

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2022.03.001

# 新型微光机电系统惯性测量技术研究进展

黄勇军, 李昕蔚, 吴江波, 闫兴, 陈鼎威, 李建, 文光俊

(电子科技大学信息与通信工程学院, 成都 611731)

**摘要:**微惯性测量单元(MIMU)是惯性导航系统(INS)的核心组件,亦是构建微定位导航授时( $\mu$ -PNT)系统的重要组成部分。当前成熟的微惯性测量单元主要基于微机电系统(MEMS)实现,其性能逐渐难以满足新型无人驾驶车、无人飞行器以及制导弹药、航空航天器等军民领域对高精度惯性导航的需求。近年来,各种新型微惯性测量技术相继被提出,以期望突破微惯性测量单元的性能与尺寸、质量、功耗(SWaP)之间相互制约的关键技术难题。系统总结了近年来国内外在常规MEMS惯性测量技术以及新型微光机电系统(MOEMS)惯性测量、微腔光力惯性测量、量子精密测量等几类新型惯性测量技术方面的研究进展,展望了未来新型高精度惯性测量技术的发展趋势,并提出了一种基于腔光力系统的量子增强型惯性测量技术构想。

**关键词:**微惯性测量技术;微机电系统;微光机电系统;微腔光力系统;量子增强型传感技术

**中图分类号:** V241.62 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8110(2022)03-0001-13

## Research Progress on New Micro-Opto-Electro-Mechanical System Inertial Measurement Technology

HUANG Yong-jun, LI Xin-wei, WU Jiang-bo, YAN Xing, CHEN Ding-wei, LI Jian, WEN Guang-jun

(School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** Micro inertial measurement unit (MIMU) is not only the core component of inertial navigation system (INS), but also an important part of micro-technology for positioning, navigation and timing ( $\mu$ -PNT) service system. At present, the well-developed MIMU is mainly realized by the micro-electro-mechanical system (MEMS), however, its performance cannot meet the increasing requirements for high-precision inertial navigation in the civilian areas such as unmanned vehicles, unmanned aerial vehicles, and military areas such as missiles, aerospace vehicles. In recent years, a variety of new micro inertial measurement technologies have been proposed to break the key technical problems of MIMU, namely the intra-restriction between the precision performance and the size, weight, and power consumption (SWaP). This review paper aims to summarize the research progress of the conventional MEMS inertial measurement technology, and the newly-developed micro-opto-electro-mechanical system (MOEMS) inertial sensing, cavity optomechanical inertial sensing and quantum sensing technologies in recent years, forecast the future development trends of new high-precision inertial measurement technologies, and propose a novel concept of quantum enhanced inertial measurement unit based on cavity optomechanical system.

**Key words:** MIMU; MEMS; MOEMS; Cavity optomechanical system; Quantum-enhanced

收稿日期:2021-12-20;修订日期:2022-02-08

基金项目:装发快速支持(80917010101);国防科技173计划技术领域基金(2021-JCJQ-JJ-0667)

作者简介:黄勇军(1985-),男,博士,副教授,主要从事新型微光机电系统和其在惯性导航及授时等方面的应用研究。

sensing technology

## 0 引言

微惯性测量技术是指利用微纳尺寸的惯性传感器件,对运载体的加速度、角速度等惯性参数进行测量的技术<sup>[1]</sup>,其在产品级应用的主要表现形式是基于微机电系统(Micro Electro Mechanical System, MEMS)的微惯性测量单元(Micro Inertial Measurement Unit, MIMU)<sup>[2]</sup>。MEMS MIMU是微惯性导航技术的核心,同时也是微定位导航授时(Micro-technology for Positioning, Navigation and Timing,  $\mu$ -PNT)技术的重要组成部分<sup>[3-4]</sup>。而PNT技术可以弥补全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)信号脆弱性的不利影响,实施全空域目标的PNT服务是国家级的战略技术,已受到各个国家的高度重视<sup>[5]</sup>。美国于2005年开始研究PNT系统,并在2010年发布了PNT系统实施计划,目标是“发展独立于全球定位系统(Global Positioning System, GPS)的综合性国家PNT系统,预期在2025年前后为美国提供更高效的PNT能力<sup>[6]</sup>”;中国则提出以北斗系统为核心,计划于2035年前建立和完善一个更加普遍化、集成化和智能化的综合PNT系统<sup>[7]</sup>,旨在为全球用户提供更统一、更准确、更可靠的时空信息服务。在综合PNT系统中,惯性导航技术是一种不依赖外部信息,也不向外辐射能量的自主式导航系统技术,早已渗透到人类生活的方方面面,小至智能手机、机动车、机器人、无人机,大至飞机、导弹制导<sup>[8]</sup>等领域,而这都离不开基础的IMU技术的发展,因此相关研究是十分有必要的。

IMU根据其在惯性导航应用场景中的性能和精度需求进行分级,可分为战略级、导航级、战术级和消费级,如表1所示<sup>[9]</sup>。传统的MEMS MIMU主要集中在消费级和战术级,目前世界上精度最高的

MEMS MIMU已突破导航级,但受制于校准方法和各类电学噪声、热噪声以及分辨率极限等,很难再进一步提高性能。近年来,微光机电系统(Micro Opto-Electro-Mechanical System, MOEMS)技术得到快速发展,特别是其中基于腔光力系统技术的发展,使该问题有了新的解决思路。

鉴于此,本文对近年来微惯性测量技术方面的研究进展进行了综述,并对未来可能出现的新型MIMU技术进行了展望。本文的主要框架如下:第一部分介绍了MEMS MIMU,分析了其存在的问题,并提出了解决方案;第二部分介绍了MOEMS加速度计、陀螺仪等新型惯性传感器,特别是基于腔光力系统的加速度计和陀螺仪的最新研究成果,提出了将腔光力系统用于设计MIMU的构想;第三部分介绍了基于压缩光源的量子增强型传感技术,并提出了一种使用压缩光源以进一步降低腔光力系统噪声的创新思路。

## 1 MEMS微惯性测量技术

在各式各样的MIMU中,MEMS MIMU因体积小、质量小、成本低、功耗少而占据大量市场,被广泛应用于定位与导航等众多场合,如智能手机导航、城市环境定位<sup>[10-11]</sup>、汽车自动导航<sup>[12]</sup>、行人室内导航等<sup>[13]</sup>。MIMU一般由正交的三轴加速度计和三轴陀螺仪构成<sup>[14]</sup>,很多情况下也会使用三轴磁力计提供辅助信息<sup>[15-16]</sup>。其中微加速度计可以测量运载体的加速度,陀螺仪可以测量运载体的角速度。两者结合,根据陀螺仪输出建立导航坐标系,根据加速度计输出解算出运载体在导航坐标系中的速度和位置,所形成的系统便是惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS),进而可以与GNSS集成,提供低成本的导航解决方案<sup>[17]</sup>。

2021年,K. Borodacz等对2020年上半年的IMU市场进行了综合调研<sup>[18]</sup>,得出目前MEMS MIMU虽占据大量市场,但其性能仍无法满足高精度的技术要求。随着军事武器等领域对MEMS MIMU性能的要求越来越高,如何提高其精度将是科研工作者们接下来要关注的难题。近年来,专家学者们提出了诸如校准算法<sup>[19]</sup>、旋转调制技术<sup>[20-21]</sup>、去噪方法<sup>[22-23]</sup>等方案,以试图在不同程度上提高MEMS MIMU的性能,现阶段部分MEMS MIMU技术已实现导航级性能。

表1 惯性测量单元性能等级分类<sup>[9]</sup>

Tab. 1 Performance classification of IMUs<sup>[9]</sup>

性能指标	战略级	导航级	战术级	消费级
加速度计零偏不稳定性	0.1~1 $\mu$ g	<100 $\mu$ g	1~5mg	100~1000mg
陀螺仪零偏不稳定性	0.0001~0.001( $^{\circ}$ )/h	<0.01( $^{\circ}$ )/h	1~10( $^{\circ}$ )/h	0.1( $^{\circ}$ )/s
陀螺仪角度随机游走	<0.001( $^{\circ}$ )/h <sup>1/2</sup>	<0.002( $^{\circ}$ )/h <sup>1/2</sup>	0.05~0.2( $^{\circ}$ )/h <sup>1/2</sup>	2~10( $^{\circ}$ )/h <sup>1/2</sup>

例如,2020年 S. Zotov 等对美国 SDI(Systron Donner Inertial)公司的 SDI500 IMU 产品中的陀螺仪进行重新设计(如图 1(a)所示),并改进前端电子器件以优化噪声参数,最终得到陀螺仪的角度随机游走(Angle Random Walk, ARW)优于  $0.001(^{\circ})/h^{1/2}$ ,零偏不稳定性约为  $0.005(^{\circ})/h$ ,达到导航级性能<sup>[24]</sup>。同年,中国研制出一种新型高精度 MEMS IMU,其产品图和结构图如图 1(c)、图 1(d)所示,其角度随机游走达到  $0.003(^{\circ})/h^{1/2}$ ,零偏不稳定性达到  $0.006(^{\circ})/h$ ,代表当时商用空间应用的最高精度 MEMS IMU<sup>[25]</sup>。2021年, Honeywell 公司基于 HG1930 MEMS IMU 进一步开发了 HG7930 MEMS IMU,产品图如图 1(b)所示,实现了约 1 个数量级的性能提升<sup>[26]</sup>,其角度随机游走达到  $0.0035(^{\circ})/h^{1/2}$ 。然而,受制于校准方法和分辨率极限,特别是各类电学噪声、机械热噪声(如式(1)所示<sup>[27]</sup>),导致 MEMS IMU 的进一步提升空间很小,而且再度提升也将导致其失去低成本的优势。

$$I_{sn} = \sqrt{2qI_{dc}B}, V_{tn} = \sqrt{4kTBR},$$

$$I_{fn} = \sqrt{KI_{dc}B/f} \quad (1)$$

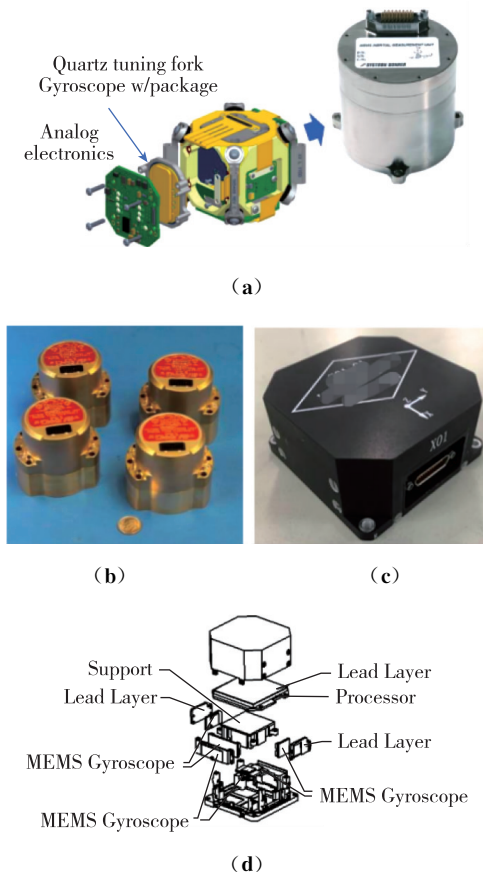


图 1 导航级微惯性测量单元<sup>[24-26]</sup>

Fig. 1 Navigation grade MEMS IMU<sup>[24-26]</sup>

## 2 MOEMS 和腔光力惯性测量技术

### 2.1 MOEMS 惯性测量技术

MOEMS 技术是将 MEMS 技术与微光学技术结合而产生的多学科交叉性技术,它兼具两者的优点,可实现低成本、小型化、可集成、可大批量生产,同时满足高精度、高灵敏度、高热稳定性,以及强抗电磁干扰能力的微光学惯性传感和测量。它可以克服传统 MEMS MIMU 基于电容传感的一些缺点,如输入加速度引起小电容变化、寄生电容、卷曲效应、易受电磁干扰、窄带宽<sup>[28]</sup>等,同时解决了传统光学陀螺仪尺寸、质量、功耗和成本大的问题,使之转变为基于 MOEMS 制造的小型化芯片级器件。将 MOEMS 技术用于研制新型 MIMU 中,有望以较低成本大幅提高 MIMU 产品的性能。虽然当前产品级的 MOEMS MIMU 还未研制出,但 MOEMS 微加速度计和陀螺仪方面已有许多成果不断涌现。

现阶段 MOEMS 微加速度计主要有三种方案<sup>[29]</sup>。其一是基于光强的几何光学方案,结构如图 2(a)所示,其中质量块通过悬挂元件附接到基板,质量块的凸起部分位于输入、输出光纤之间。施加的加速度导致质量块发生位移,输出光纤中透射光强度随之产生变化,据此通过测量透射光强度变化量可得到施加的加速度大小。这种加速度计结构简单、成本低,一般在  $mg$  级精度,但对加速度的敏感度差。其二是基于波动光学的方案,加速度计中的质量块受外部加速度作用发生位移,从而引起激光波长(或频率/相位)的变化,通过测量该变化量可得到施加的加速度大小。根据光学位移测量单元的形式和测量原理,又可细分为光栅干涉腔、光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)、法布里-珀罗腔(Fabry-Perot cavity)和光子晶体等方法,这类加速度计研究较为广泛,比第一类更精确,可达到  $\mu g$  级精度,且具有更大的工作带宽。其三是基于光-物质相互作用的新的光力学/量子光力学方案,如图 2(b)所示<sup>[30]</sup>,这种加速度计的精度有望达到或超过标准量子极限(Standard Quantum Limit, SQL),目前还在研究发展阶段。

基于光强调制的原理,2008 年美国桑迪亚国家实验室 N. A. Hall 等提出了一种新型光学微加速度计结构,如图 3(a)所示,检测电极相对于刚性衍射光栅背板电极垂直移动,以提供在用相干光照射时质量块位移的干涉检测分辨率,其加速度探测分

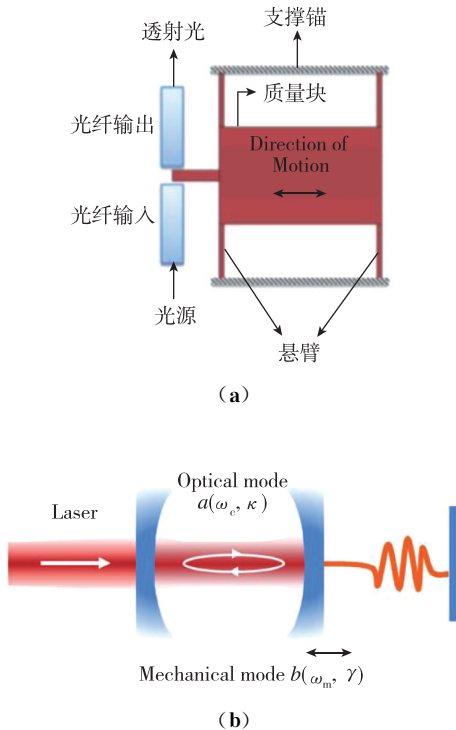


图2 (a)基于光强调制的MOEMS加速度计原理图;  
(b)腔光力系统原理图<sup>[30]</sup>

Fig. 2 (a) Schematic of light-intensity modulation based MOEMS accelerometers; (b) Schematic of a typical cavity optomechanical system<sup>[30]</sup>

辨率理论可达到  $43.7 \text{ ng}/\text{Hz}^{1/2}$ <sup>[31]</sup>。2012年,加拿大蒙特利尔工程学院 K. Zandi 等通过集成法布里-珀罗腔以及片上光波导方式,实现了一种高性能光学加速度计,结构如图 3(b)所示,其测试获得的加速度探测分辨率达到  $111 \mu\text{g}/\text{Hz}^{1/2}$ <sup>[32]</sup>。2016年,伊朗沙希德·贝赫什提大学 A. Sheikholeh 等利用一维(1D)光子晶体,提出了一种基于强度调制的 MOEMS 加速度计的新拓扑结构,如图 3(c)所示,可用于从消费电子产品到惯性导航的各种应用,具有  $119.21 \text{ nm}/\text{g}$  的机械灵敏度和  $0.32\%/g$  的光学灵敏度<sup>[33]</sup>。基于类似原理,2019年国内华中科技大学 Tang S. 等在传统 MEMS 加速度质量块中心刻蚀出一条微缝隙,并通过检测透过该缝隙的光斑位置因重力加速度变化产生的位移来测量加速度大小,实现了约  $8.16 \text{ ng}/\text{Hz}^{1/2}$  的测量精度<sup>[34]</sup>。

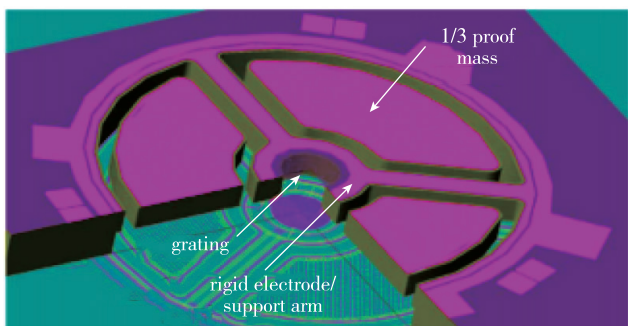
基于波动光学的原理,2017年浙江大学 Lu Q. 等提出了一种基于光栅干涉腔的 MOEMS 加速度计,并进行传感结构优化,原理如图 3(d)所示,图中包含一个光栅干涉测量腔和一个由检测质量、弹簧悬架和支撑结构组成的机械传感结构,可实现超高灵敏

度、低跨轴灵敏度和低频应用,噪声水平为  $185.8 \text{ ng}/\text{Hz}^{1/2}$ <sup>[35]</sup>。2019年,伊朗沙希德·贝赫什提大学 M. Ahmadian 等基于波长调制,并利用石墨烯的特性,提出了一种高灵敏度、宽带宽、大线性测量范围的石墨烯 MOEMS 加速度计,如图 3(e)所示,光学灵敏度为  $0.2111 \text{ nm}/\text{g}$ ,机械灵敏度为  $0.4617 \text{ nm}/\text{g}$ <sup>[28]</sup>。同年, A. K. N. Shotorban 等提出了一种基于微环谐振器的 MOEMS 加速度计,如图 3(f)所示,该加速度计的机械部分由 2 个弹簧和 1 个质量块组成,微环连接到质量块上。当对系统施加加速度时微环移动,这会导致下降端口的波长响应发生变化,进而可通过光电探测器进行检测以测量施加的加速度。该加速度计具有  $0.0025 \text{ nm}/\text{g}$  的光学灵敏度和  $1.56 \text{ nm}/\text{g}$  的机械灵敏度<sup>[36]</sup>。2020年,中北大学 Huang K. 等提出了一种基于一维光子晶体波长调制的新型 MOEMS 加速度计,如图 3(g)所示,其由 4 个弹簧连接的可移动检测质量块感知振动信号,一维光子晶体系统则可以调制光信号,该加速度计的灵敏度达到  $2.06 \text{ nm}/\text{g}$ <sup>[37]</sup>。2021年,伊朗沙希德·贝赫什提大学 M. Taghavi 等基于法布里-珀罗腔,提出了一种双轴 MOEMS 加速度计,如图 3(h)所示,外部输入加速度会导致法布里-珀罗腔在每个方向上的长度发生变化,从而导致干涉仪的输出光谱发生变化,通过测量频谱偏移量可以计算出加速度的值和方向,得到的 X 和 Y 两个方向的精度分别为  $309 \mu\text{g}$  和  $313 \mu\text{g}$ <sup>[38]</sup>。同年,我国 Yao Y. 等提出了一种基于光栅干涉腔的改进型 MOEMS 加速度计,并对其结构进行优化设计,得到加速度灵敏度约为  $60 \text{ V}/\text{g}$ ,噪声为  $15 \text{ ng}/\text{Hz}^{1/2}$ <sup>[39]</sup>。

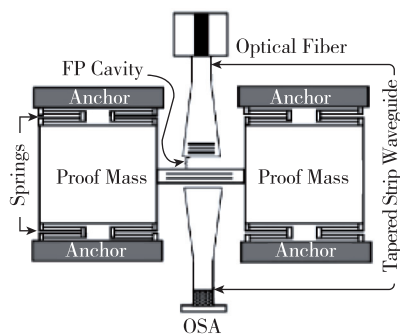
MOEMS 陀螺仪由于同时具有高精度、低成本和易于制造的优势,亦受到国内外学者的广泛关注。2019年,东南大学 Shen X. 等提出了一种基于波导微环谐振器的 MOEMS 谐振陀螺仪,通过测量透射光谱的移动来工作。该陀螺仪的角度随机游走可达  $0.09(^{\circ})/\text{h}^{1/2}$ ,使其成为低成本、批量制造、小尺寸惯性级 MOEMS 陀螺仪的理想选择<sup>[40]</sup>。同年,东南大学 Xia D. 等提出了一种基于回音壁模式(Whispering Gallery Mode, WGM)微盘谐振器和 MEMS 谐振器的 MOEMS 陀螺仪<sup>[41]</sup>。MOEMS 谐振器在电极输入信号的驱动模式下工作时,若受到旋转作用,将激活其感应模式,产生与角速度有关的形变,从而引起 WGM 谐振器透射谱的位移。通过测量该位移,就可以确定外部输入的角速度。2021年,中北大学 Xie K. 等设计了一种新型基于单层近场衍射光栅塔尔博

特(Talbot)效应的 MOEMS 陀螺仪,其结构如图 3(i)所示,微位移检测灵敏度可达 0.09%/nm,谐振频率

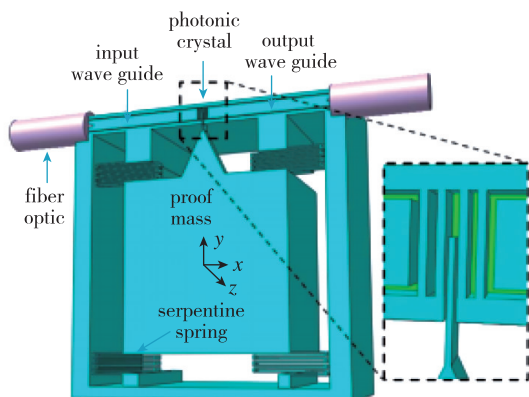
为 7048Hz,品质因数为 700,与电容检测相比,该结构更简单、性能更可靠<sup>[42]</sup>。



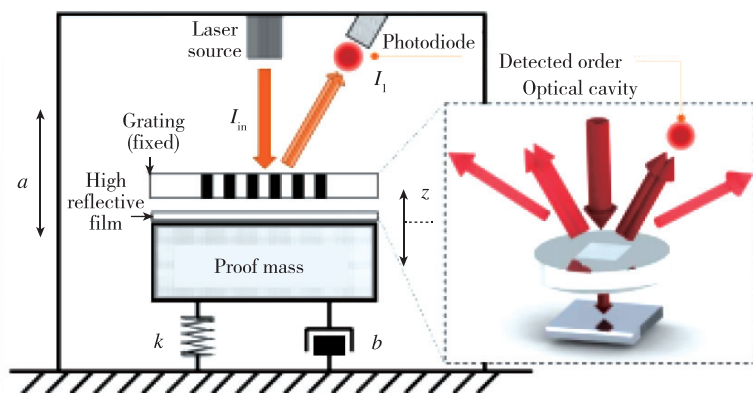
(a)



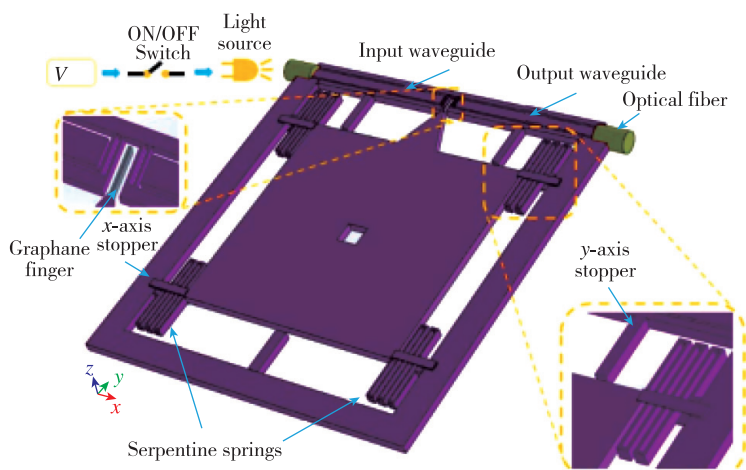
(b)



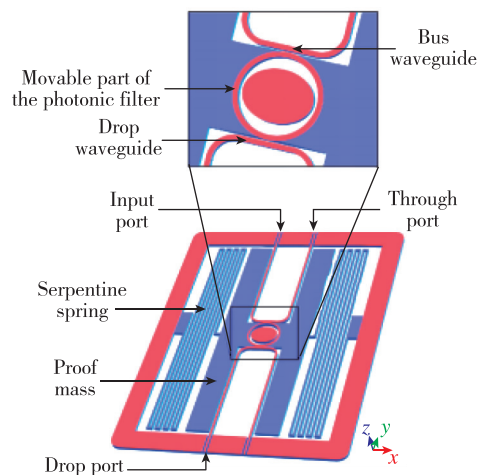
(c)



(d)



(e)



(f)

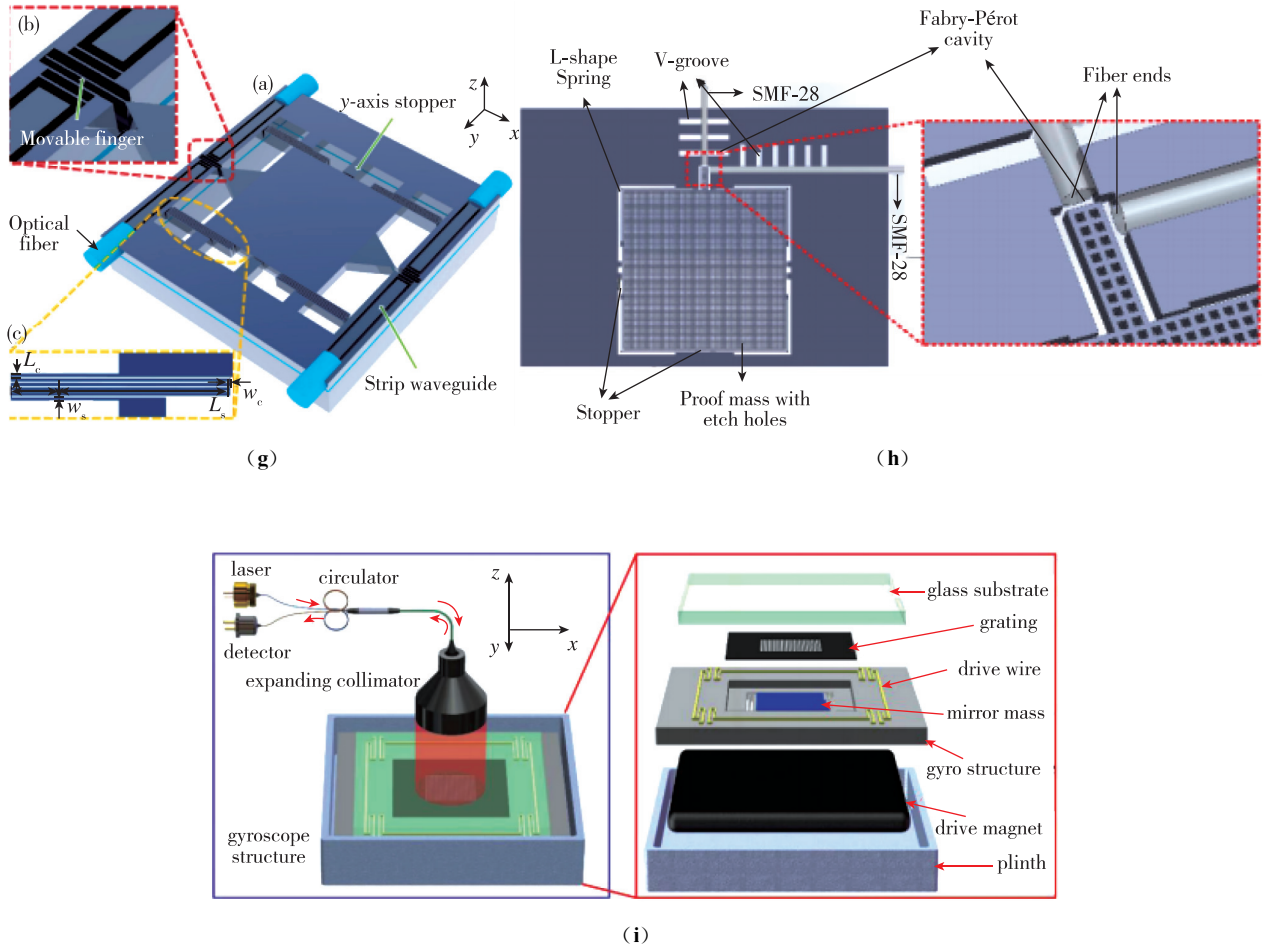


图3 微光机电系统加速度计和陀螺仪<sup>[29, 31-33, 35-38, 42]</sup>

Fig. 3 MOEMS accelerometers and gyroscopes<sup>[29, 335-38, 42]</sup>

## 2.2 腔光力系统惯性测量技术

腔光力系统(Cavity optomechanical system)惯性测量技术是一种基于光-物质相互作用的新型光学/量子光学精密测量方案。随着高精度光学微纳加工技术的快速发展,腔光力系统技术及应用研究受到了广泛关注。它能够实现光和机械谐振器之间的相互作用,为宏观量子系统的基础物理和精密传感的实际应用提供一个平台。在腔光力系统中,机械运动与光的耦合通过光学腔(法布里-珀罗腔、WGM球形腔、光子晶体等)实现共振增强<sup>[43]</sup>,使得其能够精确感测多个物理量,包括位移、质量、力、加速度、磁场和超声波等<sup>[30, 44]</sup>。腔光力系统应用于加速度和角速度传感具有巨大优势,使其有很大潜力应用在高精度惯性测量及惯性导航系统中<sup>[45]</sup>。

如图2(b)所示,经典腔光力系统中存在两种物理谐振模式,分别为光学微腔的光学谐振模式和机械振子(质量块)的机械振荡模式。对于设计研制

完成的腔光力系统,其质量块质量、光学谐振特性、机械谐振特性、光机械耦合率等便可确定。因此,在固定激光波长和幅度的情况下,光学微腔或机械振子最终的谐振/振荡特性(频率、幅度、相位等)仅随外加加速度大小及方向的变化而变化,故而通过检测光学微腔谐振特性或机械振子振荡特性变化即可表征出加速度大小和方向。

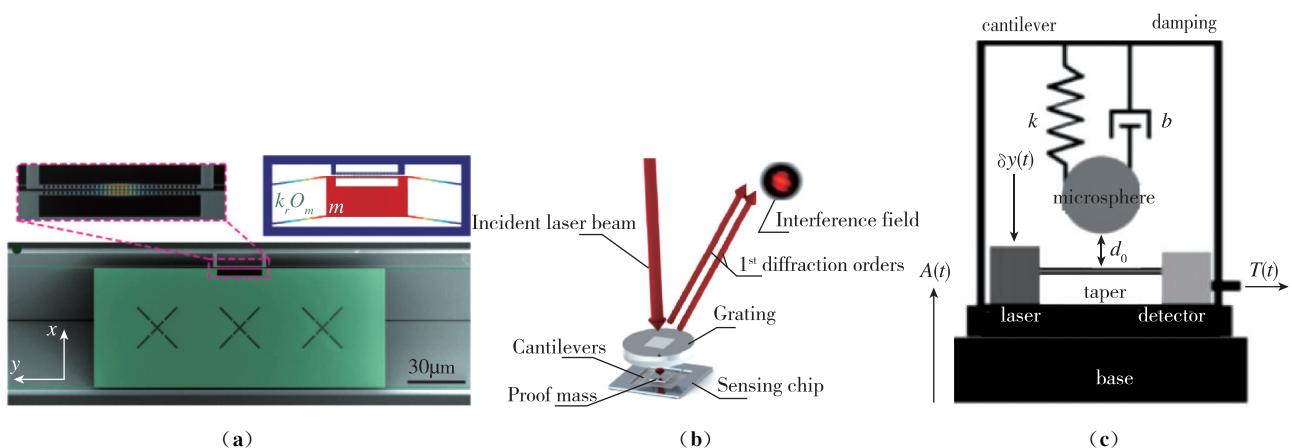
腔光力系统运用在加速度传感上已有了许多显著成果。2012年,美国加州理工学院 A. G. Krause 等设计了一种基于平面集成氮化硅(SiN)光子晶体腔的腔光力系统加速度计,如图4(a)所示,采用链接有大质量块的光子晶体微腔感知因加速度作用产生的位移导致光学谐振特性的变化,进而通过测试光学特性及腔光力耦合特性的变化,以实现高带宽和高分辨率的加速度传感,其分辨率达到 $10\mu\text{g}/\text{Hz}^{1/2}$ <sup>[46]</sup>。2014年,美国马里兰大学 C. F. Guzmán 等采用尺寸更大的可移动机械振荡器,研制出探测精度为 $100\text{ng}/\text{Hz}^{1/2}$ 的腔光力加速度计<sup>[47]</sup>。

2016 年,美国 Y. Bao 等设计了一种具有半球形空腔的平均取向的腔光力加速度计,采用法布里-珀罗干涉测量法和高精度光学腔转换加速度,从而实现优于  $1\mu\text{g}/\text{Hz}^{1/2}$  的分辨率<sup>[48]</sup>。同年,国内浙江大学 Lu Q. 等提出了基于光栅的腔光力加速度计,如图 4(b)所示,该加速度计由 1 个基于光栅的腔体和 1 个由 4 个蟹形悬臂与 1 个质量块组成的加速度传感芯片组成。光栅平行地安装在传感芯片的顶部,当准直激光束垂直入射光栅时,基于光栅的腔的输出光强度随腔的长度而变化,通过检测其位置和入射光利用率,可计算出光栅和质量块之间的位移,进而得出输入的外部加速度。通过实验测试获得该加速度计的零偏稳定性达到  $1.325\mu\text{g}$ <sup>[49]</sup>。2018 年,英国伦敦大学学院 Li Y. L. 等提出了基于 WGM 光力结构的加速度计<sup>[50]</sup>,利用光学 WGM 谐振器与波导的运动的色散和耗散耦合。其中二氧化硅微球悬臂梁同时用作光学腔和惯性测试质量。输入加速度引起悬臂梁的偏转,将改变微球和波导之间的倏逝耦合,进而可测量频移,实现 WGM 共振的展宽。该加速度计原理如图 4(c)所示,其探测精度可达  $4.5\mu\text{g}/\text{Hz}^{1/2}$ ,偏置不稳定性为  $31.8\mu\text{g}$ 。2020 年,国内电子科技大学 Huang Y. 等设计研制出一种硅基腔光力加速度计芯片结构,在光子晶体腔光机械结构上连接了质量较大的硅悬臂,可通过光学弹性效应测量机械振荡频率的偏移,以探测微弱加速度的变化量。重点提出了基于腔光力系统的参数光机械放大原理,以提高灵敏度和抑制机械热噪声特性,从而获得了接近热噪声极限的  $8.2\mu\text{g}/\text{Hz}^{1/2}$  探测精度,以及  $50.9\mu\text{g}$  的零偏稳定性指标<sup>[51]</sup>,结构如图 4(d)所示。

将腔光力系统运用在陀螺仪设计的研究则是

近年来才起步。2016 年,加州理工学院初步设计了腔光力陀螺仪样机,其在真空条件下,将大质量硅基腔光机械加速度计放置到检测轴上,以因科里奥利力引起的振幅变化计算出角速度的大小<sup>[52]</sup>,理论上其角度随机游走可达  $0.03(^{\circ})/\text{h}^{1/2}$ 。同年,国外 S. Davuluri 等<sup>[53-54]</sup>提出了将腔光力用于旋转检测应用,并于 2017 年提出了一种二维腔光力陀螺仪设计<sup>[55]</sup>,实现了较高的灵敏度。原理如图 4(e)所示。当工作台以角速度  $\dot{\theta}$  旋转时,科里奥利力沿  $x$  轴作用在机械振荡器上,等于  $2m\dot{\theta}\dot{y}$ 。在检测器  $D_1$  和  $D_2$  处测量相移,对应于科里奥利力作用导致的光机械腔长度的变化,即可估计工作台的角速度。同年,美国 A. J. Grine 等提出了一种新型腔光力陀螺仪设计<sup>[56]</sup>,机械频率通过光学力学弹簧和萨格纳克效应作为旋转的敏感读数,原理如图 4(f)所示。2018 年,我国北京计算科学研究中心 Li K. 等提出了一种如图 4(g)所示的三模腔光力陀螺仪方案,其中腔场模式耦合到二维(2D)谐振器的两个机械模式之一。当整个系统旋转时,由于绝对旋转而作用在 2D 机械谐振器上的科里奥利力会影响机械运动,从而改变腔输出场的相位,而输入的角速度则可以通过零差测量监测腔的输出场的频谱来估计<sup>[57]</sup>。基于腔光力系统的角速度计目前正处于探索阶段,潜力很大。

综上所述,基于腔光力系统的加速度计和陀螺仪具有极高的精度与性能(部分陀螺仪、加速度计性能汇总如图 5 所示),若能设计出结构简单、制造简易、可大规模生产的新型腔光力系统光学加速度计和陀螺仪,将有望替代 MEMS 技术,运用至超高精度惯性测量当中,实现新型战略级的 MIMU 产品。



(a)

(b)

(c)

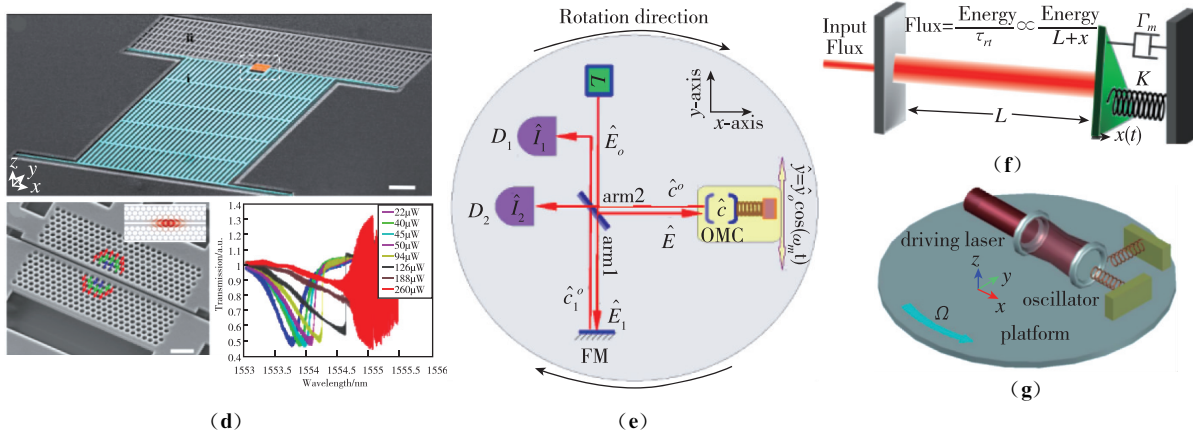
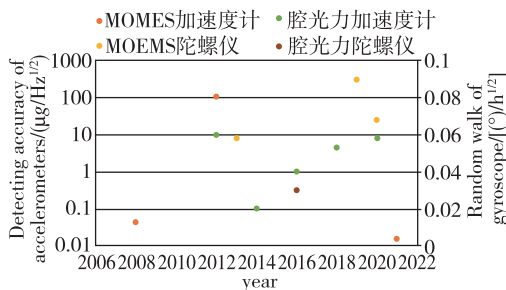
图4 腔光力加速度计和陀螺仪<sup>[46,49-51,55-57]</sup>Fig. 4 Cavity optomechanical accelerometers and gyroscopes<sup>[46,49-51,55-57]</sup>

图5 加速度计和陀螺仪性能参数

Fig. 5 Performance parameters of accelerometers and gyroscopes

### 3 量子及量子增强型高精度测量技术

虽然 MOMES 及腔光力系统相比 MEMS 大幅度提高了惯性测量性能,但仍存在一些激光源引入的噪声,有进一步优化的空间。腔光力系统加速度计和陀螺仪的噪声主要有热噪声、散粒噪声、量子反作用噪声等<sup>[30,46]</sup>。为了降低噪声,可在基态下准备机械谐振器,即降低其温度,以减小热噪声;可以用不同的输入功率重新配置,通过光学弹簧和阻尼效应进行调谐,以减小散粒噪声和量子反作用噪声<sup>[44]</sup>。对于腔光力加速度计,可以通过较大的光学模式体积来减小热折射噪声;而对于腔光力陀螺仪,则可以通过增大光学功率和提高光学品质因数来减小光学散粒噪声<sup>[52]</sup>。然而,这些方法对减小噪声的作用十分有限。

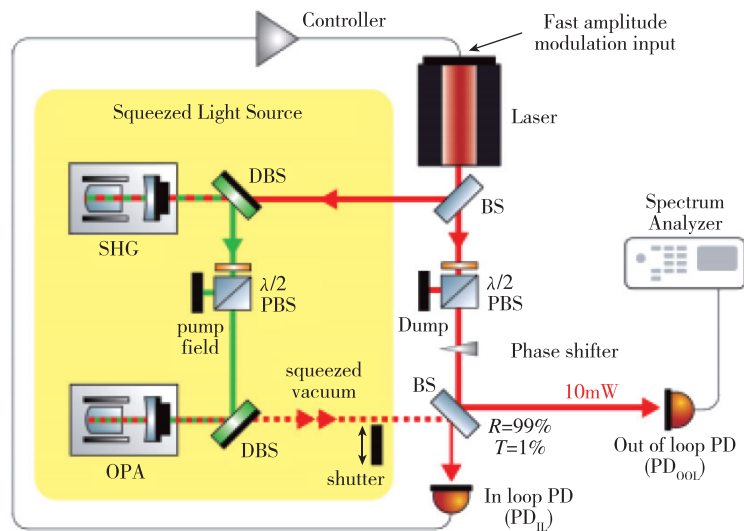
随着量子精密测量技术的快速突破和发展,出现了一些基于量子效应的陀螺仪,大大降低了上述

噪声的影响,如较为典型的冷原子干涉陀螺仪、核磁共振陀螺仪,以及新型的金金刚石自旋陀螺仪<sup>[58]</sup>、原子-光混合量子陀螺仪<sup>[59]</sup>等。量子陀螺的出现,引领惯性导航技术迎来一场新的革命,已经成为当今导航技术领域最为前沿的研究课题之一。量子陀螺具有很多优点,如灵敏度高、分辨率高、环境适应性好、尺寸小等;不过成本较高,难以大批量生产。相比之下,基于压缩光源的量子增强型传感技术成本较低,且提供了一种降低腔光力系统惯性器件噪声的新途径。

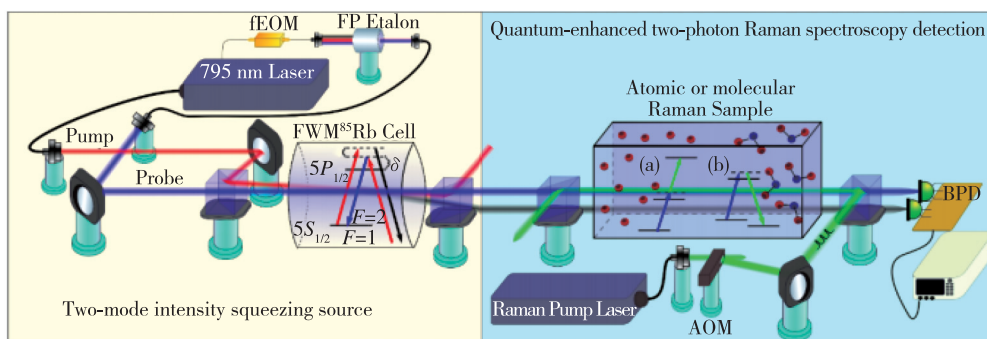
此外,近年来使用压缩光源实现量子增强传感的应用已十分广泛,例如压缩光源可应用于稳定激光功率(图 6(a))<sup>[60]</sup>、光谱测量(图 6(b))<sup>[61]</sup>、引力波探测(图 6(c))<sup>[62]</sup>、光学频率梳测量(图 6(d))<sup>[63]</sup>、等离子体传感(图 6(e))<sup>[64]</sup>、测磁(图 6(f)、图 6(g))<sup>[65-66]</sup>等。其中,美国 A. Kumar 等用强度差为 9dB 的压缩光源实现量子增强等离子体传感器,当用于检测超声波时,其灵敏度相对于散粒噪声极限提高了 56%<sup>[64]</sup>。Li B. B. 等将压缩光源运用至腔光力磁力计中,本底噪声被抑制了约 40%,在散粒噪声占主导地位的频率下,灵敏度提高了约 20%<sup>[65]</sup>。

在已报道的各种基于压缩光源的量子增强型精密测量技术方案中,均利用压缩光源抑制传统激光源中存在的散粒噪声等噪声源,从而获得接近标准量子极限的探测精度。由此,若将压缩光源用于腔光力系统惯性传感技术中,将进一步提高腔光力系统惯性传感器件的性能,这将是未来的热点研究方向之一。

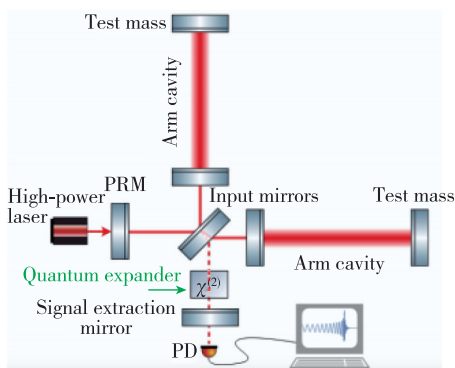




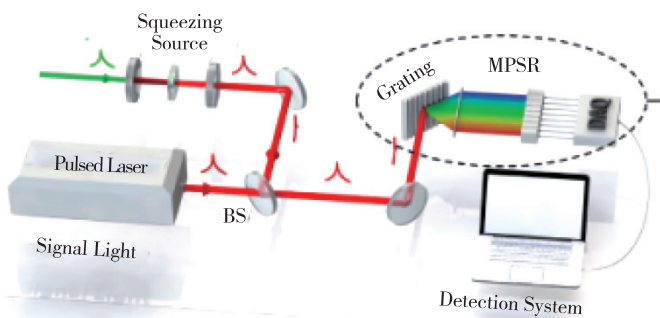
(a)



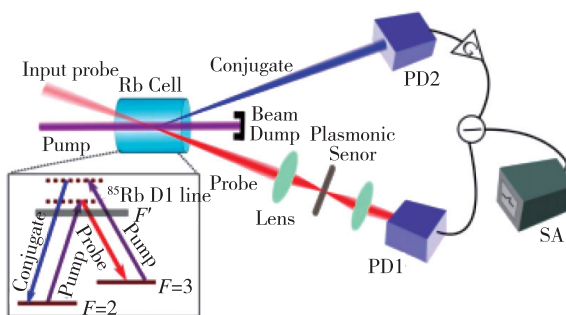
(b)



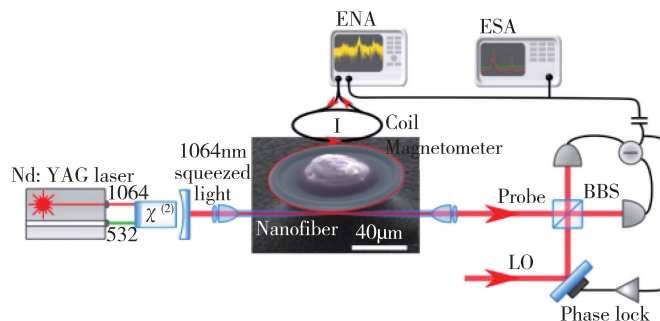
(c)



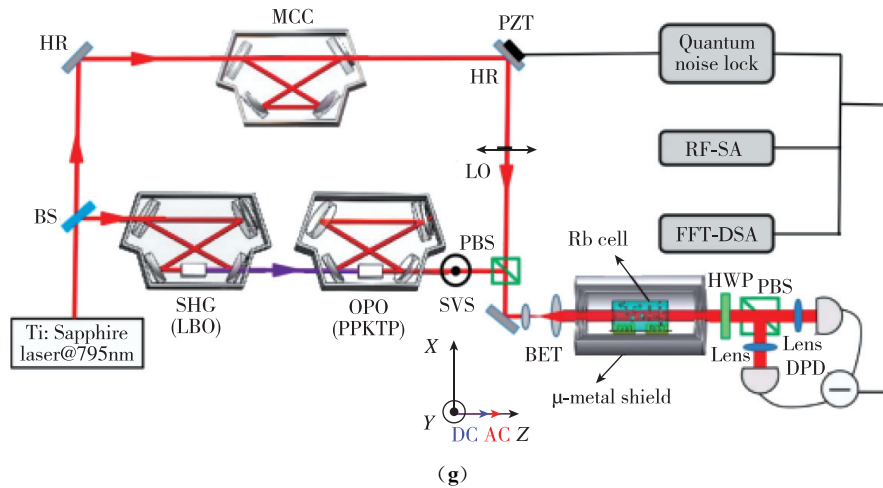
(d)



(e)



(f)

图6 基于压缩光源的量子增强传感应用<sup>[60-66]</sup>Fig. 6 Application of quantum enhanced sensing based on squeezed light<sup>[60-66]</sup>

#### 4 结论及展望

本文针对微惯性测量技术的最新研究进展情况展开论述,首先指出当前MIMU市场的主要构成是基于MEMS的产品,进而对这类MIMU结构的性能特点进行了简要分析;接着重点总结分析了近年来快速发展的MOEMS惯性传感、微腔光力系统惯性传感、量子及量子增强传感技术等方面的研究进展情况;最后,针对目前新型微惯性测量技术领域发展的特点及存在的技术瓶颈,对一种新型微惯性测量方案进行了展望,总结如下:

1)IMU对于INS乃至PNT都非常重要,目前市场上的IMU大多是基于MEMS的,但传统MEMS IMU的精度无法满足高性能需求,主要受限于各种电子噪声和机械热噪声等,可通过校准算法、旋转调制技术、去噪方法等方案,在一定程度上提升MEMS IMU的精度等性能指标。

2)另一方面,采用快速发展的MOEMS技术能够降低MIMU的部分电学噪声特性,但MOEMS采用激光源作为激励,仍存在因激光源引入的散粒噪声和量子反作用噪声等噪声源,以及机械振子存在的固有机热噪声。为此,可通过MOEMS系统本身的光机械相互作用效应,例如本文提出的腔光力系统的参数光机械放大原理,抑制机械噪声;在此基础上,通过压缩光源技术、量子噪声消除技术等途径,抑制散粒噪声和量子反作用噪声,最终实现高精度的惯性测量。

3)如上所述,基于压缩光源的量子增强型精密测量技术得到快速发展并产生大量应用,使用压缩光源

能进一步降低MOEMS惯性传感器的散粒噪声,达到标准量子噪声极限(海森堡不确定性极限),将是未来的热点研究方向之一。为此,本文末尾提出了一种基于腔光力系统的量子增强型IMU的惯性测量技术方案设想,有望在不久的将来实现低成本、高性能、可集成化、大批量生产的新型MIMU产品。

4)然而,目前报道的各种新型MOEMS惯性测量技术,包括前述基于腔光力系统及量子增强型的惯性传感技术,其系统级集成还处在起步阶段,大部分的MOEMS惯性传感器系统采用板级电路,因此针对MOEMS惯性测量技术的专用集成电路亦是未来的重点发展方向之一。同时,为实现利用MOEMS技术提高惯性测量精度,各种新材料、新工艺的发展亦将成为未来重点关注的方向。

综上,基于新型MOEMS技术的高精度微惯性测量技术的发展,离不开基础的材料制备、成熟的加工工艺,以及对各种噪声源产生机理的揭示和有效抑制途径的实现,还有针对MOEMS技术的专用集成电路的发展与成熟。

#### 参考文献

- [1] 丁衡高,王寿荣,黄庆安,等.微惯性仪表技术的研究与发展[J].中国惯性技术学报,2001,9(4):46-49.  
Ding Henggao, Wang Shourong, Huang Qing'an, et al. Research and development of micro inertial instruments[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2001, 9(4): 46-49(in Chinese).
- [2] 杨文华,石存杰,秦洪武,等.基于MEMS传感器的车载微惯性测量单元设计[J].传感器与微系统,

- 2013, 32(1): 121-124.
- Yang Wenhua, Shi Cunjie, Qin Hongwu, et al. Design of vehicle MIMU based on MEMS sensor [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2013, 32(1): 121-124(in Chinese).
- [ 3 ] 杨元喜, 李晓燕. 微 PNT 与综合 PNT[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1249-1254.
- Yang Yuanxi, Li Xiaoyan. Micro-PNT and comprehensive PNT[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1249-1254(in Chinese).
- [ 4 ] Lutwak R. Micro-technology for positioning, navigation, and timing towards PNT everywhere and always[C]// *Proceedings of 2014 International Symposium on Inertial Sensors and Systems (ISISS)*. IEEE, 2014: 1-4.
- [ 5 ] 尤政, 马林. 构建微型定位导航授时体系, 改变 PNT 格局[J]. *科技导报*, 2015, 33(12): 116-119.
- You Zheng, Ma Lin. Construction of a micro positioning navigation and timing system; a change of the pattern of PNT service[J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(12): 116-119(in Chinese).
- [ 6 ] Wang D, Xin J, Guo J, et al. Key technologies research of PNT system [C]// *Proceedings of 2018 IEEE CSAA Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC)*. IEEE, 2018: 1-5.
- [ 7 ] Lu X, Guo X, Guo S, et al. Update on BeiDou navigation satellite system and PNT system[C]// *Proceedings of 2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*. IEEE, 2020: 392-398.
- [ 8 ] Savage P G. Blazing gyros; the evolution of strapdown inertial navigation technology for aircraft[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2013, 36(3): 637-655.
- [ 9 ] El-Sheimy N, Youssef A. Inertial sensors technologies for navigation applications: state of the art and future trends[J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1(1): 1-21.
- [10] Li T, Zhang H, Gao Z, et al. High-accuracy positioning in urban environments using single-frequency multi-GNSS RTK/MEMS-IMU integration [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): 205.
- [11] Lim J H, Yoo W J, Kim L W, et al. Augmentation of GNSS by low-cost MEMS IMU, OBD-II, and digital altimeter for improved positioning in urban area [J]. *Sensors*, 2018, 18(11): 3830.
- [12] Prikhodko I P, Bearss B, Merritt C, et al. Towards self-navigating cars using MEMS IMU: challenges and opportunities[C]// *Proceedings of 2018 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*. IEEE, 2018: 1-4.
- [13] Hasan M A, Mishuk M N. MEMS IMU based pedestrian indoor navigation for smart glass[J]. *Wireless Personal Communications*, 2018, 101(1): 287-303.
- [14] Larey A, Aknin E, Klein I. Multiple inertial measurement units-an empirical study[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 75656-75665.
- [15] Faisal I A, Purboyo T W, Ansori A S R. A review of accelerometer sensor and gyroscope sensor in IMU sensors on motion capture[J]. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2020, 15(3): 826-829.
- [16] Xing H, Chen Z, Yang H, et al. Self-alignment MEMS IMU method based on the rotation modulation technique on a swing base[J]. *Sensors*, 2018, 18(4): 1178.
- [17] Li T, Zhang H, Gao Z, et al. Tight fusion of a monocular camera, MEMS-IMU, and single-frequency multi-GNSS RTK for precise navigation in GNSS-challenged environments[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(6): 610.
- [18] Borodacz K, Szczepański C, Popowski S. Review and selection of commercially available IMU for a short time inertial navigation[J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2021.
- [19] Qureshi U, Golnaraghi F. An algorithm for the in-field calibration of a MEMS IMU[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(22): 7479-7486.
- [20] Du S, Sun W, Gao Y. MEMS IMU error mitigation using rotation modulation technique [J]. *Sensors*, 2016, 16(12): 2017.
- [21] Xing H, Chen Z, Yang H, et al. Self-alignment MEMS IMU method based on the rotation modulation technique on a swing base[J]. *Sensors*, 2018, 18(4): 1178.
- [22] Jiang C, Chen S, Chen Y, et al. A MEMS IMU denoising method using long short term memory recurrent neural networks (LSTM-RNN) [J]. *Sensors*, 2018, 18(10): 3470.
- [23] Mishra J P, Singh K, Chaudhary H. A hybrid noise removal algorithm for MEMS sensors[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 46(12): 5791-5796.
- [24] Zotov S, Srivastava A, Kwon K, et al. In-run navigation grade quartz MEMS-based IMU [C]// *Proceedings of 2020 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*. IEEE, 2020: 1-4.
- [25] Zhao W, Cheng Y, Zhao S, et al. Navigation grade MEMS IMU for a satellite[J]. *Micromachines*, 2021, 12(2): 151.

- [26] Johnson B, Albrecht C, Braman T, et al. Development of a navigation-grade MEMS IMU[C]// Proceedings of 2021 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL). IEEE, 2021: 1-4.
- [27] Mohd-Yasin F, Nagel D J, Korman C E. Noise in MEMS[J]. Measurement Science and Technology, 2009, 21(1): 012001.
- [28] Ahmadian M, Jafari K. A graphene-based wide-band MEMS accelerometer sensor dependent on wavelength modulation[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(15): 6226-6232.
- [29] Lu Q, Wang Y, Wang X, et al. Review of micromachined optical accelerometers: from mg to sub- $\mu\text{g}$ [J]. Opto-Electronic Advances, 2021, 4(3): 200045.
- [30] Li B B, Ou L, Lei Y, et al. Cavity optomechanical sensing[J]. Nanophotonics, 2021, 10(11): 2799-2832.
- [31] Hall N A, Okandan M, Littrell R, et al. Micromachined accelerometers with optical interferometric read-out and integrated electrostatic actuation[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2008, 17(1): 37-44.
- [32] Zandi K, Bélanger J A, Peter Y A. Design and demonstration of an in-plane silicon-on-insulator optical MEMS Fabry-Pérot-based accelerometer integrated with channel waveguides[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2012, 21(6): 1464-1470.
- [33] Sheikhalah A, Abedi K, Jafari K, et al. Micro-optomechanical systems accelerometer based on intensity modulation using a one-dimensional photonic crystal[J]. Applied Optics, 2016, 55(32): 8993-8999.
- [34] Tang S, Liu H, Yan S, et al. A high-sensitivity MEMS gravimeter with a large dynamic range[J]. Microsystems & Nanoengineering, 2019, 5: 45.
- [35] Lu Q, Bai J, Wang K, et al. Design, optimization, and realization of a high-performance MOEMS accelerometer from a double-device-layer SOI wafer[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2017, 26(4): 859-869.
- [36] Shotorban A K N, Jafari K, Abedi K. Optical MEMS accelerometer sensor relying on a micro-ring resonator and an elliptical disk[J]. IET Circuits, Devices & Systems, 2019, 13(7): 1102-1106.
- [37] Nie Y, Huang K, Yang J, et al. A proposal to enhance high-frequency optical MEMS accelerometer sensitivity based on a one-dimensional photonic crystal wavelength modulation system[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(24): 14639-14645.
- [38] Taghavi M, Latifi H, Parsanasab G M, et al. A dual-axis MOEMS accelerometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(12): 13156-13164.
- [39] Yao Y, Pan D, Wang J, et al. Design and modification of a high-resolution optical interferometer accelerometer[J]. Sensors, 2021, 21(6): 2070.
- [40] Shen X, Zhao L, Xia D. Research on the disc sensitive structure of a micro optoelectromechanical system (MOEMS) resonator gyroscope[J]. Micromachines, 2019, 10(4): 264.
- [41] Xia D, Huang L, Zhao L. A new design of an MOEMS gyroscope based on a WGM microdisk resonator[J]. Sensors, 2019, 19(12): 2798.
- [42] Xie K, Zhang R, Xin C, et al. Micro-opto-electromechanical gyroscope based on the Talbot effect of a single-layer near-field diffraction grating[J]. Applied Optics, 2021, 60(13): 3724-3731.
- [43] Li Y L, Barker P F. Commercializing optomechanical sensors: from the classical to quantum regime[C]// Proceedings of Optical Trapping and Optical Micromanipulation XVI. International Society for Optics and Photonics, 2019, 11083: 110830X.
- [44] Hu Y W, Xiao Y F, Liu Y C, et al. Optomechanical sensing with on-chip microcavities[J]. Frontiers of Physics, 2013, 8(5): 475-490.
- [45] Lee J Y, Lin Q. Noise analysis in optomechanical inertial sensors[C]// Proceedings of 2016 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems. IEEE, 2016: 132-135.
- [46] Krause A G, Winger M, Blasius T D, et al. A high-resolution microchip optomechanical accelerometer[J]. Nature Photonics, 2012, 6(11): 768-772.
- [47] Guzmán C F, Kumanchik L, Pratt J, et al. High sensitivity optomechanical reference accelerometer over 10 kHz[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(22): 221111.
- [48] Bao Y, Cervantes F G, Balijepalli A, et al. An optomechanical accelerometer with a high-finesse hemispherical optical cavity[C]// Proceedings of IEEE International Symposium on Inertial Sensors & Systems. IEEE, 2016.
- [49] Lu Q, Wang C, Bai J, et al. Minimizing cross-axis sensitivity in grating-based optomechanical accelerometers[J]. Optics Express, 2016, 24(8): 9094-9111.
- [50] Li Y L, Barker P F. Characterization and testing of a micro-g whispering gallery mode optomechanical ac-

- celerometer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(18): 3919-3926.
- [51] Huang Y, Flores J G, Li Y, et al. A chip-scale oscillation-mode optomechanical inertial sensor near the thermodynamical limits[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(5): 1800329.
- [52] Blasius T D. Optomechanical inertial sensors and feedback cooling[D]. *California Institute of Technology*, 2016.
- [53] Davuluri S. Optomechanics for absolute rotation detection[J]. *Physical Review A*, 2016, 94(1): 013808.
- [54] Davuluri S, Li Y. Absolute rotation detection by Coriolis force measurement using optomechanics[J]. *New Journal of Physics*, 2016, 18(10): 103047.
- [55] Davuluri S, Li K, Li Y. Gyroscope with two-dimensional optomechanical mirror[J]. *New Journal of Physics*, 2017, 19(11): 113004.
- [56] Grine A J, Siddiqui A, Keeler G A, et al. Optomechanical spring effect readout in resonant micro-optical Sagnac gyroscopes design and scaling analysis [C]//*Proceedings of 2017 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN)*, 2017.
- [57] Li K, Davuluri S, Li Y. Three-mode optomechanical system for angular velocity detection[J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(8): 084203.
- [58] Song X, Wang L, Diao W, et al. Quantum gyroscope based on Berry phase of spins in diamond[C]// *Proceedings of 4<sup>th</sup> Seminar on Novel Optoelectronic Detection Technology and Application*. International Society for Optics and Photonics, 2018, 10697: 106974K.
- [59] Wu Y, Guo J, Feng X, et al. Atom-light hybrid quantum gyroscope [J]. *Physical Review Applied*, 2020, 14(6): 064023.
- [60] Vahlbruch H, Wilken D, Mehmet M, et al. Laser power stabilization beyond the shot noise limit using squeezed light[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(17): 173601.
- [61] Prajapati N, Niu Z, Novikova I. Quantum-enhanced two-photon spectroscopy using two-mode squeezed light[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(8): 1800-1803.
- [62] Korobko M, Ma Y, Chen Y, et al. Quantum expander for gravitational-wave observatories[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8(1): 1-8.
- [63] Cai Y, Roslund J, Thiel V, et al. Quantum enhanced measurement of an optical frequency comb[J]. *NPJ Quantum Information*, 2021, 7: 82.
- [64] Kumar A, Dowran M, Lawrie B J, et al. Quantum-enhanced ultrasound detection with plasmonic sensors [C]// *CLEO: QELS\_Fundamental Science*. Optical Society of America, 2018: JF2B. 6.
- [65] Li B B, Bilek J, Hoff U B, et al. Quantum enhanced optomechanical magnetometry[J]. *Optica*, 2018, 5(7): 850-856.
- [66] Bai L, Wen X, Yang Y, et al. Quantum-enhanced rubidium atomic magnetometer based on Faraday rotation via 795 nm Stokes operator squeezed light[J]. *Journal of Optics*, 2021, 23(8): 085202.

(编辑:李瑾)