

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.04.08

现代航天传感器技术发展趋势分析

彭泳卿, 陈青松, 戴保平

(北京遥测技术研究所, 北京 100076)

摘 要: 根据传感器专业前沿技术的发展方向, 结合航天强国建设和航天工业发展对传感器产业发展的需求, 系统介绍了国内外先进航天传感器产品的技术发展概况, 例举了几类先进传感器产品, 包括温度及热流传感器、压力传感器、高性能 MEMS 陀螺、气体传感器、光纤传感器和无源无线传感器等, 并对下一代传感器技术的发展方向进行了展望。

关键词: 传感器; 航天; 敏感元件

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)04-0064-09

Analysis of Development Trend of Modern Aerospace Sensor Technology

PENG Yongqing, CHEN Qingsong, DAI Baoping

(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: From the viewpoint of the development of the sensor technology, and based on the national demand to develop the sensor industrialization from the aerospace power strategy, the current advanced sensor technologies, such as pressure sensor, temperature and heat flux sensor, high precision MEMS gyroscope, gas sensor, optical fiber sensor and wireless passive sensor, are introduced, and the prospects of the future sensor technology development are given.

Key words: sensor; aerospace; sensing element

0 引言

传感器作为获取自然和生产领域中各类信息的主要途径与手段, 已经成为国防建设、工业转型升级以及保障和提高人民生活质量等必不可少的基础核心技术和装备^[1]。我国“十三五”规划中明确把传感器技术列为国家战略发展的重点; 工信部发布的《智能传感器产业三年行动指南(2017-2019 年)》^[2]提出要推动基于 MEMS 工艺的新型智能传感器设计技术的研发, 提升 MEMS 传感器集成化水平, 探索研发具备信息获取、存储、处理、传输、免标定、自补偿、自诊断、自决策等功能的智能传感器, 推动传感器由传统的分立器件向先进的数字化、网络化、集成化以及应用创新方向快速发展。目前, 在国家政策的支持下, 国内传感器市场持续快速增长。

我国传感器产业与国外相比, 仍然存在较大的差距。目前在国际传感器市场上始终保持领先地位的是美、德、日、俄等发达国家。在这些传统发达国家, 传感器获得了非常广泛的应用, 许多传感器企业都实现了年产千万只以上的规模化生产^[2]。相比之下, 中

国传感器公司年产量超过 100 万只的都寥寥无几, 特别是对于高、精、尖的传感器产品, 几乎全部受制于国外品牌。传感器产业的落后造成当前国家重大装备所需要的高端传感器和智能化仪器仪表很大程度上长期依赖进口; 而涉及国家重大型号工程所需的敏感芯片和传感器产品, 国外一直采取严格的限制和禁运措施, 尤其是近些年以来, 形势更为严峻。

航天传感器作为军用特种传感器的一个重要分支, 因其独特性, 从上个世纪 60 年代开始, 各研究部门就一直致力于自主研发, 并形成了一系列具有自主知识产权的技术成果, 因此系统分析航天传感器技术发展的趋势, 对于突破我国传感器产业发展瓶颈和提升自主保障能力具有重要意义。

1 航天型号中的传感器应用

先进航天装备发展的一个重要特征是信息化和智能化, 其核心技术是传感技术、通信技术和计算机技术。传感器位于信息采集的最前沿, 其发展已越来越受到各国的重视。美国国防部早在 2003 年“国防技术领域计划”中就已经将传感器与电子设备、战场空间环

境等一并作为十一个重点发展对象之一,并系统性持续投入充足资源支撑和推进新型传感器技术从原理就绪度到实用就绪度的实现,确保美国在军用传感器领域始终保持全球领先水平,并不断巩固其引领能力。德国一直视军用传感器为优先发展技术,英、法、日等国对传感器的研究投资也逐年上升。2003年美国《技术评论》评出对世界产生深远影响的十大新兴技术,由美国军方提出并发展的无线传感器网络技术被列为二十一世纪十大新兴技术之首。

传感器作为航天器的“感官”和“神经”,遍布航天器的各个关键部位,是确保测得出、测得准、预测对、诊断灵,保障任务成功率的有效手段。例如,运载火箭中的控制系统、动力系统、推进剂利用系统、附加系统、遥测系统,载人飞行器中的故障检测与诊断系统、舱内环境控制与生命保障系统、逃逸救生系统、航天员舱外活动支持系统和再入式登陆系统等,都离不开传感器对航天器各关键部位工作状态的准确检测^[3]。载人航天器舱内密闭空间由于在轨环境的特殊性,在轨舱内环境监测传感器对于航天员安全就至关重要。美国国际空间站就是依靠高灵敏传感器的火灾预警,多次成功避免了国际空间站火灾悲剧的发生。在航天器二次变轨的过程中,需要为航天器提供用于改变飞行方向推进力,高精度压力传感器用于测量燃料罐压力,是控制点火、开启变轨飞行的关键器件,一旦传感器的测量精度超差或者失效,将直接导致变轨失败^[3]。2010年,俄罗斯质子-M火箭发射3颗GLONASS-M导航卫星,因燃料水平传感器超差导致加注燃料过量,使火箭“头部”重量超标,从而导致火箭飞行末期达到速度不够,未能正确入轨致使3颗导航卫星全部葬身于太平洋中。可见,传感器对于航天装备而言,地位重要,作用关键^[4]。

国内外航天飞行器的各大系统中,无一例外,都大量使用各种类型的传感器。例如,美国的航天飞机使用的传感器数量超过3500只。欧空局的Ariane5火箭上,在研制试验阶段使用传感器数量435只,通常一次飞行测量参数达570个,一次技术飞行测量参数达1100个^[3]。

我国航天任务中也大量使用各种类型的传感器,例如载人运载火箭中,单发使用传感器、变换器数量达到600余只,而新一代大型运载火箭单发使用传感器、变送器数量更是超过了1600只。但通过与美国航天型号比较分析,可以看出我国对于遥测传感器的用量需求还有大幅的增长空间^[4]。

经过以北京遥测技术研究所为代表的国内科研院所长达60年的共同努力,国内航天传感器经历了由仿制到自制、由少品种到多品种、由结构型到复合型、由低准确度到高准确度的发展历程,较好地满足了我国快速发展的各重点航天型号的测量需求,并逐步制定一系列的规范和标准,形成了各类航天特色鲜明的特种传感器产品系列,涵盖了压力、温度、液位、过载、振动、冲击、角速率、位移、流量、烧蚀、噪声、湿度、应变、风速、气体、辐射等测量参数。特别是近年来,在国家超高密度航天型号任务的牵引下,我国下一代航天传感器技术在新型MEMS智能传感器技术、极限环境特种传感器技术、高性能光学传感系统技术、无线传感网络技术方面取得了众多具有国际先进水平的成果,可为各类航天型号任务提供更全面、更精确的测量服务。

目前,传感器技术已经进入到一个飞速发展的时代,现代意义上的传感器已经不再如过去一般仅仅能够敏感被测对象的单一信息,而是集多参数信息测量、融合分析处理和高速传输于一体的多学科产物^[5]。在国内科研团队的团结协作和不懈努力下,我国下一代航天传感器正朝着微型化、芯片化、智能化和网络化等世界前沿方向快速发展,必将为我国航天强国的建设做出更大的贡献。

2 典型航天传感器技术介绍

2.1 压力传感器

现代压力传感器技术发展以1954年史密斯(C. S. Smith)发现硅与锗的压阻效应为重要标志^[6],历经上世纪50年代将应变电阻片粘贴在金属薄膜上的简易压阻传感器技术,60年代利用硅扩散技术直接把应变电阻扩散在晶面上硅杯加工工艺技术,70年代应用硅的各向异性的腐蚀技术发展而成的可以适应大规模生产的自动控制硅膜厚度的硅各向异性加工技术,直至上世纪末利用纳米技术进行微纳机械加工的先进工艺技术。到目前为止,阻式压力传感器是应用最为广泛、市场份额最大、技术最成熟、性能最稳定、性价比最高的一类传感器^[7-8]。

在高精度压力测量方面,谐振式压力传感器比起压阻式等其他原理的压力传感器具有更高的准确稳定性,是高精度压力测量技术的发展热点。目前硅谐振式压力传感器和石英谐振式压力传感器都具有非常优异的测量准确度、长期稳定性以及环境适应性,随着深反应离子刻蚀技术、高可靠键合技术、高可靠整机

封装等关键工艺技术水平的提升, 谐振式压力传感器的测量误差可控制在 0.01% FS 以内, 如美国 GE 公司的 RPS8000 系列硅谐振压力传感器^[9] (如图 1 所示), 以及美国 Paroscientific 公司的 3000 系列石英谐振压力传感器 (如图 2 所示) 等。目前北京遥测技术研究所研制的高精度石英压力传感器误差已经小于 0.01% FS, 硅谐振压力传感器误差小于 0.02% FS, 分别应用于航天发动机压力系统测试以及深空探测等重点领域。

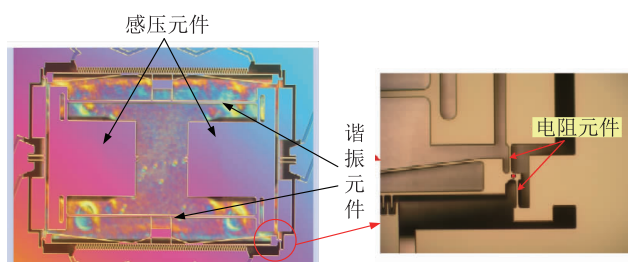


图 1 TERPS 硅谐振压力传感器

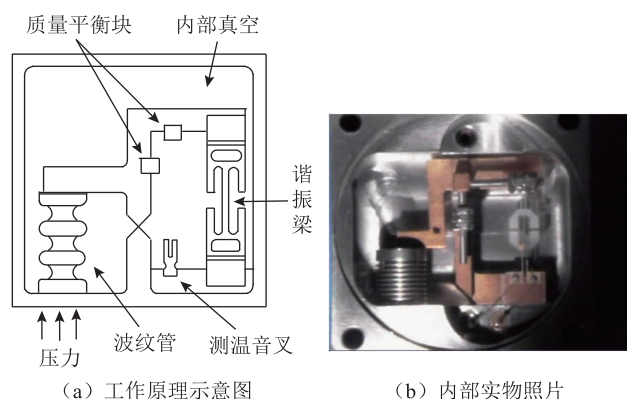


图 2 Paroscientific 公司石英谐振式压力传感器

基于微机械加工制备的 SiC 压力传感器, 可用于航空航天型号的高温压力参数测量, 一直是国内外航天军工传感器研制单位的研究热点。十二五期间, 北京遥测技术研究所完成了第一代 SiC 高温压力传感器 (如图 3 所示) 的研制, 并成功完成多次飞行试验测试, 具备 800 °C 以上高温压力测量能力^[10-11], 与当时的国际水平基本相当。

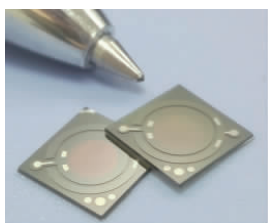


图 3 SiC 超高温压力敏感元件

在动压测量方面, 美国 PCB 公司生产的动态压力传感器响应速度快、幅值和频率范围较宽。主要应用爆炸零件测试、爆炸冲击波检测。借助微电子技术的发展, PCB 公司最早于 70 年代已将电压前置放大器制成微型电路并植入压电传感器, 即 ICP 压电传感器。因其具有低阻输出特性, 所以可采用普通的双芯电缆实现传感器与后端采集设备的长距离连接, 且传感器的灵敏度不受连接电缆长度的影响, 甚至可适用于潮湿环境下的测试, 而且每个测量通道成本远低于传统电荷型的测量产品。

自上世纪 60 年代以来, 我国就开始爆炸冲击波测量技术的研究工作。从 80 年代至今, 国内的北理工、南理工、航天一院所、兵器某所、中北大学等多家单位均对冲击波超压测试系统进行了研究和开发, 并相继取得了一定的成果。目前, 我国在武器毁伤威力场测量和新型发动机动态压力测量领域, 对具有宽响应频带、高固有频率和极快响应速度等优异性能的动力学压力传感器有着迫切的需求。北京遥测技术研究所所在爆破冲击测量需求的牵引下, 已完成冲击波超压传感器工程产品的研制工作, 其灵敏度为 0.06 pC/kPa、固有频率为 450 kHz, 综合性能达到国外同类尖端产品水平。

2.2 温度及热流传感器

温度传感器使用范围广泛、数量众多。它的技术发展历程可分为三个阶段: 分离式、模拟集成式和数字式。目前正在向网络化、智能化的方向发展^[12]。

从温度敏感原理来看, 薄膜材料技术的发展使得薄膜热电偶温度传感器得到越来越广泛的应用。早在 1993 年, 弗吉尼亚理工大学的 Diller 教授率先展开了薄膜热电堆热流传感器设计、加工工艺进行了研究, 于 2003 年与 Vatel 公司合作生产 HFM6/7/8 系列薄膜热电堆热流传感器商用产品, 如图 4 所示。产品共 5 个系列, 工作温度 300 ~ 850 °C, 有 E 型和 S 型两种类型, 可测量 10 kW/m² 以上的热流^[13]。



图 4 Vatel 公司 HFM6/7/8 系列薄膜型热流传感器

NASA 格林研究中心早在 2005 年已经加工出了耐高温的薄膜型热流传感器,如图 5 所示,有多种结构类型,可应用于风洞或叶片表面的热流测试,工作温度高达 1000 ℃。



图 5 NASA 格林研究中心的薄膜热电堆式热流传感器

为满足极限环境下的温度测量需求,美国宇航局 Lewis 研究中心在超高温合金、SiC, Si_3N_4 , Al_2O_3 陶瓷等不同耐高温材料的衬底上,采用溅射工艺沉积微米级的 Pt, Pt-Rh13, Pd-Cr14 等薄膜,形成热电偶两极,据报道,其研制的该类型高温薄膜温度传感器测温可达到 1100 ℃,且实现了误差在 ± 0.3 ℃ 范围内的指标,如图 6 所示。

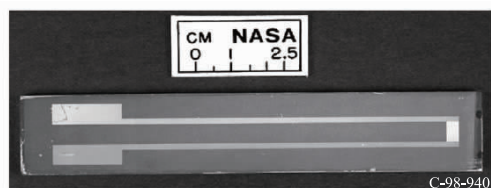


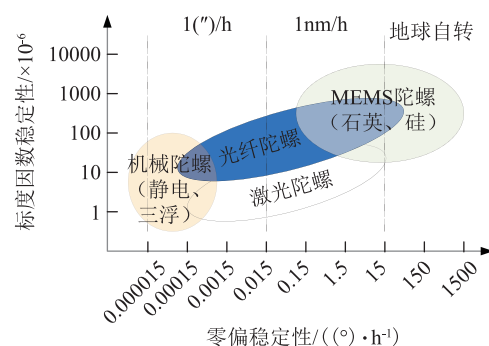
图 6 薄膜热电偶式高温温度传感器样机

2013 年, Otto J. Gregory 等人开展进一步研究,将溅射方法制备的 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{ITO}$ 薄膜热电偶同 S 型和 K 型和 Pt/Pd 薄膜热电偶进行比对,认为 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{ITO}$ 薄膜热电偶应用于 1000 ℃ 以上有氧环境,比 S 型和 K 型热电偶性质更加稳定,其热电势相对金属薄膜热电偶具有量级上的提高,而且具有更高的塞贝克系数和更优良的化学稳定性。国内,北京遥测技术研究所研制的薄膜热电堆热流传感器已经完成多次飞行试验验证^[14],工作温度达到 600 ℃。

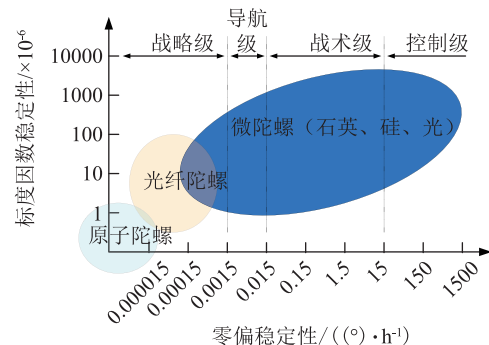
2.3 高精度微机械陀螺

自 1987 年,美国 Draper 实验室研制出世界上第一款微机械陀螺,微机械陀螺一直是国内外重点支持的研究领域,由于小体积、低成本、低功耗、高可靠性、适宜大批量生产的特点,并且随着 MEMS 工艺技术发展,目前多种结构形式的微机械陀螺仪已达到战术级水平,并形成了完善的产品体系,取代部分传统机械陀螺和光学陀螺,大量应用至军事国防和航空航天领

域^[15-16],而一些新结构或者新原理的微陀螺,已经完成样机研制,具备导航级准确度的水平和潜力,图 7 给出了微陀螺的发展趋势预计。



(a) 2010年陀螺发展情况



(b) 2020年陀螺发展趋势预测

图 7 微陀螺发展趋势预计

1) 战术级微机械陀螺

战术级精度微机械陀螺目前已有一系列成熟产品,包含石英微陀螺和硅微陀螺两大类,目前石英音叉陀螺的性能居于已产品化的微陀螺的最前列。早在 1994 年,美国 Systron Donner 公司研制的石英音叉陀螺就先后在宇航员太空行走的无缆绳背包稳定控制系统,旅居者号和探路者号火星车的辅助定向系统等宇航领域应用。近几年,石英音叉陀螺产品的全工作环境零偏稳定性已经突破达到 $0.5 \sim 1(^\circ)/\text{h}$,大量应用在美海军 MK54, MK48 制导鱼雷和 JDAM 航空制导炸弹等领域。

“十五”期间,国内开始石英 MEMS 陀螺的研究,其中,北京遥测技术研究所已建立完整石英 MEMS 工艺线、惯性实验室,突破了石英音叉陀螺工艺加工、结构优化、噪声控制等技术,并完成多工况状态下的飞行验证及多型号小批量应用^[17]。目前产品性能常温零偏稳定性优于 $5(^\circ)/\text{h}$,全温零偏稳定性优于 $10(^\circ)/\text{h}$,相关产品见图 8,先后用于纳卫星姿态测量、远程火箭弹和航空炸弹的导航制导等。



图 8 北京遥测技术研究所研制的高精度石英微陀螺及惯组产品

2) 导航级微机械陀螺

2010 年 1 月, 为应对未来战略对抗中的“导航战”, 美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)启动了名为 Micro-PNT 的研究专项, 其技术体系如图 9 所示, 其目标是通过研发同时兼具高性能自主导航、高精度定位、高精度授时功能的系统, 来替代现役的卫星导航系统, 其核心研究内容是研制零偏稳定性优于 $0.01(^{\circ})/h$ 的高性能微机械陀螺^[18]。包含微速率积分陀螺(MRIG)项目和导航级集成微陀螺(NGIMG)项目, 分别重点支持新原理微陀螺和新工艺新材料微陀螺的研究和开发。目前国际上最为重视微半球谐振陀螺、碟形谐振陀螺、微型核磁共振原子陀螺等, 代表了微机械陀螺技术最新发展趋势, 图 10 给出了谐振陀螺的发展与演变。

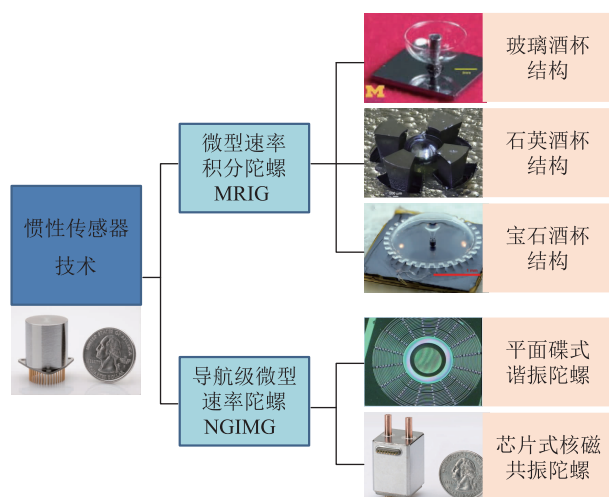


图 9 Micro-PNT 计划中高精度陀螺技术体系

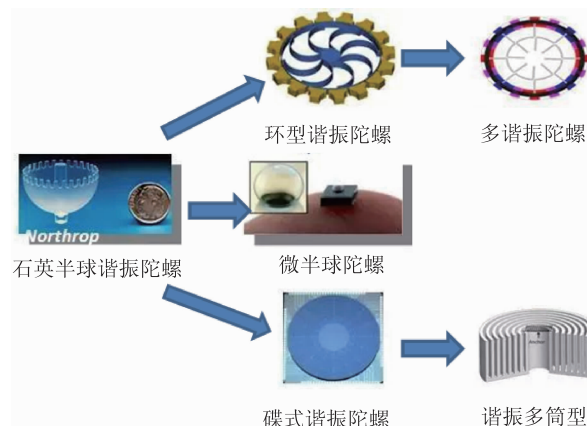


图 10 谐振陀螺的发展与演变

在微半球谐振陀螺方面, 目前攻关重点是采用金刚石、石英、玻璃合金等高性能新材料, 开发下一代三维微制造工艺, 以制备超高精度的微半球谐振元件。目前, 国外已经完成较高性能实验室样机的研制, 如 2017 年密歇根大学研制的微半球谐振陀螺(BRG)样机的零位稳定性达到 $0.039(^{\circ})/s$; 国内国防科技大学、中北大学、中国电科 26 所等单位处于谐振半球微工艺技术攻关阶段, 与国外先进水平还有一定差距^[19]。

在碟形谐振陀螺方面, 代表产品是嵌套环式振动微陀螺, 采用单晶硅(或熔融石英)的深刻蚀制备工艺, 可实现批量制造, 并且具有较好的漂移及噪声特性。2014 年, 波音公司的碟形谐振陀螺样机, 零偏稳定性小于 $0.01(^{\circ})/h$ 。目前美国 SIM 公司(JPL、波音联合团队)推出的 SIM-SRG 系列陀螺和 SIM500 惯组产品, 如图 11 所示, 陀螺精度已经达到导航级, 零位稳定性最优达到 $0.003(^{\circ})/h$, 是目前零位稳定性最优的微陀螺产品。国内国防科大和兵器 214 所联合开展 DRG 的设计及加工工艺研究, 先后解决了高灵敏度谐振器结构设计、高深宽比深刻蚀、静电修调、频率匹配等关键技术, 目前实验室样机陀螺的角度随机游走已经达到 $0.08(^{\circ})/h$ 。

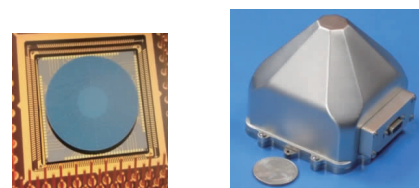


图 11 DRG 碟式陀螺元件

在微型原子陀螺方面, NGIMG 重点支持了微型核

磁共振陀螺的研发,该陀螺的原理是利用原子核在磁场中的陀螺式自旋来实现高精度指向,其核心技术是如何采用 MEMS 工艺技术制备出高精度的核磁共振腔。早在 2013 年 10 月,美国 Northrop Grumman 公司就公布了一种微型核磁共振陀螺样机^[20],陀螺零位稳定性达到 $0.02(^{\circ})/h$,是目前世界上体积最小的导航级核磁共振陀螺,已在“猎户星座”和 T-6B 飞机进行了独立测试,并开始装备空军。目前国内航天 33 所等单位已经突破了小型化磁共振气室、无磁电加热片、三维异型线圈等设计加工问题,完成了体积小于 50 cm^3 (原子气室体积仅为 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$),零偏稳定性优于 $1(^{\circ})/h$ 的小型化样机^[21]。

2.4 气体传感器

针对密闭半密闭空间的气体检测应用需求,国内外开发了多种有毒有害气体传感器产品。美国喷气推进实验室(JPL)采用电子鼻监测实时连续环境空气质量。电子鼻功耗低,对化合物响应范围宽,且维护、校准和分析所需时间短,能定性定量分析 $0.01 \sim 10000\text{ ppm}$ 内的气体。JPL 用其确认并分析化合物 24 h 太空船最大运行浓度,若化合物浓度达到危险浓度时提供早期预警^[20]。

欧洲航空局(ESA)开发的 ANITA^[22]是与 NASA 合作用于监测空气质量的重要交互手段。该系统在 STS-118 发射任务中作为 NASA ISS 医疗项目(ISSMP)交付于约翰逊航天中心(JSC)。ANITA 可在线监测和量化 30 多种除 CO_2 和水气外的亚 ppm 浓度极限下的痕量气体。ANITA 能够测量的气体下限为 10^{-d} 最高运行浓度(SMAC)水平的 10%,在 10^{-d} SMAC 与 6 h SMAC 间的探测误差优于 10%。

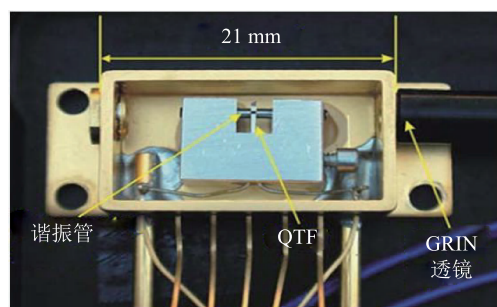


图 12 石英增强型光声光谱气体池

NASA 与 Rice 大学开展光声光谱法测量痕量气体研究,用于载人航天器早期火灾探测。采用 $1.53\text{ }\mu\text{m}$ 的 DFB 半导体激光器作为光源,用石英音叉作为声敏检测元件,如图 12 所示,采用共振式光声池,大幅度

提高检测灵敏度,有效抑制干扰信号^[23]。光声池采用半导体激光器蝶形封装外壳制作而成,整个气池体积小于 1 cm^3 。应用单个光源,通过电流调制实现对 NH_3 , HCN , C_2H_2 的光谱影响测试,输出的信号采用谐波原理检测,并对其交叉敏感特性以及长期稳定性进行了测试。最终每种气体在积分时间小于 1 min 的情况下能实现亚 ppm 浓度的检测。美国 Vista 光电公司为 NASA 研制了基于近红外半导体激光器的光声光谱法气体传感器样机,可以选择性地探测 HF-HCl-HCN-CO 和 NH_3 ,探测水平与 180 天飞船最大运行浓度(SMAC)相关,样机如图 13 所示。

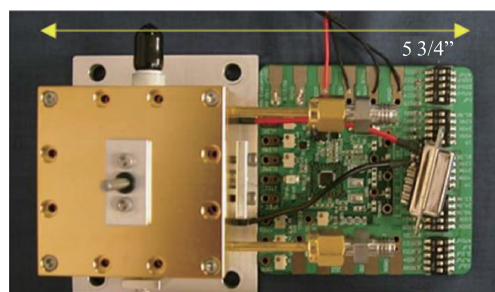


图 13 NASA 光声光谱气体传感器样机图

我国神舟系列飞行器上使用过电化学以及气相色谱的气体分析仪,相关单位利用小型化四级杆质谱仪测量气体成分进行了研究。北京遥测技术研究所依托载人航天工程牵引,完成了基于光声光谱技术的小体积、低功耗、轻质量的多组分痕量舱内有害气体分析仪的研制,能实现 30 种 ppb 级痕量气体的在线检测,具有工作寿命长、免维护、宽范围、抗相互干扰能力强、不中毒等优点^[24-25]。在公共安全、大气环境监测、工业现场安全监测^[26]、医疗诊断等领域具有极佳的推广价值。

2.5 光纤传感器

光纤传感技术是 20 世纪 70 年代末兴起的一项技术,现已与光纤通信并驾齐驱。光纤传感器因其尺寸小、重量轻、抗电磁干扰性强、抗腐蚀性好、灵敏度高、动态范围宽、便于组网等显著优点,而一直备受青睐^[27]。采用不同敏感原理的光纤传感器可以实现温度、应力、应变、压力、磁场、振动、位移、声音等多达 70 种参数的测量。

北京遥测技术研究所所在特种光纤传感技术领域已开展多年研究,并在高温光纤温度测量、光纤压力测量、光纤应变测量等领域取得了重大突破。实现了我国首套应用于航天型号飞行试验的光纤传感系统、高

温应变测量系统的工程应用,先后承担了运载火箭、火星气象测量仪等多项重要型号工程光纤传感载荷研制任务。

2.6 无源无线传感器

面向航天发动机的健康状态监测和推进剂的高效率利用的需求,对应变、温度、压力、振动等多种参量进行同时监测,即实现多参数复合集成测量,并与微执行器结合形成控制闭环测控系统是非常必要的。这也是目前国际上军用特种传感器的主要发展趋势。未来重点发展方向则是与无线传感网络技术、人工智能技术结合,使传感器发展成自适应、自学习的智能传感网络。

在无线无源 LC 高温压力传感器方面,根据烧结温度的不同可分为两种技术路线:低温共烧陶瓷(Low Temperature Co-fire Ceramic, LTCC)和高温共烧陶瓷(High Temperature Co-fire Ceramic, HTCC)。1998 年,乔治亚理工学院 Mark G. Allen 研究团队首次成功研制了基于 LTCC 技术的 LC 谐振型无源高温压力传感器,稳定工作温度达到了 450 °C,该团队 2009 年又采用 HTCC 技术将工作温度提升到了 600 °C。瑞典 Uppsala 大学的 Sturesson P 等人利用 HTCC 材料和后烧铂浆料制作感压结构和电感线圈,将传感器的温度进一步提高到 1000 °C,但 1000 °C 时传感器的 Q 值降低到 3 以下,谐振点检测难度大。国内,中北大学在共烧陶瓷领域研究较为深入,2014 年报导了基于 HTCC 方案的传感器,工作温度达到 800 °C,测压上限为 200 kPa,非线性度为 7%,处于国内领先水平。

在无线无源 SAW 高温温度传感器方面,欧美等国家的研究已相当深入,成果比较突出。美国 Environetix 公司研制的基于 LGS 晶体的高温 SAW 温度传感器(EVHT-100),并成功应用于涡轮发动机的温度测试。其性能指标如下:测温范围为 150 ~ 900 °C,测量误差小于等于 10 °C,时漂特性小于等于 1 °C/150 h,寿命小于等于 500 h,支持无线传输及阵列组网。国内还有中科院声学所、上海交通大学、电子科大等单位开展了 SAW 温度、压力传感器方面的研究,但主要集中在常温段或温度传感器方面,高温压力传感器的研究国内相关报道较少。

3 结论

总体上说,航天传感器技术呈现以下发展态势:

1) 传统航天传感器技术仍具有旺盛的生命力
一些成熟定型的传感器技术,如:应变式、压阻

式、压电式及热电式等传感器已有数十年的应用历史,现仍在各型号中广泛使用。

2) MEMS 传感器正在进入成熟期

MEMS 传感器固有的微型化、小重量、低功耗、低成本、集成化等优势,特别适合航天飞行器应用。目前, MEMS 传感器正在进入成熟期,已经有越来越多的 MEMS 传感器进入航天测控领域。

3) 总线传感器和无线传感器网络技术已经成为航天传感器的趋势

传感器数字化、智能化是现代传感器技术的发展方向,总线技术在型号上的应用已经开展。另一方面为了减少航天测量系统的布线、降低电缆重量、提高测量的灵活性,无线传感器技术近年来得到了迅猛发展。

航天传感器未来发展方向可归纳如下:

1) 向高性能方向发展

在当前超高密度发射任务背景下,各航天型号对传感器性能的要求在持续提高,有必要研制出一批具有灵敏度高、准确度高、响应速度快的新型传感器技术和产品,确保航天任务 100% 成功。

2) 向高环境适应性方向发展

因航天型号的特殊性,研究能够耐受恶劣热学环境和力学环境的高可靠特种传感器将是永久性的方向。大部分军用传感器的工作范围都在 -50 ~ 85 °C,而某些新型号航天器,如临近空间飞行器、氢氧发动机等型号对传感器的工作温度有更高或更低的要求,因此发展新型材料(如 SiC, SiCN 等特种陶瓷)的传感器将具有很好的应用前景。

3) 向微型化、芯片化、智能化方向发展

以往传统的传感器由于重量、体积、功耗都相对比较大,其应用空间越来越小。许多新型号航天器都对传感器提出了更严格的体积、重量、功耗限制和更高的免标定、自诊断和多参量数据融合等智能化要求,为此,必须采用新材料、新原理和新工艺,将传感器向微型化、芯片化、智能化方向发展。

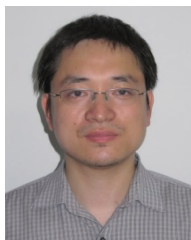
参 考 文 献

- [1] 宋宗炎. 现代传感器技术[J]. 测控技术, 1996, 15(4): 5-9.
- [2] 工业与信息化部. 智能传感器产业三年行动指南[M], 2017.
- [3] 宋宗炎, 邹江波. 航天飞行器中的测控仪表传感器技术[J]. 遥测遥控, 2007, 28(S1): 1-10.
- [4] 李艳华, 李凉海, 湛明, 等. 现代航天遥测系统技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018.

- [5] 李景丽, 陈瑞球. 我国传感器现状及其发展趋势[J]. 仪表技术, 2003(5): 39-40.
- [6] Smith C S. Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon[J]. Physical Review, 1954, 94(1): 42-49.
- [7] 黄庆安. 硅微机械加工技术[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [8] 徐永青, 杨拥军. 硅 MEMS 器件加工技术及展望[J]. 微纳电子技术, 2010, 47(7): 425-431.
- [9] Craddock R, Kinnell P. Trench Etched Resonant Pressure Sensor: TERPS. GE Measurement & Control Solutions [M], 2010: 1-7.
- [10] 曹正威, 尹玉刚, 许姣, 等. 4H-SiC MEMS 高温电容式压力敏感元件设计[J]. 纳米技术与精密工程, 2015, 13(3): 179-185.
- [11] 何文涛, 李艳华, 邹江波, 等. 高温压力传感器的研究现状与发展趋势[J]. 遥测遥控, 2016, 37(6): 61-71.
- [12] 王毅, 赵俭. 动态温度测量与校准技术[J]. 计测技术, 2015, 35(1): 13-17.
- [13] 王丰, 刘建华, 杨显涛. 大量程薄膜热流传感器敏感元件设计[J]. 遥测遥控, 2013, 34(6): 69-72.
- [14] 张雷博. 高速飞行器外表面气动热参数测量技术研究进展[C]//中国航天科技集团公司第九研究院科学技术委员会. 第三届航天电子战略研究论坛论文集(遥测遥控专刊), 2017: 4.
- [15] 周鑫, 肖定邦, 吴学忠. 微机电陀螺的现状与发展趋势[J]. 国防科技, 2015, 36(4): 8-14.
- [16] 赵慧. 加速度传感器数字化关键技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2009.
- [17] 张瀚, 金小锋, 邹江波. 一种新型固支结构石英音叉陀螺的设计[J]. 仪表技术与传感器, 2009(S1): 313-315.
- [18] 江城. 美国 Micro-PNT 发展综述[C]//中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心. 第六届中国卫星导航学术年会论文集—S09PNT 体系与导航新技术, 2015: 10.
- [19] 汪红兵, 林丙涛, 梅松, 等. 微半球谐振陀螺技术研究进展[J]. 微纳电子技术, 2017, 54(11): 772-780.
- [20] James T J, McCoyhompson J T. A Review of Monitoring Technologies for Trace Air Contaminants in the International Space Station [C]//34th International Conference on Environmental Systems (ICES), Colorado Springs, Colorado, 2004, 2004: 01-2339.
- [21] 马永龙. 原子陀螺的研究进展[J]. 光学与光电技术, 2015, 13(3): 89-92.
- [22] Honne A, Schumann-Olsen H, Kaspersen K, et al. ANITA Air Monitoring on the International Space Station Part 2: Air Analyses[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2008, 1(1): 178-192.
- [23] Miklós A, Hess P, Bozók Z. Application of Acoustic Resonators in Photoacoustic Trace Gas Analysis and Metrology [J]. Review of Scientific Instruments, 2001, 72(4): 1937-1955.
- [24] Hanqing Zhao, Xiantao Yang, Gui Meng, et al. Experimental Analysis of Multi-trace Gas Analyzer based on Photoacoustic Spectroscopy for Manned Spacecraft [C]//International Conference on Environmental Systems, 2016: 235.
- [25] Zhou Jianfa, Meng Gui, Zheng Yi, et al. Advanced Photoacoustic Spectrometer for Air Monitoring in Manned Spacecraft [C]// ICES, 2015: 333.
- [26] 邹江波. 航天器用先进气体监测技术在化工安全中的应用 [C]//国家安全生产监督管理总局. 第一届中国国际化工过程安全研讨会暨第一届 CCPS 亚太过程安全会议论文集, 2013: 6.
- [27] 朱涛, 靳伟, 何祖源. 光纤传感核心技术与前沿研究——专题导读[J]. 光电工程, 2018, 45(9): 4.

基金项目: 装备预研项目(30506020302)

作者简介



彭泳卿(1980-), 男, 研究员, 博士, 中国仪器仪表学会传感器分会常务理事。

2009年毕业于美国西密西根大学机械工程专业的, 同年到中国航天科技集团有限公司第九研究院 704 所工作至今, 其中, 2009~2017 年历任 704 所一室副组长、副主任、主任/高级工程师, 2017 年至今任 704 所传感器与系统集成事业部, 部长助理/研究员。

作为项目负责人先后承担 973, 863、装备发展部重点预研项目、各军兵种预研项目、载人航天预研项目、航天科技创新项目等多项国家重大课题研究任务, 获得省部级科技奖 1 项、航天基金奖(集体奖)、中国航天科技集团公司航天贡献奖、开发区海外高层次人才、“亦麒麟”领军人才、授权发明专利 10 余项, 先后发表高水平英文学术论文 15 篇, 发表中文学术论文 12 篇, 受邀在全国性学术会议作特邀报告 5 次, 参加国际学术会议作口头报告 5 次。



戴保平(1964-), 男, 研究员, 硕士, 中国仪器仪表学会理事, 中国仪器仪表学会传感器分会理事长。1989年毕业于中国运载火箭技术研究院 704 所飞行器仪表与测试专业, 同年在 704 所工作至今, 先后担任研究室主任、事业部部长、副所长等职务。获得省部级科技奖 4 项, 先后获航天

工业总公司航天奖、总装备部、国防科工委“XXX”研制先进个人、北京经济技术开发区“博大贡献奖”、航天科技集团公司科技进步奖等奖项, 2007 年起享受政府特殊津贴。



陈青松(1972 -), 男, 研究员, 硕士生导师, 长期从事航天特种传感器技术研究和型号配套产品研制工作, 在军用民用传感器研制开发和工程应用方面经验丰富。

1993 年武汉大学物理系毕业, 2004 年北京航空航天大学航天工程硕士, 现工作于中国航天科技集团有限公司 704 所, 是中国航天电子技术研究院“百人工程”专业技术带头人。

主管设计的多项产品成功应用于航天重大型号, 解决了系

统测量瓶颈问题, 取得了较好的社会效益和经济效益。作为项目负责人, 组织完成十余项国防科研项目, 多项产品技术指标达到国内国际先进水平。担任中国仪器仪表学会传感器学会副理事长兼秘书长、中国仪器仪表协会传感器分会副理事长、机械工业仪器仪表元器件标准化技术委员会副主任委员、中国仪器仪表学会标准化委员会委员、北京宇航学会传感器专业委员会执行委员、智能传感器创新联盟理事等职务, 参与和主持数十项国家军用标准、国家标准的审查工作, 并在核心期刊和全国性学术会议发表专业论文 18 篇, 授权发明专利 15 项。