

量子传感的导航应用研究现状与展望

吴德伟, 苗强, 何思璇, 任钊恒, 魏天丽

(空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077)

摘要 量子传感技术以光子、原子等量子系统为介质,利用量子效应可实现突破标准量子极限制约的超高精度和灵敏度的物理量测量,为基于时空参量测量的传统导航定位授时技术体制的突破带来新的机遇。量子传感改变了导航系统中导航传感器的感知机理,能够实现高精度的时空参量观测,并利用量子系统的非经典特性,实现导航信息的安全可靠传输和探测,提升导航对抗能力。作为量子传感技术的主试验场,量子导航技术方兴未艾,新的导航参量量子传感技术和功能器件不断涌现,量测性能日新月异。在分析了不同量子传感技术和器件物理原理的基础上,探讨了量子导航技术的研究进展与发展方向,并展望了其未来发展趋势和组合导航方式。随着量子传感技术的进步,未来高精度、抗干扰的实用高性能量子导航系统将具有广阔应用前景。

关键词 量子传感;量子导航;测量精度;量子噪声极限

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2021.06.011

中图分类号 O431.2 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2021)06-0067-10

A Study of Existing Status and Prospects for Quantum Sensor in Navigation

WU Dewei, MIAO Qiang, HE Sixuan, REN Zhaoheng, WEI Tianli

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract Quantum sensing technology is to take photons, atoms and other quantum systems as the medium, and utilize quantum effects for achieving ultra-high-precision and sensitive physical quantity measurement to break through the standard quantum limit and bring about new opportunities for the breakthrough of the traditional navigation and positioning timing technology system based on the measurement of time and space parameters. The quantum sensing changes the perception mechanism of navigation sensors in navigation systems, enables high-precision observation of space-time parameters, and utilizes the non-classical characteristics of quantum systems for achieving safe and reliable transmission and detection of navigation information, and enhancing navigation confrontation capabilities. As the main testing ground for quantum sensing technology, the quantum navigation technology is in the ascendant, new navigation parameter quantum sensing technology and functional devices are constantly emerging, and the measurement performance is changing with each passing day. This paper analyzes the physical principles of different quantum sensing technologies and devices, discusses the development direction and research progress of quantum navigation technology, and looks forward to its future development trends and combined naviga-

收稿日期: 2021-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(61573372,61603413,62073338);陕西省自然科学基金(2017JM6017)

作者简介: 吴德伟(1963—),男,吉林省吉林市人,教授,研究方向为量子传感与智能导航。E-mail:wudewei74609@126.com

引用格式: 吴德伟, 苗强, 何思璇, 等. 量子传感的导航应用研究现状与展望[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2021, 22(6): 67-76. WU Dewei, MIAO Qiang, HE Sixuan, et al. A Study of Existing Status and Prospects for Quantum Sensor in Navigation[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(6): 67-76.

tion methods. With the advancement of quantum sensing technology, high-precision, anti-jamming and practical high-performance quantum navigation systems will have broad application prospects in the social, economic, and military fields.

Key words quantum sensing; quantum navigation; measurement accuracy; quantum noise limit

导航系统主要为运行体提供精确的时空信息。初期,利用目视推算等方法,出现了磁罗盘等导航装置。20世纪20年代出现了无线电罗盘等导航设备。第二次世界大战前后,仪表着陆系统、罗兰C等无线电导航系统相继问世,1964年子午仪卫星导航系统建成,此后建成了GPS等卫星导航系统。导航系统向着智能化、自主化、组合化方向发展;导航体制不断更新,出现了新一代地形辅助、天文导航等自主导航系统。迄今为止,所有获得广泛应用的导航技术体制无一例外均基于经典信息的产生、传输和探测理论与技术,使得导航参量的量测精度始终受限于标准量子噪声极限制约^[1]。

此外,随着对导航系统的依赖性不断加强,导航系统的安全性、可靠性问题也成为必须重点关注的问题。而量子技术的兴起,无疑将新的机遇带给了导航系统,量子传感改变了传统导航系统中导航传感器的感知方式。此外,量子力学中的非经典特性,可以实

现保密性和抗欺骗干扰。事实上,利用量子传感器实现量子导航成为了未来导航发展的新趋势^[2],量子导航领域已然成为量子传感技术的主试验场。

1 量子传感技术概述

随着科学技术的不断进步,测量和探测在生产生活中占据着非常重要的地位,提高传感器精度是人们一直致力追求的目标。传统方法上一种是提高测量所用“尺子”的分辨率,另一种是通过多次测量减小误差,理论上精度可以达到经典力学框架下的标准量子噪声极限^[3]。

现代研究表明,基于量子特性的传感方式可以实现突破标准量子噪声极限的高精度测量^[4]。量子传感器是以量子力学为指导,以量子系统作为传感介质,利用量子效应设计的传感器件。量子传感原理图如图1所示。

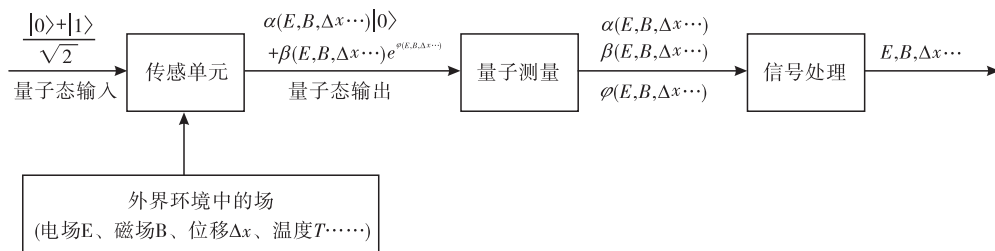


图1 量子传感的理论框架图

目前,国内外相关研究的主要实验体系可分为以下4种:①冷原子传感器;②金刚石NV色心传感器;③SQUID超导量子干涉器;④无线量子传感器。各种类又可以进一步划分为不同形式的装置,如图

2所示。量子传感具有超高的灵敏度和超高的精度,其应用已涉及勘察测绘和导航定位等多个领域^[5]。这里主要综述导航应用中的量子传感技术。

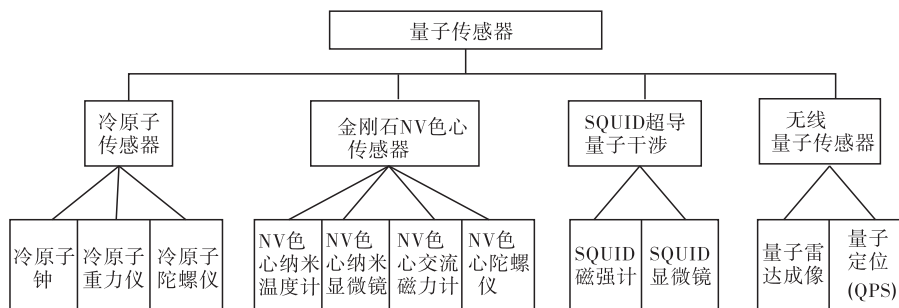


图2 发展中的量子传感器

2 导航应用中的量子传感

传感器作为一种探测和测量装置,其功能就是

敏感被测信息并转换成电信号或其他形式的信号输出。量子导航应用中研究较多的实验体系主要有原子、超导和光子等量子系统。从传感器信息获取方式的角度对现有导航传感器归类,可分为有源导航

传感器和无源导航传感器。下表列出了量子传感器的导航应用情况。

表 1 量子传感器的导航应用

传感器	导航信息	敏感物理量		原理	导航应用
原子钟	时间/频率	原子辐射电磁波频率		超精细能级跃迁	卫星导航系统中授时和伪距测量
	重力梯度			广义相对论引力红移效应	测高
原子陀螺仪	角运动矢量	干涉式	相位	Sagnac 效应	载体角速度测量
		SERF 原子自旋 核磁共振	光的线偏振变化 旋转引起的拉莫尔进动频率	自旋定轴性 核自旋进动性	
原子加速度计	重力梯度加速度	物质波相位		原子干涉	重力匹配定位/惯性导航加速度测量
量子磁力仪	磁场	量子干涉	临界电流	约瑟夫森效应	地磁导航
		光泵 CPT	电磁波频率 激光调制频率	光磁共振效应 相干粒子数俘获现象	
单光子探测器	伪距	纠缠光脉冲的到达时间		TOA	纠缠光脉冲测距
HOM 干涉仪	伪距	纠缠光子对的到达时间差		HOM 干涉符合计数	二阶量子相干定位方案

2.1 无源量子传感器

2.1.1 原子钟

原子钟是利用原子吸收或释放能量时产生的电磁波的频率来计算时间的。原子钟发展过程如图 3 所示。目前,最先进的光钟不确定度和稳定度最高可以达到 10^{-19} 量级,其中美国 JILA 的 Sr 光钟不稳定性已经可以达到 2×10^{-18} [6]。NIST 的 Yb 光钟

的不确定度和稳定度分别达到了 1.4×10^{-18} 和 3.2×10^{-19} [7]。而近年来研制的量子逻辑钟不确定度指标最高达到了 9.4×10^{-19} [8]。

我国的原子钟研究开始于 20 世纪 60 年代。目前,武汉物理与数学研究所已成功制造出 Ca 离子光钟,时钟不确定度降低到 2.2×10^{-17} [9]。

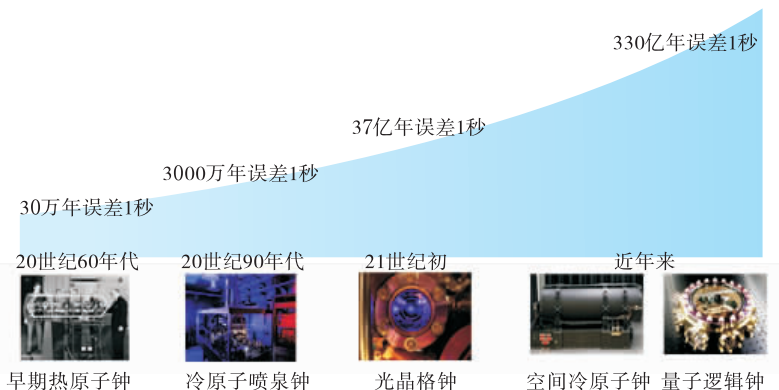


图 3 原子钟发展

2.1.2 原子陀螺

陀螺仪的发展主要经历了机电式、光学式和目前正在探索的原子式以及量子增强式光学陀螺。根据原理不同,原子陀螺可以分为原子干涉陀螺仪、SERF 原子自旋陀螺仪、核磁共振陀螺仪三种。

2.1.2.1 原子干涉陀螺仪

原子干涉陀螺仪原理如图 4 所示。

德国汉诺威大学在 2008 年研制了一种小型 AIG,其短期灵敏度达到 $6.1 \times 10^{-7} \text{ rad/s} \sqrt{\text{Hz}}$ [10],

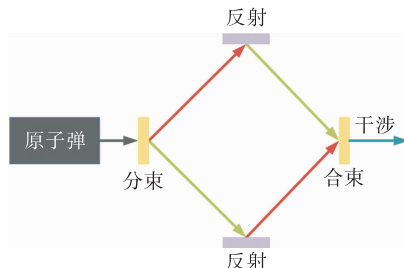


图 4 原子干涉陀螺原理

2014年又报道了一种物质波 Sagnac 干涉仪的最新进展,分析了由原子源不稳定性及脉冲光光栅的残余失调引起的旋转测量误差,实现了 $850 \text{ nrad/s} \sqrt{\text{Hz}}$ 的灵敏度和 20 nrad/s 的稳定度^[11]。2000年,斯坦福大学和耶鲁大学联合开发的原子陀螺仪短期灵敏度为 $6 \times 10^{-10} \text{ rad/s} \sqrt{\text{Hz}}$ ^[12]。与此同时,巴黎天文台 LNE-SYRTE 实验室实现了三轴测量原子陀螺仪,短期灵敏度达到 $2.4 \times 10^{-7} \text{ rad/s} \sqrt{\text{Hz}}$ ^[13]。2018年,他们报道了一种消除死区时间的原子陀螺,其短期灵敏度可以达到 $30 \text{ nrad/s} \sqrt{\text{Hz}}$,稳定度达到 $3 \times 10^{-10} \text{ rad/s}$ ^[14]。在国内,2007年清华大学冯焱颖等提出了基于原子干涉仪的相位调制进行绝对转动测量的方法。2017年,该团队利用⁸⁷Rb连续冷原子束作为物质波源实现了一个光脉冲原子干涉仪短期灵敏度达到 $7.8 \times 10^{-5} \text{ rad/s} \sqrt{\text{Hz}}$ ^[15]。

2.1.2.2 SERF 原子自旋陀螺仪

SERF 原子自旋陀螺仪利用极化的碱金属原子和惰性气体原子自旋保持定轴来敏感角速度,如图 5 所示。

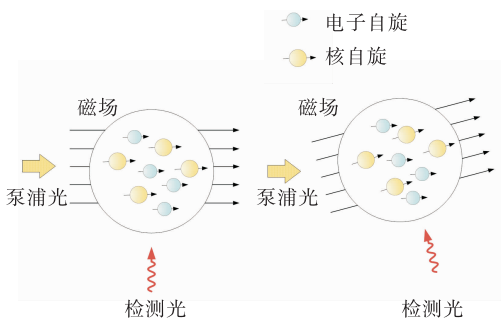


图 5 SERF 陀螺原理

普林斯顿大学在 2005 年开发了基于无自旋交换弛豫磁强计的新型原子自旋陀螺仪^[16]。2016年,其开发出将³He、¹²⁹Xe 和 Rb 作为工作物质的耦合磁强计 SERF 核自旋陀螺^[17]。2018年提出一种芯片级低漂移核自旋陀螺^[18]。国内,北京航空航天大学 2013 年报道了一种基于¹²⁹Xe-Cs 磁强计的 SERF 陀螺,灵敏度达到了 $7 \times 10^{-5} \text{ rad/s} \sqrt{\text{Hz}}$ ^[19]。2016年,进行 K-Rb-²¹Ne 陀螺仪研究,得到了 $4.6 \times 10^{-7} \text{ rad/s} \sqrt{\text{Hz}}$ 的灵敏度^[20]。

2.1.2.3 核磁共振陀螺仪

美国 Northrop Grumman 公司 2014 年首次研制出微型封装核磁共振陀螺仪^[21],原理如图 6 所示。2018年,该公司又提出一种新型铁氧体磁屏蔽内层结构。

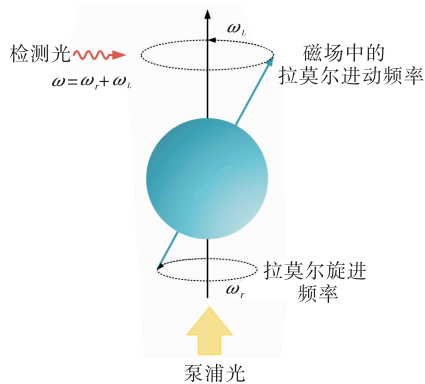


图 6 核磁共振陀螺原理

2.1.3 量子增强光学陀螺

光学陀螺是基于 Sagnac 效应的惯性量测元件,其工作物质为光波。Bertocchi 小组于 2006 年首次实现了量子光学 Sagnac 效应,如图 7 所示。

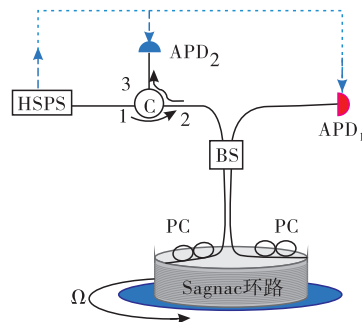


图 7 Bertocchi 小组单光子 Sagnac 干涉实验原理图^[23]

2007 年 Kolkiran 小组在理论上研究了利用纠缠光子增强 Sagnac 效应,如图 8 所示。

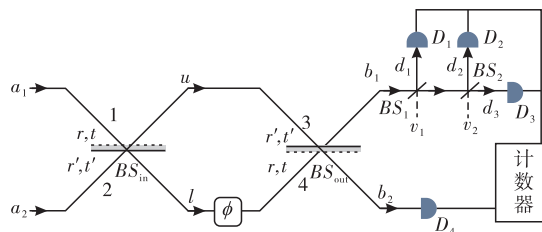


图 8 Kolkiran 小组所提方案原理图^[24]

2013 年,上海交通大学提出利用双模压缩相干光来增强 Sagnac 效应^[25]。2017 年,空军工程大学提出将相干态和 Fock 态注入光纤陀螺增强 Sagnac 效应,研究利用奇偶测量实现了量子态的最优测量,当 Fock 态的平均光子数 N 远小于相干态时,其陀螺精度提高了 $(1 + 2N)$ 倍^[26]。然而该方案无法在旋转角为零时获得最佳灵敏度,为此提出了基于压缩真空光的增强方案^[27-28],将单模压缩光与相干光分别注入陀螺,并采用平衡零拍探测消除了本地振荡器的所有技术噪声和经典噪声,其相位灵敏度能提高 er 倍,其中 er 为压缩态的压缩强度。

2.1.4 原子加速度计

原子加速度计是利用冷原子干涉效应来实现的,其中敏感垂直方向重力的原子加速度计也叫作

原子重力仪或重力梯度仪。原子重力仪的原理如图 9 所示,原子经过磁光阱冷却之后,使原子自由下落或呈喷泉向上抛出,通过在纵向上作用拉曼激光脉冲来实现原子干涉。干涉的相位结果包含重力信息,体现在原子内态布居数,其关系表现为 $P_2 = (1 - \cos(k_{\text{eff}}gT^2))/2$ 。通过内态探测,能够实现重力加速度的测量。

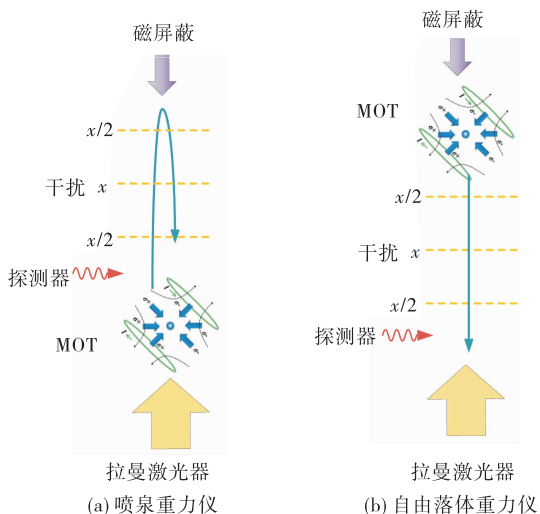


图 9 原子重力仪原理图

1991 年,美国斯坦福大学的 Chu 小组提出利用冷原子喷泉实现重力加速度测量^[29]。2014 年,该研究组又完成了高度达 10m 的喷泉式原子干涉重力仪的搭建和测试工作,其灵敏度可达 $6.7 \times 10^{-12} \text{ g}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[30]。2019 年加州大学用一种移动式原子重力仪,在实验室测量潮汐重力变化,并在野外测量重力^[31]。目前在国,浙江大学、国防科技大学等都开展了冷原子干涉重力仪的相关研究。浙江大学开发出的重力仪灵敏度达到了 $1 \times 10^{-7} \text{ g}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[32]。华中科技大学搭建的上抛的冷原子绝对重力仪,灵敏度达到 $4.2 \times 10^{-9} \text{ g}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[33]。

为解决动态性能问题,McDonald 等提出了一种光波导中的原子干涉测量加速度的方法,未来可以通过增加两个正交波导原子干涉仪实现多轴惯性传感器^[34]。除此之外,Battelier 等通过将经典的惯性传感器与原子传感器集成,进一步提升了原子加速度计的动态性能,测量灵敏度达到 $2.3 \times 10^{-4} \text{ g}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[35]。

2.1.5 量子磁力仪

地磁导航是通过地磁传感器测得的方向做指示,或实时获得地磁数据,与计算机中存储的地磁基准图匹配定位来实现的导航技术,具有无源、无辐射、全天时、全地域、全天候、能耗低等优良特征。高性能的弱磁性探测技术是地磁导航的技术基础。

2.1.5.1 超导量子干涉磁力仪

超导量子干涉磁力仪(Superconductor Quantum Interference Device, SQUID)是将磁通基于超导约瑟夫效应和磁通量子化现象转化为电压的磁通传感器,具有可以检测非常微弱的磁场并且精度很高的优点。超导量子干涉磁力仪是一对由超导材料制作的闭合环和环中间的一个很薄的绝缘隧道结(称为约瑟夫森结)组成的^[36],如图 10 所示。

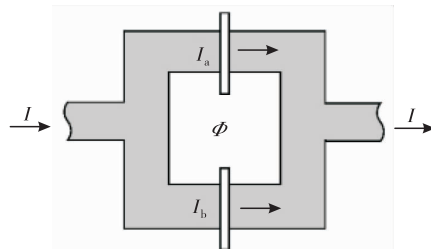


图 10 超导量子干涉磁力仪原理图

布赖恩·戴维·约瑟夫森在 1962 年预测了约瑟夫森效应,在此基础上发展出超导量子干涉磁力仪,主要有两种类型,即直流超导量子干涉磁力仪(DC SQUID)和射频超导量子干涉磁力仪(RF SQUID)^[37]。1964 年,Jaklevic 等提出了双 Josephson 结量子干涉模型^[38]。1987 年 Koch 和 Nakane 首先制造出了高温直流超导量子干涉磁力仪。在这之后,德国 GFZ 利用 SQUID 进行了地面电磁法的相关试验工作。三轴 SQUID 磁力仪被美国特瑞斯坦技术公司开发出来^[39]。在国内,北京大学物理系和中国科学院物理研究所联合开发了高温超导磁力仪^[40]。

2.1.5.2 光泵磁力仪

光泵磁力仪(Optically Pumped Magnetometer, OPM)是一种高精度和高灵敏度的磁测仪器。其工作原理是原子能级在磁场中因塞曼效应产生劈裂,此时对原子进行光泵浦,原子在电磁波作用下发生光磁共振效应,待测磁场大小可以根据所加电磁波频率计算得出,如图 11 所示。

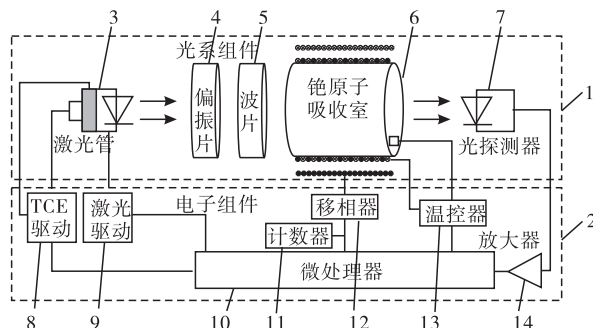


图 11 光泵磁力仪原理图

光泵磁力仪种类很多,可按照测量参数不同,可分为分量磁力仪、梯度磁力仪等;按敏感物质的原子种类不同,分为碱金属光泵磁力仪和氮(He)光泵磁

力仪;按技术设计方案的不同,可分为跟踪式光泵磁力仪和自激式光泵磁力仪等。

2.1.5.3 CPT 磁力仪

相干粒子数捕获(CPT)量子干涉磁力仪利用的效应是一种量子干涉效应,这也是该磁力仪称为量子干涉磁力仪的原因,也可将其称之为 CPT 磁力

仪,其具有能耗低、体积微小、灵敏度高、性能稳定等优点,精度可以达到 $(10^{-4})\text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

光学镜片、激光器、原子气室和光电探测器构成 CPT 磁力仪的传感器部分^[41],图 12 展示了 CPT 磁力仪传感器的内部结构。

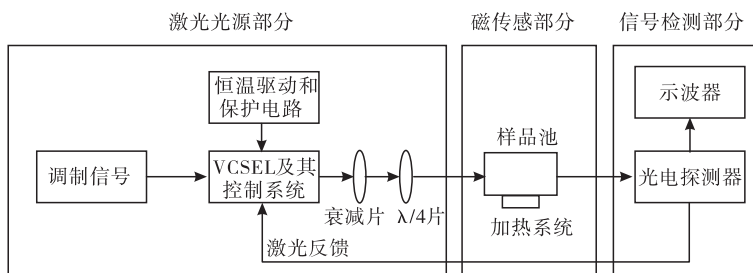


图 12 CPT 磁力仪系统结构

德国波恩大学 Wynands 小组最早利用 CPT 原理进行磁场测量的相关研究^[42]。2002 年,该小组通过将两个传感器联合起来,除去了杂散场的干扰,成功制造了磁力梯度仪。此后,在 2007 年,塞尔维亚科学院的 Yanev 小组研制了一套基于 CPT 原理的全光测磁系统^[43]。2009 年,Kitching 小组设计出了物理部分尺寸为 12mm^3 、测量灵敏度为 $2.6\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的 CPT 磁力仪^[44]。国内吉林大学、中国科学院武汉物理与数学研究所等科研机构也开展了 CPT 量子干涉磁力仪的相关实验研究。

2.2 有源量子传感器

量子有源传感器是通过接收外部人工制造信号,以被测物理量对环境空间表征进行探测的传感器。

2.2.1 光子探测器

单光子探测器能够实现对光的最小单元光子的探测,可以对单个光子进行计数,极大地提高了光谱测量的灵敏性和精度。2001 年由美国麻省理工学院实验室的 V. Giovannetti 研究团队提出了一种利用量子纠缠和压缩特性的定位方式^[45],理想化结构如图 13 所示。

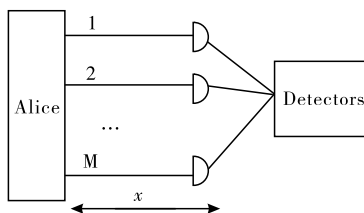


图 13 理想化实验结构示意图

待测点 Alice 通过发送 M 个纠缠光脉冲,接收方通过单光子探测器测量每一个纠缠光脉冲的到达时间,可以获得位置信息,这种方法的测量精度上限比经典方式提高了 \sqrt{M} 倍。如果每个脉冲包含 N

个纠缠光子,则测量精度上限可以进一步提高到 \sqrt{MN} 倍。之后该团队提出了一种基于压缩脉冲频率纠缠的定位方案,详细分析了该方案提高位置测量精度和实现量子加密定位的可能性^[46-47]。

近年来随着超导电路量子电动力学系统及腔量子电动力学系统的不断成熟,基于此的微波单光子探测器研究也不断深入,目前已衍生出两种较为成熟的微波单光子探测技术,即基于电流偏置约瑟夫森结的腔光子探测技术和基于超导体人工原子的传输线单光子探测技术^[48]。

2007 年,Romero 设计了一种基于电流偏置的约瑟夫森结实现微波腔光子探测的方案,如图 14 所示^[49]。2020 年,Peropadre 将电流偏置约瑟夫森结耦合到微波传输线,理论上探测效率可达 100% ^[50]。2014 年,Flurin 等利用约瑟夫森环形调制器实现 3D 微波超导腔与传输线的耦合,并实现了微波光子的捕获、存储和读取,其效率达 80% ^[51]。2019 年,同组的 Peronnin 实现了对 Transmon 量子比特的连续测量。2020 年,该小组在此基础上实现了微波光子计数器,可同时分辨三个光子,其探测效率为 96% ^[52]。

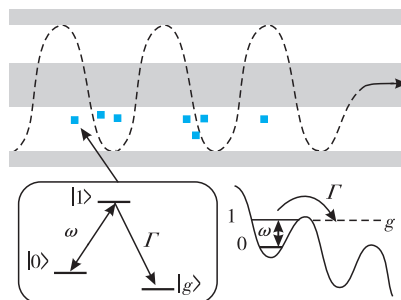


图 14 基于电流偏置约瑟夫森结的微波腔光子探测模型^[51]

2.2.2 腔光力学微腔

腔电光力转换器 (Electro-Opto-Mechanical,

EOM)是一种双模、跨频段的广义腔光力系统,将一个纳米机械振子同时作为光学谐振腔的可移动腔镜和微波谐振腔中可移动电容极板,在光力作用下实现对于微波光子-机械振动声子-光波光子之间的有效耦合。在微纳 EOM 转换器中,单个微波光子-机械振动声子-光波光子可以实现超强耦合,意味着微纳 EOM 转换器可以实现精确、高效的频率转换和态转移,进而将微波单光子、纠缠微波信号一一对应地转移到器件和技术成熟高效的光波频段进行探测,提高探测效率,同时可以大幅降低成本和缩短研制时间。当控制机械振子工作于机械暗态时,还可以实现绝热转移,达到对噪声的强力抑制,这些优势使得 EOM 转换器十分适合作为纠缠微波信号、微波单光子的探测器。

现有的腔光力系统分为法布里—珀罗腔^[53-57]、回音壁腔^[58-61]、振动薄膜腔^[62-63]、光子晶体腔^[64-68]、超导微波腔^[69-72]五大类,如图 15 所示。Delic 等提出悬浮式粒子型的法布里—珀罗腔,可以实现线性、二次等各种光力相互作用,同时该结构可以在强协同水平方面获得较好的性能表现^[73];高 Q 值硅基回音壁腔由 Hyungwoo 等提出,其降低光模式面积的同时增加了腔材料的拉曼增益^[74];Chuan 等提出了一种驱动一个内含薄膜的腔光力系统以实现机械振子基态冷却的方案^[75];Rajasekar 等提出了一种通过六边形结构的光子晶体环状谐振腔进行压力和温度感知的方案^[76];Bienfait 等设计的超导微波腔光力系统,实现了两个超导微波腔中超导微波量子比特在收发过程中保真度为 84%、效率高达 67%的超导微波量子态转移^[77]。

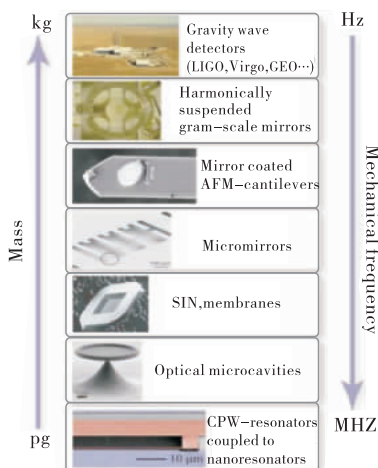


图 15 各种不同质量和机械振动频率的腔光力系统

2.2.3 HOM 干涉仪

HOM 干涉最早是 1987 年 Mandel 小组在实验中观测到的,该小组利用参量转换产生的纠缠光子对实现了双光子干涉,图 16 为 HOM 干涉原理图。

2004 年,美国军队研究实验室 (ARL) Bahder 等人提出了一种利用纠缠光子对二阶量子相干的量子定位系统 (QPS) 具体方案^[78]。

国内空军工程大学杨春燕等人基于 Thomas B. Bahder 博士提出的干涉式 QPS 的星座布置方案,研究了 QPS 位置精度因子 (PDOP) 的相关影响因素^[79]。中国科学技术大学的丛爽等人对基于 3 颗卫星的星量子定位系统的测距与定位过程进行了深入研究并提出相关方案^[80],重点研究了 ATP 中的精跟踪系统^[81,82],通过研究量子纠缠光符合计数与到达时间差,对符合门宽、采集时间和延时增加步长进行参数优化^[83]。

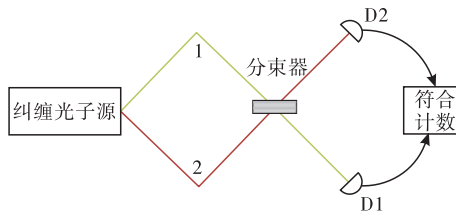


图 16 HOM 干涉仪原理图

3 量子导航技术发展展望

研究表明,已经可以利用量子传感器实现时间、加速度、重力和磁场等精密测量,但对于量子传感的导航应用来说,仍然存在以下几点问题:

1) 量子导航缺少完整的系统体制研究。目前量子导航的相关研究主要是从传感器层面进行的,很少有完整系统的相关报道。比如量子惯性导航还不能做到陀螺和加速度计的集成,实现量子惯性导航系统的全惯性参数测量。

2) 如何实现量子导航的组合导航方式。由于单一导航系统存在一定的局限性,为满足高可靠性、全地域、全天时、全天候导航要求,组合导航技术成为了必然的趋势,而量子导航也必然要作为其中的一种导航方式,与其他传统导航系统进行组合。

3) 量子传感器的工作条件苛刻。部分超导量子传感器工作条件需要大体积的制冷设备,仪器体积和功耗偏大,急需开展高温超导材料或可替代量子传感器的研究工作。

目前已经有研究团队开始探索量子导航与传统导航传感器的集成。国外 Canciani 研究了冷原子干涉惯性导航与传统惯性导航系统以及 GPS 系统的组合方式^[84]。Cheiney 等提出了一种量子加速度计和经典加速度计组合方案^[85]。

参考文献

[1] GIOVANNETTI V, LLOYD S, MACCONE L.

- Quantum-Enhanced Measurements: Beating the Standard Quantum Limit [J]. *Science*, 2004, 306 (5700): 1330-1336.
- [2] MAJOR F G. Quo Vadis: Evolution of Modern Navigation-The Rise of Quantum Techniques [M]. New York: Springer Science+Business Media, 2014.
- [3] 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.
- [4] 郭光灿, 张昊, 王琴. 量子信息技术发展概况 [J]. *南京邮电大学学报(自然科学版)*, 2017, 37(3): 1-14.
- [5] 陈晖, 徐兵杰, 王运兵. 量子信息技术及其应用探讨 [J]. *中国电子科学研究院报*, 2012, 7(5): 441-445.
- [6] BOTHWELL T, KEDAR D, OELKER E, et al. JILA SrI Optical Lattice Clock With Uncertainty of 2.0×10^{-18} [J]. *Metrologia*, 2019, 56: 065004.
- [7] MCGREW W F, ZHANG X, FASANO R J, et al. Atomic Clock Performance beyond the Geodetic Limit [J]. *Nature*, 2018, 564: 87-90.
- [8] BREWER S M, CHEN J S, HANKIN A M, et al. Al^{+} 27. Quantum-Logic Clock with a Systematic Uncertainty below 10^{-18} [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(3): 033201. 1-033201. 6.
- [9] HUANG Y, GUAN H, ZENG M, et al. $40Ca$ + ion Optical Clock with Micromotion-Induced Shifts Below 1×10^{-18} [J]. *Physical Review A*, 2019, 99 (1): 011401
- [10] TACKMANN G, BERG P, SCHUBERT C, et al. Self-alignment of a Compact Large-Area Atomic Sagnac Interferometer [J]. *New Journal of Physics*, 2012, 14(1): 015002.
- [11] TACKMANN G, BERG P, ABEND S, et al. Large-area Sagnac Atom Interferometer with Robust Phase Read Out [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2014, 15 (10): 884-897.
- [12] GUSTAVSON T L, LANDRAGIN A. Rotation Sensing with a Dual Atom-Interferometer Sagnac Gyroscope [J]. *Classical Quantum Gravity*, 2000, 17(12): 2385.
- [13] CANUEL B, LEDUC F, HOLLEVILLE D, et al. Six-Axis Inertial Sensor Using Cold-Atom Interferometry [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97 (1): 010402.
- [14] GEIGER R, SAVOIE D, ALTORIO M, et al. Interleaved Matter-Wave Gyroscope with 3×10^{-10} rad. s^{-1} Stability [C]//Conference on Precision Electromagnetic Measurements. IEEE, 2018.
- [15] 王安琪, 孟至欣, 李营营. 连续冷原子束干涉陀螺仪研究进展 [J]. *导航定位与授时*, 2017, 4(1): 77-84.
- [16] ALLRED J C, LYMAN R N, KORNACK T W, et al. High-Sensitivity Atomic Magnetometer Unaffected by Spin - Exchange Relaxation [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(13): 130801.
- [17] LIMES M, SHENG D, ROMALIS M. A 3 He- 129 Xe co-magnetometer with 87 Rbmagnetometry [C]//Aps Division of Atomic, Molecular & Optical Physics Meeting, APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics Meeting Abstracts, 2016.
- [18] ROMALIS M, KORNACK T. Chip-Scale Combinatorial Atomic Navigator (C-SCAN) Low Drift Nuclear Spin Gyroscope [R]. U. S. Government Science and Technology Report, 2018, 1-39.
- [19] FANG J C, QIN J, WAN S A, et al. Atomic Spin Gyroscope Based on Xe- 129 -Cs Comagnetometer [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(13): 1512-1515.
- [20] LI R, FAN W, JIANG L, et al. Rotation Sensing Using a K-Rb-Ne 21 Comagnetometer [J]. *Physical review A*, 2016, 94(3): 032109.
- [21] LARSEN M, BULATOWICZ M. Nuclear Magnetic Resonance Gyroscope: For DARPA's Micro-Technology for Positioning, Navigation and Timing Program [C]//Frequency Control Symposium (FCS), 2012 IEEE International. Baltimore, MD, USA: IEEE, 2012.
- [22] MASPERO F, BULATOWICZ M. Nuclear Magnetic Resonance Gyroscope: Developing a Primary Rotation Sensor [C]//International Symposium on Inertial Sensors and Systems. Lake Como, Italy: IEEE, 2018.
- [23] BERTOCCHI G, ALIBART O, OSTROWSKY D B, et al. Single-Photon Sagnac Interferometer [J]. *Journal of Physics B Atomic Molecular & Optical Physics*, 2006, 39(5): 1011.
- [24] KOLKIRAN A, AGARWAL G S, et al. Heisenberg Limited Sagnac Interferometry [J]. *Optics Express*, 2007, 15(11): 6798-6808.
- [25] 肖骁琦. 基于关联光学的精密测量理论和研究方法研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [26] CHEN K, CHEN S X, WU D W, et al. A Scheme for Sagnac-Effect Quantum Enhancement with Fock State Light Input [J]. *中国物理 B*, 2017, 26 (9): 94212-094212.
- [27] 陈坤, 陈树新, 吴德伟, 等. 压缩真空光输入和光子计数法增强 Signac 效应 [J]. *光子学报*, 2017(5): 65-71.
- [28] 陈坤, 陈树新, 吴德伟, 等. 相干态和压缩真空态的自适应最优估计方法 [J]. *物理学报*, 2016, 65(19): 79-85.
- [29] KASEVICH M, CHU S. Atomic Interferometry Using Stimulated Raman Transitions [J]. *Physical Review Letters*, 1991, 67(2): 181-184.
- [30] DICKERSON S M, HOGAN J M, SUGARBAKER A, et al. Multi-axis Inertial Sensing with Long-time Point Source Atom Interferometry [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111: 083001.

- [31] WU X, PAGEL Z, MALEK B S, et al. Gravity Surveys Using a Mobile Atom Interferometer[J]. *Science Advances*, 2019, 5(9): eaax0800.
- [32] WU B, WANG Z, CHENG B, et al. The Investigation of a μ Gal-level Cold Atom Gravimeter for Field Applications[J]. *Metrologia*, 2014, 51(5):452-458.
- [33] HU Z K, SUN B L, DUAN X C, et al. Demonstration of an Ultrahigh-Sensitivity Atom-Interferometry Absolute Gravimeter[J]. *Physical Review A*, 2013, 88(4):043610.
- [34] MCDONALD G D, KEAL H, ALTIN P A, et al. Optically Guided Linear Mach-Zehnder Atom Interferometer[J]. *Physical Review A*, 2013, 87(1):013632.
- [35] BATTELIER B, BARRETT B, FOUCHÉ L, et al. Development of Compact Cold-Atom Sensors for Inertial Navigation[C]//SPIE Photonics Europe, *Quantum Optics*, 2016 (9900):990004.
- [36] 银鸿, 杨生胜, 郑阔海, 等. 弱磁测量传感器的发展与应用[J]. *真空与低温*, 2017, 23(5):304-310.
- [37] 曾宪金. 基于 Bell-Bloom 结构和圆二向色性检测的铯原子磁力仪研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2013.
- [38] 郭亚锋. 具有随机相移的 Josephson 结阵列的动力学研究[D]. 浙江:浙江师范大学, 2010.
- [39] 王三胜, 张明吉, 贺同福. 一种基于巨磁阻抗效应的全张量磁场梯度计: 中国, CN104062607B[P]. 2017-01-11.
- [40] 张昌达, 董浩斌. 量子磁力仪评说[J]. *工程地球物理学报*, 2004, 1(6):499-507.
- [41] 张笑楠, 寇军, 李洁. CPT 磁力仪暗态耦合磁场测量技术[J]. *中国惯性技术学报*, 2017, 25(6):753-758.
- [42] 刘智. 铯原子相干布居俘获实验参数研究[D]. 太原:山西大学, 2013.
- [43] 冉莹莹. 磁力仪光源和光电检测技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2017.
- [44] 李庆萌. 磁场对原子磁力仪相关光谱影响的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2017.
- [45] GIOVANNETTI V, LLOYD S, MACCONE L. Quantum - Enhanced Positioning and Clock Synchronization[J]. *Nature*, 2001, 412(6845): 417-419.
- [46] GIOVANNETTI V, LLOYD S, MACCONE L. Quantum Positioning System [M]//Coherence and Quantum Optics VIII. Springer US, 2003.
- [47] GIOVANNETTI V, LLOYD S, MACCONE L. Positioning and Clock Synchronization Through Entanglement[J]. *Physical Review A*, 2002, 65(2):022309.
- [48] SATHYAMOORTHY S R, STACE T M, JOHANSSON G. Detecting Itinerant Single Microwave Photons [J]. *Comptes rendus - Physique*, 2016, 17(7):756-765.
- [49] G ROMERO, GARCIA-RIPOLL J J, SOLANO E. Microwave Photon Detector in Circuit QED[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(17):173602.
- [50] PEROPADRE B, ROMERO G, JOHANSSON G, et al. Perfect Micro wave Photodetection in Circuit QED [J]. *Physical Review A*, 2010, 84(6):063834.
- [51] E FLURIN, N ROCH, et al. Superconducting Quantum Node for Entanglement and Storage of Microwave Radiation[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114(9):90503-90503.
- [52] PERONNIN T, D MARKOVIĆ, FICHEUX Q, et al. Sequential Measurement of a Superconducting Qubit [J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(18):180502.
- [53] ZHANG J, PENG K, BRAUNSTEIN S L. Quantum-State Transfer from Light to Macroscopic Oscillators [J]. *Physical Review A*, 2003, 68(1):356-367.
- [54] VITALI D, MANCINI S, TOMBESI P. Stationary Entanglement Between Two Movable Mirrors in a Classically Driven Fabry-Perot Cavity[J]. *Mathematics*, 2007, 40(28):8055-8068.
- [55] WILSON D J, REGAL C A, PAPP S B, et al. Cavity Optomechanics with Stoichiometric SiN Films [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103(20):207204.
- [56] BITARAFAN M H, RAMP H, ALLEN T W, et al. Thermo-Mechanical Characterization of On-Chip Buckled Dome Fabry-Perot Microcavities[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2015, 32(6):1214.
- [57] PONTIN A, MOUROUNAS L S, GERACI A A, et al. Levitated Optomechanics with a Fiber Fabry-Perot Interferometer[J]. *New Journal of Physics*, 2018, 20(2):023017.
- [58] ARMANI D K, KIPPENBERG T J, SPILLANE S M, et al. Ultra-High-Q Toroid Microcavity on a Chip [J]. *Nature*, 2003, 421(6926):925.
- [59] HOSSEIN-ZADEH M, ROKHSARI H, HAJIMIRI A, et al. Characterization of a Radiation-Pressure-Driven Micromechanical Oscillator[J]. *Physical Review A*, 2006, 74(2):023813.
- [60] HENZE R, PYRLIK C, THIES A, et al. Fine-tuning of Whispering Gallery Modes in On-Chip Silica Micro-disk Resonators within a Full Spectral Range[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(4):41104-41104.
- [61] KAVUNGAL V, FARRELL G, WU Q, et al. A Packaged Whispering Gallery Mode Strain Sensor Based on a Polymer-Wire Cylindrical Micro Resonator [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 36(9):1757-1765.
- [62] THOMPSON J D, ZWICKL B M, JAYICH A M, et al. Strong Dispersive Coupling of a High-Finesse Cavity to a Micromechanical Membrane[J]. *Nature*, 2008, 452(7189):900.
- [63] JAYICH A M, HARRIS J, SANKEY J C, et al.

- Strong and Tunable Nonlinear Optomechanical Coupling in a Low-Loss System [J]. *Nature Physics*, 2010, 6(9):707-712.
- [64] PAINTER O, VUCKOVIC J, SCHERER A. Defect Modes of a Two-Dimensional Photonic Crystal in an Optically Thin Dielectric Slab[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1999, 16(2):275-285.
- [65] EICHENFIELD M, CAMACHO R, CHAN J, et al. A Picogram and Nanometre-Scale Photonic-Crystal Optomechanical Cavity[J]. *Nature*, 2009, 459(7246):550-555.
- [66] SAFAVI-NAEINI A H, HILL J T, MEENEHAN S, et al. Two-Dimensional Phononic-Photonic Bandgap Optomechanical Crystal Cavity[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(15):153603-153603.
- [67] BUREK M J, COHEN J D, MEENEHAN S M, et al. Diamond Optomechanical Crystals [J]. *Physics*, 2015, 3(12):1404.
- [68] RIEDINGER R, WALLUCKS A, MARINKOVII I, et al. Remote Quantum Entanglement Between Two Micromechanical Oscillators [J]. *Nature*, 2018, 556(7702):473.
- [69] REGAL C A I, TEUFEL J D, LEHNERT K W. Measuring Nanomechanical Motion with a Microwave Cavity Interferometer[J]. *Nature Physics*, 2008, 4(7):555-560.
- [70] TEUFEL J D, D LI, ALLMAN M S, et al. Circuit Cavity Electromechanics in the Strong-Coupling Regime[J]. *Nature*, 2011, 471(7337):204-208.
- [71] FINK J M, KALAHEO M, PITANTI A, et al. Quantum Electromechanics on Silicon Nitride Nanomembranes[J]. *Nature Communications*, 2015, 7:12396.
- [72] LI Y C, TANG J S, JIANG J L, et al. A Controllable Superconducting Electromechanical Oscillator with a Suspended Membrane[J]. *Aip Advances*, 2019, 9(1):015029.
- [73] DELIĆ U, GRASS D, REISENBAUER M, et al. Cavity Cooling of a Levitated Nanosphere by Coherent Scattering[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(12):123602.
- [74] CHOI H, CHEN D, DU F, et al. Low Threshold Anti-Stokes Raman Laser On-chip [J]. *Photonics Research*, 2019, 7(8):926.
- [75] WANG C, LIN Q, HE B. Breaking Optomechanical Cooling Limit by Two Drive Fields on a Membrane-in-middle System[J]. *Physical Review A*, 2019, 99(2):023829.
- [76] RAJASEKAR R, ROBINSON S. Nano-Optical Switch Based on Photonic Crystal Ring Resonator[J]. *Plasmonics*, 2019, 14(6):1-8.
- [77] BIENFAIT A, SATZINGER K J, ZHONG Y P, et al. Phonon-mediated Quantum State Transfer and Remote Qubit Entanglement [J]. *Science*, 2019, 364(6438):368-371.
- [78] BAHDER T B. BAHDER. Quantum Positioning System[R]. Army Research Lab Adelphi MD, 2004, 53-76.
- [79] 杨春燕, 吴德伟, 余永林, 等. 干涉式量子定位系统最优星座分布研究[J]. *测绘通报*, 2009(12):1-6.
- [80] 丛爽, 宋媛媛, 尚伟伟, 等. 三颗量子卫星组成的导航定位系统探讨[J]. *导航定位学报*, 2019, 7(1):1-9.
- [81] 邹紫盛, 丛爽, 尚伟伟, 等. 量子定位中精跟踪系统状态滤波及控制器设计[J]. *系统工程与电子技术*, 2019, 41(3):142-147, 149-151.
- [82] DUAN S, CONG S, ZOU Z, et al. Modelling and Simulation of the Quantum Ranging and Positioning System [J]. *International Journal of Modelling and Simulation*, 2019(4):1-15.
- [83] 丛爽, 宋媛媛, 量子定位系统中符合计数与到达时间差的获取[J]. *北京航空航天大学学报*, 2020, 46(10):1834-1843.
- [84] CANCIANI A. Integration of Cold Atom Interferometry INS with Other Sensors[D]. San Diego: Air Force Institute of Technology, 2012.
- [85] CHEINEY P, FOUCHÉ, LAURIANE, et al. Navigation-Compatible Hybrid Quantum Accelerometer Using a Kalman Filter [J]. *Physical Review Applied*, 2018, 10(3):034030.

(编辑:张建业)