

量子传感 (III): 核心应用与未来展望

郭弘^{1,†} 吴腾¹ 罗斌² 刘院省³

(1 北京大学电子学院 量子信息技术中心 北京 100871)

(2 北京邮电大学电子工程学院 信息光子学与光通信全国重点实验室 北京 100876)

(3 北京航天控制仪器研究所 北京 100094)

2024-07-15 收到

† email: hongguo@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20240904

Quantum sensing (III): applications and prospects

GUO Hong^{1,†} WU Teng¹ LUO Bin² LIU Yuan-Xing³

(1 Center for Quantum Information Technology, Department of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China)

(2 State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

(3 Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100094, China)

摘要 作为量子信息感知物理实现基础的量子传感技术是三大核心量子技术之一,也是发展历史最悠久、技术成熟度最高、实际应用范围最广、潜在应用最多的量子技术。文章是量子传感系列综述的第三部分,在前两部分内容的基础上,从实际应用角度出发,介绍量子传感技术在导航定位授时、遥感探测、生物医学和基础物理等代表性领域的应用现状,阐述了量子传感的阶段性发展特征,包括量子传感的核心使能组件、量子传感的适应性难题等,最后,结合从传感到信息感知的论述,给出了量子传感技术的未来展望。

关键词 量子传感, 导航定位授时, 遥感探测, 生物医学, 基础物理, 量子信息感知

Abstract Quantum sensing is one of the core directions of current quantum technology, with the longest history, the highest maturity, and the widest applications. As the third part of the Quantum Sensing review series, this paper focuses on the current status and characteristics of quantum sensing in applications related to position-navigation-timing, remote sensing, biomedical sciences, and fundamental physics. The critical components and adaptation problems of quantum sensing are discussed. Finally, the future development and prospects of quantum sensing together with quantum information perception are envisaged.

Keywords quantum sensing, position-navigation-timing, remote sensing, biomedical science, fundamental physics, quantum information perception

1 引言

量子传感系列综述的第一部分主要介绍了量子传感的基本理论和方法^[1]；从理论上总结了量子传感的概念内涵，从实际应用的角度给出了量子传感的技术外延以及分类依据，同时介绍了量子传感的基本架构，总结了描述量子传感器性能的核心技术指标。量子传感系列综述的第二部分主要介绍了量子传感的关键技术与典型代表^[2]；阐述了基于量子态的制备、操控、探测的量子传感技术具备颠覆性传感能力的核心原理，并介绍了代表性量子传感器的实现方法及发展现状。

本文是量子传感系列综述的第三部分：主要

从实际应用角度出发，重点介绍量子传感技术在导航定位授时、遥感探测、生物医学和基础物理等代表性领域的应用现状。基于此，总结了量子传感的阶段性发展特征，以及量子传感的核心使能组件、量子传感的适应性难题等。最后，给出了未来展望并讨论了从量子信息传感到量子信息感知的发展趋势。

2 量子传感技术的核心应用

目前，从各国的国家计划和路线图来看，量子传感技术及量子传感器的发展已经在应用层面逐步聚焦(表1)^[3-11]。总体而言，目前量子传感的核心应用主要体现在以下几个方面。

表1 各国的主要国家计划或路线图中量子传感器应用方向择要

时间	国家	文件来源	主要量子感知技术领域
2015	英国	国家量子战略 ^[3] National Strategy for Quantum Technologies	紧凑型原子钟；无损生物显微镜；比拟GPS精度的水下导航；空间应用(环境监测和地震预测)；地下设施和坑洞检测；医学诊断(心脏和大脑功能)；无GPS的军用车辆导航；地下/采矿导航；个性化、专业导航设备(汽车和手机导航设备)；改进的军事光学和热成像。
2016	欧盟	量子宣言 ^[4] European Quantum Manifesto	用于量子传感器(包括用于医疗保健、地球测量和安全的重力和磁传感器)；用于高频金融交易时间戳的更精确的原子钟；适用于汽车、建筑等大批量应用的量子传感器；手持式量子导航设备；基于重力传感器的重力成像设备；将量子传感器与包括移动设备在内的消费者应用相结合。
2017	欧盟	量子旗舰计划最终报告 ^[5] Quantum Technologies Flagship Final Report	医学诊断；材料分析；导航；土木工程；网络同步；互联网；计量标准；量子增强型物联网。
2017	美国	量子法案(提案) ^[6] National Quantum Initiative—Action Plan	地下物质成分(洞穴、矿产、地下基础设施)遥感和重力检测；生物医学成像中近场磁场的传感；GPS拒止环境中的绝对导航；用于导航和通信的便携式原子钟网络。
2019	美国	量子科学技术现状概览及给国防部的建议 ^[7] Overview of the Status of Quantum Science and Technology and Recommendations for the DoD	精准导航和授时；小尺寸(电)天线；小尺度传感器(生物成像)；高对比度主动传感(反隐身)；精密重力仪。
2020	日本	量子技术战略研究报告 ^[8] Quantum Technology Strategy Report	重力传感器；阿秒激光等；固态量子传感器(金刚石氮空位中心等)；量子惯性传感器和光学晶格钟；量子纠缠光学传感器；生物纳米量子传感器、量子纠缠光学成像、超极化/超小型MRI等超极化核磁共振技术。
2020	北约	科技趋势2020—2040：探索科技前沿 ^[9] Science & Technology Trends 2020—2040 Exploring the S&T Edge NATO Science & Technology Organization	大类：定位导航授时(PNT)；遥感；磁力和重力感应。 透明海洋：通过超灵敏磁、重力或声传感器获取地球上任何地方、任何深度的任何潜艇的位置。 量子雷达：使用空中和天基隐蔽超灵敏低功率雷达系统跟踪识别极端视距范围内的空中目标。 GPS拒止环境：在GPS拒止环境中一次运行数周，具有完整的地理空间和时间感知，相当于当今海上、空中或陆地上的GPS系统。 精准导航：利用无人水下航行器在深海、沿岸进行长达数月的精准导航，无需GPS数据更新。 量子照明：用于安全或生物医学应用的短程极低功率无创成像。
2021	加拿大	量子革命：全球量子技术政策报告 ^[10] A Quantum Revolution: Report on Global Policies for Quantum Technology	时间(对于新的、更准确的原子钟)；重力(用于土木工程、采矿或地震学)；加速度(例如，用于抵抗GPS黑客攻击的导航系统)；磁场(例如，用于检查电子电路)。
2021	美国	兰德-量子技术的商业和军事应用以及时间表 ^[11] Commercial and Military Applications and Timelines for Quantum Technology	时间、加速度、磁场和电磁辐射的增强灵敏度传感器；惯性导航系统和磁力测量系统，用于在GPS拒止环境中导航；改进的雷达和激光雷达；量子成像；鬼成像，量子照明。

2.1 定位、导航、授时——PNT

量子传感器最主要的应用方向之一是定位(position)、导航(navigation)、授时(timing)三个方面,简称PNT技术。量子传感器与下一代PNT,特别是在卫星信号拒止条件¹⁾下的弹性PNT技术(resilient PNT)具有极为密切的关系。

当标准卫星导航信号不可用时,接入原子钟和高精度时间传输协议的辅助网络可以为导航系统提供弹性、可靠的备选方案。基于原子陀螺仪(或超高精度激光/光纤陀螺仪)和加速度计的惯性导航系统具有达到超高精度的潜力,从而在某些情况下减少对标准导航卫星或声纳(涉及水下的应用场景时)的需求。与传统的惯性技术相比,还可以减小长期导航误差。例如,实现水下超长时间航行应用需要惯性导航系统在性能提升、系统集成度及环境适应性等方面有显著的突破。陀螺罗盘、卫星指向、制导、导航、重力测绘和海底避障的综合应用可能即将到来。基于原子磁传感器的地磁匹配导航技术^[12],也是下一代PNT技术规划中的重要支撑技术之一。

从国内外公开的战略文件看,无论是量子技术方面的技术规划,还是PNT方面的技术规划,都明确指出了这一点,即,量子传感器与下一代PNT技术的实质性结合及综合运用,将成为重点方向之一。以美国为例,2021年5月,美国国家审计总署(United States Government Accountability Office)在公开发布的弹性PNT技术分析文件中,明确列出了芯片原子钟、原子磁传感器、重力仪(惯性传感器)等典型量子传感技术^[13]。

2.2 遥感探测

遥感探测是量子传感技术的重点应用方向之一。目前典型的代表性技术是原子磁传感器和原子重力仪。除了军事目标探测应用外,上述量子

1) 卫星信号拒止条件: 导航卫星信号受到干扰、遮挡,甚至恶意欺骗攻击等导致的卫星导航定位设备无法正确输出导航参数信息的情形。

传感技术在遥感探测领域的重要应用,包括但不限于地球磁场和重力场高精度测绘、航空物探、磁异常和重力异常检测等。

例如,原子磁传感器可以为本地和远程传感和测绘提供高性能磁场测量能力,典型的技术应用就是激光导星(laser guide star)技术^[14],即通过向大气中发射激光来创建人造导星。此外,射电望远镜可以使用基于原子钟的时间同步来支持超长基线干涉测量,从而实现包括黑洞观测在内的极限观测能力^[15]。光频原子钟的发展正在形成新的观测能力,比如引力红移的测量^[16, 17]。锁定于原子钟的高精度频率梳则提供了光谱学测量的全新手段,在痕量气体检测(例如监测甲烷泄漏)和增强的光谱仪校准(例如“天文光梳”)等方面有望取得重大突破。里德伯原子态作为传感器或量子天线用于原子电场传感,以测量静电场(DC, 0 Hz)到THz (10^{12} Hz)的宽频率范围内的电磁波,为遥感和静电测试提供了新的手段,有望扩大THz领域的应用范围并实现新的应用,也提供了减小天线尺寸和改进射频滤波的新技术。

2.3 生物医学

近期量子传感在生物医学方面的发展极为迅速,主要体现在利用原子磁传感器对人体器官生物磁场信号的探测,以及基于此而形成的疾病诊疗等应用。

人体器官的功能活动伴随着生物电现象,电流或时变电场必然伴随着磁场信号。因此,人体器官的生物磁场信号反映的是器官的功能活动^[18]。生物磁探测技术兼具高空间分辨率(毫米量级)、高时间分辨率(毫秒量级),能够与现有的医学影像技术有效互补。尤其在功能活动的源定位方面,相较于生物电探测技术,生物磁探测技术具有极为显著的优势^[19]。

生物磁探测技术已历经近60年的发展历程,早期的生物磁探测技术主要利用超导干涉磁力仪(superconducting quantum interference devices, SQUIDs),在临床应用方面已初具规模。近些年,以基于原子气室和金刚石NV色心为代表的原子

磁传感器为生物磁信号检测提供了全新的可能性。原子磁传感器在具有与超导磁力仪相当的磁探测灵敏度的同时,还兼具在地磁条件及常温下的磁场探测能力,为运动情况下的脑磁、心磁等生物磁特性测量提供了全新手段^[20-23]。金刚石NV色心磁力仪则在空间分辨率方面有显著优势,可以在亚微米尺度对器官、组织的生命活动实现原位探测,探测分辨率甚至能达到单分子级别^[24]。

在医学应用方向,基于生物磁探测技术,可以进行神经功能的生物医学研究以及对部分疾病的早期诊断。例如,脑磁图自研制以来,被广泛应用于脑功能区定位,包括癫痫诊断和癫痫灶术前定位、神经外科手术前脑功能区定位等。具体而言,在脑外科手术期间,外科医生要避免对大脑重要功能区域造成不必要的损害,在患有脑肿瘤的患者中,脑肿瘤可能会明显扭曲脑部解剖结构,或者诸如动静脉畸形之类的病变,也会导致脑功能的重组,在这种情况下,解剖学标志物可靠性低,利用脑磁图对大脑重要功能区进行映射就至关重要。

心磁图在心血管疾病诊断方面具有非常广泛的应用前景。心电图的敏感度较低,且受限于心电信号的难溯源性;与传统冠状动脉造影相比,心磁图具有非侵入、高敏感等特点,因此,心磁图具备心脏功能活动的直观展示以及源定位功能,逐渐成为心肌缺血、冠状动脉疾病、冠心病、心肌纤维化等心脏类疾病的早期诊断技术手段;生物磁探测技术也逐步成为生物医学领域,继功能性核磁共振成像(fMRI)、脑电图、冷冻电镜等技术之后的重要补充。

除了基于原子磁传感技术的生物磁探测之外,利用金刚石NV色心磁力仪还能够对微米级样品中的化学位移进行核磁共振波谱探测,适用于开展单个细胞中的蛋白质动力学等研究。因此,这也是目前量子磁传感器在生物医学方面的典型应用之一。

2.4 基础物理

目前的基础物理研究,特别是物理学几个核

心问题(暗物质、暗能量、永久性电偶极矩等)的实验验证对传感器测量精度的要求与日俱增,传统的测量技术精度已经无法满足要求,在此情况下,量子传感器成为重要选项^[25]。

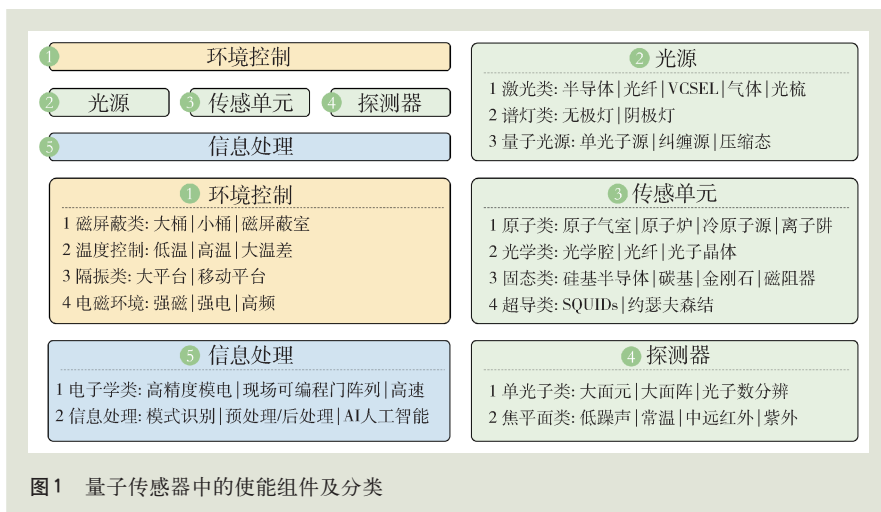
高精度原子钟(三维光晶格)、原子磁传感器(原子磁力仪)、量子增强的光学干涉仪、原子干涉仪(等效性验证)等提供的超高精度测量能力为基础物理研究提供了利器。相关的单光子探测器、极低温技术等也发挥了重要的作用。具体而言,原子钟和原子磁传感器可以分别从精细结构常数以及奇异自旋相关相互作用的角度对暗物质候选粒子(如类轴子粒子,即axion-like particles)进行搜寻^[26, 27];上述暗物质候选粒子也是有关中子或电子等粒子存在永久电偶极矩的重要诱因^[28]。原子干涉重力仪和重力梯度仪除了在万有引力常数、等效性原理(自由落体的普遍性)、引力红移等基本物理验证方面的测量应用外,也有望应用于火山、地下水、矿床、潮汐动力学和冰冻圈(即地球上冰的分布)的地球科学研究。此外,压缩态光场注入的增强型干涉仪也有望提高引力波探测器LIGO的探测灵敏度^[29]。

3 量子传感技术的发展

量子传感器与经典传感器既有显著区别(如由经典统计极限过渡到量子统计极限),又有密切联系(如除了感知物理量的原子系综处于相干量子态外,操控量子态的输入信号和读出信号仍依赖于经典的电信号)。同时,量子传感器的使能组件及其对使用平台环境的适应性也是制约量子传感技术发展的主要因素。

3.1 建立在既有传感器体系中的量子传感器

在很多学术专著上,传感器的定义被简单地概括为“一种接受激励并以电信号响应的装置”,这显然不能完全概括目前有关量子传感技术以及量子传感器的全部内容。广义的量子传感,除了能够覆盖经典定义的传感之外,其最具吸引力的地方,体现在对物理量的高准确度读取以及高复



年代、利用分立性而实现的对某种特定物理量进行测量的传感技术,也可以被纳入量子电子学技术和经典传感器在应用方面并没有本质区别,这就使得量子传感器的指标体系、评测方法和应用方向都需要向同类型的、已经存在的经典传感器靠拢。量子科技的研究人员(特别是物理学家们)在与应用对接时需要特别注意。

现性和一致性(前者主要涉及探测灵敏度以及噪声,而后者更关注的是如何提高准确度(或精度,其本质是一致性以及长期稳定性)),充分利用分立性给物理量探测所赋予的一致性,并从经典统计极限发展为基于量子相干(或纠缠)的量子统计极限。

首先,量子传感器在理论上有可能全面覆盖经典传感器所涉及的广泛领域,但仅仅是在理论上。如果我们采纳对量子技术的代系描述,那么,第一代量子传感器已经在其涉足领域内实现了对经典传感器的颠覆,其代表性的技术是原子钟、激光及其干涉技术、核磁共振,以及以原子为基础的电、磁、惯性传感器等;以纠缠为代表的第二代量子传感技术目前主要受限于技术水平(特别是大规模纠缠源和宏观纠缠态的制备、保持等),实现技术替代需要相当长的时间,但具备巨大应用潜力。

其次,量子传感器的现状是被“困在”经典的输入和读出状态下的。发展至今,量子传感器的接收信号是经典信号(至少在被动探测下是如此,主动探测的量子信源的技术成熟度暂时还不足以进入实际应用),输出信号也是经典的电信号,所采用的噪声抑制技术以及信息读取方式,仍以经典的技术手段为核心。

因此,现阶段的量子传感器(我们将其称为“传统”的量子传感器,主要指诞生于20世纪30

3.2 量子传感器的使能组件

量子传感器中使能组件²⁾的分类如图1所示,主要包括光源类组件、传感单元类组件、探测器类组件、环境控制类组件和信息处理类组件。这些使能组件为量子传感器中的量子态制备、量子态演化和量子态检测提供了硬件保障和软件支撑,是实现量子传感,进而实现量子信息感知的重要基础。

2018年,美国国防部国防科学委员会特别小组经过近一年的研究,于2019年10月发布了《量子技术的应用》报告。这是美国在2018年底确立量子技术国家计划之后极为重要的文件。在该报告最开始的两份备忘录中表达了非常明确且强烈的倾向性态度,强调聚焦“支撑广泛量子技术的使能组件”,指出“可能产生持续差异性影响的技术是跨越不同量子技术应用范围的技术——使能组件。可靠的、特征明确的、可信的、制作精良的组件和实用集成技术结合,可能是获得量子优越性和竞争优势的最大因素。这对美国在当前竞争者已经紧跟其后的竞争中保持优势,至关重要。”并在报告附录中进一步明确了相关的使能组件技术。

表2列举了美国能源部、欧盟量子旗舰计划、美国国防部和美国光学学会的分析报告中提到的使能组件。可以看到,除超高真空、极低温、单光子源和探测器等保障性技术外,激光器技术一

2) 使能组件:保障量子传感器性能指标的重要组件,是构成并实现量子传感的核心元器件。

直处于核心地位。另外，原子源(热原子气室、冷原子源等)也极为重要，是量子信息技术未来产业的支柱，美国国防高级研究计划局甚至专门立项支撑。需要特别注意的是，随着片上集成光子学技术的发展，特别是有源片上光子学技术(激光器、放大器、调制器等)的工艺能力的快速提升，片上量子集成很有可能发展成下一个足以左右量子传感器产业的核心。

3.3 量子传感器的适应性难题

在使用环境、载体平台和综合性能指标等约束条件下，研制高性能量子传感器，获取满足应用要求的高质量信号，充分体现量子传感技术的跨代甚至颠覆性优势，是量子传感器目前的重要任务之一(图2)。量子传感器走向应用，必然面临体积(size)、重量(weight)、功耗(power)和费用(cost)等问题(简称SWaP-C)。量子传感器普遍存在体积重量大、功耗高、费用昂贵、环境适应性不足等问题，部分技术本质上还处于实验室阶段。如何在SWaP-C的制约条件下，设计出具备市场竞争力的量子传感器产品，将是量子传感器进一步发展的关键。量子传感技术领域的科学家和工程师必须学会向各种条件和环境限制进行妥协，才能发展出具有真正意义的实用化量子工程产品。

例如，集成光子学技术，特别是有源器件的

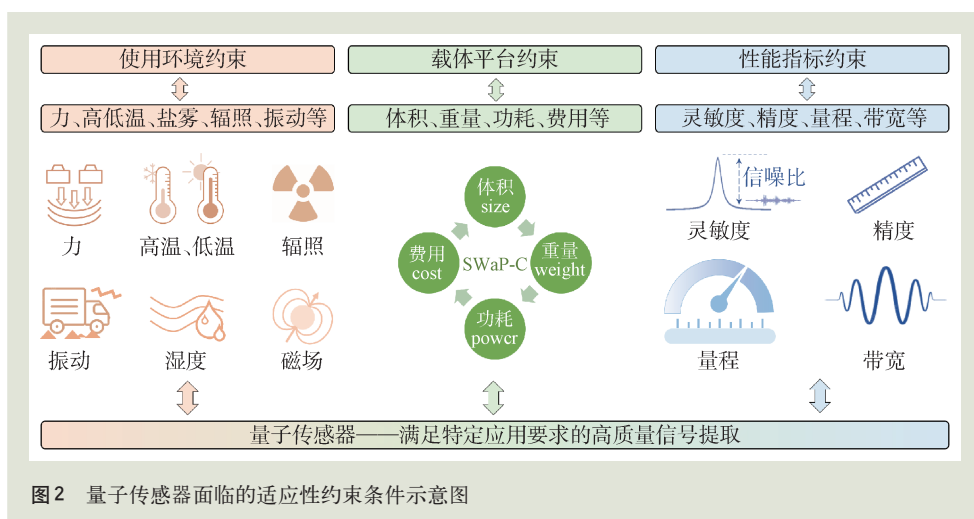
片上异质集成是未来非常重要的技术之一。但片上集成技术使用固态材料会导致更强的热噪声；微型气室或金刚石NV色心等方案，则由于粒子数减少，相应地减少了参与相互作用过程的原子数(人造原子数)，限制了传感器的灵敏度和精度。对于灵敏度和精度要求较高的应用场合，集成技术很难替代传统方案，需在原理上做实质性创新。小型化、高稳定性、长寿命等工程技术是量子传感器必须攻克的一道致命的难关。

另一方面，和传统传感器一样，量子传感器的应用必然受到载荷平台和使用环境的严格约束，且量子传感器对平台和环境要求更加苛刻。探测性能很容易被淹没在平台干扰和环境噪声中，需要在更高的精度下深入研究平台噪声补偿和环境噪声剔除等新技术。从实际使用情况看，多传感器协同下对平台机动参数的高精度检测也是至关重要的。

与传统传感器不同的是，几乎所有的量子传感器，其核心都依赖于量子态的相干性，而相干性的保持对外界环境的要求极高。例如，对于原子磁传感器，要想充分发挥其磁场探测性能，对于外磁场的均匀性有极为严苛的要求——磁场梯度会造成原子磁传感器磁共振信号的展宽，从而大大限制了其磁场探测灵敏度指标。相较而言，传统的传感器(如基于电子元器件)虽然极限传感性能指标受限，但胜在环境适应性强，在不同的

表2 美欧代表性分析文件中的量子技术使能组件情况择要

时间	国家	文件来源	使能组件择要
2016	美国	量子传感器报告 ^[30] DOE Quantum Sensors Report	窄带稳定激光器；超高真空；低温设备；集成微波电路；高Q值微波或射频腔；超导材料；高Q微波腔的接口优化；用于高保真读出的纳米光学材料；原子力显微镜有源机械元件的耗散控制；皮开尔文冷原子系综；米级波包分离距离的原子干涉仪；高功率(>10 W)、超稳定(<1 kHz线宽)激光器；高通量原子源。
2017	欧盟	量子旗舰计划最终报告 ^[9] Quantum Technologies Flagship Final Report	理论与软件：存在噪声时的多参数估计算法；精确理解具体应用中的量子测量优势；纠缠的优化利用；混合量子态有用性的基本理论；用于测量的不完美量子操作；新型精密测量和传感方案的设计；设计新的基础物理学实验。 工程与控制：材料的合成和生长；单原子掺杂技术；制造和集成；光子平台；紧凑型微波源；纳米机械装置；先进的核磁共振和相干控制技术。
2019	美国	量子技术的应用(调查报告) ^[31] Applications of Quantum Technology (Investigation Report)	特定波长的分立和集成光子学；窄带固态激光器；高效率单光子探测器；单光子源和纠缠光子源；低损耗开关和其他光学元件；低损耗滤波器、环行器和其他微波元件；原子气室和真空封装；稀释制冷剂 and 低温电子学。
2020	美国	量子光子技术路线 ^[32] Quantum Photonic Development Roadmap	激光；单光子或纠缠光子源；单光子探测器；外差和零差光子探测器；光纤或集成光子波导；调制器；换能器和转换器。



环境条件下，都能够充分发挥其传感能力。因此，如何在复杂的实际环境中，充分兑现量子传感器的性能优势，是目前量子传感亟待解决的核心问题之一。

4 展望——从量子传感到量子信息感知

量子传感是物理层的，是对物理信号的量子探测与传感，是量子信息感知的重要物理基础和物理实现上的必要条件。量子信息感知则是信息层的，是对信息的感知，除了必需的高灵敏度的量子传感外，还需要增加协议、算法、软件以及高空间—时间分辨率的信号处理等数学层的东西，才能够达成充分条件从而构成信息层，具体关系如图3所示。

总体而言，自20世纪30年代以来，量子传感技术已历经近一个世纪的发展，其技术外延也伴随着人们对微观世界认知的不断深入而不断拓展。这其中，信息技术以及量子理论的发展起到了决定性的推动作用。从早期针对经典传感技术而形成的诸如原子钟、原子磁传感器、原子陀螺仪、原子重力仪等各类以微观粒子分立性为核心的量子传感技术(即第一次量子技术革命的代表性技术)，到以量子相干、量子纠缠为核心，能够突破经典统计极限的量子精密测量技术，以及建立在早期量子传感技术和量子精密测量技术基础上的量子计量技术(即第二次量子技术革命的代表性技

术)，量子传感的概念及范围始终处在不断更新、拓展的过程中。相较于早期阶段，已经发生了翻天覆地的变化。以此为基础，面向以人工智能机器学习为代表的新一轮信息化浪潮，量子传感技术也必将迎来新一轮发展契机——从单一维度的物

理信号的传感迈向更多维的信息感知，充分兑现量子传感技术为信息感知所赋予的高精度、高灵敏度、多维度等优势，推动实现从“信号传感”到“信息感知”的实质性进程。

(1)传统的量子传感。核心仍是基于全同微观粒子的分立性，其发展方向主要体现在如何进一步提升量子传感器的环境适应能力，以及与第二次量子革命以来的基于量子纠缠的量子精密测量技术进行结合。经过数十年的发展，依托经典噪声抑制技术及信号提取技术，此类量子传感器已经充分证明了其优异的传感性能。例如，原子磁传感器目前已经可以逼近 μT 量级的磁场探测能力，其磁传感性能是传统意义的磁传感器所无法比拟的，充分体现了以量子态操控、读取为核心的量子传感技术的巨大优势及潜力。更进一步，需要提高此类技术在更实际、更复杂应用场景下的传感性能，紧密围绕以SWaP-C为核心来发展此类量子传感技术，以期进一步拓展潜在应用方向。

(2)量子精密测量。以微观粒子分立性以及量子相干和量子纠缠为核心的量子测量理论与技术。核心是如何在探测资源有限的情况下(如相互作用的原子数)，突破限制传统测量精度的统计极限，逼近测量精度的量子极限(海森伯极限)。截至目前，在小尺度的量子体系中，量子精密测量理论及技术均已有非常广泛的研究基础。

需要注意的是，发展至今，量子精密测量和

量子传感在研究对象以及核心目标方面，仍存在一定的差异，不能混淆：量子精密测量主要关注如何通过合适的量子操控手段以及特殊量子态的制备，在有限资源条件下，获得更低的测量不确定度(从经典统计极限过渡到量子极限)、更低的测量系统误差以及更高的可重复性；而量子传感更关注的是针对特定物理量变化量的敏感程度。两者也在各自的发展进程中不断融合——量子精密测量中的技术方案以及理论、协议，需要能够拓展到更大尺度、更宏观的量子体系中，即更多的相互作用粒子数；传统的量子传感技术，在保证传感性能的基础上，需进一步压制技术类噪声等经典噪声(或与量子噪声有相互影响的交叉噪声)，使传感器的噪声水平由经典噪声占主导，过渡到由量子噪声占主导，为不断发展的量子精密测量技术及理论与量子传感的结合提供契机，从而有望带来量子传感技术性能指标的革命性突破。

(3)量子计量。以传统量子传感技术以及量子精密测量技术为基础，量子计量主要有两层含义。一方面，国内提及量子计量通常指的是计量领域的量子化，特指2019年5月20日开始的国际单位制基本物理量常数化溯源问题——国际单位制下的7个基本物理量的计量标准由实物过渡为基本物理常数。量子计量是计量领域的重大事件，带来了计量领域的深刻变革，其发展至今，离不开量子传感以及量子精密测量技术的支撑。此外，更重要的一点是，量子计量的重要性因计量技术本身的法定意义而得到高度重视。另一方面，学术文献中的量子计量(quantum metrology)有另一层含义，并与量子信息论和量子信息技术紧密相连，指的是“量子计量学是使用量子理论来描述物理系统，对物理参数进行高分辨率和高灵敏度测量的研究，特别是利用量子纠缠和量子压缩。该领域有望开发出比在经典框架

中执行的相同测量精度更高的测量技术。与量子假设检验一起，它代表了量子传感基础上的一个重要理论模型”，这一点与量子精密测量息息相关。总而言之，伴随着技术的不断推进，传统的量子传感技术与量子精密测量也将会不断融合，互相之间的界限也将趋于模糊。

(4)量子信息感知。信息感知体现为利用多种手段获取不同层次、不同特征的信息，并通过多方面的信息处理以及信息解读，从而得到针对某一事件更多维度、更全面的感知。信息感知是传感技术发展 to 一定程度的必然结果，体现了从局部到整体的认知过程。信息感知需要具备若干基本要素：从传感器方面，需要具备高精度、高灵敏、多维度的对物理信号的传感方式；在信息处理方面，需要具备相当水平的算力，并结合信息论的有关数学、物理模型，从而快速、准确并有效地识别大量传感器所提供的有效信息，达到去伪存真和还原被测目标完整面貌的基本目的。

具体而言，量子传感技术以及人工智能的发展，为实现新型的信息感知能力，提供了如下重要契机：

更全面、更精准的信息来源——量子传感从物理层面能够获取更细微、更精确、更可靠的信号，也能够充分保证信息获取的可靠性以及可重复性。伴随着量子传感器体积、功耗、环境适应

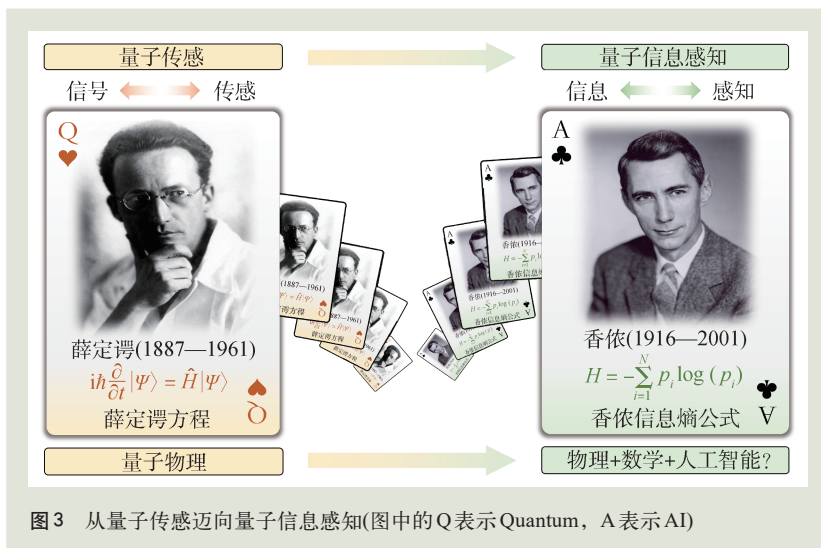


图3 从量子传感迈向量子信息感知(图中的Q表示Quantum, A表示AI)

性,以及成本的不断降低,在更实际的应用场景下布置更多数量、更多种类的量子传感器,并结合量子时频、量子信息安全等技术,构筑更安全、时延控制更精准的高精度传感器网络,有助于最终获取多维度的海量信息。

更智能、更迅捷的信息处理——目前,人工智能技术如火如荼,人工智能领域的突破性进展主要得益于几项关键技术:大数据的积累、算力的飞速增长、深度学习算法的不断完善等。海量可靠的数据是训练人工智能的关键基础。充分结合人工智能以及深度学习算法,能够更迅捷地从多维度的传感器网络中提取更有效的信息。量子传感器网络能够为人工智能及深度学习算法提供更多维度、包含更多信息的数据来源,能够使得人们从更全面的角度,理解、掌握某一类具体场景的真实情况,例如,利用可广泛布局于人体不同部位的高灵敏度传感器,可以更全面地获取人体的生命活动信息,通过一定的机器学习算法,对于部分疾病的早期诊断以及预判,能够提供重要的技术参考。

更广泛、更科学的信息定义——信息是无序的体现,早期有关信息的定义主要基于香农所提出的信息熵。一方面,仅信息熵本身就有很多地方值得深入挖掘;另一方面,如果将信息推广到一般意义的无序,那么关于无序的物理以及数学上的描述,也并不唯一。比如,关于熵的定义就有很多种,如雷尼熵(Renyi entropy)、近似熵(approximate entropy)、取样熵(sample entropy)、模糊熵(fuzzy entropy)、传递熵(transfer entropy)、分布熵(distribution entropy),等等。从这个角度看,信息的维度以及范围是非常广泛的。如何获取更精准、更全面、更有价值的信息,不仅对量子传感技术提出了硬件方面的要求,也需要充分结合信息的内涵以及外延方面的拓展,并针对不同的应用场景,对人工智能辅助下的信息处理以及信息筛选提出相应的技术发展要求。总之,人工智能和量子传感的结合,是从传统的量子传感迈向量子信息感知的关键。

此外,量子传感、量子通信和量子计算在量

子比特的统一表达下或许会形成全新的信息科学架构。不同于当前的通感算一体化概念,量子传感、量子通信和量子计算融合的内在逻辑支点对量子体系与信息应用的深入理解和技术融合,其外在要求是大规模量子纠缠技术实现,其本质是信息的承载和处理方式彻底摆脱经典信息形式的束缚。这需要等待通用量子计算所引领的核心技术的重大突破,并以此为基础构建新的量子信息大厦。

5 结语

本文介绍了量子传感的核心应用以及未来展望。总体而言,量子传感已经在应用层面逐步聚焦,其核心应用主要体现在导航定位、授时、生命科学、基础物理、遥感等领域。当前,实用化程度最高的量子传感技术仍主要集中于第一次量子革命的代表,以纠缠为核心的量子传感技术仍主要处于实验室阶段,但已充分证明了其在提升传感性能方面的颠覆性效果。以此为基础,如何与各种条件和环境限制相妥协,研制、发展兼具小型化、低功耗、高稳定、长寿命,以及环境适应性的量子工程产品,是量子传感器在应用方面必须要突破的瓶颈问题。更重要的是,以人工智能机器学习为代表的新一轮信息化浪潮,来势迅猛,已逐渐成为大势所趋,量子传感技术也正迎来新一轮发展契机,如何从单一物理层面的信号(signal)传感,发展为物理+数学+人工智能的信息(information)感知,既需要在物理层面发展多维度的量子传感技术,也需要在数学层面深入挖掘信息的本质,还需要充分结合通用量子计算以及人工智能给信息处理所带来的颠覆性能力,真正实现从量子传感迈向量子信息感知。

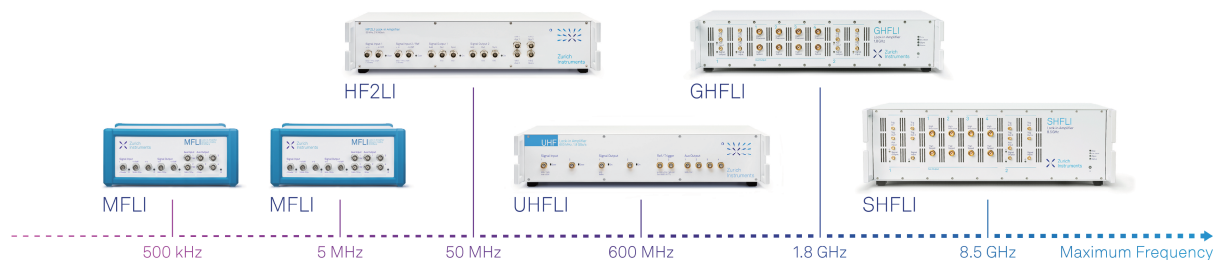
参考文献

- [1] 郭弘,吴腾,罗斌. 物理,2024,53:227
- [2] 郭弘,吴腾,罗斌等. 物理,2024,53:384
- [3] <https://uknqt.ukri.org/wp-content/uploads/2021/10/National-Quantum-Technologies-Strategy.pdf>
- [4] <http://www.qtfllgship.cnr.it/wp-content/uploads/2016/10/Quantum-Manifesto.pdf>

- [5] <https://era.gv.at/public/documents/3365/Finalreport.pdf>
- [6] <https://www.lightourfuture.org/NPI/media/mpi/Resources/FINAL-Action-Plan-for-a-NQI-Apr-3-2018.pdf?ext=.pdf>
- [7] Wolf S A, Joneckis L G, Waruhiu S *et al.* Overview of the status of quantum science and technology and recommendations for the DoD. Institute for Defense Analyses, 2019
- [8] <https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/ryoushisenryaku.pdf>
- [9] https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2020/4/pdf/190422-ST_Tech_Trends_Report_2020-2040.pdf
- [10] <https://cifar.ca/wp-content/uploads/2021/05/QuantumReport-EN-May2021.pdf>
- [11] https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_reports/RRA1400/RRA1482-4/RAND_RRA1482-4.pdf
- [12] Li W, Wang J. The Journal of Navigation, 2014, 67: 263
- [13] <https://www.gao.gov/assets/gao-21-320sp.pdf>
- [14] Zhang R, Klinger E, Bustos F *et al.* Phys. Rev. Lett., 2021, 127: 173605
- [15] Psaltis D. General Relativity and Gravitation, 2019, 51: 137
- [16] Bothwell T, Kennedy C J, Aepli A *et al.* Nature, 2022, 602: 420
- [17] Pumpo F D, Ufrecht C, Friedrich A *et al.* PRX Quantum, 2021, 2: 040333
- [18] Hämäläinen M, Hari R, Ilmoniemi R *et al.* Reviews of Modern Physics, 1993, 65: 413
- [19] Kim J, Pullan A, Bradshaw L *et al.* Physiological Measurement, 2012, 33: 545
- [20] Zhang R, Xiao W, Ding Y *et al.* Science Advances, 2020, 6: eaba8792
- [21] Xiao W, Sun C, Shen L *et al.* Science Advances, 2023, 9: eadg1746
- [22] Limes M, Foley E, Kornack T *et al.* Physical Review Applied, 2020, 14: 011002
- [23] Yu Z *et al.* Physical Review Applied, 2024, 21: 064028
- [24] Du J *et al.* Reviews of Modern Physics, 2024, 96: 025001
- [25] Safronova M S, Budker D, DeMille D *et al.* Reviews of Modern Physics, 2018, 90: 025008
- [26] Derevianko A, Pospelov M. Nature Physics, 2014, 10: 933
- [27] Afach S *et al.* Nature Physics, 2021, 17: 1396
- [28] Abel C *et al.* Physical Review X, 2017, 7: 041034
- [29] Tse M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2019, 123(23): 231107
- [30] <https://www.osti.gov/servlets/purl/1358078>
- [31] https://dsb.cto.mil/reports/2010s/DSB_QuantumTechnologies_Executive%20Summary_10.23.2019_SR.pdf
- [32] https://www.optica.org/industry/online_industry_library/quantum_photonics_roadmap/

全频带锁相测量

DC - 8.5 GHz



扫码了解详情

www.zhinst.cn
info.cn@zhinst.com
021-64870287