

飞机结构健康监测技术及传感器网络

Aircraft Structural Health Monitoring Technology and Sensor Network

北京航空航天大学自动化学院 袁梅 鲍鹏宇 付重 杜冲 孙东亚



袁梅

副教授,北京航空航天大学自动化学院检测系。主要从事先进传感技术、检测技术及自动化装置、嵌入式系统技术、复杂系统健康监测技术等研究。航空学会自动控制分会仪表与测试专业委员会委员兼秘书,中国计量学会高级会员。在国内外期刊和会议上发表论文 20 余篇,其中 EI 检索 7 篇,SCI 检索 1 篇。曾获国家发明奖 1 项,航空部科技进步二等奖 1 项。

随着现代战争对武器装备任务出勤率和战备完好率要求的提高,以及材料科学、测试技术、信号分析和人工智能技术的飞速发展,目前武器装备大量采用故障预测和状态管理技术(Prognostic and Health

将基于传感器网络的结构健康监测技术应用到飞行器中,对飞行器的结构损伤发生与发展状态、结构的健康状况、可能的寿命进行在线的监测与预报,对保证飞行安全具有重要的理论意义和实际应用价值。

Management, PHM) 以实现“视情维修”,即依据状态的预防维修。这项技术通过检测系统的状态来预测系统及其部件的故障情况,并确定其剩余寿命;利用多传感器信息融合技术诊断系统故障,并基于可用资源和使用需求对维修活动做出管理和决策。PHM 是实现武器装备“视情维修”的重要手段,具有故障预测、检测、隔离、关键部件寿命跟踪、故障报告以及寿命预测等功能,能够实现在准确的时间对准确的部位采取准确的维修活动,从而有效减少维修项目,节省维修费用,减少武器装备的事故率。例如,美国海军应用“视情维修”制定维修大纲,使得维修 F-4J 的维修周期延长了 20%,发动机大修期由 1200h 延长到 2400h;采用 PHM 技术的 JSF 飞机,保障设备减少 50%,维护人员减少 20%~40%,架次生成率提高 25%。

飞行器的结构健康监测

(Structure Health Monitoring, SHM) 是 PHM 的重要组成部分,是 PHM 技术在飞行器结构损伤监测、识别与定位中的应用。由于化学腐蚀、应力作用、撞击以及热疲劳等因素影响,飞行器结构表面或内部有可能产生大量局部损伤及微裂纹。如果不及时检测出这些局部结构损伤,确定其位置、形状、大小,进而采取必要的补救措施,损伤将有可能进一步扩展,从而导致结构破坏,甚至造成严重事故。例如 2003 年 2 月,哥伦比亚号航天飞机的失事是缘于一块重量不足 2kg 的隔热瓦脱落后击中航天飞机左翼前端,所产生的裂纹最终导致航天飞机在返航时解体。

飞行器典型结构(如机翼、机身)的主要损伤包括疲劳裂纹损伤、结构腐蚀损伤、意外损伤(非正常机动过载对结构的损伤,包括冰雹、闪电、鸟撞对结构的损伤等),以及这些因素组合产生的综合损伤。将基于传感

器网络的结构健康监测技术应用到飞行器中,对飞行器的结构损伤发生与发展状态、结构的健康状况、可能的寿命进行在线的监测与预报,对保证飞行的安全具有重要的理论意义和实际应用价值。

结构健康监测技术概述

“健康”一词最初来源于医疗卫生领域,主要用于描述生物有机体的状态。“监测”是指利用一系列手段对问题的起因和发生发展过程进行定性和定量的监视和记录。将“健康监测”引入到工程领域中,它代表的含义和医疗卫生领域的含义存在着相似性,是指在损伤失效事件发生前发现并预报早期故障征兆,避免灾难性事故发生。

“损伤”并不是一种独立的物理性质,它泛指材料内部的一种劣化因素,与所涉及的材料和工作环境密切相关。在从毛坯制造到加工成形的过程中,不可避免地会使机械设备和工程结构中构件的内部或表面产生微小的缺陷(如小于1mm的裂纹或空隙)。在一定的外部因素(载荷、温度变化及腐蚀介质等)作用下,这些缺陷会不断扩展和合并,形成宏观裂纹。裂纹继续扩展后,最终可能导致构件或结构的断裂破坏。对飞机、潜艇和航天飞行器等工程结构的事故分析表明,材料构件内部微裂纹或微缺陷等损伤的发展和聚合,是导致结构失效的重要原因之一。结构健康监测分为被动监测和主动监测两种,通常把采用传感器网络作为神经系统,以生物界的方式感知结构内部的状态(结构整体形变、局部应力应变、强度、刚度等)和外部的环境参数,再根据这些参数,结合力学建模分析、信号处理等技术确定结构的状态。

传统的飞机结构健康状况检测主要是用仪器对结构作无损检测,常规的无损检测方法有目测、电涡流检测、渗透检测、X射线检测、超声检

测、声振和声发射检测等方法。虽然目前无损检测技术的应用已相当广泛,检测的水平也达到一定高度,而且随着技术的不断更新和仪器水平的不断提高,损伤识别和定位精度也相当不错。但是常规的无损检测是一种非常耗时的工作,所需要的仪器设备一般都比较笨重,而且检测时被测设备必须停机,不能实现在线监测。所以常规的无损检测方法不适用于飞行器等结构状态的实时监测。

结构健康监测技术主要针对与人民群众生命安全密切相关、服役期长、造价及维护费用高的国防武器装备和国民经济基础设施,如航空航天飞行器、桥梁、大坝、高层建筑、体育场馆、船舶、潜艇、汽车、高速列车、工程机械、发电设备、核反应堆、输油输气管线等,研究并提高这些结构的安全性,可以降低其维护费用,延长其使用寿命。

结构健康监测技术起源于1954年,最初是进行大型建筑物结构的载荷状态监测。结构健康监测分为被动监测和主动监测两种,通常把采用传感器网络作为神经系统,以生物界的方式进行监测并获得结构状态信息的方法称为被动结构健康监测方法;而主动结构健康监测系统通常在结构

中设置激励源,在结构中激发弹性波或使结构处于轻微振动状态,再通过分析结构响应,获得结构的损伤状态信息。

随着结构设计日益向大型化、复杂化和智能化发展,结构健康监测技术的内容逐渐丰富起来,不再是单纯的载荷监测,而是向结构损伤检测、损伤定位、结构剩余寿命预测,乃至结构损伤的自动修复等方面发展,并与主动控制技术、智能材料技术相结合,逐步发展成为既具有“监测功能”,又具有“控制行为”的结构健康监测技术。当遇到突发事故或危险环境,系统不仅可以感知到自身的状态以及受到损伤的位置和程度,还可以通过调节与控制使整个结构系统恢复到最佳工作状态。不仅如此,系统还可通过自动改变和调节结构的形状、位置、强度、刚度、阻尼或振动频率使结构在危险发生时能自我保

丹阳险峰轴承附件厂

我厂是原机械工业部中国机械基础件成套技术公司轴承专用设备、仪器仪表联营会成员单位,是专业生产机床附件和仪器仪表附件的工厂。
DJK-150型“百灵”牌电刻印机具有技术先进、品质优秀、设计新颖、造型美观、电脑控制、字迹清晰、工作可靠及使用方便等优点,是轴承、活塞环、工具和喷油嘴等标志加工的理想选择。




▲ DJK-150型“百灵”牌电刻印机的技术规格

刻印直径: 15 ~ 150mm	
电 源: 220V, 50Hz	
刻印高度: >4mm	功耗: <40W
刻印深度: 5 ~ 15mm	净重: 10kg
刻印效率: 60件/min(双槽型)	
膜片寿命: 约10万件/片	
电解液消耗: 约1.2kg/万件	
外形尺寸: 320mm × 280mm × 100mm(刻印电源)	
300mm × 420mm × 80mm(刻印槽)	
不但在平面上而且在外径上也可使用	

本厂生产的硬质合金钢球,于1999年4月28日和2000年7月6日经国家轴承质量鉴定检测中心测定,分别达到G16(B~14mm)、G10(φ3~φ7.5mm),深受用户青睐。

通讯地址: 江苏省丹阳市新桥镇何家村
邮编: 212322
电话: 0511-86356868 86352019

传真: 0511-86357183
网址: WWW.XFDJKQ.COM
电子邮箱: Xqzhff@pub.zj.jsinfo.net

广告索引号 08-057

护,并继续生存下去。

结构健康监测技术国内外发展和研究现状

1 国外研究及发展现状

1979年,美国NASA启动了一项“智能蒙皮”计划,Claus等人首次将光纤传感器网络埋入碳纤维增强复合材料飞机蒙皮中,使材料具有感知应力和判断损伤的能力,这是结构健康监测系统第一次在航空航天领域的初步尝试,尔后带来了SHM在军用和民用领域的研究热潮。

在军用航空领域,在美国军方和政府部门的各项研究计划中都采用了结构健康监测技术,例如在USAF的资助下,美国已经进行了结构健康监测技术的应用基础研究,并将其应用于F-18、F-22、JSF等飞行器。欧洲联合研制的Eurofight 2000新型战机亦采用了先进的结构健康监测技术进行了飞行载荷的监测。针对直升机结构健康监测的研究是目前健康监测研究的一个重要方向,美国和英国都开展了相关研究项目,主要的监测对象是旋翼结构的振动、旋翼桨叶结构的损伤、信号传输系统的失效及发动机齿轮箱中的故障。在民用航空领域,波音公司计划在其新型飞机波音7E7上探索采用结构健康监测技术探测结构微裂纹;空中客车公司也积极开展这一领域的研究,他们已研制了一套基于压电传感器阵列的结构疲劳裂纹监测系统,在A340~A600飞机上进行了试测,效果明显,并探索将结构健康监测新技术在新机型,如A380飞机上的应用。

目前结构健康监测技术在土木工程领域的应用早已是一个研究的热点,应用的对象包括桥梁、水坝、高层建筑、公路等。美国20世纪80年代中后期就开始在多座桥梁上布设监测传感器,监测环境荷载、结构振动和局部应力状态,用以验证设计假

定、监视施工质量和实时评定服役安全状态。美国仅1995年,就投资1.44亿美元,在90座大坝上配备了安全监测设备。

在舰艇和海上钻井平台方面,美国海军研究了一套光纤传感器系统,用于监测美国海军舰艇推进系统中装配的水润滑轴承的疲劳裂纹及船体的结构应变。英国实施了海上平台智能结构系统的研究计划,针对航海目标,研究以全光纤传感器为核心的复合材料海上平台系统,以探索在恶劣的海洋环境下海上平台的健康监测试验等综合技术;英国石油机构声称,由于采用结构健康监测系统,他们的海上石油平台得到了很好的经济效益,平均每一个海上石油平台可以节省5000万英镑左右。

国际上有关结构健康监测技术的学术交流活动也非常频繁,每年都举办许多世界性的结构健康监测大会,其中SPIE(Society of Optical Engineering)智能材料结构会议(Smart Structures and materials)及无损健康监测与诊断会议(Non-destructive Evaluation for Health Monitoring and Diagnostics)每年3月在美国西海岸举行。在美国Stanford大学,自1997年起每两年举行一次名为结构健康监测国际论坛(The International Workshop on Structural Health Monitoring)的国际会议。欧洲也每两年定期召开欧洲结构健康监测大会(European Conferences on Structural Health Monitoring)。此外,美国、欧洲、日本、中国经常定期召开联合会议,交流结构健康监测和研究进展。

2 国内研究及发展现状

我国国家自然科学基金委员会最早于1991年将智能材料与结构技术列为国家高新技术研究发展计划纲要的新概念构想探索课题,1996年又将其列入重点课题。从那时起,

我国的一些高等院校就紧紧跟随国际先进水平的步伐,至今已开展了10余年的智能材料与结构技术的研究。例如,南京航空航天大学早在1991年就成立了智能材料与结构研究所,集中从事智能材料与结构的研究,先后取得一批在国内外有影响的学术成果。1991年原中航还投资1200万元建设了智能材料与结构航空科技部级重点实验室。此外,哈尔滨工业大学在土木工程结构、海洋工程结构的健康监测及应用光纤传感器监测复合材料的固化等方面进行了大量的研究。重庆大学侧重于基于分布式光纤传感系统的智能材料与结构的研究。北京航空航天大学也进行了一些智能材料制备及性能表征方面的研究,并在“863项目”资助下,开展了对飞机结构损伤进行在线监测的新机理和新技术研究。在土木工程领域,武汉理工大学、同济大学、东南大学及大连理工大学都开展了不少结构健康监测方面的研究,尤其是针对桥梁结构。我国在许多大型土木工程中都采用了结构健康监测系统,例如香港青马大桥安装了500个加速度传感器、粘贴了大量的应变片和一套GPS系统,用以长期监测桥梁的服役安全性。内地也有不少桥梁安装了结构健康监测系统,如江苏的苏通大桥、江阴大桥等。此外,哈尔滨工业大学在“863项目”的资助下,对海洋钻井平台的结构健康监测系统进行了系统研究。

结构健康监测的研究是一个多学科综合交叉的前沿研究领域,内容涉及材料、测控、力学、机械、信息通信、人工智能等多个学科领域。其中先进智能传感技术、信号与信息处理技术、损伤识别技术、结构状态特征参数提取技术等是目前的研究热点。本文以FBG光纤传感器网络和压电传感器网络为例,重点介绍结构健康监测技术中的传感器网络技术的原理、特点及应用情况。

SHM 中的传感器网络技术

结构健康监测通过结构中的传感器网络来实时监测结构对环境激励(人为或自然)的响应信号,并从中提取结构的损伤和老化信息,为结构的使用和维护工作提供参考。所以用传感器网络实现损伤检测是进行结构健康监测的基础。

结构健康监测系统的功能器件分为 2 类,一类是传感元件,用于将外界的应力、应变、位移、温湿度、机械波等信号转换成相应的电/光信号输出;另一类是激励驱动元件,用于产生力、位移、应变、温升等激励信号,对结构的状态和损伤产生激励。

目前用于飞机结构健康监测的传感器网络有光纤、压电、压阻、温度等多种敏感机理的传感器网络,而其中以光纤和压电两类传感器网络应用最为广泛。例如,1979 年 NASA 启动的智能蒙皮计划,就是采用光纤传感器网络埋入碳纤维增强型复合材料实现应力与损伤判别;美国诺斯罗普·格鲁门公司利用压电传感器网络及光纤传感器网络,监测具有隔段的 F-18 战斗机机翼结构的损伤及应变;空中客车公司研制的基于压电元件阵列的结构疲劳裂纹监测系统用于空客系列飞机疲劳裂纹监测。

1 SHM 中的光纤传感器网络

由于光纤传感器具有重量轻、抗电磁干扰、耐腐蚀、易于埋入结构、在同一根光纤上可以实现多点测量等优点,一直是结构健康监测系统中广泛采用的传感器之一。光纤传感器的基本原理是将光源的光输入光纤,并经光纤传输至调制区,在调制区内,外界被测参数与进入调制区的光相互作用,使得光的性质(如光强、波长、频率、相位等)发生变化而形成被调制的信号光,再经光纤送入探测器、解调器,最终获得被测参数。目前常用的调制方法有 6 种:强度调

制、波长调制、频率调制、相位调制、偏振态调制和分布调制。

光纤光栅是结构健康监测中最具发展前途的光纤无源器件之一,是一种波长调制型功能器件。光栅器件主要有光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)、长周期光栅和啁啾光栅。FBG 是最简单、最普遍的一种光纤光栅,可以直接传感温度及应变,实现与温度和应变有关的其他参数的间接测量。它除了具有普通光学传感器重量轻、耐腐蚀、抗电磁干扰、使用安全可靠等优点外,还具有尺寸小、抗干扰能力强、传感与传输一体、易于构成传感器网络的特点。正是由于 FBG 所具有的其他传统传感器无法比拟的优点,使得 FBG 传感器成为近年来光纤传感器中最引人注目的研究和应用热点。

FBG 的传感原理为:在光纤纤芯传播的光将在每个光栅面处发生散射,如果不满足波长条件,依次排列的光栅平面反射回来的光相位将会逐渐变得不同,最后相互抵消;当满足波长条件时,每个光栅平面反射回来的光逐步累加,最后会在反向形成一个反射峰。反射峰值的中心波长称为 Bragg 波长 λ_B ,其大小为:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda,$$

式中, Bragg 波长 λ_B 是光纤布拉格光栅反射回来的入射光在自由空间中的中心波长; n_{eff} 是光纤纤芯针对自由空间中心波长的折射率; Λ 为光栅周期。温度与应变的变化会引起 FBG 的周期与折射率的变化,通过检测 FBG 反射谱与透射谱的变化,就可以获得相应的温度与应变信息,这就是 FBG 探测温度与应变的基本原理。

实际使用时,可以选用不同中心波长的 FBG 传感器串联组成的传感器阵列,只要保证阵列中的 FBG 传感器的中心波长间隔和波长变化范围不重叠,FBG 组成的传感器阵列就可以监测多个测量区域的温度及应力/应变,使用非常方便。FBG 传感器的应变分辨力可达 1 个微应变,温度分辨力可达 0.1℃。

如图 1 所示,为了将 FBG 传



EASTWARD
伊斯沃公司

在各种产品、零件、整机上打
印中英文字符或图形标识
欢迎拨打免费热线电话: 800-807-6866

ISO9001 质量管理体系认证和高新技术认定的外资企业
为用户设计订做各种工业专用标记机



▲ 气动打标机系列



▲ 激光打标机系列

- 气动打标机系列
- 无声气动打标机
- 无线气动打标机
- 振镜扫描连续激光打标机
- X-Y 扫描连续激光打标机
- X-Y 扫描脉冲激光打标机
- 电蚀打标机
- 喷砂打标机
- 半导体激光打标机系列
- 光纤激光打标机系列
- 汽车零部件专用打标机
- 智能卡激光专用打标机



▲ 激光金属纸标签



▲ PM154 轿车底盘 VIN 号数字压机

品牌, 专业, 不打不相识, 伊斯沃为您解决一切标记问题

中国公司
地址: 深圳市宝安区西乡街道 401147
电话: (020) 67810571 67802455
传真: (020) 67810577
网址: www.eastward.com.cn
E-mail: canada@eastward.com.cn

各办事处
华东服务热线: 13918137046
华南服务热线: 15026817243
华北服务热线: 13934327406
东北服务热线: 150841087204
重庆服务热线: 13608369345

广告索引号 08-092



图1 国外飞机采用FBG传感器网络进行结构健康监测示意图

感器应用于航空航天领域,德国Daimlerchrysler Aerospace (DASA) 飞机测试中心的M. Trutzel 等人将FBG粘贴于当时最新研制的碳纤维增强塑料(CFPR)机翼的表面,实现了对机翼疲劳特性的健康监测。结果表明,FBG可以很好地完成信号的监测工作,而且当温度在 $-50 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 的范围内时,应变灵敏度具有良好的线性特性。

北航测控技术实验室也利用FBG传感器网络搭建了太阳能帆板模型主动振动控制系统。系统中采用FBG应变传感器监测振动的幅值、频率和振型,并使用FBG温度传感器对其FBG应变传感器的温度漂移进行补偿。主动振动控制系统根据监测到的振动信息,利用压电元件作为制动器,对太阳能帆板的振动信号进行抑制。与用常规的应变传感器相比,用带有温度修正的FBG传感器网络对振动进行监测,无论是测量精度和测量灵敏度都有较程度的提高。

2 SHM中的压电传感器网络

压电元件具有频响高、重复性好,既可用作传感器又可用作驱动器,便于实现主动监测系统等优点,在结构健康监控系统中,也是应用非常广泛的一种元件。

压电元件的工作主要利用压电效应。压电元件受到机械应力的作用处于应变状态时,其材料内部会引起电极化并产生电场,其值与应力的方向成比例,其符号取决于应力的方向,这种现象称为正压电效应。利用

正压电效应,可以实现应变、位移、损伤部位反射的Lamb波的监测。正压电效应一般有3种形式,分别称为纵向效应、横向效应和剪切效应。

逆压电效应则与正压电效应相反,当材料在电场的作用下发生电极化时会产生应变,其应变值同所加电场的强度成比例,其符号取决于电场的方向。利用压电元件的逆压电效应特性,可以让元件作为激励源并按照设定的方式对结构进行激励,通过检测、分析激发出的弹性波,获取结构的损伤信息,判定结构的损伤状态。

在结构健康监控系统中,常用的压电元件主要有压电陶瓷和压电薄膜。随着压电元件在智能结构中的广泛应用,目前很多新型的压电材料及压电元件不断出现,包括大应变单晶压电材料、压电纤维元件、可设计性很强的压电复合材料等。

利用压电传感器阵列可以实现冲击、裂纹等信息的检测和定位。美国Stanford大学开展了此项研究。通过分析处于不同坐标位置处的压电传感器监测到的信号幅度和信号的时间差,利用相关的信号和信息处理算法,就可以计算出冲击产生的位置和冲击强度。

图2为北航测控技术实验室开展的利用压电传感器阵列对螺钉松动状态进行检测和定位的实验装置示意图。图中P11-P14、P21-P24为压电传感器阵列,D1-D4为螺钉。该装置的工作原理是利用P21压电传感器产生激励信号,再利用数据采集和记录装置对其余压电传感器的信号进行采集、处理,采用小波包能量分解法提取损伤特征值,并采用传感器阵列的方式建立损伤信号与

损伤部位的映射,利用该映射关系进行损伤定位,完成螺钉松动状况的监测。

结束语

随着航空科学技术的飞速发展,飞机结构设计思想不断更新,满足轻质、高可靠性、高机动性、高可维护型、高生存力、超音速巡航、隐身、大航程和短距离起落的综合要求已成为现代军用飞机结构设计的一项极为重要而且必须遵循的准则,这些性能要求使得飞行器结构材料面临更

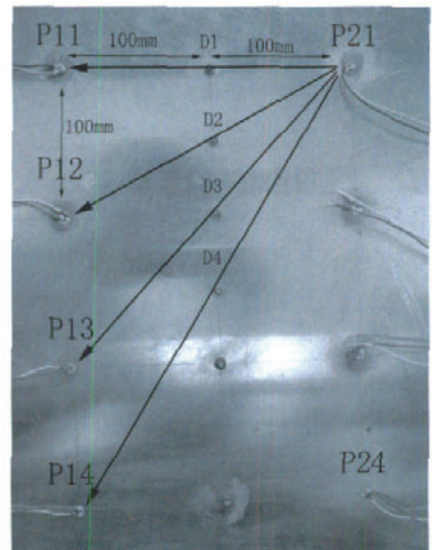


图2 利用压电传感器阵列进行螺钉松动状态监测

加恶劣的使用环境。利用基于传感器网络的结构健康监测技术对飞行器的结构损伤发生与发展、结构的健康状况、可能的寿命进行在线的监测与预报,对保证飞行安全具有重要的理论意义和实际应用价值。

各国科学家在结构健康监测多个领域开展的研究为这项技术的实际应用奠定了基础,但是在工程应用之前还有许多问题需要解决,例如智能材料的集成制造技术、损伤识别及定位技术、结构健康监测方法的长期稳定性及可靠性试验验证技术等。在今后较长的一段时间内,结构健康监测技术仍将是很多领域科学家研究的重点和热点。

(责编 未艾)