

量子信息科技与产业发展态势及未来展望

李硕^{1,2*}, 李欣欣^{1,2}, 张雪松³, 高飞⁴, 陈远珍⁵, 任思源⁶, 于溢琛⁷

(1. 中电科发展规划研究院有限公司, 北京 100043; 2. 中国电子科技集团公司发展战略研究中心, 北京 100043;
3. 中国电子科技集团公司电子科学研究院, 北京 100041; 4. 北京邮电大学网络空间安全学院, 北京 100876;
5. 南方科技大学理学院, 广东深圳 518055; 6. 中国计量科学研究院, 北京 100029;
7. 中国电子科技集团有限公司第三十八研究所, 合肥 230088)

摘要: 量子信息技术是国际科技前沿技术, 是大变局时代的关键科技变量, 也是大国科技、综合国力和军事竞争的战略高地。本文梳理了国外量子信息领域的战略布局、主要方向的发展态势及我国量子信息领域的发展现状, 结合国家战略需求, 分析了我国进一步发展量子信息科技和产业面临的优势与挑战, 并应用科技体系工程思维方法, 通过研究产业技术应用研发和集成创新途径, 面向量子信息技术形态、产品形态和产业生态, 提出以量子计算关键赛道为牵引, 系统布局量子信息产业发展; 抓住自主可控关键节点, 系统部署量子信息产业链; 面向应用场景引导国家量子重大工程应用项目研发方向; 十年积累, 培育量子信息科技人才等发展建议, 以为我国量子信息产业发展提供借鉴与参考。

关键词: 量子信息; 量子计算; 量子通信; 量子测量; 量子产业

中图分类号: G353.12; O413 **文献标识码:** A

Development Trends and Future of the Quantum Information Technology and Industry

Li Shuo^{1,2*}, Li Xinxin^{1,2}, Zhang Xuesong³, Gao Fei⁴, Chen Yuanzhen⁵,
Ren Siyuan⁶, Yu Yichen⁷

(1. Institute for Development and Planning, China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100043, China; 2. Research Center for Development and Strategy, China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100043, China; 3. China Academy of Electronic and Information Technology, China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100041, China; 4. School of Cyberspace Security, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China; 5. College of Science, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, Guangdong, China; 6. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China; 7. The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, China)

Abstract: The quantum information technology represents the frontier of international scientific and technological advancements, serving as a pivotal technological variable in the era of great changes and a strategic high ground for technological, and national power, competitions among major powers. This study reviews the strategic layouts and development trends of key directions in the field of quantum information abroad, as well as the current development status in China. By integrating these insights with national strategic needs, it analyzes the advantages and challenges faced by China in further developing quantum information science and

收稿日期: 2024-12-13; **修回日期:** 2025-01-02

通讯作者: *李硕, 中电科发展规划研究院有限公司正高级工程师, 主要研究方向为电子信息领域发展战略研究;

E-mail: lishuo5@cetc.com.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“全球未来信息产业发展趋势及我国开辟新领域新赛道战略研究”(2023-XBZD-21)

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

technology and its related industries. Applying the thinking methodology of science and technology system engineering, and by investigating the research and development (R&D) of industrial technology applications and integrated innovation pathways, this study proposes, with a focus on quantum information technology forms, product forms, and industrial ecosystems, to systematically layout the development of the quantum information industry with quantum computing as a key driving force; to systematically deploy the quantum information industry chain by grasping the critical nodes of autonomy and controllability; to guide the R&D directions of national significant quantum engineering projects based on application scenarios; and to cultivate quantum information science and technology talents over a decade. These suggestions aim to provide insights and references for the development of China's quantum information industry.

Keywords: quantum information; quantum computing; quantum communications; quantum measurement; quantum industry

一、前言

信息革命是人类历史上一场方兴未艾的深刻的科技变革。始于 20 世纪初期的第一次量子革命，孕育了电子信息科学与技术。兴起于 21 世纪初期的第二次量子革命，催生了包括量子计算、量子测量、量子通信等在内的量子信息科学与技术，是可能会重构传统技术体系的颠覆式技术创新。量子信息技术会在信息获取、信息传递、信息安全、信息处理、信息应用等方面突破传统信息技术的瓶颈，极大地推动物理域、信息域、认知域、社会域的科技发展。

量子信息已成为世界各国开展科技、经济等综合国力竞争、维护国家技术与发展主动权的战略制高点之一。2018 年，欧盟推出“欧洲量子技术旗舰计划”、美国发布《国家量子倡议法案》，之后各国加速推进量子信息领域的规划布局^[1]。量子信息领域的产业生态培育及建设也逐步成为各国关注热点。截至 2024 年，全球已有 29 个国家和地区发布了量子信息相关的发展战略或规划文件；全球各国（除中国外）量子信息领域投资预算总规模已超 250 亿美元^[2]，其中美国“量子计划”近五年实际支出约 39.39 亿美元^[3]。

我国高度重视量子信息领域的发展，通过实施“量子调控重大专项”“科技创新 2030—量子通信与量子计算机重大项目”等，量子信息技术达到国际先进水平，但整体仍处于技术萌芽突破期，且存在与美国差距拉大的风险，亟需研究国家量子发展战略，补齐量子信息技术基础、软件和操作系统等短板。

本文梳理国外量子信息战略布局、各方向发展趋势及我国量子信息领域的发展现状，结合国家战略需求，分析我国进一步发展量子信息科技和产业面临的优势与挑战，通过研究产业技术应用研发和

集成创新途径，面向量子信息技术形态、产品形态和产业生态，研究开辟量子信息领域的科技产业制胜模式，以为我国量子信息科技和产业高质量发展提供参考。

二、国外量子信息领域的发展态势

量子信息技术属于量子物理与信息科学的交叉技术领域，主要包括量子计算、量子通信、量子测量、量子计量等技术方向。近年来，各国政府通过战略规划、项目支持、成立量子中心和量子联盟等方式，整合量子新科研机构与工业团队优势资源，多维度布局以推动量子信息技术与产业快速发展。

（一）主要国家量子战略布局

近年来，全球主要国家和地区均加快了量子信息领域的战略部署，发布多份顶层规划文件，并加大了量子科技领域的投资力度。

美国作为量子信息技术领域的先行者，2002 年就制定了《量子信息科学和技术发展规划》。此后，美国持续发布相关战略和政策文件，力图在量子信息技术领域构建一个涵盖政府机构、学术团体、社区及私营部门的全方位创新生态系统。美国共有三个联邦协调机构：国家量子协调办公室（NQCO）、国家科学技术委员会量子信息科学小组委员会（SCQIS）、国家量子倡议咨询委员会（NQIAC），以成文法的形式促进机构间的规划和合作，并充当国家量子倡议的管理者。

英国则将量子技术视为提升国家创新力和国际竞争力的关键领域，早在 2013 年就启动了国家量子科技计划。2023 年 3 月，英国发布了最新版《国家量子战略》^[4]，明确了在未来十年成为世界领先量子经济体的愿景，并制定了详细的行动计划。

加拿大在全球量子信息研究领域也占据一席之

地。根据2015年的评估，加拿大在量子科学领域的年度总支出排名全球第五。2023年3月，加拿大发布了《国家量子战略》^[5]，旨在支持本国的量子部门，进一步巩固其在量子领域的领先地位。

日本在量子计算领域的发展战略也愈发明晰，研究方向聚焦于领域化发展，并成立了临时性协调机构解决具体问题。2022年，日本公布了《量子未来社会愿景》^[6]，提议建立量子技术国际合作中心，推动量子技术与社会经济的深度融合。2024年2月，日本启动了“登月计划6”长期计划，目标是到2050年开发出容错的通用量子计算机^[7]。

（二）国外量子计算发展态势

量子计算朝着实用化方向稳步前进，五条主流实现量子计算的技术路线在量子比特数量和品质、测控系统、量子软件等诸多核心技术方向，取得相当惊人的研究成果。

1. 主流技术路线硕果累累

综合来看，超导、光量子离子阱成为主流路线，半导体量子点、中性原子等技术路线加速追赶，拓扑量子方向成为新热点。在超导路线方面，国外有IBM、Intel、Google、Rigetti等品牌。2023年，国际商业机器公司发布了拥有1121量子比特的“秃鹰”芯片，是世界超导量子计算的最大规模^[8]处理器。在光量子路线方面，国外有Xanadu、PsiQuantum、Quix等公司。2024年，荷兰Quix Quantum公司在光量子芯片上演示了GHZ态的生成。在离子阱方面，国外有Quantinuum、IonQ、eleQtron等公司。2024年，Quantinuum公司推出56位量子比特离子阱原型机Model H2-1，量子体积达到创纪录的1 048 576^[9]。在中性原子路线方面，国外企业有Atom Computing、QuEra、PASQAL、ColdQuanta等。2023年，美国Atom Computing企业研制出1180量子比特的量子设备。

值得一提的是量子纠错技术。量子纠错是实现通用量子计算机的关键，2023年，谷歌公司的表面码和深圳国际量子研究院的研究方案先后突破量子纠错的盈亏平衡点，QuEra公司发布了业界最多的48个逻辑比特中性原子计算机，实现了初步量子纠错^[10]。

2. 量子配套软件持续迭代

量子软件需要满足量子计算的底层理论与算法

逻辑，提供面向不同技术路线和硬件方案的量子指令集、编译功能与中间标识，并提供基于开源的编程语言框架，特异性与专业性较强，目前处于设计与生态构建的早期阶段。业界已在量子计算编译软件、应用开发软件、测控软件、电子设计自动化软件等多层次开展布局。

3. 量子算法从优越性转向实用性

量子计算的一项首要任务是设计出优于经典方法的量子算法，包含量子绝热、量子随机、量子门线路等不同范式，以及通用与变分两类。1994年Shor提出了指数级加速的大数分解量子算法；1996年Grover提出了平方加速的量子搜索算法；2009年，Harrow等人提出HHL算法用于求解线性方程组；2014年量子变分本征值求解器（VQE）的提出开启了混合量子-经典算法研究的新纪元^[11]。

（三）国外量子通信发展态势

量子通信的广义概念是以传输量子态为手段的通信方式，理论上具有传输的绝对安全性。当前量子通信主要有两种技术途径，量子密钥分发（QKD）和量子安全直接通信（QSDC）。需要指出的是，当前国内学者所说的“量子通信”主要是基于QKD技术的量子保密通信。

近年来，国外学者在新型QKD协议（旨在提高密钥分发性能）的实验验证、QKD系统的小型化和集成化、量子与经典信号共纤传输等方面取得了多项突破。2021年，东芝电子欧洲公司在实验室内实现了605 km传输距离下的双场（TF）QKD演示验证；英国剑桥大学设计了一套高斯调制本地本振连续变量QKD系统，实现了26.9 Mbps@15 km的安全成码率。2023年，奥地利的因斯布鲁克大学成功实施了一项量子中继实验，该实验采用两个钙离子作为量子存储器，成功实现了在超过50 km的光纤上进行电信波段的信号传输。与此同时，多家欧洲机构携手启动了LaiQa项目，旨在构建一个全球性的量子互联网，为此他们正致力于开发包括三种不同类型的光子源、具备实用性的量子存储器，以及能将卫星与地面站相连接的先进光纤耦合技术和自适应光学系统等核心组件^[12]。美国的林肯实验室等在波士顿地区构建了50 km三节点量子网络实验床，测试量子态信号传输特性和补偿机制。

(四) 国外量子测量发展态势

量子测量是量子信息技术领域中发展较为迅速、技术相对成熟、近期可实现工程化应用的技术方向，至今已有多项量子测量技术取得重大突破。

1. 量子雷达在特定环境下的信噪比提升得到验证

量子雷达是一种利用量子特性进行目标状态感知和信息获取的特殊传感技术，按照雷达发射端和接收端特性可以分为量子照明雷达、接收端量子增强雷达等。2020年，奥地利科学技术研究所开发了量子照明雷达原理样机，对1 m距离处的目标进行探测，其信噪比相较传统相干态雷达高出4 dB^[13]。2022年，加拿大多伦多大学开发的接收端量子增强激光雷达原型系统声称其信噪比比经典激光雷达高了近36 dB^[14]。

2. 量子磁场传感器在特种应用上取得突破

量子磁场感知是利用原子在磁场中的自旋进动效应或相干布居效应进行磁传感的技术，在地下物质勘探、暗物质探测、医学心脑血管成像应用上取得突破。2020年，德国耶拿物理高科技研究所采用变压型耦合结构亚微米约瑟夫森结技术，研制了磁矢量梯度计，成功探测出1.2 km深的镍铜铂矿床分布形状^[15]。

3. 原子重力梯度仪实现工程应用

量子重力测量利用原子物质波干涉实现重力加速度的测量，其中基于拉曼脉冲干涉原理的重力测量是技术最成熟、性能最高的绝对重力测量方案。2018年，英国伯明翰大学成功研制出原子重力梯度仪原理样机，并于2022年实现该样机的工程化。该样机在外场环境下开展重力梯度测量，目前应用于火山喷发数据监测，是世界上第一台非实验室条件下的原子重力梯度仪^[16]。

(五) 国外量子计量发展态势

利用量子效应来定义计量单位并建立计量基准，实现实物计量向量子计量转变，逐渐成为计量科学的研究重点和热点。

1. 时间频率基准精确度及稳定性进一步提升

原子钟通过原子的超精细能级跃迁频率实现高精度计时，是目前最精确的时间和频率基准装置。2019年，美国国家标准与技术研究院（NIST）研制的²⁷Al+光钟的系统相对不确定度达到 10^{-19} 量级，

成为当前世界上系统不确定度指标最好的光钟。2023年，美国阿贡国家实验室利用欧洲新一代同步加速器辐射源高亮度X射线激发钪-45元素金属箔产生异构体，理论计时精度可达到每3000亿年才误差1 s，有望成为新一代时频基准解决方案^[17]。

2. 量子电流复现取得技术进展

国际单位制（SI）重新定义后，电流的复现可依据定义，利用单电子隧道效应或其他物理公式直接复现。2015年，德国联邦物理技术研究院在基于GaAs异质结构中动态量子点的单电子泵中得到100 pA量级的电流，不确定性优于 0.2×10^{-6} 。2023年，日本电报电话（NTT）公司和国家高级工业科学技术研究所成功地利用硅量子点产生了稳定可靠的电流，并通过对比首次证实这两个量子点的电流一致性达到 4×10^{-7} 以下。

3. 量子电压基准已用于实际计量校准工作

20世纪80年代，基于约瑟夫森效应，量子电压的建立实现了电压伏特从实物基准到量子基准的过渡。2015年，NIST成功开发出了一款基于制冷技术的10 V可编程量子电压系统，并逐步推向市场。2018年，NIST在全球率先进行了可编程量子电压系统与脉冲驱动系统所产生的直流电压之间的直接比较，结果显示^[18]，两者之间的直流电压差异仅为3 nV，相对不确定度优于 10^{-8} 。

三、我国量子信息领域的发展现状

21世纪以来，我国一直高度重视量子信息技术的发展，我国量子科技创新成效显著，整体水平处于全球第一梯队。与美国相比，我国量子通信总体处于“领跑”，除光量子计算技术途径占优之外，其他量子计算技术途径处于“跟跑”，量子精密测量整体处于“并跑”。在大国博弈的焦点领域中，量子科技产业差距最小，是我国实现领域超越的机遇。

(一) 我国量子信息技术发展和产业战略

《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》提出，在量子信息等前沿科技和产业变革领域，组织实施未来产业孵化与加速计划，谋划布局一批未来产业。2024年5月，国务院国有资产监督管理委员会开展

第二批中央企业原创技术策源地布局建设，在量子信息、类脑智能、生物制造等36个领域，支持40家中央企业并布局52个原创技术策源地。

地方层面纷纷推出量子信息方面的发展规划，积极推动量子信息技术发展。北京市经济和信息化局发布《北京市数字经济全产业链开放发展行动方案》，强调超前布局量子计算等未来科技前沿领域。上海市公布《上海打造未来产业创新高地发展壮大未来产业集群行动方案》，其中特别强调培育量子科技产业，致力于突破量子信息关键技术，并积极推动量子技术在金融、大数据处理、医疗健康以及资源环境等多个领域的实际应用。广东省科学技术厅发布了《广东省基础与应用基础研究十年“卓粤”计划（征求意见稿）》，该计划将量子科技项目列为未来十年基础与应用基础研究的首要重点，明确表示将全力支持粤港澳大湾区量子科学中心的建设与发展。深圳市政府也发布了相关意见，明确指出将量子信息领域作为战略性新兴产业集群和未来产业的重要发展方向，力求在量子操作系统、量子云计算以及含噪声的中等规模量子处理器等关键技术上取得重大突破^[19]。

（二）我国量子计算方向进展

我国量子计算技术主要依托高校、研究机构和互联网企业，在物理系统领域、应用算法领域、云计算领域取得了一系列成果，目前主要聚焦于提升物理指标，寻求基础科学突破，但在计算整机开发、专用算法配套、混合架构设计等方面布局不足，难以直接支撑武器模拟、密码破译等军事应用。

我国已布局超导量子、光量子等技术途径，在光量子计算领域国际领先，能够自主可控并持续发展。“九章三号”实现了基于256个光量子比特模拟玻色采样应用^[20]。第三代自主超导量子计算机“本源悟空”搭载72位自主超导量子芯片“悟空芯”^[21]。“祖冲之三号”量子计算云平台实现了基于176个超导量子比特的模拟随机行走应用^[22]。“天工一号”实现了全自主可控20个超导量子比特计算机系统。“五岳”和“天衍”量子云平台^[23]突破了运筹优化、量子化学、通信网络优化等业务领域新算法^[24]。

在量子计算科技发展方面，我国与国际先进水平齐头并进。2024年，清华大学实现了512离子二维阵列囚禁和300量子比特的量子模拟^[25]；中国科

学技术大学成功构建求解费米子哈伯德模型的超冷原子量子模拟器“天元”，实验验证费米子哈伯德模型在含掺杂条件下的反铁磁相变^[26]；清华大学等联合团队提出玻色编码纠错方案，实现了纠缠逻辑量子比特相干时间提高45%，首次利用逻辑量子比特实验证明了贝尔不等式^[27]。

（三）我国量子通信方向进展

我国量子通信整体领先，在量子通信的实验验证和工程化建设方面取得了令人瞩目的成绩。2016年，“墨子号”量子科学实验卫星发射升空，并成功完成星地QKD实验。2017年，中国科学技术大学潘建伟院士团队负责建成了全长超过2000 km的QKD干线——京沪干线；2021年，该团队演示了一个基于“墨子号”的集成空对地QKD量子通信网络，总距离可达4600 km。此外，国内学者在新型QKD协议的实验验证、QKD系统的小型化和集成化、QSDC协议实验验证等方面取得了新突破^[28]。

在量子通信产业方面，中国航天科工集团有限公司、中国电子科技集团有限公司、国家电网有限公司、中国联合网络通信集团有限公司、中国电信集团有限公司、中国移动通信集团有限公司等企业均有布局和部署。中国电信集团有限公司与合肥国家实验室深度合作，承建了全球规模最大的合肥量子城域网；投资30亿元成立中国电信量子信息科技集团有限公司，通过定增方式投资收购并控股国盾量子技术股份有限公司；将量子技术与通信网络、云计算、数字化平台等融合，初步形成全场景能力体系，量子密信密话用户突破300万户。

在量子计算科技发展方面，我国稳居国际引领地位。在QKD科研探索方面，2024年6月，济南量子技术研究院利用乙炔分子气室作为本地绝对频率参考，实现无需统一光学频率参考的TF-QKD系统502 km光纤传输，等效成码率约为数比特每秒，有望提升CV-QKD技术的实用化水平^[29]。此外，量子信息网络成为研究热点，2024年5月，中国科学技术大学报道了基于单光子相位控制和量子频率转换技术，在城域三节点量子网络中实现独立存储节点间纠缠，点到点最远距离达12.5 km，成为国际首个城域多节点量子网络实验^[30]。

（四）我国量子测量方向进展

我国在量子测量方向整体与国外“并跑”，在量子信息获取方面，重点开展了量子测量研究工作。2023年12月，浙江工业大学完成国内首次基于自主研发的原子磁力仪搭载无人机航磁系统的测试飞行，成功进行了航磁数据采集，其采集数据结果与已有磁测数据对比达到预期。

部分企业在量子测量领域的总体发展水平达到国内领先：中国航天科工集团有限公司研制的原子磁强计，核心技术指标国际领先；中国电子科技集团有限公司研制的单光子激光雷达，验证了探测隐身目标、战略高价值目标的实用性；国家电网有限公司、中国南方电网有限责任公司等新生力量，也积极布局电力量子传感、电气量子测量与计量等关键技术研究。

（五）我国量子计量方向进展

在量子信息技术基础研究方面，重点开展了量子计量研究工作。2015年，中国计量科学研究院在国内首次实现了 ^{87}Sr 光晶格原子钟，其系统不确定度为 2.3×10^{-16} ，经过不断改进于2022年达到 10^{-18} 。2023年，中国科学技术大学成功研制了不确定度和万秒稳定度均优于 5×10^{-18} 的 ^{87}Sr 光晶格原子钟。

在极低温温标方面，中国计量科学研究院、中国科学院理化技术研究所、北京航天测试计量技术研究所、中国科学院物理研究所、清华大学等单位开展了低温温度计量或测量研究，部分单位建立有1 K以上温度计量装置，而在10 mK至1 K温区缺乏基标准装置和量传体系，计量标定高度依赖国外公司。在电学计量方面，用于量子电压的集成约瑟夫森结阵芯片是目前的研究重点。我国基于自主芯片已经实现0.5 V的高精度量子电压输出，与美国NIST芯片相比差值为 5.5×10^{-10} V。

四、我国量子信息领域发展优势与挑战

（一）量子信息领域总体优势与挑战

我国在量子信息科技和产业发展方面具有一定优势。一是我国量子信息研究起步早，在科研布局和企业投入方面取得了一定成果，如QKD、量子计算均处于世界先进水平；二是我国同时具备丰富的要素基础、完备的产业体系、庞大的市场规模，

为量子信息产业发展奠定了坚实基础；三是在国家顶层战略的指导下，以量子信息国家实验室为代表，发挥集中力量办大事的优势，立项“科技创新2030—量子通信与量子计算机重大项目”，促进了量子信息基础技术发展。

我国通往量子信息时代的道路极为坎坷，存在诸多困难与挑战：一是量子工业基础力量分散，在量子硬件、软件等方面仍然存在重大技术障碍，可能导致量子信息技术发展的加速度不足；二是在量子信息技术的原始积累方面，我国企业相比于国外企业，参与度较低，研发投入和产业发展方向的布局缺乏全面统筹，尚处于“跟跑”状态；三是我国量子信息科技人才体系结构不均衡，中高级人才严重匮乏，人才知识结构较为单一，高校缺乏针对量子信息技术发展的系统学科布局；四是在中美量子信息竞争的大格局下，技术干扰、技术诱骗是新常态，不仅要控制技术决策失误风险，还要警惕其他的干扰和误导。

（二）量子计算发展面临的挑战

尽管量子计算技术得到了突飞猛进的发展，但要研制出具有实际应用价值的量子计算机还任重道远。

1. 量子计算机的工程实现技术途径尚存在变数

目前提出的技术实现途径有超导、硅基、中性原子、光量子计算等，量子处理器的量子比特集成度持续提升，量子比特误差抑制和缓解取得长足发展。但是，究竟哪一条路径能够工程化实现通用量子计算机尚不确定。

2. 量子计算实际应用的突破时间难以确定

量子计算理论上具有远超经典计算的强大并行计算能力，实现强大并行计算功能应用需要中等规模以上的量子比特数量、较长的相干时间、较高的保真度以及低开销的量子算法。从当前技术的发展程度来看，量子计算的工程化应用仍需在量子计算机硬件的设计制造技术、量子算法等方面实现突破，量子计算实际应用仍需要进一步探索。

3. 通用量子计算必须解决纠错与容错问题

量子纠错、容错需要数量巨大的低错误率的物理量子比特，现有技术水平难以达到，实现量子纠错、容错仍面临极大挑战。

（三）量子通信发展面临的挑战

尽管国内外学者已经为探索量子通信的实用性付出了巨大努力，但量子通信的发展目前仍处于初级阶段，要想构建长距离且高效的量子网络，仍然需要克服众多难题。

1. 量子密码网络工程化面临应用体系问题和性能提升问题

随着技术进步，量子密码网络正朝着更高码率、更远距离、更大规模商业化 QKD 网络迈进。然而，当前量子密码网络的发展仍面临挑战：一是量子密码协议体系的不均衡问题，QKD 发展迅速，但其他协议进展缓慢，难以满足全面增强信息系统安全性的需求，因此亟需完善整个量子密码协议体系；二是 QKD 系统在传输速率、传输距离、系统的实际安全性三方面的性能还有待提升；三是随着技术的不断发展与成熟，量子密码网络标准还需要进一步更新和完善。

2. 量子隐形传态网络各项关键技术尚不成熟

目前，量子隐形传态网络各项关键技术尚不成熟，尤其是量子中继器和量子存储器离实用化还有一段距离，使得量子态的远距离传输和量子态的高性能存储成为量子隐形传态网络的两大关键问题。量子中继器的实现依赖于诸如纠缠分发、交换、纯化（或纠错）以及存储等一系列关键技术。尽管这些技术在实验层面已有一定进展，但仍面临诸多挑战。例如，纠缠分发需克服信道噪声，而纠缠交换与纠错则要求高保真度量子门。这些问题延缓了量子中继器的实用化进程，进而限制了大规模量子隐形传态网络的发展。当前，量子存储器已在多种量子体系中得以实现，但各体系各具优劣，难以全面满足实际量子态传输的需求。此外，链路建立技术（纠缠生成和远程纠缠建立技术）、信息传输技术（信道复用和量子接口技术）、量子网络协议技术（量子网络堆栈和量子网络协议）等关键技术也有待进一步研究，以满足量子网络的实用化要求。

（四）量子测量发展面临的挑战

1. 在实际应用环境条件下，各类噪声会导致量子测量系统性能下降，基本不能达到理论指标

量子照明雷达方案理论上能够降低雷达误判率，一定程度上提高信噪比。该方案存在纠缠源亮度及相干性随传输距离急速下降的问题，难以完成

真实环境下的远距离目标探测，仍处于学术研究阶段。单光子探测雷达主要用于解决高价值目标测距和大气探测等，该类样机仍面临环境噪声问题，全天时、全天候探测能力有待提升。

原子陀螺仪、原子重力仪等利用了冷原子干涉特性实现重力、重力梯度、角速度等精密测量，具有测量精度高、相干时间长等优势。但由于激光冷却操控测量装置较为复杂，在车载、船载等平台以及恶劣自然环境中，冷原子干涉装置测量性能急速下降。在工程应用方面，冷原子干涉测量装置尚需解决可搬运、可移动、环境适应性问题，从而适应移动搭载平台及野外作业的需求，解决从基础研究到真实场景的工程化应用问题。

2. 量子测量系统的仪器设备自主研发需求迫切

量子探测器件是决定量子雷达性能的关键器件，现有量子探测器件主要工作在光频段，尚不能兼顾高灵敏和大动态探测需求，难以实现全天候远距离探测；微波频段量子探测器件需要 mK 级低温和极为纯净的电磁场环境，国内微波频段量子探测器件的研制技术尚不成熟。

热原子蒸气是目前成熟度较高的频谱感知技术体系，系统无需制冷、功耗低，小型化相对较容易。热原子蒸气中原子核和电子具有自旋的内禀属性，通过与外界场进行耦合可用于磁场感知；高激发态原子能级跃迁能够与外界电场耦合，可用于电场感知。原子气室是原子跃迁、极化、自旋交换、自旋弛豫、自旋进动等过程发生的物理场所，其加工工艺是工程化应用的主要问题，涉及的关键技术包括长弛豫时间原子气室技术、无磁加热技术、原子芯片技术等，自主研制的工艺水平需进一步突破。

3. 量子测量系统信噪比提升算法有待优化

具备量子效应的器件用于传统感知计量领域能够带来系统灵敏度的大幅提升，然而信噪比的提升依赖于区分信号和噪声的优化算法。以量子成像为例，量子成像速度与图像信噪比呈相互制约关系，即为了获得较好的信噪比，量子成像算法处理时间过长，导致目标信息获取时效性较差。因此，优化量子成像算法，压低成像重构运算量，实现量子成像效率的提升，才有望提高量子成像的实际可行性。

（五）量子计量发展面临的挑战

1. 物理量定义、溯源方法和形式等出现颠覆性变革，新的量子计量体系尚未建立

量子计量是以新定义的 SI 为源头，涵盖多学科、多领域、多参数的量值传递溯源体系。与传统计量相比，量子计量在物理量定义、溯源方法和形式等方面都发生了颠覆性变革。目前，量子计量仍处于点状突破阶段，体系化发展格局尚未形成。在技术研发方面，用于 SI 新定义的物理常数的测定工作已取得较好成绩，但量值传递溯源能力尚不健全。例如，我国虽然在玻尔兹曼常数测量、能量天平质量量子基准研究、硅摩尔质量测量等方面取得较好的成绩，但是不能形成独立的量传能力。在体制机制方面，计量法律法规体系改革滞后于计量体系发展，《中华人民共和国计量法》作为我国基本的计量制度，对国家量值传递溯源体系进行规制，至今已运行 30 多年。在计量量子化变革的背景下，计量单位不再单一地由计量器具来保存和复现，而是随时随地可以复现，量值传递溯源不再依靠实物量具的逐级比较来实现，现有的《中华人民共和国计量法》部分内容不再适用。

2. 计量精确性提升空间已经打开，我国指标与国际领先水平尚有差距

不确定度是评价计量精确性的核心指标，在原子钟、量子电磁基准等典型量子计量基准中，我国已进入国际先进水平，但与国际顶尖水平相比仍存在一个数量级左右的差距。例如，在光钟研制方面，我国最好的光钟不确定度指标达到 10^{-18} 量级，而美国已进入 10^{-19} 量级。量子基准的工程化应用大多在于定位导航、先进通信、精密制造和前沿研究等战略性高精尖领域，核心指标的数量级差距往往意味着代际差距。因此，为提升产品竞争力，需持续加强技术研发迭代，不断提升核心指标，早日实现工程化突破和产业化应用。

3. 制定量子计量的“芯片基准”，是应对极端或复杂环境下计量应用的工程技术途径

量子计量的工程化应用方向之一是研制芯片级的量子基准，旨在将最准的“标尺”直接嵌入仪器设备，从而大幅缩短量值溯源链条，推动测量效能大幅提升。例如，目前芯片级原子钟、量子电压基准均已接近工程化应用阶段，但是，将计量基准从实验室移植至测量仪器实际工作场景意味着失去了

理想的校准环境。因此，在高海拔、强辐射、极高 / 低温等极端或复杂环境下保持计量基准的稳定性和可靠性，是实现量子计量工程化应用的关键。

五、量子信息未来发展方向

近年来，在政府、企业和科研机构的大力支持下，量子信息技术取得了长足的进步。当前，各类量子信息技术要实现有实际应用价值的工程应用还有许多理论、技术和工程问题需要攻克，未来的发展方向和发展路径不尽相同。

（一）量子计算

通用量子计算机的技术路线图清晰，当前进入大规模含噪量子计算阶段，攻关焦点是规模扩展和容错纠错。量子物理系统实现有超导、光量子、离子阱、中性原子等十余种技术途径，存在技术路线尚未收敛的问题和风险。通用量子计算必须解决纠错容错问题，目前量子计算机比特数量和质量都不支持量子纠错算法的实现^[1]。另外，经典计算机解码速度和量子计算机测量速度不匹配，使得纠错方式在实际应用中更加困难。量子容错需要数量巨大的低错误率的量子比特，超出了现有技术能达到的水平，是比量子纠错技术难度更大的问题。量子比特相干时间较短，大大限制了量子线路深度，难以实现量子错误缓解。

量子计算实际应用的突破时间不确定。量子计算的典型应用场景有密码破译、信号分析、大数据分析、机器学习、气象预报、新材料、新药物等。实现这些应用需要量子计算机的量子比特数量上规模、相干时间足够长、保真度达到纠错临界值，以及足够多的量子比特纠缠工作。因此，实现量子计算实际应用的具体时间难以确定，乐观估计仍然需要 3~5 年时间。

（二）量子通信

量子通信实现了第一个里程碑，继续发展尚需攻克诸多理论和技术问题。当前，QKD 已从实验室走向初步实用化，美国目前尚未开展大规模的 QKD 网络建设，只是在现有光纤网络中成功演示基于 QKD 的电子网络保密通信、实时加密

视频等应用。量子隐形传态已从实验室验证阶段进入校园/城市间实验阶段，传输距离拓展到几十千米量级，这是实现量子互连下一个里程碑的关键一步，亟待突破高品质的量子纠缠态制备、量子态存储中继和高效率量子态检测等技术瓶颈^[32]。

当前的量子通信主要采用QKD技术，存在QKD系统单跳传输距离较短、中继节点密钥落地等安全问题；QKD系统器件的实现与理论模型存在差距，可能会带来一些系统漏洞，导致系统被侧信道攻击；网络信息安全是一种体系安全，仅靠密钥分发是不完整的，而认证、签名等常见密码学功能恰恰与量子通信所追求的信息论安全性存在不兼容问题。

（三）量子测量

按照所测量的物理量不同，量子测量技术可以生成多种多样的技术装备，如量子导航、量子雷达、量子成像、量子侦察等。量子测量因为突破了标准量子极限，获得了超越经典测量极限的、超灵敏的微弱能量感知能力。单光子探测雷达技术产品相对成熟，已在测绘、环境、气象等领域开展应用。量子成像技术在全天候目标识别、水下成像以及地形测绘等多个领域具有广泛的应用潜力。量子磁场感知使得极弱磁场探测、磁场超高分辨成像等领域有了质的飞跃，核心器件主要有超导量子干涉仪、碱金属原子磁力仪、金刚石氮空位色心三大类。量子电场感知处于学术研究阶段，距离工程化应用仍需解决瞬时接收带宽受限、高灵敏度测量等问题。量子导航正在向小型化、芯片化方向演进，可为地面与空间卫星测控互联等领域，提供高精度定位、导航、授时服务保障。

量子测量正在逐步向工程化应用方向演进，但存在一些工程技术原理类的问题。量子纠缠雷达的纠缠源亮度不足，纠缠特性随传输距离急速下降，难以对远距离目标进行探测，应用场景受限。量子增强接收雷达优势是能够提高雷达的探测威力，缺点是抗干扰能力弱。单量子探测雷达在光学频段已经有工程样机，主要用于解决远程测距和大气探测等，但仍面临噪声问题和干扰问题，探测威力和全天候、全天候探测能力有待提升^[33]。量子成像速度

与图像信噪比呈相互制约关系，即量子成像算法处理时间过长，导致目标信息获取时效性较差。里德堡原子能够与外界电场耦合，可用于电场感知，其原子气室加工工艺是工程化应用的主要问题，包括长弛豫时间原子气室技术、无磁加热技术、原子芯片技术等。

（四）量子计量

SI量子化复现技术不断迭代，量子计量基准核心指标不断提升。聚焦时频、电学、热力学量子计量等方面加大研发投入，重点突破关键核心技术，提升国际竞争力。在时间频率计量方面，聚焦下一代秒定义变革，加强激光冷却和飞秒光梳技术研究，推动新一代光钟技术发展；在电流计量基准研究领域，重点研发可编程型量子电压芯片和量子噪声源芯片，进一步提升量子电压、电阻标准的不确定度水平；在热力学量子计量领域，发展特殊环境温度测量技术以及量子压力基准技术，完善深低温标技术体系，实现1 mK至1 K全温区的温度量值溯源。

面向量子科技的计量基础设施建设不断完善。围绕以量子计算、量子通信、量子精密测量为代表的量子科技对于极端条件、极限量程和极高精度的计量测试需求，建立完善量子计量基础设施。一是建立涵盖时间频率、电学、温度等关键参数的计量基准装置，实现宽频、宽量程、极高准确度的物理量测量能力；二是面向量子科技产业的现场计量需求，研制便携式、芯片尺度的量子计量标准，为量子产业提供现场、高准确量值溯源能力；三是打造极低温温度计量、极低温射频微波参数计量、极弱磁场与矢量磁场量子计量等实验平台，满足量子科技对极端条件下极值量程和极高精度计量的需求。

六、量子信息领域发展建议

全面推进量子计算、量子精密测量、量子通信、抗量子密码等方向迅猛发展，融入并大幅度提升信息获取、信息传递、信息存储、信息处理和利用等全过程信息能力，领跑量子信息科技和产业新赛道，成为科技强国建设的决定性力量。

(一) 以量子计算关键赛道为牵引, 系统布局量子信息产业发展

量子计算机产业体系涉及到一系列长周期重大项目, 需要多学科交叉融合和多技术领域集成创新, 形成我国量子科技发展的体系化能力。目前我国量子计算发展力量相对薄弱, 需要国家与产业保持一定的关注和投入。建议尽快制定我国量子计算机发展规划, 面向未来数字经济发展的需求与痛点, 加强对量子计算应用场景和产业化趋势的研究。开展量子计算经济规模测算, 评估量子计算对数字经济的拉动价值, 形成全国、全产业“一盘棋”的发展局面。

(二) 抓住自主可控关键节点, 系统部署量子信息产业链

运用科学工程体系思维, 融合全国分散的科技产业要素, 夯实工业软件、公共基准和工业母机基础, 打造计量体系、制造体系、验证体系^[34]。在推动信息技术的发展过程中, 应高度重视高精度“公共基准”、系统化“工业软件”以及高技术“工业母机”等基础领域的建设, 迅速弥补技术与装备方面的不足, 减少对外依赖的风险^[35]。从维护国家安全的视角出发, 基准构成了计量溯源体系的基石, 而公共基准则是量子信息产业标准体系的根本。因此, 应优先推动量子测量技术的应用, 构建稳固且自主可控的量子信息产业基础^[36]。

(三) 面向应用场景引导国家量子重大工程应用项目研发方向

积极动员企业、高校及研究机构, 以实际需求为引领, 专注于具备产业化潜力的量子技术, 广泛探索量子科技的应用领域, 如大数据搜索、人工智能、生物制药、金融、医疗及政务等, 通过应用不断优化技术, 促进量子信息产业生态的构建。同时, 紧密结合国家在量子信息实际应用中遇到的工程化难题, 深化“产学研用”合作, 指导量子科技产业生态体系集中力量解决这些关键问题。

(四) 十年积聚, 培养量子信息科技人才

量子信息应用基础研究和工程技术研发的人才较为匮乏, 需要相关部委协同, 采取教育和产业联合模式, 引进和培养具有计算机科学、数学、物

理、通信和工程技术背景的复合型人才, 打造量子计算上下游阶梯式人才梯队, 具备基础研究与产品研发能力。此外, 量子信息理论是科学理念的变革, 当前量子科技知识普及程度低。建议高等院校设立量子计算机相关课程, 培养专业人才, 同时积极激励量子信息领域科研人员重视科普, 投入精力宣讲量子信息技术及其应用, 从而奠定群众基础, 开拓应用市场、培养用户。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: December 13, 2024; **Revised date:** January 2, 2025

Corresponding author: Li Shuo is a professor-level senior engineer from Institute for Development and Planning, China Electronics Technology Group Corporation. Her major research field is development strategy research on electronic information field. E-mail: lishuo5@cetc.com.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on the Development Trend of global Future Information Industry and the Strategy of Opening up New Fields and New Tracks in China” (2023-XBZD-21)

参考文献

- [1] 李硕, 李欣欣, 张雪松, 等. 国外量子信息战略布局分析及启示 [J]. 信息安全与通信保密, 2024, 22(5): 11–20.
Li S, Li X X, Zhang X S, et al. Analysis and enlightenment of foreign quantum information science strategic layout [J]. Information Security and Communications Privacy, 2024, 22(5): 11–20.
- [2] QURECA. Quantum initiatives worldwide 2024 [EB/OL]. (2024-04-01)[2024-10-12]. <https://www.quireca.com/quantum-initiatives-worldwide/>.
- [3] Subcommittee On Quantum Information Science Committee on Science. National quantum initiative supplement to the president’s FY2023 budget [EB/OL]. (2023-01-06)[2024-10-12]. <https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2023/01/NQI-Annual-Report-FY2023.pdf>.
- [4] Department for Science, Innovation & Technology of UK. National quantum strategy [EB/OL]. (2023-03-01)[2024-10-12]. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1142942/national_quantum_strategy.pdf.
- [5] Government of Canada. Canada’s national quantum strategy [R]. Ottawa: Minister of Innovation Science and Industry, 2023.
- [6] 宋姗姗, 钟永恒, 刘佳, 等. 量子信息领域的国家战略布局与研发态势分析 [J]. 世界科技研究与发展, 2024, 46(1): 21–35.
Song S S, Zhong Y H, Liu J, et al. Analysis on national strategy layout and R&D trend of quantum information field [J]. World Sci-Tech R&D, 2024, 46(1): 21–35.
- [7] Government of Japan. Moonshot Goal 6: Science, technology and innovation- cabinet office home page [EB/OL]. [2024-10-12]. https://www8.cao.go.jp/cstp/english/moonshot/sub6_en.html.
- [8] IBM quantum summit 2023 [EB/OL]. [2024-12-10]. <https://www.>

- ibm.com/quantum/summit-2023.
- [9] Quantinuum launches industry-first, trapped-ion 56-qubit quantum computer, breaking key benchmark record [EB/OL]. (2024-06-05)[2024-12-10]. <https://www.quantinuum.com/press-releases/quantinuum-launches-industry-first-trapped-ion-56-qubit-quantum-computer-that-challenges-the-worlds-best-supercomputers>.
- [10] 范桁. 量子计算纠错取得突破性进展 [J]. 物理学报, 2023, 72(7): 7–9.
Fan H. Breakthrough of error correction in quantum computing [J]. Acta Physica Sinica, 2023, 72(7): 7–9.
- [11] Peruzzo A, McClean J, Shadbolt P, et al. A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor [J]. Nature Communications, 2014, 5: 4213.
- [12] TNO joins European collaboration to develop global quantum internet enabled from space [EB/OL]. [2024-12-10]. <https://www.tno.nl/en/newsroom/2023/09/laiqa-european-quantum-internet-space>.
- [13] Barzanjeh S, Pirandola S, Vitali D, et al. Microwave quantum illumination using a digital receiver [J]. Science Advances, 2020, 6(19): eabb0451.
- [14] Blakey P S, Liu H, Papangelakis G, et al. Quantum enhanced LIDAR using nonlocal dispersion [R]. San Jose: 2022 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2022.
- [15] Stolz R, Schmelz M, Zakosarenko V, et al. Superconducting sensors and methods in geophysical applications [J]. Superconductor Science and Technology, 2021, 34(3): 033001.
- [16] Stray B, Lamb A, Kaushik A, et al. Quantum sensing for gravity cartography [J]. Nature, 2022, 602(7898): 590–594.
- [17] Shvyd'ko Y, Röhlberger R, Kocharovskaya O, et al. Resonant X-ray excitation of the nuclear clock isomer ^{45}Sc [EB/OL]. (2023-09-27)[2024-12-10]. <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06491-w>.
- [18] 贺青, 邵海明, 梁成斌. 电磁计量学研究进展评述 [J]. 计量学报, 2021, 42(11): 1543–1552.
He Q, Shao H M, Liang C B. Review on the research progress of electromagnetic metrology [J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(11): 1543–1552.
- [19] 中国信息通信研究院. 量子信息技术发展与应用研究报告 (2023年) [R]. 北京: 中国信息通信研究院, 2024.
China Information and Communications Research Institute. Report on the development and application of quantum information technology (2023) [R]. Beijing: China Information and Communications Research Institute, 2024.
- [20] Deng Y H, Gu Y C, Liu H L, et al. Gaussian boson sampling with pseudo-photon-number-resolving detectors and quantum computational advantage [J]. Physical Review Letters, 2023, 131(15): 150601.
- [21] 我国第三代自主超导量子计算机上线 [EB/OL]. (2024-01-06)[2024-12-10]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202401/content_6924690.htm.
China's third-generation domestically-developed superconducting quantum computer is now online [EB/OL]. (2024-01-06)[2024-12-10]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202401/content_6924690.htm.
- [22] “祖冲之三号”量子计算云平台网址 [EB/OL]. [2024-12-10]. <https://quantumctek-cloud.com/login.html>.
The website address for the “Zu Chongzhi No.3” quantum computing cloud platform [EB/OL]. [2024-12-10]. <https://quantumctek-cloud.com/login.html>.
- [23] The website address for the “Wuyue” quantum computing cloud platform [EB/OL]. [2024-12-10]. <https://platform.qbosc.com/login>.
- [24] 李晓巍, 付祥, 燕飞, 等. 量子计算研究现状与未来发展 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(4): 133–144.
Li X W, Fu X, Yan F, et al. Current status and future development of quantum computation [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(4): 133–144.
- [25] Guo S A, Wu Y K, Ye J, et al. A site-resolved two-dimensional quantum simulator with hundreds of trapped ions [J]. Nature, 2024, 630: 613–618.
- [26] Shao H J, Wang Y X, Zhu D Z, et al. Antiferromagnetic phase transition in a 3D fermionic Hubbard model [J]. Nature, 2024, 632: 267–272.
- [27] Cai W Z, Mu X H, Wang W T, et al. Protecting entanglement between logical qubits via quantum error correction [J]. Nature Physics, 2024, 20: 1022–1026.
- [28] 李静, 高飞, 秦素娟, 等. 量子网络系统研究进展与关键技术分析 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(6): 80–95.
Li J, Gao F, Qin S J, et al. Research progress and key technologies of quantum network systems [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(6): 80–95.
- [29] Chen J P, Zhou F, Zhang C, et al. Twin-field quantum key distribution with local frequency reference [J]. Physical Review Letters, 2024, 132: 260802.
- [30] Liu J L, Luo X Y, Yu Y, et al. Creation of memory–memory entanglement in a metropolitan quantum network [J]. Nature, 2024, 629: 579–585.
- [31] ICV Tank, 光子盒研究院. 2023 全球量子计算产业发展展望 [R]. 北京: ICV Tank, 光子盒研究院, 2024.
ICV Tank, Quantum China. 2023 global quantum computing industry development prospect [R]. Beijing: ICV Tank, Quantum China, 2024.
- [32] Hu X M, Guo Y, Liu B H, et al. Progress in quantum teleportation [J]. Nature Reviews Physics, 2023, 5: 339–353.
- [33] 赵浴阳, 周鹏飞, 解天鹏, 等. 单光子激光雷达技术发展现状与趋势 [J]. 光电工程, 2024, 51(3): 7–29.
Zhao Y Y, Zhou P F, Xie T P, et al. Development status and trends of single-photon LiDAR technology [J]. Opto-Electronic Engineering, 2024, 51(3): 7–29.
- [34] 陆军, 张雪松, 栾添, 等. 量子信息系统发展探讨 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2018, 13(5): 497–501.
Lu J, Zhang X S, Luan T, et al. The discussion of quantum information system [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2018, 13(5): 497–501.
- [35] 陆军, 许守任. 重视“公基”“母机”, 强化新基建两大底层支撑 [N]. 科技日报, 2020-06-19(05).
Lu J, Xu S R. Emphasize “public benchmarks” and “industrial foundation machines”, strengthen the two fundamental supporting pillars of new infrastructure [N]. Science and Technology Daily, 2020-06-19(05).
- [36] 安达, 龚振炜, 陈岩, 等. 量子信息技术工程化应用发展初探 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2022, 17(8): 809–815.
An D, Gong Z W, Chen Y, et al. Tentative exploration on the development of engineering application of quantum information technology [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2022, 17(8): 809–815.