

# 量子信息技术产业发展报告

## (2023年)

量子信息网络产业联盟

2024年1月

# 声 明

本报告所载的材料和信息，包括但不限于文本、图片、数据观点、建议等，均不构成投资或法律建议，也不应替代律师意见。本报告所有材料或内容的知识产权归量子信息网络产业联盟所有（注明是引自其他方的内容除外），并受法律保护。如需转载需联系本联盟并获得授权许可。转载、摘编或利用其它方式使用本报告文字、图表或者观点的，应注明“来源：量子信息网络产业联盟”。违反上述声明者，本联盟将追究其相关法律责任。

量子信息网络产业联盟

联系电话：010-62300592

邮箱：qia@caict.ac.cn

# 编制说明

量子信息技术是培育未来产业新赛道、构建新质生产力、推动高质量发展的重要方向之一，已逐渐步入科技攻关、工程研发、应用探索和产业培育一体化推进的发展阶段，技术成果亮点纷呈，应用场景探索广泛开展，产业生态培育方兴未艾。

我国量子信息技术三大领域总体发展态势良好，未来有望进一步取得更多技术研究与应用探索的新成果。联盟组织成员单位共同编写了 2023 年《量子信息技术产业发展报告》，针对三大领域总体发展态势、技术演进趋势、应用探索转化前景和产业生态发展情况等进行分析探讨，提出技术产业趋势展望供业界参考。

**编制单位：**中国信息通信研究院、科大国盾量子技术股份有限公司、上海图灵智算量子科技有限公司、本源量子计算科技（合肥）股份有限公司、北京中科弧光量子软件技术有限公司、中国电子科技集团公司电子科学研究院、合肥么正量子科技有限公司、中国信息通信科技集团有限公司、北京航空航天大学、江苏亨通问天量子信息研究院有限公司、华翊博奥（北京）量子科技有限公司、北京玻色量子科技有

限公司、国开启科量子技术（北京）有限公司、上海交通大学、中国电信集团有限公司、北京量子信息科学研究院、国家电网有限公司信息通信分公司、北京大学、上海循态信息科技有限公司。

**编写组：**王敬、赖俊森、张萌、姚飞、赵勇、杨林、赵勇杰、楼华哲、韩丙亮、张雪松、韩雁鑫、全伟、赵良圆、杨蒿翔、马寅、罗乐、唐豪、唐建军、王敏、范琼、吕玉祥、吴腾、周颖明。

# 前 言

近年来，量子信息技术已经成为全球各主要科技国家的关注焦点之一，政策规划与投资支持力度不断加大，量子计算、量子通信和量子测量三大领域科研探索与技术创新保持快速发展，应用探索持续开展，产业生态逐步构建。

本报告对量子信息技术总体发展态势、三大领域关键技术进展、应用探索前景和产业生态培育情况等进行分析探讨，展望量子信息技术领域发展趋势。

本研究报告共分为六章，相关章节内容安排如下：

第一章：量子信息领域总体发展态势。介绍量子信息领域三大领域发展态势和年度热点事件。

第二章：政策布局投资。分析国内外量子信息领域政策布局与投资最新情况。

第三章：科研进展成果。介绍三大领域近一年科研攻关的最新进展、重要成果和发展趋势。

第四章：应用场景探索。探讨三大领域近一年应用探索的最新进展、重要成果和发展趋势。

第五章：产业发展分析。介绍三大领域近一年产业培育的最新进展、重要成果和发展趋势。

第六章：发展趋势展望。总结三大领域发展趋势。

# 目 录

一. 总体发展态势	1
(一) 三大领域发展态势	1
(二) 热点话题事件	3
二. 政策布局投资	8
(一) 国际政策布局	8
(二) 国内政策布局	15
三. 科研进展成果	17
(一) 量子计算	17
(二) 量子通信	27
(三) 量子测量	34
四. 应用场景探索	39
(一) 量子模拟助力探索微观系统性质与规律	39
(一) 量子组合优化提升搜索最佳方案准确性	41
(一) 多方合作开展量子保密通信应用探索	43
(一) 首批PQC标准草案发布, 应用存在难度	44
(一) 量子探测成像助力环境监测与生物医疗	47
(一) 量子测量推动调整能源结构与双碳达标	48
五. 产业发展分析	50
(一) 量子计算产业生态培育仍处初期阶段	50
(二) 量子保密通信领域产业化持续探索	51
(三) 量子测量产业链基本形成, 大规模商用仍存挑战	54
六. 未来趋势展望	56

# 图目录

图 1 量子计算技术体系框架	25
图 2 美国NIST后量子加密（PQC）算法标准化历程	47
图 3 量子计算产业生态与国内外代表性企业概况	53
图 3 量子通信产业总体视图	55
图 4 量子测量产业链与代表性企业概况	58

# 表目录

表1 全球量子信息领域战略规划和投资情况（不完全统计）	3
表2 国内外代表性量子计算云平台发展概况	27
表3 2023年全球量子信息网络代表性科研成果	31
表4 量子模拟行业应用探索概况	41
表5 量子组合优化行业应用探索概况	43

## 一、总体发展态势

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的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。

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、调控和观测，实现信息感知、计算和传输。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的变革性应用。

### （一）三大领域发展态势

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。

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。现阶段超导、离子阱、光量子、硅半导体、中性原子等技术路线竞相争鸣，已迈入中等规模含噪声量子处理器阶段，大规模可容错通用量子计算机仍是需要长期探索和集中攻关的目标。量子计算应用场景探索持续开展，但“杀手级”应用尚未出现，产业生态发展稳步推进。

量子通信基于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，理论协议层面具有信息论可证明安全性。基于量子密钥分发和量子安全直接通信等技术方案的量子保密通信系统初步实用化，在新型协议研究和实验系统研制等方面取得阶段性成果，样机产品研制和示范应用探索持续开展，应用探索与产业发展均面临诸多挑战。量子信息网络是未来重点发展方向之一，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、灵敏度和稳定性等核心指标相较传统技术具有数量级提升。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/资源勘测和生物医药等诸多领域，多类型量子测量样机和产品进入实用化与产业化阶段。

## （二）热点话题事件

### 1. 全球多国发布国家量子战略

量子信息技术作为对传统技术体系产生冲击、进行重构的一项重大颠覆性创新，有望在未来引领新一轮科技革命和产业变革方向，已成为全球科技竞争关注焦点之一。

2018 年，欧盟发布“量子旗舰计划”，美国发布《国家量子倡议（NQI）》法案，这两项战略规划的推出正式开启了国家层面支撑量子信息技术领域发展的序幕，近五年来全球各国在量子信息领域的规划布局持续加速。截至 2023 年 12 月，已有 30 个国家和地区相继制定了量子信息领域的战略规划或法案，总计投资额已超过 280 亿美元（根据公开信息不完全统计），全球量子信息领域战略规划和投资情况如表 1 所示。2023 年，共有 7 个国家相继发布量子信息领域国家层面的战略规划，计划投资总额达到 67 亿美元。

表 1 全球量子信息领域战略规划和投资情况（公开信息统计）

时间	国家/地区	战略规划/法案	投资规模（美元）
2014	英国	国家量子技术计划	10 年投资约 12.15 亿
2018	日本	光量子跃迁旗舰计划	投资约 1.2 亿/年
2018	欧盟	量子旗舰计划	10 年投资约 11 亿
2018	美国	国家量子信息科学战略 国家量子倡议（NQI）法案	计划 5 年投资 12.75 亿， 实际投资已达 37.38 亿
2018	德国	量子技术从科研到市场	投资约 7.1 亿
2019	荷兰	量子技术发展国家计划	7 年投资约 7.4 亿
2019	以色列	国家量子技术计划	5 年投资约 3.3 亿
2019	俄罗斯	国家量子行动计划	5 年投资约 5.3 亿
2020	法国	国家量子技术投资计划	投资约 19.6 亿
2021	德国	量子系统研究计划	5 年投资约 21.7 亿
2022	法国	国家量子计算平台	投资约 1.85 亿

时间	国家/地区	战略规划/法案	投资规模（美元）
2022	美国	芯片与科学法案	4 个量子项目 1.53 亿/年
2023	加拿大	国家量子战略	投资约 2.7 亿
2023	英国	国家量子战略（NQS）	10 年投资 31.8 亿
2023	澳大利亚	国家量子战略	投资约 6.4 亿
2023	丹麦	国家量子技术战略	5 年投资约 1 亿
2023	韩国	量子科技发展战略	2035 年前投资 17.9 亿
2023	印度	国家量子任务	2030 年前投资 7.2 亿
2023	爱尔兰	量子信息领域国家战略	——

全球各国量子信息战略规划具有普遍共识和共性举措。一是在量子信息三大领域中，均以量子计算为头号发展目标。二是均在科研、应用、产业、供应链、人才和生态等方面开展全方位布局。三是在科研、应用、产业化等方面提出分阶段目标和推进举措。

总体而言，量子信息领域从基础科研探索，转向集科研攻关、工程研发、应用开发、产业培育为一体的体系化竞争。量子信息领域的国际科技竞争正日趋白热化，全球主要国家采取各种措施全面加大布局投入，竞相争夺量子信息技术制高点。

## 2.量子纠错研究进展亮点纷呈

量子计算未来有望引领新一轮科技革命和产业变革，前提是量子计算机性能可满足实际应用的需求。量子纠错作为可容错量子信息处理中必不可少的环节，需要大量的开销资源，还可能由于纠错编码的复杂性、不可逆性和环境噪声等影响造成“越纠越错”的尴尬局面，也即量子纠错之后的效果远未达到不采用纠错情况下的最优值，无法真正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。

近年来随着量子计算硬件及算法的不断发展，量子纠错技术研究

持续保持热度，多类型的突破性成果不断涌现。2023 年，Google、耶鲁大学、南方科大等多项实验验证表明量子纠错首次突破了盈亏平衡点，实现越纠越对。此外，《自然》同期发表三篇中性原子量子计算纠错的最新成果，加州理工、普林斯顿大学、哈佛大学等多项实验验证展示了量子纠错新方案，为持续提升逻辑门保真度等关键指标奠定基础。上述成果均代表着量子纠错技术向前迈进了一大步，也意味着距离实现实用化可扩展通用量子计算更进一步。可以预见，未来经过业界的持续努力，量子纠错领域将产出更多突破性成果。

### **3.国内外加速布局量子计算云平台**

量子计算云平台是集成量子计算机软硬件能力，面向用户提供服务，支撑算法研究，展开应用探索和产业生态的重要汇聚点，已成为推动应用探索和产业化发展的重要驱动力。科技巨头、初创企业与研究机构为抢占应用产业生态核心地位，加大量子计算云平台建设投入和推广力度，全球已有数十家公司和研究机构推出了不同类型量子计算云平台。

近年来，已部署量子计算云平台的国内外企业机构，例如 IBM、亚马逊、谷歌、微软、华为、百度、本源量子、弧光量子、北京量子院等，在原有云平台基础上不断迭代开发新的硬件后端、应用案例以及服务模式。此外，2023 年，多家企业和机构纷纷上线了各自的量子计算云平台，主要包括日本量子计算联合研究小组的超导量子计算机

云平台，中科大与国盾量子的“祖冲之号”量子计算云平台，中国移动与中国电科等共建的“五岳”量子计算云平台，本源量子等共建的量子超融合计算平台，中国电信的“天衍”量子计算云平台等。总的来说，国内外诸多研究机构和企业布局推出了量子计算云平台产品和服务，依托云平台加快推动量子计算算法研究、应用探索和产业生态建设已逐渐成为业界共识。

#### 4.QKD 实验系统性能指标再创新高

量子密钥分发（QKD）基于量子力学基本原理，可在用户间进行安全的对称密钥分发，结合“一次一密”的加密方式，在理论协议层面具备信息论安全性，基于 QKD 的保密通信称为量子保密通信。

近年来 QKD 的实验系统研究不断突破传输距离和密钥成码率的记录，为未来进一步推广和推进产业化发展奠定基础。在传输距离方面，中科大联合团队首次实现千公里级无中继光纤量子密钥分发实验，创造了 1002 公里的单跨段光纤传输最远距离，对应密钥成码率 0.0034bps，对系统参数进行优化后，在 200 公里光纤距离下获得 47.06 kbps 成码率，该研究成果验证了远距离下双场量子密钥分发方案的可行性，并验证了在城际光纤距离下可实现高成码率的量子密钥分发。在密钥成码率方面，中科大联合团队实现百兆比特率量子密钥分发实验，实现了 10 公里标准光纤信道下 115.8Mbps 的密钥成码率，相较之前纪录提高了约一个数量级，实验系统稳定运行超过 50 个

时，该研究成果表明，QKD 可实现百兆比特率的实时密钥分发，有望满足高带宽通信加密需求，对未来应用推广具有重要意义。

## 5.量子测量持续突破经典测量极限

精密测量技术作为从物理世界获取信息的主要途径，在信息技术中起着至关重要的作用。精密测量的本质是测量系统与待测物理量的相互作用，通过测量系统性质的变化表征待测物理量的大小。经典测量方法的精度往往受限于衍射极限、散粒噪声和海森堡极限等因素，测量精度的提升面临一定困难。量子测量在此背景下应运而生，其基于微观粒子系统和量子力学特性实现对物理量进行高精度的测量，可以突破经典力学框架下的测量极限，从而实现更加准确、精细和可靠的测量。

近年来量子测量持续突破经典测量的物理极限，在不同测量领域展示了量子优势。代表性样机产品涉及量子干涉仪、量子磁梯度仪、微波量子雷达等多种类型，被测物理量则涵盖了磁场、频率、相位、光谱等多个方向。此类研究成果表明，基于量子测量的解决方案不仅在理论上能够突破标准量子极限，同时验证了其性能优于当前已有的同类型经典测量设备的最高水平，这为开拓可实用的量子测量技术打开了新的空间。未来随着量子测量技术的发展，不同领域的量子测量样机产品将会实现更大的量子优势。

## 二、政策布局投资

### （一）国际政策布局

欧美多国持续在量子科技领域提供政策资金支持，围绕战略规划、政策措施、组织机制前沿研究、应用探索、产业培育和人才培养等领域，积极争夺量子信息技术制高点。

#### 1. 美国

美国是世界上最早开展量子信息技术研究的国家之一，尤其注重通过政府指导推动量子信息技术的发展，国家战略部署围绕顶层设计、组织机制、专项计划、生态建设等方面展开。一是在顶层设计方面，制定出台《国家量子倡议法案（NQI）》，统一部署全国量子信息技术系列行动。该法案是美国统筹国内力量推进量子信息技术发展的法律基础，也是谋求量子信息技术及其应用全球领导地位的战略规划。二是在组织机制方面，依托 NQI 法案建立了一套完整的组织体系，国家技术标准局（NIST）、国家科学基金会（NSF）、能源部（DoE）、国防部（DoD）、国家航空航天局（NASA）等部门各司其职，同时设立量子信息科学跨机构协调组织，主要包括量子信息科学小组委员会（SCQIS）、国家量子协调办公室（NQCO）、量子科学对经济和安全影响小组委员会（ESIX）、国家量子计划咨询委员会（NQIAC）等，全面加强统筹实施。三是在专项计划方面，美国在量子信息领域积极构建战略优势。美国已推出的专项计划主要包括《国家战略计算计划》、

《国家人工智能计划》、《量子信息科技人才培养国家战略规划》等。四是在生态体系建设方面，美国通过政府引导、企业和大学全力融入、国际盟友积极参与，形成了多方共建的量子信息生态体系。

2023 年 12 月，美国国家科学技术委员会《NQI 2024 年年报》显示<sup>1</sup>，美国量子信息领域实际投资较 NQI 立法原计划的五年共 12.75 亿美元超出两倍有余，2019-2023 财年投资额累计达 39.39 亿美元，2024 年则将预计投资 9.68 亿美元，覆盖量子传感/计量、量子计算、量子网络、量子基础科研和量子工程技术五大领域。其中，量子计算领域投资占比最高，五年共计约 14 亿美元，其他领域投资保持稳定。DoE、NSF、NIST 是三大金主，其中 DoE 和 NSF 五年来已在量子信息领域分别累积投资超过 12 亿和 11 亿美元，分别计划将在 2024 年投入 2.9 亿和 3.4 亿美元。

美国 2018 年底通过 NQI 立法，法案中多项授权于 2023 年 9 月到期，2024 年是 NQI 法案的关键时刻。2023 年 11 月，美国众议院科学、空间和技术委员会主席 Frank Lucas 和首席委员 Zoe Lofgren 代表委员会正式提出 H.R.6213 法案<sup>2</sup>，即《国家量子倡议再授权法案》（National Quantum Initiative Reauthorization Act），以推进美国的量子科学技术保持全球领导地位，12 月通过该法案的重新授权。《国家量子倡议再授权法案》建立在 NQI 法案的基础之上，以确保美国继续

---

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

<sup>2</sup> <https://science.house.gov/2023/11/the-national-quantum-initiative-reauthorization-act>

加速量子科学的突破，加强美国的量子生态系统，以保持美国在未来几十年的竞争力。《国家量子倡议再授权法案》的核心要点主要包括以下几点：要求白宫科技政策办公室制定一项战略，与美国盟友开展量子研究工作合作，以加强美国在这一领域的世界竞争力；授权 NIST 建立最多三个中心以推进量子传感、测量和工程方面的研究；加强 NSF 的学生培训、奖学金和其他人才计划；授权设立一个新的 NSF 多学科协调中心，以在教育单位和更大的量子产业生态系统之间建立新的人才管道，并授权通过 NSF 下属技术、创新与伙伴关系（TIP）理事会设立新的量子测试平台；指示 DOE 制定促进量子计算商业化的战略，并支持量子工厂的发展，以满足量子供应链的设备和材料需求；将 NASA 列入接受法案资助的机构名单，并授权其成立量子科技研究所，专注于太空和航空应用。

## 2. 欧盟

上世纪九十年代，欧盟及相关国家意识到量子信息技术的巨大潜力，持续对泛欧洲乃至全球的量子信息技术研究给予重点支持。在组织机制方面，欧盟围绕量子技术旗舰计划共同设立五个机构，分别是出资方委员会（BoF）、战略指导委员会（SAB）、科学与工程委员会（SEB）、量子社区网络（QCN）和协调支持行动办公室（CSA-QFlag）。具体执行过程中，欧盟量子技术旗舰计划项目信息首先由量子社区网络收集，经协调支持行动办公室汇总到战略指导委员会进行评估。经

战略指导委员会评估通过或提议的项目在出资方委员会同意后，会获得旗舰项目资金支持并交由科学与工程委员会开展实施。开始实施之后，科学与工程委员会不断向战略指导委员会和出资方委员会汇报各项目进展，或由各项目协调人经协调支持行动办公室直接向战略指导委员会汇报情况。

近年来，欧盟积极布局并出台了一系列量子科技战略以及专项计划，目标是在全球量子科技竞争中赢得主动。欧盟主推的《量子技术旗舰计划》于 2018 年正式实施，投资约 10 亿欧元，计划十年内分三个发展阶段发展量子信息技术。2022 年 11 月，欧盟发布《欧盟战略研究和产业议程（SRIA）》<sup>3</sup>，基于量子计算、量子模拟、量子通信、量子传感与计量等四大技术支柱，结合基础量子科学、工程和使能技术等主题，概述了 2030 年量子技术发展路线图，旨在使现有议程与即将推出的一系列计划保持一致。2023 年，欧盟发布《欧洲量子旗舰计划阶段性报告》<sup>4</sup>，回顾四年来研究项目的亮点成就，研究项目对旗舰计划目标的贡献以及面临的挑战，并展望了计划下一阶段的布局举措与目标。欧盟量子技术旗舰计划推出欧洲量子计算机项目“OpenSuperQPlus”<sup>5</sup>，旨在建立一个 1000 量子位的量子计算系统。欧盟量子技术旗舰计划启动新项目“PASQuanS2”<sup>6</sup>，旨在开发一个能够

---

<sup>3</sup> [https://qt.eu/app/uploads/2022/11/Quantum-Flagship\\_SRIA\\_2022.pdf](https://qt.eu/app/uploads/2022/11/Quantum-Flagship_SRIA_2022.pdf)

<sup>4</sup> <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/quantum-tech-flagship-ramp-phase-report>

<sup>5</sup> <https://www.opensuperqplus.eu/>

<sup>6</sup> <https://pasquans2.eu/>

处理多达 10000 个中性原子的量子模拟器，从而进一步改变欧洲可编程量子模拟发展格局。欧盟出资 1900 万欧元成立 Qu-Pilot 项目<sup>7</sup>，该项目将欧洲试点基础设施联合量子技术生产设施，旨在加快欧洲量子技术工业创新走向市场，并帮助建立可信赖的供应链。

### 3. 英国

英国在规划量子信息技术发展方面走在欧洲前列。英国在 2014 年率先出台全球首个量子信息国家级发展政策《国家量子技术计划》，通过两个五年期的规划，共计投资超过 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，同时大力支持量子技术企业发展。2023 年 3 月，英国科学创新与技术部发布《国家量子战略（NQS）》<sup>8</sup>，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。战略中提出四个主要发展目标，一是确保英国拥有领先的量子信息科技与工程技术；二是支持量子技术企业发展，促进投资、供应链和人力资源建设；三是加快量子信息技术应用转化；四是加强量子信息技术产业监管与国际治理合作。

### 4. 日本

日本针对量子信息技术领域的研究开展较早，投入持续较大。2020 年，日本发布《量子技术创新战略（最终报告）》<sup>9</sup>，强有力地促

---

<sup>7</sup> <https://www.ipms.fraunhofer.de/en/press-media/press/2023/Quantum-Technologies-from-Europe.html>

<sup>8</sup> <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy>

<sup>9</sup> <https://www8.cao.go.jp/cstp/siryo/haihui048/siryo4-2.pdf>

进和制定从研发到社会实施的广泛计划，推动量子技术创新。2022 年，日本发布《量子未来社会愿景》<sup>10</sup>，旨在加快量子技术在日本的发展，通过量子技术创造更多就业机会，涵盖领域涉及量子计算机、量子软件、量子安全和量子网络、量子测量和传感及量子材料。同年出台《量子人才培养与保障推进政策》<sup>11</sup>，提出建立教育生态系统，培养“XX+量子”人才；为青年研究人员独立开展相关研究提供持续保障；构建涵盖产业界的研究与人才生态系统。

## 5.其他主要国家

加拿大于 2023 年 1 月发布《加拿大国家量子战略》<sup>12</sup>，量子计算方面需要持续提升混合计算能力，投资建设量子模拟器，探索量子计算应用案例；量子通信方面投资后量子密码学，建设包括陆基和卫星基础设施等在内的国家安全量子网络；量子传感器方面为加拿大开发人员 and 量子传感新技术的早期采用者提供支持，开发新型高灵敏度量子传感器。

印度于 2023 年 4 月发布了《国家量子任务》<sup>13</sup>，计划在 2023 年~2030 年期间投资超 600 亿卢比（约合 7.2 亿美元），旨在促进量子科技研究和工业应用开发，使印度成为量子技术的全球领导者，同时支持数字印度、印度制造、技能印度和可持续发展目标等国家优先事项。

---

<sup>10</sup> <https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/11kai/11kai.html>

<sup>11</sup> [https://www.mext.go.jp/content/20220128-mxt\\_kiso-000020510\\_1.pdf](https://www.mext.go.jp/content/20220128-mxt_kiso-000020510_1.pdf)

<sup>12</sup> <https://www.newswire.ca/news-releases/government-of-canada-launches-national-quantum-strategy-to-create-jobs-and-advance-quantum-technologies-869929816.html>

<sup>13</sup> <https://thequantuminsider.com/2023/04/20/india-announces-730-million-plus-national-quantum-mission/>

该战略的建设目标包括未来 8 年内开发具有 50-1000 个量子比特的中规模量子计算机；拟在建立卫星与印度境内地面站的安全量子通信，并与其他国家进行远距离安全量子通信；实现超过 2000 公里的城际量子密钥分发，同时也部署了具有量子存储的多节点量子网络；开发高灵敏度磁力计和用于精确计时、通信和导航的原子钟；支持量子材料的设计和合成，例如超导体、新型半导体结构和用于制造量子器件的拓扑材料；为量子通信、传感和计量应用开发单光子源/探测器和纠缠光子源。

澳大利亚于 2023 年 5 月发布了《澳大利亚国家量子战略》<sup>14</sup>，制定发展愿景与行动计划，将从 150 亿澳元国家重建基金中拨出 10 亿用于支持量子等关键技术。战略目标是到 2030 年成为全球量子行业领导者，创造 22 亿澳元的量子产业和 8700 个工作岗位；至 2045 年产业价值增长至 61 亿澳元，工作岗位增加至 19400 个。战略共含五大主题，分别是投资研发和商业化、确保基础设施和材料、培养熟练劳动力、维护国家利益、建立量子生态系统。

丹麦于 2023 年 6 月宣布将实施《国家量子技术战略》<sup>15</sup>，计划在 2023 财年拨款 2.12 亿丹麦克朗用于量子领域的研究和创新的基础上，在 2023-2027 年新增拨款 10 亿丹麦克朗（约合 9360 万美元），用于推动丹麦的量子研究发展，为量子技术的开发和应用建立框架，以保

---

<sup>14</sup> <https://www.industry.gov.au/sites/default/files/2023-05/national-quantum-strategy.pdf>

<sup>15</sup> <https://ufm.dk/en/newsroom/press-releases/2023/the-danish-government-is-ready-with-a-dedicated-investment-of-one-billion-dkk-as-first-part-of-a-new-quantum-strategy>

持其全球领先地位，并促进将研究成果转化为应对全球挑战的实用量子解决方案。战略拟通过制定量子研究与创新战略计划，计划主要聚焦在三个重点领域，对研究和创新的长期和战略投资；开展国际研究和创新合作；改善对数字研究基础设施的访问。

韩国于 2023 年 6 月发布《量子科技发展战略》<sup>16</sup>，计划至 2035 年将至少投入 3 万亿韩元（23 亿美元）用于量子技术的研究和应用，以期到 2035 年成为量子科技领域第四大强国。投资分两部分，政府将于 2035 年前投入 2.4 万亿韩元；私营企业将于 2027 年前投入 6000 亿韩元，2027 年后投资额将视技术发展及商业条件灵活调整。该战略将重点加大量子人才培养力度、加强量子基础设施建设、促进量子技术研发及商业化应用推广，提升量子计算机、量子传感器和量子城域网的自主研发能力及服务水平，力争到 2035 年将量子技术水平提高到美国等领先国家的 85%。

爱尔兰于 2023 年 11 月发布国家量子战略“量子 2030”<sup>17</sup>，围绕五个重点领域布局：一是支持量子技术基础科研及应用研究；二是培养顶尖量子人才；三是加强国内和国际合作；四是促进创新、创业，提升经济竞争力；五是提高对量子技术和实际惠益的认识。面对量子技术发展带来前所未有的机遇和挑战，爱尔兰希望通过该战略加强资源投入，到 2030 年成为具有国际竞争力的量子技术中心。

---

<sup>16</sup> <https://www.kedglobal.com/tech,-media-telecom/newsView/ked202306270025>

<sup>17</sup> <https://www.gov.ie/en/press-release/af23b-minister-harris-launches-quantum-2030-irelands-first-national-strategy-for-quantum-technologies/>

## （二）国内政策布局

我国对量子信息技术领域高度重视，各省市也积极推动量子信息相关政策制定与落地实施。2020 年 10 月，习近平总书记在中共中央政治局第二十四次集体学习中，作出把握量子科技大趋势，下好先手棋系列重要指示，讲话从发展趋势研判，顶层设计规划，政策引导支持，人才培养激励，产学研协同创新等五个方面对我国量子科技发展做出全方位系统性布局，为加快促进我国量子信息技术领域发展提供了战略指引和根本遵循。2021 年以来，北京、安徽、广东、上海、山东等二十余个省市在地方“十四五”科技与信息技术产业发展规划中，对量子信息技术领域基础科研、应用探索和产业培育等方面做出具体部署，提供政策引导与项目支持。

2023 年 1 月，合肥市发布《政府工作报告》<sup>18</sup>，强调加快建设综合性国家科学中心和量子信息未来产业园。6 月，广东省政府印发《广东省质量强省建设纲要》<sup>19</sup>，提出支持量子信息等前沿领域加强研发布局。8 月，国务院印发《河套深港科技创新合作区深圳园区发展规划》<sup>20</sup>，支持深港联合国内外高校和科研院所在深圳园区共建“量子谷”。9 月，北京市政府印发《北京市促进未来产业创新发展实施方案》<sup>21</sup>，提出面向量子物态科学、量子通信、量子计算、量子网络、量子

---

<sup>18</sup> <https://www.hefei.gov.cn/ssxw/ztzl/zt/jjhflh/zfgzbg/zfgzbg/108461122.html>

<sup>19</sup> [http://www.gd.gov.cn/gdywdt/gdyw/content/post\\_4199552.html](http://www.gd.gov.cn/gdywdt/gdyw/content/post_4199552.html)

<sup>20</sup> [https://www.gov.cn/zhengce/content/202308/content\\_6900742.htm](https://www.gov.cn/zhengce/content/202308/content_6900742.htm)

<sup>21</sup> [https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/202309/t20230908\\_3255227.html](https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/202309/t20230908_3255227.html)

传感等方向开展技术攻关。工信部等五部门印发《元宇宙产业创新发展三年行动计划（2023-2025年）》<sup>22</sup>，加快高性能计算、异构计算、智能计算、量子计算、类脑计算等突破。10月，武汉市政府召开常务会议<sup>23</sup>，提出要抢抓量子科技发展机遇，全力打造量子科技产业发展高地。11月，湖北省印发《湖北省加快发展量子科技产业三年行动方案（2023-2025）》<sup>24</sup>，设立20亿元量子科技产业投资基金，部署创新突破发展、科技成果转化、场景应用示范、产业融合发展、产业人才聚集等五大工程和18项重点工作。安徽省通过单列量子信息领域重大专项<sup>25</sup>、印发《安徽省数字基础设施建设发展三年行动方案（2023—2025年）》<sup>26</sup>等措施，加大省科技项目对量子领域的支持力度。12月，全国工业和信息化工作会议提到<sup>27</sup>出台未来产业发展行动计划，瞄准人形机器人、量子信息等产业。中央经济工作会议提出<sup>28</sup>开辟量子未来产业新赛道。

地方政策措施主要聚焦科研、硬件和应用三大领域。一是开展科学研究，完善学科布局，建设一流研发平台、开源平台和标准化公共服务平台，推动在量子信息技术关键领域的发展；二是开展硬件研发，攻关量子信息领域核心器件、系统、材料的发展；三是推动场景应用，

---

<sup>22</sup> [https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2023/art\\_e715a9d4611742d5a5f7a4f36ea74974.html](https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2023/art_e715a9d4611742d5a5f7a4f36ea74974.html)

<sup>23</sup> [https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2023/art\\_e715a9d4611742d5a5f7a4f36ea74974.html](https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2023/art_e715a9d4611742d5a5f7a4f36ea74974.html)

<sup>24</sup> [http://www.hubei.gov.cn/zwgk/hbyw/hbywqb/202311/t20231116\\_4947889.shtml](http://www.hubei.gov.cn/zwgk/hbyw/hbywqb/202311/t20231116_4947889.shtml)

<sup>25</sup> <https://www.ah.gov.cn/zmhd/xwfbhx/564281791.html>

<sup>26</sup> <https://sjzyj.ah.gov.cn/public/7061/40684913.html>

<sup>27</sup> [https://wap.miit.gov.cn/xwdt/gxdt/ldhd/art/2023/art\\_bfa8bab733374d2a9a79f5c86935aead.html](https://wap.miit.gov.cn/xwdt/gxdt/ldhd/art/2023/art_bfa8bab733374d2a9a79f5c86935aead.html)

<sup>28</sup> [https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202312/content\\_6919834.htm](https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202312/content_6919834.htm)

推动量子信息技术在金融、大数据计算、生物医药、资源环境等重要领域的应用。

我国量子信息技术产业发展起步稍晚，但重视程度逐渐加大，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，未来也将持续加强顶层规划并完善布局，产出更多高水平技术成果。

### 三、科研进展成果

#### （一）量子计算

##### 1. 多种技术路线持续提升关键性能指标

量子计算处理器作为量子计算的“核心引擎”，是制备、操作和测量量子比特与量子逻辑门的物理载体，也是现阶段量子计算技术研究与应用的核心方向之一，超导、离子阱、光量子、硅半导体、和中性原子等技术路线呈现多元化发展和开放竞争态势，尚无一种技术路线具备压倒性优势。近年来量子计算原型机研制进一步加速，亮点纷呈。

超导量子路线是当前最受关注和研究最多的技术路线，核心器件为二能级系统超导约瑟夫森结，具有可设计、可扩展、易集成、易操控、易耦合等优势。近期超导量子路线量子比特集成规模、基础科研和量子纠缠比特数目方面均取得一定成果。2023 年，“Osprey”芯片上线 IBM 量子计算云平台<sup>29</sup>。QuantWare 推出 64 位超导量子比特处理

---

<sup>29</sup> <https://quantum-computing.ibm.com/services/resources?tab=systems>

器 Tenor<sup>30</sup>。中国科大在 66 位超导量子处理器“祖冲之二号”的基础上扩展可操纵的量子比特数至 176 比特<sup>31</sup>。苏黎世联邦理工学院使用超导量子电路首次完成无漏洞贝尔实验<sup>32</sup>。谷歌使用超导量子处理器模拟操控非阿贝尔任意子，并通过编码创建了代表性的量子纠缠态<sup>33</sup>。中国科大等联合团队实现 51 个超导量子比特簇态的制备<sup>34</sup>。Rigetti 推出<sup>35</sup>84 位超导量子处理器“Ankaa-1”。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<sup>36</sup>。日本富士通和 RIKEN 发布 64 量子比特超导量子计算机<sup>37</sup>。IBM 量子峰会发布<sup>38</sup>1121 位量子比特“Condor”和 133 位量子比特“Heron”两款处理器芯片，并发布了模块化系统扩展技术路线图，预计 2029 年实现一亿个量子逻辑门相干操控。

离子阱路线是另一种受关注程度较高的技术路线，基本原理是利用电荷与电磁场间的交互作用力牵制带电粒子运动，并利用囚禁离子的基态和激发态组成的两个能级作为量子比特，具有逻辑门操作保真度高、量子比特间连接性好、相干时间长等独特优势。近期离子阱路线研究进展主要体现在保真度提升和全连接比特数增长等方面。2023

---

<sup>30</sup> <https://tech.eu/2023/02/23/quantware-debuts-64-qubit/>

<sup>31</sup> <https://www.chinadaily.com.cn/a/202303/08/WS6407d466a31057c47ebb2f6e.html>

<sup>32</sup> <https://www.nature.com/articles/s41586-023-05885-0>

<sup>33</sup> <https://www.nature.com/articles/s41586-023-05954-4>

<sup>34</sup> <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06195-1>

<sup>35</sup> <https://medium.com/rigetti/introducing-the-ankaa-1-system-rigettis-most-sophisticated-chip-architecture-unlocks-a-ab3f05e3c264>

<sup>36</sup> <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.131.080401>

<sup>37</sup> <https://www.fujitsu.com/global/about/resources/news/press-releases/2023/1005-01.html>

<sup>38</sup> <https://newsroom.ibm.com/2023-12-04-IBM-Debuts-Next-Generation-Quantum-Processor-IBM-Quantum-System-Two,-Extends-Roadmap-to-Advance-Era-of-Quantum-Utility>

年，Quantinuum 宣布<sup>39</sup>将 Model H1-2 原型机的单、双量子比特门保真度分别提升至 99.997% 和 99.8%，并将 Model H1-1 系统的量子体积进一步提升至 524288<sup>40</sup>。华翊量子发布<sup>41</sup>37 位离子阱量子计算原型机 HYQ-A37。么正量子发布<sup>42</sup>53 位离子阱量子计算原型机。

光量子路线原理是以光子作为信息载体，利用其多种自由度例如偏振、相位和时间位置等进行量子态编码和量子位构建，可分为专用和通用两种量子计算模型，优势包括单比特操控简单、抗退相干能力强、可常温工作、相干时间长等。近期光量子技术路线科研进展主要是新型光子态生成方案、特定应用问题求解、光子规模增长等。2023 年，中科大等合作构建 255 光子的量子计算原型机“九章三号”<sup>43</sup>，进一步提升了高斯玻色采样速度和量子优越性，基于光量子计算机完成“稠密子图”和“Max-Haf”两类图论问题求解<sup>44</sup>，研究了“九章”处理这两类图论问题为搜索算法带来的加速。南京大学提出<sup>45</sup>一种可行、可扩展的 N-光子态（N-photon state）生成方案。玻色量子发布<sup>46</sup>100 量子比特相干光量子计算机。

硅半导体量子路线的关注度也在持续提升，主要利用量子点中囚禁的单电子或空穴作为量子比特，通过电脉冲实现对量子比特的驱动

<sup>39</sup> <https://arxiv.org/pdf/2305.03766.pdf>

<sup>40</sup> <https://www.quantinuum.com/news/quantinuum-h-series-quantum-computer-accelerates-through-3-more-performance-records-for-quantum-volume-217-218-and-219>

<sup>41</sup> <https://www.hyqubit.com/simulator>

<sup>42</sup> <https://mp.weixin.qq.com/s/TdkxA8KJWtfFrOc3GjpMVg>

<sup>43</sup> <https://journals.aps.org/prl/issues/131/15>

<sup>44</sup> <https://physics.aps.org/articles/v16/s64>

<sup>45</sup> <https://phys.org/news/2023-02-quantum-optics-multiphoton-qubits-lnoi.html>

<sup>46</sup> <https://www.qboson.com/index/>

和耦合，优势在于可扩展性好、门操作速度快、与现有半导体工艺技术兼容。近期成果亮点主要在于新型量子比特研发、操控技术提升和量子比特数增长等方面。2023 年，Intel 发布<sup>47</sup>12 位硅基自旋量子芯片 Tunnel Falls。新南威尔士大学实现<sup>48</sup>一种电信号控制的新型硅量子比特—触发器(flip-flop)量子比特。浙江大学等在半导体纳米结构中创造了一种新型量子比特<sup>49</sup>。休斯研究实验室实现<sup>50</sup>硅编码自旋量子比特通用控制。中国科大实现<sup>51</sup>硅基锗量子点的超快调控，自旋翻转速率超过 1.2 GHz。

中性原子量子计算通过被称为光镊的紧密聚焦激光束阵列，约束中性原子在超高真空中悬浮，并基于此构建二能级系统，主要优势在于相干时间长、原子间相互作用强、原子阵列构型灵活、构建超高维阵列潜力等。中性原子量子计算在量子哈密顿量和量子模拟处理方面具有一定优势，不但可用于研究和解决凝聚态物质中诸多物理问题的典型模型，还可用于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。2023 年，密歇根大学提出<sup>52</sup>操纵里德堡量子态的新方法，可诱导被捕获在一维晶格中的原子同时发生奇偶校验的里德堡跃迁。合肥国家物理科学微尺度研究中心等基于角自旋相关的超光学晶格制备出保真度为 95.6(5)%、寿命为  $2.20 \pm 0.13$  秒的

---

<sup>47</sup> <https://www.intel.com/content/www/us/en/research/quantum-computing.html>

<sup>48</sup> <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.add9408>

<sup>49</sup> <https://www.nature.com/articles/s41565-023-01442-y>

<sup>50</sup> <https://www.nature.com/articles/s41586-023-05777-3>

<sup>51</sup> <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.nanolett.3c00213>

<sup>52</sup> <https://physics.aps.org/articles/v16/s105>

Bell 态<sup>53</sup>，并实现了一维原子链中 10 个原子以及二维原子阵列中 2×4 个原子的量子纠缠。Atom Computing 公布 1225 原子阵列和 1180 量子比特的中性原子量子计算原型机<sup>54</sup>，预计于 2024 年正式上市。

不同技术路线具有自身的独特优势，所面临的技术与工程问题与挑战差异性较大，并驾齐驱与持续竞争的发展态势将会继续，何种技术路线最后胜出目前尚不明确，最终的胜出者可能会取决于技术突破、应用落地时间以及市场需求等多种复杂因素。

## 2. 量子纠错技术不断取得突破性进展

量子纠错是用于保护量子态信息免受噪声或退相干影响的技术，是进行高保真量子信息处理的必要环节之一。量子态的不可克隆性、相干性等量子物理特性，决定了量子纠错与经典纠错存在本质差异。量子纠错需要完成纠错编码、制备辅助比特、探测错误和纠正错误等多项操作，每项操作步骤均有可能引入额外的错误，为了避免越纠越错，则在各环节均需完成高精度的操控。假设在纠错精度高于纠错阈值时可以很好地完成量子纠错，即可通过多重级联编码等方式使错误率大幅降低，从而实现超高精度的逻辑量子比特，并最终以大规模逻辑比特为基础，构建大规模可容错通用量子计算机。

随着量子计算样机硬件能力的提升，量子纠错研究具备了更好的物理基础，近期不断取得新进展。2023 年，Google 首次突破量子计

---

<sup>53</sup> <https://physics.aps.org/articles/v16/s122>

<sup>54</sup> <https://atom-computing.com/quantum-startup-atom-computing-first-to-exceed-1000-qubits/>

算纠错编码规模与收益的平衡点<sup>55</sup>，在纠错编码规模增长的同时降低错误率，验证了量子纠错方案的可行性。南方科大以离散变量编码逻辑量子位突破 QEC 平衡点<sup>56</sup>，超过盈亏平衡点约 16%。耶鲁大学利用实时量子纠错方案实现盈亏平衡点超越<sup>57</sup>，利用实时纠错实现稳定的逻辑量子比特。IBM 在 127 位 Eagle 量子处理器上基于误差缓解技术和量子伊辛模型<sup>58</sup>，在无需量子纠错条件下实现对磁性材料简化系统模型的自旋动态和磁化特性的模拟，并验证其准确性。加州理工展示<sup>59</sup>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<sup>60</sup>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<sup>61</sup>基于里德堡阻塞机制控制方案，在 60 个铷原子阵列实现 99.5% 双比特纠缠门保真度，超过表面码纠错阈值。清华大学等<sup>62</sup>联合使用四个离子阱量子比特对 PEC 进行基准测试，通过层析重建误差模型并结合其他错误缓解方法提高保真度。

量子纠错近年取得诸多成果，但需要指出，当前逻辑量子比特的最低错误率距离实用化要求仍有近十余个数量级的差距，量子纠错距离实现解决实际问题的量子计算机仍有很远的距离。量子纠错未来发

---

<sup>55</sup> <https://www.nature.com/articles/s41586-022-05434-1>

<sup>56</sup> <https://www.nature.com/articles/s41586-023-05784-4>

<sup>57</sup> <https://www.nature.com/articles/s41586-023-05782-6>

<sup>58</sup> <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06096-3>

<sup>59</sup> <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06516-4>

<sup>60</sup> <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06438-1>

<sup>61</sup> <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06481-y>

<sup>62</sup> <https://www.nature.com/articles/s41534-023-00784-8#citeas>

展主要聚焦以下几个方面：一是理论与实验相互配合，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。二是进一步改进纠错程序，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阈值、减低纠错开销的双向努力，进一步提升不同路线量子硬件水平满足实现量子纠错所需要的冗余比特需求的同时，通过算法改进降低纠错所需的资源开销。可以预测，在达到量子纠错盈亏平衡点后，业界将持续集中攻关量子纠错理论与工程实现，量子纠错发挥实际应用这一目标，有望取得进一步突破。

### **3.量子计算软件与云平台持续开展探索**

随着量子计算样机系统研发的快速推进，量子计算软件和云平台作为实现计算处理功能和用户连接服务的重要桥梁，也处于百花齐放的蓬勃发展阶段。由量子计算硬件系统、软件、算法和云平台等关键要素构成的量子计算技术体系框架初步形成，如图 1 所示。

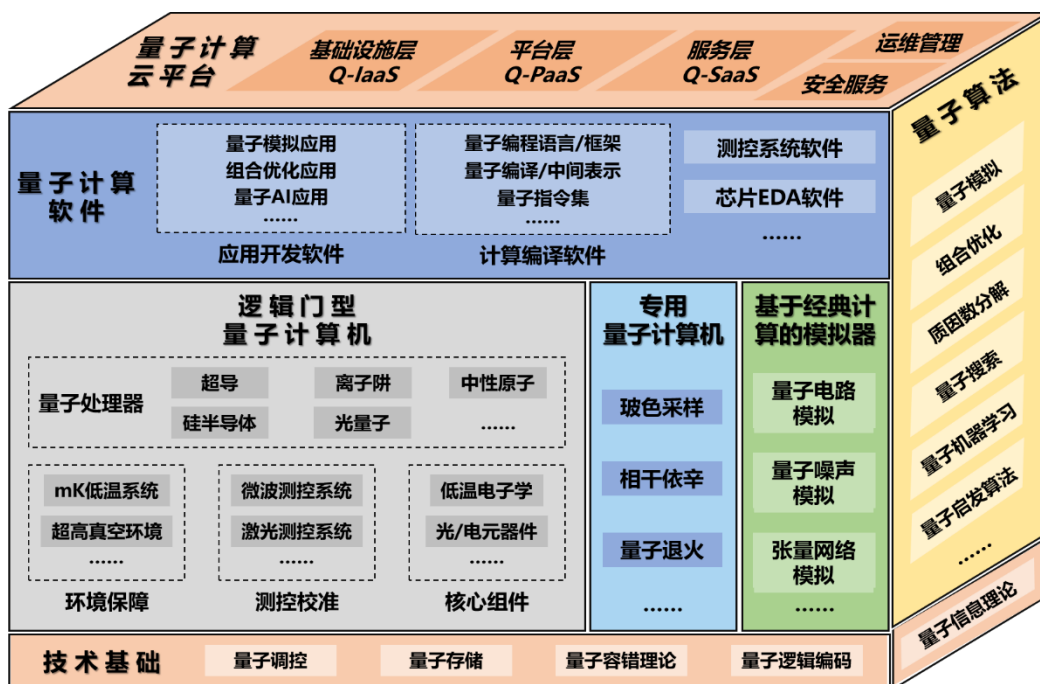


图 1 量子计算技术体系框架

量子计算软件是连接使用者与量子计算硬件的关键桥梁，量子计算软硬件相结合将助力多行业领域研究人员开展理论研究与应用探索。量子计算软件在编译运行和应用开发等方面需要根据量子计算原理特性进行全新设计，提供面向不同技术路线的底层编译工具，特异性与专业性较强，目前处于功能设计开发与生态构建的早期阶段。业界在量子计算应用开发软件、编译软件、测控软件、EDA 软件等方向开展多元化布局。

量子计算应用开发软件为开发者提供创建和操作量子程序的工具集、开发组件以及算法库，支持开发者编写、运行、检验量子算法和程序。2023 年，Intel 推出量子计算开发平台 SDK 1.0<sup>63</sup>，QC Ware

<sup>63</sup> <https://www.intel.com/content/www/us/en/newsroom/news/intel-releases-quantum-sdk.html#gs.riwex3>

发布量子化学软件 SaaS Promethium<sup>64</sup>，Quantum Brilliance 推出涵盖经典量子混合应用、化学模拟以及自动驾驶等用例的量子计算软件开发工具包 Qristal SDK<sup>65</sup>。量子计算编译软件于明确量子编程边界并确保程序编译正确执行，并提供完善且体系化的语法规则用于协调和约束量子操作与经典操作。Pasqal 发布中性原子量子计算软件 Pulser Studio<sup>66</sup>，微软发布 Azure 量子开发套件 QDK 预览版<sup>67</sup>。量子计算测控软件为用户提供量子芯片控制、处理、运算等功能，并支持测量结果反馈与芯片校准。苏黎世仪器推出操控软件 LabOne Q，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><sup>68</sup>。量子计算芯片 EDA 软件主要用于实现量子芯片的自动化设计、参数标定与优化、封装设计等功能。亚马逊发布开源软件平台 Palace<sup>69</sup>，可完成复杂电磁模型模拟并支持量子计算硬件设计。量旋科技推出应用于超导芯片的 EDA 软件天乙<sup>70</sup>。

量子计算软件作为同时承载量子计算硬件与算法应用的连接环节，目前尚难完全明确目标需求并确定技术架构，仍处于开放式探索阶段，不同软件功能各有侧重，发展水平均属于工具级，与经典软件

---

<sup>64</sup> <https://www.hpcwire.com/2023/04/17/qc-ware-launches-promethium-a-quantum-chemistry-saas-targets-hybrid-world-near-term/>

<sup>65</sup> <https://www.einpresswire.com/article/638267292/quantum-brilliance-releases-open-source-software-for-miniature-quantum-computers>

<sup>66</sup> <https://www.pasqal.com/articles/pulser-s-1>

<sup>67</sup> <https://github.com/microsoft/qsharp/wiki/Installation>

<sup>68</sup> <http://www.qudoor.com/index.php?c=show&id=139>

<sup>69</sup> <https://aws.amazon.com/cn/blogs/quantum-computing/aws-releases-open-source-software-palace-for-cloud-based-electromagnetics-simulations-of-quantum-computing-hardware/>

<sup>70</sup> <https://www.spinq.cn/newsDetail/a915d803-d94d-485e-b6ad-ee6356062b98>

成熟度相去甚远。未来量子编程语言和框架、量子编译器和优化器、量子误差校正模块等方面需要进一步探索和提升。

表 2 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		
平台提供者										
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				光子	中性原子	模拟器	云平台服务		
平台提供者	中科大 & 国盾量子	北京量子院 & 物理所	本源量子	中国电信	图灵	武汉量子院	华为	中国移动	弧光量子	
平台名称	量子计算云平台	quaifu	本源量子云	天衍量子计算云平台	量擎	酷原量子云	HiQ	"五岳"量子计算云平台	弧光量子云平台	
量子处理器	骊鸿176	ScQ-P136 ScQ-P21 ScQ-P18 ScQ-P10	本源悟空 本源悟源1号 本源悟源2号	超导176比特量子芯片	—	—	—	波色-相干伊辛机 量子科技长三角创新中心-超导量子计算机(待上线) 华翎量子-离子阱量子计算机(待上线)	超导66比特量子芯片 离子阱11比特量子芯片	
量子比特数	176 (66计算比特)	136; 21; 18; 10	12; 6	176 (66计算比特)	—	—	—	100专用光子量子比特	66; 11	

量子计算云平台将量子计算机硬件或量子计算模拟器与经典云计算软件工具、通信设备及 IT 基础设施相结合，为用户提供直观化及实例化的量子计算接入访问与服务。近年来国外科技企业、初创企业与研究机构加速布局，为争夺产业生态地位，抢占未来发展先机展开激烈竞争，目前全球已有数十家公司和研究机构推出了不同类型的数十个量子计算云平台，其中代表性云平台如表 2 所示。

2023 年，加州理工大学等共同推出<sup>71</sup>量子计算开发平台 BlueQubit，用户可通过其访问超导量子硬件。Pasqal 发布<sup>72</sup>中性原子量子计算探索平台 Quantum Discovery，助力探索基于中性原子量子计算的行业应用。Strangeworks 云平台推出<sup>73</sup>多种新工具以及使用优化方法执行

<sup>71</sup> <https://www.bluequbit.io/>

<sup>72</sup> <https://quantumdiscovery.pasqal.cloud/>

<sup>73</sup> <https://strangeworks.com/press/strangeworks-announces-general-availability-of-advanced-compute-platform>

问题的原始应用程序。日本量子计算联合研究小组推出量子计算云平台服务<sup>74</sup>，用户可在签订合作协议后接入 64 位超导量子计算机。中科大 176 比特“祖冲之号”量子计算云平台正式上线<sup>75</sup>。北京量子院研制的 136、18 和 10 位超导量子芯片在其夸父量子计算云平台上线<sup>76</sup>。中国移动、中国电科等联合发布<sup>77</sup>“五岳”量子计算云平台。本源量子等多家单位<sup>78</sup>联合推出量超融合计算平台。中国电信发布<sup>79</sup>“天衍”量子计算云平台。

总的来说，随着量子计算技术的不断发展，量子计算云平台已经成为了研究和应用量子计算的重要平台，为多个行业领域的研究者提供了算力服务与创新工具。

## （二）量子通信

### 1. 量子密钥分发实验系统性能持续提升

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方向，国内外已有基于多种协议类型的 QKD 系统初步实现商用化，但需要注意的是，商用 QKD 系统在密钥成码率、传输距离等方面仍面临诸多挑战。未来持续提升 QKD 系统的密钥成码率与传输距离等关键性能是实现远距离传输、组网和高带宽加密业务应用等的必经之

---

<sup>74</sup> [https://www.riken.jp/pr/news/2023/20230324\\_1/index.html](https://www.riken.jp/pr/news/2023/20230324_1/index.html)

<sup>75</sup> <https://quantumctek-cloud.com/>

<sup>76</sup> <https://quafu.baqis.ac.cn/#/home>

<sup>77</sup> [https://www.cnii.com.cn/rmydb/202308/t20230819\\_496801.html](https://www.cnii.com.cn/rmydb/202308/t20230819_496801.html)

<sup>78</sup> <https://qcloud.originqc.com.cn/zh/qhComputing/home>

<sup>79</sup> <https://qc.zdxlz.com/home>

路，同时也是提高 QKD 技术实用化水平，破解应用推广与产业化困境所必须解决的问题。

“制备-测量”式 QKD 是商用化 QKD 系统的主要技术方案，可基于连续变量（CV）协议（例如高斯调制相干态）和离散变量（DV）协议（例如诱骗态 BB84）等类型的协议实现。“制备-测量”式 QKD 方案的密钥成码率与传输效率息息相关，突破单跨段 500km 光纤传输距离极限十分困难，此外，具有不理想特性的接收端探测器可能引入威胁系统现实安全的风险。CV-QKD 在数十公里的中短传输距离方面具有密钥成码率优势，有望成为城域 QKD 应用主流技术方案。2023 年，山西大学采用改进 16-APSK、2.5G 波特率的离散调制协议 CV-QKD 系统<sup>80</sup>，在 80km 传输距离实现 2.11 Mbps 密钥成码率。西南通信研究所采用高斯调制协议、工作频率 1GHz、全数字解调算法系统<sup>81</sup>，在 100km 传输距离实现 0.51 Mbps 密钥成码率。上海交大采用发送端光源集成方案<sup>82</sup>，在 50km 传输距离实现 0.75 Mbps 密钥成码率。丹麦科技大学采用<sup>83</sup>接收端集成方案的 10G 波特率调制系统，在 10km 距离实现 300 Mbps 密钥成码率。DV-QKD 实验系统的密钥成码率等性能指标近年来也获得持续提升。2023 年，中科大联合团队基于 2.5GHz 工作频率系统、光源编码集成器件、8 通道集成 SNSPD 和高

---

<sup>80</sup> <https://doi.org/10.1364/OL.492082>

<sup>81</sup> <https://doi.org/10.1364/OL.485913>

<sup>82</sup> <https://doi.org/10.1364/PRJ.473328>

<sup>83</sup> <https://arxiv.org/abs/2305.19642>

速实时后处理技术<sup>84</sup>，采用诱骗态 BB84 协议 QKD 系统实现了 10km 传输距离 115.8 Mbps 密钥成码率。瑞士应用物理集团基于 2.5GHz 工作频率、14 通道集成 SNSPD 的 BB84 协议 QKD 系统<sup>85</sup>，实现 10km 距离 64Mbps 密钥成码率。

双光场 (TF) 协议因其“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，从而可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。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 实验系统的关键性能持续提升。2023 年，中科大采用 SNS-TF-QKD 协议、主动奇偶校验方法、双波段相位估计以及超低噪声超导纳米线单光子探测器 (SNSPD) 完成了 1002km 系统传输实验<sup>86</sup>，实现 0.0034bps 密钥成码率，在 200km 光纤传输距离实现 47kbps 密钥成码率。TF-QKD 的有效探测事件取决于中间探测端借助两端信号产生的单光子干涉结果，两个发送端独立激光器的波长和相位需要精准匹配，此外还需要实现基于参考光测量的相位跟踪和锁定，这提高了现网部署的难度。北京量子院提出一种开放式 PMP-QKD 架构<sup>87</sup>，可异步配对探测符合计数且无需参考光信道，在 508km 光纤距离实

<sup>84</sup> <https://doi.org/10.1038/s41566-023-01166-4>

<sup>85</sup> <https://doi.org/10.1038/s41566-023-01168-2>

<sup>86</sup> <https://doi.org/10.1103/physrevlett.130.210801>

<sup>87</sup> <https://doi.org/10.1103/physrevlett.130.250801>

现 42.64 bps 成码率，简化系统配置的同时提高了实用化水平。

## 2.量子信息网络使能技术开展持续研究

量子信息网络（QIN）基于量子纠缠操控、量子隐形传态、量子存储中继等关键技术，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，有望为量子信息处理能力带来指数级提升，是量子计算、量子通信和量子测量三领域融合发展的最终演进方向，成为量子信息领域的前沿研究热点方向。2023 年，量子纠缠制备、量子中继、量子存储器方面取得诸多进展，不完全统计如表 3 所示，探索不断扩展和深化。

表 3 2023 年全球量子信息网络代表性科研成果

时间	主要技术成果	研究机构	发表期刊
2023.2	实现 230 米光纤信号钙离子间量子纠缠	奥地利 Innsbruck	Phys. Rev. Lett <sup>88</sup>
2023.3	基于离子阱实现 10s 量子存储	英国 牛津大学	Phys. Rev. Lett <sup>89</sup>
2023.4	电信波段和近可见波段单光子转换（效率 0.73）	中国 中科大等	npj Quantum Inf <sup>90</sup>
2023.5	基于量子中继实现 50 公里光纤纠缠传输	奥地利 Innsbruck	Phys. Rev. Lett <sup>91</sup>
2023.5	实现中性原子微波-光波转换（效率 0.58）	美国 芝加哥大学	Nature <sup>92</sup>
2023.5	实现四光子 Dicke 态制备（保真度 0.817）	中国 南京大学	Phys. Rev. Lett <sup>93</sup>
2023.5	实验实现微波光子-光学光子纠缠	奥地利 ISTA 等	Science <sup>94</sup>

<sup>88</sup> <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.050803>

<sup>89</sup> <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.090803>

<sup>90</sup> <https://doi.org/10.1038/s41534-023-00704-w>

<sup>91</sup> <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.213601>

<sup>92</sup> <https://www.nature.com/articles/s41586-023-05740-2>

<sup>93</sup> <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.223601>

<sup>94</sup> <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adg3812>

时间	主要技术成果	研究机构	发表期刊
2023.7	实现 51 个 qubit 纠缠态制备（保真度 0.637）	中国 中科大	Nature <sup>95</sup>
2023.7	实现铌酸锂芯片 200 ns 多模光量子存储	中国 电子科大	Science Advances <sup>96</sup>
2023.7	实现硅基光量子芯片间的高维量子纠缠网络	中国 北京大学	Science <sup>97</sup>
2023.7	完成 50 公里三节点光纤 QIN 原型试验	美国 林肯实验室	ArXiv <sup>98</sup>
2023.8	提出基于卫星中继的广域量子信息网络方案	加拿大 Calgary	Phys. Rev. Appl <sup>99</sup>
2023.10	实现里德伯原子光波-微波频率转换（效率 0.5）	波兰 华沙大学	Nature <sup>100</sup>

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，因此提升量子纠缠制备和分发效率和保真度是实现量子信息网络的必经之路，相关科学研究和实验验证不断开展和深化。2023 年，奥地利因斯布鲁克大学在相距 230 米的两个钙离子之间实现 0.882 保真度的远距离纠缠<sup>101</sup>。中科大实现 0.637±0.030 保真度的 51 个超导量子比特纠缠态制备验证<sup>102</sup>。北京大学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<sup>103</sup>，并提出高维量子纠缠自修复方法用以快速修复在传输过程中已退化的纠缠。南京大学首次在硅基光量子芯片上实现 0.817±0.003 保真度的四光子 Dicke 态制备及高精度相干调控<sup>104</sup>。

<sup>95</sup> <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06195-1>

<sup>96</sup> <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adf4587>

<sup>97</sup> <https://doi.org/10.1126/science.adg9210>

<sup>98</sup> <https://arxiv.org/abs/2307.15696>

<sup>99</sup> <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.20.024048>

<sup>100</sup> <https://www.nature.com/articles/s41566-023-01295-w>

<sup>101</sup> <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.050803>

<sup>102</sup> <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06195-1>

<sup>103</sup> <https://doi.org/10.1126/science.adg9210>

<sup>104</sup> <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.223601>

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。量子存储方面，基于气态冷原子系综、固态掺杂晶体和全光子簇态等不同类型技术路线的存储方案和实验研究持续深入。2023 年，牛津大学使用离子阱量子信息网络节点实现了高稳定性量子存储器<sup>105</sup>，存储时间超 10s 后纠缠保真度仍保持在 0.81(4)。电子科大联合团队基于原子频率梳协议在掺铒铋酸锂波导芯片上实现了 200 ns 存储时间、4GHz 存储带宽以及  $2.83 \pm 0.03\%$  内部存储效率的通信波段集成多模光量子存储<sup>106</sup>。量子中继方面，技术方案分为两类，分别是含存储量子中继方案和全光量子中继方案，前者是当前主流方案，近年科研探索仍在不断推进。2023 年，美国普林斯顿大学实验验证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<sup>107</sup>，未来有望用于固态量子中继器实验。美国德克萨斯大学提出基于测量的容错单向全光量子中继方案<sup>108</sup>，完成全光中继局部操作的有效简化。奥地利因斯布鲁克大学利用两个钙离子作为量子存储器完成电信波段传输超 50 公里的量子中继实验<sup>109</sup>。南京大学提出并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<sup>110</sup>。

### 3.量子信息网络研究与试验验证有序推进

---

<sup>105</sup> <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.090803>

<sup>106</sup> <https://doi.org/10.1126/sciadv.adf4587>

<sup>107</sup> <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06281-4>

<sup>108</sup> <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2536477/v1>

<sup>109</sup> <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.213601>

<sup>110</sup> <https://doi.org/10.1364/OL.482287>

量子信息网络得多项核心使能技术处于理论与实验研究的开放探索阶段，仍存在诸多技术瓶颈，整体距离实用化水平还有很大差距。但基于其实现量子计算机互联组网以指数级提升量子信息处理能力的巨大潜力，使之成为欧美等国量子通信领域发展的重点方向之一。

近年来，量子信息网络的传输与组网技术实验，以及初步应用探索正在逐步开展，全球多国加快推动技术试验与测试验证。其中代表性的是美国，美国近年来积极搭建测试平台并开展一系列组网实验，加速量子信息网络应用探索。研究机构方面，2023 年，NIST 为 QIN 基础组件研发及组网测试提供长期支持，构建 NG-QNet 测试平台验证 QIN 基础组件功能<sup>111</sup>。DoE 计划拨款 2400 万美元用于 QIN 研究开发并推动分布式量子计算网络应用探索<sup>112</sup>。林肯实验室等联合构建了 50 公里三节点量子网络实验床（BARQNET）用于测试量子态信号传输特性和补偿机制<sup>113</sup>。企业方面，多家企业在量子信息网络研发与测试验证等方面积极开展布局。亚马逊量子网络研究中心开发基于金刚石色心的新型量子网络光接口<sup>114</sup>。Qunnect 启动 GothamQ 量子信息网络测试平台<sup>115</sup>，与纽约大学合作测试 16 公里 QIN 链路。高校方面，滑铁卢大学将与欧洲团队联合开展合作项目“HyperSpace”<sup>116</sup>，目标是

---

<sup>111</sup> <https://www.nist.gov/programs-projects/quantum-communications-and-networks>

<sup>112</sup> <https://science.osti.gov/ascr>

<sup>113</sup> <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.15696>

<sup>114</sup> <https://aws.amazon.com/cn/blogs/quantum-computing/perfect-imperfections-how-aws-is-innovating-on-diamond-materials-for-quantum-communication-with-element-six/>

<sup>115</sup> <https://www.nyu.edu/about/news-publications/news/2023/september/nyu-takes-quantum-step-in-establishing-cutting-edge-tech-hub-in-.html>

<sup>116</sup> [https://uwaterloo.ca/news/science/connecting-canada-and-europe-through-quantum-satellite?utm\\_source=mira-genews&utm\\_medium=miragenews&utm\\_campaign=news](https://uwaterloo.ca/news/science/connecting-canada-and-europe-through-quantum-satellite?utm_source=mira-genews&utm_medium=miragenews&utm_campaign=news)

实现跨大西洋的量子卫星链路和洲际量子通信组网。佛罗里达大学与加拿大卡尔加里大学联合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<sup>117</sup>。

此外，欧盟多国依托量子旗舰计划和地平线欧洲计划等战略规划，采取开展组网实验、组织应用探索、支持初创企业、建立合作项目等一系列行动，旨在实现全球范围内的量子信息网络。2023 年，多家欧洲研究机构共同启动为期三年的 **LaiQa** 项目<sup>118</sup>，旨在构建全球范围的量子互联网，并开发一系列量子信息网络所需的关键组件。欧洲量子互联网联盟（**QIA**）启动了为期七年的计划，将构建欧洲首个大规模量子互联网<sup>119</sup>。**QIA** 启动第一届量子互联网应用挑战赛<sup>120</sup>，旨在汇聚更多参赛者参与到应用组网原型设计开发和应用探索中。荷兰代尔夫特理工（**TUD**）取得诸多科研成果，率先实现了三节点组网实验，完成了基于纠缠 **QIN** 链路层协议的实验演示<sup>121</sup>。此外，**TUD** 为 **QIN** 产业化做出贡献，孵化了 **Q\*Bird**、**QphoX**、**Qblox** 等一系列初创企业。德国电信开设量子实验室<sup>122</sup>，实验室提供量子光学基础设施和可完成两千公里测试的光纤网络，聚焦量子信息网络应用并探索构建量子物联网。英国布里斯托大学基于动态多协议纠缠分发量子信息网络实现

---

<sup>117</sup> <https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.20.024048>

<sup>118</sup> <https://www.tno.nl/en/newsroom/2023/09/laiqa-european-quantum-internet-space>

<sup>119</sup> <https://quantuminternetalliance.org/2022/10/14/the-quantum-internet-alliance-will-build-an-advanced-european-quantum-internet-ecosystem/>

<sup>120</sup> <https://quantuminternetalliance.org/quantum-internet-application-challenge-2023/>

<sup>121</sup> <https://doi.org/10.1038/s41534-022-00631-2>

<sup>122</sup> <https://www.telekom.com/en/media/media-information/archive/deutsche-telekom-opens-quantum-research-lab-1047874>

六个用户之间的量子通信<sup>123</sup>。

### （三）量子测量

#### 1. 科研发展迅速，展示量子优势成为趋势

量子测量是利用量子特性获得更高性能的测量技术，主要通过对微观粒子体系及其中量子态的制备、调控和观测，更加准确、精细和可靠的测量与探测外界物理量的变化。根据物理媒介和制备操控方式不同，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。可被测量的物理量主要包括频率、时间、重力场、加速度、角速度、磁场、电场、温度、物质痕量等。量子测量在基础科研、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具备广泛应用场景。

近期，展现“量子优势”已成为量子测量领域的发展热点，相关基础科研快速发展，成果层出不穷。2023 年，英国布里斯托尔大学提出基于压缩态频率梳的量子增强吸收光谱测量方案<sup>124</sup>，10dB 和 15dB 压缩比时的测量信噪比分别达到比标准量子极限高一个数量级和标准量子极限的 30 倍。意大利都灵理工大学联合团队通过测量信号光和闲置光的一阶强度方式计算的皮尔逊相关系数明显低于经典方法，在

---

<sup>123</sup> <https://ieeexplore.ieee.org/document/9748401/authors>

<sup>124</sup> <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.130.133602>

量子增强非干涉定量相位成像领域同样展示了量子优势<sup>125</sup>。法国里昂高等师范学院实现的微波量子雷达性能比经典雷达高出 20%<sup>126</sup>，展示了微波量子雷达中的量子优势。上海交通大学联合团队提出新型量子干涉仪噪声压缩保护方案<sup>127</sup>，实验验证了高路径损耗条件下的量子干涉仪的测量结果依旧可以突破标准量子极限。兰州大学利用 Floquet 束缚态克服含噪量子计量中的不可行原理<sup>128</sup>，周期性驱动 Ramsey 干涉仪的原子，当原子和噪声共同形成 Floquet 束缚态时，频率测量精度恢复至理想的  $t^2$  标度关系，并允许频率测量精度随着原子数  $N$  恢复至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。

## 2.量子 PNT 已成为量子测量领域研究热点

基于卫星的定位、导航、授时（PNT）技术依赖全球导航卫星系统（GNSS），通过其发送由星载原子钟产生的高精度时间信号，接收器接收多颗卫星的时间信号并计算距离后则可确定接收器的精确位置信息，并实时进行运动过程中的位置计算从而实现定位导航功能。基于卫星的 PNT 技术具有精确定位、高效导航和准确授时的能力，在航空航天、军工国防、公共安全、减灾救援、交通出行等领域均起到重要作用。但基于卫星的 PNT 在为现代社会提供便利的同时也隐

---

<sup>125</sup> <https://www.nature.com/articles/s41377-023-01215-1#Sec3>

<sup>126</sup> <https://www.nature.com/articles/s41567-023-02113-4>

<sup>127</sup> <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.130.073601>

<sup>128</sup> <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.131.050801>

藏了诸多风险隐患。对于 GNSS 卫星信号的干扰、篡改、伪造、屏蔽乃至对卫星的摧毁，都将使卫星 PNT 系统无法工作，可能会对以此为基础的生产活动应用造成难以预估的严重影响。在此背景下，无需借助卫星同时具有更高精度和可靠性的自主 PNT 技术应运而生。现阶段，基于原子钟和量子惯性导航等技术的量子 PNT 已成为量子测量领域的重点发展方向之一。

原子钟是 GNSS 系统实现定位导航功能的关键使能组件，也是量子 PNT 技术体系的核心部分之一。近期，下一代秒定义的相关研究取得诸多成果，以光学原子钟为代表的新型时频基准不确定度已迈入  $1\text{E}-19$  量级，为大幅提升 PNT 系统的授时和定位导航精度奠定基础。2023 年，美国阿贡实验室利用欧洲新一代同步加速器辐射源（EuXFEL）高亮度 X 射线激发钷-45 元素金属箔产生异构体<sup>129</sup>，实现两个数量级的跃迁能量不确定度优化以及 3000 亿年误差一秒的理论计时精度，有望成为未来新一代时频基准解决方案。美国 NIST 联合团队在 300 余公里的自由空间信道条件下实现 320 阿秒的时间同步<sup>130</sup>，支持  $40\mu\text{W}$  信号发射功率和 102dB 链路损耗。美国科罗拉多大学在光钟中实现秒稳  $1.087\text{E}-15$  的自旋压缩<sup>131</sup>，低于标准量子极限 1.94dB。中科院精密测量院研发的室温钙离子光钟的不确定度达  $1\text{E}-$

---

<sup>129</sup> <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06491-w>

<sup>130</sup> <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06032-5>

<sup>131</sup> <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06360-6>

18 量级<sup>132</sup>，为未来的光钟应用奠定一定基础。

陀螺仪和加速度计均为自主惯导系统的核心组件。量子惯导系统主要基于 SERF 和冷原子干涉等原理实现，未来有望成为新一代惯导解决方案，数量级提升理论测量精度和体积功耗等关键性能指标。2023 年，北京理工大学研制出基于悬浮纳米金刚石的高灵敏度陀螺仪<sup>133</sup>，可实现  $6.86 \times 10^{-7} \text{ rad/s}/\sqrt{\text{Hz}}$  灵敏度，由于陀螺仪的工作面积积极小，未来有望实现芯片化。总的来说，量子陀螺仪和加速度计现阶段主要处于实验室样机研制阶段，性能指标仍待优化。

### 3.量子探测成像技术未来前景可期

量子探测成像是一种集量子纠缠光源、脉冲注入压缩、单光子探测等量子技术与计算光学、雷达探索等经典技术于一体的新型成像方法。使用量子探测成像技术获取探测目标的图像、位置和距离等信息时，可实现成像距离、速度、分辨率和灵敏度等方面的突破。

以单光子激光雷达为代表的超分辨成像是量子探测成像未来发展的重要方向之一，单光子激光雷达具有单光子级别的灵敏度和皮秒级别的时间分辨率，可实现远距离、高精度的三维成像。2023 年，美国科罗拉多大学提出基于经典和量子关联函数的高速超分辨率计算成像技术<sup>134</sup>，同时提升了信噪比与成像速度。英国爱丁堡大学联合团队

---

<sup>132</sup> <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.19.064004>

<sup>133</sup> <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-31-5-8139&id=526325>

<sup>134</sup> <https://spj.science.org/doi/full/10.34133/icomputing.0003>

利用单光子激光雷达重建水下散射环境的实时三维场景<sup>135</sup>，实验显示浑浊水质条件下仍能实现每秒 10 帧的刷新速率。华东师范大学提出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<sup>136</sup>。

双光场关联成像（鬼成像）是一种利用纠缠光子对实现目标物体照明和图像采集分离的新型成像方式，优势在于采用低光照即可完成成像。2023 年，南非威特沃特斯兰德大学实现三维结构信息探测的单像素量子鬼成像<sup>137</sup>，通过获得复杂物体相位以及振幅等信息重建复振幅图像。德国劳恩霍夫研究所联合团队实现三维量子鬼成像<sup>138</sup>，相较经典方案，在空间损耗、校准工作及其在遥感中的应用等方面具有优势。意大利罗马大学联合团队提出空间双光子态振幅和相位的干涉成像技术<sup>139</sup>，达到 87% 平均保真度的同时测量时间缩短三个数量级。

近年来，量子探测成像方向的新型协议研究与关键器件研制也取得诸多进展。2023 年，美国 NIST 联合团队研制出一种四十万像素超导纳米线单光子探测相机<sup>140</sup>，可实现 4 mm×2.5 mm 阵列面积、5 um×5 um 分辨率以及 1.1×10<sup>5</sup> cps 探测计数率，单个探测器可实现 1.0×10<sup>-4</sup> cps 暗计数率，也即整个阵列暗计数率达到了 0.13 cps。南京大学提

---

<sup>135</sup> <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-31-10-16690&id=530374>

<sup>136</sup> <https://www.nature.com/articles/s41377-023-01179-2>

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

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

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

<sup>140</sup> <https://arxiv.org/abs/2306.09473>

出一种新型量子成像协议<sup>141</sup>，并演示了利用未检测到的光子对结构物体进行无交互单像素量子成像。

## 四、应用场景探索

### （一）量子模拟助力探索微观系统性质与规律

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、演化规律以及经典现象，通过使用算法和数据创建相关过程的动态模型，对现实世界现象的行为产生洞察力。量子模拟具备在原子尺度直接模拟微观系统相互作用能力，目前正在从纯粹原理性演示逐渐过渡到为应用问题提供解决方案，未来有望成为多个行业领域的全新应用探索工具。

表 4 量子模拟行业应用探索概况

应用方向	代表性参与机构	应用场景
化学工业	IBM、谷歌、微软、D-Wave、SEEQC、富士通、NobleAI 等	量子化学
		化工材料
物理研究	IBM、谷歌、ParityQC、马普所、哈佛大学、马里兰大学等	凝聚态物理
		高能物理
		核物理
		量子力学
生物制药	IBM、QC Ware、Zapata、Kvantify、Polarisqb、Moderna、富士通、NTT DATA 等	制药
		生命科学
能源	Quantinuum、英飞凌、空客、宝马、福特等	传统能源
		新能源

近年来量子模拟在化学工业、物理研究、生物制药、能源等代表性行业领域的应用探索已成为研究热点，如表 4 所示。2023 年，谷歌

<sup>141</sup> <https://www.nature.com/articles/s41534-022-00673-6>

联合团队开发出一种机器学习算法用于完成对超分子复合物进行动力学模拟<sup>142</sup>。德国尤利希研究中心<sup>143</sup>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<sup>144</sup>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 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<sup>145</sup>，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。IBM 和克利夫兰诊所合作<sup>146</sup>，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。美国艾姆斯国家实验室通过模拟材料的自适应算法展示了一种应用量子计算于材料研究中的方法<sup>147</sup>，可在减少计算资源的同时保持准确性。美国能源部国家能源技术实验室联合团队使用量子计算研究胺反应<sup>148</sup>，可更快找到用于碳捕获的有用胺化合物用以帮助净化大气。

量子模拟具备在原子尺度直接模拟微观系统相互作用能力，目前正在从提供物理现象的定性演示向着为应用问题提供解决方案的方向发展，未来有望成为物理、化学、材料、医药等领域的全新应用探索工具。

---

<sup>142</sup> <https://phys.org/news/2023-01-algorithm-enables-simulation-complex-quantum.html>

<sup>143</sup> <https://www.eurekalert.org/news-releases/977133>

<sup>144</sup> <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abo7484>

<sup>145</sup> <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06096-3>

<sup>146</sup> <https://newsroom.ibm.com/2023-03-20-Cleveland-Clinic-and-IBM-Unveil-First-Quantum-Computer-Dedicated-to-Healthcare-Research>

<sup>147</sup> <https://www.insidequantumtechnology.com/news-archive/quantum-news-briefs-may-4-sandboxaq-and-the-city-university-of-new-york-partner-to-create-quantum-education-opportunities-and-launch-new-photonics-lab-what-government-can-do-to-enable-the-quantum-in/>

<sup>148</sup> <https://avs.scitation.org/doi/10.1116/5.0137750>

## （二）量子组合优化提升搜索最佳方案准确性

组合优化问题是目前算法中最热门的问题之一，搜索空间往往随着搜索规模呈指数级增长，导致有效时间内难以求解，或难以获得全局性最优解。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，是量子计算领域近年来颇受关注的探索方向，也被认为是当前有可能率先突破应用的方向之一。

表 5 量子组合优化行业应用探索概况

行业领域	代表性参与机构	应用场景
量化金融	IBM、Xanadu、D-Wave、QC Ware、IonQ、Pasqal、Rigetti、Terra Quantum、Multiverse Computing、本源量子、汇丰银行、Itaú Unibanco 银行、毕马威、巴斯夫、摩根大通、德意志交易所集团等	组合优化
		模拟定价
		风险预测
交通物流	Quantinuum、Xanadu、Q-CTRL、QCI、英伟达、宝马等	路线优化
		货物装配
		线路调度
航空航天	Xanadu、Quantum-South、英伟达、空客、Amerijet 等	流体动力学
		路线优化
气象预测	PsiQuantum、Pasqal、Rigetti、OQC、巴斯夫、德勤等	气象预测
		灾害预警
电信传媒	D-Wave、Multiverse Computing、Atom Computing、玻色量子、中国移动、NREL 等	电信
		媒体

近年来，量子组合优化在诸多行业中均可找到相应用例，主要包括涉及复杂多变量组合优化的量化金融、交通规划、气象预测、电信传媒等方向，如表 5 所示，未来将持续加大应用探索的深度和广度，实现更多行业领域的量子组合优化案例。2023 年，Xanadu 和航空发动机制造商罗尔斯·罗伊斯共同为 PennyLane 开发量子计算工具以加

速对航空航天应用量子算法的研究<sup>149</sup>。Terra Quantum 和泰雷兹公司使用混合量子计算优化卫星任务规划<sup>150</sup>，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<sup>151</sup>。Amerijet 和 Quantum-South 利用量子计算实现飞机物流装载优化用以提高货物装载率和航班收入<sup>152</sup>。中国移动分别与玻色量子和本源量子合作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<sup>153</sup>，验证了算法加速潜力与应用场景可行性。

总体而言，量子组合优化有望应用于诸多行业领域，为任务规划、物理研究、路线优化、信息通信等方向提供解决方案，未来将持续加大应用探索的深度和广度，实现更多行业领域的量子组合优化案例。

### （三）多方合作开展量子保密通信应用探索

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积极合作，明确系统融合方案和加密应用场景，才有望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实际解决方案，从而带动产品实用化部署与产业化发展。近几年量子保密通信企业通过与传统通

---

<sup>149</sup> <https://www.newswire.ca/news-releases/xanadu-and-rolls-royce-to-build-quantum-computing-tools-with-penny-lane-881322368.html>

<sup>150</sup> <https://www.newswire.ca/news-releases/xanadu-and-rolls-royce-to-build-quantum-computing-tools-with-penny-lane-881322368.html>

<sup>151</sup> <https://thequantuminsider.com/2023/05/23/nvidia-rolls-royce-and-classiq-use-quantum-computing-for-computational-fluid-dynamics-in-jet-engines/>

<sup>152</sup> <https://quantum-south.com/airlinescargo/quantum-south-identifies-alternatives-to-boost-amerijet-internationals-cargo-load-factor-by-up-to-30-with-cutting-edge-solution/>

<sup>153</sup> <https://mp.weixin.qq.com/s/LPNIwofTnGrxLYaA7hQLSQ>

信网络运营商开展合作的方式，共同进行测试验证与应用探索已成为新的发展趋势，并且已在企业合作、网络建设和行业融合应用等方面取得初步进展。

企业合作方面，中国移动与国科量子联合共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共建了中电信量子科技有限公司。2023 年，中国电信投资 30 亿元在安徽成立了中电信量子信息科技集团有限公司，公司经营范围含数字技术服务、量子计算技术服务、信息安全设备制造、云计算设备制造、商用密码产品生产、5G 通信技术服务、卫星移动通信终端销售等。

网络建设方面，2022 年，全长 1147km 的合肥量子保密通信城域网建成，共包含 8 个核心节点和 159 个接入节点，将为电子政务网络提供量子安全接入和数据传输加密服务。欧盟多国开启量子通信实验网络和基础设施建设，西班牙将建设覆盖马德里大都市区量子通信城域网。法国、爱尔兰、丹麦等国也均开始建设量子通信试验网络并开展相关产品测试。

行业融合应用方面，国内外针对 QKD 等量子保密通信技术与不同类型 ICT 系统及网络的融合应用研究开展持续探索，进行了诸多实验验证和商用化方案探索工作。2023 年，华夏银行与北京量子院联合探索 QSDC 技术在银行关键数据加密传输场景的应用。意大利电信

集团联合 QTI 公司探索 QKD 技术在工业网络中的应用<sup>154</sup>，演示其在工控交换机与边缘云计算节点的数据传输中起到的加密保护作用。英国 Bristol 大学将 QKD 设备与 5G 天线后端前传网络设施进行融合<sup>155</sup>，完成 5G 前传光信道中使用量子加密技术的可行性验证。维也纳大学设计并演示了基于 QKD 的量子安全电子支付方案<sup>156</sup>，该方案使用信息论安全 MAC、最优欺骗策略分析等方法设计量子信号制备、数据后处理，可防御客户欺骗性支付。

#### **（四）首批 PQC 标准草案发布，应用存在难度**

当前互联网信息的安全性普遍基于以 RSA、ECDH 和 ECDSA 等算法为基础的公钥密码体系，该体系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。量子计算技术将对以公钥密码体系为基础的信息通信网络安全构成严重威胁，已成为全球各国管理机构、学术界和产业界普遍共识。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。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。

---

<sup>154</sup> <https://www.gruppotim.it/it/archivio-stampa/mercato/2023/CS-CIM4-0-TIM-16-03-23.html>

<sup>155</sup> <https://doi.org/10.1364/JOCN.483644>

<sup>156</sup> <https://www.nature.com/articles/s41467-023-39519-w>

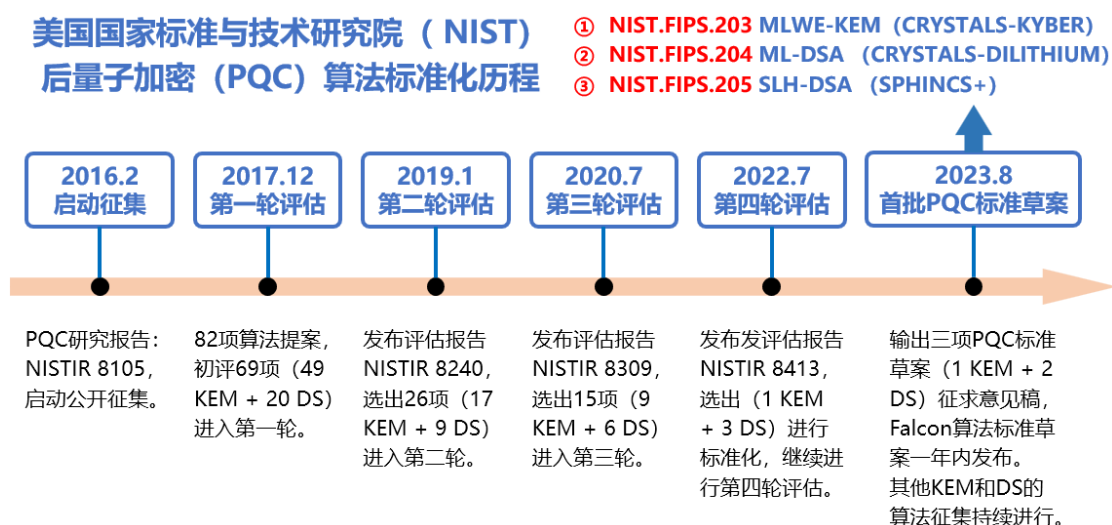


图 2 美国 NIST 后量子加密（PQC）算法标准化历程

美国引领了 PQC 算法标准的制定，欧美科技巨头和密码学界均作出重要贡献，PQC 算法标准化历程如图 2 所示。2023 年 8 月，美国 NIST 正式发布三种 PQC 算法的标准化草案<sup>157</sup>，分别是 CRYSTALS-KYBER 算法<sup>158</sup>、CRYSTALS-DILITHIUM 算法<sup>159</sup>以及 SPHINCS+算法<sup>160</sup>，预计上述三种 PQC 算法将在 2024 年发布正式标准，第四种算法 FALCON 的标准化草案也将会在 2024 年发布。此外其他 KEM、DSA 算法的新一轮征集也将持续开展。

PQC 标准化的持续推进加快了 PQC 应用部署推广的速度。2023 年，互联网工程任务组(IETF)成立后量子应用协议工作组(PQUIP)，开展加密技术标准和网络协议升级等方面的研究。PQUIP 发布《面向工程师的后量子密码》报告<sup>161</sup>，详细探讨 PQC 标准算法特征、算法

<sup>157</sup> <https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography>

<sup>158</sup> <https://csrc.nist.gov/pubs/fips/203/ipd>

<sup>159</sup> <https://csrc.nist.gov/pubs/fips/204/ipd>

<sup>160</sup> <https://csrc.nist.gov/pubs/fips/205/ipd>

<sup>161</sup> <https://www.ietf.org/id/draft-ietf-pquip-pqc-engineers-01.html>

替换升级方案等技术问题。NIST 联合国家网络安全卓越中心(NCCoE) 启动“向 PQC 迁移”计划<sup>162</sup>，在提出升级项目工作流程的同时推荐了 28 家 PQC 技术产品供应商，包含 IBM、亚马逊、思科、SandboxAQ 等企业。美国网络安全与基础设施安全局（CISA）、NSA 和 NIST 联合发布《量子准备：迁移到后量子密码学》文件<sup>163</sup>，目标是为机构和企业开展 PQC 升级应用提供参考与指导。IBM、微软、MITRE、PQShield、SandboxAQ 和滑铁卢大学等联合成立 PQC 联盟，开展 PQC 迁移标准研究、创建技术材料、测试验证等活动。

首批 PQC 算法标准草案的发布助力 PQC 产业化发展，但需要注意，信息安全系统的 PQC 迁移与大规模应用部署，仍面临重重困难。一是目前 PQC 算法标准具有多样性，在带来安全性提升的同时，也为下游产品开发、测试评估、标准更新和应用部署带来较多不确定性。二是 PQC 技术标准的实际应用部署，需要明确标准中提出的诸多密钥、密文和签名参数，满足计算处理和故障处理等能力要求，同时适配目标系统架构和环境，这使得开展产品级和系统级的研究开发、测试验证以及更新适配等一系列工作成为必然。三是目前信息通信和互联网的大量协议和标准中广泛采用公钥加密算法，加密算法更新意味着大量通信协议和标准的更新迭代，可以预见，种类多且数量大的通信与信息安全领域标准协议完成更新和系统迁移的过程将需要较长

---

<sup>162</sup> <https://csrc.nist.gov/News/2021/migration-to-post-quantum-cryptography-proj-desc>

<sup>163</sup> <https://www.cisa.gov/news-events/news/cisa-nsa-and-nist-publish-new-resource-migrating-post-quantum-cryptography>

时间。

## （五）量子探测成像助力环境监测与生物医疗

量子探测成像以其探测灵敏度、成像分辨率等方面可突破传统相机经典极限限制等优点，在高分辨率成像、非相干成像、恶劣条件下成像等方面具有广阔的应用前景。量子探测成像技术有望应用于环境监测和生物医疗等行业领域，近年来国内外均开展了相关实验探索并取得初步成果。

油气泄漏监测是环境监测的一个重要应用方向。油气泄漏监测对于环境保护具有重要意义，通过监测管道泄漏，能够及早发现油气是否存在泄漏情况，便于及时采取措施防止泄漏事故进一步扩大。2023年，厦门大学联合团队利用体积约为  $0.013\text{m}^3$  的单光子拉曼激光雷达实现水下石油泄漏的监测<sup>164</sup>，该雷达系统可以在水下 0.6 米处探测并区分厚度为 1~15 mm 的石油泄露情况。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可提升气体浓度检测与成分分析的灵敏度<sup>165</sup>，在百米范围实现 ppm 量级的检测精度，为炼化和存储设施提供一种新型的气体泄漏监测方案。英国 QLM 开发一种用于气体监测的激光雷达系统<sup>166</sup>，可建立激光雷达生成的甲烷或二氧化碳等温室气体图像，从而可以快速可视化和量化管道或储气设施中的气体泄漏。

---

<sup>164</sup> <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-62-19-5301>

<sup>165</sup> <https://www.idquantique.com/quantum-sensing/applications/oil-gas/>

<sup>166</sup> <https://qlmtec.com/solution/#monitor>

生物学科学的进步往往得益于灵敏度和分辨率更高的工具的开发，而实现生命体征的实时监测在生物学中具有十分重要的应用价值，目前相关实时监测基本采用接触式设备，一定程度上限制了设备的应用推广，量子测量为新一代生物学传感器的发展提供了新的方向。2023 年，悉尼大学团队发明了用于非接触式生命信号监测的光子雷达<sup>167</sup>，原理是利用经过人体胸腔反射信号的多普勒效应从而监控人的呼吸频率、幅度以及心率，可实现信号带宽 30GHz、精细分辨率 6 毫米以及微米级别的准确度，这将助力针对呼吸骤停和吸气性呼吸困难等呼吸系统疾病的早期检测，同时对人体可能存在的潜在健康问题进行提示和施救警报。

## （六）量子测量推动调整能源结构与双碳达标

2020 年 9 月，我国明确提出二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和。在“碳达峰”与“碳中和”双碳发展目标指引下的能源革命，意味着调整能源结构，将传统的化石能源为主的能源体系转变为以可再生能源为主导、多能互补的能源体系，进而促进我国能源及相关产业升级，破除能源之间的壁垒，促进多能互补、取长补短，提高能源整体利用率，这是能源变革势在必行之举。以金刚石 NV 色心磁场测量、电流互感测量和单光子探测为代表的一系列新兴量子测量技术，未来有望助力解决能源行业的众多应用痛点，

---

<sup>167</sup> <https://www.nature.com/articles/s41566-023-01245-6>

助力实现双碳达标。

高能量密度是储能器件未来的重要发展方向，锂电池因其高能量密度和集成化能力，作为一种性能优异的储能器件在新能源领域，尤其是电动汽车等行业领域已获得广泛应用，然而目前锂电池的生产、检测和使用等环节中仍有诸多行业痛点仍待解决，未来量子测量有望为提升锂电池生产质量和效率、提高锂电池漏电检测灵敏度以及提高锂电池剩余电量测量准确度等方面提供助力。2023 年，日本东京工业大学使用金刚石 NV 色心传感器测量电池电流<sup>168</sup>，实现 130 A 动态范围内 10 mA 的电流测量精度。

构建新型电力网络是实现双碳发展目标的关键抓手之一，未来新型电力网络将从“源随荷动”的实时平衡模式、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，电网运行特性的转变意味着需要更加灵敏与可靠的监测传感设备，用以满足采集和智能化分析监测电网状态信息的更高要求。金刚石 NV 色心量子电流互感器可探测高压电流导线周围的磁场，实现高精度和动态范围的电流互感测量，且具备较强的极端环境耐受性。面对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，量子电流互感器能够有助于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

---

<sup>168</sup> <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18106-x>



前，不同技术路线的并行发展导致对于上游供应链的需求存在差异，这一定程度上限制了上游供应链企业的技术攻关和规模化发展。国内外对比而言，上游企业以欧美居多，部分龙头企业占据较大市场份额，我国部分关键设备和元器件对外依赖程度较高。

量子计算产业生态中游主要涉及量子计算原型机和软件，其中原型机是产业生态的核心部分，目前超导、离子阱、光量子、硅半导体和中性原子等技术路线发展较快，其中超导路线受到热捧，离子阱、光量子和中性原子路线获得较多初创企业关注。近年出现一批主推量子计算软件的企业，对于量子计算领域应用探索与产业发展起到一定推动作用。国内外对比而言，美国在原型机研制与软件研发等方面占据优势，我国量子计算硬件企业存在数量有限且技术路线布局相对单一等问题，量子计算软件企业数量规模较少、创新成果有限、应用探索推动力较弱。

量子计算产业生态下游涵盖量子计算云平台以及行业应用，处在早期发展阶段。近几年，全球已有数十家公司和研究机构推出量子计算云平台力图争夺产业生态地位。目前量子计算领域应用探索已在量化金融、化学模拟、人工智能、生物医药、交运航空等领域广泛开展。国内外对比而言，国外量子计算云平台在后端硬件性能、软硬件协同程度、商业服务模式等方面具有优势。欧美行业龙头企业成立量子计算研究团队，与量子企业联合开展应用研究，我国下游行业用户对量子计算重视程度有限，仍需提升应用探索动力。

## （二）量子保密通信领域产业化持续探索

随着量子保密通信试点应用和网络建设的推进和发展，量子保密通信产业初步建立并逐渐发展，形成包含基础研究、设备研发、建设运维和安全应用为一体的产业生态系统，产业总体视图如图 4 所示。近年来，量子通信领域的网络建设验证、产品研发以及标准化研究等方面发展较为迅速。



图 4 量子保密通信产业总体视图

在网络建设与实验验证方面，2023 年，亚马逊量子网络中心在新加坡实现了一个点对点的量子安全网络<sup>170</sup>，成功连接了两个相距约 3 公里的 QKD 设备，并建立了一个同时使用 QKD 技术和 AWS 边缘计

<sup>170</sup> <https://aws.amazon.com/cn/blogs/quantum-computing/implementing-a-quantum-secured-network-in-a-metropolitan-area/>

算硬件的 VPN 隧道。瑞士 IDQ 与诺基亚、移动通信公司 Proximus 合作<sup>171</sup>，在布鲁塞尔和梅赫伦的两个数据中心之间分别完成 QKD 试验。中国电信联合团队完成基于少模光纤 (FMF) 和分离光放系统的 QKD 与经典光通信系统共纤传输实验<sup>172</sup>，100.96km FMF 和经典光通信带宽 1Tbps 时，密钥成码率达到 2.7kbps。

在产品研发方面，2023 年，日本东芝和软银在英国共建量子技术中心<sup>173</sup>，专注于研制兼容 QKD 接口的虚拟专用网 (VPN) 路由器产品，并完成基于 IPsec 协议的量子加密 VPN 通信技术实验。西班牙 LuxQuanta 推出基于 CV-QKD 技术的商用化 “NOVALQ” 系统<sup>174</sup>，具有易于部署、可靠性强、具有弹性和能快速生成密钥的优势。韩国 SK Broadband 推出韩国首个支持 QKD 和 PQC 在线安全方法的专线服务<sup>175</sup>，用户可以选择和使用 QKD 或 PQC。

在标准化方面，2023 年 8 月，工信部等四部门联合印发《新产业标准化领航工程实施方案（2023-2035 年）》<sup>176</sup>，在量子信息领域，方案提出开展量子信息技术标准化路线图研究。10 月，全国信息技术标准化技术委员会成立量子信息标准工作组<sup>177</sup>。此外，随着量子保密通信技术产品研发和应用探索发展，量子保密通信领域技术标准体系初

---

<sup>171</sup> <https://www.idquantique.com/sk-telecom-and-samsung-unveil-the-galaxy-quantum-4/>

<sup>172</sup> <https://doi.org/10.1364/OL.500406>

<sup>173</sup> <https://www.toshiba.eu/quantum/news/toshiba-announces-strategic-investment-in-quantum-technology-with-opening-of-cutting-edge-commercial-hub-with-product-development-and-manufacturing-facility-in-the-uk/>

<sup>174</sup> <https://www.toshiba.eu/quantum/news/toshiba-announces-strategic-investment-in-quantum-technology-with-opening-of-cutting-edge-commercial-hub-with-product-development-and-manufacturing-facility-in-the-uk/>

<sup>175</sup> <https://www.kedglobal.com/tech,-media-telecom/newsView/ked202309060009>

<sup>176</sup> [https://wap.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2023/art\\_8d26688ad0aa422eaa5ebba5dceac908.html](https://wap.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2023/art_8d26688ad0aa422eaa5ebba5dceac908.html)

<sup>177</sup> <https://www.cesi.cn/202311/9584.html>

步构建，相关标准研制取得阶段性成果。2023 年，国际与国内标准化组织发布了 ISO/IEC 23837-1/2《QKD 安全要求与测试评估方法》、GS QKD 016《QKD 模块安全评估保护框架（PP）》、GB/T 42829-2023《量子保密通信应用基本要求》、YD/T 4303-2023《基于 IPSec 协议的量子保密通信应用设备技术规范》、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》、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》、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）》等一系列标准。

总体而言，量子保密通信在网络建设、产品研发、标准化研究等方面持续推进，已取得诸多进展，但仍有较大提升空间并面临诸多瓶颈挑战，未来需要持续提升。

### **（三）量子测量产业链基本形成，大规模商用仍存挑战**

随着量子测量技术逐步成熟，越来越多样机走出实验室，迈向产品化，各技术方向的发展成熟度有较大差异，代表性的成熟商用产品包含原子钟、原子重力仪等，处于工程化研发和应用探索样机阶段的产品主要包含量子磁力计、光量子雷达和量子陀螺等，处于系统技术攻关的原型机主要包括量子关联成像、里德堡原子天线等。近年来，

不仅在国内外涌现出大量相关初创企业，传统测量技术公司也在量子测量领域积极布局研发新产品并探索商业模式，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 5 所示。



图 5 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包含系统研发所需的基础材料、元器件和支撑系统提供商。目前量子测量技术路线多元，所需上游材料、器件存在较大差异，上游产业的整合和优化面临一定挑战。国内外对比来看，量子测量上游厂商在欧美集中度较高。未来供应链发展需要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。

量子测量产业链中游包含各类技术方向的系统设备提供商。目前商业化的量子精密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。冷原子钟产业化程度较低，热原

子钟成熟度和商业化成熟度最高，其中芯片级的热原子钟逐步实现工程化样机向商用产品的迭代演进。分子钟具备千秒稳  $1\text{E}-11\sim 1\text{E}-13$  量级、纯电学元件驱动、无需光学器件和恒温加热系统、磁场不敏感、易芯片化等优势，未来应用前景可期。量子重力仪目前已实现集成化、可移动、自动化控制。量子磁力计近年来商业化成熟度方面正在快速提升。量子雷达中，基于单光子探测的光量子雷达已经实现商用，而基于量子纠缠、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仍处于原理验证阶段，光量子雷达应用前景广阔，市场驱动力较大。其他量子测量产品的成熟度仍待提升。

量子测量产业下游涉及基础科研、国防军工、工业制造、生物医疗、能源开发、环境监测、资源勘探等行业领域，应用前景广阔。当前量子测量产品已经成为传统传感测量领域的重要补充方案，未来随着样机产品性能指标、工程化水平和体积成本的提升，有望成为超越现有传感测量方案的下一代技术演进方向。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。

## 六、未来趋势展望

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。

量子计算领域，超导、离子阱、光量子、硅半导体、中性原子、金刚石色心、拓扑等多条技术路线并行发展，超导路线在比特数量和保真度等指标持续稳步提升，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、保真度和纠错等方面提升迅速，有望成为技术路线竞争中的后起之秀。基于量子纠错实现更高质量的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。量子计算软件和云平台成为创新的重要发力点，但技术和应用成熟度有待提升。量子计算应用场景探索广泛开展，目前主要处于算法研究和可行性验证阶段，未来将在提升硬件性能的基础上进一步探索更多的应用场景。随着量子计算企业数量的增长，上中下游产业生态初步形成，产业生态逐步构建。

量子通信领域，QKD 实验系统的极限传输距离和密钥成码率指标持续提升。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、量子存储中继等方向取得诸多进展。多国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。随着通信运营商的加入，量子保密通信应用方案不断丰富，场景探索持续拓展。NIST 发布首批三项 PQC 算法标准草案，逐渐拉开了公钥密码体系升级迁移和产业化发展的序幕，但大规模应用推广仍任重道远。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。

量子测量领域，基于量子纠缠和压缩态等方案的量子增强测量，成为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，已成为全球主要科技国家在量子测量领域的关注重点。基于单光子探测、量子关联成像和光子量子雷达等的量子探测成像技术，助力实现高精度目标识别。金刚石 NV 色心磁场测量和单光子探测成像等技术在环境监测、生物医疗、能源等领域极具应用前景。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。



量子信息网络产业联盟  
联系电话：010-62300592  
邮箱：qia@caict.ac.cn