

量子信息技术发展与应用 研究报告 (2022 年)

中国信息通信研究院

2023年1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，是量子科技重要组成部分，有望成为未来重大技术范式变革和颠覆式创新应用的新源泉。发展量子信息技术，推动科研成果应用和产业生态构建，已成为全球在前沿科技领域政策布局与投资支持推动的热点，也是各国构建未来产业竞争力，维护国家技术主权的重要方向之一。2022 年度诺贝尔物理学奖，授予 Alain Aspect、John F. Clauser 和 Anton Zeilinger，表彰他们使用纠缠量子态进行开创性实验，为基于量子信息的新技术开发奠定基础，进一步提高全球关注热度。

近年来，量子信息技术科研加速发展，技术创新活跃，亮点成果不断涌现，标准化研究取得阶段性进展，应用场景探索广泛开展，产业生态培育方兴未艾。我国量子信息技术领域具备良好基础，前沿研究、样机研发和应用推广等方面取得诸多进展，未来有望在基础科研、应用推广与供应链构建等方面取得更多成果。

2018 年起，中国信息通信研究院连续 4 年发布《量子信息技术发展与应用研究报告》，成为管理部门和行业各方掌握量子信息领域发展动态的重要参考。本报告聚焦 2022 年量子信息技术发展态势，梳理三大领域的最新研究与应用进展，分析探讨热点问题，展望技术演进与产业应用发展趋势，希望为促进凝聚业界共识，形成发展合力贡献力量。

目 录

一、 量子信息技术总体发展态势.....	1
(一) 量子信息技术是量子科技的重要组成部分	1
(二) 量子信息成为全球多国政策布局与投资热点	3
(三) 量子信息三大领域科研与技术创新快速发展	6
(四) 量子信息技术与产业生态培育受到多方重视	9
二、 量子计算领域研究与应用进展.....	12
(一) 样机研发多路线竞相争鸣，研究进展亮点纷呈	12
(二) 量子纠错成业界关注热点，将是下一个里程碑	16
(三) 基准测评为性能表征和行业观察提供重要参考	19
(四) 软件与云平台发展迅速，构建用户生态是关键	21
(五) 应用探索广泛开展但尚未落地，泡沫争议浮现	24
三、 量子通信领域研究与应用进展.....	28
(一) 量子密钥分发科研活跃，实验系统性能获提升	28
(二) 量子信息网络持续研究，使能技术仍有待突破	32
(三) 空间量子通信将成为科研与应用发展重要方向	36
(四) 量子保密通信探索应用，标准测评验证须加强	38
(五) 量子保密通信与 PQC 将有望形成融合应用方案	41
四、 量子测量领域研究与应用进展.....	44
(一) 多种量子测量技术并存，样机工程化水平提升	44
(二) 助力生命科学研究，实现可穿戴与非侵入检测	47
(三) 赋能垂直行业应用，成为加速产业升级催化剂	50
(四) 量子测量与其他技术领域融合，向智能化发展	54
(五) 量子测量商用发展迅速，产业价值链初步形成	56
五、 量子信息技术与应用前景展望.....	60
(一) 三大领域研发持续推进，应用与产业前景各异	60
(二) 发展量子信息技术，开启新一轮技术创新周期	62

图 目 录

图 1 量子信息技术是量子科技的重要组成部分.....	1
图 2 量子信息三大领域近年来科研论文趋势.....	7
图 3 量子信息三大领域近年来专利申请趋势.....	7
图 4 量子信息三大领域各国专利申请占比情况.....	8
图 5 我国各省市量子信息专利申请量.....	9
图 6 全球各国量子信息技术领域产业联盟概况.....	10
图 7 美国量子信息领域行业联盟平台概况.....	11
图 8 全球量子计算样机研发与技术验证代表性成果.....	16
图 9 量子计算基准测评体系初步框架与指标.....	20
图 10 量子计算基准测评主要技术方案概况.....	21
图 11 量子计算技术与应用体系视图.....	22
图 12 国内外代表性量子计算软件概况.....	23
图 13 量子计算应用场景探索发展概况.....	25
图 14 量子计算“杀手级”应用需突破“不可能三角”.....	27
图 15 TF-QKD 系统实验 (a) 830 公里 (b) 658 公里.....	30
图 16 NIST 抗量子计算破解加密 (PQC) 算法标准化.....	42
图 17 量子保密通信与 PQC 融合应用.....	43
图 18 量子测量主要技术方向.....	45
图 19 量子测量在生命科学领域主要研究成果.....	48
图 20 量子测量在垂直行业应用主要案例.....	51
图 21 智能化量子传感器与量子信息和 AI 结合.....	54
图 22 量子测量技术产业价值链.....	57
图 23 量子测量领域产业视图.....	59

表 目 录

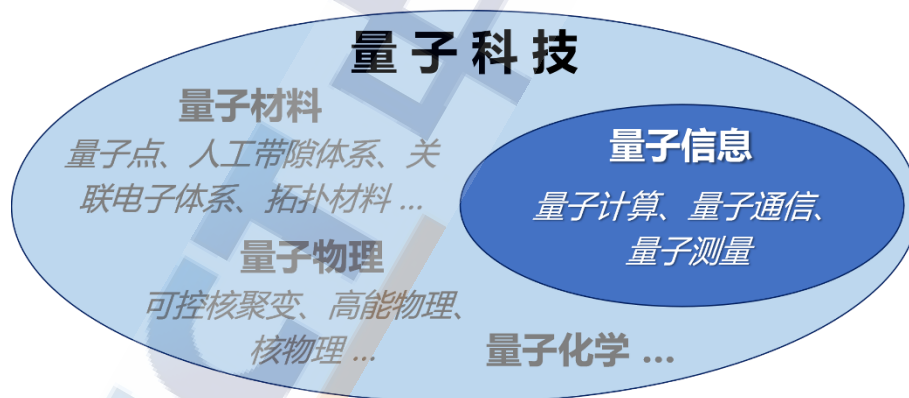
表 1 近年国外量子技术企业融资与上市概况.....	4
表 2 2022 年全球量子信息网络代表性科研进展.....	32
表 3 “墨子号”量子科学实验卫星代表性科研成果.....	36



一、量子信息技术总体发展态势

（一）量子信息技术是量子科技的重要组成部分

上世纪量子力学创立和发展，开启了人类对微观物理世界的认识。通过对光电效应、受激辐射光放大、固体能带与能级跃迁等现象和规律的阐释与利用，诞生了以半导体、激光器和传感器为代表的信息测量、传输与处理技术，成为从工业社会迈向信息社会的核心驱动力。本世纪量子调控技术研究和发 展，将进一步深化人类对微观物理世界的理解。通过开发新材料、构筑新结构、发现新物态和研发新测控手段，对量子叠加、量子纠缠、量子隧穿等新颖物理现象加以利用，并与通信、信息、材料和能源等领域交叉融合而形成的量子科技，有望成为未来重大技术范式变革和颠覆式创新应用的新源泉。



来源：中国信息通信研究院

图 1 量子信息技术是量子科技的重要组成部分

量子信息技术是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、调控和观测，实现信息感知、计算和传输的全新信息处理方式。量子信息技术是量子科技重要组成部分，如图 1 所示，

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。

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，能在某些计算困难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。硬件系统研发仍处于多种技术路线并行发展阶段，超导和光量子实现量子计算优越性实验验证，离子阱量子体积指标领先，中性原子可能成为量子模拟重要平台。编译开发与算法应用软件领域百家争鸣，多类型编程框架、开发平台、模拟器和算法软件工具通过开源社区开放竞争，科技巨头在软件 and 用户生态构建方面占据优势。量子计算与模拟的应用探索在各行业领域广泛开展，业界期待未来在材料与生物医药化学模拟、以及复杂系统建模与优化等领域，率先展示实用化量子计算应用案例及其优越性。

量子通信利用量子叠加态或纠缠效应，在经典通信辅助下进行量子态信息传输或密钥分发，理论协议层面具有信息论可证明安全性，部分协议可实现经典信息传输。基于量子密钥分发（QKD）、量子随机数发生器（QRNG）和量子安全直接通信（QSDC）等技术方案的量子保密通信初步实用化，在科研领域持续探索新型协议系统和提升技术水平，在国内外进一步开展应用探索和标准化研究，但应用与产业发展仍面临挑战。基于量子纠缠操控、量子隐形传态、量子存储中继和量子态转换等使能技术和组件，构建量子信息网络是量子通信领域未来的重要发展方向，近年来国内外在基础科研探索和系统原型实验等方面取得一定进展，但距离实用化仍有较大差距。

量子测量对外界物理量变化导致的微观粒子系统量子态变化进行调控和观测，实现精密传感测量，在精度、灵敏度和稳定性等方面相较传统技术带来数量级提升。当前量子测量技术与应用发展的主要方向包括：基于量子时间频率基准的授时定位，如光晶格原子钟与时频传输；基于量子陀螺的自主姿态控制与导航，如冷原子干涉或无自旋交换弛豫原子自旋（SERF）陀螺；基于量子微弱磁场测量的金属目标探测或生物磁信号成像，如心/脑磁图和分子级磁共振谱；基于量子绝对重力仪或重力梯度仪的地质及地下结构勘测；基于单光子探测和光量子雷达的目标成像与环境质量监测等。多类型量子测量样机和产品，在航天、国防、医疗、环保和科研等领域探索应用。

（二）量子信息成为全球多国政策布局与投资热点

近年来，全球主要国家在量子信息技术领域加强科技政策布局，推出发展战略和研究项目规划，加大公共研发资金的支持投入力度。量子信息领域的国家级规划与投资情况在 2021 年报告已初步总结¹，截至 2022 年 9 月，全球投资最新进展的不完全统计已达 160 亿美元以上。我国近年来高度重视量子信息技术领域发展，随着“十四五”规划中关于组建国家实验室和实施重大科技项目等措施的逐步落实，科研布局与支持力度进一步加强。需要指出，在国外统计²和报告³中，对我国量子信息领域的公共资金投资规模，大都不同程度上存在缺乏来源依据的臆想与夸大，例如“中国量子信息领域投资总额达 150 亿

¹ http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bs/202112/t20211224_394517.htm

² <https://qureca.com/overview-on-quantum-initiatives-worldwide-update-2022/>

³ <https://www.weforum.org/reports/state-of-quantum-computing-building-a-quantum-economy>

美元”说法在多个报告间相互引用，颇有三人成虎之势。

国家公共研究资金、大型科技企业投资和社会资本投融资是支持和推动量子信息技术研究和应用发展的三大支柱。IBM、谷歌、Intel 和微软等科技巨头在量子计算领域的持续投资布局，已成为推动样机研发和应用探索的重要力量，但具体投资规划和金额规模难见公开信息披露。近年来，量子信息领域的初创企业获市场高度关注，通过社会资本股权投资和证券市场上市融资等形式获得大量资金支持。量子信息领域投融资近两年来呈现爆发式增长趋势，2020 和 2021 年投资金额分别达到 7 亿美元和 14 亿美元⁴，超过 2010-2019 共十年的总和。值得关注的国外量子技术企业融资上市不完全统计情况如表 1 所示，量子技术初创企业在欧美聚集度和关注度更高，市场投资高度集中在量子计算领域，其中又以量子计算系统硬件制造企业最受追捧，反映出量子计算机研发在整个量子信息技术领域的重要价值和意义。

表 1 近年国外量子技术企业融资与上市概况

企业（国家）	技术领域	融资类型	融资/收益 ⁵ （亿美元）	时间
PsiQuantum（美）	量子计算	股权投资	6.65	2021
Quantinuum（英/美）	量子计算	股权投资	3.00	2021
Xanadu（加）	量子计算	股权投资	1.45	2021
IQM Quantum Computers（芬）	量子计算	股权投资	1.28	2022
Quantum Machines（以）	量子计算	股权投资	0.75	2022
IonQ（美）	量子计算	NYSE 上市	6.36	2021
Rigetti（美）	量子计算	NASDAQ 上市	2.62	2021
Arqit（英）	量子加密	NASDAQ 上市	0.70	2021

⁴<https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/quantum%20computing%20funding%20remains%20strong%20but%20talent%20gap%20raises%20concern/quantum-technology-monitor.pdf>

⁵ 通过特殊目的收购公司（SPAC）完成首次公开募股（IPO）的交易收益（扣除赎回）。

D-Wave（加）	量子计算	NYSE 上市	0.09	2022
-----------	------	---------	------	------

来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理（截至 2022 年 9 月）

2022 年，美国在量子信息领域进一步加大政策布局和规划投资力度，出台多项法案、政令、规划和研究报告，全方位推动量子信息科研、应用、产业、教育和国际合作等方面发展。

在规划投资方面，2021 年 12 月公布的《国家量子行动（NQI）》计划最新预算年度报告⁶显示，2018 年 NQI 立法后的 4 个财年以来，预算授权和请求金额分别为 4.49 亿、6.72 亿、7.93 亿和 8.77 亿，总额达 27.91 亿美元，已超过原计划投资规模（5 年合计 12.75 亿）的两倍以上。8 月美国通过的《芯片和科学》法案⁷中，包含量子科学网络、科学技术量子用户扩展、量子网络与通信研究和标准化、下一代量子领导者先导计划 4 个项目，未来五年新增预算金额 7.65 亿美元。

在政策文件方面，NQI 办公室 2 月发布《量子信息科学技术劳动力发展国家战略》计划⁸，评估人力资源需求，提出科普教育宣传等方面人才培养规划举措。3 月发布《将量子传感器付诸实践》报告⁹，分析量子测量技术应用挑战，提出加强应用研究、开发组件子系统和简化技术转让与准入等发展建议。白宫 2 月更新《关键和新兴技术》清单¹⁰，列入量子计算、量子器件材料与制造、抗量子计算破解加密、量子传感和量子网络等 5 项量子信息技术。5 月签发两项总统行政令

⁶ <https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2021/12/NQI-Annual-Report-FY2022.pdf>

⁷ <https://www.quantum.gov/quantum-in-the-chips-and-science-act-of-2022>

⁸ <https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2022/02/QIST-Natl-Workforce-Plan.pdf>

⁹ <https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2022/03/BringingQuantumSensortoFruition.pdf>

¹⁰ <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/02/02-2022-Critical-and-Emerging-Technologies-List-Update.pdf>

¹¹，一是强化 NQI 咨询委员会职能，二是部署国家信息系统中的抗量子计算破解加密技术产品升级工作。

牵头实施 NQI 计划的能源部（DOE）、国家科学基金（NSF）和国家标准与技术研究院（NIST），近期发布了该计划实施和投资进展情况。其中，DOE 报告¹²显示，投资 6.25 亿美元在其下属的 5 个国家实验室组建多方协作的量子技术研究中心。此外，还投资 3.84 亿美元在量子材料、核聚变、量子网络、量子计算软件算法、量子信息与核物理融合研究等方面支持了 25 个项目。NSF 网站¹³显示，资助成立 5 家量子飞跃挑战研究所和 14 所优势高校构建量子科研与教育基地，开展 18 项专题研究项目投资。NIST 网站¹⁴显示，在离子光钟、量子存储器、冷原子传感器、量子通信和网络、中性原子量子计算模拟、单光子测量等方向部署开展 40 个科研项目。

（三）量子信息三大领域科研与技术创新快速发展

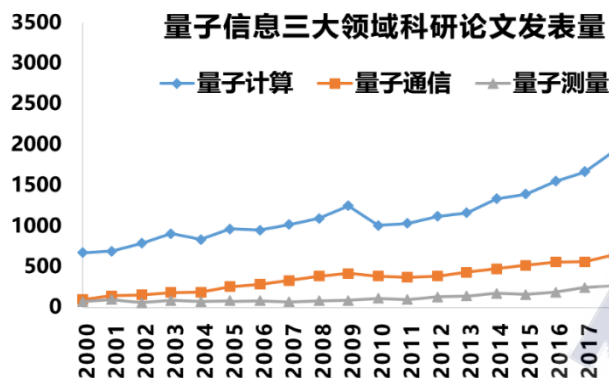
量子信息技术科学研究探索发展迅速，已成为前沿科技领域的热点，近年来科研论文发表量的趋势见图 2，其中量子计算领域科研产出近十年增长趋势显著，在三大领域中最活跃。

¹¹<https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2022/05/04/executive-order-on-enhancing-the-national-quantum-initiative-advisory-committee/>
<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/>

¹²<https://www.energy.gov/technologytransitions/downloads/spotlight-quantum-information-science-and-technology>

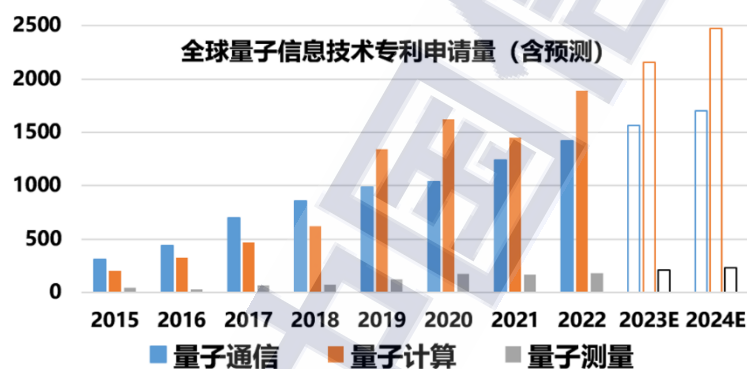
¹³ https://www.nsf.gov/mps/quantum/quantum_research_at_nsf.jsp

¹⁴ <https://www.nist.gov/quantum-information-science>



来源：中国信息通信研究院（截至 2022 年 9 月）

图 2 量子信息三大领域近年来科研论文趋势¹⁵

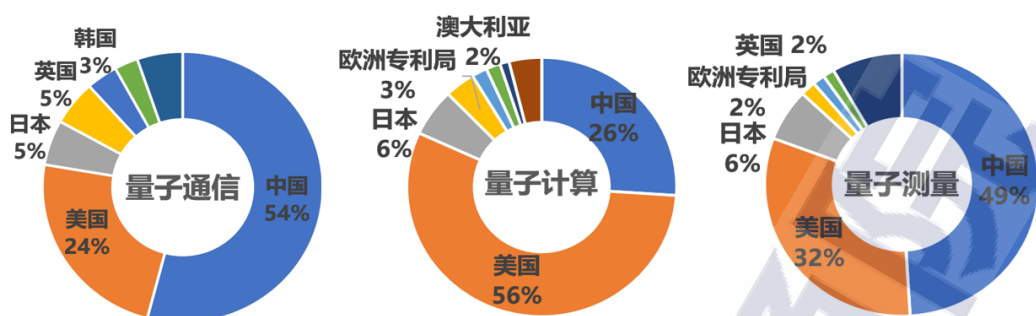


来源：中国信息通信研究院（截至 2022 年 9 月）

图 3 量子信息三大领域近年来专利申请趋势

近年来，量子计算、量子通信和量子测量三大领域的全球专利申请数量变化趋势如图 3 所示。其中，量子计算领域技术创新活跃，专利申请数量上升迅速，自 2019 年起已成为量子信息领域专利申请数量最多的方向，四年来持续保持领先并呈现加速发展趋势。量子通信领域专利申请数量增长平稳，量子测量相比其他两个领域，在专利绝对数量和增长趋势方面差异较为明显。

¹⁵ 2022 年科研论文数量仅包含前 9 个月。

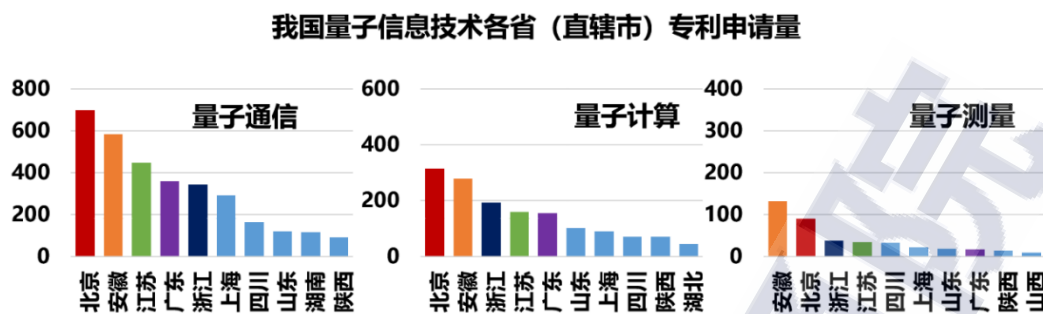


来源：中国信息通信研究院（截至 2022 年 9 月）

图 4 量子信息三大领域各国专利申请占比情况

全球各国量子信息领域的专利申请占比情况如图 4 所示，其中量子计算领域美国技术创新活跃，专利申请占比达到 56%，中国位居第二，专利申请数量占比达到 26%。在量子通信和量子测量领域，中国专利申请数量均处于全球领先，占比分别为 54% 和 49%，美国专利申请数量均处于第二位，占比分别为 24% 和 32%。从专利申请数量角度看，中美两国在量子信息技术领域创新能力较强。

我国各省市量子信息领域的专利申请量分布情况如图 5 所示。量子通信领域专利总数最高，相关高校、科研机构和产业公司聚集区域，如北京、安徽和江苏等省市的专利数量处于领先。量子计算领域以科研为主，应用产业处于探索起步期，国内发展水平较平均，高校和研究机构聚集的北京和安徽等地的专利数量靠前。量子测量领域专利数量较少，安徽和北京的专利申请量明显高于其他地区。从专利申请数量和分布看，我国北京、安徽、浙江、江苏和广东等地区，已成为量子信息技术研发与应用的创新高地。



来源：中国信息通信研究院（截至2022年9月）

图 5 我国各省市量子信息专利申请量

(四) 量子信息技术与产业生态培育受到多方重视

当前，量子信息技术整体处于从基础科研与实验探索，向产品研发与应用探索过渡的早期阶段。未来，量子信息技术从科研走向应用和产业化¹⁶需要多要素的协同推动：一是政府公共研究资金和私营部门社会投资的长期稳定投入；二是学术科研机构的攻关突破与技术创新驱动；三是产业公司和初创企业的技术产品研发、应用场景开发和商业应用转化；四是在政策、监管、标准、测评、认证和人力资源等多方面的配套支持。近年来，推动量子信息三大领域科研探索，促进科研成果应用转化，打造技术产业创新链与供应链，加强量子技术技能人力资源建设，构建培育量子信息技术产业生态体系，已成为各国开展中长期体系化布局，维护量子技术主权的普遍共识。

¹⁶ https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA869-1.html



来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

图 6 全球各国量子信息技术领域产业联盟概况

全球主要国家在量子信息技术领域，成立和推动产业联盟类平台组织的进展情况概况如图 6 所示。美国量子经济发展联盟 (QED·C) 是全球各类量子信息技术产业联盟中成立最早和发展最活跃的平台，由斯坦福研究院 (SRI) 运营，包含美国境内 160 余家高校、科研机构、科技企业和初创公司，2022 年通过政府间协议等方式，扩展与 36 个西方国家的成员合作关系。目前已发布《量子传感》、《实用量子中间表示 (PIRQ)》、《量子安全组织指南》和面向应用的量子计算性能基准测试等多项研究报告与开源软件工具¹⁷。欧盟、荷兰、加拿大、德国和日本也成立量子信息技术产业联盟，促进管理部门、研究机构和产业公司等利益相关方和交流与合作研讨。以色列成立有 30 余家公司参与的量子计算、量子传感和量子密码产业联盟¹⁸。澳大利亚也成立由 6 家本地企业与 3 家美国企业发起的量子产业联盟¹⁹。促进利

¹⁷ <https://quantumconsortium.org/news-and-updates/>

¹⁸ <https://doi.org/10.1063/PT.3.4898>

¹⁹ <https://www.innovationaus.com/australian-quantum-leaders-form-industry-alliance/>

益相关方协同创新的量子经济产业联盟，正成为各国构建培育技术产业生态和供应链，加强未来产业竞争力的重要平台。



来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

图 7 美国量子信息领域行业联盟平台概况

在国家级产业联盟平台之外，由科技企业和研究机构等组建和运营的量子信息行业联盟平台，近年来也成为推动构建应用产业生态的重要力量。美国企业和研究机构在量子信息领域行业联盟平台发展方面表现活跃，代表性平台概况如图 7 所示。量子计算云平台服务是推动技术供需双方协同创新的重要形式，IBM 量子网络²⁰基于自研超导量子计算 Q Experience 云平台 and OpenQASM 软件编程框架，为全球 180 余家成员提供软硬件一体化服务和合作研发。亚马逊 Braket²¹联合多家量子计算硬件厂商提供商业级量子计算云服务。芝加哥量子交易所、西北量子网络和量子信息前沿等行业联盟平台在量子器件技术研发、量子计算机研制与测试、应用开发等方面推动合作。近期，美

²⁰ <https://www.ibm.com/quantum/network>

²¹ <https://aws.amazon.com/braket>

国成立华盛顿量子网络研究联盟（DC-QNet）²²，共同开展量子互联网的原型研发、网络测试和应用探索等合作。

近年来，我国量子信息领域的产学研协同和产业生态培育等工作也逐步得到重视和加强。2022 年 7 月，由工信部指导，中国信通院联合国内量子信息领域高校、科研机构 and 产业公司共同发起的量子信息网络产业联盟在京正式成立，目前已有成员单位 55 家，组织推动和开展了技术论坛交流、应用案例征集、行业报告研究、产品验证测评等工作。此外，在电子学会、通信学会、计算机学会、信息协会等行业平台，也成立了量子计算、量子通信等方向的分会组织，推动开展年度学术进展报告交流和产业研讨会论坛等多学科领域的交流与研讨。在行业联盟平台方面，本源量子 2018 年组建量子计算产业联盟²³，与上游供应链和下游用户企业等 20 余家单位，推动开展研发制造、应用探索和科普教育等方面合作。

二、量子计算领域研究与应用进展

（一）样机研发多路线竞相争鸣，研究进展亮点纷呈

量子力学刻画微观粒子系统中的叠加性与纠缠性等独特性质，为新的计算范式提供了物理基础。量子计算是迄今已知的，可以提供与当今计算机相比，运算处理能力指数级加速的唯一计算模型²⁴。量子计算硬件技术主要分两大类，一类是以超导和硅半导体为代表的人造

²²<https://www.quantum.gov/nrl-announces-the-washington-metropolitan-quantum-network-research-consortium-dc-qnet/>

²³ <https://originqc.com.cn/zh/union.html>

²⁴ <https://nap.nationalacademies.org/catalog/25196/quantum-computing-progress-and-prospects>

粒子路线，另一类是以离子阱、光量子和中性原子为代表的天然粒子路线。量子计算硬件研发目前处于各种技术路线并行发展和开放竞争阶段，近期科研不断取得进展，亮点成果纷呈。

超导量子计算处理器核心器件为超导约瑟夫森结，具有可设计、可扩展、易控制、易耦合等优势，近年来衍生出 **Transmon**、**Xmon**、**Fluxonium** 等多种新型超导量子比特。近期超导技术路线在比特数量和保真度方面均有突破。2022 年 2 月，**Rigetti** 上线 **Aspen-M80** 量子比特系统，预计明年初发布 84 个量子比特单芯片处理器 **Ankaa**²⁵。5 月，**IBM** 发布新技术路线图，预计年底发布 433 量子比特 **Osprey** 处理器，明年推出 1121 量子比特 **Condor** 处理器，并探索并行芯片扩展方案，2025 年实现 3 处理器集成 4000+量子比特系统²⁶。7 月，阿里报道²⁷实现 **Fluxonium** 系统中双比特门的 99.72%保真度。8 月，百度发布超导量子计算机乾始²⁸。超导技术路线是通用量子计算有力竞争者之一，得到众多科研机构、科技企业和初创公司支持，比特数量稳步提升，每秒电路层操作数（**CLOPS**）等指标占优。

硅半导体量子计算处理器在硅或者砷化镓等半导体材料制备门控量子点来编码量子比特，优势在于可扩展性好，且与成熟 **CMOS** 工艺相兼容。硅半导体量子比特主要分光门控和电门控两类，前者通常使用光学活性缺陷或量子点来诱导光子间的强有效耦合，后者通过施加在光刻金属门上的电压来限制和操纵形成量子比特的电子。硅半导

²⁵<https://www.globenewswire.com/news-release/2022/02/15/2385386/0/en/Rigetti-Computing-Announces-Commercial-Availability-of-80-Qubit-Aspen-M-System-and-Results-of-CLOPS-Speed-Tests.html>

²⁶ <https://research.ibm.com/blog/ibm-quantum-roadmap-2025>

²⁷ <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.129.010502>

²⁸ <https://quantum.baidu.com/news/quantum-create-2022-summary>

体技术路线近期主要进展在于量子比特数量和保真度提升。2022 年 1 月,《自然》杂志发表澳大利亚 UNSW 大学、荷兰 Delft 理工和日本理化研究所三个团队成果²⁹,不同方案硅基量子处理器的双量子比特门保真度均达到 99% 以上。9 月,荷兰 QuTech 实现 6 位硅基自旋量子比特的新纪录³⁰,实现 99.77% 保真度单量子门操控。未来,克服电子自旋易受电磁环境影响,将是硅半导体科研攻关的主要目标。

离子阱量子处理器利用电荷与磁场间的交互作用力,形成势阱操控带电粒子构建二能级量子比特。操控手段包括通过电场和磁场结合形成电势的 Penning 阱,以及静态和振荡电场相组合形成电势的 Paul 阱等。量子比特包括利用基态和亚稳态之间的能级差构建的光学量子比特和区分不同基态的超精细量子比特等。离子阱技术路线具有天然粒子全同、相干时间长等优势,近期主要进展是保真度提升和全连接比特数增长。2022 年 3 月, IonQ 报道钡基离子阱处理器的保真度达 99.96%, 5 月推出 32 量子比特处理器 Forte³¹。6 月, Quantinuum 的 Model-H1 离子阱量子计算机扩展到 20 全连接量子比特, 9 月实现量子体积指标 8192 新纪录³²。离子阱是通用量子计算另一有力竞争者,保真度和相干时间等指标有优势,未来样机研发在真空、激光、微波和电子学等多个工程领域需持续攻关。

光量子处理器利用单光子或光压缩态的多种自由度进行量子态编码和量子比特构建,优势在于光子受环境影响小、可常温环境工作、

²⁹ <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04292-7>, <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04273-w>,
<https://doi.org/10.1038/s41586-021-04182-y>

³⁰ <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05117-x>

³¹ <https://ionq.com/posts/may-17-2022-ionq-forte>

³² <https://www.quantinuum.com/pressrelease/quantinuum-sets-new-record-with-highest-ever-quantum-volume>

相干时间长等。光量子计算主要挑战是在不同光子态之间构建的双量子比特门和实现逻辑操作，典型策略是在线性光学量子计算中通过单光子操作和测量的结合实现双比特逻辑门，或是利用集成光学的体系结构实现光子间相互作用。近期光量子技术路线科研进展主要是量子优越性证明和光子纠缠操控实验。2022 年 6 月，加拿大 Xanadu 报道 Borealis 光量子计算机完成 216 压缩态高斯玻色采样实验³³，再次验证光量子计算优越性。2022 年 8 月，德国马克斯-普朗克研究所报道³⁴实现 14 个光子纠缠操控新纪录。未来，光量子技术路线需进一步探索新型光源和探测器技术，以及光量子逻辑门操控。

中性原子量子计算通过紧密聚焦激光束阵列形成光镊，约束中性原子在超高真空中悬浮并构建二能级系统，与离子阱技术有一定相似性，主要优势在于长相干时间和超高维阵列构建能力。中性原子量子计算适用于实现量子哈密顿量和量子模拟处理，是研究和解决凝聚态物质中诸多物理问题的典型模型，也是模拟研究分析量子化学、多体物理、凝聚态物理、核物理等诸多复杂体系和现象的有力工具。2022 年 2 月，美国芝加哥大学实现 512 位双元素二维原子阵列³⁵，5 月，哈佛大学与麻省理工展示 289 位量子比特里德堡原子处理器和图问题求解³⁶。9 月，法国 Pasqal 公司在光镊系统中捕获 324 位量子比特的中性原子大型量子处理器阵列³⁷。未来中性原子技术路线仍需进一步提升逻辑门操控能力和保真度。

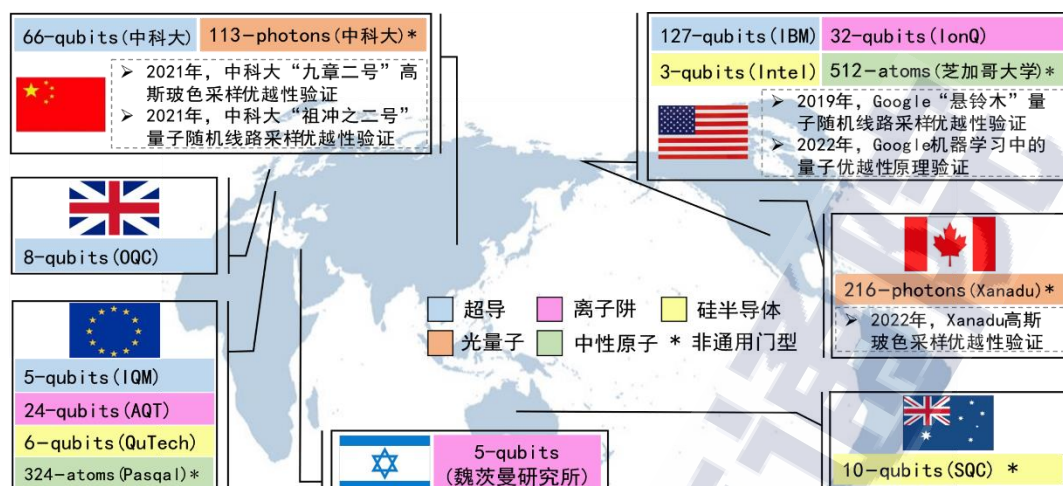
³³ <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04725-x>

³⁴ <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04987-5>

³⁵ <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.12.011040>

³⁶ <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04725-x>

³⁷ <https://pasqal.io/2022/09/14/pasqal-unveils-a-new-quantum-processor-architecture-with-a-record-324-atoms>



来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理（截至2022年9月）

图 8 全球量子计算样机研发与技术验证代表性成果

量子计算机研发已经成为全球主要国家在前沿科技领域攻关突破的重点方向之一，近年来取得样机研制与技术验证主要代表性成就如图 8 所示。大规模可容错通用量子计算机仍是需要长期探索和努力的目标，量子计算领域的发展与竞争也将是一场科技马拉松。

（二）量子纠错成业界关注热点，将是下一个里程碑

量子纠错（QEC）是一类保护量子态信息免受环境噪声或退相干影响的技术，是进行高保真量子信息处理的重要环节，也是实现可容错通用量子计算的关键要素之一。量子态不可克隆性、相干性以及差错连续性等特性，使量子纠错与经典纠错存在原理性差异。量子纠错将量子信息存储在量子纠错码中，作为一个较大的希尔伯特空间中的一个特殊子空间，可将常见错误状态移动到与原始编码空间正交的误差空间中，同时保留原状态中的信息。而后通过适当的测量确定某些粒子是否出错，并应用测量结果和么正操作等方法纠正原物理状态，

而无需测量受保护的量子态本身。量子纠错码的码字是旨在纠正特定错误集的纠缠态，可选择与最可能发生的噪声类型相匹配，错误集由一组可以乘以码字状态的运算符表示。

Peter Shor 构建第一个利用九个物理量子比特编码一个逻辑量子比特的量子纠错编码³⁸之后，量子纠错已成为量子计算一个热门研究方向。表面码是当前实验中使用较为广泛的量子纠错方案，优势在于具有较高容错阈值，仅需近邻量子比特间相互作用，易在超导和离子阱等物理系统中实现。随着量子计算样机硬件能力的提升，量子纠错研究具备更好的物理基础，近期不断取得新进展。

2021 年 7 月，谷歌报道³⁹悬铃木处理器 21 位比特一维重复码，展示对比特或相位翻转错误的指数级抑制。12 月，Quantinuum 报道⁴⁰用 10 位物理量子比特离子阱系统实现单逻辑量子比特编码和实时校正。QuTech 报道⁴¹距离为 2 的表面码量子比特实现逻辑操作并使用逻辑泡利转移矩阵演示逻辑门的过程层析成像。2022 年 7 月，中科大报道⁴²祖冲之 2.1 平台 17 位量子比特组成距离为 3 的纠错表面码在后处理中减少 20% 逻辑错误。谷歌报道⁴³在 72 位量子比特超导处理器用扩展量子纠错代码来抑制逻辑错误。8 月，日本理化研究所报道⁴⁴3 位量子比特硅基处理器的 Toffoli 门纠错演示。Quantinuum 报道⁴⁵12 位离子阱处理器构建 5 位颜色编码的 CNOT 门纠错实验。

³⁸ <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.54.1098>

³⁹ <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03588-y>

⁴⁰ <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.11.041058>

⁴¹ <https://doi.org/10.1038/s41567-021-01423-9>

⁴² <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.129.030501>

⁴³ <https://arxiv.org/abs/2207.06431>

⁴⁴ <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04986-6>

⁴⁵ <https://arxiv.org/abs/2208.01863>

量子纠错的研究和实现仍颇具挑战性。首先，量子比特的操控会引入一定的错误，除非错误概率低于某个阈值，否则会导致错误传播和越纠越错。其次，量子纠错操作需要在一个周期内多次迭代进行，纠错编码执行也有可能产生一定的读写错误并导致错误累积与扩散。最后，虽然少量量子比特可以验证量子纠错可行性，但真正实现量子纠错仍需要大量的量子比特支持。例如在错误率 $1E-3$ 条件下，高保真度执行 Shor 算法或量子化学哈密顿量模拟，需纠错编码距离约为 35，约需 15,000 个物理量子位实现一个逻辑量子位⁴⁶。此外并非所有类型逻辑门都可以转换到由分散的大量物理比特组成，解决这类问题而引入的魔法态编码将产生额外编码开销。未来，量子纠错的验证和实现仍面临诸多挑战，有待进一步探索。

量子纠错是实现可容错通用量子计算的关键技术，也是量子计算领域的下一个重要里程碑，未来发展方向主要包括三方面：一是理论与样机实验相互配合，在真实硬件平台和错误条件下，进行理论编码算法的验证与改进。二是进一步设计和改进的纠错程序，防止纠错过程和操作引入的额外错误，阻止错误状态在纠错过程中的积累和传播。三是提升硬件比特数、降低逻辑错误率和提升纠错编码阈值、减低纠错开销的双向努力。进一步提升各类型量子硬件水平满足实现量子纠错所需要的冗余比特需求，算法改进降低纠错所需的资源开销也是另一个努力方向。目前量子纠错和逻辑量子比特将何时、在何种物理平台率先实现突破仍难以预测，开展量子纠错研究和验证已成为

⁴⁶ <https://nap.nationalacademies.org/catalog/25196/quantum-computing-progress-and-prospects>

业界集中攻关的下一个重要目标。

（三）基准测评为性能表征和行业观察提供重要参考

基准测评通过设计客观有效的测试方法、工具和系统，对特定对象的功能和性能进行定量和可对比的测试，已在计算机、人工智能、云计算等领域中发挥了重要作用。随着量子计算样机研制和算法研究发展，基准测评开始逐步受到重视。2021 年，美国 DOE 启动量子科学计算开放用户测试床项目，计划建立 32 位量子比特离子阱量子处理器测试床。美国 DARPA 推出量子基准项目，明确量子计算可测试的关键指标，评估达到关键性能阈值的所需资源，衡量大规模可容错量子计算竞赛中的关注重点。

量子计算基准测评仍面临诸多技术挑战性，一是量子计算有多种技术路线并存发展，针对各类型系统方案的测评基准难以完全一致；二是各技术路线和样机研发仍在快速迭代发展，现有系统进行分析和衡量的某些指标，未来可能并不适用；三是量子计算的应用案例尚未完全明确，面向不同应用环境和条件的基准测评难以完全对应；四是基准测评需提供量子计算和经典计算之间的算力对比，但经典计算的算法研究也在持续更新，为对比带来不确定性。例如量子计算优越性证明，对比经典计算的运算时间优势，就不断受到新算法的挑战。



来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

图 9 量子计算基准测评体系初步框架与指标

量子计算基准测评处于开放探索阶段，业界提出多种指标方法，初步总结体系框架和测试指标如图 9 所示。纵向维度关注系统硬件、软件、应用和云平台等不同层面，包括量子比特、逻辑门、量子电路、系统和应用算法，以及云平台和成熟度评估。硬件层测评反映量子计算机技术能力，测评指标有较好通用性，适合硬件开发者使用。应用层测评对量子计算机执行特定任务能力进行综合评估，屏蔽底层硬件细节，适合行业用户或应用开发者使用。横向维度从规模、质量、速度三方面划分。其中，规模反映了量子计算机的极限能力，质量反映了执行量子计算任务的准确性和可信度，速度反映了量子计算机单位时间可完成工作量，三者共同支撑量子计算能力评估。

	NIST	IBM	Atos	QED-C	Super.tech	
方案	随机基准 (RB)	量子体积 (QV)	每秒电路层操作 (Clops)	Q-Score	面向应用的算法套件	SupermarQ 套件
原理	获得与原始门相关的被测试门平均保真度	可实现的正方形电路的最大尺寸	执行参数化QV模型电路各层速度	衡量解决标准优化问题的性能	执行常见量子算法/程序	执行常见量子算法/程序并附加纠错
优势	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 可扩展性强 ✓ 计算资源多项式增长 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 整体性能测量 ✓ 噪声测量 ✓ 经典计算无关 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 评估整体执行速度 ✓ 涵盖量子-经典交互时间 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 预测优化应用的有效性 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 面向实际应用 ✓ 评估整机性能 ✓ 可扩展套件 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 面向实际应用 ✓ 评估整机性能 ✓ 可扩展套件
局限	<ul style="list-style-type: none"> ✗ 仅限Clifford门集 ✗ 平均保真度单指标 ✗ 测试需门错误独立 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ 非正方形电路难预测 ✗ 仅适用NISQ系统 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ 无法测量所有应用程序 ✗ 受经典与量子计算改进影响 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ 仅限于优化问题 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ 仅适用NISQ系统 ✗ 受经典与量子计算改进的影响 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ 仅适用NISQ系统 ✗ 无法区分开放与封闭系统
	← 硬件基准测试				应用基准测试 →	

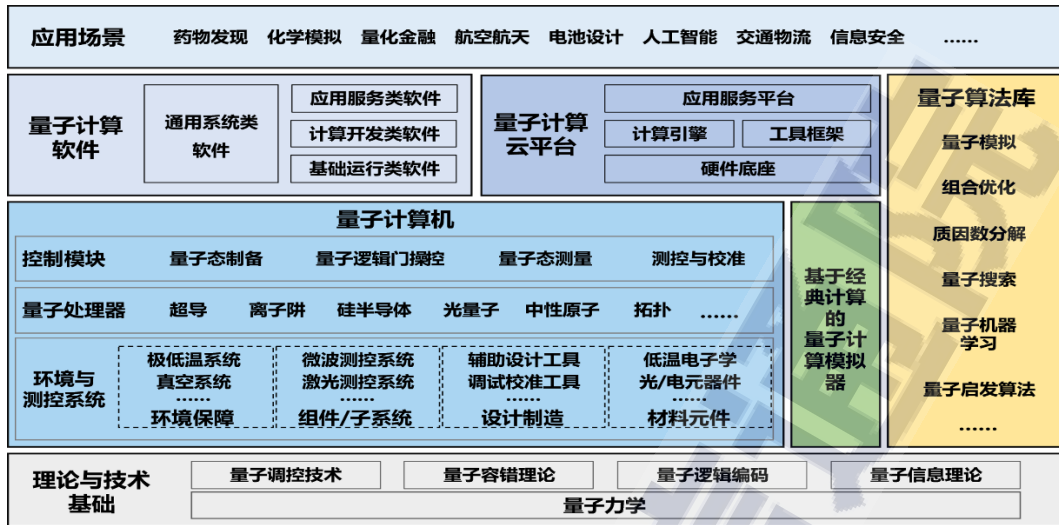
来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

图 10 量子计算基准测评主要技术方案概况

开展基准测评研究与测试验证，是促进量子计算样机研发和应用探索的重要支撑，也为评价量子计算机性能和行业发展现状趋势提供了一种重要和客观的观察角度与手段。目前诸多研究机构、企业和行业组织纷纷推出量子计算基准测评方案，如图 10 所示，其中硬件基准测试侧重评估量子计算机基本性能，应用基准测试则评估量子计算机的特定算法任务整体执行性能。

(四) 软件与云平台发展迅速，构建用户生态是关键

随着量子计算样机硬件研发不断深入，量子计算软件与云平台作为提供量子逻辑门操控和量子算法编译功能，以及量子计算应用服务的必要组件与基础平台，也在同步快速发展。量子计算软硬件系统与应用服务体系正在学术界、产业界和用户的共同推动下逐步探索和构建，量子计算技术与应用体系视图如图 11 所示。



来源：中国信息通信研究院

图 11 量子计算技术与应用体系视图

量子软件是构成量子计算系统的关键环节，目前仍处于架构探索和迭代发展的起步阶段。量子计算与经典计算运行逻辑存在显著差异，量子软件需要全新构建。量子软件可初步分为基础运行、计算开发、应用服务和通用系统等四类。其中，计算开发软件对于推动量子计算应用具有重要意义，提供了设计量子算法、创建量子程序、开发量子应用的工具集，支持量子计算机执行算法与程序的编写和转译，需要与底层硬件逻辑门匹配并实现量子算法的配置与优化。典型计算开发软件包括 Qiskit、Cirq、QDK、Forest、QPanda、ProjectQ、HiQ、PennyLane 及 SuperstaQ 等，部分量子计算开发软件可实现量子噪声模拟，部分软件可实现任意体系结构编译，软件功能差异将导致不同量子算法在不同平台的实现也有一定差异性。

	Qiskit	Cirq	QDK	Forest	QPanda	Quanlse
发布机构	IBM	Google	Microsoft	Rigetti	本源量子	百度
发布时间	2017.03	2018.04	2018.01	2017.01	2018.02	2019.07
编程语言	Python	Python	Q#	Python	Python、C++	Python
典型工具模块	Terra: 量子门和脉冲级编程 Aqua: 量子化学、优化和人工智能算法高级编程 Iqnis: 检查错误、改进门实现 Aer: 量子算法	TensorFlow Quantum: 量子机器学习建模工具 OpenFermion: 模拟获取和操纵典型费米系统	全振幅、部分振幅量子虚拟机、单振幅、含噪量子模拟器 算法用例: VQE、Grover等	pyQuil: 构建和执行Python库 Quilc: 编译器优化 QVM: 量子模拟器	全振幅、部分振幅量子虚拟机、单振幅等量子模拟器 算法用例: QFT、BV、QAOA、Shor、Grover等	构造哈密顿量, 量子比特控制, 含噪量子模拟器, 量子比特标定与脉冲校准 算法用例: RB、VQE、最大割等
开源活跃度 (Github)	Stars: 2701 Fork: 745 Issues: 112	Stars: 3535 Fork: 795 Issues: 248	Stars: 3580 Fork: 881 Issues: 15	Stars: 1260 Fork: 331 Issues: 169	Stars: 775 Fork: 77 Issues: 2	Stars: 35 Fork: 6 Issues: 1

来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

图 12 国内外代表性量子计算软件概况

国内外科技巨头和初创企业均在努力推动和构建量子软件生态，典型量子计算软件如图 12 所示。IBM、谷歌、微软等科技巨头基于长期技术积累与大量资源投入在业内保持领先。华为、百度、本源等也布局推动量子计算软件研发，但在资源和人力等方面投入有限，与国外先进水平尚有差距。在软硬件协同方面，国外量子软件可支持在不同量子计算后端运行，以 PennyLane 为例，支持 IBM、Google、Rigetti 等公司的后端硬件访问，这种合作有助促进量子软件生态发展。国内量子软件大多独立发展，缺乏协同合作，同质化竞争较为明显。在用户生态构建方面，国外量子软件已开始具备支持科研和应用开发的服务能力与用户价值，初步形成商业模式和良性迭代。国内量子软件和硬件系统协同程度有限，可提供基本演示和科普功能，但尚难以吸引用户深度使用和有效参与意见反馈与研发迭代，软件开源工具用户活跃度不高，难以形成规模效应和培养用户粘性。

量子计算云平台为用户提供量子计算机或模拟器远程访问，成为

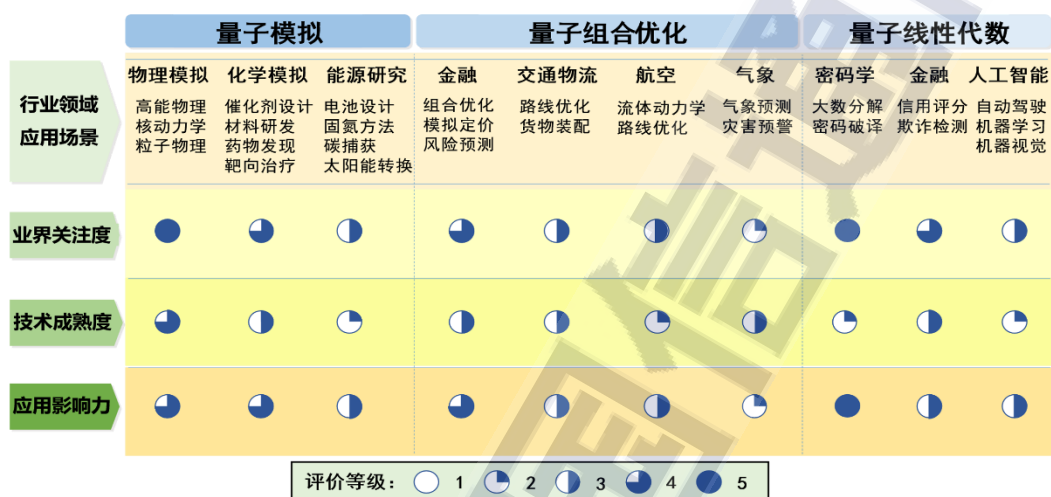
连接量子计算机与用户的桥梁，处于应用生态构建培育阶段。现阶段量子计算云平台供应商主要分为两类服务模式，一是含硬件云平台模式，在云平台后端接入自研的量子计算机或模拟器，例如 IBM、Google、Rigetti、本源和百度等。二是纯软件云平台，联合其他供应商提供量子计算机软硬件系统服务，例如 Amazon、Strangeworks 等。量子计算云平台用户使用方式也可分为两类，一是本地编译结合 API 云平台访问，将待执行本地编译量子程序通过 API 远程提交至量子计算云服务器，调度并分配至量子计算机或模拟器后端执行，程序运行结束后可获得结果。二是直接在云平台上进行开发实践，通常可选择量子编译预研或图形化量子线路编程，最终在云平台上获得执行结果。

量子计算云平台发展呈多元开放与多方合作趋势。我国量子计算云平台的起步较晚，在可访问样机比特数、可配置性、用户吸引能力等方面与科技巨头有较大差距。未来发展关注点包括：一是提升硬件性能，量子计算机或模拟器作为实体后端，是云平台的服务能力基础，加强硬件性能才能更好支撑应用和用户生态培育。二是深化应用探索，量子计算云平台的价值体现在应用和用户服务，需要进一步在金融、化学、人工智能等方面加强应用场景探索，挖掘以应用推动云平台发展的潜力。三是探索合作与商用模式，量子计算云平台是全新的算力服务与业务模式，对于商用与合作方式的开拓探索将有助于推动量子计算应用产业生态的可持续健康发展。

（五）应用探索广泛开展但尚未落地，泡沫争议浮现

随着量子计算硬件开始进入百位量子比特的含噪声中等规模量

子处理器（NISQ）时代，基于 NISQ 样机开展量子算法研究和应用场
景探索，开始成为产业界和行业用户的共同目标。近年来，量子计算
应用探索主要集中在量子模拟、组合优化和线性代数求解等领域，应
用探索发展概况如图 13 所示。



来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

图 13 量子计算应用场景探索发展概况

量子计算机在原子尺度直接模拟微观系统相互作用，可为物理、
化学、材料、医药等领域带来全新探索工具，近年来已成为研究热点。
2022 年，谷歌报道⁴⁷实现 16 比特费米子量子蒙特卡罗模拟。欧洲学
者发表展望⁴⁸，综述量子模拟实验进展，分析模拟型、容错数字型和
混合型量子模拟性能差异，指出 NISQ 平台已具备实现超越经典计算
的模拟潜力。美国计算机协会技术简报⁴⁹指出量子模拟器开发与应用
将远早于通用量子计算机，并将在科学、工业和国防等领域产生重大
影响。在涉及复杂多变量组合优化的量化金融、交通规划、气象预测

⁴⁷ <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04351-z>

⁴⁸ <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04940-6>

⁴⁹ <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3551664>

等领域，量子计算应用探索也在广泛开展。Multiverse Computing 公司推出奇点投资组合混合求解器用于量化投资优化分析⁵⁰。本源发布量子金融定价库，可用于分析期权等金融衍生品定价⁵¹。量子机器学习通过构建新型数据处理模型，有望提升目前机器学习算法处理大数据的计算效率。谷歌报道⁵²使用 40 位超导量子处理器，验证量子主成分分析过程中的原理性优势。哈佛大学报道⁵³利用里德堡原子阵列构建量子递归神经网络的认知任务学习实验。

量子计算领域各类应用场景探索，要实现真正“杀手级”应用，需要同时满足三项要求，如图 14 所示。一是可证明超越经典计算的量子优越性；二是具备实用性，即实现社会经济价值；三是能在现有 NISQ 处理器上运行。具备优越性理论证明和实际应用价值的 Shor 和 Grover 算法，硬件需求当前难以满足；已在 NISQ 系统实验验证量子优越性的随机线路采样和高斯玻色采样问题，需要进一步探索与实用化问题的结合；而近期在算法研究领域关注的 VQE 和 QAOA 等算法，需要找到能展现量子优越性的明确案例场景。

⁵⁰ <https://apnews.com/article/technology-f376884377d7a6794c69316bc8c33e1d>

⁵¹ <https://qcloud.originqc.com.cn/application/finance>

⁵² <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abn7293>

⁵³ <https://arxiv.org/abs/2111.10956>



来源：中国信息通信研究院

图 14 量子计算“杀手级”应用需突破“不可能三角”

量子计算应用需要直面与经典计算的算力竞争，只有明确展示量子优越性，量子计算应用案例的价值才能够覆盖其研制、开发和应用的高额成本。换言之，量子计算应用关注的不是能用在哪儿，而更是能在哪儿明确体现出指数级（至少是多项式级）计算加速优势。而这一关键问题目前在众多所谓量子计算应用的宣传报道中，往往语焉不详。根据现有公开信息可以审慎地认为，量子计算应用仍处于原理性与可行性验证的探索阶段，尚无实质性突破和里程碑式进展。

近年来量子计算技术成为国家机构、科技巨头和资本市场等各方在前沿科技领域的关注焦点之一，公共研究资金、私营部门股权投资和资本市场融资不断涌入，既为量子计算样机硬件研发、软件平台开发、应用场景探索等方向提供创新支持和资源保障，也引发了技术炒作、夸大宣传和行业泡沫等不同观点和争议。2022 年 5 月，美国

Scorpion Capital 发布对量子计算上市公司 IonQ 的做空报告⁵⁴，指出其量子计算产品与应用局限（该报告的技术专业性似乎有限），以及管理运行方面问题，质疑其交付能力与商业模式。8 月，牛津大学学者在金融时报刊文⁵⁵，直指资金涌入导致量子计算技术成就和前景夸大宣传，量子计算公司尚未提供真正产品和实现业务收入，行业泡沫不容忽视。上述观点也引发业界回应⁵⁶，从技术发展成就、科技巨头投入和应用探索前景等方面进行热烈讨论。

量子计算是未来科技与产业发展变革的重要变量，已成为全球各国学术界、产业界和利益攸关方的普遍共识。但也要指出，量子计算软硬件技术发展远未成熟，应用探索与产业培育处于起步阶段，和任何新兴技术一样，需要依靠研发攻关突破来跨越缺乏落地应用和商业交付的“死亡之谷”。在政策与资金不断涌入时，对量子计算领域的“捧杀”，例如毫无根据的乐观预期或对近期成果的夸大宣传，需要保持清醒和警惕。在“无人区”探索和技术应用成果的短期交付不达预期时，也要保持战略定力与发展信心，避免矫枉过正的“捧杀”，对构建未来技术产业竞争力带来不利影响。

三、量子通信领域研究与应用进展

（一）量子密钥分发科研活跃，实验系统性能获提升

量子密钥分发（QKD）作为量子通信领域进入实用化阶段的技术

⁵⁴ <https://scorpioncapital.s3.us-east-2.amazonaws.com/reports/IONQ.pdf>

⁵⁵ <https://www.ft.com/content/6d2e34ab-f9fd-4041-8a96-91802bab7765>

⁵⁶ <https://www.factbasedinsight.com/weathering-the-first-quantum-short>

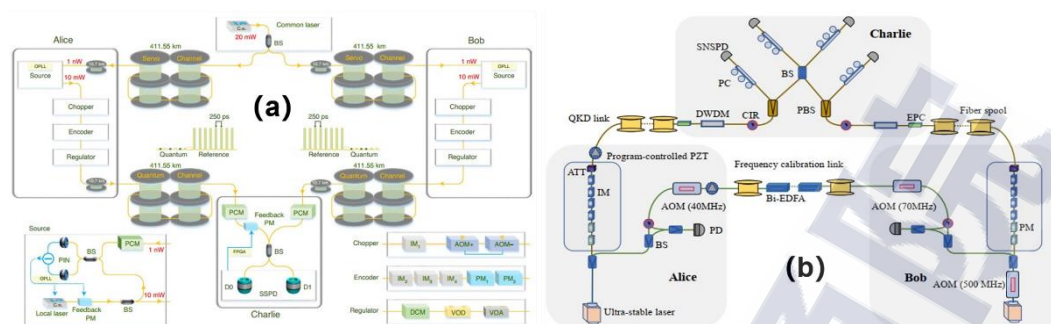
<https://thenextweb.com/news/oxford-scientist-says-greedy-physicists-overhyped-quantum-computing>

方向，在新型协议研究、安全性证明、系统实验探索和现网试验验证等方面的科研不断深入并取得诸多重要成果。传统点到点“制备-测量”式 QKD 系统，由于光纤链路传输的固有损耗限制，密钥成码率与传输效率线性相关，单跨段无中继光纤传输极限距离难突破 500 公里。此外，QKD 系统接收端探测器的不理想特性存在侧信道安全漏洞，可能成为系统现实安全性的风险点。近年来，以双场（TF）为代表的测量设备无关类新型 QKD 协议，因“双端制备-中心测量”架构可消除探测器端所有侧信道安全漏洞，同时将理论成码率提升至与传输效率平方根相关，从而突破量子信道密钥容量的 PLOB 界，成为业界广泛认可的下一代远距离、高安全性 QKD 技术方案。

2022 年 1 月，中科大报道⁵⁷基于改进型四相位调制 TF-QKD 协议，结合独立光源锁相、信道相位补偿、高信噪比单光子探测甄别等系统关键技术，如图 15(a)所示，实现 830 公里（0.014bit/s 成码率）光纤无中继传输的新世界纪录。5 月中科大报道⁵⁸基于 SNS-TF-QKD 协议，利用时频传输频率控制、参考光相位波动检测和高计数率低噪声单光子探测等技术，如图 15(b)所示，实现 658 公里（0.092bit/s 成码率）光纤无中继传输，同时具备超百公里距离光纤振动传感检测定位能力，定位精度可达 1 公里。需要指出，TF-QKD 系统需要远距离独立激光器之间实现单光子级的干涉控制，对于光源锁频和线路波动补偿等方面提出苛刻要求，系统工程化和实用化前景仍不明确。

⁵⁷ <https://doi.org/10.1038/s41566-021-00928-2>

⁵⁸ <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.128.180502>



来源：（a）Nature Photonics 16, 154–161（b）Phys. Rev. Lett. 128, 180502

图 15 TF-QKD 系统实验（a）830 公里（b）658 公里

区别于采用单光子偏振/相位调制，编码二进制随机信息的离散变量（DV）QKD 协议，连续变量（CV）QKD 协议通常采用相干态光场正则分量调制，编码二维高斯分布随机信息，可采用传统光通信器件，如 IQ 调制器和相干接收机等，设备集成化与降成本更具优势。在数十公里的中短传输距离上，CV-QKD 具有 Mbit/s 的高速密钥成码能力，有望成为城域 QKD 应用主流技术方案。经过 20 年发展，CV-QKD 协议主要聚焦 GG02、No-Switching 和离散调制三类，系统架构经历随路本振、本地本振和离散调制数字化系统的三阶段演进，联合窃听、相干窃听和组合安全框架等协议安全性证明已逐步完备，未来离散调制数字化系统有望成为 CV-QKD 商用主流方案。

2022 年 6 月，西南通信研究所和北邮联合报道⁵⁹5GBaud 的 QPSK 离散调制 CV-QKD 系统在 25 公里距离获得 21.53Mbit/s 密钥成码率。8 月，丹麦技术大学（DTU）报道⁶⁰无开关离散调制 CV-QKD 系统在 20.3 公里距离获得 4.71Mbit/s 密钥成码率。法国贝尔实验室提出⁶¹概

⁵⁹ <https://doi.org/10.1038/s42005-022-00941-z>

⁶⁰ <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32161-y>

⁶¹ <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.11702>

率整形 256QAM 离散调制和全数字相干解调 CV-QKD 系统在 25 公里距离获得 24Mbit/s 密钥成码率。离散调制数字化 QKD 系统硬件结构简单，但依赖高性能 DSP 算法实现相干解调、信号补偿和高吞吐量密钥后处理，目前仍处实验室研究阶段，商用化尚需时日。

上述各类 QKD 协议在理论层面均具备信息论安全性证明，但在实际系统中，由于器件不理想特性，可能存在侧信道安全漏洞，即便是测量设备无关类 QKD 也存在源安全风险。现有解决方案是对各类 QKD 系统安全漏洞进行充分的攻防研究并制定完备的标准测评认证体系，确保系统现实安全性，但这一方案对于未知安全漏洞和攻击方案仍难以完全防范。理想解决方案是研发基于纠缠协议和无漏洞量子力学基础检测原理的设备无关 (DI) QKD 系统，可以完全消除硬件设备侧信道风险，在物理系统中也能达到信息论安全性上限，这也是真正解决 QKD 系统现实安全性问题的终极方案。

2022 年 7 月 27 日，英、德、中三国科研团队，同时报道⁶²了三项 DI-QKD 原理验证实验进展。牛津大学团队通过离子阱系统中相距 2 米的铯离子量子位之间的纠缠存储，构建 E91 协议 DI-QKD 系统，实现 3.32bit/s 的密钥生成速率。慕尼黑大学团队在相距 400 米的铷原子光学阱之间建立预报式纠缠，实现纠缠保真度 >0.89 和误码率 0.078 的 DD-QKD，推算每对纠缠可产生 0.07bit 密钥。中科大团队通过后选择基矢和添加噪声方案降低了系统探测效率要求，通过 220 米光纤进行了纠缠测量与密钥分发，未来可望实现百 bit/s 成码率。上述原理

⁶² <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04941-5>; <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04891-y>;
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.129.050502>

实验验证了使用“黑盒”不受信设备基于 DI-QKD 协议产生安全密钥的可能性，但在纠缠制备检测能力、传输距离和密钥速率等方面，均远未达到实用化水平，具有科研意义，尚无应用前景。

（二）量子信息网络持续研究，使能技术仍有待突破

量子信息网络，也称量子互联网或量子网络，基于量子隐形传态、量子存储中继和量子态转换等关键技术，完成量子态信息在量子处理器节点之间的传输，提供量子计算机和量子传感器等量子信息系统间的互联组网能力，从而实现量子计算机信息处理能力的指数级提升，或量子传感器在测量精度和灵敏度等方面进一步突破。量子信息网络是集量子态制备、转换、传输、存储和处理等能力为一体的多种类型组件和系统的集合，也是量子通信、量子计算和量子测量三领域融合发展方向。量子信息网络已成为量子通信领域的前沿研究热点方向，2022 年在纠缠制备传输、量子态存储转换、组网技术实验等方面取得诸多进展，不完全统计如表 2 所示，探索不断扩展和深化。

表 2 2022 年全球量子信息网络代表性科研进展

时间	主要技术成就	研究机构	发表期刊
2022.2	光子-原子系综确定性时间位纠缠	中国 中科大	Physical Review Letters
2022.2	核自旋固态材料实现量子存储	美国 加州理工	Nature
2022.2	基于拓扑相位的高保真度纠缠光源	中国 北京大学	Nature Photonics
2022.3	稀土掺杂晶体光量子 20 毫秒存储	瑞士 日内瓦大学	NPJ quantum information
2022.3	微波光子猫态和超导量子比特纠缠	中国 清华大学	Science Advances
2022.3	容错全光量子中继器方案验证	中国 中科大	Optica
2002.4	50 公里光纤双向量子时钟同步	中国 授时中心	Journal of Lightwave Technology
2022.5	光子偏振态的可集成固态量子存储	中国 中科大	Physical Review Letters
2022.5	中空光纤可控单光子的频率上转换	德国 马普所	Science
2022.5	NV 色心三节点网络量子隐形传态	荷兰 Delft	Nature

2002.7	光纤集成系统中光-物质纠缠存储	西班牙 ICFO	Science Advances
2022.7	量子存储 20.5 公里光纤纠缠分发	中国 中科大	Physical Review Letters
2022.8	无探测漏洞的高维贝尔不等式检验	中国 中科大	Physical Review Letters
2022.8	基于里德堡超原子的多光子纠缠	中国 中科大	Nature Photonics
2022.8	自由电子腔电子-光子纠缠制备	德国 马普所	Science
2022.8	14 光子 GHZ 态 12 光子簇态制备	德国 马普所	Nature

来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理（截至 2022 年 9 月）

实现量子纠缠资源的高效制备和分发，是构建量子信息网络的基础资源，当前技术方案在纠缠产生率和保真度等核心指标方面仍有很大提升空间，同时扩展高维量子纠缠操控能力也是未来提升量子信息网络组网能力的重要方向。德国马普所报道⁶³基于腔内存储原子和确定性协议，高效制备多光子纠缠态实验，完成保真度 76%和 56%的 14 光子 GHZ 态、12 光子簇态制备，光子产生及探测效率达 43%。此外还报道⁶⁴了基于自由电子腔的电子-光子纠缠对制备实验，纠缠对产生概率为 2.5%，可用于预报式单电子/光子态制备。北京大学报道⁶⁵硅基芯片拓扑相位纠缠光源，可实现 4 种拓扑纠缠态，保真度达 0.968。中科大报道⁶⁶基于原子系综里德堡超原子与光腔耦合的 44%概率单光子输出与 6 光子 GHZ 态纠缠实验。

实现量子态信息的存储和中继，是构建量子信息网络的核心使能技术。近年来，基于气态冷原子系综、固态掺杂晶体和全光子簇态等技术路线的量子存储方案和实验研究持续深入，但在存储时间、带宽和读取效率等方面还难以满足实用化要求，科研探索仍在不断推进。

⁶³ <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04987-5>

⁶⁴ <https://doi.org/10.1126/science.abo5037>

⁶⁵ <https://doi.org/10.1038/s41566-021-00944-2>

⁶⁶ <https://doi.org/10.1038/s41566-022-01054-3>

加州理工大学报道⁶⁷在镱离子掺杂晶体中，实现含核自旋系综的多能级态极化、激发和量子存储，退相干时间达 239 微秒，保真度达 0.76。日内瓦大学报道⁶⁸基于铈离子掺杂晶体微磁场动态去耦方法，实现光量子比特时间位置信息存储，存储时间达 20 毫秒，平均保真度 0.85。中科大报道⁶⁹在铈离子掺杂晶体中，基于电场调制原子频率梳和波导结构实现光集成化光量子偏振态存储，保真度达 0.994。在全光簇态无存储中继方面，中科大报道⁷⁰全光中继器图态与 Shor 纠错编码融合的可容错单向光量子中继方案，实现整体保真度大于 0.64。量子纠缠纯化方面，中科大报道⁷¹基于超纠缠 11 公里高效量子纠缠纯化和确定纠缠纯化实验，纯化效率提升了 6000 多倍。

实现信道传输光量子比特与处理器物质量子比特之间的量子态转换，是构建量子信息网络物理接口的关键技术，其中涉及多种类型、不同能级和编码自由度量子比特之间的相互转换，目前仍属开放探索科学问题。德国马普所报道⁷²在充氦气空芯光纤中实现可控单光子频率上转换方法，转换带宽 125THz 效率可达 70%，同时可保持光量子相干性，可提供不同量子体系间转换界面。中科大报道⁷³采用循环恢复修正调控方案的单光子时间模式和里德堡原子系综态的纠缠转换，纠缠读出保真度达 0.878。西班牙 CIFO 报道⁷⁴掺镨离子晶体激光刻蚀波导与光纤及探测器集成，提升纠缠存储时间和读写效率。清华大学

⁶⁷ <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04293-6>

⁶⁸ <https://doi.org/10.1038/s41534-022-00541-3>

⁶⁹ <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.128.180501>

⁷⁰ <https://doi.org/10.1364/OPTICA.439170>

⁷¹ <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.010503>

⁷² <https://doi.org/10.1126/science.abn1434>

⁷³ <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.128.060502>

⁷⁴ <https://doi.org/10.1126/sciadv.abn3919>

报道⁷⁵基于超导量子电路和微波谐振腔，制备相干态微波光子的多体“薛定谔猫”态，实现微波-光子量子态纠缠与转换。

量子信息网络的传输与组网技术实验，以及初步应用探索，也在逐步开展。荷兰 Delft 报道⁷⁶在金刚石色心 3 节点线路中，基于节点间纠缠存储时间和读取效率提升，首次实现跨节点量子隐形传态，效率约每 117 秒 1 次，保真度为 0.702。德国马普所报道⁷⁷在 33 公里光纤线路中的远程量子节点间纠缠分发实验，而中科大报道⁷⁸20.5 公里现网光纤线路中的量子存储器纠缠传输实验，保真度达到 0.9。授时中心报道⁷⁹50 公里光纤线路中的双向量子时钟同步应用探索实验，长期同步稳定度达到飞秒量级，美国阿贡国家实验室宣布基于伊利诺伊州快速量子网络平台也开展了类似实验。

总体而言，量子信息网络在纠缠资源制备操控方面仍在探索不同体系方案，核心技术指标有待提升。量子态存储中继的不同技术路线研究持续开展，部分单项指标有所突破，但整体系统未达实用化水平。量子态转换功能需在进行不同体系之间，基于多种技术方案做开放性研究探索，转换需求和实施方案仍未完全明确。近期开展若干量子态传输和存储中继原理验证性实验，并探索时频传递等应用场景，未来仍需在核心技术和使能组件方面进一步攻关突破。

⁷⁵ <https://doi.org/10.1126/sciadv.abn1778>

⁷⁶ <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04697-y>

⁷⁷ <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04764-4>

⁷⁸ <https://doi.org/10.1103/physrevlett.129.050503>

⁷⁹ <https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3153655>

（三）空间量子通信将成为科研与应用发展重要方向

基于卫星开展空间量子信息科学研究和应用探索，具有三方面的独特优势。一是作为量子通信终端，卫星可显著提升传输距离与组网能力。大气层有效厚度在 10 公里以内，千公里轨道星地信道损耗仅为 40dB 左右，相比千公里地面光纤信道 200dB 以上损耗降低 16 个数量级。在量子存储中继技术实用化之前，卫星平台是实现千公里级量子通信的唯一方案。二是作为中继节点，卫星能够有效提升 QKD 应用的覆盖面、灵活性与安全性。相比地面网络光纤资源限制，卫星可与全球范围或机动配置的地面站实现按需组网，同时卫星高机动性和机密性，可提升其作为密钥存储可信中继节点的安全性。三是作为空间科学实验平台，卫星因其超远距离、高真空、微重力等特性，可为开展大尺度量子物理学基础实验、高灵敏度光量子干涉测量、超高精度时频基准生成与传递等前沿科学探索提供有力支持。

近年来，量子通信卫星已成为全球多国的布局规划关注点，例如加拿大 QEYSSat 项目，美国 Marconi 2.0 天基量子链路计划，欧洲 CQuCoM 和 Nanobob 微纳量子卫星计划，英国 Arqit 公司商用 QKD 卫星计划等。我国在 2016 年 8 月率先发射了全球首颗量子科学实验卫星“墨子号”，并开展多项开创性的空间量子通信与量子物理学实验，取得了一系列具有国际领先水平的研究成果，如表 3 所示，成为国际空间量子通信科研与应用的探索引领者。

表 3 “墨子号”量子科学实验卫星代表性科研成果

技术方向	主要技术成就	发表时间	发表期刊
	1200 公里星到地 QKD (成码率 1.1 kbit/s)	2017.8	Nature

量子密钥分发	1000 公里星到地纠缠协议 QKD（成码率 3.5 bit/s）	2017.11	Phys. Rev. Lett
	7600 公里卫星中继 QKD 与加密传输（密钥 100KB）	2018.1	Phys. Rev. Lett
	1120 公里地面站纠缠协议 QKD（成码率 0.12 bit/s）	2020.7	Nature
	星-地 QKD 速率提升 40 倍（成码率 47.8 kbit/s）	2021.1	Nature
	便携地面站六地星地 QKD 实验（平均密钥量 50KB）	2022.5	arXiv
量子信息网络	相距 1200 公里的地面站间纠缠分发（保真度 0.869）	2017.6	Science
	1400 公里地到星量子隐形传态（保真度 0.80）	2017.8	Nature
	相距 1200 公里地面站量子态远程传输（保真度 0.82）	2022.4	Phys. Rev. Lett
量子物理学实验	地球引力导致纠缠退相干理论模型实验验证	2019.9	Science
	星到地量子安全时间传输（9kHz 速率 30ps 精度）	2020.5	Nature Physics

来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理（截至 2022 年 9 月）

2022 年，中科大在国际物理学权威期刊《现代物理评论》，发表墨子号空间量子实验长篇综述论文⁸⁰，对量子信息基本概念、量子通信原理实验、地面大空间尺度验证实验进行介绍，并综述“墨子号”卫星研制、试验与运行情况，以及系列星地量子科学实验进展，展望未来空间量子科学前景。此外，还报道⁸¹基于中倾角轨道“天宫二号”空间实验室的小型化 QKD 载荷，与四个地面站之间的星地中继 QKD 传输组网实验。报道⁸²基于“墨子号”卫星（已在轨运行 6 年）纠缠源分发和相距 1200 公里地面站间的量子态远程传输实验。7 月 27 日，全球首颗 QKD 微纳卫星“济南一号”成功发射⁸³，相比“墨子号”重量仅为 1/6，光源频率提升约 6 倍，可实时完成密钥处理和生成，未来有望开展微纳卫星与便携式地面站间的 QKD 传输组网与示范应用。上述成果将有助于保持我国空间量子通信领域的领先地位。

⁸⁰ <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.94.035001>

⁸¹ <https://doi.org/10.1364/OPTICA.458330>

⁸² <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.128.170501>

⁸³ <http://www.chinanews.com.cn/gn/2022/07-27/9813757.shtml>

未来，基于卫星平台的空间量子通信科研与应用探索，主要面向三个阶段发展目标。近期基于低轨和中高轨微纳卫星，构建星地 QKD 传输组网能力，探索高安全需求场景的落地应用。实现该目标一方面要解决日间量子通信背景噪声影响，降低天气对信道质量影响，形成全时工作能力。另一方面要低轨和中高轨卫星配合便携式地面站，形成 QKD 星座与地面站网络，提升覆盖范围和密钥生成服务能力。中期是进一步开展空间量子科学实验，例如大空间尺度纠缠分发验证量子力学非局域性，纠缠引力退相干实验探讨量子力学与广义相对论关系，基于星载光钟和频率梳构建超高精度时频传输网络等，实现这些科学目标需要具备中高轨卫星平台和研发相关星载系统设备能力。远期是构建天地一体化量子信息网络，将纠缠制备操控、量态存储中继和量子态转换等功能与卫星平台优势充分结合，形成量子星座和光纤网络融合的未来量子信息网络基础设施。

(四) 量子保密通信探索应用，标准测评验证须加强

基于 QKD 在通信收发双方产生共享密钥，结合对称加密算法进行信息加密传输，是一种典型的量子保密通信应用。其中，QKD 通过协议后处理中的对基过程监测信道误码率，具有理论协议层面的密钥分发安全性，同时还可提升对称密钥更新速率，从而以密钥分发安全性和速率的提升，增强对称加密应用的安全性。广义量子保密通信还包括基于量子随机数发生器（QRNG）生成随机数的加密应用，以及基于量子安全直接通信（QSDC）的量子态编码信息传输等。QRNG 熵源具备理论模型层面可证明的随机性，结合具备侧信道消除能力的

提取器后处理压缩，可实现高速率随机数生成，可用于数据库加密、非对称加密算法随机数提供等方面。QSDC 采用与 QKD 相似的信道误码率监测并结合量子态直接信息编码与纠错等步骤，实现基于物理方式的信息加密传输，无需生成密钥和使用对称加密算法。

2022 年来，各类量子保密通信技术方案的产品研发、应用探索和网络建设在国内外持续开展。在产品研发方面，瑞士 IDQ 推出 Clavis XG QKD 系统，标称密钥成码率 100kbit/s@50 公里，最远传输距离支持 150 公里⁸⁴。多种技术方案和设备形态的 QRNG 产品开始商用，最高随机数生成速率提升至 10Gbit/s 量级。韩国 SKT 和三星推出 Galaxy Quantum 3 智能手机，推动芯片化 QRNG 在移动终端认证和信息加密应用⁸⁵。清华大学报道⁸⁶新型 QSDC 样机系统 100 公里超低损光纤的 0.54bit/s 信息传输速率实验。在应用探索方面，美国 ORNL 报道⁸⁷在智能电网数控系统中，利用 QKD 和 QRNG 进行 GMAC 认证加密应用试验，提升认证加密效率。中国电信和移动推出基于量子密钥离线充注或平台转发等方式的量子加密手机和通话业务。清华大学提出⁸⁸PQC 和 QSDC 结合的安全中继量子网络方案。在网络建设方面，国家广域量子保密通信骨干网络建设工程项目进入验收阶段。合肥量子保密通信城域网开通并为政务系统网络提供加密服务。韩国 SKT 建成 800 公里 QKD 网络为多个政府机构提供信息加密服务⁸⁹。

⁸⁴ <https://www.idquantique.com/quantum-safe-security/products/clavis-xg-qkd-system/>

⁸⁵ <https://zdnet.co.kr/view/?no=20220427114253>

⁸⁶ <https://doi.org/10.1038/s41377-022-00769-w>

⁸⁷ <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16090-w>

⁸⁸ <https://doi.org/10.1109/MNET.108.2100375>

⁸⁹ <https://www.idquantique.com/idq-and-sk-broadband-complete-phase-one-of-nation-wide-korean-qkd-network/>

英国电信和东芝欧研所合作在伦敦启动量子加密城域网商用实验⁹⁰。

随着量子保密通信技术产品研发和应用探索发展，国际电信联盟（ITU-T）、国际标准化组织及国际电工委员会（ISO/IEC）、欧洲电信标准化协会（ETSI）、中国通信标准协会（CCSA）和密码行业技术标准委员会（CSTC）均开展了标准化研究并取得阶段性进展。截至 2022 年 9 月，ITU-T SG13 已发布 QKD 网络架构、管控、服务需求等 12 项 Y.38xx 系列标准⁹¹，SG17 已发布 QRNG 架构、QKD 网络安全框架和安全设计等 5 项 X.17xx 系列标准⁹²，SG11 开始研究 QKD 网络接口协议相关标准。ETSI 已发布 QKD 器件、内部接口、应用接口、控制接口等 13 项标准⁹³，并进一步对安全性要求、认证和网络架构等开展研究。ISO/IEC 持续开展 QKD 系统安全性要求和测试评估方法两项标准研究，目前已完成 DIS 投票⁹⁴。CCSA 在 ST7 开展 2 项国家标准、19 项行业标准和 2 项协会标准研究⁹⁵，已发布和报批量子通信术语定义、量子保密通信应用场景、QKD 系统技术要求、测试方法、网络架构等标准 11 项。CSTC 目前已发布了量子密钥分配产品技术规范 and 检测规范 2 项⁹⁶。量子保密通信领域的系统设备、核心器件、网络架构和接口协议等方面的技术标准体系初步形成。

基于 QKD 的量子保密通信，在产品工程化水平、商用化推广和产业化发展等方面，仍有较大提升空间并面临诸多瓶颈挑战，在往年

⁹⁰<https://newsroom.bt.com/bt-and-toshiba-launch-first-commercial-trial-of-quantum-secured-communication-services/>

⁹¹ https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/index_sg.aspx?sg=13

⁹² https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/index_sg.aspx?sg=17

⁹³ <https://www.etsi.org/committee/1430-qkd>

⁹⁴ <https://www.iso.org/standard/77097.html>、<https://www.iso.org/standard/77309.html>

⁹⁵ <https://www.ccsa.org.cn/txhb>

⁹⁶ <http://www.gmbz.org.cn/main/bzlb.html>

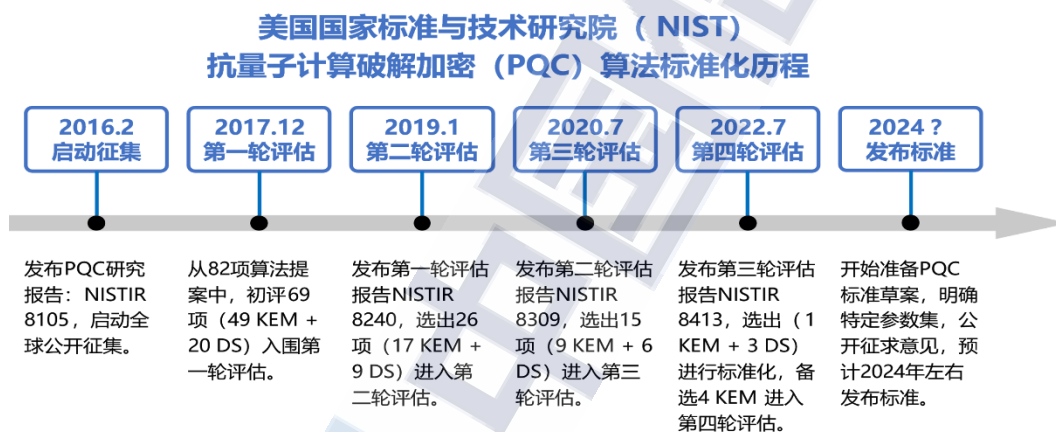
报告中已有分析⁹⁷，不再赘述。技术标准化、测评验证和产品认证，作为信息通信和信息安全等领域的技术产品商用和市场推广的基础，也是量子保密通信应用的必要条件之一，当前量子保密通信标准化和测评验证仍有很多工作需要推进和完成。对于现有“制备-测量”式 QKD 产品而言，系统现实安全性要求与测试验证标准，以及 QKD 网络的密钥存储管理和“可信中继节点”等安全性标准仍不明确，相关测评验证仍需进一步加强。如果 QKD 系统和网络自身的安全性标准和测评认证不完备，则基于量子密钥的各类加密应用和所谓“量子安全”服务都将无从谈起。对于 QRNG 产品而言，虽然从熵源物理方案和协议后处理等技术供给侧能够体现原理优势，但在应用需求侧仅基于随机性检测标准的通过性验证，无法证明 QRNG 相对于 PRNG 所谓“不可预测性”的比较优势，QRNG 应用推广如何摆脱“为信仰充值”的尴尬仍需探索。QSDC 样机工程化和实用化水平仍需进一步提升，在协议安全性证明、系统现实安全性分析、功能性能测试验证和标准化等方面的研究和测评均有待进一步推进。

（五）量子保密通信与 PQC 将有望形成融合应用方案

非对称（公钥）加密体系中基于 RSA、ECC 等算法的密钥交换机制（KEM）、数字签名（DS）与身份认证机制，以及基于 MAC、AEAD 等算法的消息认证机制，与 AES 等对称加密算法一道，共同构成了在当今互联网中保障信息传输的机密性、完整性和不可否认的

⁹⁷ http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/tps/202112/t20211224_394517.htm
http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/tps/202012/t20201215_366153.htm

密钥交换与加密技术基础⁹⁸。量子计算并行处理能力带来解决特定计算困难问题的算力飞跃，例如 Shor 算法破解质因数分解问题具备指数加速能力，将对 RSA 和 ECC 等算法为基础的公钥加密体系带来严重威胁。虽然现有量子计算机硬件水平距离执行 RSA 等公钥密码破解任务所需能力，例如数千逻辑比特，或仍需十年以上发展⁹⁹，考虑到长期敏感信息存在“先存储后破解”的追溯性风险，以及现有信息系统公钥密码体系升级所需时间，应对量子计算信息安全威胁已成为全球各国量子信息技术应用与风险管控的热点问题。



来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理（截至 2022 年 9 月）

图 16 NIST 抗量子计算破解加密（PQC）算法标准化

对当前公钥加密体系进行升级，形成抗量子计算破解加密（PQC）算法和体系，是全球信息安全管理机构和密码学界的努力方向。美国 NIST 主导 PQC 算法研究、征集评选和标准化工作历程如图 16 所示，2016 年正式启动新加密算法征集，经三轮算法安全性研究分析与评选，目前开始标准研究和第四轮评选，预计 2024 年推出 PQC 标准。

⁹⁸ <https://quantumconsortium.org/mp-files/a-guide-to-a-quantum-safe-organization.pdf/>

⁹⁹ <https://globalriskinstitute.org/download/quantum-threat-timeline-report-2021-full-report/>

根据 2022 年 7 月发布的最新报告¹⁰⁰，NIST 初步明确 KEM 标准算法采用 CRYSTALS-KYBER, DS 标准算法包含 CRYSTALS-Dilithium、FALCON 和 SPHINCS+ 三种，仍将对 BIKE、Classic McEliece、HQC 和 SIKE 四种 KEM 算法开展第四轮评估。基于格结构最短矢量求解数学难题算法，因其安全性、密钥大小和处理速度等方面的平衡性，以及面向未来同态加密等应用的可扩展性，已经成为 PQC 标准算法主流。由于量子计算机硬件和算法研究仍在发展，格密码安全性目前难以完全验证，基于编码和多变量方程的 KEM 和 DS 方案仍有可能进入标准。未来，PQC 可能形成不同应用场景采用不同算法的体系化标准，这也会增加 PQC 标准的应用实施难度。

技术方案/特性	随机熵源	密钥交换	数字签名/身份认证	信息加密
现有网络密钥交换/加密协议	CSPRNG	SM2、ECDH-256	SM2、RSA-2048	SM4、AES-128
PQC	CSPRNG	PQC 密钥交换	PQC 数字签名	对称加密算法 如：AES-256、AES-2048等
QRNG+PQC	QRNG	PQC 密钥交换	PQC 数字签名	
基于QKD的量子保密通信	CSPRNG、QRNG	QKD	SM2、RSA-2048、预置共享密钥	
QRNG+QKD+PQC	QRNG	QKD	PQC 数字签名	
信息论安全	QRNG	QKD	预置共享密钥	一次一密

- CSPRNG：具备加密安全性的伪随机数生成器，QRNG：量子随机数生成器
- PQC 密钥交换：CRYSTALS-KYBER, BIKE, Classic McEliece, HQC, SIKE (NIST标准化与第四轮评估对象)
- PQC 数字签名：CRYSTALS-Dilithium, FALCON, SPHINCS+ (NIST标准化对象)
- QKD：含多种协议与系统实现方案，BB84、GG02、MDI、TF、EPR等

来源：中国信息通信研究院

图 17 量子保密通信与 PQC 融合应用

当前 IKE 与加密应用普遍使用具备加密安全性的伪随机数发生器 (CSPRNG) 作为各类密钥和加密算法的随机熵源，在 QRNG 技术

¹⁰⁰ <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8413>

产品的工程化和集成化水平得到进一步提升后，可在服务器、加密机、移动终端等多种类型系统和应用中，利用 QRNG 与 PRNG 两种熵源进行输出随机数融合，增强随机性与性能水平。IKE 中的现有 KEM 和 DS 算法生成的公钥或数字签名，面临量子计算破解的威胁，需要采用 PQC 加密算法进行 KEM 和 DS 升级替换，也可在高安全性需求场景中，具备光纤信道等资源条件下，采用 QKD 系统或网络来提供对称密钥实现 KEM 过程。信息加密过程中的 AES 对称加密算法和 SHA 哈希校验，可能受到量子计算和 Grover 搜索算法威胁¹⁰¹，但可以通过增加密钥原语或输出序列长度的方式提升安全性水平。

要实现所谓信息论安全（ITS）的加密传输，则需要基于 QRNG 随机熵源，采用现实安全性严格验证 QKD 系统进行直接量子态传输与密钥生成，不能包含可信中继、密钥存储和二次转发，同时仅采用预置共享密钥和通用哈希校验进行身份认证，并且在信息加密过程中仅使用信息与密钥等长且逐比特更新的“一次一密”方式，不使用包含密钥缩放重用的加密算法。上述条件在现实系统、多点网络和高速传输中难以满足，应用场景也非常有限，理论意义大于实用价值。

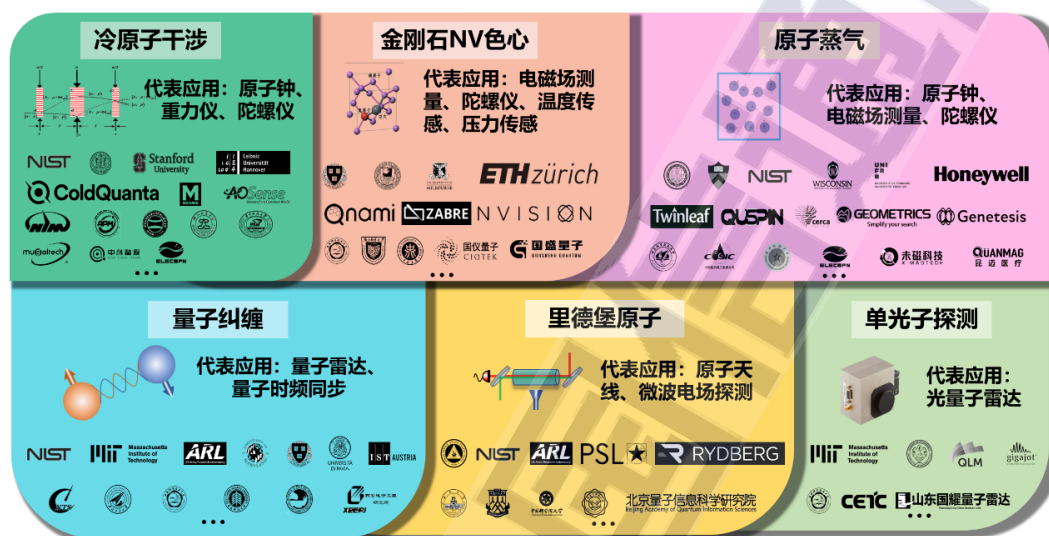
四、量子测量领域研究与应用进展

（一）多种量子测量技术并存，样机工程化水平提升

量子测量是量子信息领域三驾马车之一，被认为是距离实用化最近的量子技术方向，传感单元是量子态制备、操控和测量的载体，根

¹⁰¹ <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.IR.8105>

据物理媒介和制备操控方式不同，存在冷原子、热原子蒸气、氮空位（NV）色心、里德堡原子、量子纠缠、单光子等多种技术路线，如图 18 所示。国内外研究机构和初创企业在陆续推出了冷原子钟、重力仪、磁力计、光量子雷达等样机和产品，并逐步走向商业应用¹⁰²。



来源：中国信息通信研究院

图 18 量子测量主要技术方向

冷原子干涉是一种测量精度较高的量子测量技术路线。利用冷原子相干叠加特性可实现频率、重力、重力梯度、角速度等物理量精密测量。主要优势在于测量精度高，相干时间长，但是由于激光冷却操控测量装置较为复杂，冷原子干涉仪集成度不高，体积较大，成本高，主要应用于基础科研、计量基准等对体积、成本、功耗不敏感，但对测量精度要求高的领域。国内外公司推出基于冷原子的时钟、重力仪等产品，尝试在车载、船载、恶劣自然环境中部署，主要面向科研院所、授时机构、地质勘探等专业用户。

¹⁰² <https://quantumconsortium.org/mp-files/quantum-sensing-report-2022.pdf/>

热原子蒸气是目前成熟度较高的一种技术路线，已广泛应用于时频同步领域，目前商用铯钟、铷钟都是基于热原子蒸气能级跃迁进行频率或时间测量，并逐步向小型化和芯片化方向演进。热原子蒸气中原子核和电子具有自旋的内禀属性，会与外界场产生耦合，也可用于磁场和角速度测量。基于热原子蒸气的量子磁力计已开始商用化，特别是 SERF 磁力计，具有超高灵敏度的优点，相比超导干涉仪而言，具备无冷却装置、维护费用低、可近距离探测等优点，有望成为下一代心磁和脑磁等人体微弱磁场检测方案。

氮空位（NV）色心是近年来发展起来的新兴测量技术。金刚石 NV 色心是一种特殊的发光点缺陷，由氮原子与其紧邻碳原子空位组成，可通过光学和微波脉冲对其量子态进行制备、操控以及读取。NV 色心对外界磁场十分敏感，室温相干时间可达毫秒级，空间探测分辨率可达纳米级，与待测样品间距可小于 5 纳米。NV 色心单量子传感器可实现样品表面纳米级精度扫描磁成像，为研究单活体细胞、蛋白质、DNA 等新材料和生命科学领域应用带来全新测量手段。金刚石 NV 色心量子测量技术初步成熟，初创企业已推出商用产品。

里德堡原子主要用于射频电场探测，其中价电子远离原子核，束缚作用较弱，其量子态对外界电磁场十分敏感，可作为射频信号接收天线。由于电磁诱导透明（EIT）和 Autler-Townes 分裂效应，使得探测光吸收峰产生劈裂，其间隔与外界射频场的振幅成正比，里德堡原子可实现 MHz 到 THz 量级超宽谱射频场测量，具有厘米级小尺寸、非导电材料、灵敏度极高（ 10^{-10}V/m ）、可全光调控读取等特点，并且由于测量基于不变的原子性质，具有免校正特殊优势。里德堡原子天

线在信息通信领域有望引发雷达、通信与导航等技术产品变革。

量子纠缠理论上可突破标准量子极限 (SQL), 逼近海森堡极限。纠缠在雷达探测和时频同步领域具有应用价值, 国内外学者提出多种基于纠缠光子对的量子时间同步协议, 实验中得到皮秒量级同步精度。近年提出量子传感网络概念, 利用量子纠缠将多个量子传感器连接, 进一步提升测量性能。2022 年, 英国牛津大学使用光子链路成功纠缠相隔 2 米两个 $^{88}\text{Sr}^+$ 离子, 展示首个纠缠光学原子钟量子网络¹⁰³, 有望用于增强计量学。但量子纠缠目前还不是量子测量领域研究重点, 一是目前量子测量精度瓶颈尚未达到标准量子极限, 主要受限于经典噪声; 二是量子纠缠态产生、调控以及远距离分发等技术尚不成熟, 难以工程应用。上述光钟网络的纠缠持续时间仅为 9 毫秒, 目前光钟需要 500 毫秒探测时间, 远远不能满足工程化应用需求。

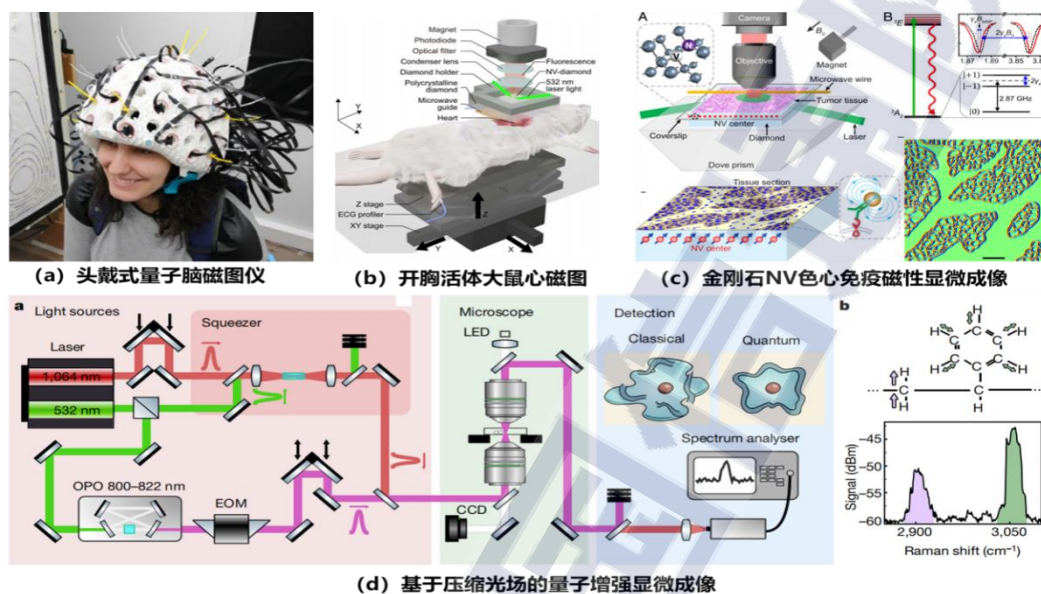
单光子探测主要应用于目标探测和成像领域, 以提高探测效率方式提升雷达性能, 单光子探测器需要极高增益又要保持极低噪声。单光子探测可分为硬目标和软目标探测, 硬目标探测是对飞行器等实体目标进行百公里级、三维、非视域成像; 软目标探测是对风场、气溶胶、云层分布等非实体目标进行检测。单光子探测技术产品已相对成熟, 目前在环境、交通、气象等领域落地应用。

(二) 助力生命科学研究, 实现可穿戴与非侵入检测

生命科学技术帮助人们了解生物代谢过程, 有效地治疗疾病, 提高农业生产力, 量子测量有望进一步加速生命科学技术的发展。量子

¹⁰³ www.nature.com/articles/s41586-022-05088-z

测量在生命科学研究领域的代表性成果如图 19 所示，可实现纳米尺度生物信号检测与成像，并降低环境依赖性，在心脑疾病诊断、癌细胞检测、细胞显微成像等领域具有广阔的应用前景。



来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

图 19 量子测量在生命科学领域主要研究成果

量子测量可实现纳米级空间分辨率。传统的核磁共振（NMR）和核磁共振成像（MRI）技术可实现人体软体组织器官的医学成像，但是需要外加强磁场和使用造影剂，空间分辨率只有几十微米量级，不能对细胞和分子进行成像分析。细胞级和分子级的成像对于生物医学研究至关重要，如药物开发过程中需要研究药物成分在细胞内和细胞间的运输、分布和代谢，目前 MRI 等技术无法解决。金刚石 NV 色心可以提供纳米级空间分辨率¹⁰⁴，通过将光学显微镜与金刚石 NV 色心芯片相结合，可实现活细胞宽场磁成像，并可对低频磁场和高频磁

¹⁰⁴ www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1231675

场进行动态跟踪。2022 年，中科大¹⁰⁵基于金刚石 NV 色心对肿瘤组织进行免疫磁性显微成像，利用近表面约百纳米的 NV 色心作为二维量子磁传感器，在毫米级视野范围里达到微米级空间分辨率。量子金刚石显微镜，国内外 Qnami、国仪量子等公司已实现商品化。

心脑磁图相比于传统的心脑电图、磁共振成像等技术而言，具有测量精度高、检测速度快、对人体无创无损等优点。心磁信号在体表的强度约为几十皮特斯拉量级，脑磁信号仅百飞特斯拉量级。超导式干涉仪（SQUID）需要液氦冷却至接近绝对零度，失导重启时间长，体积庞大，需要建设约十几平米的独立磁屏蔽间，施工周期 6 个月到 1 年，造价接近千万。基于热原子蒸气的光泵量子磁力计可以测量皮特斯拉（ 10^{-12} ）甚至飞特斯拉（ 10^{-15} ）量级微弱磁场。原子磁力计用作脑磁图仪可制成可穿戴头盔，采用小型杜瓦罐制冷，功耗低，上电即可工作，维护成本大幅降低，且设备体积小，仅需小型磁屏蔽室，节约工程成本。目前已有国内外企业推出光泵心脑磁图仪商用设备，2022 年我国也颁发了国内首张、全球第二张原子磁力计心磁图仪的医疗器械注册证，开始进入医疗市场。

光学成像分辨率受衍射极限限制，为了提高信噪比需要增大入射光强。但生物样品对光照敏感，例如光化学效应、局部加热和物理损伤等，都会影响标本的生长、活力和功能。量子相关性可以用于降低测量噪声，可在光照强度不变情况下提高信噪比。2021 年，澳大利亚昆士兰大学¹⁰⁶实验证明利用皮秒脉冲正交振幅分量压缩态光场可以

¹⁰⁵ www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.2118876119

¹⁰⁶ www.nature.com/articles/s41586-021-03528-w

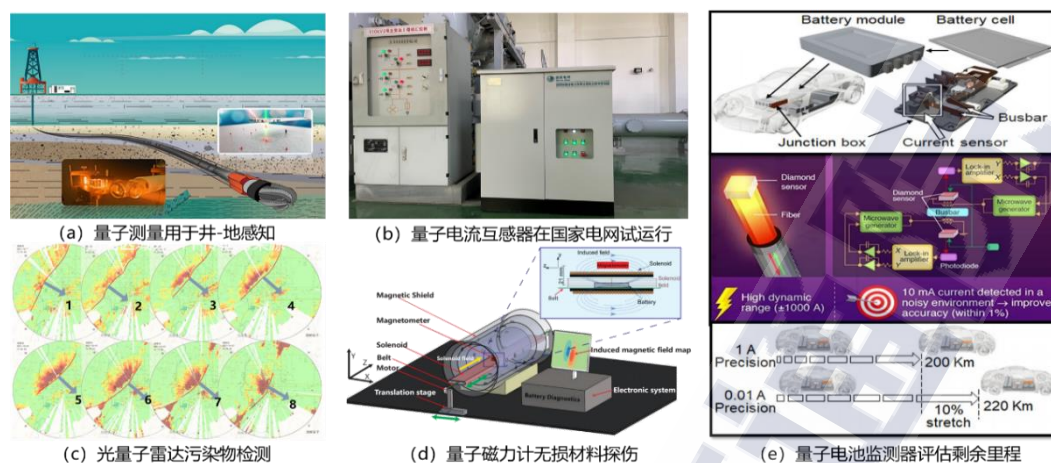
将受激拉曼散射的信噪比提高 1 dB，并对酵母细胞进行了量子增强的显微成像。新奥集团¹⁰⁷基于量子纠缠利用标记光子偏振态符合测量，计算手性生物分子溶液反应过程中，各种试剂分子浓度随时间的变化，具有更好的信噪比，并且对环境光变化不敏感。

随着量子测量技术的发展，有望在生命科学领域带来更多变革性应用，例如基于量子技术的实时、长期的大脑电位动态监测可以帮助研究神经元可塑性甚至意识如何从神经元产生；室温量子脑磁探测有望成为脑机接口的可选技术方案；单分子动态成像为研究蛋白质折叠和药物代谢提供有力工具等。

（三）赋能垂直行业应用，成为加速产业升级催化剂

工业互联网时代，传感器是信息数据的来源，也是网络的神经末梢，为工业互联网生态构建提供感知能力和数据支撑。近年来，越来越多企业推出量子测量装置设备和仪器仪表，积极探索在工业、能源、气象、地质、交通等行业的应用场景，推动量子测量助力垂直行业数字化升级。量子测量在石油、电力、环保、工业生产、新能源汽车等领域应用探索代表性成果如图 20 所示。

¹⁰⁷ <https://opg.optica.org/boe/fulltext.cfm?uri=boe-12-10-6590&id=460075>



来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

图 20 量子测量在垂直行业应用主要案例

国产化核磁共振测井仪实现精确储层评估。核磁共振测井仪是快速探寻地底油气资源的有效检测手段，我国初步实现核磁共振测井仪自主研发。商用产品可用于油气田及可燃冰钻井过程地层地质评价，精确评估储层饱和度、孔隙度、渗透率等，提升钻进效率和储层产能，指导油气田高效开发。此外，井下-地面通信技术是目前石油开采过程中重点关注的问题之一，传统方案受限于技术或应用条件等因素，难以实现高速稳定通信。原子磁力计具有抗高温、体积小、功耗小、探测灵敏性强等优势，可作井-地电磁波通信接收备选方案¹⁰⁸。

量子电流互感实现大动态范围交直流精准测量，赋能电力行业。电流互感器广泛应用于电力统计量和线路监测等环节，对安全性、可靠性、环保型、智能化等要求极高。传统电磁式互感器频带窄、高频响应差、动态范围小等局限性；电子式互感器也存在器件干扰问题、

¹⁰⁸ <https://www.qoiltech.com/list/12.html>

温度问题、积分漂移问题，均难以满足智能电网发展要求。NV 色心电流互感器对高压电流导线周围磁场进行探测，实现电流互感，测量精度高、绝缘性能好、稳定性与适应性强，可实现交直流一体检测，应用前景广阔。2022 年，量子电流互感器在合肥挂网试运行¹⁰⁹，有望降低运维成本，减少测量误差和干扰故障停电事故，同时可提升直流电流互感器耐压上限，助力特高压网络发展。

光量子雷达助力大气环保，实现工业废气实时监测。煤炭能源大量使用以及不法企业的废气偷排漏排，导致能见度低下、PM2.5 超标、空气异味等诸多环境问题。传统激光雷达受背景光影响大，信噪比低，扫描时间长，监测过程存在滞后性，叠加风速扩散影响，难以实现自动精准实时溯源。光量子雷达具备快速扫描定位、自动识别污染源、实时精准溯源、人眼安全等优势，为下一代环保领域颗粒物排放监测溯源提供了新解决方案。2022 年，济南市部署首个颗粒物光量子雷达监测网示范应用平台¹¹⁰，7 个节点总计覆盖面积约 700 平方公里，数据刷新闻隔由 1 小时缩短到 8 分钟，污染源自动识别率大于 95%，为环保部门污染源检测提供有效支撑。

量子磁力计用于工业检测，实现无损探伤。当金属材料内部存在缺陷时，缺陷处的电导率会发生微小的变化。如果在待测金属材料上施加交流电，在缺陷处会产生磁场梯度，这种微弱的磁场变化可以被量子磁力计感知，由此可以确定材料缺陷的部位和尺寸，对材料进行无创的磁性鉴别。量子磁力无损探伤在航空、材料等诸多工业领域具

¹⁰⁹ <https://m.gmw.cn/baijia/2022-09/16/1303143773.html>

¹¹⁰ <http://ictp.caict.ac.cn/article/2022/2096-5931/2096-5931-48-7-52.shtml>

有较高应用价值，有望在近期实施实用。英国工艺创新中心启动量子传感器应用于工业检测的研究项目¹¹¹，旨在开发基于光泵磁力计的工业探伤在线测试系统。

量子传感监测电池电量，精确评估里程，助力碳中和。电动车电池的电流动态范围可达到数百安，传统传感器大动态范围下难以保证测量精度，无法准确预测剩余行驶里程，模糊估计充电状态，电池使用效率低下。2022 年，东京科技大学和矢崎集团报道¹¹²开发基于金刚石 NV 色心传感器的电池监视器样机，在 1000A 动态范围下电池电量检测精度可以达到 1%，将电池使用效率提高 10%，有望使全球 2000 万辆新电动汽车的运行能量损耗减少 3.5%。

量子重力仪为地质和地下结构勘测提供服务，用于地质研究、火山检测、地下测绘等领域。2022 年，英国伯明翰大学¹¹³的冷原子重力梯度仪进行外场实地探测，在不破坏道路表面的情况下成功探测到地下三英尺深的一条隧道。法国 iXblue 公司使用便携式量子重力仪在监测和研究火山活动¹¹⁴，验证在火山喷发等恶劣环境中的工作能力，为地质灾害预警提供了新的方案。此外，量子重力仪可实现 10 微伽量级绝对重力测量精度，可为压力值标定提供重要的技术支撑¹¹⁵。

工业领域的垂直行业应用将加速量子测量技术发展，同时也对量子传感器提出了更高要求，例如在生产线上复杂的电磁和振动环境中仍保证较高的测量精度和鲁棒性，同时还需要轻量化、低功耗和低成本，

¹¹¹ <https://www.uk-cpi.com/news/cpi-joins-consortium-to-develop-quantum-sensors-for-end-of-line-battery-testing>

¹¹² <https://www.nature.com/articles/s41598-022-18106-x>

¹¹³ www.nature.com/articles/s41586-021-04315-3

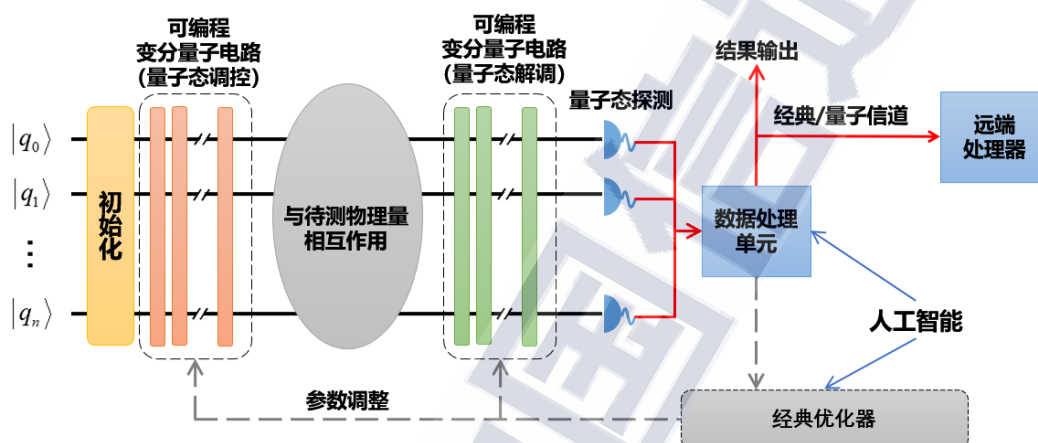
¹¹⁴ <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2022GL097814>

¹¹⁵ <https://mp.weixin.qq.com/s/YtxQpcxKb5Ge8eHqpVKpLA>

未来还应具备组网管控和集成智能化等功能。

（四）量子测量与其他技术领域融合，向智能化发展

智能化传感器是测量传感领域的主要发展方向之一，智能化是指能够对外界物理量进行感知采集，同时自主判断、分析和处理，智能化传感器应具有信息的采集、处理分析以及存储和传输功能。



来源：中国信息通信研究院

图 21 智能化量子传感器与量子信息和 AI 结合

量子测量智能化发展趋势，如图 21 所示，主要体现在几个方面：一是与量子计算结合，实现可编程量子制备与调控，利用量子纠错提升测量性能；二是量子态调控和数据处理引入人工智能（AI），实现自校准和数据分析；三是与量子通信相结合，实现量子传感器的纠缠态量子信息组网，或与远端处理器的可信通信。

可编程量子传感器结合机器学习实现超越经典极限测量精度。经典测量极限受到标准量子极限（SQL）的限制，使用量子纠缠态作为测量“探针”理论上可以突破这一极限。最常用的量子纠缠态是 GHZ 态，但其精度优势依赖于先验选择的特性取值范围。奥地利因斯布鲁

克实验物理研究所¹¹⁶报道了一种可编程的量子传感器，利用低深度参量化变分量子电路对量子态进行编解码，引入经典优化器进行参数优化达到最优性能。传感器架构适用于任何物理方案，可在没有先验估值前提下达到最优测量性能，具备一定自校准能力。使用特殊量子态虽然能提升量子测量的性能，但其本身易受到环境噪声影响，使得相干时间减小，因此在实际应用中被一定程度削弱。清华大学报道¹¹⁷将量子计算中量子纠错（QEC）思想引入量子测量，将量子态映射到更大的希尔伯特空间引入冗余度，保护量子态免受退相干和缺陷影响。实验方案获得 5.3dB 的灵敏度增强。

AI 算法辅助数据处理提升处理效率和结果准确率。量子态极易被外界环境因素影响，使得信噪比劣化，将有效信号淹没在噪声中。AI 算法被认为是数据分析处理的有效工具之一，将量子测量与 AI 算法结合，可实现在复杂环境下的精确测量。日本东京大学报道¹¹⁸AI 算法增强金刚石 NV 色心量子传感器探测性能，并将这一技术应用到场成像，每像素都实现 1.8uT 的准确度。

基于量子纠缠可实现可信量子遥感。在遥感测量场景中，远端的站点需要将测量数据发送回本地站点，以便本地站点进行数据的汇总和分析处理，测量数据的安全传输至关重要。比如窃听者截获到地磁场分布的测量数据，对其进行分析整理结合其他信息可以获取地下矿产资源的分布情况。中科大报道¹¹⁹将量子通信设备无关协议引入量子

¹¹⁶ www.nature.com/articles/s41586-022-04435-4

¹¹⁷ www.nature.com/articles/s41467-022-30410-8

¹¹⁸ www.nature.com/articles/s41598-022-18115-w

¹¹⁹ <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRevA.105.032615>

测量领域，提出基于量子纠缠的可信遥感协议，防止窃听者获取有效信息或替换虚假信息，该协议用于磁场测量，证明了其有效性。

量子测量技术走向智能化是需求驱动的一种必然趋势。可编程、软件定义的量子传感单元，机器学习增强数据后处理机制以及可信遥感协议使得量子测量能够适应复杂多变的环境噪声和应用场景，并且进一步提升测量的性能。量子测量智能化还处于开放研究阶段，应用于商用量子传感器还需要 5-10 年的时间甚至更久。

(五)量子测量商用发展迅速，产业价值链初步形成

随着量子测量逐步成熟，越来越多样机走出实验室，迈向产品化。近年来，国内外孵化出多家量子测量领域初创公司，产品在不断迭代中日渐成熟，同时积极探索应用场景，赋能千行百业。一些传统测量技术公司，如原子钟设备商，也积极研发新产品并探索商业模式，工业巨头博世成立量子测量部门，开展车载量子陀螺仪、医用心脑磁图仪等产品研发。法国高科技公司 iXblue 收购量子测量公司 Muquans，打造光子和量子技术能力¹²⁰。近年来，资本市场对量子测量技术领域的重视程度逐步提高，多家初创公司获得政府和私营部门投资。

¹²⁰<https://www.ixblue.com/ixblue-acquires-kylia-and-muquans-create-new-european-leader-photonics-and-quantum/>



来源：中国信息通信研究院

图 22 量子测量技术产业价值链

量子测量技术产业价值链目前已初步形成，如图 22 所示。上游主要为量子测量设备提供基础的材料和组件，包括高纯度材料（如碱金属原子、惰性气体、金刚石等）、激光器、探测器、环境控制系统（如低温系统、磁屏蔽系统、真空系统、隔振系统等）和光电子元器件，涉及光电子学、微纳加工、低温电子学等领域。中游主要涉及量子探针和传感器的设计、研发与生产，例如量子磁力计、重力仪、陀螺仪、光量子雷达、金刚石显微镜等。下游主要涉及在国防、航天、

医疗、基础设施、能源等不同行业领域的应用推广。

量子测量产业上游可以一定程度与传统光电子加工制造业复用。电学处理部分，如高速信号采集、AD/DA 转换、FPGA 和单片机处理、光学处理模块等，制造加工工艺成熟，满足量子测量设备需求。此外，量子测量对供应链有一些特殊需求，如金刚石 NV 色心材料、低温系统、真空系统、高性能激光器等。以激光器为例，通信激光器大部分集中在 1310 和 1550nm 波段，而量子测量用激光器波长选择与材料和能级结构强相关，如里德堡原子制备与操控，铷原子对应的激光波长为 510nm，铯原子波长为 481nm，由于用量较小，目前两种波长工业级产品需定制。另外，量子测量对于激光器性能提出较高的要求，如窄线宽、高功率和无磁封装等。总体而言，量子测量的上游供应链正在逐步构建，但部分关键要素仍有待完善。

产业价值链中游主要是量子测量设备的设计研发与加工生产，以科研机构孵化的初创企业为主，部分老牌工业企业开始相关产品布局。产品形态包括原子钟、重力仪、磁力计探头、心/脑磁图仪、磁共振谱仪和光量子雷达等，部分产品已在外场测试工作中展现出量子优势并验证其环境适应性。未来量子传感器向小型化、低功耗、低成本发展，将有效牵引上游产业发展，促进元器件、组件模块的加工工艺升级，性能指标提升以及制造成本下降，实现紧凑型、芯片化元器件，从而反向带动量子传感器进一步小型化、降成本。未来量子测量产品有望降低对操作人员的高技术能力要求，提供友好人机交互、上电即工作、一键式操和设备自校准等功能。

产业价值链下游目前仍在探索阶段，用户主要涉及高校科研院所、

国防单位、国家机构（地震局、天文台、授时中心、环保、交通、地质等）、航空航天、能源勘探、医疗机构、工业制造等领域。由于量子测量精度高、成本高，个人消费商业化需求目前尚不明确，主要面向政府和行业用户。随着量子测量企业与行业用户交流合作的不断深入，更多的应用场景和解决方案有望进一步提出。

量子测量领域产业链国内外主要企业如图 23 所示。上游以美、英、德、日企业居多，中游以欧美和中国企业为主，在时频同步、磁场测量、重力测量等领域均有涉及。我国量子测量创新应用与产业孵化取得一定进展，但在一些领域产业化与欧美存在明显差距。如美国 Rydberg 公司已提供商用的基于里德堡原子的射频场探头，我国在该领域还处于原理样机开发阶段。博世等工业巨头已布局推出量子测量产品，我国量子测量产品研发仍以初创企业为主。



来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

图 23 量子测量领域产业视图

五、量子信息技术与应用前景展望

（一）三大领域研发持续推进，应用与产业前景各异

以量子计算、量子通信和量子测量为代表的量子信息技术，作为量子科技的重要组成部分，将成为打破经典技术能力极限，推动未来科技扩展新疆域，促进信息技术产业和数字经济升级发展的创新源泉。量子信息技术已成为全球科技政策领域布局和投资的重点方向，同时也成为科技巨头和社会资本关注的重点领域。近年来，量子信息技术领域基础科研与技术创新保持快速发展，以技术攻关、样机研制、应用探索和产业生态培育为一体的体系化发展格局已经形成。加强管理部门、高校研究机构、产业公司和行业用户等多方交流合作，探索协同创新机制，打造科研产业供应链，加强人力资源建设，成为各国在构建量子信息技术产业体系化发展能力方面的共识。

量子计算的技术产业影响力最大，是量子信息领域的关注焦点。样机研发与性能提升是实现量子计算潜力的核心，超导和离子阱技术路线持续领跑，硅半导体、光量子和中性原子等技术路线在样机技术指标提升方面发展迅速，也是有力竞争者，硬件技术仍处于多种方案并存发展阶段。完成量子计算优越性证明之后，进一步提升物理硬件指标与算法纠错性能，实现基于量子纠错的逻辑量子比特，将是迈向通用量子计算的下一个重要里程碑。表征和评价量子计算硬件能力和应用可行性的基准测评已成为业界研究热点，也是观察分析量子计算技术产业发展水平的重要指标参考。软件和云平台成为构建量子计算应用产业生态重要组成部分，科技巨头在技术创新能力、合作推动力

和用户吸引力等方面处于领先。基于 NISQ 平台的量子计算应用探索在金融、制药、化工、交通等领域广泛开展，但杀手级应用仍需迈过性能优越性、用例实用性与硬件可执行性三道坎。各类投资大量涌入，既为技术发展提供有力支持，也带来行业泡沫争议与讨论。作为全球多国重点发展的战略性新兴技术，量子计算科研仍需长期艰苦努力，目前应用产业仍处于探索起步期，跨域技术产品与商业应用难达市场预期的“死亡之谷”，是业界各方需要共同面对的挑战。

量子通信领域，基于 QKD、QRNG、QSDC 的量子保密通信技术初步实用化，在基础科研领域保持活跃，样机系统传输距离和成码率等技术指标得到提升，DI-QKD 系统前沿探索取得一定进展，但尚无实用化前景。基于量子隐形传态、存储中继和转换等关键技术构建量子信息网络，将是量子通信领域的未来方向，使能技术与组件科研探索取得诸多进展，原理样机和原型实验报道开始出现。但在纠缠制备操控和量子态存储转换等基础关键技术，有待进一步攻关突破，短期难有实用落地。空间量子通信成为科研和应用发展重要方向，墨子号量子科学实验卫星在轨运行 6 年，取得十余项国际领先实验成果，为未来空间量子科学探索奠定坚实基础。量子保密通信产品研发、应用探索和网络建设在国内外持续开展，标准化研究工作取得阶段性成果，对系统功能性能、现实安全性和组网业务能力的标准测评验证须加强。各类量子保密通信技术与 PQC 有望进一步探索不同方式的融合应用，共同为量子计算时代信息安全保驾护航。对于量子保密通信产业而言，提升产品工程化能力水平，探索信息安全领域的有效融合应用场景，仍将是未来破解行业发展困境的主要努力方向。

量子测量领域，冷原子、热原子蒸气、NV 色心、里德堡原子、量子纠缠、单光子等技术方案并行发展，在时频基准、重力测量、惯性测量、磁场探测和目标识别等多种场景开展样机产品研发与应用探索，原子钟、重力仪、磁力计、光量子雷达等多类型产品已逐步走进商业应用。以微弱磁场探测为代表的量子测量技术在心脑血管疾病诊断、癌细胞检测、细胞显微成像等生命科学研究领域将产生重要推动作用。量子测量在微弱电磁信号检测，绝对重力与重力梯度测量，以及软硬目标探测识别等领域的发展，将为国防、工业、地质、环保等众多垂直行业应用赋能，成为加速产业升级的催化剂。量子测量技术与量子计算、量子通信和 AI 等前沿技术也在探索融合应用，成为智能化量子传感器的重要发展演进方向。近年来，随着量子测量技术产品发展和各领域应用探索不断深入，产业价值链逐步明晰，上游关键器件供应能力仍需进一步加强。未来，量子测量各类技术产品在国防、航天和医疗等重点行业领域的应用和产业化发展有望率先获得突破。

（二）发展量子信息技术，开启下一轮技术创新周期

发展量子信息技术，既由科学家探索物质世界最基本运行规律，拓展人类知识边界的好奇心驱动，也有突破经典信息技术能力极限，提升人类社会科技与生产力水平的现实需求，还可能成为开启下一轮康德拉季耶夫(康波)周期技术创新之门的钥匙。经过四十余年发展，量子信息技术已成为全球科技领域的显学。2022 年度诺贝尔物理学奖¹²¹，授予 Alain Aspect、John F. Clauser 和 Anton Zeilinger，表彰他

¹²¹ <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2022/press-release/>

们使用纠缠量子态进行开创性实验，为基于量子信息的新技术开发奠定基础。2023 年度科学突破基础物理奖¹²²，授予 Charles H. Bennett、Gilles Brassard、David Deutsch 和 Peter Shor，表彰他们在量子信息方面的奠基工作。2022 年度科学突破基础物理奖¹²³，授予香取秀俊和叶军，表彰他们将时间测量的精度提高了三个数量级。

发展量子信息技术，促进创新成果应用与产业培育，是推动信息社会和数字经济升级演进的触发器和催化剂，也是构建未来产业竞争实力，维护技术主权的重要环节。在全球量子信息技术产业发展中，美国仍然占据主导地位。在政策布局与投资力度方面，从管理部门、科教部门和产业部门三方进行全面动员和体系化布局，政府公共研发资金、科技巨头投资与资本市场融资三类资金投入规模均为全球领先。在科研产出与技术成就方面，在超导、离子阱、硅半导体、中性原子和拓扑等量子计算技术路线，以及原子钟、量子陀螺仪、量子磁力计和量子重力仪等量子测量技术方向均处于领先。在量子通信领域鲜见对 QKD 的投资支持，但大力发展量子信息网络。在产业发展与国际合作方面，科技巨头在量子计算机软硬件研发、应用场景探索和用户习惯培养等方面优势明显，开始发力构建关键材料、元件、仪器和设备供应链，并联合一些国家构建量子信息技术、应用、标准与产业生态，在量子信息科技和产业领域巩固优势地位。

我国量子信息领域具备良好科研基础，已成为全球推动量子信息技术发展的重要力量之一。“十四五”规划和各地政策布局均高度重

¹²² <https://breakthroughprize.org/News/73>

¹²³ <https://breakthroughprize.org/News/65>

视量子信息技术发展与产业培育，随着国家实验室和重大科技项目等布局举措的落地实施，科研体系化布局和支持力度得到进一步增强。在量子通信领域的新型 QKD 系统和星地量子通信实验处于领先，在量子计算和量子测量领域与欧美先进水平仍有一定差距。在量子计算软硬件协同发展、应用场景探索和用户生态构建等方面的推动力和影响力有限。学术界和产业界在技术沟通交流、产学研分工合作、供应链建设等方面的协同创新能力有待提升。当前国际形势较为复杂，量子信息又属于关键基础性前沿技术，我国量子信息科研与产业发展可能面临供应链维护、国际合作和人才培养等方面的困难和挑战。

总体而言，我国量子信息技术领域发展态势良好，未来，在加强基础科研攻关，保障自主供给能力，促进产学研协同，培育应用产业生态，夯实人力资源基础等方面，进一步凝聚共识，聚力加快发展，将有望取得更多科研、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

