业仍处于早期投资阶段。从投融资金额规模看，过去 5 年资本市场对量子信息领域企业的投资同样经历了一轮爆发式增长，2021 年和 2022 年均超过 20 亿美元量级，超过了过去十年的总和。近两年来，量子信息初创企业获得的投融资数量和金额开始出现一定回落。一方面有全球疫情、经济衰退和美元加息等宏观层面影响，另一方面也有量子计算等初创企业技术产品和投资收益未达市场预期等具体原因。

表 2 全球量子信息初创企业十大融资事件（金额降序）

公司	国家	技术领域	融资额（亿美元）	时间
SandboxAQ	美国	量子软件/PQC	5.00	2022
PsiQuantum	美国	量子计算	4.50	2021
IonQ	美国	量子计算	3.50	2021
Rigetti Computing	美国	量子计算	3.45	2022
Arqit	英国	量子通信	3.45	2021
IonQ	美国	量子计算	3.00	2021
Quantinuum	英国	量子计算	3.00	2021
D-Wave Systems	加拿大	量子计算	3.00	2022
PsiQuantum	美国	量子计算	2.30	2020
本源量子	中国	量子计算	1.45	2022

来源：麦肯锡《量子技术监测》（2023 年 4 月）

美国麦肯锡咨询公司 2023 年 4 月发布《量子技术监测》报告¹⁵,

¹⁵<https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/quantum%20technology%20sees%20record%20investments%20progress%20on%20talent%20gap/quantum-technology-monitor-april-2023.pdf>

统计量子信息领域初创企业十大融资事件如表 2 所示。其中美国企业占据 7 席，市场表现最为活跃，SandboxAQ、Quantinuum 等从大型科技企业分拆的量子信息领域独立企业，获得大量资金投入，IonQ、D-Wave 等欧美初创企业也从资本市场获得了大笔研发资金。我国仅有本源量子在 2022 年完成 B 轮 10 亿元人民币融资上榜，资本市场和社会投融资对量子信息企业的支持力度有待进一步加强。

二、量子计算领域研究与应用进展

量子计算技术体系如图 9 所示，硬件、软件、算法是三大支柱，云平台是集成三者面向用户提供服务的应用与产业生态汇聚点。



来源：中国信息通信研究院

图 9 量子计算技术体系框架

当前，量子计算硬件包含逻辑门型量子计算机、专用量子计算机和基于经典计算的模拟器等主要类型。其中，逻辑门型量子计算机是

通往大规模可容错通用量子计算的主流发展方向，也是业界研究关注重点；玻色采样、相干伊辛和量子退火等量子计算模型和系统可能在专用计算复杂问题中产生算力优势；基于经典计算的量子计算模拟器主要用于算法研究和验证。

（一）硬件多技术路线并行发展，创新成果不断涌现

量子计算硬件目前有多种技术路线，处于并行发展阶段，大致可以分为两大类，一是基于微观结构形成分立能级系统的“人造粒子”路线，如超导和硅半导体，二是直接操控微观粒子的天然粒子路线，如离子阱、光量子和中性原子。近年来，量子计算科研攻关全球加速发展，各方你追我赶竞争激烈。表 3 梳理了五种技术路线的关键指标发展现状概况，其中各项指标为不同研发机构、技术方案和样机系统的代表性成果汇总，部分指标基于专家意见给出数量级估计。

表 3 量子计算主要技术路线关键指标现状

	超导	离子阱	光量子	硅半导体	中性原子
量子比特规模 (光子/原子/量子点)	433 (IBM)	37 (华翊量子)	255 (中科大)	16 (TUDelft)	1180 (Chicago)
单比特逻辑门 保真度	99.99 % (Maryland)	99.9999 % (Oxford)	99.84 % (华中科大)	99.96 % (SQC)	99.9953% (精测院)
双比特逻辑门 保真度	99.92 % (MIT)	99.92 % (NIST)	99.69 % (华中科大)	99.65 % (TUDelft)	99.5 % (Harvard)
SPAM读取 保真度	99.2 % (ETH Zurich)	99.9904 % (Quantinuum)	98 % (赋同科技)	97 % (Princeton)	99 % (QuEra)
T1时间	1.2 ms (Maryland)	数百 s 量级	数百 μ s 量级	数百 ms 量级	数百 s 量级
T2时间	1.48 ms (Maryland)	5500 s (清华)	数百 μ s 量级	0.23 ms (UNSW)	40 $\pm$ 7 s (Atom Computing)
门速度	24 ns (中科大)	μ s~ms 量级	ns~ μ s 量级	ns~ μ s 量级	数百 ns 量级

来源：中国信息通信研究院

超导路线基于超导约瑟夫森结形成扩展二能级系统，包括电荷量子比特、通量量子比特、相位量子比特等种类，以及 Transmon、Xmon、

Fluxonium 等构型,因其可扩展、易操控和集成电路工艺兼容等优势,受到众多科研机构、科技巨头和初创企业重视。2023 年超导量子计算原型机指标持续提升,IBM 的 433 位超导量子比特处理器 Osprey 在其云平台上线¹⁶;中科大在 66 位超导量子处理器“祖冲之二号”基础上新增 110 个耦合比特控制接口,使可操纵比特数达到 176 位¹⁷;Rigetti 推出 84 位量子比特单芯片量子处理器 Ankaa-1¹⁸。基于超导路线的科研成果亮点频出,苏黎世理工基于超导量子电路完成无漏洞贝尔实验¹⁹;谷歌使用超导量子处理器模拟操控非阿贝尔任意子,并通过编码创建新型量子纠缠态²⁰;中科院物理所利用 41 位超导量子芯片“庄子”模拟“侯世达蝴蝶”拓扑物态²¹。超导技术路线的比特数量、操控精度和相干时间等关键指标提升迅速且发展较为均衡,是有望率先实现量子纠错和突破杀手级应用的“种子选手”。

硅半导体路线通常利用硅同位素量子点结构中的电子自旋构造量子比特,采用硅锗异质结、砷化镓和金属氧化物半导体等衬底材料,具有制造和测控与集成电路工艺技术兼容等优点。2023 年亮点成果主要包括新型比特构型设计、操控方案和芯片比特数量增长等方面。Intel 发布²²的 12 位硅基自旋量子芯片 Tunnel Falls,成为硅半导体路线产品的最新纪录。新南威尔士大学报道²³设计了一种电信号控制的

¹⁶ <https://quantum-computing.ibm.com/services/resources?tab=systems>

¹⁷ <https://www.chinadaily.com.cn/a/202303/08/WS6407d466a31057c47ebb2f6e.html>

¹⁸ <https://medium.com/rigetti/introducing-the-ankaa-1-system-rigetti-s-most-sophisticated-chip-architecture-unlock-s-a-ab3f05e3c264>

¹⁹ <https://www.nature.com/articles/s41586-023-05885-0>

²⁰ <https://www.nature.com/articles/s41586-023-05954-4>

²¹ <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.131.080401>

²² <https://www.intel.com/content/www/us/en/research/quantum-computing.html>

²³ <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.add9408>

新型触发器（flip-flop）硅量子比特。休斯研究实验室提出²⁴硅基自旋量子比特编码的通用控制新方法，中科大实现²⁵硅基自旋量子比特的超快操控，自旋翻转速率超过 1.2 GHz。硅半导体路线主要得到 Intel 等半导体制造商支持，由于同位素材料加工和介电层噪声影响等瓶颈限制，比特数量和操控精度等指标进展缓慢，在竞争中难言优势。

离子阱路线利用电荷与磁场间所产生的交互作用力约束带电离子，通过激光或微波进行相干操控，具有比特天然全同、操控精度高和相干时间长等优点。近年来，离子阱结构设计不断优化，发展出四极杆阱、刀片阱、芯片阱等新构型，囚禁离子数量不断提升。2023 年主要进展包括全连接比特数量增长和逻辑门操控保真度提升等方面。Quantinuum 宣布²⁶其 32 位全连接量子比特离子阱原型机 Model H2 的单比特和双比特量子逻辑门保真度达到 99.997% 和 99.8%，量子体积指标达到 524288²⁷，成为业界最新纪录。华翊量子发布²⁸37 位量子比特离子阱原型机 HYQ-A37，逻辑门保真度等指标稍逊一筹。离子阱路线的天然全同粒子特性在相干时间和保真度等方面有优势，但比特规模扩展难度大，光学测控系统复杂等技术瓶颈和工程挑战十分明显，在技术路线竞争中能否领先有待观察。

光量子路线可利用光子的偏振、相位等自由度进行量子比特编码，具有相干时间长、室温运行和测控相对简单等优点。根据是否支持逻辑门和量子纠错等操作，可进一步分为逻辑门型和非逻辑门型两类，

²⁴ <https://www.nature.com/articles/s41586-023-05777-3>

²⁵ <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.nanolett.3c00213>

²⁶ <https://www.quantinuum.com/hardware/h2>

²⁷ <https://www.quantinuum.com/news/quantinuum-h-series-quantum-computer-accelerates-through-3-more-performance-records-for-quantum-volume-217-218-and-219>

²⁸ <https://hyqubit.com/newsinfo/5843439.html>

其中逻辑门型光量子计算是未来实现通用量子计算的发展方向，而非逻辑门型光量子计算，如玻色采样和相干伊辛系统等，可用于组合优化和图论问题求解等专用计算问题。2023 年，中科大联合团队发布²⁹255 光子的“九章三号”光量子计算原型机，进一步提升了高斯玻色采样速度和量子优越性。玻色量子发布³⁰了 100 量子比特相干光量子相干伊辛机“天工量子大脑”，并与中国移动合作开展图像渲染算力调度优化等任务的可行性验证³¹。未来，非逻辑门型光量子计算有望在组合优化等专用问题求解中展示实用化优势，逻辑门型光量子计算则仍需突破光子间相互作用弱，双比特逻辑门构建困难和大规模光子集成等技术瓶颈，才能体现竞争优势。

中性原子路线利用光镊或光晶格囚禁原子，激光激发原子里德堡态进行逻辑门操作或量子模拟演化，相干时间和操控精度等特性与离子阱路线相似，在规模化扩展方面更具优势。近年来，中性原子路线的研究与实验发展迅速，大有后来居上之势。10 月，《自然》同期发表三篇中性原子量子计算和纠错最新成果。加州理工展示³²“量子橡皮擦”纠错新方法，使激光照射下的错误原子发出荧光实现错误定位以便进一步纠错处理，系统纠缠率提升 10 倍。普林斯顿大学³³基于相似擦除原理，将门操作错误转化为擦除错误，有效提升逻辑门保真度。哈佛大学³⁴使用基于里德堡阻塞机制的最优控制门方案，在 60 个铷原子阵列实现 99.5% 的双比特纠缠门保真度，超过了表面码纠错阈值。

²⁹ <https://journals.aps.org/prl/issues/131/15>

³⁰ <https://www.qboson.com/web/product>

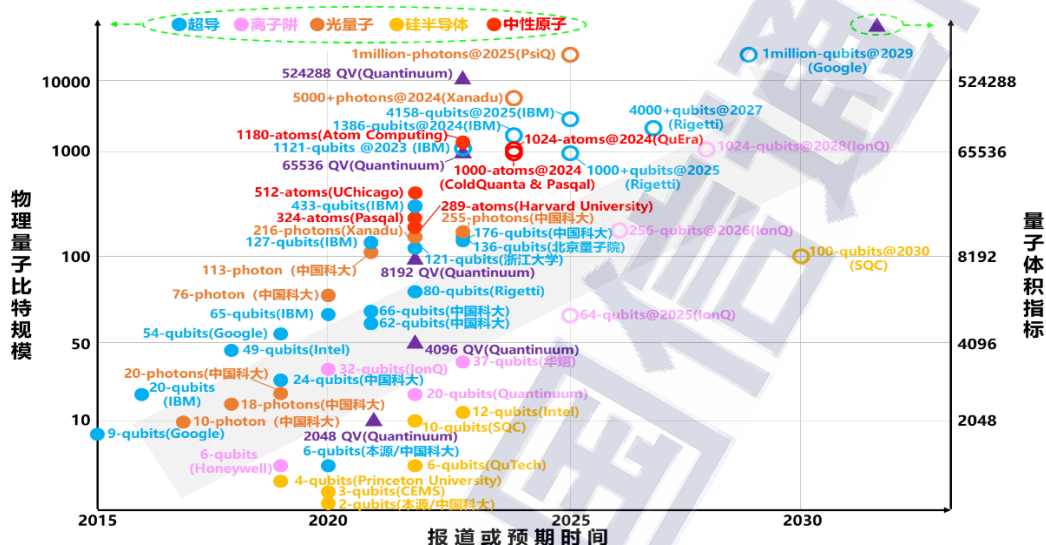
³¹ <https://doi.org/10.1007/s11433-023-2147-3>

³² <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06516-4>

³³ <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06438-1>

³⁴ <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06481-y>

美国 Atom Computing 公司发布³⁵1225 原子阵列和 1180 量子比特的中性原子量子计算原型机，预计 2024 年上市。中性原子路线有望在规模扩展和量子模拟应用等方面取得更多突破，已成为在量子计算技术路线竞争中异军突起的一匹“黑马”。



来源：中国信息通信研究院

图 10 量子计算比特数和量子体积指标发展趋势

近年来量子计算主要技术路线竞争激烈，比特数（光子/原子数）和量子体积指标持续提升，发展演进趋势如图 10 所示。超导、中性原子和离子阱技术路线是迈向通用量子计算的有力竞争者，逻辑门型光量子计算和硅半导体技术路线需要取得重大技术和工程突破才能保持竞争实力。当前量子计算硬件性能水平，距离实现大规模可容错通用量子计算还有很大差距，仍需业界长期艰苦努力攻关。

³⁵ <https://atom-computing.com/quantum-startup-atom-computing-first-to-exceed-1000-qubits/>

（二）量子纠错突破平衡点，环境测控系统仍有瓶颈

量子纠错（QEC）的原理是通过使用多个物理比特编码一个逻辑比特，通过增加信息编码空间的冗余度，使受到环境噪声或退相干影响的量子态可以被识别和区分，并通过纠错操作恢复出原始量子态。QEC 是使量子计算具备理论可行性的底层解决方案，也是支持大规模量子逻辑门操作，实现通用量子计算的必要环节。量子态的不可克隆性、相干性以及差错连续性等决定了 QEC 与经典纠错有本质差异，量子比特当前产生的错误率比经典比特更高，错误类型也更加广泛。自 QEC 概念提出³⁶以来，已产生了多类基于不同思想构造的 QEC 编码方案，其中 1996 年提出的稳定子码³⁷是其中代表，涵盖了表面码、颜色码等多种方案，表面码是目前研究和实验验证热点，主要优势在于高容错阈值、仅需近邻比特间作用、多技术路线适用等，但也存在物理比特编码冗余度较高等局限。

由于纠错编码的复杂性、不可逆性和环境噪声等影响，QEC 实验一度面临“越纠越错”的窘境。突破 QEC 的盈亏平衡点，实现纠错编码规模与相干时间、错误率等性能指标的正增益，对实现逻辑量子比特具有里程碑意义，近期也取得了多项突破性进展。2023 年 2 月，谷歌报道³⁸首次越过 QEC 规模与收益平衡点，证明提升纠错编码规模后可降低错误率，验证了量子纠错的现实可行性。3 月，南方科技大学报道³⁹以离散变量编码逻辑量子位突破 QEC 盈亏平衡点，延长量子

³⁶ <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.54.1098>

³⁷ <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRevA.54.1862>

³⁸ <https://www.nature.com/articles/s41586-022-05434-1>

³⁹ <https://www.nature.com/articles/s41586-023-05784-4>

比特寿命约 16%。耶鲁大学报道⁴⁰利用实时 QEC 方案超越盈亏平衡点，实现逻辑量子比特寿命增加一倍。

虽然 QEC 突破盈亏平衡点实验具有重要里程碑意义，但现有 QEC 技术方案的纠错效率、容错阈值，以及量子计算硬件的逻辑门保真度、可相干操控比特数等指标，距离实现逻辑量子比特操控和容错计算仍有很大差距。QEC 未来发展的主要方向包括，优化利用高维度量子资源实现逻辑量子比特的量子纠错编码方案，实现对特定噪声免疫的量子态调控方案，研究分布式量子纠错架构，在考虑计算资源的同时探究切合实际的纠错性能评价指标，实现带量子纠错的量子计算优越性等。实用化 QEC 已经成为全球量子计算业界关注和攻关突破的重点方向，未来还将有更多进展和成果涌现。

量子计算中的叠加和纠缠等状态极易受到外界影响而退相干，需要极低温、高真空等环境系统支持，同时对大规模量子比特的微波或光学调控与测量，也需要高精度和高集成度的测控系统支持。环境与测控系统是各种技术路线的量子计算原型机必不可少的使能组件，也是当前提升样机工程化水平面临的重要技术瓶颈。

稀释制冷机采用多级制冷机制，通常使用脉管制冷机降温至液氮温区（~4K），之后基于氦-3 和氦-4 混合液的浓缩相和稀释相分离和循环转换进一步降温，将样品区域温度降低至 mK 量级，满足超导和硅半导体技术路线量子计算芯片的环境温度要求。稀释制冷机的技术难点主要在于前级预制冷所需的脉冲管和冷头设备制造，极低温区焊

⁴⁰ <https://www.nature.com/articles/s41586-023-05782-6>

接和检漏工艺，以及样品空间和制冷量提升等方面。稀释制冷机作为量子计算的核心装备，提升国产化自主供给能力对于保障科研探索与工程研发意义重大。近年来，国内相关单位持续研发攻关，在样机产品研制方面取得重要进展。2023 年，中科院物理所、中船重工鹏力、本源量子等单位相继发布了稀释制冷机样机和相关产品，技术指标与国外商用产品接近。未来，还需进一步提升样品空间和制冷量，以及设备集成化水平，支持量子处理器大规模扩展。

真空腔是离子阱和中性原子技术路线的量子计算机必需的运行环境，主要功能是消除真空腔内的气体分子，降低其与离子或原子的碰撞概率，避免离子或原子脱离囚禁，从而提升离子阱或原子阵列囚禁稳定性和相干时间。真空腔主要技术难点在于高性能吸气剂泵和分子泵等关键组件的研制，以及提升气体抽速及腔内真空度等指标。未来进一步提升真空度可以使用更高复杂度和成本的低温泵系统。2022 年 11 月，启科量子发布⁴¹了离子阱用低温真空系统<Aba|Qu|Cryovac>，将低温、真空、电气、光学四大核心要素进行有机整合，为样机系统研制提供环境保障。

量子计算测控系统主要用于生成操控和测量量子比特的物理信号，按照技术路线的不同需求大致可分为两类。一是离子阱、中性原子和光量子等技术路线所需的光学测控系统，通过激光囚禁或激发天然原子，实现量子比特操纵，再通过单光子探测或荧光成像等方案实现量子态测量和读出。二是超导、半导体等技术路线所需的微波测控

⁴¹ <https://www.quantumchina.com/newsinfo/4631068.html>

系统，通过产生微波信号激励和测量量子比特状态。测控系统属于传统技术领域，相对而言难度较低，在国内外也有多家可提供相关设备产品。2023 年，苏黎世仪器发布 QCCS 测控系统，科大国盾推出 ez-Q[®] Engine 超导量子计算操控系统，中微达信推出 ZW-QCS1000 可支持数百位超导和硅半导体量子计算的测控系统。

未来，量子计算的比特数量规模和操控精度要进一步提升，会对环境与测控系统提出更为苛刻的要求。稀释制冷机支持数千比特量级的布线和制冷，真空系统迈向极高真空环境（ $<1\text{E-}12\text{ mbar}$ ）仍有很大工程挑战性，激光和微波测控系统也需要提出新型测控架构和进一步提高集成度。当前多种量子计算技术路线的并行发展，不同技术路线对于测控系统的需求各有差异，也导致测控系统、低温电子学组件和光电元器件等量子计算供应链的碎片化，上游供应商还难以聚焦某种技术路线开展测控系统和核心组件的集中攻关和性能提升。

（三）软件与云平台发展迭代迅速，成熟度有待提升

量子计算软件是连接使用者与硬件的关键纽带，量子计算机软硬件的结合，有望为多行业领域研究人员提供理论研究与应用探索方面的有力支持。量子计算软件需要满足量子计算的底层理论与算法逻辑，提供面向不同技术路线和硬件方案的量子指令集，编译功能与中间表示，并提供基于开源的编程语言框架，特异性与专业性较强，目前处于设计开发与生态构建的早期阶段。业界在量子计算编译软件、应用开发软件、测控软件、EDA 软件等多层次开展布局。

量子计算编译软件用于规范量子编程边界并保证编译正确执行，

提供完善的、体系化的语法规则用于协调和约束量子操作以及经典操作。2023 年，Pasqal 发布中性原子量子计算软件 **Pulser Studio**⁴²，能够以图形方式构建量子寄存器并设计脉冲序列。应用开发软件提供创建和操作量子程序的量子计算工具集、组件与算法库，支持开发者编写、运行、检验量子算法和程序。Intel 发布量子计算开发平台 **SDK 1.0**⁴³，QC Ware 推出量子化学软件 **SaaS Promethium**⁴⁴，Quantum Brilliance 发布量子计算开发工具包 **Qristal SDK**⁴⁵，涵盖经典量子混合应用、化学模拟以及自动驾驶等用例。量子计算测控软件提供量子芯片控制、处理、运算等功能，同时支持测量结果反馈以及芯片校准。2023 年，苏黎世仪器发布 **LabOne Q** 操控软件，为量子计算提供完整测控框架，启科量子发布离子阱环境控制系统 **<Aba|Qu|ENV>**⁴⁶。芯片 EDA 软件实现量子芯片自动化设计、参数标定与优化、封装设计等功能。亚马逊推出开源软件平台 **Palace**⁴⁷，可完成复杂电磁模型模拟并支持量子计算硬件设计。量旋科技发布超导芯片 EDA 软件 **天乙**⁴⁸。

量子计算软件作为连接硬件和承载应用的中间环节，在硬件系统多种技术路线并行发展尚未融合收敛，应用探索广泛开展但尚未实现重大突破的情况下，难以完全明确目标需求和确定技术架构方案，仍处于开放式探索阶段，技术水平属于工具级，与经典软件成熟度相去

⁴² <https://www.pasqal.com/articles/pulser-s-1>

⁴³ <https://www.intel.com/content/www/us/en/newsroom/news/intel-releases-quantum-sdk.html#gs.riwex3>

⁴⁴ <https://www.hpcwire.com/2023/04/17/qc-ware-launches-promethium-a-quantum-chemistry-saas-targets-hybrid-world-near-term/>

⁴⁵ <https://www.cinpresswire.com/article/638267292/quantum-brilliance-releases-open-source-software-for-miniature-quantum-computers>

⁴⁶ <http://www.qudoor.com/index.php?c=show&id=139>

⁴⁷ <https://aws.amazon.com/cn/blogs/quantum-computing/aws-releases-open-source-software-palace-for-cloud-based-electromagnetics-simulations-of-quantum-computing-hardware/>

⁴⁸ <https://www.spinq.cn/newsDetail/a915d803-d94d-485e-b6ad-ee6356062b98>

甚远。未来量子计算软件发展需要在量子电路编译优化、模块化程序研究和量子-经典混合算法协同等方面进一步探索和提升。



来源：中国信息通信研究院

图 11 量子计算云平台功能架构图

量子计算云平台将量子计算与经典云服务融合，通过网络提供量子计算算力，是未来量子计算用户服务的主要形式。量子计算云平台的功能架构如图 11 所示，可划分为基础设施层、平台层、服务层和配套的运维管理与安全服务功能等主要组成部分。基础设施层中的外围设施层为量子计算硬件提供环境保障，物理资源层主要包括量子计算机、量子模拟器和经典云计算资源，虚拟资源层则主要由量子计算虚拟机、云计算虚拟机、虚拟网络等功能模块组成，资源管理层负责物理机、虚拟机、存储和网络等资源管理和任务调度。平台层主要完成程序开发和编译功能。服务层提供用户和开发者的访问接口，并提

供对服务目录和实例的管理功能，应用开发层主要通过应用开发软件提供量子计算应用服务。运营管理主要实现用户服务和运行维护两个层面的管理功能。安全服务主要实现接入安全、软件安全、虚拟化安全、硬件安全和数据安全等功能。

表 4 国内外代表性量子计算云平台发展概况

硬件类型	超导			离子阱	光子	半导体/超导	退火	云平台服务供应		
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, OQC, 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					超导/离子阱		光子	中性原子	模拟器
平台提供者	中科大 & 国盾量子	北京量子院 & 物理所	本源量子	浙大	中国移动 & 中电科	百度	弧光量子	图灵	武汉量子院	华为 阿里
平台名称	量子计算云平台	quaifu	本源量子云	太元一号	“五岳”量子计算云平台	量易伏	弧光量子云平台	SoftQubit	酷原量子云	HiQ 太章
量子比特数	176; 12	136; 18; 10	12	10	待上线	8; 10; 1	66; 11	—	待上线	—

来源：中国信息通信研究院

目前，国内外众多研究机构和企业发布了不同类型的量子计算云平台，如表 4 所示，近期发展迭代迅速。2023 年，加州理工大学、斯坦福大学、谷歌等联合推出⁴⁹BlueQubit 量子计算开发平台，提供超导量子硬件。Pasqal 推出⁵⁰中性原子量子计算平台 Quantum Discovery，协助用户探索中性原子量子计算应用。日本量子计算联合研究小组启动⁵¹基于 64 位超导量子计算机云平台服务，用户可通过签订合作协议接入服务。Strangeworks 展示⁵²云平台多种新工具以及使用优化方法。北京量子院⁵³夸父量子计算云平台上线了具有 136、18 和 10 位量子比

⁴⁹ <https://www.bluequbit.io/>

⁵⁰ <https://quantumdiscovery.pasqal.cloud/>

⁵¹ https://www.riken.jp/pr/news/2023/20230324_1/index.html

⁵² <https://strangeworks.com/press/strangeworks-announces-general-availability-of-advanced-compute-platform>

⁵³ <https://quaifu.baqis.ac.cn/#/home>

特的三个超导量子芯片。中科大⁵⁴上线 176 比特“祖冲之号”量子计算云平台。中国移动、中国电科等联合发布⁵⁵“五岳”量子计算云平台。本源量子等多家单位⁵⁶共同推出量超融合计算平台。

基于量子计算云平台或样机实地部署等方式，推动量子计算与超级计算机等经典算力的融合，正成为研究探索热点。通过将复杂计算任务进行分解，在量子计算和超算平台之间进行联合调度与协同处理，可以发挥不同算力平台的特色优势，相关混合计算架构、量超融合算法和协同调度机制等研究，开始收到业界各方关注。

依托量子计算云平台推动多类型硬件接入服务、软件和编程框架迭代与应用场景探索是重要发展方向。2023 年 5 月，量子信息网络产业联盟（QIIA）组织第一届量子信息技术与应用创新大赛，华为、弧光、本源等成员单位依托量子计算云平台组织多个赛道活动，有效促进了量子计算国产软硬件平台推广、应用探索和人才培育。

当前，国内外量子计算云平台发展仍处于起步阶段，硬件水平、服务模式以及功能架构等成熟度有限，距离提供商业价值的目标仍有较大差距。未来发展主要关注点包括：提升量子计算后端硬件技术与工程化水平；推动编程软件与框架持续演进，加快算法研究与应用探索，助力应用落地转化；开展功能框架与能力测评等标准研究，助力功能完善与服务提升，提高不同平台和硬件间的互操作性。

⁵⁴ <https://quantumctek-cloud.com/>

⁵⁵ https://www.cnii.com.cn/rmydb/202308/t20230819_496801.html

⁵⁶ <https://qcloud.originqc.com.cn/zh/qhComputing/home>

（四）应用探索广泛开展，组合优化或有望率先实用

随着量子计算硬件进入数百位量子比特的中等规模含噪量子处理器（NISQ）时代，在随机线路采样和高斯玻色采样问题中完成量子计算优越性的实验验证，业界普遍期待能够在 NISQ 阶段，实现具有实际社会经济价值的计算困难问题指数级加速求解和应用，为量子计算技术产业发展带来从量变到质变的飞跃。当前，基于逻辑门型量子计算处理器和各类专用机的应用案例探索在国内外广泛开展。近期，美国摩根大通、洛斯阿拉莫斯实验室和欧洲核子研究组（CERN）等机构和公司，发表⁵⁷了量子计算在金融、人工智能和高能物理等领域的应用探索和前景展望。量子计算应用探索的主要计算问题包括量子组合优化、量子模拟、量子人工智能和量子线性代数四大类型。

量子组合优化使用量子算法在大量可能方案中以更高效率和准确性找到最佳方案，被认为是当前有可能率先突破应用的方向之一。2023 年，Terra Quantum 和泰雷兹公司⁵⁸使用混合量子计算优化卫星任务规划，展示了改善卫星运行效用的潜力。英伟达、罗尔斯-罗伊斯和 Classiq 合作⁵⁹尝试将量子计算用于喷气发动机流体动力学计算以提升效率。Amerijet 和 Quantum-South 宣布⁶⁰利用量子计算实现飞机物流装载优化，提高货物装载率和航班收入。中国移动分别与玻色量子 and

⁵⁷ <https://www.nature.com/articles/s42254-023-00603-1>, <https://www.nature.com/articles/s43588-022-00311-3>, <https://arxiv.org/abs/2307.03236>

⁵⁸ <https://www.newswire.ca/news-releases/xanadu-and-rolls-royce-to-build-quantum-computing-tools-with-pennylane-881322368.html>

⁵⁹ <https://thequantuminsider.com/2023/05/23/nvidia-rolls-royce-and-classiq-use-quantum-computing-for-computational-fluid-dynamics-in-jet-engines/>

⁶⁰ <https://quantum-south.com/airlinecargo/quantum-south-identifies-alternatives-to-boost-amerijet-international-cargo-load-factor-by-up-to-30-with-cutting-edge-solution/>

本源量子合作⁶¹完成基于专用和通用量子计算真机的移动通信网络优化算法实验，验证了算法加速潜力与应用场景可行性。

量子模拟运用人工可控的量子系统模拟另外一个量子系统的性质和演化规律，应用范围涵盖能源、制药、化工和生命科学等多个领域。2023 年，IBM 报道⁶²在 127 位 Eagle 超导量子处理器上基于误差缓解技术和量子伊辛模型，无需量子纠错条件下实现对磁性材料简化模型的自旋动态和磁化特性模拟。德国尤利希研究中心⁶³利用量子计算机解决蛋白质折叠难题，提升寻找最低能量结构的成功率。牛津大学实现⁶⁴基于网格的量子计算机化学模拟，探索基态准备、能量估计和电离动力学等方面问题。IBM 和克利夫兰诊所合作⁶⁵，推出了医疗保健用量子计算机，加速生物医学领域量子计算应用研究。

量子人工智能将量子计算与人工智能相结合，旨在利用量子计算特性提升解决某些计算困难问题的效率，有望在机器学习、自动驾驶和机器视觉等应用领域中发挥作用。2023 年，谷歌联合团队报道⁶⁶在超分子复合物动力学模拟中引入量子机器学习算法，揭示复杂物理系统中原子相互作用，从而加速量子化学的科学研究。摩根大通和 QC Ware 联合⁶⁷开展使用量子深度学习的对冲金融风险研究，可更有效地训练预测模型。Zapata 等公司发布的共同研究⁶⁸表明混合量子生成人

⁶¹ <https://mp.weixin.qq.com/s/LPNIwofTnGrxLYaA7hQLSQ>

⁶² <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06096-3>

⁶³ <https://www.eurekalert.org/news-releases/977133>

⁶⁴ <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abo7484>

⁶⁵ <https://newsroom.ibm.com/2023-03-20-Cleveland-Clinic-and-IBM-Unveil-First-Quantum-Computer-Dedicated-to-Healthcare-Research>

⁶⁶ <https://phys.org/news/2023-01-algorithm-enables-simulation-complex-quantum.html>

⁶⁷ <https://www.hpcwire.com/off-the-wire/jpmorgan-chase-and-qc-ware-evolve-hedging-for-a-quantum-future>

⁶⁸ <https://www.benzinga.com/pressreleases/23/06/b32736504/zapata-foxconn-insilico-medicine-and-university-of-toronto-study-shows-promise-of-hybrid-quantum-g>

工智能生成的小分子比经典方案具有更理想特性。

量子线性代数包含多种量子算法和方法，可用于因式分解和采样搜索等计算困难问题，应用场景包含密码分析、数据挖掘、网络搜索等领域。2023 年，中国科大报道⁶⁹基于 144 模式的“九章二号”光量子计算原型机完成“稠密子图”和“Max-Haf”两类图论问题求解，实验证明了高斯玻色采样为搜索算法带来的加速。美国纽约大学⁷⁰提出了可大幅减少量子逻辑门数或步骤的超大规模因式分解量子算法方案，分解 n bit 质因数仅需 $\tilde{O}(n^{3/2})$ 逻辑门和运行 $\sqrt{n} + 4$ 次。

需要说明的是，虽然近年来各类量子计算应用探索案例和成果的报道层出不穷，颇有乱花渐欲迷人眼之势，但据同行评议的公开发表论文成果来看，大多属于算法原理和应用可行性的验证性报道，部分算法应用取得一定加速优势，但距离业界期待的指数级加速和算力飞跃相去甚远。换言之，量子计算尚未在实用化计算复杂问题中展现出有现实意义的量子计算优越性或指数级加速优势。究其原因，主要在于 NISQ 平台的相干操控比特数、逻辑门保真度和电路深度等硬件性能仍极为有限，难以支撑有明确加速优势的算法实施。以应用问题和算法研究的需求侧优化，迁就 NISQ 硬件水平的供给侧能力，难免巧妇难为无米之炊，提升硬件能力是突破应用的前提。

2023 年美国 Gartner 发布技术成熟度曲线，如图 12 所示，预测量子计算翻越了“过高期望”顶点，距离“生产力高原”仍需超过十年。如果 NISQ 平台在未来数年内一直无法实现“杀手级”应用落地

⁶⁹ <https://physics.aps.org/articles/v16/s64>

⁷⁰ <https://arxiv.org/abs/2308.06572>

突破，则量子计算技术产业发展恐将面临“幻灭之谷”的低潮期。



来源：Gartner: Hyper Cycle of Compute（2023 年 7 月）

图 12 2023 年 Gartner 量子计算技术成熟度预测

量子计算发展演进可大致分为三个阶段，一是实现量子计算优越性验证（已完成）；二是能够在若干具有实际应用价值的计算难题中展现量子计算优越性并带来社会经济价值的专用量子计算机（下一步重点攻关目标）；三是大规模可容错通用量子计算机（远期目标，尚无实现时间预期）。要实现“杀手级”应用突破，关键还在于提升量子处理器的硬件性能。根据业界专家分析，专用量子计算机“杀手级”应用突破，也可大致分为三个阶段。以超导路线为例，一是相干操控比特数达数百位规模，逻辑门保真度达 99.9% 以上时，可在运算复杂度和精度要求不高的组合优化场景中率先落地，有望未来 3-5 年实现；二是相干操控比特数达数千位规模，逻辑门保真度达 99.99% 以上时，可实现量子模拟在多个领域的落地应用，有望未来 5-10 年实现；三是相干操控比特数达数万位规模，逻辑门保真度满足量子纠错要求时，可在密码分析等领域产生重要影响，预计还需 10 年以上。

(五)量子计算产业链初具雏形，标准化成布局热点

[illegible]

来源：中国信息通信研究院

图 13 量子计算产业链与国内外代表性企业概况

量子计算产业链的上游主要涉及环境支撑系统、测控系统、各类光电元器件与线缆连接器等设备组件，是支持各种技术路线开展原型机工程化研制的基础保障。目前，多种量子计算处理器技术路线并行发展，对于上游供应链的需求各不相同，例如稀释制冷机主要用于超导和硅半导体路线，真空系统主要用于离子阱和中性原子路线，高性能激光器和单光子探测器主要用于光量子路线。供应链需求的多元化

和碎片化是当前量子计算技术产业发展的一大特征，限制了上游供应链企业的技术攻关和规模化发展。国内外对比来看，欧美在量子计算上游支撑保障系统和元器件等方面，具有传统产业的积累优势，供应链企业数量、产品丰富程度和自主供给水平占据优势。我国虽有部分企业开展布局和推出相关产品，但在加工制造设备、高性能光电元器件等一些关键环节，仍需要进一步提升自主化水平，以保障量子计算技术研究、应用探索和产业培育的可持续发展。

量子计算产业链中游主要由硬件和软件研发制造企业构成，量子计算原型机研制是产业链的核心环节。目前，超导、离子阱、光量子、硅半导体和中性原子是产业界关注的主要技术路线，其中超导路线受到热捧，国内外科技企业和初创企业集中度最高，硅半导体和拓扑技术路线也得到英特尔和微软等科技企业支持，离子阱、中性原子和光量子技术路线以初创企业推动为主。近年来，量子计算编译软件、开发软件和应用软件等方面的创新创业高度活跃，涌现出大量初创企业，成为推动量子计算生态建设和应用场景探索的重要力量。国内外对比来看，我国在量子计算主要硬件技术路线均有企业布局，超导和离子阱路线关注程度较高，但整体企业数量、规模和创新成果，以及科技企业在硬件攻关方面投入推动力度，相比欧美同行仍有较大差距。量子计算软件生态方面，国内企业相对较少，在更新迭代速度、用户数量和开源社区影响力等方面，和国外科技企业也有差距。

量子计算产业链下游包括面向用户提供服务的量子计算云平台企业和在各领域开展应用探索的行业企业。目前，以 IBM、亚马逊、微软等科技企业为代表的量子计算云平台，在后端量子计算硬件丰富

程度、软件框架完备性、商业化运营模式等方面，已成为业界标杆。未来量子计算云平台构建后端多种技术路线硬件的支撑能力，实现编译指令、中间表示和编程框架等层面的互联互通，是重要发展方向。量子计算的潜在算力优势受到金融、军工、航空航天、汽车、制药等众多行业的欧美领军企业的高度重视，行业企业与量子计算企业联合开展应用探索已蔚然成风。对比来看，我国量子计算云平台企业在后端量子计算硬件水平、平台应用活跃度和商业化服务探索等方面，仍需进一步追赶。我国重点领域的行业企业对于量子计算应用探索的关注和投入有待进一步加强。

在量子计算技术产业快速发展的同时，技术标准化也开始成为国内外标准化组织研究布局的热点。国际标准方面，国际标准化组织和国际电工委员会（ISO/IEC）JTC1 成立了量子信息工作组（WG14），开展了量子计算术语和词汇标准研究，还在进一步讨论成立量子技术联合技术委员会（JTCQ）。国际电信联盟（ITU-T）的网络量子信息技术焦点组（FG-QIT4N）完成了盲量子计算和分布式量子计算等应用案例研究讨论。电气与电子工程师协会（IEEE）近期立项了多个量子计算标准项目，涉及术语定义、性能基准、功能架构、算法开发和能效测试等多个方面，发展趋势值得高度关注。国内标准方面，全国量子计算与测量标准化技术委员会（TC578）组织开展了多项量子计算标准预研，2023 年发布我国首个量子计算国家标准 GB/T 42565-2023《量子计算术语和定义》，近期讨论推动多个国家标准和研究课题的立项。全国信息技术标准化技术委员会成立了量子信息标准工作组。目前，量子计算技术、产品和应用的成熟度还非常有限，相关标准化

工作应以基础、功能和框架性研究为主。如果仓促针对特定技术路线或具体系统推动标准制定，可能导致标准内容与技术创新的发展脱节，甚至是对技术产业演进的负面影响，不利于行业整体发展。

三、量子通信领域研究与应用进展

（一）QKD 科研成果亮点纷呈，实验系统指标获提升

量子通信领域的量子密钥分发（QKD）技术初步实用化，多种协议类型的 QKD 系统在国内已经实现商用，但商用 QKD 系统的性能仍有明显瓶颈，例如，单跨段现网光纤传输距离通常在数十 km 范围，密钥成码率通常为数 kbps 至数十 kbps 量级。进一步提升 QKD 系统的传输距离和密钥成码率，对于远距离传输、组网和高带宽加密业务应用等具有重要意义，也是提升 QKD 技术实用化水平，破解应用推广与产业发展困境的必由之路。

制备-测量式 QKD 可采用离散变量(DV)协议(如诱骗态 BB84)和连续变量(CV)协议(如高斯调制相干态)等实现，是商用化 QKD 系统的主要技术方案。量子态编解码可利用光信号的不同自由度实现，如偏振、相位、相邻脉冲间的位置和相位差等。制备-测量式 QKD 的密钥成码率与传输效率相关，难以突破单跨段 500km 光纤传输距离极限。此外，QKD 接收端探测器的不理想特性可能导致侧信道安全漏洞，成为系统现实安全性的风险点。

2018 年提出的双光场(TF)协议采用两端制备-中心测量式架构，可以消除探测器引入的侧信道安全漏洞，同时将理论成码率提高到与传输效率的平方根相关，突破量子信道容量的 PLOB 界限。近年来，

随着发送或不发送（SNS）协议、双向经典通信（TWCC）和主动奇偶校验等协议和方案的改进，TF-QKD 已经成为业界公认的下一代远距离、高安全性 QKD 技术方案，也是提升系统极限传输能力的研究热点，代表性 QKD 实验系统的传输距离提升趋势如表 5 所示。

表 5 近年来 QKD 实验系统传输距离提升趋势

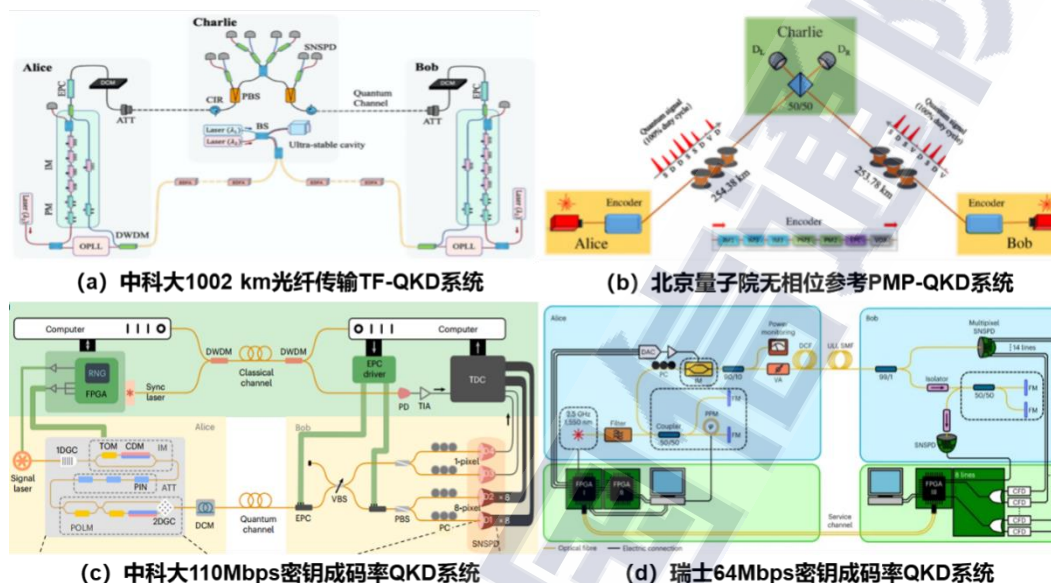
协议	类型	距离/损耗	密钥成码率（bps）	时间	机构
BB84	实验室	421 km	6.5	2018	日内瓦大学
TF	实验室	90.8 dB	0.045	2019	东芝欧研
TF	实验室	502 km	0.118	2020	中科大
TF	实验室	509 km	0.269	2020	中科大
TF	实验室	605 km	0.97	2021	东芝欧研
TF	现网	511 km	3.45	2021	中科大
TF	实验室	658 km	0.092	2022	中科大
TF	实验室	830 km	0.014	2022	中科大
PMP	实验室	508 km	42.64	2023	北京量子院
TF	实验室	615km	0.32	2023	北京量子院
TF	实验室	1002 km 499 km	0.0034 47.9	2023	中科大

来源：中国信息通信研究院（截至 2023 年 10 月）

2023 年，中科大团队报道⁷¹了采用 SNS-TF-QKD 协议、主动奇偶校验方法、双波段相位估计和超低噪声超导纳米线单光子探测器（SNSPD）的 1002km 系统传输实验，如图 14（a）所示，密钥成码率为 0.0034bps，首次将 QKD 系统的光纤极限传输距离提升到千公里量级，200km 距离的密钥成码率可达 47kbps。TF-QKD 的中间探测端借助两端信号的单光子干涉结果作为有效探测事件，需要两个发送端独立激光器的波长和相位严格匹配。系统在传输信道之外还需要相位参考光信道，以实现基于参考光测量的相位跟踪和锁定，降低了现网

⁷¹ <https://doi.org/10.1103/physrevlett.130.210801>

部署的实用性。北京量子院团队提出⁷²异步配对探测符合计数和无参考光信道的开放式 PMP-QKD 架构，如图 14（b）所示，简化了系统配置提升了实用化水平，在 508km 光纤距离实现了 42.64 bps 成码率。



来源：Phys.Rev.Lett. 130, 210801, 250801, Nature Photonics v17, p416–421, p422–426

图 14 2023 年 QKD 系统实验的代表性成果

提升 QKD 系统的密钥成码率指标是另一个重要研究目标。2023 年，中科大联合团队报道⁷³，基于 2.5GHz 工作频率系统、光源编码集成器件、8 通道集成 SNSPD 和高速实时后处理技术，如图 14（c）所示，实现了 10km 光纤距离诱骗态 BB84 协议 QKD 系统中 115.8 Mbps 密钥成码率新纪录。瑞士应用物理集团报道⁷⁴了 2.5GHz 工作频率，14 通道集成 SNSPD 的 BB84 协议 QKD 系统，如图 14（d）所示，10km 距离 64Mbps 密钥成码率。上述四个实验基本代表了 DV-QKD 实验系统当前的最高水平，需要指出，单光子干涉和 SNSPD 等要素

⁷² <https://doi.org/10.1103/physrevlett.130.250801>

⁷³ <https://doi.org/10.1038/s41566-023-01166-4>

⁷⁴ <https://doi.org/10.1038/s41566-023-01168-2>

导致实验系统向商用化系统的科研成果转化难度极高，基于 TF 方案的商用化 QKD 系统，短期内尚无实用化前景。

CV-QKD 在中短距离范围有密钥成码率优势，同时系统集成度和供应链成熟度等方面更具竞争力，是未来城域 QKD 应用主流。2023 年，山西大学报道⁷⁵采用改进 16-APSK，2.5G 波特率的离散调制协议 CV-QKD 系统，在 80km 距离可实现 2.11 Mbps 密钥成码率。西南通信研究所报道⁷⁶采用高斯调制协议、工作频率 1GHz、全数字解调算法系统，实现 100km 距离 0.51 Mbps 密钥成码率。北大基于连续模式光场理论对高速 CVQKD 系统引入线性数字信号处理的安全性给出初步证明和要求⁷⁷。北邮提出⁷⁸点到多点 CV-QKD 协议，消除不同链路相关性，提升组网可扩展性。上海交大报道⁷⁹采用发送端光源集成方案，工作频率 0.5GHz 系统实现 50km 距离 0.75 Mbps 密钥成码率。北邮提出点到多点 CV-QKD 协议，消除不同链路相关性，提升组网可扩展性，与西南通信研究所联合在 ECOC2023 报道实现 8 用户 PON 网络中 6Mbps 密钥成码率。丹麦科技大学报道⁸⁰接收端集成方案的 10G 波特率调制系统，实现 10km 距离 300 Mbps 密钥成码率。

（二）QKD 应用持续探索，标准研制取得阶段性成果

基于 QKD、QSDC、量子随机数发生器（QRNG）等技术的量子保密通信，需要与通信和信息安全领域的行业企业和用户联合开展产

⁷⁵ <https://doi.org/10.1364/OL.492082>

⁷⁶ <https://doi.org/10.1364/OL.485913>

⁷⁷ <https://doi.org/10.1038/s41534-023-00695-8>

⁷⁸ <https://arxiv.org/abs/2302.02391>

⁷⁹ <https://doi.org/10.1364/PRJ.473328>

⁸⁰ <https://arxiv.org/abs/2305.19642>

品研发和应用探索，明确系统融合方案和加密应用场景，才能为有高安全性需求的用户提供切实有效和成本收益合理的解决方案，进而带动技术产品规模化部署和产业化发展。

近年来，量子保密通信企业与通信网络营运商合作开展技术验证和应用探索已渐成趋势，在企业合作和网络建设方面取得一定进展。中国移动与国科量子联合组建了信通数智量子科技有限公司，中国电信与科大国盾联合组建了中电信量子科技有限公司。包含 8 个核心节点和 159 个接入节点，总长度达到 1147km 的合肥量子保密通信城域网建成，为市、区两级党政机关的电子政务网络提供量子安全接入和数据传输加密服务。2023 年中国电信进一步投资 30 亿元在安徽成立了中电信量子信息科技集团有限公司，推动量子通信产业化，并布局量子计算和量子测量等领域能力开发。欧盟多国在欧洲量子通信基础设施（EuroQCI）计划的资金支持下，开始启动量子通信实验网络和基础设施建设。西班牙 Madrid Quantum 项目将建设覆盖马德里大都市区量子通信城域网，法国、爱尔兰和丹麦等国也开始建设量子通信试验网络并开展相关技术产品测试。

QKD 等技术和不同类型 ICT 系统及网络融合应用研究持续开展。中国电信联合华为技术、烽火通信、科大国盾等企业开展了 QKD 与光传送网（OTN）设备融合组网的原型产品开发和测试验证，推出了量子保密传送网和 OTN 融量子加密专线等概念方案。2023 年，中国电信联合团队报道⁸¹了基于少模光纤（FMF）和分离光放系统的 QKD

⁸¹ <https://doi.org/10.1364/OL.500406>

与经典光通信系统共纤传输实验，在 100.96 km FMF 和经典光通信带宽 1 Tbps 条件下，实现 2.7 kbps 密钥成码率。华夏银行联合北京量子院开展 QSDC 在银行关键数据加密传输的应用探索。日本东芝和软银合作，在英国建立量子技术中心，开发兼容 QKD 接口的虚拟专用网（VPN）路由器产品，完成基于 IPSec 协议的量子加密 VPN 通信技术实验。英国 Bristol 大学报道⁸²将 QKD 设备与 5G 天线后端前传网络设施结合，测试验证 5G 前传光信道中使用量子加密技术可行性。意大利电信集团与 QTI 公司合作开展工业网络中的 QKD 应用演示，为工控交换机和边缘云计算节点的数据传输提供加密保护。

2023 年 8 月，工信部等四部门联合发布《新产业标准化领航工程实施方案（2023-2035 年）》⁸³。方案对量子信息领域标准化工作提出明确指导意见：开展量子信息技术标准化路线图研究。加快研制量子信息术语定义、功能模型、参考架构、基准测评等基础共性标准。聚焦量子计算领域，研制量子计算处理器、量子编译器、量子计算机操作系统、量子云平台、量子人工智能、量子优化、量子仿真等标准。聚焦量子通信领域，研制量子通信器件、系统、网络、协议、运维、服务、测试等标准。聚焦量子测量领域，研制量子超高精度定位、量子导航和授时、量子高灵敏度探测与目标识别等标准。

量子保密通信领域技术标准体系初步构建，关键技术产品和网络相关标准研制取得阶段性成果。在系统器件标准方面，中国通信标准化协会（CCSA）量子通信与信息技术特设任务组（ST7）陆续发布了

⁸² <https://doi.org/10.1364/JOCN.483644>

⁸³ https://wap.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2023/art_8d26688ad0aa422eaa5ebba5dceac908.html

量子密钥分发系统技术要求和测试方法，QRNG 和单光子探测器（SPD）等关键系统与器件行业标准，为量子保密通信领域的技术产品研发和应用部署提供了规范化引导和支持。2023 年，YD/T 4303-2023《基于 IPsec 协议的量子保密通信应用设备技术规范》和 YD/T 3834.2-2023《量子密钥分发（QKD）系统技术要求 第 2 部分：基于高斯调制相干态协议的 QKD 系统》行业标准发布实施，为基于 IPsec 协议的量子加密 VPN 和终端设备，以及新型 CV-QKD 系统提供了标准指导。量子保密通信系统中具备商用化能力的 QKD、QRNG 和加密应用等核心设备已初步实现标准化。同时，在量子信息网络产业联盟（QIIA）组织开展的量子保密通信产品标准实施验证测评活动中，科大国盾、启科量子、弦海量子等厂家的 QKD 和 QRNG 等产品通过相关标准验证测评，促进了标准实施应用和行业规范化发展。

在 QKD 网络标准方面，ITU-T 在 SG13、SG17 和 SG11 研究组，开展十余项新标准项目研究，涉及 QKD 网络互联互通、网内和网间接口与协议定义、QKDN 网络可信中继节点的安全框架等内容，中国成员单位是相关项目的主要推动力量。GB/T 42829-2023《量子保密通信应用基本要求》正式发布，成为我国量子通信领域的首个国家标准。CCSA-ST7 制定的 YD/T 4301-2023《量子保密通信网络架构》、YD/T 4302.1-2023《量子密钥分发（QKD）网络 网络管理技术要求 第 1 部分：网络管理系统（NMS）功能》和 TD/T 4410.1-2023 的《量子密钥分发（QKD）网络 Ak 接口技术要求 第 1 部分：应用程序接口（API）》等行业标准相继发布。QKD 网络相关标准将助力提升我国 QKD 网络建设、运维、管理能力和量子保密通信应用和服务水平。

在 QKD 安全性标准方面，在 ISO/IEC JTC1 SC27 立项，由我国成员单位牵头研制的 ISO/IEC 23837-1/2《QKD 安全要求与测试评估方法》两项国际标准，历时五年编制和讨论，在 2023 年正式发布，为 QKD 技术、系统和产品的现实安全性评估奠定基础。欧洲电信标准化协会（ETSI）也发布了 GS QKD 016《QKD 模块安全评估保护框架（PP）》，提出了制备-测量式 QKD 协议实施和物理系统实现的指导要求，可用于支持对厂家提供 QKD 系统模块开展安全性评估与认证。CCSA-ST7 的 QKD 系统安全技术要求等行业标准也在编制讨论过程中。后续，根据相关国际和国内标准，组织开展 QKD 系统和产品的现实安全性测试验证与评估，将是未来量子保密通信领域标准实施验证和测评关注的重要方向。

（三）量子信息网络关键核心技术研究取得一定进展

量子信息网络（QIN），也称量子互联网，基于量子纠缠操控、量子隐形传态、量子存储中继和量子频率转换等关键技术，实现量子态信息在量子计算机和量子传感器等处理节点间的传输和组网，可以指数级提升量子信息处理能力，是量子计算、量子通信和量子测量融合发展的终极目标和演进方向，已成为全球量子信息领域开展科研攻关和实验探索的重点方向。2023 年，QIN 关键技术和使能组件的科研工作亮点频出，代表性成果如表 6 所示。

表 6 2023 年量子信息网络科研进展概况（发表时间排序）

研究机构	主要技术成就	期刊
奥地利 Innsbruck	230 米光纤信号钙离子间量子纠缠	PRL
奥地利 Innsbruck	基于量子中继实现 50 公里光纤纠缠传输	PRL
中国 南京大学	远距离多粒子纠缠全光量子中继协议	OL
英国 牛津大学	基于离子阱实现 10s 量子存储	PRL
美国 芝加哥大学	中性原子微波-光波转换（效率 0.58）	Nature
中国 中科大等	电信和近可见波段单光子转换（效率 0.73）	npj QI
中国 南京大学	四光子 Dicke 态制备（保真度 0.817）	PRL
奥地利 ISTA 等	微波光子-光学光子纠缠实验	Science
中国 中科大	51 个 qubit 纠缠态制备（保真度 0.637）	Nature
中国 电子科大	铌酸锂芯片 200 ns 多模光量子存储	Science
中国 北京大学	硅基光量子芯片间的高维量子纠缠网络	Science
美国 林肯实验室	50 公里三节点光纤 QIN 原型试验	ArXiv
加拿大 Calgary	提出卫星中继的广域量子信息网络方案	PRA
波兰 华沙大学	里德伯原子光-微波频率转换（效率 0.5）	Nature

来源：中国信息通信研究院（截至 2023 年 10 月）

量子信息网络基于量子纠缠制备和量子隐形传态实现量子态信息传输，提高量子纠缠制备和分发的效率和保真度是实现量子信息网络的基础环节，相关研究和实验持续推进，在多体纠缠态制备分发等方面取得一定进展。2023 年，奥地利因斯布鲁克大学报道⁸⁴在相距 230 米的两个钙离子之间实现远距离纠缠，保真度达 0.882。南京大学报道⁸⁵首次在硅基光量子芯片上实现四光子 Dicke 态的制备及高精度相干调控，保真度达 0.817 ± 0.003 。中科大报道⁸⁶成功实现 51 个超导量子比特纠缠态制备验证，保真度达 0.637 ± 0.030 。北京大学⁸⁷报道基于硅基光量子芯片实现集成芯片间的高维量子纠缠网络，并提出高维量子纠缠自修复方法，可快速恢复在传输过程中已退化的纠缠。

⁸⁴ <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.050803>⁸⁵ <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.223601>⁸⁶ <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06195-1>⁸⁷ <https://doi.org/10.1126/science.adg9210>

量子中继是扩展量子信息网络传输和组网能力的关键使能技术，主要分为含存储量子中继和全光量子中继两类方案，其中含存储量子中继是当前主流发展方向，实验进展成果丰富。2023 年，美国普林斯顿大学报道⁸⁸掺铒的钨酸钙晶体可在电信频段发出彼此无法区分的光子，有望用于固态量子中继器的实验。奥地利因斯布鲁克大学报道⁸⁹利用两个钙离子作为量子存储器的量子中继实验，实现超 50 公里光纤的电信波段传输。全光量子中继⁹⁰无需量子存储器，为量子中继提供了另一种思路。美国德克萨斯大学⁹¹报道基于测量的容错单向全光量子中继方案，简化了全光中继的局部操作。南京大学报道⁹²提出和验证了用于实现远距离多粒子纠缠分发的全光量子中继协议。

量子存储器是含存储量子中继方案的核心组件，用于实现光子纠缠态的存储和读取。当前基于多种不同类型存储介质和技术协议方案的量子存储器处于开放探索阶段，部分量子存储器的单项性能指标逐渐接近实用化水平，但距离同时满足所有指标的实用化要求尚有差距。2023 年，牛津大学报道⁹³基于离子阱量子信息网络节点实现了高稳定性量子存储器，在存储时间超过 10s 后，离子-光子纠缠保真度仍保持在 0.81(4)。电子科大等联合团队⁹⁴基于原子频率梳协议在掺铒铌酸锂波导芯片上实现了通信波段集成多模光量子存储，存储时间为 200 ns，存储带宽为 4GHz，内部存储效率为 $2.83 \pm 0.03\%$ 。

⁸⁸ <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06281-4>

⁸⁹ <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.213601>

⁹⁰ <https://doi.org/10.1038/ncomms7787>

⁹¹ <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2536477/v1>

⁹² <https://doi.org/10.1364/OL.482287>

⁹³ <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.090803>

⁹⁴ <https://doi.org/10.1126/sciadv.adf4587>

量子频率转换器用于实现微波及光波等量子态信号的相干转换，是构建量子信息网络物理接口的关键技术，现有原子辅助、电光、光电机机械等多种转换方案并行发展，转换效率和转换带宽等关键指标性能逐步提升。2023 年，美国芝加哥大学等联合团队⁹⁵在低温环境下利用中性原子实现微波光子到光学光子的转换，转换效率峰值可达 58%，转换带宽为 360kHz。中科大等联合团队报道⁹⁶基于铌酸锂芯片实现电信波段和近可见光波段的光子频率转换，内部转换效率可达 73%。奥地利科学技术研究所⁹⁷在《科学》发文首次成功实现微波光子与光学光子之间的纠缠转换，对扩展现有量子计算硬件规模，实现量子计算互连组网，以及网络增强量子传感器具有重要意义。

当前，量子存储、量子中继、量子频率转换等量子信息网络关键技术仍处于理论与实验研究的开放探索阶段，部分性能指标得到提升，但整体距离实用化水平还有很大差距，量子纠缠源、单光子探测器和耦合连接器等使能组件的性能指标有待进一步提升。作为欧美等国量子通信领域发展的重点方向，量子信息网络关键技术研究 and 使能组件攻关未来可能加速发展演进，成为量子科技国际竞争的新热点。

(四) 欧美积极推动量子信息网络组网技术试验验证

量子信息网络目前主要处于基础研究与实验探索阶段，关键技术与使能组件仍有技术瓶颈尚未突破，实用化前景尚不明确，但其实现量子计算机互联组网，指数级提升量子信息处理能力的应用潜力巨大，

⁹⁵ <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05740-2>

⁹⁶ <https://doi.org/10.1038/s41534-023-00704-w>

⁹⁷ <https://doi.org/10.1126/science.adg3812>

已成为欧美国家布局的重点发展方向之一。近年来，欧美研究机构和行业组织等，通过合作项目、组网实验和平台建设等多种方式，加快推动技术试验与测试验证，主要动态如表 7 所示。

表 7 近期欧美地区 QIN 项目、测试平台及组网实验列表

地区/国家	研究/行业机构	QIN 项目规划/测试平台/组网实验	
欧洲	量子互联网联盟	项目规划	量子互联网七年计划
	欧盟资助		LaiQa 项目
西班牙	IMDEA 网络研究所等	组网实验	MADQuantum-CM 项目
荷兰	代尔夫特理工		三节点量子信息网络
英国	布里斯托大学		六用户量子信息网络
美国	NIST	测试平台	NG-QNet 项目
	EPB & Qubitekk		EPB 量子网络服务
	Qunnect		GothamQ 网络测试床
	Qunnect&纽约大学	组网实验	16 公里量子网络链路实验
	林肯实验室		50 公里三节点 QIN 实验
加拿大	卡尔加里大学等	组网实验	基于卫星 QIN 组网实验
加拿大+欧洲	滑铁卢大学等	组网项目	HyperSpace 量子卫星项目

来源：中国信息通信研究院（截至 2023 年 10 月）

欧盟多国在地平线欧洲计划和量子旗舰计划等项目支持下，加大量子信息网络研发投入力度，通过建立合作项目、组织应用竞赛和支持创业企业等多种形式，加快推动量子信息网络组网实验与应用探索。2023 年，多家欧洲机构联合启动 LaiQa 项目⁹⁸，以构建全球量子互联网为目标，开发三种不同光子源、实用化量子存储器、以及连接卫星和地面站的先进光纤耦合/自适应光学系统等组件。欧洲量子互联网联盟（QIA）启动“七年计划”⁹⁹，计划投入 2400 万欧元开发欧洲首个

⁹⁸ <https://www.tno.nl/en/newsroom/2023/09/laiqa-european-quantum-internet-space>

⁹⁹ <https://quantuminternetalliance.org/2022/10/14/the-quantum-internet-alliance-will-build-an-advanced-european-quantum-internet-ecosystem/>

大规模量子互联网。9 月，QIA 启动首届“量子互联网应用挑战赛”¹⁰⁰，鼓励量子爱好者参与 QIN 应用组网原型设计开发和应用探索。荷兰代尔夫特理工（TUD）是欧洲 QIN 研究探索的引领者，率先实现了三节点组网实验，报道¹⁰¹基于纠缠 QIN 链路层协议进行了实验演示。此外，TUD 还孵化了 Q*Bird、Qblox、QphoX 等多个初创企业，成为 QIN 产业化的先驱。英国布里斯托大学报道¹⁰²了一种动态多协议纠缠分发量子信息网络，实现六用户间的量子通信。德国电信开设量子实验室¹⁰³，提供量子光学基础设施和 2000 公里测试光纤网络，聚焦量子纠缠技术的电信网络应用，探索构建量子物联网。

美国一直高度重视发展量子信息网络，2020 年发布了《美国量子网络战略》，近期通过搭建测试平台和开展组网实验，为 QIN 的开发和应用提供基础设施和技术储备，加速应用探索。2023 年，DoE 宣布¹⁰⁴拨款 2400 万美元用于 QIN 研究开发，推动分布式量子计算网络应用探索。NIST 长期支持 QIN 基础组件研发及组网测试，构建测试平台“NG-QNet”表征和验证 QIN 的基础组件功能实现¹⁰⁵。林肯实验室等联合发布报道¹⁰⁶在波士顿地区构建了 50 公里三节点量子网络实验床（BARQNET），测试量子态信号传输特性和补偿机制。美国企业也在积极布局量子信息网络研发与测试验证，亚马逊量子网络研究中心报

¹⁰⁰ <https://quantuminternetalliance.org/quantum-internet-application-challenge-2023/>

¹⁰¹ <https://doi.org/10.1038/s41534-022-00631-2>

¹⁰² <https://ieeexplore.ieee.org/document/9748401/authors>

¹⁰³ <https://www.telekom.com/en/media/media-information/archive/deutsche-telekom-opens-quantum-research-lab-1047874>

¹⁰⁴ <https://science.osti.gov/ascr>

¹⁰⁵ <https://www.nist.gov/programs-projects/quantum-communications-and-networks>

¹⁰⁶ <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.15696>

道¹⁰⁷研制了基于金刚石色心的新型量子网络光接口。EPB 与 Qubitekk 合作推出美国首个商业 QIN 平台“EPB 量子网络”¹⁰⁸，并开始为网络实验接受用户申请。Qunnect 开发了量子信息网络测试平台“GothamQ”¹⁰⁹，与纽约大学合作测试 16 公里 QIN 链路。滑铁卢大学¹¹⁰宣布将与欧洲团队联合开展“HyperSpace”合作项目，旨在实现跨大西洋的量子卫星链路和洲际量子通信组网。加拿大卡尔加里大学和佛罗里达大学合作¹¹¹提出了基于卫星中继的量子信息网络组网方案并完成仿真实验。

近年来，欧美在量子通信领域的研究重点已逐步转向了量子信息网络方向，在基础研究和技术实验等方面发展迅速，有可能率先取得技术和应用突破。对比来看，我国量子通信领域的技术研究和应用探索仍主要集中在 QKD 领域，在量子信息网络原型研发和测试验证等方面的推动力度和创新成果有限，需要进一步加强布局投入。

（五）PQC 首批算法标准发布，应用推广仍任重道远

以 RSA、ECDH 和 ECDSA 等算法为基础的公钥密码体系，是当今互联网信息安全的基石，为信息传输过程中的机密性、完整性和不可否认性提供了底层安全保障。在量子计算技术迅速发展的背景下，大数分解和椭圆曲线离散对数等底层数学难题可能被未来的大规模

¹⁰⁷ <https://aws.amazon.com/cn/blogs/quantum-computing/perfect-imperfections-how-aws-is-innovating-on-diamond-materials-for-quantum-communication-with-element-six/>

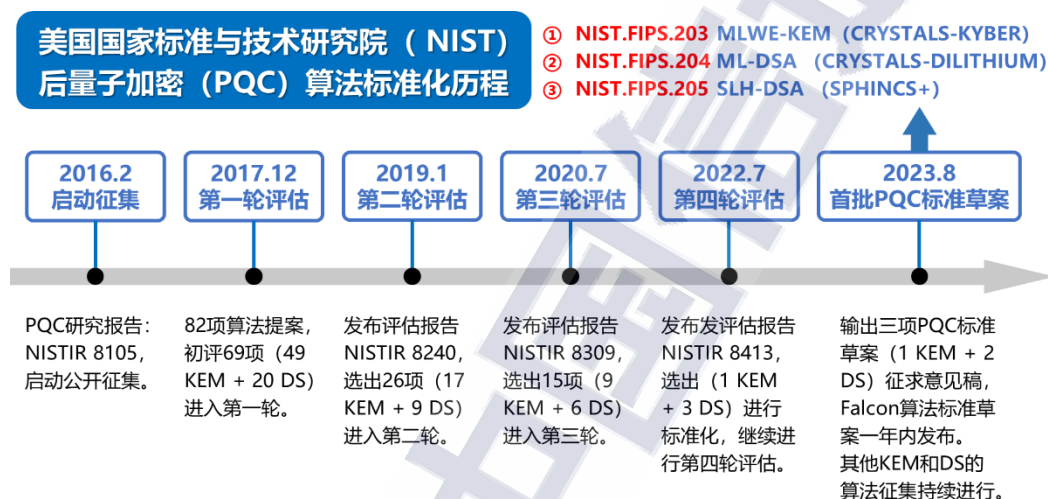
¹⁰⁸ <https://quantum.epb.com/>

¹⁰⁹ <https://www.nyu.edu/about/news-publications/news/2023/september/nyu-takes-quantum-step-in-establishing-cutting-edge-tech-hub-in-.html>

¹¹⁰ https://uwaterloo.ca/news/science/connecting-canada-and-europe-through-quantum-satellite?utm_source=miragenews&utm_medium=miragenews&utm_campaign=news

¹¹¹ <https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.20.024048>

可容错通用量子计算机快速破解，从而对以现有公钥密码技术为基础的网络信息安全体系造成严重威胁。对于需要长期保护的敏感信息，例如生物特征信息、军事外交情报等，已经开始面临“先获取后破解”的现实风险。全球各国信息安全管理机构和密码学界对此高度重视，提出以新型底层数学难题构建全新公钥加密算法和标准，应对量子计算破解威胁的技术方案，即后量子加密（PQC）。



来源：中国信息通信研究院

图 15 美国 NIST 后量子加密（PQC）算法标准化历程

PQC 技术产业发展具有鲜明的方案竞争和标准先行特性，美国是 PQC 算法标准制定的引领者，欧美科技巨头和密码学界是重要贡献者。美国 NIST 推动 PQC 算法标准化的历程如图 15 所示，2016 年启动 PQC 算法的全球征集，通过收集全球利益相关方的算法提案，并在密码学社区进行公开评议、破解验证和修订更新等形式，在 2017 至 2022 年间推动了四轮 PQC 算法评选，从 69 项有效算法提案中，评选出一种密钥交换机制（KEM）和三种数字签名算法（DSA）作为标准化对象。2023 年 8 月，NIST 发布三项 PQC 标准草案征求意见

¹¹², 包括 FIPS.203¹¹³ 基于 CRYSTALS-KYBER 算法的含错误学习模块化格密钥交换机制 (MLWE-KEM)、FIPS.204¹¹⁴ 基于 CRYSTALS-DILITHIUM 算法的含错误学习模块化格数字签名算法 (ML-DSA)、FIPS.205¹¹⁵ 基于 SPHINCS+ 算法的无状态哈希数字签名算法 (SLH-DSA)。预计上述三种 PQC 算法将在 2024 年发布正式标准, 基于 FALCON 算法的 PQC 数字签名算法将在一年内输出标准草案, 其他 KEM、DSA 算法的新一轮征集也还在持续进行中。

随着 PQC 标准初具雏形, 欧美在 PQC 产业化方面也加快推进, 抢占先机。2022 年 5 月, 拜登政府发布行政令¹¹⁶, 提出在 2035 年前, 由国家安全局(NSA)和 NIST 负责及时完成美国国家信息系统的 PQC 升级迁移, 为应用推广扣响了“发令枪”。2023 年 1 月, 互联网工程任务组(IETF)成立后量子应用协议工作组(PQUIP), 开始从加密技术标准和网络协议升级等方面开展研究与推动。10 月, PQUIP 发布《面向工程师的后量子密码》报告¹¹⁷, 分析 PQC 标准算法特性、过渡时间表、算法替换升级方案等具体技术问题。7 月, NIST 联合国家网络安全卓越中心(NCCoE)发起“向 PQC 迁移”计划¹¹⁸, 提出升级项目工作流程, 推荐 28 家 PQC 技术产品供应商, 包含 IBM、亚马逊、思科等科技巨头和 SandboxAQ、PQShield 等初创企业。8 月, 美

¹¹² <https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography>

¹¹³ <https://csrc.nist.gov/pubs/fips/203/ipd>

¹¹⁴ <https://csrc.nist.gov/pubs/fips/204/ipd>

¹¹⁵ <https://csrc.nist.gov/pubs/fips/205/ipd>

¹¹⁶ <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/05/04/national-security-memorandum-on-promoting-united-states-leadership-in-quantum-computing-while-mitigating-risks-to-vulnerable-cryptographic-systems>

¹¹⁷ <https://www.ietf.org/id/draft-ietf-pquip-pqc-engineers-01.html>

¹¹⁸ <https://csrc.nist.gov/News/2021/migration-to-post-quantum-cryptography-proj-desc>

国网络安全与基础设施安全局（CISA）、NSA 和 NIST 三部门联合发布为《量子准备：迁移到后量子密码学》文件¹¹⁹，为机构和企业开展 PQC 升级应用，提出制定升级路线图、编制密码清单、测试验证 PQC 技术产品等指导意见。9 月，IBM、微软、MITRE、PQShield、SandboxAQ 和滑铁卢大学成立 PQC 联盟，推动 PQC 迁移标准研究，创建技术材料，组织测试验证等活动。谷歌 Chrome 浏览器（版本 116）已集成 KYBER-768 算法，与传统椭圆曲线算法提供混合保护。

PQC 算法标准的推出，拉开了全球 PQC 技术产业化序幕。我国需加快 PQC 相关算法研究、评估和标准化进程，推动技术产品研发、应用部署推广和培育领军企业，在技术产业竞争中占据一席之地，掌握自主可控的量子时代信息安全保障能力。虽然 NIST 发布第一批 PQC 算法标准为业界提供了基础指引，但信息安全系统的 PQC 迁移与大规模应用部署，仍然任重道远。首先，由于对量子计算破解能力的研究尚不深入，PQC 算法标准化采用“不把所有鸡蛋放在一个篮子”策略，提供了多种算法标准互为备份，且仍在持续进行征集与评估。算法标准多样性一定程度上提升了安全性，但也为下游产品开发、测试评估、标准更新和应用部署引入更多不确定性。其次，PQC 技术标准要从算法文件走向产品应用，还需要进行大量的产品级和系统级的研究开发、测试验证和更新适配等工作，才能明确标准中提出的密钥、密文和签名参数，以及计算处理和故障处理等能力要求，完成与目标系统架构和环境的适配和升级。最后，公钥加密算法在通信和互联网

¹¹⁹ <https://www.cisa.gov/news-events/news/cisa-nsa-and-nist-publish-new-resource-migrating-post-quantum-cryptography>

的大量协议和标准中广泛应用，加密算法更新需要大量的通信协议和标准进行更新迭代，不同技术标准组织和机构的需要全面完成升级，才能保证加密应用的互联互通。通信与信息安全领域的标准协议种类繁多、数量庞大，且存在长尾效应和监管限制，预计相关标准更新和系统迁移的过程将相当漫长。

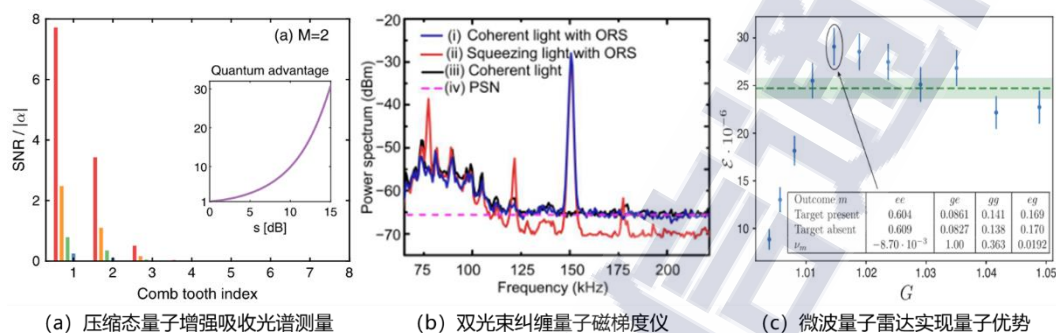
四、量子测量领域研究与应用进展

（一）基础研究成果亮点纷呈，量子优势越发明显

与量子计算和量子通信的理论和实验研究起源于上世纪八十年代不同，量子测量技术（也称量子传感、量子探测等）的发展历史更加悠久，原子钟、核磁共振成像、电荷耦合器件等技术和产品已经在生产生活中广泛应用，成为信息感知和获取中不可或缺的重要组成部分。早期量子测量技术通常利用能级跃迁、光电效应等量子力学原理实现物理量探测，但对微观粒子的调控和观测能力还较为有限。随着量子科技的不断发展，以及对微观粒子系统认识和测控能力不断提升，大量新型量子测量技术和产品不断涌现，量子测量已成为量子信息领域技术方向多元、应用场景丰富和产业化发展迅速的代表。

量子测量通过对原子、离子和光子等微观粒子体系及其中量子态的制备、调控和观测，实现对外界物理量变化更加准确、精细和可靠的测量与探测。量子测量典型技术方案包括冷原子干涉、核磁/顺磁共振、金刚石色心、无自旋交换弛豫原子自旋（SERF）、量子纠缠或压缩增强探测等；被测物理量包括频率、时间、重力场、加速度、角速度、磁场、电场、温度、物质痕量等；应用场景涉及基础科研、国防

军工、航空航天、定位导航、环境监测、生物医疗、资源勘测等众多行业领域。量子测量不仅可以带来测量精度、灵敏度等关键指标的数量级提升，还可以基于微观粒子系统的独特优势，在测量可靠性和空间分辨率等方面提供全新测量传感方案和应用。



来源：（a）PRL 130,133602；（b）Sci.Adv.9,eadg1760；（c）Nat. Phys. 19, 1418–1422

图 16 量子测量实验体现量子优势的代表性成果

近年来，量子测量领域科研成果亮点纷呈，突破经典测量的物理极限，展现“量子优势”成为发展热点。2023 年，上海交通大学和华东师范大学联合团队提出¹²⁰一种具有最优资源分配的量子干涉仪噪声压缩保护方案，实验结果表明干涉仪在高路径损耗的情况下，测量结果仍能够突破标准量子极限。英国布里斯托尔大学团队提出¹²¹基于压缩态频率梳的量子增强吸收光谱测量方法，如图 16（a）所示，当压缩比为 10dB 时，测量信噪比将比标准量子极限高一个数量级；当压缩比为 15dB 时，信噪比有望达到标准量子极限的 30 倍。上海交通大学团队提出¹²²一种基于纠缠双光束的量子磁梯度仪，如图 16（b）所示，测量频段覆盖 7Hz~6MHz，其测量结果比量子噪声极限低 5.5dB。

¹²⁰ <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.130.073601>

¹²¹ <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.130.133602>

¹²² <https://www.science.org/doi/full/10.1126/sciadv.adg1760>

法国里昂高等师范学院团队报道¹²³在微波量子雷达中实现了量子优势，如图 16（c）所示，利用超导电路实现微波量子态的纠缠产生、存储和操控，可以计算微波场中的光子数量。实现的微波量子雷达性能比经典雷达高出 20%。意大利都灵理工大学和荷兰代尔夫特理工大学联合团队¹²⁴在量子增强非干涉定量相位成像领域实现了量子优势，通过测量信号光和闲置光的一阶强度实时获得全场相位恢复，计算皮尔逊相关系数明显低于经典方法。兰州大学团队¹²⁵利用 Floquet 束缚态克服含噪量子计量中的不可行原理（No-Go Theorem），通过对 Ramsey 干涉仪的原子进行周期性驱动，当原子与噪声组成的系统形成 Floquet 束缚态时，其频率测量的精度将恢复到理想的 t^2 标度关系，还允许精度随着原子数 N 恢复到理想的海森堡极限标度 N^2 ，同时恢复了噪声量子计量精度随原子数和编码时间的标度优势。

基于量子纠缠和压缩的量子测量方案理论上能够突破标准量子极限，从而逼近海森堡极限，在计量、成像、科研等领域具有广阔的应用前景。但目前上述方案的技术成熟度仍然是一个重要瓶颈因素，要达到实用化仍需要克服许多技术难题和挑战。例如，量子系统的稳定性和可扩展性、环境噪声和干扰、测量设备的精度和灵敏度等都是需要解决的关键问题。此外，量子测量方案的应用不仅需要解决技术问题，还需要考虑实际应用场景中的因素，例如一些量子测量方案需要在特定的环境条件下才能实现高精度的测量。因此，在将量子测量方案应用于实际场景时，需要考虑如何将这些方案与具体应用环境需

¹²³ <https://www.nature.com/articles/s41567-023-02113-4>

¹²⁴ <https://www.nature.com/articles/s41377-023-01215-1#Sec3>

¹²⁵ <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.131.050801>

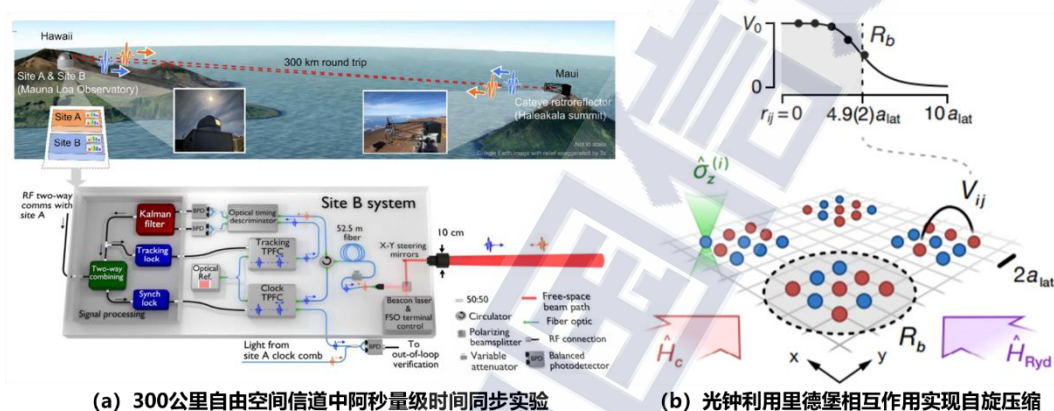
求相结合。总体而言，虽然基于量子纠缠和压缩的量子测量方案有广阔的应用前景，但实现这些应用仍然需要克服许多技术和工程挑战。未来随着技术的进步和应用需求的增长，期待看到更多科研和实验的进展，推动新型量子测量方案的实用化。

（二）量子 PNT 战略价值突出，成为各国关注热点

卫星定位、导航、授时(PNT)技术通过全球导航卫星系统(GNSS)例如 GPS 和北斗，发送星载原子钟产生的高精度时间信号，通过接收器对多颗卫星进行时间信号接收和距离计算，确定接收器的精确位置信息，并根据运动过程中的实时位置计算实现导航功能。基于卫星的 PNT 技术能够实现精确定位、高效导航和准确授时，对于现代信息社会中的交通出行、公共安全、减灾救援等生产生活应用，乃至航空航天和军工国防等国家安全应用，都具有重要战略价值，已成为构建空天地一体化时空信息基础设施，推动信息化和智能化转型的重要支柱。然而，卫星 PNT 在提供巨大便利同时，也潜藏风险隐患。对于 GNSS 卫星信号的干扰、篡改、伪造或屏蔽，甚至是对卫星的摧毁，将使卫星 PNT 系统失效，并对以此为基础的国家安全和生产活动等应用造成难以估量的严重影响。发展无需卫星支持，具有更高精度和可靠性的自主 PNT 技术，是应对极限风险的重要举措。近年来，基于原子钟（也称原子频标）和量子惯性导航等技术方案的量子 PNT，已成为全球主要国家在量子测量领域的重点发展方向。

原子钟是 GNSS 系统能够实现定位导航功能的关键组件，在量子 PNT 技术体系中占据核心地位。1967 年第 13 届国际计量大会(CGPM)

通过了基于铯原子跃迁的秒定义标准，基于多个国家计量机构中，不确定度达到 $1\text{E-}16$ 量级的铯原子喷泉钟，直接复现秒定义产生的国际原子时（TAI）进行比对校准，进而得到世界标准时间（UTC）的方案沿用至今。近年来，下一代秒定义的研究发展迅速，以光学原子钟为代表的新型时频基准的不确定度已进入 $1\text{E-}19$ 量级，未来有望大幅提升 PNT 系统的授时和定位导航精度。



来源：（a）Nature 618, 721–726 (2023) （b）Nature 621, 734–739 (2023)

图 17 量子时频同步研究的代表性进展成果

2023 年，美国 NIST 联合团队¹²⁶实现量子极限下的光学时间传递，如图 17（a）所示，在夏威夷山顶之间 300 多公里的自由空间信道中实现 320 阿秒的时间同步，信号发射功率仅为 $40\mu\text{W}$ ，该技术方案能够支持 102dB 的链路损耗，未来有望用于超高精度星地时间同步。美国科罗拉多大学团队¹²⁷在光钟中利用里德堡相互作用实现自旋压缩，如图 17（b）所示，秒稳达到 $1.087\text{E-}15$ ，比标准量子极限低 1.94dB。美国阿贡实验室¹²⁸，利用欧洲新一代同步加速器辐射源（EuXFEL）

¹²⁶ <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06032-5>

¹²⁷ <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06360-6>

¹²⁸ <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06491-w>

高亮度 X 射线激发钷-45 元素金属箔产生异构体，跃迁能量不确定度优化两个数量级，理论计时精度可达到 3000 亿年误差一秒，有望成为未来新一代时频基准解决方案。我国精密测量院¹²⁹研制出不确定度达 $1\text{E-}18$ 量级的室温钙离子光钟，为光钟应用奠定基础。

测量旋转角速度的陀螺仪和测量重力加速度的加速度计是自主惯性导航系统的核心组件。基于 SERF 和冷原子干涉等原理实现的量子惯导系统是继机电系统和光电系统之后的新一代惯导解决方案，在理论测量精度和体积功耗等关键性能指标方面，有望带来数量级提升。例如原子干涉陀螺仪的理论精度极限可达到 $1\text{E-}10^\circ/\text{h}$ ，超过光纤陀螺精度 5 个数量级，当前样机精度已达到 $1\text{E-}5^\circ/\text{h}$ ，仍有很大提升空间。2023 年，北京理工大学¹³⁰提出一种基于悬浮纳米金刚石的高灵敏度陀螺仪，其灵敏度可以达到 $6.86 \times 10^{-7} \text{ rad/s}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，由于陀螺仪的工作面积积极小（ $\sim 0.01 \mu\text{m}^2$ ），未来有望实现芯片化。目前，量子陀螺仪和加速度计主要处于实验室样机研制阶段，零偏稳定性和灵敏度等测量技术指标，以及体积和功耗等系统指标仍需优化。量子惯性导航系统的研究需要进一步提升原子干涉陀螺仪的测量动态范围，研制适用于大负载环境的稳定平台控制方案，提升样机的实用化部署能力。

基于量子测量的自主 PNT 技术有重要战略价值，是 GNSS 服务拒止情况下的保底解决方案，成为全球主要国家布局和推动的重点。美国 NSF、DoD、空军、海军等多部门资助量子加速度计、高性能冷原子钟、新型光学原子钟、量子磁场导航系统等关键器件的研发。

¹²⁹ <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.19.064004>

¹³⁰ <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-31-5-8139&id=526325>

DARPA 的 H6 项目布局面向 GPS 缺失情况下的新型小型化时钟技术，技术路线包括亚太赫兹分子时钟和复合机械时钟。北约科学技术组织发布《科学与技术趋势 2023-2024》¹³¹提出将重点布局量子定位导航授时技术，特别是其在军事和安全领域的应用。英国研究与创新署（UKRI）为量子技术项目提供 4500 万英镑的资金支持，2500 万英镑投入 7 个与定位、导航和授时（PNT）功能相关的量子测量项目。2023 年 6 月，英国海军在军舰上测试量子惯性导航系统¹³²，澳大利亚国防部宣布开发量子传感器，提供更精密、可靠的导航能力。

（三）量子探测成像具备高灵敏度，应用前景广阔

量子探测成像技术将量子纠缠光源、脉冲注入压缩和单光子探测等技术 with 计算光学、雷达探索等技术相结合，基于光学或微波等辐射场的二阶关联等效应，获取探测目标的图像、位置和距离等信息，可以实现在成像距离、速度和分辨率等方面的突破，是未来战场态势感知和要地侦测防御等应用的可选技术方案。

利用量子相关特性可以突破经典的空间分辨率限制，实现超分辨成像。2023 年，美国科罗拉多大学团队¹³³提出一种基于经典和量子关联函数的高速超分辨率计算成像技术，在提高信噪比的同时提升了成像速度。单光子激光雷达具有单光子级别的灵敏度以及皮秒级别的时间分辨率，可实现远距离、高精度三维成像。英国爱丁堡大学联合团队¹³⁴将单光子激光雷达用于水下散射环境的实时三维场景重建，在

¹³¹ https://www.nato.int/cps/en/natohq/news_213088.html

¹³² <https://hackaday.com/2023/06/07/royal-navy-tests-quantum-navigation/>

¹³³ <https://spj.science.org/doi/full/10.34133/icomputing.0003>

¹³⁴ <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-31-10-16690&id=530374>

1.8 米深的水下环境对 3 米外目标进行三维轮廓重建，实验结果显示在浑浊水中仍能实现每秒 10 帧的刷新速率。华东师范大学¹³⁵提出超灵敏、高分辨、大视场的中红外单光子三维成像技术，实现了单光子探测灵敏度、飞秒门控时间精度以及百万像素宽画幅。山东大学团队¹³⁶提出一种计时矫正单光子激光雷达的高精度三维成像技术，搭建了双 SPAD 激光雷达系统，结合矫正互相关算法和动态互相关算法，得到信号光子准确飞行时间，完成目标物体高精度三维重建。

双光场关联成像，也称鬼成像，利用纠缠光子对可以实现目标物体照明与图像采集分离，使用较低的光照就可以实现成像，在目标探索和医学检测等领域具有应用潜力。2023 年，南非威特沃特斯兰德大学团队¹³⁷提出可实现三维结构信息探测的单像素量子鬼成像，可以获得复杂物体的相位和振幅信息，从而重建完整的复振幅图像。德国劳恩霍夫研究所联合团队¹³⁸实现了三维量子鬼成像，在空间损耗、校准工作及其在遥感中的应用方面超越了以往的方案。意大利罗马大学联合团队¹³⁹提出一种空间双光子态振幅和相位的干涉成像技术，平均保真度达到 87%，同时测量时间缩短了 3 个数量级。

量子探测成像关键器件和新型协议研究方面近年来也取得了一系列成果。2023 年，南京大学¹⁴⁰提出一种新的量子成像协议，通过将单光子迈克尔逊干涉仪嵌入到基于诱导相干的非线性干涉仪中，以及利用单像素成像技术，演示了利用未检测到的光子对结构物体进行无

¹³⁵ <https://www.nature.com/articles/s41377-023-01179-2>

¹³⁶ <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-31-15-24481&id=532644>

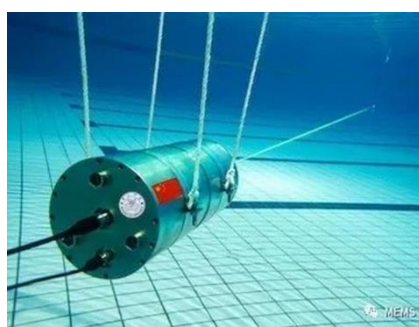
¹³⁷ <https://opg.optica.org/optica/fulltext.cfm?uri=optica-10-2-286&id=526269>

¹³⁸ <https://opg.optica.org/ao/fulltext.cfm?uri=ao-62-23-6275&id=536121>

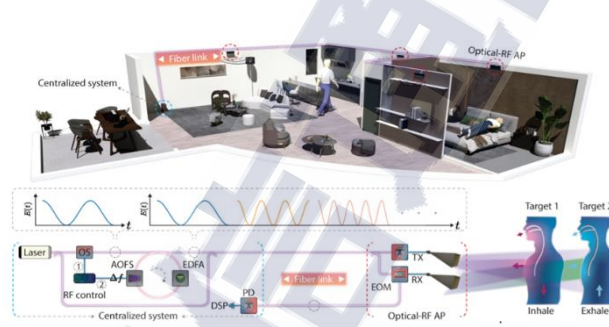
¹³⁹ <https://www.nature.com/articles/s41566-023-01272-3#Sec5>

¹⁴⁰ <https://www.nature.com/articles/s41534-022-00673-6>

交互单像素量子成像。美国 NIST 联合团队¹⁴¹研制了一种 40 万像素超导纳米线单光子探测相机，该相机阵列面积为 $4\text{mm}\times 2.5\text{mm}$ ，分辨率为 $5\mu\text{m}\times 5\mu\text{m}$ ，探测计数率为 $1.1\times 10^5\text{cps}$ ，每个探测器的暗计数率为 $1.0\times 10^{-4}\text{cps}$ ，相当于整个阵列暗计数率为 0.13cps 。



(a) 单光子激光雷达水下漏油检测



(b) 基于光子雷达的非接触式生命体征检测

来源：（a）Applied Optics 62(19), 5301-5305 （b）Nature Photonics 17, 791-797

图 18 量子探测成像应用探索代表性进展成果

量子探测成像技术有望在环境监测和生物医疗等领域带来创新应用，相关实验探索在国内外取得一定进展。石油泄漏监测对于环境保护有重要意义，通过监测管道泄漏，及早发现泄漏情况，及时采取措施防止泄漏事故扩大。2023 年，厦门大学联合团队¹⁴²利用单光子拉曼激光雷达实现水下石油泄漏检测，如图 18（a）所示，实验中体积约 0.013m^3 的雷达系统在水下 0.6 米处能够探测和区分厚度为 1~15 毫米的石油泄露。生命体征的实时监测在智慧医疗中也有重要应用价值，目前相关检测大多基于接触式设备，给应用推广造成不便。悉尼大学团队¹⁴³发明了用于非接触式生命体征检测的光子雷达，如图 18（b）所示，利用经人体胸腔反射信号的多普勒效应监控人的呼吸频率、幅

¹⁴¹ <https://arxiv.org/abs/2306.09473>

¹⁴² <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-62-19-5301>

¹⁴³ <https://www.nature.com/articles/s41566-023-01245-6>

度或心率，可对呼吸骤停和吸气性呼吸困难等呼吸系统疾病进行早期检测，并对潜在健康问题进行提示和施救警报。

总体而言，量子探测成像技术有望提升全天候目标感知和识别定位能力，基于关联成像技术实现远距离和高分辨率的成像能力，支持三位成像的精细对象识别。但也要看到，当前的量子探测成像技术仍处于研究探索阶段，技术成熟度还非常有限，需要进一步提升探测距离、分辨率和成像速率，才能逐步走向实用化。

(四) 能源领域探索量子测量应用，助力双碳达标

2020 年 9 月，我国明确提出到 2030 年实现“碳达峰”与 2060 年实现“碳中和”的双碳发展目标。在双碳政策指引下，调整能源结构，向清洁、低碳、高效方向转型，同时变革能源消费方式，通过技术创新提升存储、配送与使用效率，对于未来提升产业竞争力，走向可持续发展具有重要意义。以金刚石色心磁场测量、电流互感测量和单光子探测为代表的量子测量技术，将有望解决能源行业诸多应用痛点，助力实现双碳发展目标。

锂电池因其高能量密度和集成化能力，在新能源领域，特别是电动汽车等行业已获得广泛应用。在锂电池的生产、检测和使用等过程中，仍有很多行业痛点亟待解决和提升。首先，在锂电池生产过程中，原材料的铁磁性杂质含量是影响电池性能以及健康状态的重要因素，要求严格控制在百万分之一（ppm）量级。传统锂电池生产线依靠电磁吸附技术进行铁磁性杂质去除，结合抽样方式进行检测，检测耗时长、过程繁琐且漏检率高。基于金刚石色心磁场测量技术，可以实现

高灵敏度、非接触和实时的铁磁性杂质检测，结合多级电磁除杂装置，可以有效地提升锂电池产品质量和生产效率。其次，锂电池漏电流在实际应用中具有巨大的安全隐患。传统检测方式测量电池的自放电率，将充满电的电池存放数周时间后测量剩余电量，这种方式极大地增加了仓储时间和成本。金刚石色心磁力计可以非接触方式测量锂电池漏电流导致的微弱磁场变化，有望将锂电池漏电流检测时间从数周缩短到分钟级，实现“即产即检”。最后，电动汽车使用锂电池需要准确测量剩余电量，对剩余里程和充电需求做出评估。但由于电池电流变化动态范围达到数百 A，传统传感器难以达到 mA 级测量精度，导致电量估计通常有 10% 冗余，使用效率降低。日本东京工业大学¹⁴⁴报道使用金刚石色心传感器测量电池电流，可在 130 A 的动态范围内达到 10 mA 电流测量精度，提升电池利用效率，预计使用此项技术有望实现全球交通领域 0.2% 的 CO₂ 减排。

未来，新型电力网络将从“源随荷动”的实时平衡模式和大电网一体化控制模式，向“源网荷储”协同互动的非完全实时平衡模式和大电网与微电网协同控制模式转变，这一转变趋势对于电网状态信息采集和智能化监测分析能力提出更高要求，需要更加灵敏与可靠的监测传感设备。传统电流互感器体积大、耐压等级低、温漂大、精度难以提升。基于金刚石色心的量子电流互感器可对高压电流导线周围的磁场进行探测，实现高精度和动态范围的电流互感测量。金刚石材料具有稳定物理化学性质，耐受各种极端环境，可以提升电流互感器的

¹⁴⁴ <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18106-x>

耐压等级和工作寿命。量子电流互感器可用于实时监测电网中由于环境变化或黑客攻击导致的断电、电涌等异常情况，保障电网健康状况和安全性，提升运维效率。2023 年，国家电网安徽电科院联合中科大创业团队发布¹⁴⁵量子电流互感器样机并在电力行业推动落地应用，有效提升了电网监测中的电流测量最高精度。

量子测量技术在传统能源的勘探、运输和存储等领域同样也有用武之地。华中科技大学报道¹⁴⁶的冷原子干涉重力梯度仪，具有微伽级高探测分辨率，可以用于石油和天然气资源的勘探开发。基于金刚石色心的高灵敏度光学温度测量传感¹⁴⁷，可用于油气传输管道等环境中部署，实现泄漏检测等应用。在油气存储过程中，气体泄漏检测和定位对于防范生产损失和灾难性事故至关重要。基于单光子探测和时间相关光子计数相结合的量子光学雷达¹⁴⁸，可实现高灵敏度的气体浓度检测与成分分析，在百米范围达到 ppm 检测精度，可为炼化和存储设施提供先进的气体泄漏监测方案。

（五）量子测量产业链形成，规模化商用仍有挑战

在量子信息三大领域中，量子测量具有技术方向多元、应用场景丰富、产业化前景明确的特点。量子测量各技术方向的发展成熟度有较大差异，既有原子钟、原子重力仪等已成熟商用产品，也有量子磁力计、光量子雷达和量子陀螺等处于工程化研发和应用探索阶段的样机产品，还有量子关联成像、里德堡原子天线等尚处于系统技术攻关

¹⁴⁵ <http://kjt.ah.gov.cn/kjzx/mtjj/121803151.html>

¹⁴⁶ <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-1056/24/5/050401>

¹⁴⁷ <https://doi.org/10.1063/1.5037053>

¹⁴⁸ <https://www.idquantique.com/quantum-sensing/applications/oil-gas/>

的原型机。近年来，随着量子测量技术和应用的不断发展，国内外均有相关初创企业不断涌现，传统行业企业也在量子测量不同技术方向加大布局推动力度，以上游基础材料器件系统、中游系统样机产品和下游多领域行业应用组成的产业链基本形成，如图 19 所示。



来源：中国信息通信研究院

图 19 量子测量产业链与代表性企业概况

量子测量产业链上游主要是系统研发所需的基础材料、元器件和支撑系统提供商。基础材料包括高纯度同位素材料、金刚石、惰性气体等；元器件主要包括激光器、原子气室、光学系统元器件、电子元器件、线缆等；支撑系统主要包括磁屏蔽、真空、低温、隔振等环境保障；量子测量上游厂商在欧美集中度较高。目前量子测量技术路线多元，所需上游材料、器件差异性大，给上游整合和优化带来挑战。未来，供应链发展需要科研机构和企业积极推动产学研合作，促进上下游协同创新，通过共同研发、技术转让、联合生产等方式，逐步实现供应链整合和优化。此外，建立行业标准和规范也是推动量子测量

供应链培育和发展的的重要手段，通过制定技术标准和检测体系，推动上游材料和器件的标准化，可降低供应链企业成本和风险。

量子测量产业链中游包含各种技术方向的系统设备提供商。目前可以商用的量子测量设备产品包括量子时钟、量子重力仪、量子磁力计及其衍生产品、光量子雷达等。冷原子钟多用于计量、授时、基础科研等场景，同时其设备结构复杂、体积庞大，产业化程度较低。热原子钟已经广泛应用于通信、电力、卫星导航等领域，成熟度和商业化成熟度最高。近年来，芯片级的热原子钟成为产业界关注的热点，逐步实现工程化样机向商用产品的迭代演进，如果成本可以进一步降低，有望替代现有高精度晶振并改变现有时频网络体系架构。分子钟是近年来提出的一种新型量子时钟，利用惰性气体的振动谱特性，有望实现千秒稳 $10^{-11} \sim 10^{-13}$ 量级，纯电学元件驱动，无需光学器件和恒温加热系统，对磁场不敏感，易实现芯片化，未来应用前景广阔。量子重力仪目前已实现集成化、可移动、自动化控制，未来还需要实现小型化和降低成本。量子磁力计近年来发展迅速，也随之衍生出一系列新型测量传感设备，如脑磁图仪、心磁图仪、量子扫描显微镜、量子电流互感器等，商业化成熟度方面正在快速提升。量子雷达主要分为两种，一种是基于单光子探测的光量子雷达，另一种是基于量子纠缠、压缩等原理的量子干涉雷达、量子照明雷达和量子增强雷达。前者已经实现商用，后者仍处于原理验证阶段。光量子雷达在环境监测、道路交通、气象测绘等诸多领域具有广阔的应用前景，市场驱动力较大。其他量子测量产品如量子惯性导航系统和原子天线等，在国防军工等领域有重要战略价值，但是产品成熟度还有待提升。

量子测量产业下游涉及基础科研、国防军工、生物医药、能源开发、工业制造、资源勘探、环境监测等诸多领域，应用前景十分广泛。当前量子测量技术产品已经成为传统传感测量领域的有效补充和增强技术方案，未来随着样机产品性能指标、工程化水平和体积成本的进一步优化，有望成为超越现有传感测量手段的下一代技术方案演进方向。但也需要看到，大多数量子测量技术仍主要处于实验室研发和原型机攻关阶段，如何走出实验室，在工程化应用场景中实现落地，样机整体能力指标如何满足实际场景中全方位应用需求，仍是需要产业界和学术界开展协同推动并突破的科技成果转化瓶颈。当前，量子测量技术的商业价值尚未完全显现，社会资本的投入力度有限，主要依靠公共研发资金支持，加大量子测量领域创新创业的支持力度也是未来推动商业化应用的必要条件。

五、量子信息技术与应用前景展望

（一）三大领域研究发展迅速，应用探索进一步拓展

以量子计算、量子通信和量子测量为代表的量子信息技术，既是量子科技的重要组成部分，也是未来产业发展的重点方向之一，将引领新一轮科技革命和产业变革方向。量子信息技术已进入科技攻关、工程研发、应用探索和产业培育一体化推进的发展关键期，全球主要国家加强战略规划和投资布局，国际竞争正日趋激烈。量子信息三大领域科研探索和技术创新成果不断涌现，美国处于国际科研合作中心地位，企业创新实力强劲。在过去十年间，量子信息领域的企业数量和投融资经历了一轮爆发式增长，近两年增速有所回落。

量子计算多种技术路线并行发展，超导路线在比特数量和保真度等指标持续稳步提升，发展较为均衡，是技术路线竞争的种子选手，中性原子路线近期在比特规模和保真度方面提升迅速，有望成为黑马。基于量子纠错实现逻辑量子比特成为下一步发展的路标，多项创新方案和突破纠错盈亏平衡点实验成果为发展奠定基础。测控系统已成为量子计算工程化研发和能力提升的重要瓶颈，技术路线分散导致供应链碎片化是限制因素。量子计算编译、开发、测控等软件成为创新的重要发力点，但技术和应用成熟度有待提升。量子计算云平台是提供硬件算力、探索应用场景和培育产业生态的重要支点，欧美科技巨头量子计算云平台在硬件能力、软件生态和用户影响力等方面处于领先。量子计算在组合优化、量子模拟、人工智能和线性代数等领域广泛探索应用场景，目前主要处于算法研究和可行性验证阶段。未来在比特数量和保真度满足一定条件时，有望在性能要求不高的组合优化场景中率先突破应用。随着量子计算相关企业数量的快速增长，上中下游产业链已初具雏形，产业生态也在蓬勃发展，量子计算技术标准化正成为国内外布局和推动的热点。

量子通信领域的 QKD 科研热度持续，TF 和 PMP 等协议是英雄实验关注焦点，实验系统的极限传输距离和密钥成码率指标得到提升。CV-QKD 在城域范围具有密钥成码率、系统集成化和相对较低成本的优势，将是未来应用的重要方案。随着通信运营商的加入，基于 QKD 和 QRNG 的量子保密通信应用方案不断丰富，场景探索持续拓展，但仍需进一步提升技术产品工程化水平，在小型化和降成本等方面取得实质性突破，才能真正破解商业化应用困局。量子保密通信的系统

器件、网络架构和安全性等标准化研究取得阶段性进展，推动标准实施验证和产品测评认证是未来努力方向。量子信息网络已成为量子通信领域科研竞争主赛道，在纠缠制备操控、量子存储中继、量子频率转换等方向取得诸多进展，为原型样机研发和组网实验验证奠定基础。欧美研究机构多方合作加快推动组网试验技术验证，我国需加大量子信息网络方向布局和推动力度。NIST 历时 7 年组织 4 轮征集评选，发布首批 3 项 PQC 算法标准草案，拉开了公钥密码体系升级迁移和 PQC 产业化发展的序幕，但未来应用推广还任重道远。

量子测量领域有冷原子干涉、核磁/顺磁共振、金刚石色心、SERF、量子纠缠或压缩增强探测等技术方向多元化发展，在量子时频基准、磁场/电场测量、重力测量、惯性导航和目标探测等应用方向已有样机和产品，为国防军工、航空航天、定位导航、资源勘测等行业带来了全新传感探测方案。基于量子纠缠和压缩态等方案的量子增强测量，成为突破经典测量物理极限，展现量子优势的重要方向。基于光学原子钟、量子陀螺仪等设备实现自主定位/导航/授时具有重要战略价值，已成为主要国家在量子测量领域的关注重点。采用单光子探测、量子关联成像和光量子雷达等技术实现高精度目标识别，是未来战场态势感知和要地侦测防御的有效技术手段。金刚石色心磁场测量和单光子探测成像等技术在锂电池制造、检测和使用，以及电网和油气管网运营维护等方面，大有用武之地。近年来，量子测量企业数量持续增长，产业链上下游生态基本形成，但规模化商用仍面临一定挑战。

（二）培育量子信息未来产业需加强政产学研用协同

量子信息技术是挑战人类调控微观世界能力极限的世纪系统工程，总体处于从基础研究向应用研究转化的发展关键期，近年来科研成果不断涌现、应用探索广泛开展、产业生态方兴未艾，已成为培育未来产业，构建新质生产力的关注焦点之一。加快发展量子信息技术，推动创新成果应用，构建供应链、人才队伍和未来产业竞争力，成为全球主要国家战略布局和政策规划的普遍共识。

新兴技术和未来产业的培育发展，需要政府战略规划政策引导，公共研发资金投入支持，学术界科研攻关突破，产业界技术创新推动，行业应用商业转化等多方要素的共同支持。以上世纪中叶电子信息产业发展为例，1946 年美国陆军资助宾夕法尼亚大学研发全球首台通用电子计算机 ENIAC，成为电子信息产业发展起点。美国政府以国防和情报等需求为牵引，在半导体领域开展大量直接投资和政府采购，支持贝尔实验室、德州仪器、西屋电气、英特尔等研发机构和企业，在晶体管、集成电路和存储器等领域取得多项重大原始创新突破并完成早期商业化积累。美国商务部数据显示，1958-1964 年间半导体技术研发经费中，政府投资占比高达 85%，电子设备每年 30 亿美元销售额约一半来自军方采购。面对量子信息发展的时代机遇，美国自 2018 年起发布《量子信息科学国家战略概述》，制定《国家量子倡议（NQI）》法案，通过 DOE、NSF、NIST 和 DOD 等部门投资 37.38 亿美元组建多个量子科学研发中心，支持上千项科研项目，通过组建量子经济发展联盟（QEDC）构建产业供应链和人力资源，打造盟友国

家间量子科研与产业合作生态。美国通过一系列超常规布局 and 全方位举措，加快推动量子信息技术产业发展，占据领先优势。

我国高度重视量子信息领域发展，近年来取得一系列重要进展。基础科研方面，通过组建国家实验室和实施重大科技项目，在量子信息三大领域形成了较为全面的科研布局，学术论文和专利申请数量位居全球前两位，取得了“墨子号”量子科学实验卫星、“祖冲之”超导量子处理器等一系列重要成果。工程研发方面，稀释制冷机等量子计算支撑保障系统自主研发攻关取得初步成果，新型 QKD、QRNG 产品和量子加密应用设备不断迭代，钙离子光钟和冷原子重力仪等样机产品研发和技术验证取得进展。应用探索方面，量子计算企业和行业企业的合作研究逐渐增多，通信运营商为量子保密通信的应用融合与场景探索注入新动力，量子心脑磁图仪和量子电流互感器等测量新产品在相关行业开展应用。生态培育方面，量子信息网络产业联盟、量子信息技术与应用创新大赛、量子产业大会、量子信息技术学术交流大会等平台和活动，促进了产学研交流合作与协同创新。

面对全球量子信息技术快速发展形势和日趋白热化的国际竞争态势，我国不进则退、慢进亦退。同时，我国量子信息领域在全方位体系布局，核心原创技术方案，产业支撑基础能力，产学研协同合作和人才体系建设等方面，也存在一些短板和瓶颈。未来，需要在完善政策体系布局，强化战略科技力量，加快关键技术攻关，保障自主供给能力，加强产学研用协同，推进未来产业培育等方面，进一步聚力加快发展，争取更多技术、应用与产业化成果。

中国信息通信研究院

地址：北京市海淀区花园北路 52 号

邮编：100191

电话：010-62300592

传真：010-62304980

网址：www.caict.ac.cn

