

量子信息技术发展与应用 研究报告 (2018 年)

中国信息通信研究院
2018年12月

版权声明

本研究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研究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

随着人类对微观粒子系统的观测和调控能力不断突破和提升，利用量子力学中的叠加态和纠缠态等独特物理特性进行信息的采集、处理和传输已经成为可能，量子科技革命的第二次浪潮即将来临。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未来信息通信技术演进和产业升级的关注焦点之一，其研究和应用发展在未来国家科技发展、新兴产业培育和经济建设等诸多领域，也将产生基础共性乃至颠覆性的重大影响。

近年来，量子信息技术发展与应用呈现加速趋势，全球各国普遍关注和重视，我国对于量子信息技术和产业发展的重视程度也进一步提高。2018年5月28日，习近平总书记在两院院士大会上的讲话中指出，“以人工智能、量子信息、移动通信、物联网、区块链为代表的新一代信息技术加速突破应用。”

为推动我国量子信息技术研究与产业应用的健康发展，澄清原理概念、分析问题瓶颈、凝聚发展共识，中国信息通信研究院组织编写了《量子信息技术发展与应用研究报告》（2018年）。本报告深入解读量子信息技术概念原理、关键技术、应用现状、产业发展、问题瓶颈和未来发展趋势，并提出相关策略建议。

目 录

| | |
|----------------------------|----|
| 一、量子信息技术发展背景 | 1 |
| (一) 量子科技革命第二次浪潮即将来临..... | 1 |
| (二) 量子信息技术在全球范围广受重视..... | 2 |
| (三) 量子信息技术概念原理与三大领域..... | 3 |
| 二、量子计算技术与应用进展 | 4 |
| (一) 量子计算技术研究与发展现状..... | 4 |
| (二) 量子计算应用和产业生态发展..... | 6 |
| (三) 我国发展应用面临的问题与挑战..... | 10 |
| 三、量子通信技术与应用进展 | 11 |
| (一) 量子通信技术研究与发展现状..... | 11 |
| (二) 量子保密通信应用和产业进展..... | 17 |
| (三) 我国发展应用面临的问题与挑战..... | 21 |
| 四、量子测量技术与应用进展 | 22 |
| (一) 量子测量概念原理与技术体系..... | 22 |
| (二) 量子测量五大方向研究与发展现状..... | 25 |
| (三) 我国发展应用面临的问题与挑战..... | 30 |
| 五、演进趋势、发展态势与策略建议 | 31 |
| (一) 量子信息技术整体演进趋势..... | 31 |
| (二) 量子信息领域国际发展态势..... | 32 |
| (三) 促进我国量子信息技术发展的策略建议..... | 34 |

一、量子信息技术发展背景

（一）量子科技革命第二次浪潮即将来临

量子是构成物质的基本单元，是不可分割的微观粒子（譬如光子和电子等）的统称。量子力学研究和描述微观世界基本粒子的结构、性质及其相互作用，量子力学与相对论一起构成了现代物理学的两大理论基础，为人类认识和改造自然提供了全新的视角和工具。

上世纪中叶，随着量子力学的蓬勃发展，人类开始认识和掌握微观物质世界的物理规律并加以应用，以现代光学、电子学和凝聚态物理为代表的量子科技革命第一次浪潮兴起。其中诞生了激光器、半导体和原子能等具有划时代意义的重大科技突破，为现代信息社会的形成和发展奠定了基础。受限于对微观物理系统的观测与操控能力不足，这一阶段的主要技术特征是认识和利用微观物理学规律，例如能级跃迁、受激辐射和链式反应，但对于物理介质的观测和操控仍然停留在宏观层面，例如电流、电压和光强。

进入二十一世纪，随着激光原子冷却、单光子探测和单量子系统操控等微观调控技术的突破和发展，以精确观测和调控微观粒子系统，利用叠加态和纠缠态等独特量子力学特性为主要技术特征的量子科技革命第二次浪潮即将来临。量子科技的革命性发展，将极大的改变和提升人类获取、传输和处理信息的方式和能力，为未来信息社会的演进和发展提供强劲动力。量子科技与通信、计算和传感测量等信息学科相融合，形成全新的量子信息技术领域。

（二）量子信息技术在全球范围广受重视

近年来，全球多国加快量子信息技术研究与应用布局，推动技术研究和应用发展。日本文部科学省 2013 年成立量子信息和通信研究促进会以及量子科学技术研究开发机构，计划未来十年内投资 400 亿日元，支持量子通信和量子信息领域的研发。英国 2014 年设立“国家量子技术计划”，投资 2.7 亿英镑建立量子通信、传感、成像和计算四大研发中心，开展学术与应用研究。欧盟 2016 年推出“量子宣言”旗舰计划，在未来十年投资 10 亿欧元，支持量子计算、通信、模拟和传感四大领域的研究和应用推广，并在 2018 年 11 月正式启动首批 20 个研究项目。

美国近十年来，已通过“量子信息科学和技术发展规划”等项目，以每年约 2 亿美元的投入力度，持续支持量子信息各领域研究。在全球量子信息技术加快发展的背景下，美国进一步加大投入，在 2018 年 6 月推出《国家量子行动计划(NQI)》法案，计划在 2019 年至 2023 年的第一阶段，在原有基础上每年新增 2.55 亿美元投资，共计 12.75 亿美元，加快推动量子信息技术研发与应用。2018 年 9 月美国白宫发布《量子信息科学国家战略概述》，总结量子信息科学带来的挑战和机遇，并分析美国在该领域维持和扩大领先优势的措施。

我国持续支持量子信息技术领域的研究探索，近年来重视和支持力度进一步加大。2018 年 5 月 28 日，习近平总书记在两院院士大会上的讲话中指出，“以人工智能、量子信息、移动通信、物联网、区块链为代表的新一代信息技术加速突破应用。”自然科学基金、“863”

计划、“973”计划和中科院战略先导专项等国家科技项目，在过去十余年来，对量子信息领域的基础科研和前沿应用研究进行了大量布局和投入。自 2016 年起，我国进一步设立国家重点研发计划“量子调控与量子信息”重点专项，支持量子信息重点技术领域研究。2018 年进一步研究筹建国家级实验室和论证设立新科技项目，继续加强量子信息领域的支持力度和顶层布局规划。

（三）量子信息技术概念原理与三大领域

量子信息技术通过对光子、电子和冷原子等微观粒子系统及其量子态进行精确的人工调控和观测，借助量子叠加和量子纠缠等独特物理现象，以经典理论无法实现的方式获取、传输和处理信息。量子信息主要包括量子计算、量子通信和量子测量三大技术领域。

量子计算以量子比特为基本单元，通过量子态的受控演化实现数据的存储计算，具有经典计算无法比拟的巨大信息携带和超强并行处理能力。量子计算技术所带来的算力飞跃，有可能成为未来科技加速演进的“催化剂”，一旦取得突破，将在基础科研、新型材料与医药研发、信息安全与人工智能等经济社会的诸多领域产生颠覆性影响，其发展与应用对国家科技发展和产业转型升级具有重要促进作用。

量子通信利用微观粒子的量子叠加态或量子纠缠效应等进行信息或密钥传输，基于量子力学原理保证信息或密钥传输安全性，主要分量子隐形传态和量子密钥分发两类。量子通信和量子信息网络的研究和发展，将对信息安全和通信网络等领域产生重大变革和影响，成为未来信息通信行业的科技发展和技术演进的关注焦点之一。

量子测量基于微观粒子系统及其量子态的精密测量，完成被测系统物理量的执行变换和信息输出，在测量精度、灵敏度和稳定性等方面比传统测量技术有明显优势。量子测量主要包括时间基准、惯性测量、重力测量、磁场测量和目标识别五个方向，应用涵盖基础科研、空间探测、生物医药、惯性制导、地质勘测、灾害预防等领域。

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未来科技创新发展的重要突破口和触发器，也是信息通信技术演进和产业升级的关注焦点之一。量子信息技术研究和应用发展在未来国家科技发展、新兴产业培育和经济建设等诸多领域，将产生基础共性乃至颠覆性重大影响。

二、量子计算技术与应用进展

（一）量子计算技术研究与发展现状

1.量子计算带来算力飞跃，具有攻克无解难题潜力

计算能力是信息化发展的核心，随着社会经济对信息处理需求的不断提高，以半导体大规模集成电路为基础的经典计算性能提升或将面临瓶颈。量子计算是基于量子力学的新型计算方式，利用量子叠加和纠缠等物理特性，以微观粒子构成的量子比特为基本单元，通过量子态的受控演化实现计算处理。随着量子比特数量增加，量子计算算力可呈指数级规模拓展，理论上具有经典计算无法比拟的巨大信息携带和超强并行处理能力、以及攻克经典计算无解难题的巨大潜力。

2.量子计算处于技术验证和原理样机研制关键阶段

量子计算基础理论创立于上世纪八十年代，技术研究、实验验证与样机研发的发展历程如图 1 所示。



来源：中国信息通信研究院根据文献及公开信息整理

图 1 量子计算技术发展历程

量子计算包含处理器、编码和软件算法等关键技术，近年来发展加速，但仍面临量子比特数量少、相干时间短、出错率高等诸多挑战，目前处于技术研究和原理样机研制验证的关键阶段，超越经典计算的性能优势尚未得到充分证明。

量子处理器有超导、离子阱、半导体、中性原子、光量子、金刚石色心和拓扑等多种技术路线，现阶段超导和离子阱路线相对领先，但尚无任何一种路线能够完全满足实用化要求并趋向技术收敛。量子系统非常脆弱，极易受材料杂质、环境温度等外界因素影响而引发退相干效应，使计算准确性受到影响，甚至计算能力遭到破坏。量子编码是解决量子退相干难题、将多个脆弱的“物理比特”构造成能够纠错和容错的“逻辑比特”的关键使能技术。现有量子纠错编码存在阈值高、效率低的问题，尚未突破实现第一个“逻辑比特”。算法和软件是硬件处理器充分发挥计算能力和解决实际问题的神经中枢。量子计算相比

于经典计算的加速能力与量子算法息息相关，例如 Shor 和 Grover 算法在密码破译和数据搜索问题上可分别实现指数级和平方根级加速。然而量子算法的开发需紧密结合量子叠加、纠缠等物理特性，不能直接移植经典算法。目前量子计算算法的数量有限，只在部分经典计算难以解决的复杂问题上存在潜在优势，并非普适于解决所有问题。

3. 专用机可能率先突破，量子计算与经典计算并存

量子计算机可分为通用机和专用机两类，通用量子计算机需要上百万甚至更多物理比特，具备容错计算能力，需要量子算法和软件的支撑，其实用化是长期渐进过程。专用量子计算机用于解决某些经典计算难以处理的特定问题，只需相对少量物理比特和特定算法，实现相对容易且存在巨大市场需求。业内专家预测，未来五年左右，美国有可能在模拟、优化等领域的专用量子计算方面率先取得突破。

在与经典计算的比较和发展定位方面，量子计算目前只在部分经典计算不能或难以解决的问题上具备理论优势，且尚未得到充分证明，并非在所有问题的解决上都优于经典计算。此外，量子计算机的复杂操控仍需要经典计算机辅助，在未来相当长时间内，量子计算都无法完全取代经典计算，两者将长期并跑、相辅相成。有业内专家表示，量子计算未来或可能成为辅助经典计算的特殊处理器，专注于解决某些特定计算问题。

（二）量子计算应用和产业生态发展

1. 美国综合实力全球领跑，欧、日、澳等国紧密跟随

美国大力投入量子计算领域，取得系列重要成果并建立领先优势。科研领域顶尖人才聚集，加州大学、马里兰大学、哈佛大学和耶鲁大学等研究机构取得大量原创开拓性成果。谷歌、IBM、英特尔和微软等科技巨头近年来大举进军量子计算领域，发展模式如图 2 所示。



来源：中国信息通信研究院根据文献及公开信息整理

图 2 美欧领先国家量子计算发展模式

美国已形成政府、科研机构、产业和投资力量多方协同的良好局面。Rigetti computing、IonQ 和 Qubitek 等初创公司极具创新活力，涵盖芯片、硬件、软件和云平台等多个领域。2013 年谷歌联合美国国家航空航天局成立人工智能实验室，与 D-Wave 合作开展量子退火模拟专用机研究；2014 年谷歌与美国加州大学圣塔芭芭拉分校顶尖科研团队合作，共同进行通用量子计算机研发；2017 年谷歌与创业公司 Rigetti Computing 合作推出开源量子计算软件平台。荷兰代尔夫特理工大学和应用科学研究组联合成立的 QUTech 研究所在超导、半导体硅量子点和拓扑路线均有布局，并与英特尔、微软等紧密合作。英国、奥地利在离子阱量子计算领域均有布局。澳大利亚集中研究半导体量子计算技术路线。此外，美欧日澳等国家通过联合研究和成果

共享，形成并不断强化的联盟优势。

2. 产业巨头开展全球合作，推动技术与应用加速发展

目前，量子计算技术的研究与应用探索广受重视，成为新兴技术领域热点，并已经初具产业生态，如图 3 所示。



来源：中国信息通信研究院根据文献及公开信息整理

图 3 量子计算初具产业生态

谷歌、IBM、英特尔和微软等科技巨头已成为推动量子计算原理样机研发加速发展的重要力量。从技术路线来看，谷歌和 IBM 致力于超导体系统，Intel 同时涉猎硅半导体和超导体系统，微软布局全新的拓扑路线。从发展模式来看，几大巨头在全球范围内联动优势资源展开广泛合作。英特尔与荷兰 QuTech 研究所、德国马普量子光学中心、美国国家标准技术研究院等研究机构联合推进硅半导体量子计算。微软与荷兰 QuTech 研究所、丹麦玻尔研究所等合作研究拓扑量子计算。IBM 对金融、汽车、电子、材料等不同应用领域的全球合作伙伴开放量子计算云平台，推动产业应用，量子计算初具产业生态。

从研究成果来看，Google、IBM 等产业巨头加入超导量子比特技术研究后，量子比特数量迭代速度明显加快，尤其近三年由 9 位拓展

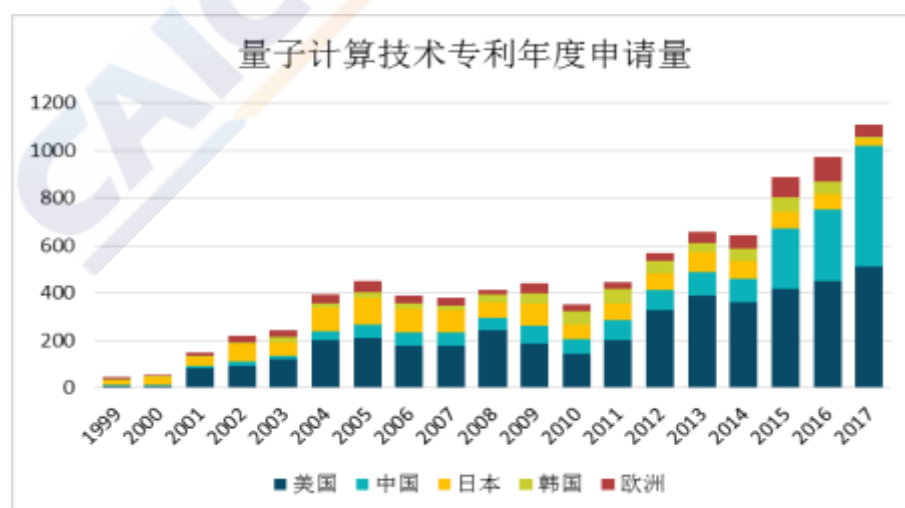
至 72 位，实现了 8 倍迅速提升，如图 4 所示。尽管几家公司在量子比特数量的成果中未披露全部技术细节，引发一定争议，但不可否认的是量子计算近年来在科技巨头的推动下发展速度十分迅速。



来源：中国信息通信研究院根据文献及公开信息整理

图 4 量子计算物理比特位数发展趋势

从专利申请量来看，如图 5 所示，量子计算 2000 年之前专利量较少，2001-2011 年期间专利量开始出现增长，近年来进入快速增长期。全球专利申请主要来自美、中、日、韩、欧等国，中国受理的专利申请数量近年来快速增长，一方面是由于国内高校和科研单位越来越重视知识产权，另一方面也源于国外公司的在华专利布局。



来源：中国信息通信研究院知识产权中心

图 5 量子计算技术专利申请情况

3.我国近年来研究发展较快，与欧、美尚有一定差距

我国量子计算以科研机构为主，在量子计算基础理论、物理实现体系、软件算法等领域均有研究布局，中国科学技术大学、清华大学、浙江大学等研究机构近年来取得一系列具有国际先进水平的研究成果，为我国量子计算发展奠定了坚实基础。从各国高水平 SCI 论文总量和热点论文来看，美国位列第一，我国、德国分列第二和第三位；在被引次数方面，我国紧随美国、德国和英国之后。在代表性研究成果方面，中科大、浙江大学等联合实现了 11 位超导量子比特纠缠，中科大分别实现了光量子体系 18 比特纠缠和半导体体系 3 比特逻辑门，清华大学实现了相干时间最长的离子阱体系量子储存。阿里巴巴、腾讯、百度和华为等科技公司开始关注和投资量子计算领域，阿里与中科大联合发布量子计算云平台，华为宣布了由量子计算模拟器和编程框架组成的云平台，但总体而言进入较晚、参与度有限，在产品工程化及应用推动方面与美国科技巨头存在明显差距。国内首家量子计算初创企业合肥本源量子 2017 年成立，为研究和应用注入了新动力。我国在量子计算领域虽已取得一定成绩，但在关键技术指标、重大创新成果、发展模式与体制、产业基础与应用、人才引进和培养等方面仍存在一些不容忽视的问题与挑战，与美国存在较大差距。

（三）我国发展应用面临的问题与挑战

1. 关键技术尚未突破，算力优势仍待证明

量子计算技术研究与应用仍处于发展早期阶段，大规模量子比特物理实现、量子纠错编码、量子算法软件等关键技术仍处于艰难的研

究拓展阶段。量子系统脆弱性对计算准确度影响较大，现有系统的相干时间、量子比特数量和操控精度不足以运行已有的高级量子算法，其超越经典计算的计算能力优势尚未得到充分证明。

2. 发展模式仍在摸索，多方尚未形成合力

我国量子计算研发由研究机构主导，科技企业进入晚、参与度有限，初创企业仅有一家。科研体制较难适应量子计算领域快速变化的新情况，在产品工程化及应用推动方面与美国科技巨头主导存在差距。产学研用各方力量分散，结合不紧密，缺乏美国政府、科技企业、科研机构、产业界和投资力量多方协同的发展模式。

3. 产业基础存在短板，有受制于人的风险

量子计算属于交叉学科，需要量子物理、应用数学、计算机科学等多种专业的协同配合，我国在跨学科合作方面存在体制机制壁垒，效率有限。量子计算机研制属于巨型系统工程，涉及众多产业基础和工程实现环节，我国在高品质材料样品、工艺结构、制冷设备和测控系统等领域仍落后于领先国家，存在关键环节受制于人的风险。

三、量子通信技术与应用进展

（一）量子通信技术研究与发展现状

量子通信与现有通信技术不同，可以实现量子态信息的传输，主要分量子隐形传态（Quantum Teleportation，简称 QT）和量子密钥分发（Quantum Key Distribution，简称 QKD）两类。QT 基于通信双方的光子纠缠对分发（信道建立）、贝尔态测量（信息调制）和幺正变换（信息解调）实现量子态信息直接传输，其中量子态信息解调需要

借助传统通信辅助才能完成。QKD 通过对单光子或光场正则分量的量子态制备、传输和测量，首先在收发双方实现无法被窃听的安全密钥共享，之后再与传统保密通信技术相结合完成经典信息的加解密和安全传输。基于 QKD 的保密通信称为量子保密通信。量子通信技术研究与应用发展历程如图 6 所示。



来源：中国信息通信研究院根据文献及公开信息整理

图 6 量子通信技术的发展历程

1.量子隐形传态处于前沿研究阶段，实用化尚有距离

二十世纪上半叶，量子力学理论的创立和发展，以及量子叠加、量子纠缠和非定域性等概念的提出和讨论为量子通信奠定理论基础。1982 年，法国科学家首次实验观测到光子系统中的量子纠缠现象，奥地利维也纳大学在 1997 年完成首个室内自由空间 QT 实验，2012 年报道 143 公里自由空间最远距离 QT 实验。2015 年，日本 NTT 公司报道了 102 公里超低损光纤最远距离 QT 实验。我国中科大、中科院和清华大学等单位，自 2005 年起在北京八达岭和青海湖等地，陆续开展了系列自由空间 QT 实验。2015 年完成首个自由空间单光子偏振态和轨道角动量双自由度 QT 实验，2017 年基于墨子号量子科学实

验卫星，实现迄今为止最远距离的 1400 公里星地 QT 传输。

现阶段各类 QT 实验报道仍局限于证明原理可行性和观测实验现象，基于 QT 的量子通信距离实用化仍有一定距离。QT 中的纠缠光源目前通常采用激光器和非线性晶体组合制备，纠缠光子对生成属于基于测量验证的后验概率过程，生成效率和应用场景受限，高品质确定性纠缠光源的实用化前景仍不明朗。此外，纠缠光子对在分发传输过程中，极易受到环境噪声和量子噪声的影响而产生消相干效应，量子纠缠特性难以保持。采用基于量子态存储和纠缠交换技术的量子中继，可以克服量子纠缠分发过程中的消相干问题，延长传输距离。但是，目前量子态存储各种技术方案，如气态冷原子系综、稀土离子掺杂晶体和 QED 腔原子囚禁等，在存储时间、保真度、存储容量和效率等方面各有优缺点，但尚无一种技术方案能够同时满足全部指标的实用化要求，量子存储和量子中继技术仍有待研究突破。

基于 QT 的量子通信和量子互联网仍将是未来量子信息技术领域的前沿研究热点。美国 NQI 法案将基于 QT 的安全通信，以及通过量子互联网实现量子计算机的大规模互联与信息通信列为四大应用领域之一。欧洲“量子宣言”旗舰计划在首批项目中，成立量子因特网联盟（QIA），支持荷兰 Delft 技术大学等研究机构，进行量子通信终端和量子中继器研发，并计划 2020 年在荷兰四个城市间，建立首个支持量子比特传输和组网的量子通信实验网。

2.量子密钥分发进入产业化初级阶段，仍有技术瓶颈

1984 年美国 IBM 科学家提出了首个实用化量子密钥分发 BB84

协议，使 QKD 技术研究从理论探索走向现实。2005 年中国科学家提出多强度诱骗态调制方案，解决了 QKD 弱相干脉冲光源的多光子安全漏洞，为 QKD 的实用化打开了大门。2003 年开始，世界各国逐步开展了 QKD 试点应用和实验网建设，产生了一批由科研机构转化的初创型企业。经过三十余年发展，QKD 从理论协议到器件系统初步成熟，目前已进入产业化应用的初级阶段。

QKD 协议根据量子态信息编码方式不同，可以分为针对单光子调制的离散变量(DV)协议和针对光场正则分量调制的连续变量(CV)协议。DV-QKD 包括 BB84 协议、差分相移(DPS)协议和相干单向(COW)协议等多种方案，其中又以 BB84 协议应用最为成熟，安全性证明更加完备，系统设备商用化水平较高。集成诱骗态调制的 BB84-QKD 设备根据单光子量子态调制解调方式不同，还可以进一步细分为偏振调制型、相位调制型和时间相位调制型等种类。BB84 协议后处理流程主要包括对基筛选(Sifting)、误码估计(Error estimation)、纠错核对(Error correction)、结果校验(Confirmation)和保密增强(Privacy amplification)五个步骤。其中，误码估计和保密增强是保障 QKD 安全性的核心步骤，纠错校验算法效率是限制 QKD 安全成码率的瓶颈之一。

DV-QKD 系统中的单光子探测器(SPD)是限制安全成码率的另一个主要瓶颈。目前商用 DV-QKD 系统中主要采用雪崩二极管探测器(APD)，探测效率较低(<20%)。新型超导纳米线探测器(SNSPD)光子探测效率很高(~90%)，但要求接近绝对零度(-273℃)的工作

环境，集成化和工程化存在困难。

由于协议算法处理和关键器件性能的限制，QKD 系统传输距离和密钥速率有限，且二者相互制约。实验室条件 DV-QKD 超低损光纤单跨段最远传输距离¹为 421.1 公里（71.9dB 损耗），安全密钥成码率约为 0.25bit/s，使用极低暗记数率（0.1Hz）的 SNSPD。最高密钥成码率²为 11.53Mbit/s，光纤传输距离为 10 公里（2dB 损耗）。

CV-QKD 中的高斯调制相干态（GG02）协议应用广泛，系统采用与经典光通信相同的相干激光器和平衡零差探测器，具有集成度与成本方面的优势，量子态信号检测效率可达 80%，便于和现有光通信系统及网络进行融合部署。主要局限是协议后处理算法复杂度高，长距离高损耗信道下的密钥成码率较低，并且协议安全性证明仍有待进一步完善。CV-QKD 是未来有潜力的发展方向之一。

QKD 城域网中通常采用合分波器或光开关实现量子态光信道和同步光信道的波分复用或光通路切换（时分复用）。由于量子中继技术尚不成熟，目前 QKD 光纤系统长距离传输只能依靠密钥落地、逐跳中继的可信中继技术。可信中继节点的密钥存储管理和中继转发需要满足密码行业标准和管理规范的相关要求，并且站点通常需要满足信息安全等级保护的相关要求或具备相应的安全防护条件。

实际 QKD 系统和器件的非理想特性无法满足协议理论安全性证明的假设要求，QKD 系统漏洞攻击和安全防护是科研领域的热点之一。虽然学术研究性质的漏洞攻击是否会对实际部署 QKD 系统的安

¹ 数据来源：PhysRevLett.121.190502

² 数据来源：JLT.2018.2843136

全性产生现实影响还有待进一步评估与验证，但 QKD 技术研究和设备研发仍有必要进行持续的安全性测试和升级改进。

QKD 技术演进发展方向主要包括增强系统性能，提升现实安全性和提高实用化水平等三个方面。例如采用量子态信息高维编码（HD-QKD）和相位随机双光场（TF-QKD）等新型协议增强系统安全成码率和传输能力；采用新型测量设备无关（MDI-QKD）协议消除探测器相关安全漏洞，提升现实安全性水平；开展 QKD 系统与经典光通信系统的共纤传输和融合组网研究，以及基于光子集成技术的 QKD 器件芯片化研究，进一步提高其实用化水平。

3. 星地量子通信成为未来研究和应用发展方向之一

量子态光信号或光子纠缠对在光纤或自由空间中的传输距离仅为百公里量级，量子中继技术目前尚不成熟。卫星平台具备信道损耗小、覆盖面广、生存性强等优点，已成为大尺度环境下量子通信科学研究和广域组网的较理想平台。星地量子通信属于航天技术、空间光学与量子技术相结合的前沿领域，需要解决卫星捕获跟踪对准（ATP）、信道实时补偿和星地定时同步等一系列工程技术难题，同时还需要克服气象条件影响、全天时运行和高可靠运维等方面的挑战。

2016 年 8 月中科大联合中科院和航天科技集团等多家单位，成功发射了全球首颗量子科学实验卫星“墨子号”。2017 年在《科学》和《自然》杂志报道千公里级星地量子通信的三项前沿研究成果。与其他国家报道的类似项目和实验相比，我国在星地量子通信领域的科学研究与工程水平处于领先，体现出集中力量办大事的制度优势。

“墨子号”属于实验性质卫星，由于工作波长受日光背景噪声影响和自身轨道高度限制，只能晴朗夜间的短时间窗口（数分钟/天）和地面站之间进行量子态信号传输。未来通过采用 1550nm 工作波长结合上转换探测器有望提高检测效率并实现全天时工作，或可进一步探索星地量子通信和量子密钥分发广域组网等相关应用。

（二）量子保密通信应用和产业进展

量子保密通信使用 QKD 提供的密钥并采用对称加密体制实现业务信息的加密传输，系统原理如图 7 所示。QKD 设备结合光开关、波分复用器等传输辅助设备完成量子态光信号物理层传输和点到点 QKD 密钥生成。量子密钥管理设备负责网元管理、密钥管理和基于可信中继的端到端密钥生成。量子加密应用设备，主要包括量子加密 VPN 和量子加密路由器等，使用 QKD 密钥对业务信号进行加密处理和传输接收。量子加密应用设备和传统保密通信设备在加密算法、校验算法、整体功能和性能等方面基本一致，主要区别在于使用 QKD 密钥替换传统保密通信中双方通过协商得到的加密密钥。

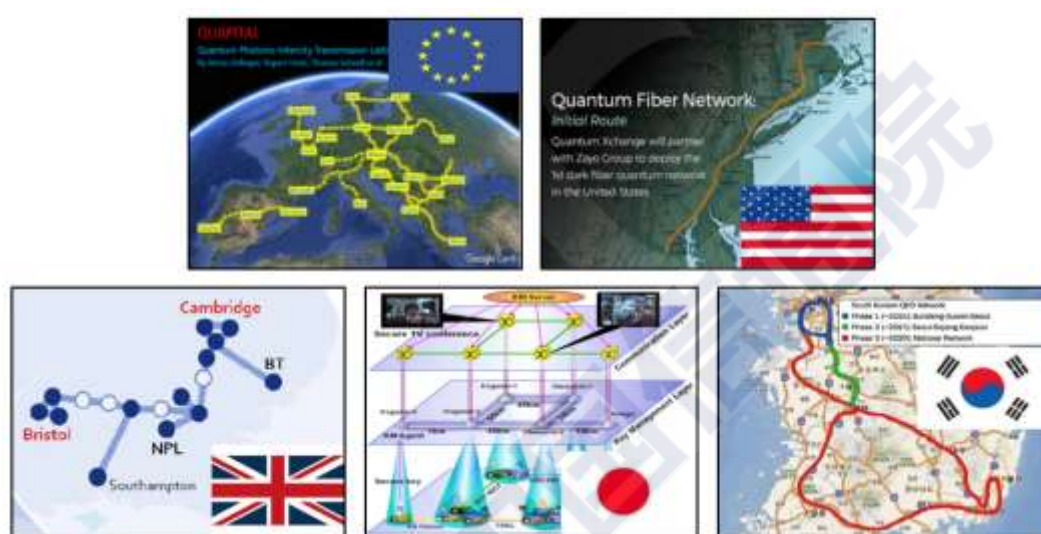


来源：中国信息通信研究院

图 7 量子保密通信系统原理图

1. 全球试点应用逐步开展，我国数量规模处于领先

量子保密通信是量子信息领域中率先进入实用化的技术方向，也是未来提升信息安全保障能力的可选技术方案之一。近年来，量子保密通信试点应用项目和实验网络建设在全球多国逐步开展，主要国家和试点应用项目如图 8 所示。



来源：中国信息通信研究院根据文献及公开信息整理

图 8 全球量子保密通信试点应用与网络建设

2003 年，美国 DARPA 资助哈佛大学建立了世界首个量子保密通信实验网。2008 年开始，欧洲多国通过 SECOQC 和瑞士量子等项目进行了 QKD 组网验证。2010 年，日本与欧洲联合建立东京量子保密通信试验床网络，多家科研机构持续开展现网实验。2015 年，英国启动连接剑桥、布里斯托和南安普顿的量子保密通信测试网络建设，韩国 SKT 宣布规划建设总长约 256 公里的量子保密通信网络。2016 年，欧盟“量子宣言”旗舰计划公布泛欧量子安全互联网规划。2018 年，美国 Quantum XChange 公司公布连接华盛顿特区和波士顿的 800 公里商用 QKD 线路建设计划。

我国面临的信息安全形势复杂，在政务、金融和关键基础设施等领域，提高信息安全保障能力的需求较为紧迫，量子保密通信的试点应用呈现出需求牵引、政策驱动、快速发展的特点，主要试点应用项目和网络建设情况如图 9 所示。目前，我国量子保密通信试点应用项目数量和网络建设规模已处于全球领先。

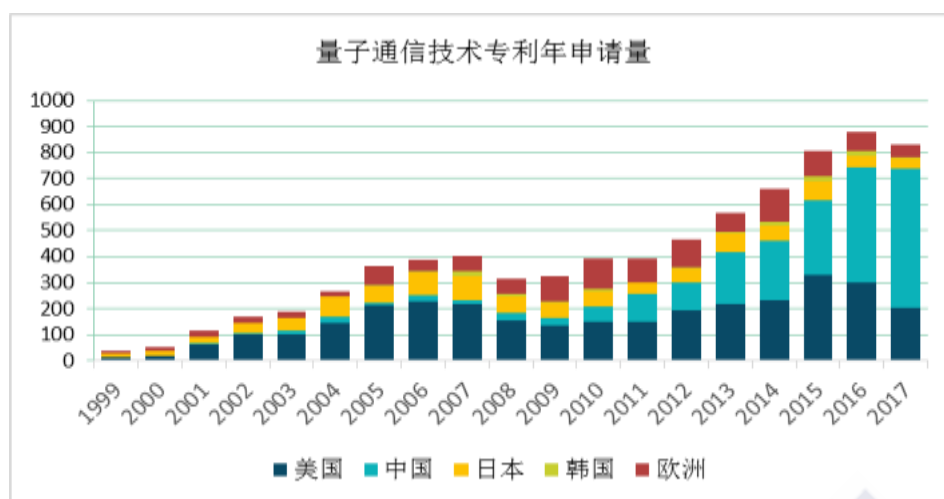


来源：中国信息通信研究院根据文献及公开信息整理

图 9 我国量子保密通信试点应用与网络建设

2016 年 12 月量子保密通信“京沪干线”技术验证与应用示范项目全线贯通，总长超过 2000 公里，接入北京、济南、合肥和上海四地量子保密通信城域网络，采用可信中继方案进行密钥中继。2018 年，国家广域量子保密通信骨干网络建设一期工程开始实施，在“京沪干线”基础上，增加武汉和广州两个骨干节点，新建北京-武汉-广州线路和武汉-合肥-上海线路，并接入若干已有和新建城域网络。

从专利申请量来看，全球量子通信专利申请超过 1.4 万件，近 6000 个专利族，申请主要来自美国、中国、欧洲、日本和韩国，如图 10 所示，中国量子通信技术专利申请近年来增长迅速。



来源：中国信息通信研究院知识产权中心

图 10 量子通信技术专利申请情况

2. 我国量子保密通信产业基本形成并获得初步发展

随着量子保密通信试点应用和网络建设的推进和发展，我国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链，产业总体视图如图 11 所示。



来源：中国信息通信研究院根据文献及公开信息整理

图 11 我国量子保密通信产业总体视图

我国量子保密通信技术研究和应用发展具备良好的实践基础，开展标准化研究的需求和条件较为成熟。2017 年 6 月，中国通信标准

化协会（CCSA）成立了量子通信与信息技术特设任务组（ST7），对量子保密通信技术进行标准化研究，目前正在开展两项国家标准和三项行业标准的研究制定工作。量子保密通信标准规范研究逐步取得实质性进展，将有效引导和支撑量子保密通信产业发展。

随着量子保密通信技术应用和产业的发展，相关技术验证和测评认证的需求也日益明显。2018 年以来，国家电网和国科量子等多家单位委托中国信息通信研究院技术与标准研究所开展了多项量子保密通信技术验证、系统测试和现网测试。通过技术验证与测评工作，对现有设备性能、网络规划建设、产业化发展水平和实用化程度进行分析和评估，同时为促进量子保密通信设备系统和网络的功能、性能和管控运维能力的完善与提升奠定基础。

（三）我国发展应用面临的问题与挑战

1. 量子通信基础研究和关键技术待突破

微观量子态和宏观经典态之间的界限与联系仍未明确，量子叠加、纠缠和测量坍缩等特性目前多为实验验证，缺少完备理论体系。量子隐形传态技术研究仅限于观测和证明其物理现象和基本原理的初级阶段，实用化尚无前景。量子存储和量子中继技术目前尚不成熟，成为量子通信技术发展与应用的关键技术瓶颈之一。

2. QKD 系统性能瓶颈限制其应用推广

商用 QKD 系统在光纤现网中的传输能力和安全成码率有限，并且传输距离和安全密钥速率相互制约，量子保密通信应用场景受限明

显。长距离传输的可信中继节点可能成为安全风险点。实际系统和器件的非理想特性有可能成为被窃听者利用的安全漏洞，需要进行安全性研究和测试，并采取防护措施。

3. 产业化尚处起步阶段，发展动力不足

量子保密通信应用场景较为有限，产业发展对于国家政策扶持依赖性较强，后续商业化应用模式和市场化推广运营有待进一步探索。传统通信和信息安全行业对于量子保密通信产业的参与度较低，产业链的建立和培育较为困难。相关标准研究和制定目前尚属于起步阶段，对网络建设和应用部署的规范和指导作用不足。

四、量子测量技术与应用进展

（一）量子测量概念原理与技术体系

1. 量子测量是未来传感测量技术发展演进必然趋势

量子测量基于量子体系（如原子、光子、离子等）的量子特性或量子现象（如叠加态、纠缠态、相干特性等），通过对其量子态的调控和精确测量，对被测系统的各种物理量执行变换并进行信息输出，量子测量在测量精度、灵敏度和稳定性等方面与传统传感技术相比具有明显优势。测量传感技术历经机电式、光电式两代发展，目前前沿研究已经开始进入量子测量领域。国际计量基准中的七个基本物理量，已经有时间和长度两个实现了完全量子化标定，质量、电流、温度和物质量等物理量的量子化标定研究已经完成，并在 2018 年 11 月的第

26 届国际度量衡大会正式公布使用。

量子测量涉及原子（电子）能级跃迁、冷原子干涉、热原子自旋、电子自旋、核磁共振、单光子探测和纠缠态联合测量等不同的技术方案，可以分为三种类型。第一种是运用量子体系的分离能级结构来测量物理量，例如超导或自旋量子位的磁性或振动状态，中性原子或囚禁离子等。第二种是使用量子相干性，即波状空间或时间叠加状态，来测量物理量。第三种是使用叠加态和纠缠态等量子体系中所独有的物理现象来提高测量的灵敏度或精度，突破经典理论极限。虽然测量原理和技术方案各有不同，但共同特征是调控观测的对象是量子级别的微观粒子系统，采用的分离能级观测方法和相干叠加状态测量等技术符合量子物理学基本原理并与传统测量技术有明显区别，因此国内外普遍认可将具备上述特征的测量传感技术通称为量子测量。

2.量子测量技术体系主要包含五大发展方向

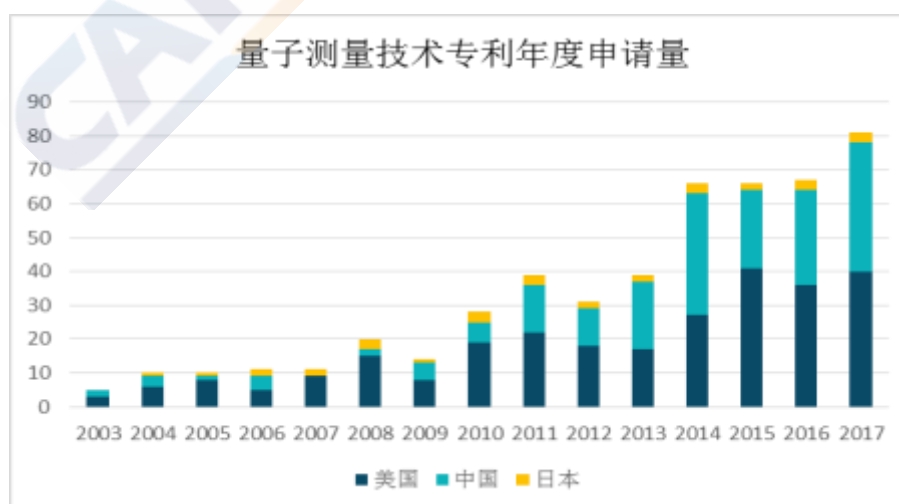
量子测量涵盖电磁场、重力应力、方向旋转、温度压力等物理量，应用范围涉及基础科研、空间探测、材料分析、惯性制导、地质勘测、灾害预防等诸多领域。当前量子测量研究和应用的主要领域及其技术体系如图 12 所示。通过对不同种类量子系统中独特的量子特性进行控制与检测，可以实现量子惯性导航、量子目标识别、量子重力测量、量子磁场测量、量子时间基准等领域的测量传感，未来发展趋势主要是高精度、小型化和高集成度。量子测量技术与传统产业的结合将产生全新技术变革，部分重点领域有望率先推广应用。



来源：中国信息通信研究院

图 12 量子测量领域的技术体系

全球量子测量相关技术专利年申请量的发展与变化情况如图 13 所示，2010 年之后申请量增长较为迅速，从专利申请量来看，相关专利主要来自中美两国，日本有少量申请，截至 2018 年 10 月公开的量子测量相关专利近 800 件。



来源：中国信息通信研究院知识产权中心

图 13 量子测量技术专利年申请量

以量子陀螺仪、量子磁强计、量子重力仪、量子雷达和原子钟为

代表的新型量子测量传感设备，在工业和信息通信领域具有较高应用价值，受到世界各国政府和研究机构重视，解决工程化和实用化等问题后，有望在关系国家安全和国计民生的重点领域率先应用。

（二）量子测量五大方向研究与发展现状

1. 量子测量五大技术方向存在差异，发展程度不一

量子测量领域研究与应用目前主要集中于惯性导航、磁场测量、重力测量、目标识别和时间基准等五大方向。

（1）量子惯性导航

角速度传感器（简称陀螺）是决定惯性导航系统性能的核心器件，广泛应用于飞行器和舰船制导以及自动驾驶等领域。量子陀螺较传统机电式陀螺和光电式陀螺而言，在测量精度和小型化集成前景等方面都具有较大的优势。各类量子陀螺的发展路线如图 14 所示。



来源：中国信通院根据文献和公开信息整理

图 14 量子惯性导航技术发展情况

其中，核磁共振陀螺发展最为成熟，已经进入芯片化产品研发，原子干涉、超流体干涉和金刚石色心陀螺目前还处于原理验证和技术

试验阶段，距离实用化较远。量子陀螺按照精度、体积、稳定性的不同，可以分为民用级、战术级、战略级导航应用，在自动驾驶、无人机、潜艇、导弹等领域有广阔的前景。

（2）量子磁场测量

微弱磁场测量作为研究物质特性、探测未知世界的有效手段，在医学、地球物理、工业检测等都有着广泛的应用。量子磁力仪最高磁场测量灵敏度可达 fT 量级（ 10^{-15} 特斯拉）。高灵敏度量子磁力仪主要有光泵磁力仪和原子 SERF 磁力仪、相干布居囚禁（CPT）磁力计等。各类量子磁力仪的发展路线和情况如图 15 所示。



来源：中国信通院根据文献和公开信息整理

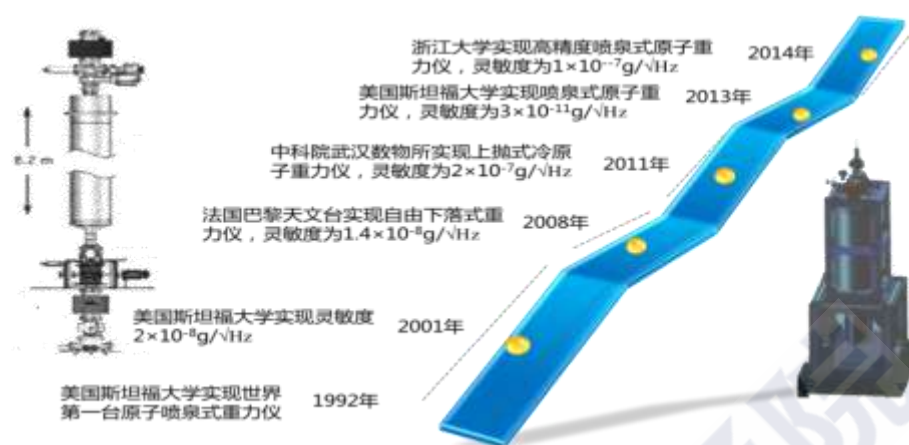
图 15 量子磁场测量技术发展情况

其中，SERF 原子磁力仪具有亚 fT 量级的测量精度，是未来超高精度磁场测量的发展方向，而 CPT 磁力计兼具测量精度和小型化优势，已经开始进入芯片级传感器的研究。

（3）量子重力测量

地球重力场反映物质分布及其随时间和空间的变化。高精度重力加速度测量可以广泛应用于地球物理、资源勘探、地震研究、重力勘

察和惯性导航等领域。冷原子重力仪利用激光冷却、原子干涉等技术实现高精度、高灵敏度重力加速度测量，发展路线如图 16 所示。



来源：中国信通院根据文献和公开信息整理

图 16 量子重力测量技术发展情况

量子重力测量研究分为超高精度和小型化两个方向。大型超高精度喷泉式冷原子重力仪有望应用于验证爱因斯坦广义相对论理论、探测引力波、研究暗物质和暗能量等，成为基础科研的有力工具。小型化下抛式冷原子重力仪有望应用于可移动平台，例如航空重力仪、潜艇重力仪甚至卫星重力仪，目前工程化小型原子重力仪研发还处于起步阶段，设备可靠性和环境适应性等方面还需要进一步提升。

（4）量子目标识别

量子雷达将传统雷达与量子技术相结合，利用电磁波的波粒二象性，通过对电磁场的微观量子态操控实现目标检测和成像，具有提高灵敏度，突破分辨率极限，增强抗干扰能力等优势，量子目标识别技术发展路线如图 17 所示。



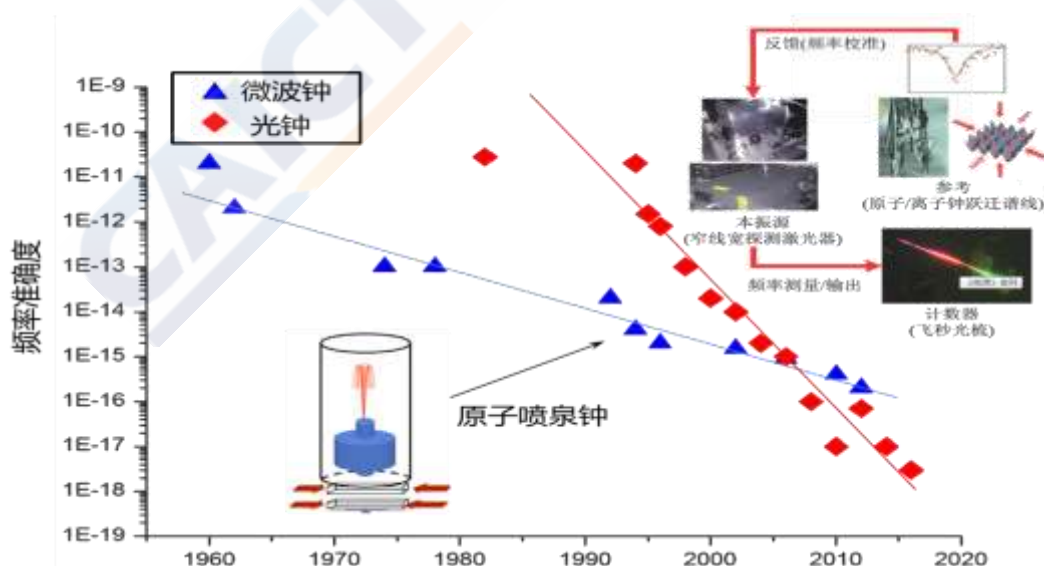
来源：中国信通院根据文献和公开信息整理

图 17 量子目标识别技术发展情况

量子雷达关键技术主要包括非经典信号的调制和非经典信号的检测。非经典信号的调制主要是纠缠源的制备，非经典信号的检测主要包括单光子探测和纠缠检测等。

(5) 量子时间基准

量子时间基准利用原子能级跃迁谱线的稳定频率作为参考，通过频率综合和反馈电路来锁定晶体振荡器的频率，从而得到准确而稳定的频率输出，量子时间基准发展状况如图 18 所示。



来源：中国信通院根据文献和公开信息整理

图 18 量子时间基准技术发展情况

高精度与小型化是量子时间基准两大发展趋势。高精度量子时间

基准可用于协调世界时（UTC）的产生。小型化高可靠性的量子时间基准可以用作星载钟，在卫星导航和定位等领域发挥重要作用。

2. 欧美等国仍处于领先，我国近年来逐步缩小差距

目前量子传感测量领域的世界记录大多是由欧美国家保持。从论文和专利数量角度统计，美国处于领先，中国位居第二，日本、韩国、英国和德国等紧随其后。从研究成果水平方面分析，在量子惯性导航领域，核磁共振陀螺和 SERF 陀螺实用化程度最高，美国在小型化和工程化研究方面处于领先，我国北航、33 所和中科大等研究机构的样机部分成果指标达国际先进水平，但在小型化和工程化方面与欧美国家仍有差距。在量子磁场测量领域，美国保持磁场检测精度世界记录（ $0.16 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ ），我国北航、中科大和浙大等机构研究成果达到世界先进水平，具有较强实力。在量子重力测量领域，美国保持重力探测灵敏度世界记录（ $3\text{e-}11\text{g/Hz}^{1/2}$ ），我国华中科大、浙大和计量院等单位研究成果与国际先进水平还有一定差距。在量子目标识别领域，美国起步较早技术领先，量子纠缠雷达 2012 年已有样机实验报道，我国与国际先进水平仍有较大差距。在量子时间基准领域，美国 2018 年报道铯原子晶格光钟实现定时精度的世界记录（ $2.5\text{e-}19$ ），我国目前已成为参与驾驭国际原子时的五个主要国之一，中国计量院研制的冷原子喷泉钟 NIM5 精度达到 $2.3\text{e-}16$ 量级，下一代 NIM6 有望突破 $1\text{e-}17$ 量级。中科院武汉物数所 2016 年报道了 $1\text{e-}17$ 量级精度的 $^{40}\text{Ca}^+$ 离子光钟，正逐步缩小差距。

（三）我国发展应用面临的问题与挑战

1. 系统工程化和实用化仍有待探索

量子传感技术对原子和光子等微观粒子进行精确的人工调控和状态检测，对调控和检测设备及其工作环境提出很高要求。量子测量和传感设备在体积、功耗和集成度等方面存在问题瓶颈，并对其应用推广形成制约。目前的工程样机级别产品和解决方案，整体性能和实用化水平还有较大提升空间，技术成熟和规模商用还有一定距离。

2. 研究项目的应用转化机制不成熟

测量仪器仪表类研究项目在申报和考察过程中，普遍存在突出个别指标参数先进性，而对整机实用性、工程化问题和相关应用研究的导向性和考察机制不足的问题。测量仪器仪表类科研项目的支持和投入，与最终的实际工程化和市场应用之间没有形成闭环。同时科研成果转化应用过程中可能存在政策和法规层面的灰色地带，市场化应用推广缺乏体制机制保障和驱动力。

3. 产业化合作和推动力量较为有限

量子传感技术的研究和应用涉及面广，技术背景差异大。项目支持和投入兼顾多个技术方向并形成体系化和持续性支持的难度较大。不同技术方向的发展程度和应用前景各不相同，研究机构和行业企业之间的合作交流目前仍十分有限，缺乏沟通合作的平台与机制，科研成果转化和知识产权开发存在困难。

五、演进趋势、发展态势与策略建议

（一）量子信息技术整体演进趋势

量子信息技术的研究和应用发展是量子科技革命第二次浪潮的先锋和代表，未来将在国家科技发展，新兴产业培育和经济建设等诸多领域中产生基础共性乃至颠覆性的重大影响。量子技术的核心是基于量子物理学原理，对微观粒子系统的叠加态和纠缠态等独特物理现象进行观测、调控和应用。量子物理学中的基础共性关键技术，例如纠缠源制备，量子态存储，单光子检测、激光原子冷却和微波粒子操控等，是量子信息技术发展和应用的控制性因素，其研究突破将对整个量子信息技术发展和应用推广产生巨大的推动作用，也是量子信息技术发展成熟度的关键性评价指标。



来源：中国信息通信研究院

图 19 量子信息技术发展与应用演进趋势

量子信息包括量子计算、量子通信和量子测量三大技术领域，在研究发展水平，技术实用化程度，产品工程化能力和产业化应用前景等方面的情况各有差异，处于不同的发展阶段。量子信息技术总体发

展与应用演进趋势如图 19 所示。

量子计算领域，目前处于基于不同技术方案探索量子处理器物理实现的关键阶段，未来五年左右可能在量子计算原理样机和专用量子计算处理器的研制等方面取得突破，并在量子模拟、机器学习和大数据集的分析优化等领域获得实际应用。同时量子计算控制系统、人机界面和软件算法等应用研究，将为通用量子计算的实用化奠定基础。未来随着量子计算技术实用化水平的进一步提升，通用量子计算机将对基础科研和信息通信等诸多领域和行业产生更大影响。

量子通信领域，量子密钥分发和量子保密通信技术已进入实用化阶段，可能在信息安全领域获得应用并产生重要影响。随着性能指标、工程化和实用化水平提升，可进一步探索基于卫星或光纤网络的长距离传输和广域组网应用。未来在量子纠缠和量子存储等共性关键技术突破之后，量子信息通信和量子互联网等方面可能产生更具基础共性和颠覆性的发展和应用。

量子测量领域，不同类型的测量技术和传感器件的发展程度和应用前景存在一定差异，原子钟、核磁共振陀螺和单光子探测与干涉测量等基于已有技术平滑升级演进的量子测量方案发展更加成熟，实用化前景更为明确。量子纠缠测量、量子关联成像和超流体干涉测量等新兴方向，在研究与应用方面面临更大挑战，实用化发展需要更长时间。未来随着技术研究突破，以及器件和设备集成度提升，量子测量技术将成为传感测量各技术领域的升级演进方向。

（二）量子信息领域国际发展态势

目前，美国、欧洲和我国在量子信息技术领域发展较快，美国仍处领先，欧洲实力强劲，我国近年来发展逐步加速。

在基础科研水平方面，美国的高水平研究机构 and 顶尖科学家人才聚集，研究方向开创性和工程化创新能力首屈一指。欧洲科研实力雄厚，国际合作广泛，在部分细分领域处于国际领先，但大项目组织投入和联合研究方面的动员能力和组织效率稍逊一筹。我国量子信息领域部分成果与国际先进水平基本保持同步，但仍属于前沿研究方向的跟随者和贡献者，新领域方向开拓性的重大成果较少。

在应用推广能力方面，美国的科技巨头和工业巨头在量子计算和量子测量领域大力投入，科研成果的应用转化环境和工程化能力领先。欧洲顶层设计和布局规划完善，商业创新环境成熟，有利于市场化应用推广，但各国政策和市场相对独立，技术产业变革的规模效应难以充分显现。我国具备集中力量办大事的体制优势，但产学研用各环节的相互合作仍然存在瓶颈，后续成果转化和应用模式还有待探索。

在布局规划差异方面，美国将量子计算和量子模拟视为优先发展方向，也十分重视量子测量在能源和工业等领域的应用和影响，意在以信息获取和计算处理能力的提升触发新一轮科技革命，保持其在科技领域的领先优势。美国量子通信领域的研究和应用公开报道较少。欧洲在量子信息计算、通信和测量三个领域的布局相对均衡，都有相关研究报道和应用成果。我国信息安全保障形势复杂，过去较为注重量子通信研究和量子保密通信应用，但其应用范围和技术影响力相对有限。近年来国家层面规划布局加大了量子计算和量子模拟等更具有

基础性和颠覆性研究方向支持力度，量子测量在众多领域的研究和应用也逐渐受到重视。

在综合实力对比方面，美国量子在量子测量方面传统优势明显，多个传感测量量子领域均保持世界记录；量子计算研究也处于领先，未来五年可能在量子计算原理样机方面率先取得突破；已经开始布局基于量子隐形传态的量子信息网络研发。欧洲在各国研究机构和科技公司具备很强科研实力，国际交流和项目合作密切，但在量子信息技术科研、应用到产业发展的全局层面仍唯美国马首是瞻。我国近年来量子信息相关科研团队、论文数量及从业人员等指标开始进入世界前列，新技术应用推广具备潜在的政策驱动和市场规模优势。量子保密通信应用规模和产业发展处于领先，量子计算和量子测量领域的研究与应用水平与美欧相比仍有一定差距。

（三）促进我国量子信息技术发展的策略建议

1.明确重点研发方向，打破瓶颈构建优势

量子科技革命的第二次浪潮即将来临，全球量子信息技术领域的科研、应用与产业发展逐渐加速，掌握量子信息关键技术、核心平台与创新能力将成为未来新的“国之重器”。建议进一步加大量子信息技术领域基础科研支持力度，在量子通信的高品质纠缠源、高性能单光子探测、量子态存储中继，量子计算的高维量子纠缠操控和高效量子纠错编码，量子测量设备小型化、集成化等方面开展共性关键技术、样机工程化和技术实用化瓶颈开展研究，将政策支持优势真正转化为

核心技术优势，掌握关键技术创新和可持续发展能力。

2. 补齐产业基础短板，强化工程支撑能力

量子信息技术研究需要通用基础设施、实验测控环境、新型芯片软件等工业领域的基础配套和短板补齐，同时量子信息技术应用转化也需要专业化的工艺、工程、软件、测试团队的支撑。建议全面梳理量子信息技术研究涉及的产业基础短板，对量子通信中的高性能单光子探测器模块，量子计算中的小型化高效制冷装置，量子计算和量子测量中的高纯度超导或金刚石样品及其制备工艺，以及微波或光学专用操控系统等为代表的“卡脖子”问题，进行针对性布局和研究。在此过程中，同步加强相关领域工艺、工程、软件和测试等人才培养，为量子信息技术科研提供有效支撑，为应用转化奠定基础。

3. 加强顶层规划设计，优化科研管理体制

从国家层面对量子信息领域制定目标明确、重点突出的顶层规划是加快发展与应用的关键之一。量子计算和量子模拟发展带来算力和研究能力提升将加速其他众多领域的演进和发展，量子计算与量子通信的融合对信息通信技术演进产生深刻影响，量子测量在众多领域的应用也将是改变游戏规则式的颠覆性技术，建议作为研究和应用的重点关注领域。科研管理体制方面，建议完善科研评价体系，人才引进和选拔方案，以及前沿探索的容错机制，激发各类型、各层次人才的创新活力。同时，改变科研经费管理和运用中条目过细、进度僵化和重物轻人等问题，建立与科研成果贡献和量子信息技术快速演进趋势

相适应的经费管理与使用模式。

4. 建立合作平台机制，推动产业应用发展

量子信息技术的科研需要大量高投入、重资产、长研发周期的实验平台及配套环境，建议从国家层面建立合作平台机制，进行规划引导和资源整合，集中力量办大事，避免低效率重复投入和通用基础平台的重复建设。在应用部署方面，建议对应用发展方案和产业推动路径等问题进行研究部署，组织开展标准评测认证、知识产权开发和产业配套政策等方面的应用研究。同时，建议联合量子技术、信息通信和传统工业等领域各方力量，建立量子信息应用公共创新平台和产业发展联盟，为产学研用各方提供信息交流、合作协同、成果转化和产业规划等多方面公共服务。

中国信息通信研究院

地址：北京市海淀区花园北路 52 号

邮政编码：100191

联系电话：010-62300592、62304839

传真：010-62304980

网址：www.caict.ac.cn

