

大型飞机的发展对结构健康监测的需求与挑战*

Challenge in Structural Health Monitoring of Large Aircraft Development

南京航空航天大学航空科技智能材料与结构重点实验室 袁慎芳 邱雷 吴键 孙亚杰 王强



袁慎芳

博士,教授,博士生导师。主要研究方向为智能材料与结构,结构健康监测,信号信息处理技术,无线传感器网络,先进传感技术,先进测控系统。

《国家中长期科学和技术发展规划纲要》已明确指出我国航空科技领域将重点实施大型飞机工程,大型飞机的发展对保障国防安全和国民经济

*国家自然科学基金重点项目(50830201)、国家高技术研究发展计划(2007AA03Z117)。

结构健康监测目前是国内外研究的热点,飞行器结构是结构健康监测技术的一个重要应用对象。飞行器结构健康监测技术从实验室研究走向实际工程应用需要进行大量的试验验证研究。

济发展具有重要的战略意义。机体结构是大型飞机发展的必要支撑平台。而飞行器结构健康监测技术是确保飞行器结构先进、机构新颖、飞行安全、易维护并满足高性能飞行指标的高新技术之一^[1-4]。

大型飞机对结构健康监测技术的需求分析

对大型民用客机而言,它们不仅需要严格的民用航空适航认证,而且必须达到美国波音公司、欧洲空中客车公司的同类产品性能,才能具有市场竞争力。民用飞机竞争的焦点在于飞机的经济性、安全性和舒适性。国内外民机研制中需要着重解决的一些问题如下^[3-6]:

(1) 民机结构大量采用先进复合材料,这被视为实现新飞机机体减重及降低直接运营成本的有效途径。这为保证飞机的安全性提出了新的要求。

(2) 民用飞机结构的外形、结构形式具有越来越复杂的趋势,几何尺寸正不断增大。这种大结构尺寸和复杂结构形式对飞机结构的可靠性和维护性提出了很高的要求。

(3) 维护费用和燃油费用关系到民用飞机的经济性。

近年来,现代军用运输机的巡航速度已达 800 ~ 900km/h,是陆上运输速度的 15 倍,海上运输速度的 25 倍;航程达 5000km 左右,可覆盖辽阔的疆土,经空中加油后,可实

施全球运输。大型军用运输机在某种程度上已成为决定战争胜负的重要因素,其装备数量、技术水平和运载效能已成为衡量一个国家国防实力的重要标志。作为大型飞机中的一类,我国也将开展大型运输机的研制。在上述我国迫切需要发展的军用飞行器研制中也面临很多需要着重解决的问题,如:

(1) 现代军机大量使用各类新型材料和先进工艺,如钛合金、铝锂合金、复合材料,应用超塑成型/扩散连接、整体化构件制造等高新技术。这些新材料和新工艺的应用,对传统的结构损伤、结构安全性设计理论提出了新的要求。

(2) 大型运输机和战略轰炸机的宽大机身结构,以及超大尺寸壁板、大开口等结构形式,同时对机体结构使用寿命提出高达 60000h 以上,日历寿命长达 40 年。这是我国飞行器研制的新问题,对飞机结构的可靠性和可维护性提出了新的挑战。

上述民机、军机的瓶颈问题可采用结构健康监测技术加以解决,采用结构健康监测技术可以在线实时地对结构状态进行监测,可以保证飞机的安全性和可靠性、降低维护费用、延长使用寿命;国外飞行器结构健康监测技术大多属于保密技术范畴,因此,该技术的研究对于发展具有我国自主知识产权的航空飞行器具有极为重要的意义。

国内外研究的现状及分析

1 国外研究情况

(1) 民机智能结构系统的集成与验证研究。

在民用航空领域,结构健康监测技术被视为保障复合材料大量使用和提高飞机安全性、降低维护费用的关键技术。因此世界两大主要飞机制造公司——波音公司和空客公司都非常重视结构健康监测技术的研究^[7-9]。波音公司在新型飞机波音

787 上探索采用了结构健康监测技术探测结构微裂纹。空客公司也积极开展了这一领域的研究,探索了多个机型的健康监测的实现,包括 A320、A340-600 等。在新机型上的应用,如 A380,也是空客结构健康监测技术探索研究的目标之一。他们认为民机结构的健康监测对象重点包括:关键部位的应力应变情况、机翼等部位所承受的较大载荷,机头、机身和垂尾等部位所受的冲击情况,关键部位的疲劳裂纹等。他们为结构健康监测系统在飞机上的应用制定了具体路线图,共分为 4 代。现阶段,结构健康监测系统的应用主要还集中在飞机的地面结构强度和疲劳试验中以及装机后的离线测试。到 2013 年左右,他们计划尝试进行在役飞机的在线监测,到 2018 左右实现飞机整机的健康监测。

(2) 军机智能结构系统的集成与验证研究。

在美国军方和政府部门的多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,美国针对 F-18、F-22、JSF 和 DC-X2、X-33 等飞行器^[10-11],已进行了结构健康监测技术的应用基础研究。美国诺斯罗普·格鲁门公司利用压电传感器及光纤传感器,监测具有隔段的 F-18 机翼结构的损伤及应变。欧洲联合研制的 Eurofight 2000 新型战机亦尝试使用基于应变片的结构健康监测技术对飞行载荷进行了的监测^[12]。2006 年,美国 Defence Science and Technology Organization 报道了他们对 UH-60A 行星齿轮架裂纹的成功监测^[13-14]。

2 国内发展情况

在中国,国家自然科学基金委员会最早于 1991 年将智能结构技术列为国家高技术研究发展计划纲要的新概念构想探索课题。从那时起,结构健康监测技术作为智能结构技术的一部分在国内也开展了相关研究。

我国的一些高等院校就紧紧跟踪国际先进水平,至今已开展了近 20 年的这方面的研究。

早在上世纪 80 年代末,陶宝祺院士带领南京航空航天大学一批青年学者在国内率先开展了航空结构健康监测的研究^[1]。南京航空航天大学先后在飞行器结构健康监测研究方面取得了一批在国内外有影响的学术成果,创建了飞行器结构强度自诊断和自适应理论并建立了演示系统,1998 年获国家发明三等奖。在此成果的基础上,2005 ~ 2006 年又在国家自然科学基金重点项目的支持下,袁慎芳教授研究小组同中国沈阳飞机研究所、中国飞机强度研究所合作,在国内首次针对某型无人机机翼盒段试验件进行了压电-光纤综合结构健康监测系统的研制与功能验证^[15]。针对某型无人机机翼盒段试验件,成功实现了国内首次大型盒段级试验件弯扭强度实验过程中的结构健康监测,监测结构尺寸达 4m × 1.2m × 0.265m,监测对象包括结构的应变场分布及抽钉失效。

此外,南京航空航天大学还针对智能无线传感网络、多主体协作技术等航空结构健康监测中的应用展开了研究^[16-18]。

哈尔滨工业大学从 1992 年开始在杜善义院士的带领下,也开展了航空航天智能材料和结构方面的研究^[19-20]。他们在光纤传感器、复合材料固化工艺监测等领域进行了研究。重庆大学在黄尚廉院士的带领下,在结构健康监测用光纤传感器技术方面,深入研究了光纤传感器及光电式位移、变形传感器^[21]。

我国航空研究所从九五期间就开展了结构健康监测的研究,如中航工业沈阳飞机设计研究所、中国飞机强度研究所等单位^[22]。

目前,国内在飞行器结构健康监测技术的原理性研究方面,已进行了不少研究工作的积累,但结合真实的

飞行器结构,尤其是比较大型和复杂的飞行器结构进行的结构健康监测系统集成与功能验证的研究还不多。国外比较重视面向具体机型的结构健康监测系统集成与功能验证。目前的探索很多是在地面进行的验证研究,也有一些已进行了飞行验证,特别是面向军机的一些研究。结构健康监测系统的集成与功能验证研究是该技术在实际飞行器结构上应用所必须进行的研究,国内在此方面的探索很少,同国外差距较大。

需要重点解决的关键技术

结构健康监测技术作为一项具有创新性的技术,从基础研究走向工程应用,尤其是在大型飞机或其他飞行器上的实际应用,目前还需要着重解决以下关键问题:

(1) 真实飞行器上结构健康监测的功能实现。

在实验室环境下针对简单结构形式下的小试件易于实现结构健康监测的功能,针对单一简单监测对象,易于实现结构健康监测功能,但在实际飞行器结构尺寸大、结构形式复杂、使用环境复杂的情况下,如何实现结构的健康监测是个需要重点研究的难点问题。

(2) 满足机载要求的结构健康监测系统集成实现方法。

现有的结构健康监测系统集成附加重量过大,多采用分立仪器实现,功耗较大,还没有专门研制的适合机载条件的集成结构健康监测系统集成,限制了该技术直接在飞行器上的应用,需要考虑低重量、小体积、低功耗的集成结构健康监测系统的实现方法。功能器件同结构集成的可靠性和规范性,是保证可靠监测的前提。需要通过研究制定功能器件同结构集成时的规范化工艺标准并进行相关的一致性、耐久性使用保障方法的研究。

(3) 复杂结构形式下载荷—结构

—损伤—传感器—监测系统的耦合建模。

飞行器结构健康监测的对象包括结构的连接失效、金属结构疲劳裂纹、复合材料结构冲击损伤、内部分层、断裂等主要损伤失效形式以及引起这些损伤和失效的冲击、载荷、温湿度场等。为有效指导结构中传感监测网络的布置、结构损伤特征参数的提取及对损伤和失效的有效评估,必须对结构健康监测系统进行有效的理论建模和数值仿真研究。建模和仿真研究涉及到结构在复杂结构形式下、承受载荷时、内部出现损伤前后的静、动力学建模、同传感器、结构健康监测方法相关的力—电耦合建模以及传感器在时域、频域及时频域的信号分析建模。

(4) 组合传感与结构健康监测方法的研究。

目前已应用于飞行器结构健康监测的传感和监测方法没有一种可以适用于所有监测对象。基于准分布式光纤光栅的结构健康监测方法适合于监测结构中的应变分布和程度较大的损伤,但对小损伤不敏感。基于压电传感阵列的主动结构健康监测方法则对裂纹等小损伤比较敏感。对于大尺寸、复杂结构形式下飞行器结构的健康监测的实现,必须充分利用已有的多种结构健康监测方法的优点,研究其组合传感方法和监测策略。通过理论和实验相结合的方法,以损伤及其监测方法的物理、力学机制为基础,探索损伤与传感器监测信号的时域、频域、时频域特征参数之间的定量联系;研究采用 Hilbert-Huang、小波分析、概率估计理论、神经网络、主元分析等先进信号信息处理方法从监测数据中提取反映结构状态的特征参数并结合力学建模对其进行辨识评价。

(5) 结构健康监测系统的综合管理。

如果针对实际飞行器应用对象,

结构健康监测系统集成时的情况非常复杂、困难。由于所要监测的结构不再是很小的试验件,因此所需的结构传感器件的数目、所需决策对象的复杂性都将大大增加,随之所带来的是结构健康监测网络的复杂程度、用于信号信息处理的运算量、需要通信、传输的信息量、系统各部分之间的管理、协调需求及监测网络所需消耗的能量等的急剧增加。这些问题如不能加以解决,结构健康监测技术就不可能真正得到较好的应用。目前,飞机的综合健康管理系统是一个亟待发展的方向,结构健康监测系统的综合管理应该作为飞机综合健康管理系统的一部分需要加以重视。

(6) 飞行器结构健康监测系统的集成与验证方法。

新技术只有通过不断的应用验证和实践,才能不断地完善已有技术、发现新问题、比较不同解决方案的有效性,才能将这项新技术推向实用。对于结构健康监测技术来讲,这也是其真正实用所必经之路。目前国外比较重视飞行器结构健康监测系统的集成与功能验证方法的研究,国内相关的经验较少,急需加强这方面的研究。

飞行器结构健康监测中的新技术

从目前国内外进展情况来看,在结构健康监测研究中,国外的研究涉及多种军、民机机型。探索涉及到的关键技术包括:结构健康监测系统中传感与驱动器件的实现、封装、优化配置方法;金属结构裂纹、复合材料结构脱粘、脱层等典型飞行器结构损伤、飞行载荷谱、应变场等的监测方法;力学建模、信号信息处理及辨识方法的研究。在这些研究中,有以下新技术值得关注。

1 智能夹层技术

美国斯坦福大学率先提出智能夹层的思想,并对此进行研制^[23-24],

国内南京航空航天大学是首先进行此方面研究的单位^[25-26]。智能夹层指一块预置了功能元件的模块化的铺层,使用时可根据需要布置在飞行器结构中,其结构包括功能元件、连接线路和基体材料。智能夹层优点是:(1)功能元件层可以一次制备完成,保证了其性能的一致性;(2)功能元件的连线预制在功能元件层内,最终通过一个标准接口输出,便于连接,线路对结构影响小;(3)功能元件层可以采用简单的方法布置在结构表面,便于大面积使用。通过这样的方法可有效改善目前常用的直接将传感元件粘贴在结构上的方法所带来的缺点,如胶层厚度不均、电绝缘问题、传感性能分散、串扰大的弊端。此外,预制了传感元件的智能夹层由于采用改进的柔性印刷技术,是一种柔性膜,可方便地根据结构的形状,进行三维制作,通过适当的剪裁,便于安装于复杂部位,使用方便。智能夹层的设计涵盖了基材选择、传感元件布局、电气线路设计及加工工艺、夹层安装工艺等方面的内容。

CLoVER (Composite Long-range Variable-direction Emitting Radar transducer) 传感器也是一种新型柔性传感元件。这种器件是由美国密歇根大学研发的一种新型器件^[27]。它是由多个楔形压电传感阵元组成的环形阵列,各阵元顺序工作使该传感器能够在 360° 范围内实现扫描监测。CLoVER传感器扇区的角度跨距越小,电容则越小,因此,利用相同的激励信号工作时,CLoVER传感器比相同尺寸环形压电传感器产生的传感信号幅值要大。CLoVER传感器电极的两个径向部分相互独立,可以通过改变传感器的径向尺寸改变在结构中所激发的导波模式,以选择更利于损伤监测的导波模式进行工作。此外,CLoVER传感器通过电极设计,可同时用作为传感器和驱动器,从而可以减少独立

的元件数量。CLoVER传感器还可以通过改变各阵元的连接方式而改变整个传感器的形状以用于弯曲表面,如飞行器机身等。

2 结构监测用智能无线传感网络

无线传感器网络是近年来国内外研究的热点。无线传感网络是由大量依据特定的通信协议,可进行相互通信的智能无线传感节点组成的网络。这些智能传感节点包含了传感、计算和通信模块,能够互相协同自组织形成网络,并且通过特定的网络技术将采集的信息进行处理与融合后发送给用户^[28]。

无线传感网络为实现结构健康监测系统提供了很好的分布式监测网络。采用无线传感网络可有效减少器件引线数量,从而降低由于增加结构健康监测系统所导致的重量增加;无线传感节点具有小尺寸、轻量化的特点,可方便地安装于结构形状比较复杂,不便于引线的部位;由于无线传感网络节点具有局域信号处理功能,很多信号信息处理工作可在传感节点附近局部完成,将大大减少所需传输的信息量,并将原来由中央处理器实现的串行处理、集中决策的系统,变为一种并行的分布式信息处理系统,将明显提高结构健康监测系统的运行速度及决策的可靠性和灵活性^[1]。

飞行器结构监测用无线传感网络系统中。大量无线传感节点的协同工作,可实现整机的监测,监测结果可以通过卫星或 Internet 传至地面。

目前针对飞行器监测应用所实现的无线传感网络节点大致包括应变节点、压电加速度节点、声发射节点及电涡流节点等^[16,29-30]。

从2002年起,南京航空航天大学开展了面向结构健康监测的智能无线传感网络的研究。自行研制了包括桥路供电、信号放大、数据采集、处理和无线通信模块的无线应变传

感器网络节点和针对结构监测中常用的压电元件的高速无线压电传感器网络节点。

设计了相应无线传感器网络拓扑结构及分层协议;自主研发了结构监测用无线传感器网络系统,包括监测节点、网络中继节点、无线网络基站节点和功能强大的客户端无线监控软件系统,针对某型战斗机前起落架试验件进行了现场静力试验,全起落架尺寸 $2800 \times 1800 \times 800 \text{mm}$;试验系统成功监测了全起落架关键监测部位共43点的应变情况。

2007年,美国空军启动ASMT (Advanced Subminiature Telemetry) 计划,该计划研究如何将智能无线传感网络应用于飞机结构试验中^[34-35]。他们采用一种特殊的可电清除的粘结剂将无线传感网络节点布置在机体结构上。

2008年4月,ASMT项目在



飞机盒段健康监测系统

F16战斗机上完成了上述系统的地面验证试验和第一次飞行颤振试验。试验表明,无线传感节点所使用的 $2.2 \sim 2.45 \text{GHz}$ 频段未影响其他机载电子设备,而其他机载电子设备,包括S段的同地面通信用的遥测装置也未对无线传感网络的通信和工作产生任何影响。飞行试验共进行了1.7个小时,整个监测系统进行了

有效的工作。

用于飞行器结构健康监测的智能无线传感网络不完全等同于常规无线传感网络的研究,常规无线传感网络的研究目前大多集中在网络的能耗问题、自组织网络拓扑结构、定位等问题。这些问题在飞行器结构健康监测中不是着重需要解决的问题。着重需要解决的是监测数据测试的实时性、同步性和可靠性。由于无线传感网络依据大量节点进行分布式测试,因此其网络的协作工作机制是必须加以着重研究的一个方面,否则无线传感网络的优势不能很好体现。结构监测用无线传感网络的研究还需要在以下关键技术上进一步发展和完善:

(1) 用于结构监测的高性能、高可靠性、多参数、小尺寸的无线传感节点的优化设计方法。

(2) 结构监测用无线传感网络的分布式协同工作策略。

(3) 无线传感网络的实时性保障方法。

(4) 无线传感网络的数据传输可

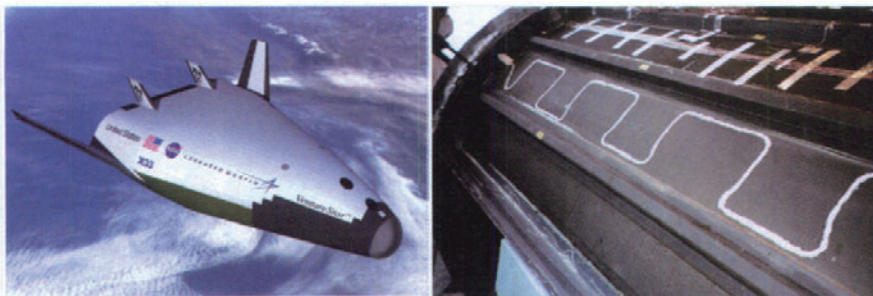


图1 X33型航天飞机及其上面的光纤传感系统

靠性校验方法。

(5) 智能无线传感网络的软件协议及系统标定方法。

3 结构的组合传感、监测策略

飞机结构的外形尺寸不断增大、结构形式越来越复杂的趋势为结构健康监测的实现提出了高要求。对于压电主动健康监测系统来说,复杂的结构形式会加大结构内弹性波传播的复杂性。弹性波不仅沿结构各个方向的群速度、相速度差异增大,

而且由于结构尺寸和形式的变化,其受到的散射、反射、相互的耦合及模式转化将明显增加。这些都为有效提取损伤散射信号并对其进行正确评估带来了挑战。复杂的结构形式也为结构动力学的精确建模带来困难,而光纤结构健康监测实现的前提是有较为精确的静动力学模型来指导传感网络的有效布置和数据的有效评估。针对这些问题,以下一些结构的组合传感和监测新方法值得参考。

(1) 时间反转聚集成像方法。

时间反转(在频域里称作共轭)是指将不同传感器接收到的声源发射信号,按其时间历程的反向过程重新向介质发射回去,即先到后发、后到先发,为可以有效地实现声源信号的重构的一种方法,它是声互易性原理的应用之一。法国科学家 Mathias Fink 最早将时间反转理论从光学领域应用到声学领域^[36]。时间反转方法可以使声源信号在空间上和时间上重新进行聚焦,使得特定信号同时同相到达聚焦点,使信号的

能量汇聚到聚焦点。这一特点可应用于基于压电元件及主动 Lamb 波的结构健康监测方法中,以有效提取结构损伤特征并优化信噪比。结构中的损伤对结构中传播的 Lamb 波会产生散射现象,损伤处的散射就相当于结构中的一个声源,虽然不同 Lamb 波模态对相同损伤的响应不相同,但通过控制反转时间及聚焦条件,可使同损伤相关的模态响应在聚焦后得以叠加增强。其他响应由

于是随机叠加无法增强,从而提高损伤信号的信噪比。这一特点恰好克服了复杂反射结构中 Lamb 波监测时的模式混叠问题,可以优化监测信号中的特征参数。以信号能量为参数,把从聚焦时刻开始传播到结构各点的信号能量用图像的方法显示出来,即将结构各点信号幅值映射矩阵中各像素点的像素值,则信号传播的波动图可以用图像的方法显示出来,且图像最亮处显示的是信号聚焦处,也就是损伤。从目前发表的研究成果来看,美国斯坦福大学的 Fu-Kuo Chang 教授等人,北卡罗来纳大学的 F. K. Yuan 等人进行了一些前期探索^[37-38],研究表明此方法对于复杂结构的健康监测有较好研究前景。国内,南京航空航天大学也进行了相关研究^[39-40],南京航空航天大学提出的二元无参考时间反转聚集成像方法中传感器的二元布置方法。采用 2 个压电元件的近距离布置结合特定的窗函数进行信号处理,该方法可不需要结构的健康信号,同时有利于应用在结构边缘处。

(2) 相控阵结构健康监测方法。

压电相控阵方法的工作原理类似于雷达的相控阵方法,采用等间隔的一组压电元件进行布置。使用时,对阵列中各元件以同一频率的信号激励,但控制激励信号的初始相位,使得它们在结构中所激励的声波互相相干,这些声波在结构中干涉形成一个特定指向且聚焦的波束。通过相位控制,可以偏转该波束,从而实现一个平面上的损伤扫查^[41]。即相控阵是通过控制每个压电元件激励和接收声波的相位延迟来控制合成波束的方向,实现对结构的多方位扫查,并将扫查结果进行成像的一种方法^[42]。国外, Woo and Shi 研究了相控阵中阵元的参数设计和参数对波束指向的影响, V. Giurgiutiu 等人对相控阵在各向同性材料结构中应用进行了相应的研究^[43-44]。国内,

南京航空航天大学进行了相关研究。

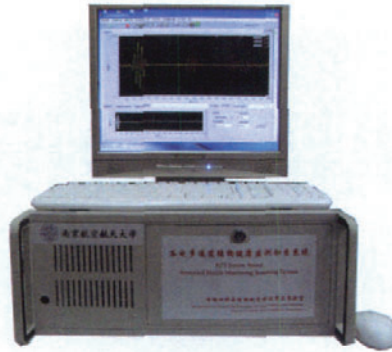
(3) 空间滤波器结构健康监测方法。

基于空间滤波器的结构健康监测方法是压电传感阵列组合应用的另外一种方法^[46-47]。该方法采用空间滤波器对压电传感阵列所测得的信号进行滤波,只保留以特定角度入射到传感器阵列的声波。利用此特性,可以帮助消除边界反射、加筋反射等结构反射,因为这些反射源同结构中布置的传感器之间的位置是相互固定的,其反射角度事先是已知的,因此可以在监测结果中,可以根据事先知道的角度关系去除边界、螺钉孔及加筋等处的结构反射,更有利于发现结构的损伤。

4 基于多主体协作的结构健康监测系统的管理方法

智能协作技术近年来被认为是实现分布式系统的一项关键技术。该技术的重要性不仅在于该技术可使分布式系统的所有资源得以高效、充分地加以应用,而且在于该技术提供了一个管理和组织平台以构建大型、复杂、鲁棒的分布式信息处理系统。在智能协作系统中,不同的信息子系统或信息源被转换成不同的智能主体(Agent),虽然每个智能主体所获得的信息是不完整的、不精确的或信息处理能力有限。但每个主体由于具有关于系统整体组织结构的知识或关于其他主体的资源、技能、组织职能、目标等知识。因而,智能主体具有自主性和社会性,能够互相作用,高效、透明地使用系统所有资源,相互协同并解决由单一主体无法解决的困难问题。

NASA的科技信息计划提出利用主体理论研究可无年限使用的航空航天飞行器概念^[48]。该研究作为飞行器综合状态管理系统研究的一部分,目的是建立可以自诊断和自修复的飞行器。在他们的研究中,提出了将航空航天飞行器结构设计成由



集成压电传感器阵列多通道扫查系统

单元“tiles”组成的多单元结构。每个结构单元除了具有原来结构的承载和保护的功能外,还具有传感器、逻辑处理单元和通信能力,也同时是一个主体单元。他们希望通过多主体间的协作协调达到整个飞行器结构自诊断和自修复的目的。

南京航空航天大学在提出将智能协作技术应用于结构健康监测系统的管理^[17-18]。南京航空航天大学建立的基于多主体协作管理的结构健康监测验证系统^[9]解决了大型铝板结构上3种典型对象的监测问题:螺钉松动监测、冲击载荷定位、静态载荷位置监测。整个监测系统集成了压电传感器、电阻应变片、光纤Bragg光栅3种常见传感器,集成了电阻应变仪、光纤光栅解调仪、声发射系统,实验室自主研发的多通道压电扫查系统、无线传感器等多种测试设备。通过不同主体间、不同子系统间的协作,整个系统能够融合上述3种不同种类的传感器信息,能够自主地选择传感对象,自组传感网络,自动丢弃无用传感数据,识别上述3种典型的结构损伤状态,并在静态载荷监测中通过重组传感网络有效解决了集中载荷在相邻2个子区域的交界位置监测问题。

5 结构健康监测系统集成实现

目前,结构健康监测系统的软硬件大多是采用分立设备实现,要实现实际应用,必须研发结构健康监测系统的专用设备,以减轻设备重量、

减小体积同时便于使用。目前,国内外这方面的专用设备研究不多。美国Acellent公司研发了一种集成压电主动健康监测系统,该系统性能较高,可产生最高300MHz的主动激励信号,和单通道400MHz的采样频率^[49]。该系统的缺点是采样通道最多只有2通道,不利于对损伤的直接判别(通常需要采集3路以上的监测信号)。

国内南京航空航天大学也研发了一套压电多通道集成健康监测系统,目前有基于PCI总线和PXI总线的2种系统^[50]。该套系统可实现四通道信号的同时测量,能实现12位20MHz的高精度高速数据采集,可编程产生任意激励波形,输出频率可达5MHz,输出电压可达±70V,可扫查576个压电激励-传感通道。

上述2套设备应该说目前比较适合进行实验室或地面的试验研究,还不符合机载条件的应用要求,这方面需要进一步加强研究。

结束语

结构健康监测目前是国内外研究的热点,飞行器结构是结构健康监测技术的一个重要应用对象。飞行器结构健康监测技术从实验室研究走向实际工程应用需要进行大量试验验证研究,尤其是结合我国实际军民机型号的验证研究。我国大型飞机的研制为结构健康监测的应用提供了进一步的需求和新的发展契机。在大型飞机的研制中应用结构健康监测技术,有助提高我国自主研发飞机的先进性。结构健康监测技术的发展和应用于研发我国具有自主知识产权的高性能军民机具有重要意义。

本文有参考文献50篇,因篇幅所限未能一一列出,读者如有需要请向本刊编辑部索取。

(责编 依然)