

量子传感与测量领域国际发展态势分析*

徐婧^{* * .1} 唐川^{1,2} 杨况骏瑜¹

(1. 中国科学院成都文献情报中心新一代信息科技战略研究中心,成都 610299;
2. 中国科学院大学经济与管理学院图书情报与档案管理系,北京 100049)

摘要:作为量子信息技术的重要发展方向之一,量子传感与测量可实现跨越式的超高精度测量,并在特定环境抵御噪声干扰,在地质勘测、空间探测、惯性制导和材料分析等重要领域具有广阔的发展和应用前景。本文梳理了近年来欧美等主要科技强国在该领域的重要战略规划与项目部署;并就量子传感与测量五大子领域的发展现状与趋势进行深入分析;最后,对我国提出了三条建议,包括以国家实验室为依托,明确重点研发方向,加快核心技术协同攻关;建立合作平台与机制,推进产业生态环境建设;重视复合型人才培养和对基础研究的长期支持。

关键词:量子传感;量子测量;战略规划;发展态势

DOI:10.16507/j.issn.1006-6055.2021.12.008

Analysis on the International Development Strategies and Trends of Quantum Sensing and Measurement*

XU Jing^{* * .1} TANG Chuan^{1,2} YANG Kuangjunyu¹

(1. Center for Strategic Study on New Generation Information Technology, Chengdu Library and Information Center, CAS, Chengdu 610299, China; 2. Department of Library, Information and Archives Management, School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As one of the important development directions of quantum information technology, quantum sensing and measurement can realize leapfrog ultra-high precision measurement and resist noise interference in specific environments, which has broad development and application prospects in important fields such as geological survey, space exploration, inertial guidance and material analysis. This paper compares the important strategic planning and project deployment in the field of quantum sensing and measurement in Europe and the United States in recent years, and provides in-depth analysis of the current situation and trends in the development of five major subfields of quantum sensing and measurement. Finally, this paper puts forward suggestions for the development of quantum sensing and measurement in China, including: relying on the national laboratory, clarifying the technology development path, laying out key core research directions; establishing a cooperation platform and mechanism, and promoting industrialization; paying attention to talent training and long-term support for basic research, etc.

Keywords: Quantum Sensing; Quantum Measurement; Strategy; Development Trend

* 中国科学院文献情报能力建设专项“科技领域战略情报研究咨询体系建设”(E0290001),中国科学院战略研究与决策支持系统建设专项“主要领域规划状态监测与分析”(GHJ-ZLZX-2020-31-1)

* * E-mail: jingxu@clas.ac.cn; Tel: 028-85228846

作为量子信息技术的重要发展方向之一,量子传感与测量可实现跨越式的超高精度测量,并在特定环境抵御噪声干扰。利用当前成熟的量子态操控技术,可以进一步提高测量的灵敏度。

工业革命以来,欧美国家发展并引领着计量基准和信息时代应用最广泛的电磁测量技术。我国电子测量仪器行业受国外隐形技术壁垒等因素制约,高端产品依赖进口。2019年,电子测量测试仪器市场国产仪器收入不到30%^[1]。高精度的计量基准和电磁测量技术已成为我国自主创新“卡脖子”中的“卡脖子”。近五年来,量子传感与测量的国际竞争日趋激烈,主要科技强国推出了一系列创新举措,如强化量子传感技术的交叉研究、制定量子传感与测量路线图、出台量子传感国家战略等。目前,高精度的微观测量(量子传感与测量)正处于前沿突破期,是我国摆脱高精度测量技术受制于人的前所未有之机遇。本文在此背景下,系统解读国际量子传感与测量领域的重大战略部署及近年来各子领域的研究情况,并基于此对我国发展量子传感与测量技术发展提出建议。

1 国内外量子传感与测量领域战略部署格局

近五年来,量子信息技术得到了全世界的关注,各大科技强国均在大力发展量子技术,构建量子技术产业生态,而量子传感与测量是其中的重要组成部分。

1.1 美国强调产业化与研究交叉

量子信息技术被美国认为是引领未来军事革命的颠覆性、战略性技术,量子传感与测量技术是其重要组成部分。从2002年起,美国多个部门和机构都制定了相关的战略规划,如美国国防部高

级研究局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)的《量子信息科学与计划规划》;并发布了多个报告,如美国国家科学与技术委员会的《推进量子信息科学发展:美国的挑战与机遇》报告、美国能源部发布《与基础科学、量子信息科学和计算交汇的量子传感器》报告,对量子传感与测量进行了补充^[2]。

2018年6月,美国推出《国家量子计划法案》,计划在十年内投入12.75亿美元,全力推动量子科学发展,将科研力量集中于三个方向:用于生物医学、导航的超精密量子传感器,能有效防止黑客侵入的量子通信,以及量子计算机^[3]。具体来说,在量子传感领域,将基于电子和光子开发量子增强型传感器,灵敏度达到基本量子噪声水平,并且在一些特定情况下,传感器的噪声水平可以低于本底噪声,也可以实现空间的分布式传感。例如,通过重力探测来实现对地表下材料成分(洞穴、矿产、地下基础设施)的遥感和成像、生物医学成像中近端磁场的感测、全球定位系统(Global Positioning System, GPS)缺失环境中的绝对导航,以及用于导航和通信的便携式原子钟网络。

2018年9月,美国国家科学与技术委员会在《量子信息科学国家战略概述》中提出,“量子测量有望为军事任务提供先进的传感器,需要发展新的测量科学和量子基准,改善导航和授时技术”^[4]。2019年12月,美国国防部国防科学委员会发布《量子技术的应用》报告摘要,认为量子传感、计算及通信系统的应用将为美国国防部开创量子使能能力的新时代^[5]。2020年2月,美国白宫发布的《美国量子网络战略远景》报告提出,要发展处理小尺寸和大规模量子处理器之间远程纠缠的新算法和应用,包括量子误差修正、量子云计

算协议和新的量子传感模式^[6]。

2020年7月,美国科学基金会(National Science Foundation, NSF)宣布建设新的量子信息研究中心。其中,由NSF量子飞跃挑战研究院投建,并由科罗拉多大学牵头的新研究所,纠缠科学和工程学的量子系统(Quantum Systems through Entangled Science and Engineering, Q-SEnSE)^[7]专注于构建具有真正量子优势的可扩展、可编程量子传感系统,探索多个平台,致力于将新技术转化为针对实际应用的可移植系统,并建设国家量子基础设施,促进技术成熟,推动研究与产业的交叉融合^[8]。该研究所于2020年9月获得为期5年的资助,资助总金额为770万美元。

2020年8月,美国能源部在未来5年投入6.25亿美元,由其下属的国家实验室牵头建设5家量子信息科学研究中心。每个中心都将有一个跨科学和跨工程领域的合作研究团队,利用美国能源部科学办公室来统筹所有研究资源,整合来自各技术领域的要素,实现跨学科跨工程研究^[9]。其中,下一代量子科学与工程中心(Q-NEXT)由美国阿尔贡国家实验室领导,建设周期5年,耗资1.15亿美元^[10],重点关注三项核心量子技术,其

中之一就是物理、材料和生命科学领域的变革性应用实现前所未有灵敏度的传感器。超导量子材料和系统中心(Superconducting Quantum Materials and Systems Center, SQMS)由费米国家加速器实验室领导,主要负责构建和部署用于计算和传感的高级量子系统。

1.2 欧盟为未来10年拟定三阶段发展目标

从2016年起,欧盟委员会连续发布多个量子计划,其中“量子技术旗舰计划”最为重要。该计划明确指出将斥资10亿欧元大力支持包括量子传感在内的五大量子技术领域,并于2018年正式启动首批20个研究项目,得到了“地平线2020计划”的1.32亿欧元支持^[11]。如表1所示,在首批量子技术旗舰项目中,有4项是量子传感与测量项目。

2020年5月,该计划发布《战略研究议程》报告,针对自身长达十年的规划设置了三个阶段性目标。其中量子传感与测量的三个阶段是:①3年内开发出采用单量子比特相干且分辨率和稳定性优于传统对手的量子传感器、成像系统与量子标准,并在实验室中演示;②6年内开发出集成量子传感器、成像系统与计量标准原型,并将

表1 首量子传感与测量资助项目

Tab. 1 First Batch of Quantum Sensing and Measurement Grants

项目名称	项目内容	牵头国家	经费/百万欧元	截至2020年10月取得的进展
金刚石动态量子多维成像(MetaboliQs)	利用室温金刚石量子动力学实现安全的多模式心脏成像,以改善心血管疾病的诊断	德国	6.667	通过使用五种不同类型传感器的微电子机械系统技术以及创新的集成和封装技术
集成量子钟(iqClock)	利用量子技术促进超高精度和可商用的光学时钟发展	荷兰	10.092	在下一代集成型/紧凑型光学量子钟方面取得进展,比目前商用的标准微波原子钟稳定100倍
微型原子气室量子测量(MACQSIMAL)	开发用于测量物理可观测量的量子传感器,造福于自动驾驶、医学成像等诸多领域	瑞士	10.209	开发出超浅金刚石氮-空位(NV)色心的均匀层,具有优秀的相干时间和传感/极化效率,提高成像灵敏度(7倍)
金刚石色心量子测量(ASTERIQS)	开发基于金刚石的高精度传感器,以定量测量磁场、电场、温度或压力等物理量	法国	9.747	在基于金刚石NV色心的量子传感器开发方面取得进展,可用于室温设备,例如汽车工业和医疗仪器

首批商业化产品推向市场,同时在实验室中演示用于传感的纠缠增强技术;③10年内从原型机过渡至商业设备。

1.3 英国领先规划30年商业化路线图

英国已将量子技术提升到国家战略高度,早在2014年就开始实施国家量子技术计划,未来20年的发展愿景和目标在其2015年发布的《国家量子技术战略》和《英国量子技术路线图》中被确立,核心是打造一个长期可持续发展的量子科技产业。英国的国家量子技术计划在第一阶段(2014—2019年)优先发展量子传感、量子精密测量和量子增强成像技术,同时也支持量子通信和量子计算的发展。从2019年底开始的第二阶段中,该计划更加强调量子技术的商业化,重点是新建若干由行业驱动、服务技术转化的“创新中心”,以针对特定市场开发相关商业产品。2019年6月,政府通过新增的产业战略挑战基金渠道投资1.53亿英镑推进量子技术商业化,而此前政府已通过产业战略挑战基金为4个量子器件原型研发先导项目投入2000万英镑。2021年,英国投资9300万英镑新建英国国家量子计算中心,并在牛津大学、伯明翰大学、约克大学和格拉斯哥大学建立4个量子技术中心。

英国技术战略委员会于2015年提出了英国未来30年量子技术商业化应用的初步路线图^[12]。其中,对量子传感与测量的规划包括:1)5年内,为全球1400家量子技术研究机构提供实验设备;制造英国自己的原子钟。2)10年内,实现低成本的气体检测;研发非破坏性的生物显微镜。3)5—10年,实现抗干扰GPS精度级水下导航;环境监测与地震预测等空间应用;为民用工程探测地下设施及废弃物。4)5—20年,实现对心脏和大脑功能的医疗诊断。5)10—15年,实现

无GPS的军用车辆导航;更好、更安全的地下采矿导航。6)10—20年,制造个人和专业的导航设备,包括汽车和手机;改进军用光学及热成像技术。7)20—30年,制造高性能、低功耗量子化协处理器。

1.4 日本量子飞跃旗舰计划稳步推进

日本作为现代科技发展的重要国家之一,对量子信息技术十分关注,于2018年发布量子飞跃旗舰计划(Q-LEAP),将量子测量与传感作为三大技术领域之一,目标是面向未来传感器市场小型化、低成本化的需求,研发先进的固态量子传感器和量子传感器技术,广泛应用于磁场、电场、温度、光等的测量活动。在具体研发方向上,日本将量子传感与测量上的研发主要集中在磁传感、量子生物等方向,重点关注固态量子传感器(金刚石NV色心等)、量子惯性传感器和光学晶格钟;通过对固态量子传感器的先进控制技术研发创新的传感器系统,主要开发用于生物医学技术的量子传感设备,包括具有高灵敏度和高空间分辨率的脑磁图测量原型系统、基于电能的电流和温度监测原型系统;研究生物纳米量子传感器、超灵敏MRI(磁共振)/NMR(核磁共振)以及基于量子理论阐述和模拟生命现象、开发可用于医学和生命科学研究的测量技术原型^[13]。

1.5 中国强调量子科技整体发展

中国较早就将量子技术纳入重要战略规划。2013年,《国家重大科技基础设施建设中长期规划(2012—2030年)》首次部署了量子通信网络试验系统。2016年,《国家创新驱动发展战略纲要》和《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》把量子信息技术作为重点培养的颠覆性技术之一,同时提出围绕量子通信部署重大科技项目和工程。2020年10月16日,习近

平总书记在中共中央政治局集体学习时强调要加强量子科技发展战略谋划和系统布局。同月,《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》提出要瞄准量子信息等前沿领域,实施一批具有前瞻性、战略性的国家重大科技项目。至此,中国实现了由重点发展量子通信向量子科技整体发展的转换。

2016年,“量子调控与量子信息”重点专项成立,量子调控与量子信息技术被纳入国家发展战

略,明确提出要在核心技术、材料、器件等方面突破瓶颈,实现量子相干和量子纠缠的长时间保持和高精度操控,并应用于量子传感与测量等领域。“地球观测与导航”重点专项部署了“原子陀螺仪”“空间量子成像技术”“原子磁强计”“芯片原子钟”等项目,为量子传感与测量的研发提供了重要支持。2021年设立的“智能传感器”重点专项将量子传感与测量作为重要内容。国家自然科学基金委数学物理科学部于2014年开始实施“精密测量物理(2014—2022年)”重大研究计

表2 国家重点专项中的量子测量领域研究主题

Tab.2 Research Topics of Quantum Sensing and Measurement in National Key Projects

专项名称	研究主题	主要内容
量子调控与量子信息	基于原子与光子相干性的量子精密测量	光子-原子耦合新机理,光子-原子关联量子干涉技术。
	超越标准量子极限的量子关联精密测量	基于囚禁原子与离子的超越标准量子极限的新型原子频标,单量子与多量子关联高灵敏测量与应用。
	高精度原子光钟	基于囚禁离子和冷原子的高精度原子光钟、光钟比对及应用。
	基于少体量子关联态的精密测量	可控少体量子关联态的制备、表征及在突破标准量子极限精密测量中的应用。
	基于金刚石色心的量子相干控制及应用	基于金刚石色心自旋的量子调控及其在量子计算与量子精密测量中的应用。
地球观测与导航	原子分子瞬态量子过程的精密测量	研发超宽频段超快光场技术及阿秒时间分辨测量技术,发展光子、电子和离子的多维关联谱学新方法,开展原子分子飞秒、阿秒瞬态过程和量子多体过程的精密测量,揭示原子分子多体关联动力学规律和调控机理。
	空间量子成像技术	面向同时兼顾高空间分辨率、夜间弱光成像和全天时地对地观测能力的各类区域性监测任务需求,开展基于激光、太阳光、自发辐射等光子探测技术的空间量子成像技术研究。
	高精度原子自旋陀螺仪技术	针对海洋资源勘探对水下探测器长航时高精度导航技术需求,开展高精度原子自旋陀螺的理论及方法研究及关键技术攻关,研制原理样机;同时,探索面向便携式自主导航的金刚石色心原子陀螺的理论及方法,研制原理验证样机。
	高精度原子磁强计	针对我国导航系统对高精度地磁测量的亟需,开展高精度原子磁强计的理论及方法研究及关键技术攻关,研制三轴矢量高精度原子磁强计原理样机,实现我国高精度导航技术的跨越式发展。
智能传感器	芯片原子钟技术	针对我国导航系统对小型化高精度授时器件的亟需,开展芯片原子钟的理论及方法研究及管件技术攻关,研制芯片原子钟原理样机,提高我国高精度导航技术的跨越式发展。
	高精度力学量的量子传感技术研究	面向高精度、小体积力学量的量子传感应用需求,探索高精度力学量的量子传感新机制;研究微观尺度下量子调控及增强机理;研究量子传感结构跨尺度可控制造方法;研究噪声抑制及传感信号高效提取方法;研制高精度、小体积力学量量子传感器样机,开展试用验证。
	深地探测极高灵敏度电磁传感器技术及深部探矿示范	针对当前金属矿产资源勘察中传感器探测深度、分辨率不足以及勘探准确率低等问题,研究高精度、高线性度宽频磁场/电磁传感器等新型传感器材料和工艺;研究高精度、高分辨率的电场、磁场和电磁场传感器设计制造技术与测试标定方法;研究新型传感器的抗干扰技术;研制核心部件国产化的高精度电场、磁场和电磁场传感器系列产品,开展找矿示范应用。

划,其中一项重要的研究内容就是量子传感与测量。

1.6 其他国家基于优势领域推动量子产业化进程

德国于2018年推出《量子技术:从基础到市场》联邦政府框架计划,预计在4年内(2018—2022年)斥资6.5亿欧元,对量子计算、量子卫星以及量子测量技术等提供支持。

2020年2月,荷兰宣布将在未来五年内对量子技术投资2350万欧元,在超冷原子源、光子源和光子检测器等技术优势领域推动进一步发展。

2020年5月,澳大利亚联邦科学与工业研究组织(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, CSIRO)制定并发布量子技术路线图——《增长的澳大利亚量子技术产业:争取40亿澳元的产业发展机遇》,明确支持量子生态系统建设。根据CSIRO的预测,量子传感与测量领域将在2040年为澳大利亚创造3000个职位以及9亿澳元的经济价值。澳大利亚将在军用及民用精确导航、地下环境量子重力测量、增强量子传感器、量子磁强计等澳大利亚优势领域开展攻关和商业化应用。

2021年1月,法国宣布启动法国量子技术国家战略,并计划5年内投资18亿欧元促进量子计算、量子通信和量子传感研究,其中2.5亿欧元用于量子传感器开发。

2 量子传感与测量领域研究现状与趋势

量子传感与测量的基本原理是利用磁、光与原子的相互作用,实现对各种物理量超高精度的测量,可大幅超越经典测量手段。与传统测量技术相比,量子测量基于微观粒子量子态精密测

量,具有更高的测试精度、灵敏度和稳定性,包括实现量子时间测量、量子重力测量、量子磁场测量、量子惯性测量和量子成像五个子领域的传感与测量。2018年,郭光灿指出,时间/频率、电磁场、压力、温度以及惯性等物理量的高精度测量已可以利用量子体实现。

量子传感与测量技术在生物医学等学科已有相关应用研究^[14]。近两年,量子传感与测量研究热度持续上升,目前主要集中在时频同步、磁场测量、定位导航、重力测量和目标识别/成像等领域^[15]。Cerca Magnetics公司^[16]开发了一个集成的光泵磁强计(脑磁图系统),利用量子传感技术对大脑磁场进行采样分析;翁堪兴、周寅等^[17]开发了一个小型化量子重力仪,可进行高精度的重力测量;李传锋、项国勇等^[18]在量子精密测量实验中实现3个参数同时达到海森堡极限精度的测量,测量精度比经典方法提高13.27分贝;杜江峰、石发展等^[19]基于金刚石固态单自旋体系在室温大气环境下实现了突破标准量子极限的磁测量。

在量子传感与测量领域,不同类型测量技术和传感器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量子测量方案因其基于已有技术平滑升级演进,所以发展更加成熟,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^[20]。英国国家量子技术传感器和计量学领域中心对量子传感和测量产业化已有了一些时间规划,如图1、图2所示。计划在2030年内完成量子传感和测量领域相关设备的研发生产,使其从实验室原型迈向小型、可靠、可部署的实用设备。

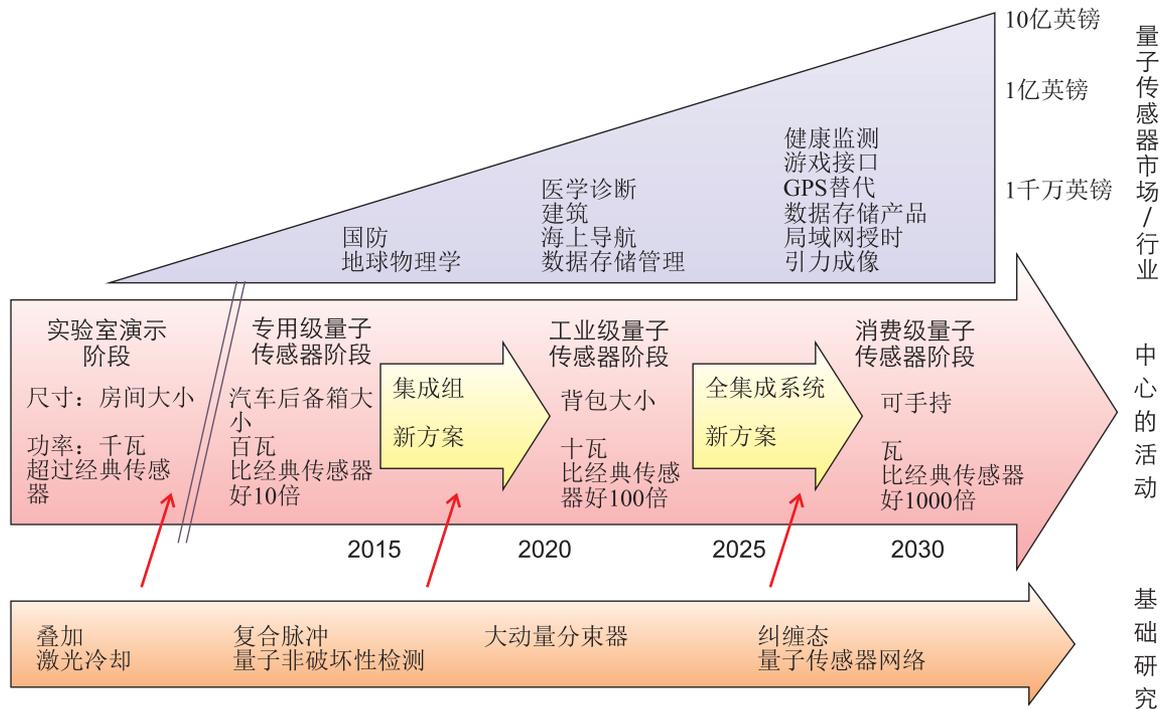


图1 量子传感器开发路线图^[21]

Fig.1 Quantum Sensor Development Roadmap^[21]

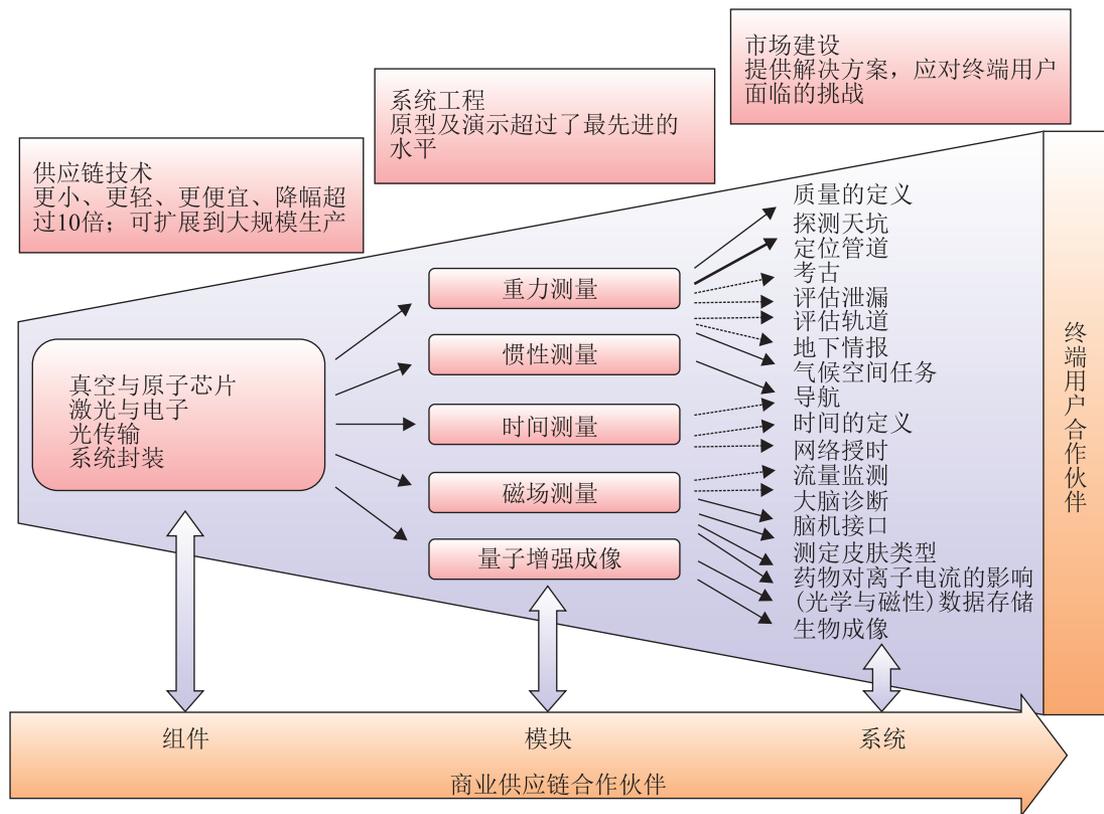


图2 量子传感器开发的三个阶段^[21]

Fig.2 Three Stages of Quantum Sensor Development^[21]

2.1 量子时间测量

通过量子传感与测量手段可以实现对时间的精密测量。时间精密测量是现代生活中一项非常重要的使能技术,涉及行业有:电信网络、金融市场、雷达系统、卫星导航以及油气勘探等。

当前最精确的实验室计时器是基于原子或离子中光学频率转换的光学时钟。2019年美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)报道芯片级原子钟,其蒸汽室体积仅为 $10 * 10 * 3\text{mm}^3$,功耗约为275 mW,不确定度达到 1e^{-13} 量级^[22]。欧盟、美国和中国在光学时钟相关技术研发方面走在世界前列,2018年欧盟量子旗舰计划项目“微型原子气室量子测量(MACQSIMAL)”将原子蒸汽室作为微型原子钟的基础,且证明了利用这种技术有可能达到相对较低的成本^[23]。同样,欧盟量子旗舰计划项目“集成量子钟(iqClock)”正在开发用于紧凑型光学量子时钟的技术,目的是开发一种新的超辐射激光器,以使这种类型的时钟在实验室外更加稳固和易于部署^[24]。2019年美国加州理工大学的研究团队提出一种单原子读数的原子阵列时钟,其能够兼顾离子钟和光晶格钟的优势,精度可达 10e^{-15} 量级^[25]。2017年武汉数物所 40Ca^+ 光钟不确定度达 1e^{-17} 量级^[26]。2020年中科大“墨子号”星地量子安全时间传递达30ps精度^[27]。2020年美国NIST报道了光钟输出可成功转换到微波波段,并保证其不确定度优于 10e^{-18} 量级。

未来,冷原子系统有望成为新一代紧凑型光学时钟的基础。冷原子钟运用激光冷却技术将原子团冷却至绝对零度附近,抑制原子热运动,利用泵浦激光进行选态,提高相干时间,利用原子能级间的相干叠加进一步提升精度。未来可

进一步研究利用纠缠构建量子时钟网络,利用原子间的纠缠特性进一步降低不确定度,从而突破经典极限。不过目前该技术成本较高,器件体积较大。高精度、小型化和低成本是量子时间精密测量发展的趋势^[20]。

2.2 量子重力测量

地球重力场反映了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。量子技术的加入有望提高重力传感器的灵敏度,从而显著提升现有地下和穿墙扫描技术的穿透能力和有效分辨率,并降低成本,对土木工程、公用设施和运输基础设施例行监测等领域有重要的应用意义。

量子重力测量研究的突破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,但目前工程化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^[20]。

2018年加利福尼亚大学报道了一种可移动原子干涉重力仪,结构简单,方便运输与组装,同时灵敏度可达到 $37 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[28];2020年浙江工业大学研制的小型化可移动原子干涉重力仪在车载倾斜路况下测量精度达 $30 \mu\text{Gal}$,且船载条件下可以实现测量精度小于 1mGal ^[29]。2021年,华中科技大学引力中心团队研制出实用化的高精度铷原子绝对重力仪装备,并成功交付给中国地震局地震研究所^[30]。

2.3 量子磁场测量

精密微弱磁场的测量是现代精密测量科学中一个非常重要的方向,不仅对基础物理对称性研究有非常重要的意义,同时在军事、生物医学、古地磁学、外空间探索以及工业无损检测等领域都有广泛的应用。

高灵敏度量子磁力仪主要有光泵磁力仪、自旋交换弛豫(SERF)原子磁力仪以及相干布居囚禁(CPT)磁力计等。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。

2002年,美国普林斯顿大学全球首次实现无SERF态,基于SERF原子自旋效应的磁场和惯性测量,将测量灵敏度大幅提升,超越传统方法4个量级以上,使得磁场测量进入 aT(10^{-15} 特斯拉)时代;2007年,美国NIST实现小型化光泵磁力仪,灵敏度达到 $5 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$, 体积为 25 mm^3 ;2013年,奥地利空间研究中心和格拉茨技术大学合作研制了基于CPT原理的耦合暗态磁力仪;2016年;北京航天控制仪器研究所完成小型CPT原子磁力仪产品的研制,实现了 $0\text{---}68 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 灵敏度的SERF磁力计;2017年,兰州空间技术物理研究所实现一种新型的激光泵原子磁力仪,灵敏度达到 $1 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[20];2019年,美国麻省理工学院开发硅芯片金刚石色心量子传感器,实现了自旋量子位测量系统和CMOS技术的结合^[31];同年,中科大实现了基于金刚石色心的50纳米空间分辨率高精度多功能量子传感^[32];2020年,北航等团队合作开发原子自旋SERF超高灵敏磁场测量平台,灵敏度达到 $0.089 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$, 指标高于国外公开报道^[33];同年,航天33所研制小型化SERF

磁强计,灵敏度约为 $10 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$, 完成了8通道脑磁探测^[20]。

2.4 量子惯性测量

惯性传感器主要用于检测倾斜、冲击、振动、旋转、多自由度运动,其包括加速度计(或加速度传感计)和角速度传感器(陀螺)以及它们的单、双、三轴组合惯性测量单元,广泛应用于导航、飞行器和舰船制导以及自动驾驶等领域。目前的GPS定位精度仅限于几米,而且并非在所有环境下(如隧道、水下)都可用,还可能受到干扰。量子传感与测量技术有望将其精确度提高到厘米级别,并能避免干扰,在自动驾驶、无人机、潜艇、导弹等领域有广阔的前景^[20]。

在量子惯性测量领域,特别是角速度传感器(陀螺)领域,核磁共振陀螺发展最为成熟,已经进入芯片化产品研发阶段,而原子干涉、超流体干涉和金刚石色心陀螺目前还处于原理验证或技术试验阶段,距离实用化较远。2012年美国加州大学伯克利分校首次提出金刚石色心的陀螺方案;北航和中航科工33所从2011年起开始研究核磁共振陀螺,2013年研发出样机,2016年实现芯片级陀螺研制;2018年,美国加州大学欧文分校提出可以批量生产微型核磁共振陀螺仪元件的方法;2019年,ColdQuanta公司依托冷原子技术,研究量子定位(陀螺仪和原子钟)和量子传感器(射频检测器)^[34]。

2.5 量子成像

量子成像是基于量子纠缠的一种新型成像技术,相较传统的成像技术,可以在红外波段获得高分辨率图像,更易在军事探查、航空探测等领域挥发作用。其技术难点在于会产生大量的纠缠光子,且成像时间较长^[35]。

2012年,美国研发了一种抗干扰能力超强的

量子雷达,能对目标成像探测,有效发现隐形飞机;2018年4月,可穿透强背景噪声的量子雷达技术被加拿大沃特卢大学研发,能以极高的精度识别出包括隐身飞机和导弹在内的目标;同年9月,英国约克大学宣布开发出量子雷达样机;同年11月,俄罗斯无线电技术与信息系统联合企业成功完成了量子无线电雷达探测任务;同年11月,中国电子科技集团有限公司自主研发出量子雷达样机,突破同类雷达的探测极限,是当时国际上第一部实现远程探测的量子雷达^[36];2020年,奥地利科学技术学院实验证明微波波段的量子照明,能照亮距离为1米的室温物体,与经典雷达相比信噪比提高了3倍^[37];同年,中电14所与南京大学联合研发的超导阵列单光子探测器雷达系统进行外场测试,实现了对数百公里外移动和固定小目标的实时跟踪探测^[20]。

3 启示与建议

量子传感与测量是量子信息领域重要研究方向之一,也是有望最先实现应用和产业化的方向之一,在地质勘测、空间探测、惯性制导和材料分析等重要领域具有广阔的发展和应用前景。美国市场调研公司 BCC Research 于 2019 年发布的市场报告显示,到 2024 年全球量子传感和测量市场规模将达到 2.99 亿美元,年复合增长率在 13.2% 左右^[38]。

欧美一直致力于量子传感与测量领域的产学研深度融合,在某些领域实现了量子传感与测量产品的小型化、集成化和商品化。目前,中国在量子传感与测量领域走在国际前列,不过在个别领域与欧美国家报道的技术水平还有一定的差距。与欧美国家相比,国内研究机构和企业之间的合作交流有限,成果转化困难。基于此,本

文提出以下建议,为我国在相关领域的工作提供有益参考。

1) 以国家实验室为依托,明确重点研发方向,加快核心技术协同攻关

目前,量子信息技术还主要处于基础研究时期,研究投入大、短期回报率低。其中,量子传感与测量领域相较于量子计算等技术来说,应用成熟度相对较高。

建议发挥我国举国体制的优势,依托相关国家实验室(如合肥国家实验室),在研判量子传感与测量未来发展趋势的基础上,明确重点研发方向,同时联合相关企业,加快核心技术的协同攻关,并及早布局关键性空白技术领域,全面推动量子传感与测量的原始创新和产业化进程。

2) 建立合作平台与机制,推进产业生态环境建设

量子传感与测量领域的应用涉及面广、优势明显,但目前其应用方向和应用场景还有待开发,技术转化为实用性产品还有很大的距离,需要产学研用金五方的协同推进。然而我国目前研究的主力军仍以科研院校为主,企业参与度不高,合作交流形式较为单一。

建议从国家层面建立合作平台与机制,加强产学研间的沟通交流,对应用发展方案和产业推动路径等问题进行研究部署,加速科研成果转化,推进量子传感与测量领域产业化发展;同时建议联合各行业,包括传统工业领域的力量,在若干重要行业建立以产业发展为主导的创新联盟,推进量子传感与测量产业生态环境建设,树立我国产业标准。

3) 重视复合型人才培养和对基础研究的长期支持

量子信息科学是融合多学科的大工程科学,

需要复合型人才。

建议我国聚焦电子材料、系统架构、器件研发、算法设计等多个方向加强相关学科和课程体系建设,加速培养量子科技领域的专业人才和后备力量,为量子传感与测量领域提供有效支撑,为应用转化奠定基础;借助创建国家实验室的良机,吸引和汇聚国内外量子科技领域的优秀人才,加强高层次学术交流;针对基础理论研究,加大长期可持续的经费投入,建立高效的运行管理模式,改进不合理的绩效考核和人才评价机制,激励科研人员潜心基础研究,以创造出系列原创性重大科研成果。

致谢 中国科学技术大学教授、博士生导师韩永健,电子科技大学研究员、博士生导师邓光伟对本论文提出了宝贵的意见与建议,谨致谢忱!

参考文献

- [1]北京普华有策信息咨询有限公司. 2021—2027年无线电测量仪器行业细分市场研究与发展趋势预测报告[EB/OL]. [2021-06-08] <https://new.qq.com/omn/20210608/20210608A04O9900.html>.
- [2]U. S. Department of Energy, Office of Science. Quantum Sensors at the Intersections of Fundamental Science, Quantum Information Science & Computing[EB/OL]. [2021-05-07]. https://science.osti.gov/-/media/hep/pdf/Reports/DOE_Quantum_Sensors_Report.pdf?la=en&hash=B2378FA2253DF340A218D6B37C44293403389C59.
- [3]U. S. Senate Committee on Commerce, Science, &Transportation. Congressional Science Committee Leaders Introduce Bill to Advance Quantum Science[EB/OL]. [2019-10-28]. <https://www.commerce.senate.gov/2018/6/congressional-science-committee-leaders-introduce-bills-to-advance-quantum-science>.
- [4]National Science & Technology Council. National Strategic Overview for Quantum Information Science[EB/OL]. [2021-05-07]. https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2020/10/2018_NSTC_National_Strategic_Overview_QIS.pdf.
- [5]Department of Defense, Defense Science Board. New Device Accelerates Development of Extraordinary Quantum Networks [EB/OL]. [2021-05-07]. https://www.globalsecurity.org/military/library/report/2019/quantum-technologies_execsum_dsb_20191023.pdf.
- [6]The White House, National Quantum Coordination Office. A Strategic Vision for America'S Quantum Networks [EB/OL]. [2021-5-7]. <https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2021/01/A-Strategic-Vision-for-Americas-Quantum-Networks-Feb-2020.pdf>.
- [7]National Science Foundation. NSF Quantum Leap Challenge Institute for Enhanced Sensing and Distribution Using Correlated Quantum States[EB/OL]. [2020-07-20]. https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=2016244.
- [8]University of Colorado Boulder. One Institute, Three Grand Challenges [EB/OL]. [2021-05-10]. <https://www.colorado.edu/research/qsense/one-institute-three-grand-challenges>.
- [9]Green Car Congress. US DOE to award MYM625M for Quantum Information Science Research Centers; Argonne Quantum Loop Testbed[EB/OL]. [2020-

- 01-13]. <https://www.greencarcongress.com/2020/01/20200113-qis.html>.
- [10] Department of Physics. Q-Next Collaboration Awarded National Quantum Initiative Funding [EB/OL]. [2020-08-26]. <https://www.physics.wisc.edu/2020/08/26/q-next-collaboration-awarded-national-quantum-initiative-funding/>.
- [11] European Commission. Quantum Technologies Flagship Kicks off with First 20 Projects [EB/OL]. [2018-10] http://europa.eu/rapid/press-release_IP-18-6205_en.htm
- [12] UK Technology Strategy Board. A Roadmap for Quantum Technologies in the UK [EB/OL]. [2015-09]. <https://epsrc.ukri.org/newsevents/pubs/quantumtechroadmap/>.
- [13] Japan Science and Technology Agency. MEXT-Quantum Leap Flagship Program (MEXT Q-LEAP) [EB/OL]. [2018-03-30]. <https://www.jst.go.jp/stpp/q-leap/en/index.html>.
- [14] 郭光灿. 量子十问之九量子传感刷新测量技术极限[J]. 物理, 2019, 48(6): 397-398.
- [15] 张萌, 赖俊森. 量子测量技术进展及应用趋势分析[J]. 信息通信技术与政策, 2021, 47(9): 72-78.
- [16] 张欣. 大脑的量子传感技术[J]. 物理, 2021, 50(3): 195-196.
- [17] 翁堪兴, 周寅, 朱栋, 等. 小型化量子重力仪高精度重力测量[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51(7): 40-53.
- [18] 人民日报. 中国科学技术大学在量子精密测量领域获重要进展 [EB/OL]. (2021-01-05). <http://scitech.people.com.cn/n1/2021/0105/c1007-31988728.html>
- [19] 吴长锋. 我国首次在固态体系实现突破标准量子极限的磁测量[N]. 科技日报, 2021-08-16(3).
- [20] 中国信息通信研究院. 量子信息技术发展与应用研究报告(2018) [EB/OL]. [2021-05-07]. http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/201812/t20181218_190861.htm.
- [21] BONGS A K, BOYERA V, CRUISEA M A, et al. the UK national Quantum Technology Hub in Sensors and Metrology [EB/OL]. [2019-01]. <https://research.birmingham.ac.uk/en/publications/the-uk-national-quantum-technologies-hub-in-sensors-and-metrology>.
- [22] NIST. NIST Team Demonstrates Heart of Next-Generation Chip-scale Atomic Clock [EB/OL]. [2019-05]. <https://www.nist.gov/news-events/news/2019/05/nist-team-demonstrates-heart-next-generation-chip-scale-atomic-clock>
- [23] European Commission. About macqsimal [EB/OL]. [2018-10]. <https://www.macqsimal.eu/>
- [24] European Commission. Iqclock [EB/OL]. [2018-10]. <https://qt.eu/about-quantum-flagship/projects/iqclock/>.
- [25] MADJAROV I S, COOPER A, SHAW A L, et al. An Atomic Array Optical Clock with Single-atom Readout [J]. Physical Review X, 2019, 9(4): 041052.
- [26] 王叶兵. 铯原子光钟的研制和评估[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [27] 中国科学院. 中国科大利用“墨子号”量子科学实验卫星实现安全时间传递 [EB/OL]. [2020-05-13]. https://www.cas.cn/syky/202005/t20200512_4745900.shtml
- [28] WU X, PAGEL Z, MALEK B S, et al. Gravity

- Surveys Using a Mobile Atom Interferometer[J]. Science Advances, 2019, 5(9): eaax0800.
- [29] 吴彬, 林佳宏, 张凯军, 等. 基于原子重力仪的车载静态绝对重力测量[J]. 物理学报, 2020, 69(6): 25-32.
- [30] 腾讯网. 打破技术垄断: 华中科大研制首台高精度量子重力仪, 已交付使用[EB/OL]. [2021-01-09]. <https://new.qq.com/omn/20210109/20210109A06EXN00.html>
- [31] MIT 新闻. MIT 首次在芯片上打造基于金刚石的量子传感器或取代车辆上的 GPS[J]. 超硬材料工程, 2019, 31(5): 28-28.
- [32] CHEN X D, LI D F, ZHENG Y, et al. Superresolution Multifunctional Sensing with the Nitrogen-vacancy Center in Diamond [J/OL]. Physical Review Applied, <https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.12.044039>.
- [33] 中国航天科工三院. 量子技术研发的航天力量——三院 33 所研制我国首个核磁共振陀螺原理样机侧记. [EB/OL]. [2016-08-26]. <http://www.casic.com.cn/n12377419/n12378177/c12678681/content.html>.
- [34] 中存储. 量子计算公司 ColdQuanta 获美国政府 280 万美元资金支持核心技术发展. [EB/OL]. [2019-10-31]. <https://www.chinastor.com/quantum/1031429362019.html>.
- [35] 葛家龙. 量子成像和量子雷达在遥感探测中的发展评述[J]. 中国电子科学研究院学报, 2014(1): 1-9.
- [36] 远望智库. 世界主要国家量子信息技术发展及应用问题研究. [2020-10-20]. <http://www.kunlunce.com/llyj/fl1/2020-10-20/147535.html>.
- [37] BARZAN JE H S, PIRANDOLA S, VITALI D, et al. Microwave Quantum Illumination Using a Digital Receiver [J/OL]. Science Advances, <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abb0451>.
- [38] BCC Research. Quantum Sensors Market to Grow 13% Annually through 2024, Boosted by R&D & IoT [EB/OL]. [2019-09-09]. <https://www.epdtonthenet.net/article/173711/Quantum-sensors-market-to-grow-13--annually-through-2024--boosted-by-R-D-IoT.aspx>.

作者贡献说明

徐 婧: 收集整理资料、撰写文章初稿、修改论文;
唐 川: 参与设计文章框架、修改论文;
杨 况: 整理资料、修改论文。

作者简介



徐 婧: 副研究员; 出版专著 1 部; 主要研究方向: 信息科技战略情报研究。