

趋势观察：

国际量子传感与测量领域 战略部署与研究热点^{*}

量子传感与测量技术是量子信息技术的主要方向之一，2019年起代表精密测量最高水平的7个基本物理量的计量基准已经全部通过量子信息技术实现。量子传感与测量是通过调控与观测量子级别的微观粒子系统来进行物理量的测量，与传统技术有明显区别，其主要的测量方案可以分为3类：运用量子体系的分离能级结构来测量物理量；使用量子相干性来测量物理量；使用叠加态和纠缠态等量子体系中独有的物理现象来提高测量灵敏度或精度。在经济社会与国防建设领域，依托量子传感与测量技术可开发比传统技术精度更高、成本更低和尺寸更小的精密测量设备，能实现无全球定位系统（GPS）信号环境下的定位与导航；在科学研究领域，借助量子传感与测量技术可帮助科学家探寻宇宙暗物质，有望推动宇宙天文学、粒子物理学和原子分子物理学等多个基础学科的发展^①。目前，正是我国发展量子传感与测量技术，实现精密测量领域自主创新的大好时机。本文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研究热点，并基于此提出对我国发展量子传感与测量技术的建议。

1 国际量子传感与测量领域战略部署

目前，量子传感与测量技术的前沿研究主要集中在以美国、欧盟和中国为首的国家 and 地区，本文根据技术发展程度和特点，选取美国、欧盟、中国、澳大利亚和日本等典型代表进行分析。

1.1 美国：重点布局研究中心，强调多学科融合研究

美国在《国家量子计划法案》的整体布局下，深入开展量子信息技术的研究，投入经费远超原计划的12.75亿美元，主要承担机构有美国国家科学基金会（NSF）、美国能源部（DOE）和美国国家标准与技术研究院（NIST），并高度重视量子技术与其他技术的融合发展。

（1）NSF 相关布局。NSF 是美国政府资助量子信息研究的主要机构之一。2016年1月1日—2021年4月20日，NSF 资助的名称中含有“量子传感”（quantum sensing）关键词的项目共计94项，资助总额度约6800万美元。2020年NSF宣布成立一家有关量子传感的量子飞跃挑战研究所——纠缠科学和工程

^{*} 本文由中国科学院成都文献情报中心信息科技战略情报研究团队撰稿，执笔人包括：杨况骏瑜、徐婧、唐川

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20220210001

修改稿收到日期：2021年2月11日

^① 徐婧，唐川，杨况骏瑜. 量子传感与测量领域国际发展态势分析. 世界科技研究与发展，2022，DOI: 10.16507/j.issn.1006-6055. 2021.12.008.

学的量子系统（Q-SEnSE）研究所。Q-SEnSE 研究所由科罗拉多大学牵头，负责构建具有真正量子优势的可扩展、可编程量子传感系统；目前，该研究所已收到 NSF 资助 770 万美元。2021 年 NSF 又宣布在融合加速器（convergence accelerator）项目下斥资 100 万美元用来支持芝加哥大学开展基于量子传感的高通量蛋白质组学技术研究。

（2）DOE 相关布局。2020 年 4 月，DOE 斥资 1 200 万美元支持量子传感等技术在聚变能源研究中的应用，并在第二年持续投入 1 100 万美元支持聚变能源与量子传感的联合研究。2020 年 8 月，DOE 宣布 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，以整合来自各技术领域的要素。其中，在量子传感与测量领域，超导量子材料和系统中心（SQMS）主要负责构建和部署用于传感的高级量子系统；下一代量子科学与工程中心（Q-NEXT）将通过物理、材料和生命科学领域的变革性应用实现超高灵敏度的传感器。

（3）NIST 相关布局。NIST 与美国顶尖大学合作，建立了多个从事量子信息技术研究的联合研究所。例如：① **吉拉研究所（JILA）**，由 NIST 与科罗拉多大学博尔德分校联合设立，主要探索量子测量技术的局限性，以及量子物理学在化学、生物学中的作用；② **量子信息与计算机科学联合中心（QuICS）**，由 NIST 与马里兰大学合作建立，主要负责推进量子计算机科学和量子信息理论的研究和教育；③ **联合量子研究所（JQI）**，也由 NIST 与马里兰大学合作建立，主要研究相干量子现象的基本理论，并为原子物理学、凝聚态物质理论和量子信息技术的融合研究提供基础；④ **量子经济发展联盟（QEDC）**，由 NIST 牵头成立，旨在提升美国在全球量子研发及新兴量子产业方面的领导地位。

1.2 欧盟：重视整体规划，采取“三步走”战略

欧盟在“量子技术旗舰计划”（Quantum Flagship）下对量子技术的整体研发与商业化制定了切实的目标。2018 年“量子技术旗舰计划”正式启动 4 项量子传感与测量项目，包括金刚石动态量子多维成像（MetaboliQs）、集成量子钟（iqClock）、微型原子气室量子测量（MACQSIMAL）和金刚石色心量子测量（ASTERIQS），经费共计 3 671.5 万欧元。2020 年欧盟《战略研究议程》（SRA）报告为量子传感与测量设定了“三步走”战略：① **3 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；② **6 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；③ **10 年内**——从原型机过渡至商业设备。

1.3 中国：依托重点项目，主攻关键技术研发

2016 年中国在《国家创新驱动发展战略纲要》中将量子信息技术作为国家重点培养的颠覆性技术之一；之后，在 2020 年《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》中提出要瞄准量子信息，实施一批具有前瞻性、战略性的国家重大科技项目；2021 年 12 月，《计量发展规划（2021—2035 年）》提出，到 2035 年，建成以量子计量为核心、科技水平一流、符合时代发展需求和国际化发展潮流的国家现代先进测量体系。

自 2016 年起，中国布局了多个量子传感与测量领域的重点项目，如“量子调控与量子信息”“地球观测与导航”和“智能传感器”等；同时，针对芯片原子钟技术、空间量子成像技术和高精度原子磁强计等关键技术领域进行研发。2022 年 1 月，中国科学技术大学取得量子测量重要进展，首次实现了海森堡极限精度的量子精密测量。

1.4 澳大利亚：进行针对性研发

澳大利亚联邦科学与工业研究组织（CSIRO）在2020年制定了量子技术路线图——《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》，以求在全球量子竞争中保持优势，并使量子产业得到可持续性发展。在量子传感与测量领域，CSIRO布局了5个重点发展方向：①基于量子增强技术的军用及民用精确导航；②用于地下环境传感的量子重力测量；③用于重力波观测的增强量子传感器；④发现新矿床的量子磁强计传感器；⑤国防量子技术。

1.5 日本：聚焦应用市场

在“量子飞跃旗舰计划”（Q-LEAP）的整体部署下，日本聚焦未来传感器市场小型化、低成本的需求，研发固态量子传感器等先进的量子传感器技术。2021年公布的Q-LEAP项目资助情况显示，在量子传感与测量领域主要开发用于生物医学技术的量子传感设备，具体包括：①具有高灵敏度和高空间分辨率的脑磁图测量原型系统；②基于电能的电流和温度监测原型系统；③生物纳米量子传感器、超灵敏磁共振/核磁共振，以及基于量子理论阐述和模拟生命现象；④可用于医学和生命科学研究的测量技术原型。

2 量子传感与测量领域研究热点

目前，国际量子传感与测量应用研究主要聚焦五大领域：量子磁场测量、量子成像、量子时间测量、量子重力测量和量子惯性测量。

2.1 量子磁场测量

量子磁场测量是现代精密测量科学中一个非常重要的方向。高灵敏度量子磁力仪主要有光泵磁力仪、基于无自旋交换弛豫（SERF）原子磁力仪和相干布居囚禁（CPT）磁力计等。其中，SERF原子磁力仪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。

的研究。

2020年5月，复旦大学物理系实现了突破标准量子极限的高灵敏度原子磁力计，在精密测量的实际应用道路上迈出了重要一步。同年6月，欧洲核子研究中心对一种新型石墨烯霍尔传感器进行了测试，希望借助它在较宽的温度范围内构建新的磁场测绘系统。同年7月，中国科学技术大学杜江峰、王亚研究团队在金刚石量子模拟实验研究方面取得新进展，有望推进金刚石单自旋体系在量子精密测量领域产生更广泛的应用；同时，郭光灿研究团队利用纠缠探针态，提出了多参数量子磁强计的最终精度极限。同年8月，澳大利亚皇家墨尔本理工大学利用传统的玻璃纤维制造高性能金刚石传感器，为量子磁场测量技术在水下监测、采矿等领域的应用打开了大门。2021年10月，丹麦奥胡斯大学利用光泵磁力仪（OPM）对视网膜进行诊断。OPM有望取代纤维电极和隐形眼镜电极，提供一种舒适的非接触式临床视网膜扫描系统。同年12月，美国麻省理工学院利用金刚石氮空位（NV）色心设计出一种基于量子磁场测量的传感器，其有望更快、更准确地检测新型冠状病毒。

2.2 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，利用量子成像技术可以在红外波段获得高分辨率的图像，更易在军事探查、航空探测等领域挥发作用。目前，致力于量子成像研究的机构和团队很多，各类成果集中凸显。

2020年1月，美国加州大学伯克利分校和爱荷华州立大学利用纳米量子传感器在高压下进行应力和磁力成像。同年3月，德国凯泽斯劳滕工业大学物理系的研究人员通过量子传感确定了太赫兹路径中样品的层厚，这是太赫兹量子成像领域的第一个里程碑。同年5月，意大利帕维亚大学和中国科学院重庆绿色智能技术研究院共同提出了一种使用纠缠光子作为雷达探测器的方法，该方法可以更精准地进行位置测量。

2021年6月, NSF宣布支持2个有关量子成像的研究项目——“纳米级量子传感器中的光物质相互作用成像”和“低成本短波红外成像的胶体量子点图像传感器”。同年7月, 俄罗斯联合研究团队开发出首个适用于脑磁图的室温固态量子传感器, 有望使监测脑电活动的成本大幅下降。同年11月, 德国汉堡大学激光物理研究所开创了一种新的量子气体成像方法, 可以精确测量原子数量、原子之间的关联, 以及它们形成的图样。

2.3 量子时间测量

当前, 基于卫星的时间同步技术被广泛应用于各类系统, 但这些系统容易受到破坏和干扰。量子时间测量有望成为一种更好的替换技术。其中, 光学时钟、原子钟是前沿研究的热点。量子时间测量的发展趋势主要为高精度、小型化和低成本。

2020年1月, 德国联邦物理技术研究院实现了对高电荷态离子的精确光学测量, 可用于精密光谱学及具有特殊性能的未来时钟。同年8月, 由英国兰卡斯特大学、英国伦敦皇家霍洛威大学伦敦分校、美国耶鲁大学和芬兰阿尔托大学组成的国际研究团队首次观察到了“时间晶体”的相互作用, 其有望改善当前的原子钟技术, 提高陀螺仪性能。

2.4 量子重力测量

量子重力测量可用于土木工程、公用设施和运输基础设施例行监测等领域, 并能降低成本。超高精度和小型化是量子重力测量的两个方向。大型超高精度喷泉式冷原子重力仪有望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各类可移动平台; 但目前, 冷原子重力仪的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。

2020年7月, 英国伦敦大学、荷兰格罗宁根大学和英国华威大学的研究人员联合提出了一种中频引力波量子探测器, 该探测器的体积仅为目前使用

探测器体积的1/4000。同年8月, 英国伯明翰大学和Nemein有限公司的研究人员开发出了基于原子干涉测量的量子重力传感器, 该传感器已经被用于石油和天然气领域。

2.5 量子惯性测量

量子惯性测量是未来解决定向、导航和运动载体控制的重要技术。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和技术试验阶段, 距离实用化较远。

2020年1月, 澳大利亚研究人员通过实验证明旋转量子物体会影响它的自旋, 并且可检测到这种影响, 这一发现可推动纳米级旋转传感的发展。同年9月, 美国亚利桑那大学开展了“用于纠缠增强力和惯性传感的量子互连光力学传感器”项目, 希望利用纠缠互连提高传感器的灵敏度。2021年9月, 美国亚利桑那大学在NSF的支持下, 开展了“量子传感器”项目, 目的是利用量子态的优点构建超高灵敏度的陀螺仪、加速度计和其他传感器。

3 启示与建议

(1) 重视量子传感与测量领域发展, 建立国防技术屏障。相较于量子计算和量子通信, 我国在量子传感与测量领域的投入较少。但在军事、医疗等依赖高精度传感和测量的领域, 量子传感与测量技术有着十分关键的作用; 特别是在国防军事领域, 量子雷达技术将颠覆隐身技术和电子战模式。目前, 美国、加拿大、澳大利亚等国正在积极开展相关研究, 我国应长期支持量子传感与测量技术的应用转化, 以应对未来可能的风险。

(2) 分层次布局研发重点, 力求在空白领域掌握主动权。量子传感与测量领域涉及学科面广, 研发横向跨度大, 有些研发方案基于已有技术平滑演进, 而有些方案则是完全空白的新兴方向。不同类型的量

子传感与测量技术的发展程度和应用前景存在一定差异。我国应分层次布局研发重点，在原子钟、核磁共振陀螺和单光子探测与干涉测量等方向上选取已有基础的方案进行重点攻关和产业化，争取提前进行市场布局；在量子纠缠测量、量子关联成像和超流体干涉测量等新兴方向上进行重大科研项目布局，力求在空白领域掌握主动权。

（3）强化关键专利布局，抢占未来市场先机。量子传感与测量不同于量子计算或量子通信，没有一个

统一、可参考的研发路线图，各种传感和测量方案呈现多点创新，因而在知识产权保护和未来市场感知层面需不断提高科研人员的敏锐度和判断力。我国应在研发过程中重视关键专利的布局，避免陷入国外专利围剿困局，抢占未来市场先机。

致谢 中国科学技术大学王亚、电子科技大学邓光伟对本文提出了宝贵意见与建议，在此谨致谢忱！

■ 责任编辑：文彦杰