



行业洞察 | 量子信息

## 三大领域持续演进，未来可期

文：路金娣

“以量子计算、量子通信和量子精密测量为代表的量子信息技术是挑战人类调控微观世界能力极限的世纪系统工程，是对传统技术体系产生冲击、进行重构的重大颠覆性创新，将引领新一轮科技革命和产业变革方向。量子信息既是量子科技重要组成部分，也是培育未来产业、构建新质生产力、推动高质量发展的重要方向之一。经过四十余年发展，量子信息领域进入科技攻关、工程研发、应用探索和产业培育一体化推进发展关键期。

目前，量子信息技术已经成为大国间开展科技、经济、军事等领域竞争，维护技术主权与发展主动权的战略制高点。30余个国家/地区发布或更新量子信息领域发展战略，不完全统计总投资超过350亿美元，国际竞争日趋激烈。与此同时，量子信息领域建设科技力量、加快技术攻关、打造基础设施、推动应用探索、培育生态体系、培养人才梯队，已成为各国发展规划共识。

## 现状 | 量子信息领域进入一体化推进发展关键期

近年来，量子信息三大领域科技创新与应用成果不断涌现，企业数量和市场投融资增长迅速，量子计算明星企业成为市场追捧对象，突破量子纠错能力是未来竞争焦点，量子计算与人工智能的融合创新与双向赋能成为关注热点，量子保密通信在电信运营商和行业专网等推动应用探索，抗量子加密算法标准研制与升级迁移渐成趋势，量子精密测量在能源电力、生物医药等领域加快应用落地。

我国高度重视量子信息技术发展与应用，加快推动科技创新和产业创新深度融合，在政策布局、科研攻关、产品研发、应用示范和产业生态培育等方面，取得了一系列重要进展和成果。一是多地加快先行先试。安徽、北京、粤港澳、湖北、上海等地在量子信息领域开展先行先试布局；二是科

技力量初具规模。合肥国家实验室、粤港澳大湾区量子科学中心、北京量子院等新型研发机构成为我国量子信息领域的战略科技力量代表；三是科研两点成果频现。“祖冲之号”、“九章”、“天元”、“量子号”等，整体水平处于全球第一梯队；四是产业生态培育步伐加快。大型央企、科技领军企业等投入力度持续加强，产业联盟推动生态建设，为培育未来产业奠定良好基础。



## ● 现状1：量子计算多种技术路线并行发展，尚未实现“杀手级”应用

量子计算作为业界关注度最高和竞争态势最激烈的量子信息方向，当前，已实现多种技术路线并行发展，科研探索与原型机研发进展迅速，处于技术攻关快速推进、应用探索蓄势待发的发展加速期。

具体而言，硬件存在超导、离子阱、中性原子、光量子、硅半导体、拓扑等多种技术路线并行发展，尚未实现收敛。近年来，样机比特数、逻辑门保真度等性能指标迅速提升，但仍有诸多科学问题和工程难题有待突破。超导、离子阱路线是各方重点关注的“种子选手”，中性原子、拓扑路线近期发

展迅速，有望成为“黑马”。基于量子纠缠实现长相干时间、高保真度逻辑量子比特，是下一步量子计算技术攻关的重点里程碑。

量子计算应用探索在金融、化工、电信、交通等领域广泛开展，但主要是原理概念和应用可行性验证，尚未实现实用化落地。实现“杀手级”应用，需要突破量子优越性、案例实用性、硬件可实现性的”不可能三角“。未来3-5年，可能在组合优化、化学模拟等领域问题空间维度较小，运算精度不高场景中，产生有实用化价值的计算加速应用。

## ● 现状2：量子保密通信科研多方向探索，抗量子加密迁移成为共识

量子通信是基于量子叠加与纠缠等效应，在经典信道辅助下实现密钥分发或量子信息传输的新型通信方式。基于通信密钥分发的量子保密通信作为量子通信领域进入实用化的技术方向，在新型协议研究、安全性证明、系统实验探索，现网试验验证等方面的科研持续。在星地实验、网络建设、项目投资等方面我国处于领先。

多种协议类型的QKD系统在国内外已经实现商用，初步形成产业链，但产品技术工程化水平有待提升，量子加密应用场景、市场规模和产业化前景较为有限，未来需进一步提升产品性能指标和工程化水平，探索拓展有效应用场景。

量子信息网络的目标是实现量子信息系统的互联组网，进一步提升量子计算机运算处理能力和量子传感器测量精度和灵敏度，

是量子计算、量子通信和量子精密测量三大领域未来融合发展演进方向。量子信息网络当前主要处于技术方案探索和试验验证阶段，实现实用化需要突破高性能量子纠缠光源、实用化量子存储等瓶颈。近年来，国内外量子信息网络科研保持高度活跃，在项目规划、协议方案、核心器件和组网实验等方面取得诸多进展和成果，部分性能指标得到提升。

抗量子加密通过升级底层数学难题，设计新型加密算法，抵抗量子计算破解攻击，已成为应对量子计算信息安全威胁的主流方案和全球共识。其中，我国为应对量子计算威胁，启动PQC算法征集，推动新一代商用密码算法标准制定。

### ● 现状3：量子精密测量技术路线多、应用范围广，创新应用不断拓展

据信通院发布的《量子信息技术发展与应用研究报告(2025 年)》显示，量子精密测量呈现出技术路线多、应用范围广的显著特点，通过对微观粒子系统中量子态制备、调控与观测，开发和运用量子叠加、量子纠缠、量子非经典关联等独特量子物理现象，实现对多种物理量更精准、更稳定、可溯源的测量与传感，测量精度、灵敏度和分辨率等核心指标相比传统技术显著提升。量子精密测量的技术路线或测量“探针”可分为原子、离子、固态自旋、超导、光子等，测量物理量可包括时间频率、磁场、重力、角速度、电场、温度、应力应变、位移/相位等。

量子精密测量技术具有军民两用特性，例如时间频率、电磁场、重力场等关键信息测量，以及目标探测识别和自主惯性导航等核心能力，对于高价值目标探测、战场态势

感知和运载平台测控等方面具有重要价值。高精度重力测量和磁场测量等技术，将在深部资源勘探和心脑血管疾病诊断与治疗等领域带来深刻变革。

量子精密测量技术的创新应用也在不断拓展，为未来发展开辟新道路。原子钟凭借高精度的数据和解决方案，有望在卫星导航、航天、通信、金融科技等领域实现大规模应用。此外，量子时频基准、磁力计、重力仪等逐步走向商用化，实现产品迭代。量子惯导和目标识别等处于技术萌芽期，距离产品化较远。

目前，量子精密测量产业链与生态已具雏形，相关企业数量近150家，但大规模商业化应用还需突破技术成熟度、成本、场景拓展与市场接受度等瓶颈。

## 挑战 | 规模化实用化落地，仍需突破多重瓶颈

当前，量子信息在硬件研发、纠错技术、通信应用、算法软件、安全伦理及产业生态等方面仍存在诸多瓶颈，制约其规模化、实用化落地。

### ● 挑战1：核心硬件面临规模化与稳定性双重制约

量子硬件是量子信息发展的基石，当前面临退相干、可扩展性、极端环境适配三大核心难题。具体而言，退相干与噪声干扰方面，量子比特的相干性是量子计算的核心前

提，但量子比特极易受温度、电磁辐射、振动等环境因素干扰，相干时间普遍较短，超导量子比特相干时间多处于微秒级。



此外，实用化量子计算需百万级量子比特支撑，而当前全球最高水平仅突破千比特规模。随着量子比特数量增加，比特间串扰问题凸显，制冷系统、控制电路的复杂度呈指数级上升，硬件成本与能耗随之飙升。此外，超导、离子阱、量子点等主流技术路线各有局限，超导体系依赖极低温环境，离子

阱扩展性较弱，光子量子比特源效率不足，缺乏通用化、低成本的规模化方案。

量子硬件对制造工艺精度要求极高。同时，不同技术路线均需配套特殊控制设备，如超导量子计算机需液氦制冷至接近绝对零度，设备体积庞大、维护成本高昂，限制其商业化普及。

## ● 挑战2：量子通信在传输与产业化方面仍存短板

量子通信凭借其无条件安全性在保密通信领域具有独特优势，但在远距离传输、速率提升、商业化落地等方面仍存在显著短板。

远距离传输技术受限。光纤传输中光子损耗随距离增加呈指数增长，导致量子密钥分发（QKD）的有效传输距离受限。量子中继技术作为突破传输距离的核心手段，目前仍处于实验室研发阶段，尚未实现工程化应用，无法支撑广域量子通信网络的构建。

速率与成本制约产业化。当前QKD系统的实际密钥生成速率较低，难以满足大规模数据加密的需求。同时，量子通信核心器件成本高昂，设备标准化、模块化程度不足，不同厂商设备间互操作性差，制约其在金融、政务等领域的规模化部署。

器件安全漏洞风险。实际应用中，量子通信设备的光源、探测器等器件存在非理想特性，可能被攻击者利用形成安全漏洞，对量子通信的无条件安全性构成挑战。

## ● 挑战3：技术发展的规范缺失带来安全与伦理挑战

量子信息技术在重塑信息安全格局的同时，也带来安全威胁与伦理挑战。在安全领域，量子计算的超强算力对现有RSA、ECC等基于大数分解和离散对数问题的公钥密码体系构成颠覆性威胁，一旦通用量子计算机实现实用化，将导致大量现有加密数据面临破

解风险。而后量子密码的研发、标准化与全球范围的技术迁移，需要高昂的成本与漫长的周期。在伦理层面，量子信息技术的滥用风险、数据隐私保护、技术垄断等问题尚未形成明确的伦理规范与监管体系，可能引发新的科技伦理争议。

## ● 挑战4：当前产业生态存在诸多系统性障碍

量子信息产业生态的构建涉及产业链、人才、标准等多个维度，当前存在诸多系统性障碍。产业链方面，核心器件如高精度量子探测器、专用制冷设备等依赖进口，上下游产业链协同不足，缺乏自主可控的产业体系。人才方面，量子信息作为交叉学科，需

要兼具量子物理、计算机科学、微电子等多领域知识的复合型人才，当前全球范围内此类人才缺口巨大。标准方面，量子比特性能评测、量子通信安全认证、量子算法兼容性等关键领域的行业标准尚未统一，制约技术迭代与产业协同发展。

## 趋势 | 三大领域技术持续演进，应用场景进一步拓展

### ● 趋势1：量子计算与人工智能交叉融合双向赋能

量子纠错是推动量子计算从实验室走向现实应用的关键支撑，新型编码方案研究和逻辑比特构建实验验证等方面进展迅速，但距离长相干时间、极低错误率的实用化要求仍有差距。量子计算软件技术体系初步形成，测控、编译和应用软件将是未来软件生态发展与竞争和核心。量子计算云平台在国内外快速发展并形成一定服务能力，未来有望成为支撑量子计算实现商业化落地和应用的重要基础设施。

与此同时，《量子信息技术发展与应用研究报告(2025 年)》称，量子计算与人工智能(AI)交叉融合与双向赋能已成为前沿科技领域关注热点。量子计算的并行计算优势将成为AI 时代满足算力爆炸式需求的有效解决方案，而大模型、机器学习等AI 技术则可能为量子计算芯片和纠错编码设计和系统优化等方面提供助力。

## ● 趋势2：PQC+QKD融合加密是未来探索的可能方向

量子通信领域，我国启动 PQC 算法标准化工作，PQC+QKD融合加密是未来探索的可能方向，但推广应用前景仍不明确。量子信息

网络使能组件研发、存储中继方案设计、量子芯片互联、组网试验验证等前沿研究发展迅速，但距离实用化落地仍有很大差距。

## ● 趋势3：量子精密测量与AI融合有望引领技术与行业变革

量子精密测量与 AI 融合有望成为引领技术与行业变革方向，将 AI 用于量子精密测量数据的后处理分析，如噪声抑制、信号提取和测量数据分类等，有望进一步提升性能和应用范围。未来，量子精密测量需进一步提升技术成熟度，突破体积、功耗、成本和任务环境适应性等瓶颈。通过产学研协同推进上游核心硬件标准化与模块化，缓解供应链整合难题。中游同步技术路线梯度化发展，成熟产品持续拓展应用，前沿技术加速工程化突破。

《量子信息技术发展与应用研究报告(2025 年)》强调，未来五到十年将是量子信息领域技术路线竞争、应用转化赋能和产业化培育发展关键期，我国也面临激烈国际竞争和复杂外部环境，发展不进则退、慢进亦退。面对机遇与挑战，需加快推动科技创新和产业创新深度融合，进一步强化基础研究与核心技术攻关，推动重点产品研发与行业应用示范，构建基础设施与公共服务平台，促进产学研用深度协同合作，培育完善产业生态体系。

## 结语

“

当前，量子信息产业已迈入全球科技竞争的战略核心赛道，我国凭借在量子通信领域的工程化优势与量子计算的局部突破，稳居全球第一梯队，千比特级专用量子计算云服务落地、“祖冲之三号”刷新算力纪录等成果，标志着产业正从实验室走向商业化落地的关键阶段。但产业仍面临量子比特退相干与纠错技术瓶颈待破，核心器件成本高企，实用算法稀缺，以及产业链协同不足、复合型人才缺口等系统性挑战。

未来，随着超导、光量子等多技术路线并行发展，量子-经典混合计算、“量子+AI”协同创新成为主流趋势，量子通信提质降本与后量子密码融合应用加速推进，精密测量在多行业的场景化落地持续拓展，产业将在技术攻坚与生态完善中逐步释放颠覆性价值，而产学研深度协同、核心技术自主可控与国际标准共建，将是跨越挑战、抢占产业制高点的关键所在。

”