

文章编号:1000-8055(2012)06-1210-08

MEMS 技术在智能航空发动机中的应用研究现状及前景

闫晓军¹, 张 锴¹, 伍晓明²

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 清华大学 微电子学研究所, 北京 100084)

摘 要: 利用 MEMS(micro-electro-mechanical system)体积小、质量轻、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。为了实现 MEMS 在航空发动机上的应用,一方面是提高 MEMS 自身适应航空发动机环境的能力;另外一方面则需要开展其和航空发动机的兼容性设计及研究。随着 MEMS 技术的不断发展,它必将是推动航空发动机发展的一个重要新技术。

关 键 词: 智能; 航空发动机; 传感器; 驱动器; micro-electro-mechanical system (MEMS)

中图分类号: V233.7

文献标志码: A

Opportunities and challenges of MEMS technology in the environment of intelligent aero-engines

YAN Xiao-jun¹, ZHANG Kai¹, WU Xiao-ming²

(1. School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To develop an intelligent aero-engine, which can adjust its components adaptively based on working conditions, more sensors, actuators, computation processors etc. are needed. Due to their big size and heavy mass, the traditional sensors and actuators will have restrictions when they are used on board considering the compact and limited space inside the aero-engine. This paper reviewed the current statues of MEMS's (micro-electro-mechanical system) application in the environment of intelligent aero-engines. These application fields of MEMS in aero-engine environment included: active flow control, active burning control, health monitoring of structure and lubricating system etc. With the development of MEMS technology, MEMS sensors and actuators will play a more important role in the intelligent engine environment.

Key words: intelligent; aero-engine; sensor; actuator; micro-electro-mechanical system

智能航空发动机的概念是由美国麻省理工学院(MIT)的 Epstein 教授在 1982 年首先提出

收稿日期:2011-06-26

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120704.1152.201206.1210_002.html

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(300803);国家自然科学基金(10872015)

作者简介:闫晓军(1973—),男,山西永济人,教授、博士生导师,博士,主要从事高温结构疲劳、智能材料结构及微机电系统应用的研究。

的^[1],所谓“智能”是指具备感知当前工作状况并做出自适应调整的能力.航空发动机的智能化,主要是指采用先进的传感器、驱动器及计算处理单元实现发动机的主动控制及状态监测,包括利用感知、反馈、诊断和控制等一系列环节组成的开环、闭环或基于模型的自适应控制系统^[2],以及健康状态实时监测和故障诊断系统.美国继1988年实施综合高性能涡轮发动机技术(IHPTET)计划以来,2006年又开始实施了IHPTET计划的后续计划,即通用、可承担起的先进涡轮发动机(VAATE)计划,该计划将智能航空发动机^[3]作为重要的一个领域来开展研究.

为了实现航空发动机的“智能化”,这就须要在发动机内多个部位安装大量的传感器和驱动器.传统的传感器和驱动器由于体积大、质量重、功能单一等因素^[4],很难安装在航空发动机需要监控的位置.而利用MEMS(micro-electro-mechanical system)技术开发的新型微型传感器和驱动器体积小、质量轻,容易布置在航空发动机内的很多部位,并且几乎不受发动机内部空间的限制^[5],从而获得更准确的发动机工作状态参数,实现航空发动机的“智能化”.

MEMS是集微机械与微电子功能于一体的微型机电器件或系统,主要由微传感器、微驱动器、集成电路和电源等组成.MEMS是随着半导体集成电路加工技术和超精密机械加工技术的发展而发展起来的,其主流加工工艺是硅工艺,此外还包括微切削工艺、LIGA(lithographie galvanoformung and abformung)工艺等一些特种加工工艺.硅工艺通过光刻将光掩膜上的平面结构图形转移到涂在硅(或其他半导体材料)基质表面的光刻胶上,从而在基质表面留下带有微图形结构的薄膜.然后在光刻的基础上,利用化学或物理的方法,通过表面氧化、刻蚀、淀积、外延生长、扩散、离子注入等一系列工艺,在基底材料上形成比较复杂的机械结构、电子器件以及光学器件,进而将机械构件、光学系统、驱动部件、电控系统集成为一个整体单元的微型系统,该系统具备尺寸小、质量轻、成本低、可靠性高以及易批量生产等优点.这种微电子机械系统不仅能够采集、处理与发送信息或指令,还能够按照所获取的信息自主地或根据外部的指令采取行动.图1是加州大学Berkeley分校利用MEMS技术制作的世界上第一台微型静电马达^[6].目前,MEMS技术在工业领域的成功应用之一是MEMS加速度计,已成功应用于

汽车安全气囊、全球定位系统导航(GPS)等方面.

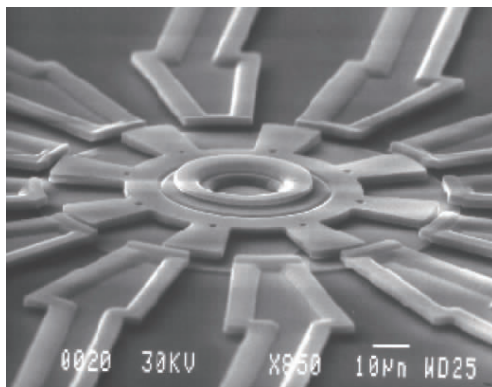


图1 利用MEMS技术研制的微型静电马达^[6]

Fig.1 Micro electrostatic motor

作为一种新技术,MEMS技术在航空发动机领域的应用有两种方式:①利用MEMS技术发展微型发动机,例如:美国麻省理工学院利用MEMS技术^[7]制造出了世界上第一台微型燃气涡轮发动机(如图2);②利用MEMS技术研制用于航空发动机环境下的新型传感器和驱动器.本文主要介绍利用MEMS技术研制用于航空发动机环境下的新型传感器和驱动器的研究现状,并对未来的研究做了展望.



图2 MIT研制的微型燃气涡轮发动机^[7]

Fig.2 Micro turbine engine development by MIT

1 研究现状

目前,针对MEMS在航空发动机内的应用方面,国外学者已经开展了大量的研究工作.根据航空发动机的学科特点,可将目前的研究工作归纳为以下四个方面:流动主动控制;燃烧过程主动控制;关键结构部件损伤监测;润滑油系统健康状态监测.

1.1 流动主动控制

通过对航空发动机内部流体的流动进行主动控制,不仅可以提高发动机的推力、耗油率等性能,还有利于减轻发动机质量^[8].目前,发动机内部的流动主动控制主要采取的形式有:叶尖间隙

控制、流体附面层控制以及喘振抑制。

1) 主动叶尖间隙控制

航空发动机内压气机和涡轮叶尖间隙是为了保证发动机转子与静子机匣间不发生碰磨,同时过大的间隙又是造成发动机气动损失的主要因素,因此,叶尖间隙的控制影响着发动机的性能及可靠性。传统的控制叶尖间隙的手段是通过对静子机匣部件吹气^[9],使机匣冷却收缩或加热膨胀,以适应叶片因离心载荷或热变形引起的长度变化。这种间隙控制方法响应速度慢,同时由于缺乏相应的间隙测量系统,控制精度也较低。美国国家航空和航天管理局(NASA)的 Glenn 研究中心利用 MEMS 技术开发了一种基于微波反射原理的间隙传感器^[10](如图 3),通过集成在传感器内的微波发射器发射微波,并对反射回来的微波信号进行分析,从而获取机匣与叶片之间的间隙。此外,还可以利用光纤发射光信号,通过对反射回来的光信号进行分析,来实现对叶尖间隙的测量^[11]。在传感器研究的基础上,结合航空发动机叶尖间隙测量的具体要求,将多个测量间隙的微型传感器结合相应的执行机构布置在机匣上,对叶尖间隙进行闭环控制,可以将叶尖间隙控制在很小的范围内,并且能够有效地减少发动机尾气排放、降低燃油消耗,提高发动机工作效率,延长使用寿命^[12]。目前,由于 MEMS 驱动器的驱动力很小,即使是采用 MEMS 传感器的主动间隙控制系统,仍需采用传统宏观尺度的驱动器,例如利用形状记忆合金^[13]或液压^[9]等来驱动相关机构。



图 3 采用了 MEMS 技术的微波间隙传感器^[10]

Fig. 3 A microwave clearance sensor using MEMS technology

2) 喘振抑制

发动机发生喘振的原因是由于压气机中气流以大迎角流入叶片排形成严重的分离时,引起压气

机出口气流压力和流量的强烈脉动。喘振是发动机的致命故障,严重时可能导致发动机空中停车甚至发动机致命损坏。抑制发动机喘振的传统手段是在压气机设计阶段,留出足够的压气机安全工作裕度,减少喘振区,但压气机的气动性能会有一定的损失;或是通过可调静子叶片,改变气流攻角进而抑制喘振^[14],但该方法却增加了发动机的质量。

由于发动机在发生喘振前,会产生气压和流速高频波动的先兆^[2],因此,可以利用 MEMS 压力传感器或流量传感器监测压力或流量的波动信号^[15],并控制微射流驱动器对叶尖注射气流来改变压气机叶片前缘附近流场,从而抑制喘振。针对叶尖注射气流如何改变叶片流场的问题,德国 Motoren- und Turbinen-Union GmbH (MTU) 发动机公司进行了计算流体动力学(CFD)仿真计算^[9],其结果如图 4 所示。可以看出,一定条件下,不采用叶尖气流注射时,叶片前缘附近流体的轴向速度会出现小于 0 的情况,即气体逆流,因此很有可能会出现喘振;而当采用了叶尖气流注射后,叶片前缘附近流体的轴向速度均大于 0,不容易产生气体倒流的现象,进而抑制了喘振的发生。法国 Joint International Laboratory on Non-linear Magnetoacoustics of Condensed Matter (LEMAG) 利用 MEMS 加工技术,将电感驱动线圈和钕铁硼永磁体固定在聚二甲基硅氧烷聚合物膜上^[16],并将聚合物膜覆盖在微型硅通道上(如图 5),通过对电感驱动线圈通电来控制硅通道开启与闭合,形成高速射流驱动器。该驱动器可在 0~400 Hz 频率范围内进行喷气射流,射流速度可达 150 m/s。将该驱动器安装在发动机叶尖处进行气流注射,可实现发动机喘振的抑制。

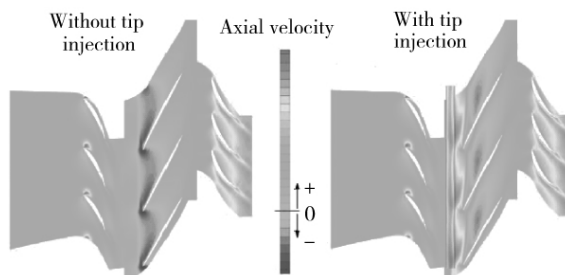


图 4 采用叶尖气流注射的 CFD 模拟计算结果^[9]

Fig. 4 CFD simulation result of the tip injection flow model

3) 附面层流动控制

流体附面层是航空发动机气动损失的主要来

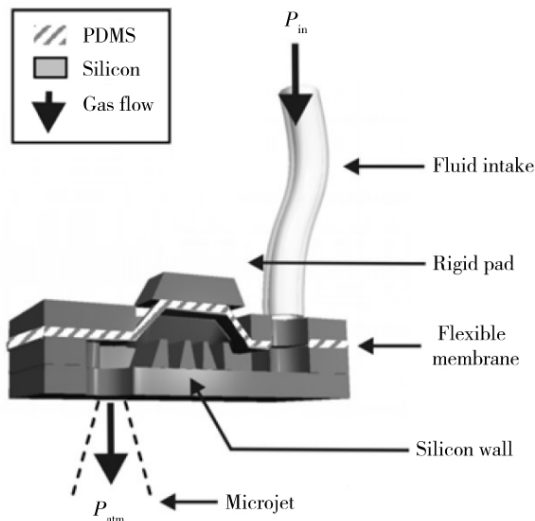
图5 微射流驱动器^[16]

Fig. 5 Micro jet actuator

源,同时也是造成涡流脱落,形成湍流的主要原因.传统的发动机流体控制技术,并没有针对附面层的控制.利用MEMS切应力传感器感知壁面流体在边界层分离时的切应力扰动,并控制分布在叶片表面的微泡驱动器吹气或吸气,从而可以实现对流体附面层的主动控制^[17].根据这一原理,日本东京大学的Yoshino T等人利用MEMS传感器和驱动器开发了一种壁面湍流反馈控制系统^[18](如图6),该系统可实现传感器与驱动器间延迟小于2.2ms,远小于形成湍流的时间,因此可以有效地抑制湍流的形成.此外,美国加利福尼亚大学的Huang A等人利用硅橡胶材料开发了一种微泡驱动器^[19](如图7),单个该驱动器可产生大于100 mN的驱动力,实现了对流体边界层分离的有效控制.

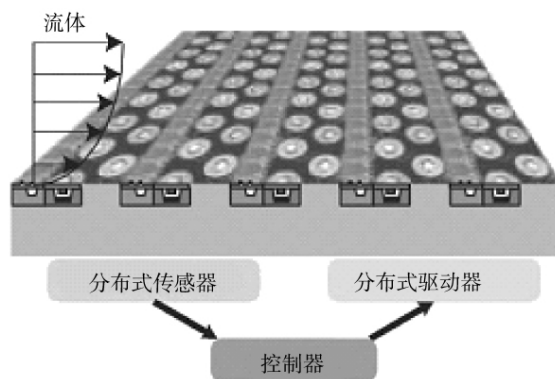
图6 主动流动控制原理^[18]

Fig. 6 Principle of the active flow control

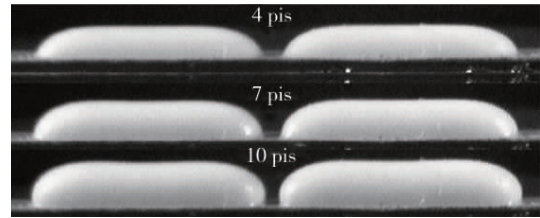
图7 微泡驱动器^[19]

Fig. 7 Micro bubble actuator

1.2 燃烧过程主动控制

航空发动机燃烧过程的稳定性、燃烧室出口温度分布的均匀性影响着发动机燃烧室及涡轮部件的寿命及可靠性,同时还影响燃烧产物的排放量.传统的燃烧控制手段,主要通过对燃油空气的混合比率进行控制,实现发动机在起飞或加力时产生较大推力.但在燃烧室出口温度分布、污染物排放控制方面则很少涉及.

西门子子公司利用MEMS技术开发了一种可检测排放尾气的温度以及特定气体(如 CO_2 , CO 等)成分的含量^[20];德国的Blaschke M等人也利用MEMS技术,将 Si_3N_4 膜覆盖在硅基底上,并在 Si_3N_4 膜上积淀厚度小于 $5\mu\text{m}$ 的金属氧化物敏感层,形成一种可检测气体中 CO_x 和 NO_x 含量的微型气体传感器^[21](如图8),由于 Si_3N_4 膜的低导热率,因此该传感器可在 450°C 的环境下安全工作.将大量的该种传感器布置在涡轮出口处或尾喷管处,对发动机尾气排放进行监测,并结合相应的数据采集分析系统,可以获得燃烧状态参数的准确信息.根据这些参数信息,利用燃油喷嘴及空气喷嘴,对燃油和空气流路、燃油流量、燃油和空气的混合比率、燃油供给量进行控制,可以

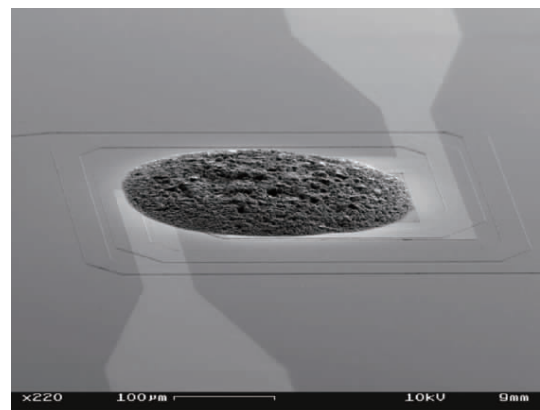
图8 检测碳化物含量的气体传感器^[21]

Fig. 8 Gas sensor which can detect the carbide's concentration

实现燃烧室燃烧更稳定,燃气出口温度分布更均匀、污染物排放更低,进而可以提高发动机推力,降低发动机燃油消耗、提高发动机耐久性及降低寿命周期成本^[22-23]。

1.3 关键结构部件损伤监测

对发动机关键结构部件进行损伤监测,获得关键结构部件损伤初期的信息^[24],可以实现对发动机部件或整机的故障预测,从而保证发动机安全性,减少发动机维修次数,延长发动机使用寿命。

发动机结构失效的原因包括疲劳裂纹萌生、结构腐蚀及变形等^[25]。同时,过高的气体温度、压力、流速等因素也会导致发动机结构的失效。因此,利用 MEMS 压力传感器、加速度计、应变传感器、温度传感器、热流传感器、振动传感器、气体传感器等对发动机结构表面裂纹参数、应变、温度及气流的温度、压力、流速等参数的监测,可以获得发动机结构的损伤状况,从而实现故障诊断和预测。辛辛那提大学的 Sadler D J 等人利用光刻工艺,在玻璃基底上加工出平面线圈及铁镍合金磁芯,形成一种微型电涡流传感器^[26](如图 9),将该传感器贴在构件表面,构件表面的裂纹导致线圈长度的变化,进而产生线圈电压的变化,根据这一电压变化可检测出构件表面出现的细微的裂纹。此外,Azevedo R G 等人通过在硅基底上对 SiC 材料进行离子刻蚀,形成梳状叉齿结构,成功研制了一种用于监测应变的 MEMS 传感器^[27](如图 10),通过对叉齿结构响应频率的测量,可以获得被监测部件的应变量,其灵敏度为 $66 \text{ Hz}/10^{-6}$,分辨率可达 10^{-7} 量级,并且可在 $0 \sim 300^\circ\text{C}$ 温度范围内安全工作,能够实现对发动机冷端结构部件的健康状态监测。

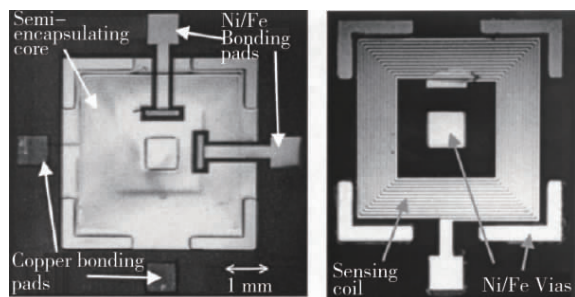


图 9 用于监测构件裂纹的电涡流传感器^[26]

Fig. 9 An eddy current sensor for structure crack monitoring

另外,为了克服发动机内部传感器引线的困

难,将 MEMS 传感器技术与无线数据传输技术相结合,可以开发出用于航空发动机损伤监测的无线传感器监测网络系统^[28-29],从而可以通过布置更多传感器来获得全面的监测数据,准确预测发动机结构件的损伤状况。图 11 是美国西南研究院在 MEMS 技术的基础上提出的一种薄膜传感器概念^[30],该传感器可用于监测叶片疲劳损伤,并通过无线数据传输的方式,将损伤监测信号传递给数据处理终端。

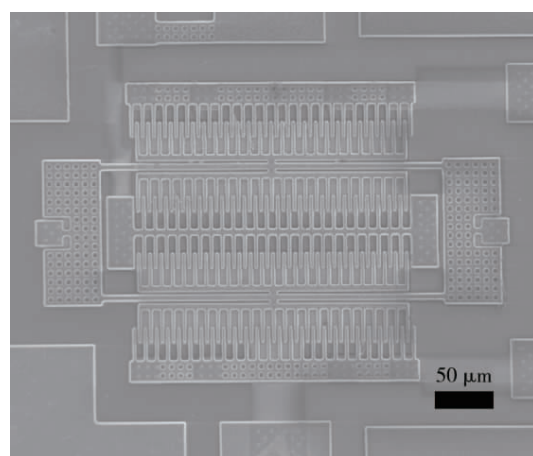


图 10 共振式应变传感器^[27]

Fig. 10 A resonance strain sensors

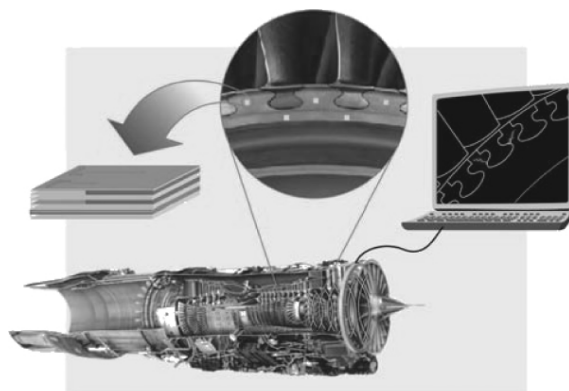


图 11 用于疲劳损伤监测的薄膜式无线传感器^[30]

Fig. 11 Thin film wireless sensor for fatigue damage monitoring

1.4 滑油系统健康状态监测

滑油主要用于航空发动机轴承、齿轮等部件的润滑。滑油的健康状态的下降直接导致发动机轴承、齿轮的磨损,进而造成发动机转子系统工作过程中阻力增大,导致发动机推力下降。

目前针对航空发动机滑油系统的健康状态监

测,主要是采用铁谱仪、光谱仪等设备对滑油中的金属成分进行分析,监测滑油中的金属颗粒情况,判断滑油健康状态.而由于铁谱仪、光谱仪等设备体积大、质量重,在进行滑油健康状态监测时,需要先抽取滑油样本,然后对样本进行分析,这种方法无法获得航空发动机滑油健康状况的实时信息,无法实现实时的飞行状态下滑油健康状态监测.

Integrated Sensing Systems 公司利用 MEMS 工艺加工了用于测量流体黏度及密度的一种微型共振管^[31](如图 12),通过流体在共振管中流动产生的阻尼效应来测量流体黏度,通过共振频率的变化来测量流体的密度.该共振管的测量误差在 0.6%~8%之间,将多个这样的共振管布置在航空发动机滑油系统中,监测滑油的黏度及密度,可以实现在飞行状态下获得准确的滑油健康状态信息,并根据滑油健康状态信息,判断发动机轴承、齿轮部件的磨损情况,为航空发动机的实时故障诊断提供参考信息. DeNatale J F 等人利用 MEMS 深刻蚀工艺制造了一种流体黏度传感器,并将该传感器与 MEMS 温度传感器、MEMS 电化学传感器、MEMS 加速度计等其他类型的传感器集成在同一基底上,并结合相应的数据处理单元,形成了一种用于监测流体健康状态的传感器系统,该系统可实现对整个发动机滑油系统的健康状态监测^[32],并判断轴承、齿轮部件的磨损情况.

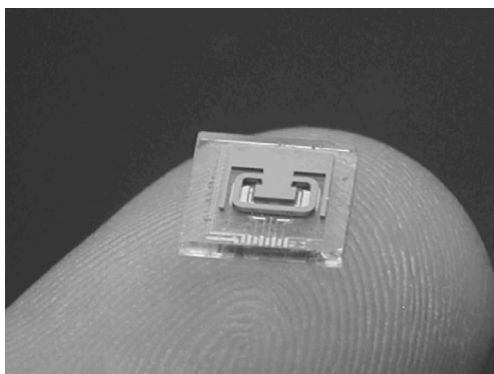


图 12 用于监测流体黏度的 MEMS 传感器^[31]

Fig. 12 MEMS sensor for monitoring fluid viscosity

2 研究展望

MEMS 技术用于大型航空发动机,主要是利用 MEMS 技术设计各种不同类型的传感器、驱动器,以实现发动机的主动控制及健康状态监测.其中, MEMS 传感器主要实现对发动机各种物理量参数进行监测.通过传感器获得的监测数据,实现

对关键部件或系统的健康状态监测.同时结合一定的控制模型,还可以对相关驱动器进行控制,实现发动机主动控制.而 MEMS 驱动器由于其体积小、驱动力不高,不适合用来控制大型结构或部件运动,但在流体流动控制方面则具备巨大的潜力.由于目前 MEMS 技术的发展还不是很成熟,真正在航空发动机环境下的应用也比较少.为了进一步提高 MEMS 系统的性能,更好将其应用于航空发动机,未来的研究主要集中在以下两个方面:

1) 提高 MEMS 自身适应航空发动机环境的能力.航空发动机涡轮前的燃气温度最高能达到 2000℃ 以上,高压压气机后气体温度也高达 200~300℃.而普通的 MEMS 传感器、驱动器及计算处理芯片绝大部分都是基于半导体硅材料,其工作温度才不到 100℃.较低的工作温度范围,是 MEMS 技术在航空发动机内应用的主要障碍之一.解决该问题主要有两个思路:①研究提高 MEMS 器件与集成电路工作温度的技术.例如在绝缘体硅材料(SOI)上制作集成微系统,通过绝缘层阻挡电路中杂质的高温扩散避免电路失效,从而达到提高系统工作温度的目的,该系统的最高工作温度可以达到 250℃;或者以能承受高温的半导体材料(如 SiC, SiCN 等)为基础研制耐高温的传感器、驱动器和电路微系统.作为能耐高温的陶瓷材料, SiC 可以承受 600℃ 的高温,而 SiCN 则具备制作高温传感器更大的潜力.在这方面 Wade Pulliam 等人^[33]研制出一种耐高温 MEMS 压力传感器(如图 13);美国航空航天局 Glenn 研究中心^[34]利用 MEMS 技术也开发出一种能耐 600℃ 高温的电子设备及传感器(如图 14),可用于测量高温环境下的气体成分,但其工作时间较短,离实际发动机使用还有一段距离.②研究能够承受高温的传感器敏感单元,将信号处理电路放置在发动机的低温处,用导线或者无线传输的方式实现传感器与信号处理电路的连接.例如可以

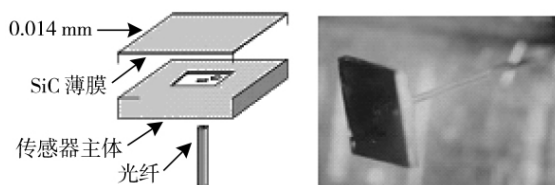


图 13 耐高温光纤 MEMS 压力传感器^[33]

Fig. 13 MEMS high temperature resistant optical fiber pressure sensor

用光纤作为信号传输的导线;或者用能耐高温的压电材料制作声表面波(SAW)传感器,用射频方式对传感器信号进行无线数据传输^[35].另外通过对相关芯片进行隔热、冷却等方式,降低芯片工作的环境温度,也可以很好地解决 MEMS 器件及集成电路耐高温的问题.

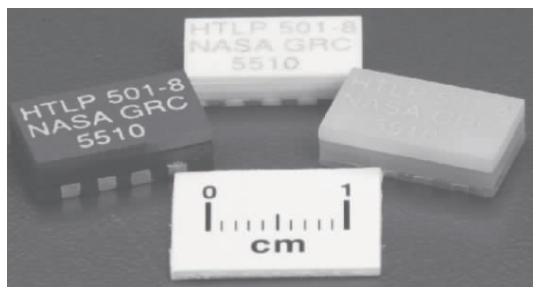


图 14 耐高温的电子设备^[34]

Fig. 14 High temperature electronic devices

2) 开展 MEMS 和航空发动机的兼容性设计及研究.虽然 MEMS 传感器和驱动器的尺寸很小,但将其安装在航空发动机内还是会对发动机流场以及结构完整性造成一定的影响.因此,在航空发动机内安装 MEMS 传感器或驱动器时,还需对发动机内流体流动特性以及发动机结构进行分析,研究 MEMS 器件安装在发动机内导致流场及结构产生的变化,选取合适的安装位置,使 MEMS 器件对发动机流动特性及结构完整性的影响降低到最小,保证 MEMS 器件结构尺寸与航空发动机结构完整性相兼容.

此外,根据航空发动机主动控制及健康状态监测的需求,发动机内的 MEMS 传感器与驱动器往往安装在可达性较差的位置,不容易对其更换电源.为了满足 MEMS 电源系统与航空发动机的兼容性问题,除了可以通过降低传感器和驱动器的耗能来实现外,还可以通过对能量收集技术^[36]进行研究,将外界环境的振动能、热能等形式的能量转化为电能,提供 MEMS 传感器和驱动器所需的能量,实现传感器、驱动器的自供能.在这方面, MicroStrain 公司针对直升机旋翼损伤监测开发的一种集成传感器、微处理器、能量收集、无线发射与一体的无线传感器节点^[37](如图 15),可以实现对直升机旋翼的损伤进行无线监测,并将旋翼工作过程中的振动能量转化为电能,为整个节点系统进行供电.

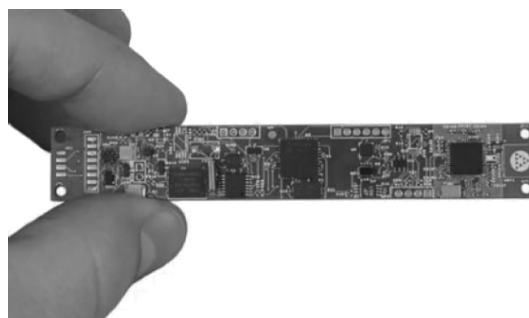


图 15 带能量收集模块的无线应变传感器节点^[37]

Fig. 15 Wireless strain sensor node with an energy harvesting module

3 结 论

航空燃气涡轮发动机的发展过程,本身就是各种新技术在其上不断应用.未来航空发动机必然会向着智能化方向发展,对航空发动机主动控制及健康状态监测的要求会越来越高. MEMS 技术作为一种新技术,在航空发动机内的应用将会是必然的. MEMS 技术用于航空发动机,主要是利用 MEMS 技术设计各种不同类型的传感器、驱动器,以实现发动机的流动主动控制、燃烧过程主动控制、关键结构部件损伤监测以及滑油系统健康状态监测.其中, MEMS 传感器主要用于对关键部件或系统的健康状态监测,以及发动机主动控制的参数测量环节;而 MEMS 驱动器由于其体积小、驱动力不高,因此不适合用在大型结构部件的运动控制,但在流体流动控制方面则具备巨大的潜力.

要真正实现 MEMS 在航空发动机上的应用,一方面是提高 MEMS 自身适应航空发动机环境的能力;另外一方面则需要开展其和航空发动机的兼容性设计及研究.随着 MEMS 技术的不断发展, MEMS 技术必将推动航空发动机发展的一个重要新技术.

参考文献:

- [1] Greitzer E M. Smart jet engines; case history of multidisciplinary research program[J]. JSME International Journal; Series B, 1998, 41(1): 90-102.
- [2] Horn W, Ardey S, Grauer F, et al. Opportunities and challenges for more intelligent gas turbine engines[R]. Darmstadt; Deutscher Luft-und Raumfahrtkongress, 2008.
- [3] Ballal D R, Zelina J. Progress in aero engine technology (1939-2003)[R]. AIAA-2003-4412, 2003.
- [4] Sabol S M, Subramanian R, Kulkarni A A. Apparatus and method of monitoring operating parameters of a gas turbine; US, 82359 B2[P]. 2009-09-01.

- [5] Alireza R. Behbahani. Need for robust sensors for inherently fail-safe gas turbine engine controls, monitoring, and prognostics[R]. Cleveland; 52nd International Instrumentation Symposium, 2006.
- [6] Fan L S, Tai Y C, Muller R S. IC-processed electrostatic micro-motors[R]. San Francisco; Electron Devices Meeting, 1988.
- [7] Teo C J. MEMS turbomachinery rotordynamics; modeling, design and testing[D]. Massachusetts; Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [8] Tong M T. A probabilistic system analysis of intelligent propulsion system technologies[R]. ASME Paper GT-2007-27914, 2007.
- [9] Bock S, Horn W, Sieber J. Active core; a key technology for more environmentally friendly aero engines being investigated under the NEWAC program[R]. Anchorage, Alaska, USA; 26th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2008.
- [10] Woike M R, Aziz H A, Bencic T J. A microwave blade tip clearance sensor for propulsion health monitoring[R]. AIAA-2010-3308, 2010.
- [11] Vakhtin A B, Chen S J, Massick S M. Optical probe for monitoring blade tip clearance[R]. AIAA-2009-507, 2009.
- [12] Steinetz B M, Lattime S B, Taylor S, et al. Preliminary evaluation of an active clearance control system concept[R]. AIAA-2005-3989, 2005.
- [13] DeCastro J A, Melcher K J, Noebe R D. System-level design of an a shape memory alloy actuator for active clearance control in the high-pressure turbine[R]. AIAA-2005-3988, 2005.
- [14] Tahara N, Kurosaki M. Active stall control in axial flow compressor using artificial hub stall[R]. AIAA-97-2656, 1997.
- [15] Hagino N, Kashiwabara Y, Uda K. Prediction and active control of surge inception in centrifugal compressor system without plenum[R]. AIAA-2005-4019, 2005.
- [16] Ducloux O, Viard R, Talbi A, et al. A magnetically actuated, high momentum rate MEMS pulsed microjet for active flow control[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2009, 19(11): 115031-115037.
- [17] Schadow K, Fatatry A E. Military/aerospace MEMS applications-AVT task group 078[R]. Brussels, Belgium; RTO AVT Symposium on Novel Vehicle Concepts and Emerging Vehicle Technologies, 2007.
- [18] Yoshino T, Tsuda M, Suzuki Y, et al. Toward development of feedback control system for wall turbulence with MEMS sensors and actuators[R]. Tokyo; 3rd Symposium on Smart Control of Turbulence, 2002.
- [19] Huang A, Lew J, Xu Y, et al. Microsensors and actuators for macrofluidic control[J]. IEEE Sensors Journal, 2004, 4(4): 492-502.
- [20] Bunce R H, Springs A. MEMS emissions sensor system for a turbine engine; US, 2008/0282770 A1[P]. 2008-11-20.
- [21] Blaschke M, Tille T, Robertson P, et al. MEMS gas-sensor array for monitoring the perceived car-cabin air quality[J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(5): 1298-1308.
- [22] Hillion M, Chauvin J, Grondin O, et al. Active combustion control of diesel HCCI engine; combustion timing[R]. SAE Technical Paper 2008-01-0984, 2008.
- [23] Cornwell M D, Myhre D C, Eriksen O H, et al. Active combustion control system for gas turbine engines; US, 7775052 B2[P]. 2010-8-17.
- [24] Grauer F, Filipovic D, Pfoertner H. Application of MEMS in turbomachinery[R]. Brussels, Belgium; RTO AVT Symposium on Novel Vehicle Concepts and Emerging Vehicle Technologies, 2007.
- [25] Kumar A, Nayak A. Sensor system for crack initiation and crack growth monitoring in aero engine components[R]. Canada; Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2007.
- [26] Sadler D J, Ahn C H. On-chip eddy current sensor for proximity sensing and crack detection[J]. Sensor and Actuators A, 2001, 91(3): 340-345.
- [27] Azevedo R G, Jones D G, Jog A V, et al. A SiC MEMS resonant strain sensor for harsh environment applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(4): 568-576.
- [28] Amini R, Gaydadjiev G, Gill E. Smart power management for an onboard wireless sensor and actuators network[R]. AIAA-2009-6815, 2009.
- [29] Zimdars A L, Bose P. Optimal control of wireless sensor network for structural health monitoring[R]. AIAA-2004-6460, 2004.
- [30] Hudak S J, Lanning B R, Jr., Light G M, et al. The influence of uncertainty in usage and fatigue damage sensing on turbine engine prognosis[R]. Warrendale, Pennsylvania; Materials Damage Prognosis, 2005.
- [31] Sparks D, Smith R, Cruz V, et al. Dynamic and kinematic viscosity measurements with a resonating microtube[J]. Sensors and Actuators A; Physical, 2009, 149(1): 38-41.
- [32] DeNatale J F, Borwick R L, Stupar P A, et al. Microelectromechanical (MEM) fluid health sensing device and fabrication method; US, 2007/0062261 A1[P]. 2007-03-22.
- [33] Pulliam W, Russler P. High-temperature, high bandwidth, fiber-optic, MEMS pressure sensor technology for turbine engine component testing[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4578(229): 229-238.
- [34] Hunter G W, Neudeck P G, Okojie R S, et al. An overview of high-temperature electronics and sensor development at NASA Glenn Research Center[J]. Journal of Turbomachinery, 2003, 125(4): 658-664.
- [35] Da Cunha M P, Lad R J, Davulis P, et al. Wireless acoustic wave sensors and systems for harsh environment applications[R]. IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks (WiSNet), 2011.
- [36] Cantatore E, Ouwerkerk M. Energy scavenging and power management in networks of autonomous microsensors[J]. Microelectronics Journal, 2006, 37(12): 1584-1590.
- [37] Arms S W, Townsend C P, Churchill D L. Energy harvesting, wireless, structural health monitoring and reporting system[R]. Melbourne; 2nd Asia-Pacific Workshop on SHM, 2008.