

MEMS传感器发展及在综合备份显示系统的应用

杜文国, 杨金峰, 黄 赓, 王 龙, 宁源源

航空工业陕西华燕航空仪表有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2024年9月15日; 录用日期: 2024年10月25日; 发布日期: 2024年11月4日

摘 要

MEMS传感器是一种利用微电子制造技术和微机械加工制造技术实现的微型器件。随着MEMS技术的不断发展, MEMS传感器在不同领域应用发展迅速, 已经逐步取代了传统的传感器, 尤其在消费电子产品、汽车工业、航空航天、机械、化工及医药等领域应用越来越广泛。本文研究分析了在MEMS传感器在这些领域主要应用场景、特点和优势。通过研究传统备份仪表的系统架构、功能作用, 结合MEMS传感器的功能及结构特点, 很好地应用到综合备份飞行显示系统设计中, 最终设计出轻量化、小型化和集成化的综合备份飞行显示系统。目前配备MEMS传感器综合备份飞行显示系统越来越多地应用到不同类型的飞机上, 逐步替代传统的备份高度表、空速表和水平仪。

关键词

MEMS传感器, 综合备份飞行显示系统, 微机电系统

Development of MEMS Sensors and Their Application in Integrated Backup Display System

Wenguo Du, Jinfeng Yang, Geng Huang, Long Wang, Yuanyuan Ning

Shaanxi Huayan Aviation Instrument Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: Sep. 15th, 2024; accepted: Oct. 25th, 2024; published: Nov. 4th, 2024

Abstract

MEMS sensor is a kind of micro device realized by microelectronic manufacturing technology and

micromachining manufacturing technology. With the development of MEMS technology, the application of MEMS sensors in different fields has developed rapidly, and has gradually replaced the traditional sensors, especially in consumer electronics, automotive industry, aerospace, machinery, chemical industry, medicine and other fields. This paper studies and analyzes the main application scenarios, characteristics and advantages of MEMS sensors in these fields. By studying the system architecture and function of the traditional backup instrument, combined with MEMS function and structure characteristics of MS sensor are well applied to the design of integrated backup flight display system, and finally a lightweight, miniaturized and integrated integrated backup flight display system is designed. At present, that integrate backup flight display system equipped with the MEMS sensor is more and more applied to different type of aircrafts and gradually replaces the traditional backup altimeter, airspeed indicator and level indicator.

Keywords

MEMS Sensor, The Integrated Backup Flight Display System, Micro-Electro-Mechanical System

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

MEMS 传感器, 全称 Micro-Electro-Mechanical System (微机电系统)传感器, 是一种利用微电子制造技术和微机械加工制造技术实现的微型器件。它集成了微传感器、微执行器、微机械结构、信号处理与控制电路、电源以及通信接口等, 能够感知和测量物体的特定状态和变化, 并将这些状态和变化转变为电信号或其他可用信号。MEMS 传感器具有典型的体积小、功能齐全、灵敏度和可靠度高等优势, 自从 20 世纪中叶研发至今, 已经逐步取代了传统的传感器[1], 得到消费电子产品、汽车工业、航空航天、机械、化工及医药等各领域的青睐[2], 在这些领域得到广泛应用, 其中比较典型的就是在航空综合电子备份仪表(即综合备份飞行显示系统)的应用[3]。由于 MEMS 传感器具有的独特优势, 使其在航空领域研究较早并广泛应用; 目前采用 MEMS 技术应用到的传感器主要有 MEMS 加速度传感器、MEMS 压力传感器、MEMS 陀螺仪、MEMS 化学传感器等。由于在尺寸、重量、功耗和可靠性等方面的突出特点, 近些年来 MEMS 传感器在新一代综合备份飞行显示系统轻量化、小型化、集成化的开发中起着关键作用。

2. MEMS 传感器应用简介

2.1. MEMS 传感器的发展

1962 年, 第一个硅微型压力传感器的问世开创了 MEMS 技术的先河, MEMS 技术的进步和发展促进了传感器性能的提升。作为 MEMS 最重要的组成部分, MEMS 传感器发展最快, 一直受到各国家的广泛重视。MEMS 传感器的门类品种繁多, 分类方法也很多。按其工作原理, 可分为物理型、化学型和生物型三类[4]。按信号检测原理区分, 可分为压阻式[5]、电容式[6]、压电式[7]、谐振式[8]。其主要特点是体积小、微型化、多样性、微系统集成化、批量化和广义化等。

MEMS 传感器在应用的过程中不仅分类广泛, 且其功能用途范围广, 是获取数据信息的关键器件, 不仅在实际工程中有所应用, 在航空航天领域、生物医药领域、汽车工业领域、消费电子领域应用较为广泛。

1) 微型压力传感器在医学领域的应用最早可追溯到测量马类的颈动脉血压[9]; MEMS 压力传感器

在医疗诊断中扮演了关键角色,例如它可以实时监测生理参数,帮助医生做出准确的诊断并制定个性化的治疗方案;这些传感器通常小巧精密,适用于各种医疗设备和场景。在临床治疗方面,比如 MEMS 压力传感器可以用于控制药物的释放,从而实现精确的药物治疗[10];在医疗监测方面, MEMS 传感器可以用于实时检测患者的健康状况,从而实现早期预警和及时干预。祁佳佳等人在其论文中详细探讨了 MEMS 传感器在医疗领域中的应用,重点讨论了其在医疗诊断、临床治疗和检测中的应用,并对其在医疗领域的主要挑战和应用前景进行了论述[11]。

2) MEMS 压力传感器在消费电子行业的应用极为广泛,比如智能手机与平板电脑中采用的加速度计、陀螺仪、压力传感器、光学传感器和麦克风,可穿戴设备中心率传感器、计步器与运动传感器、血氧饱和传感器,智能家居与物联网设备中的温度传感器、湿度传感器、压力传感器等参数采集传感器,大多采用 MEMS 传感器。惯性传感器已经应用在游戏机、智能手机、无人机、照相机、虚拟现实头盔和其他器件[12]。孔文论述了 MEMS 陀螺仪从航空、军事的技术应用开始向消费领域进军的情况,并分析了 MEMS 陀螺仪在消费电子行业技术革新的三要素[13]。人工智能、物联网时代的到来使 MEMS 陀螺仪有了新的更广泛的应用,黄杜分析了其在消费电子领域典型的市场应用[14]。

3) MEMS 压力传感器在汽车工业产业升级中起到了关键作用。比如采用 MEMS 技术的压力传感器、加速度计、微陀螺仪、化学传感器、气体传感器和指纹识别传感器等在汽车的安全系统、制动防抱死系统(ABS)、发动机系统和动力系统等设备中的广泛应用。随着汽车电子微型化和智能化发展, MEMS 传感器(如位置、速度、温度、质量气流传感器和惯性传感器以及传统的温度压力传感器)为汽车驾驶提供越来越好的体验[15]。张士钰对基于 MEMS 加速度计和陀螺的 GPS/DR 车辆组合导航系统进行了大量研究工作,并提出了系统实现方案,建立组合导航算法,并进行了多次跑车试验及相关数据分析,取得了较为满意的结果[16]。

2.2. MEMS 传感器在航空领域的应用

由于 MEMS 传感器具有的独特优势,使其在航空领域广泛应用。MEMS 传感器在航空领域主要有五种用途:1) 提供有关航天器的工作信息,进行故障诊断;2) 判断个分系统的工作协调性,验证设计方案;3) 提供全系统自检所需信息,给指挥员提供决策依据;4) 提供个分系统以及整机内部检测参数,验证设计的正确性;5) 检测飞行器内外部环境,为飞行员提供所需生存条件,保证正常飞行参数[17]。

国外将 MEMS 传感器引入航空领域比较早,研究也较为充分。早在 JSF 研制的初期,洛克希德·马丁公司就着手研究 MEMS 技术在军用飞机上应用的可行性,同时考虑在现役的 F16 战斗机中采用 MEMS 技术。美 JSF 战斗机和美海军的 H-46 型直升机的智能轮胎内嵌入了 MEMS 轮胎压力传感器,帮助监控轮胎寿命,同时减少维修故障。波音公司研制了基于 MEMS 技术的压力带,用于飞行载荷检测,利用 MEMS 技术研制的压力带,可提高安装效率 5 倍,提高精度 10 倍。

国内很多学者也将 MEMS 传感器应用在航空航天领域,并做了相关研究工作。1999 年,北京航空航天大学黄俊钦对微传感器与系统对航空航天仪表发展的作用和展望进行了探讨,着重介绍传感器、大气数据计算机、惯性导航系统、全球定位系统和彩色液晶平板显示器等,并对仪表的几个主要部分的实际数据进行比较,说明 MEMS 对航空航天仪表的体积、重量、耗电功率和可靠性的影响是相当可观的[18]。根据 MEMS 传感器的特点和航空发展需求,胡莞鑫分析并总结了 MEMS 传感器在航空中的应用前景[19]。闫晓军等利用 MEMS (micro-electro-mechanical system)体积小、重量轻、集成度高等特点,将该技术用于航空发动机,可以更好地实现对发动机的流动、燃烧过程进行主动控制、对关键结构部件的损伤以及滑油系统健康状态进行监测等方面的功能,进而实现航空发动机的智能化[20]。

目前,常用在航空领域的 MEMS 传感器有加速度计、陀螺仪、压力传感器、惯性测量组合(IMU)、

微型太阳和地球传感器、磁强计和化学传感器等，主要用于飞机的微型惯性导航系统、空间姿态测定系统、动力和推进系统、控制和监视系统、综合备份飞行显示系统等设备系统。

MEMS 陀螺仪发展很快，AD 公司推出的 ADXRS 系列谐振梁式陀螺仪通过测量电容的变化来获得加速度值，ADXRS 把传感器元件与其他必要处理电路元件集成在同一芯片上，功能比较完整，具有较高的电容和位移测量精度，可用于工业和航空航天[21]。Sensoror Technologies AS 出品的高精度多轴陀螺仪 STIM202 技术指标优越、可靠性高且成本低廉，性价比优于同精度等级的 FOG 光纤陀螺仪[22]。2009 年 3 月举行的慕尼黑上海电子展上，爱普科斯公司推出了业界封装较小的测量大气压力的压阻式 MEMS 传感器 T5000/ABS 1200E，尺寸仅为 1.7 mm × 1.7 mm × 0.9 mm，可用于便携式电子产品测量气压和海拔高度[23]。

2.3. MEMS 传感器在综合备份飞行显示系统的应用

由于在尺寸、重量、功耗和可靠性等方面的突出特点，MEMS 传感器被应用于军事领域和抗恶劣环境要求高的场合，近些年在新一代航空电子备份仪表(IESI)的开发中起着关键作用[24]。用于航空综合备份飞行显示系统(IESI)的 MEMS 传感器主要是惯性测量单元(IMU)中的陀螺仪、加速度计，以及大气测量模块中的压力传感器。

我国综合应急仪表(综合备份飞行显示系统 IESI)的发展，主要有三个阶段：左右互为备份的分布式机电仪表，单体分布的应急备份仪表，综合化、智能化应急备份仪表[25]。传统分布式机电仪表易受冲击、振动的影响，在低亮度下需要单独照明，增加座舱仪表数量，座舱布局拥挤，增加机组飞行人员的负担[26]。综合应急仪表综合了地平仪、空速表、高度表的功能，信息显示丰富直观、易于识别，占用空间小，能实现玻璃化座舱设计，在大中型民航机和公务机上获得普遍使用，其产品的大气数据测量模块采用硅压阻传感器，姿态测量模块高精度的微机电姿态传感器[27]。

综合备份飞行显示系统采用了最新的 MEMS 仿真传感器技术(包括微压力传感器、微加速度计和固态速率陀螺)替代传统的机械式膜盒和机械式垂直陀螺，敏感气压和飞机姿态(俯仰角和倾斜角)，因此比传统备用仪表工作更加可靠(平均非计划拆换间隔时间 MTBUR 达到 15,000 FH)，测量精度也大大提高。与传统备份仪表相比，采用硅压力传感器替代传统的真空膜盒和开口膜盒感受静压和动压，并由微处理器根据空速和气压高度测量原理运算后得出空速和气压高度；采用全固态速率陀螺取代传统的机械式垂直陀螺测量飞机姿态。运动载体的线运动加速度是通过加速度传感器测量的，硅微加速度传感器是继微压力传感器之后第二个进入市场的 MEMS 传感器。

3. 综合备份飞行显示系统(IESI)

3.1. 综合备份飞行显示系统简介

综合备份飞行显示系统，又称综合电子备份仪表，IESI 系统；在空客飞机中称为 ISIS 系统，在波音飞机中称为 ISFD 系统。它属于航空电子系统，主要功能是测量并显示飞机俯仰角、横滚角，计算并显示飞机的指示空速、气压高度等信息。

当机上大气数据系统、惯性导航系统、航向姿态系统、电子飞行仪表系统及主电源供电等部分或全部失效，导致机上主要的飞行仪表显示失效时，应急备份仪表系统能为飞行员提供一组对飞行安全必不可少的包括空速、高度、姿态、航向等参数，让驾驶员根据这些参数信息显示执行相关应急安全驾驶，尽快应急返航和安全着陆。目前，应急备份仪表系统已经从传统的分离式机械或机电仪表系统发展为高度综合化数字化的综合应急备份显示系统，整合并替代了传统空客和波音飞机的 3 个模拟式导航备用仪表(备用姿态指示器(姿态指示仪)、备用空速表和备用高度表)及其全部功能(如图 1、图 2 所示)。



Figure 1. Traditional backup meter

图 1. 传统备份仪表



Figure 2. IESI (ISIS) system

图 2. IESI (ISIS)系统

综合应急备份仪表显示系统以其信息显示丰富直观易于识别、占用空间小、能实现玻璃化座舱设计等优点，已广泛应用于大中型民航飞机和公务机上，在高端的小型飞机和直升机上也开始推广使用。大中型公务机为吸引大众客户，普遍采用了综合应急备份仪表显示系统。

3.2. 综合备份飞行显示系统架构

备份仪表总体架构一般分为分体式和一体式。

分体式为大气测量模块和显示模块集成设计，以显示器形式存在，姿态测量模块单独存在，形成航姿测量单元，部分产品外部设有磁航向传感器，长时间提供航向基准。该产品显示模块一般基于国产显示屏设计，航姿测量单元早期大多选用国外的 MEMS 惯性测量单元，后由于国外的 MEMS 惯性测量单元存在长期动态精度差，在不引入外部修正信息的情况下，不能适应新型飞机航电的需求，姿态测量逐渐使用光纤类的姿态测量单元。大气测量模块均选用最前沿的沟槽刻蚀硅谐振压力传感器技术，将压力量程扩展到更高的范围，对恶劣环境的适用性较强，该类设备由于部件数量较多，且核心器件为光纤陀螺，可靠性指标及功耗相对较高，国内部分军用飞机，对备份仪表有航姿备份功能的载机使用该架构。

另一种为大气测量模块、姿态测量单元和显示器三者统一进行集成设计，以单独的显示器存在，大气测量模块和姿态测量单元内嵌于显示器内部。其显示器、传感器和分系统之间仍通过总线传输实现数据信息的传输、共享[27]。一般选用 MEMS 惯性测量单元完成载机的横滚角、俯仰角的测量，在中小型通用飞行器、直升机有较多的应用，大多引入外部航向信息，实现长时间航向基准，同时内部采用多种组合校正方式，实现长时间姿态保持。该类设备一般可靠性指标较高、功耗较低，在国内军民领域主流

机型上大量使用。

国外备份仪表的发展趋势是集成度更高、系列化、产业化发展。以国外某公司的 IESI 综合电子备份仪表为例，集成了所有的重要飞行仪表，以稳定易读的方式显示飞机的姿态、空速、航向、高度等关键信息和图像；替代了地平仪，高度表，空速表，马赫数表和 ILS。

3.3. 综合备份飞行显示系统基本组成

典型的 IESI 主要由惯性测量单元(IMU)、压力测量模块(PSM)、电源模块(PSU)、接口模块(INB)、CPU 图形处理模块 CPGDM、母板、液晶显示屏、框架与外壳等构成。

航空工业华燕自行研制的轻量化集成化的综合备份飞行显示系统由综合显示模块、大气模块、航姿模块、电源模块和结构模块五大部分组成，如图 3 所示。

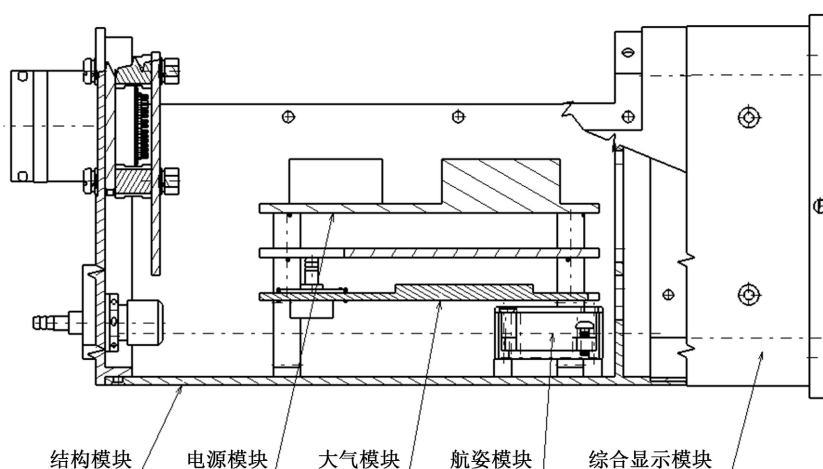


Figure 3. Schematic diagram of product composition for the lightweight, and integrated comprehensive backup flight display system

图 3. 轻量化集成化综合备份飞行显示系统组成示意图

1) 综合显示模块包含壳体组件、显示屏组件、光学组件和解算显示集成模块。显示屏组件接收电源驱动模块输出的工作电源实现背光亮度调节和加热控制，接收解算显示集成模块的 RGB 视频信号进行显示。解算显示集成模块是产品的图形产生、接口管理、数据解算的中心，将大气解算单元、航姿解算单元、图形处理单元及显示驱动单元进行集成设计，综合处理内部任务调度、数据解算、通讯控制、图形产生、亮度调节和加热控制，输出气压高度、指示空速、升降速度马赫数、横滚角和俯仰角等信息，生成 1 路 RGB 信号驱动显示屏组件显示。实现对大气及航姿参数、按键信息识别等功能，同时监控显示器内部各功能模块的工作状态。

2) 大气模块，由 2 个压力传感器单元(含 MEMS 压力传感器、气管、接气嘴等)，1 块功能电路板组成。该模块的气压接头和气管与外部气压接头连接，实现外部气压的输入；大气传感器接收输入气压，采集全压、静压信号，经过处理转换成气压参数放给功能电路组件，并通过 RS422 信号与电源模块进行通讯交互，由接口连接器将数据信息发送给综合显示模块的解算显示集成模块，计算气压高度、指示空速和升降速度和 BIT 自检信息等，并在显示界面显示出来。

3) 航姿模块是一款基于微机械技术(MEMS)的惯性测量单元(IMU)，内置高性能三轴 MEMS 陀螺和三轴 MEMS 加速度计；用于角速率、加速度等信息的输出，共给综合显示模块的解算显示集成模块进行解算，解算出横滚角、俯仰角等信息。

4) 电源模块由电源板(DC/DC 模块、电压转换器、前端稳压模块、大容量钽电容、TVS 管等)和滤波印制板(包含滤波器、插座等)构成;对外部输入的 28 VDC 电源进行滤波、稳压、变换,转换成该仪表装置内部各模块需要的稳定工作电源。

5) 结构模块设计为便于安装的单元体结构,以提高维修性和测试性。为满足外形尺寸及重量指标要求,产品整体选用铝合金材质,表面进行热处理及氧化处理,适应载机环境要求。结构模块,主要由主壳体组件、上盖板组件、后盖板组件和安装附件组成。

4. MEMS 传感器在 IESI 系统应用的作用及特点

MEMS 传感器在综合备份飞行显示系统(IESI)中发挥着关键作用,其应用不仅提升了飞行仪表的性能和可靠性,还推动了航空电子技术的发展。在 IESI 系统中应用的主要作用及特点如表 1:

Table 1. Application characteristics of MEMS sensors in IESI system

表 1. MEMS 传感器在 IESI 系统应用特点表

序号	特点	说明
1	高精度测量	高性能三轴 MEMS 陀螺仪和三轴 MEMS 加速度计应用于 IESI 系统的惯性测量单元(IMU)中,能够提供高精度的角速度和加速度测量参数,为 IESI 飞行系统提供准确的飞行姿态和动力学参数。这对于飞行的稳定性和安全性至关重要。
2	小型化和集成化	MEMS 传感器体积小重量轻,易于集成到 IESI 系统中,有效地减少了产品的体积和重量,使得产品轻量化设计得以实现。同时,集成化设计还降低了系统的复杂性和维护成本。
3	高可靠性和稳定性	MEMS 传感器采用先进的微加工技术和材料科学,具有出色的可靠性和稳定性。在恶劣的飞行环境中,如高温、高压、强振动等条件下,仍能够保持稳定的性能输出,确保 IESI 系统的正常运行。
4	低功耗与长寿命	MEMS 传感器功耗低,有助于延长飞行仪表系统的电池寿命,减少能源消耗。这对于提高飞机的续航能力和降低运营成本具有重要意义。

目前,综合备份飞行显示系统对显示屏依赖度过高,增加了对显示屏和数据传输的可靠性要求[28];MEMS 传感器国产化研制水平还不成熟,核心部件如满足军用战机性能指标的 MEMS 陀螺、加速度计、微硅压力传感器等受制作工艺水平的限制,使得产品的精度还达不到需求标准[29]。

5. MEMS 传感器的发展趋势

MEMS 传感器在综合备份飞行显示系统发挥着不可替代的作用,在航空领域、生物医药领域、汽车工业领域和消费电子领域等广泛应用,并伴随着在这些领域的应用研究不断深入和拓展,其发展趋势将更加注重技术创新、性能提升、多功能化、智能化、集成化、模块化以及环保和可持续发展等方面。

1) 技术创新与性能提升:随着微电子技术、材料科学和制造工艺的不断进步,MEMS 传感器的性能将得到进一步提升。例如,通过优化传感器结构、改进信号处理算法等手段,可以提高传感器的测量精度、稳定性和可靠性。高性能取决于应用需求,新应用需要精度更高,自动驾驶要求精度在 20 厘米以内,虚拟增强实境的感测精度在 10 厘米以内,手机光学防抖误差在 10 厘米以内[30]。

2) 多功能化和智能化:MEMS 传感器正朝着多功能化和智能化方向发展。未来的 MEMS 传感器将能够同时检测多种物理量,如温度、压力、湿度等,并通过内置的智能算法进行数据处理和分析,实现更复杂的感知和决策任务。

3) 集成化与模块化: 为了满足航空电子系统对高度集成化和模块化的需求, MEMS 传感器将更加注重与其他电子元件的集成和模块化设计。这将有助于简化系统结构、提高生产效率并降低维护成本。

4) 标准化与规范化: 为了推动 MEMS 传感器在航空、医疗等领域的广泛应用和标准化生产, 国际和国内相关组织将制定更加完善的标准和规范。这将有助于提高产品的质量和可靠性, 促进产业的健康发展。

6. 结论

MEMS 传感器已经在航空航天领域、生物医药领域、汽车工业领域和消费电子领域等领域已得到广泛应用。MEMS 陀螺仪、三轴 MEMS 加速度计和 MEMS 压力传感器在综合备份飞行显示系统(IESI 系统)小型化、轻量化、智能化和集成化过程中起到至关重要的作用; 高性能三轴 MEMS 陀螺仪和三轴 MEMS 加速度计应用于 IESI 系统的惯性测量单元(IMU)中, 提高了飞行的稳定性和安全性; 同时, MEMS 传感器所具备的高可靠性和稳定性, 以及低功耗与长寿命的应用特点, 对产品在恶劣环境下性能参数稳定输出, 对于提高飞机续航能力和降低运营成本等方面都具有重要意义。随着 MEMS 传感器行业的不断发展, 在 IESI 系统以及航空航天等领域发挥的作用会更加突出。

参考文献

- [1] 伍国伟, 伍斯龙. MEMS 传感器技术发展现状及应用初探[J]. 中国设备工程, 2019(17): 200-201.
- [2] 王淑华. MEMS 传感器现状及应用[J]. 微纳电子技术, 2011, 48(8): 516-522.
- [3] 孟禹彤, 项剑锋, 赵朋远. MEMS 传感器在航空综合电子备份仪表中的应用[J]. 通讯世界, 2015, 21(3): 188-188.
- [4] 余瑞芬. 传感器原理[M]. 北京: 航空工业出版社, 1995.
- [5] 高颖, 姜岩峰. 高性能 SOI 基纳米硅薄膜微压阻式压力传感器的研究[J]. 传感技术学报, 2023, 36(6): 839-848.
- [6] 王宁, 杨拥军, 任臣, 等. 一种振动测量用电容式硅基 MEMS 加速度计[J]. 微纳电子技术, 2023, 60(1): 108-115.
- [7] 刘林仙, 王朝阳, 马奎. 一种压电式 MEMS 矢量水听器设计[J]. 测试技术学报, 2019, 33(6): 520-523.
- [8] 李传昊, 王军波, 商艳龙, 等. 介质隔离高精度 MEMS 谐振式压力传感器[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(4): 219-227.
- [9] Druzhinin, A., Lavitska, E. and Maryamova, I. (1999) Medical Pressure Sensors on the Basis of Silicon Microcrystals and SOI Layers. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **58**, 415-419. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(99\)00121-5](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(99)00121-5)
- [10] Ramya, S., et al. (2023) Design of MEMS Based Micro-Pumps Transdermal Insulin Administration. 2023 2nd IEEE International Conference on Electronics and Renewable Systems (ICEARS), Tuticorin, 2-4 March 2023, 1-5. <https://doi.org/10.1109/icears56392.2023.10085422>
- [11] 祁佳佳, 揣荣岩. MEMS 传感器在医疗领域的研究[J]. 传感器世界, 2023, 29(12): 1-5.
- [12] Doug Sparks, Leonardo Sala. MEMS 惯性传感器在汽车领域和消费领域的应用[J]. 电子工业专用设备, 2016(12): 39-43.
- [13] 孔文. MEMS 陀螺仪的“消费级”进程加速[J]. 集成电路应用, 2011, 29(12): 30-33.
- [14] 黄杜. MEMS 陀螺仪的功能原理即市场应用[J]. 中国集成电路, 2021(12): 76-79, 85.
- [15] 叶军红. MEMS 传感器在汽车行业的应用现状综述[J]. 汽车电器, 2021(7): 46-48, 51.
- [16] 张士钰. 基于 MEMS 惯性传感器的车辆组合导航研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [17] 樊建勋. MEMS 传感器及其在航空领域的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2014(4): 259-260.
- [18] 黄俊钦. 微机电系统(MEMS)促进航空航天仪表的发展[J]. 测控技术, 2019(10): 2-10.
- [19] 胡莞鑫. MEMS 传感器在航空中的应用[J]. 引文版: 工程技术, 2021(5): 235-236.
- [20] 闫晓军, 张锴, 伍晓明. MEMS 传感器在智能航空发动机中的应用研究现状及前景[J]. 航空动力学报, 2012(6): 1210-1217.
- [21] 王喆垚. 微系统设计及制造[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

-
- [22] Sensoror Technologies AS (2010) STIM 202: Multiaxis Gyroscope. http://www.globalspec.com/FeaturedProducts/Detail/SensororTech-nologiesAS/STIM202_MultiAxis_Gyro-scope/112604/0
- [23] Yole Development SA (2009) MEMS Technology: World's Smallest Baro-Metric Pressure Sensor. *Micronews*, **78**, 1.
- [24] 宫经宽, 刘樾. MEMS 传感器在航空电子备份仪表中的应用[J]. 航空精密制造技术, 2009, 45(6): 45-47, 62.
- [25] 李艺文, 贾永翠, 任战鹏. 直升机应急备份仪表的作用和现状分析[J]. 直升机技术, 2023(3): 64-67.
- [26] 闫智武, 李成贵. 飞机座舱仪表显示器的发展概况[J]. 现代显示, 2004(12): 22-25.
- [27] 章拨邦, 郭星灿, 张宏志. 飞机综合应急仪表系统设计[J]. 信息记录材料, 2016, 17(3): 21-23.
- [28] 游学, 郭双红, 谢莉莉. 一种新型多功能航空应急仪表设计[J]. 飞行仿真, 2013(4): 40-44.
- [29] 宫经宽, 牟奇. 浅谈航空综合电子备份仪表[J]. 装备技术, 2010(2): 56-58.
- [30] 王莹. MEMS 传感器的应用走势及提高精度的方法探讨[J]. 电子产品世界, 2017, 24(11): 15-19.