



飞机结构健康监测中的信息获取技术*

Access to Information Technology of Aircraft Structure Health Monitoring

刘晓明¹ 王国才² 熊峻江¹

1 北京航空航天大学交通科学与工程学院 2 海军驻景德镇地区航空军事代表室

摘要: 简要概述了飞机结构健康监测系统的概念和作用, 重点阐述和讨论了结构健康监测系统的技术原理和方法, 包括 λ 波、智能夹层、光纤Bragg光栅传感器、电位、声发射、天线传感器、机电阻抗、应变和应力等, 最后展望了健康监控系统关键技术的发展。

关键词: 结构健康监测; 智能夹层; 光纤Bragg光栅; λ 波; 声发射; 电位法; 机电阻抗

Keywords: structural health monitoring; smart layers; fiber bragg grating; λ wave; acoustic emission; electric potential; electromechanical impedance

1 结构健康监测技术

随着飞行器结构与系统性能的不断提高, 复杂性也不断增加, 其可靠性、故障诊断与预测以及维修保障性越来越受到重视, 由此催生了预测与健康管理的(PHM, Prognostics and Health Management)的概念。健康监测和故障预测是指利用传感器采集系统的数据信息, 借助各种数据处理技术, 诊断系统自身的健康状态, 并在系统故障发生前对故障进行预测。PHM系统一般应具备故障检测、故障隔离、增强诊断、性能检测、故障预测、健康管理、部件寿命追踪等能力, 通过联合分布式信息系统与自主保障系统交联。结构健康监测技术的研究涉及材料、测控、力学、机械、信息通信、电子设备等多个学科领域, 主要应用于安全性要求高、服役时间长、造价以及维护费用高的装备, 现已成为新一代军民用飞机实现自主保障和降低寿命周期费用的核心

技术。目前在国外, 尤其是美国, 各种PHM系统和类PHM(如SHM)系统已经逐步得到应用。

飞机结构健康监测主要关注金属结构中的裂纹缺陷、腐蚀损伤, 以及复合材料结构的基体开裂、纤维断裂、分层、脱胶等典型损伤, 在这些损伤变得危险之前, 在线或实时地将其检测出来并进行预报, 以便采取相应的修理或更换措施, 提高安全性。飞机结构健康监测系统的传感器通常以网络阵列的形式粘贴或埋入结构材料中, 用于监测飞机结构的状态参数及环境参数, 状态参数一般包括应力、应变、载荷、位移、挠度、裂纹长度、分层尺寸、腐蚀面积或深度等, 环境参数则包括温度、湿度、压力、飞行速度、气体成分等。从飞机各系统采集到的故障信息不仅能向驾驶员提供报警, 也可实时上传到地面工作站, 使地面维修人员实时掌握飞机的健康状态, 并提前做好即将到站

飞机的维修准备工作, 大大减少航班延误和取消, 可以减少60%的维修试飞和20%的计划外修理, 从而节省费用, 提升飞机的适航性。

2 信息获取技术

结构健康监测技术包括以下几个主要方面: 信息获取与传输、故障识别、状态预测。信息获取技术是对大型民机进行故障诊断与健康监控的基础, 飞机如果在飞行过程中发生故障, 反映故障的状态信息就会发生变化, 只要及时捕捉这些故障信息, 就可以对大型民机的工作状态进行有效识别和监控。信息获取分为直接获取和间接获取, 直接获取是通过在各监测点布置传感器来获取被测对象的状态信息, 如利用振动传感器可获取飞机整机振动和发动机振动的状态信息; 间接获取是通过测量与被测量相关的某些量, 获得被测对象的状态信息, 如发动机的推力、功率等。多传感器信息融合和多源信息融合, 为准确获取故障信息提供了一种有效方法。

目前, 信息获取技术发展有 λ 波

* 基金项目: 国家自然科学基金(E050603)和航空科学基金(20095251024)资助。

波、智能夹层、光纤Bragg光栅传感器、电位法、声发射法、天线传感器、机电阻抗、应变和应力等方法。

2.1 智能夹层

1998年,美国斯坦福大学研制的智能夹层将传感器模块化到铺层中,根据监测的结构和部位的不同将其埋入在材料中,与结构集成在一起,如图1所示。目前已有压电智能夹层和光纤智能夹层两种智能夹层应用于航空航天器的主要结构。智能夹层的传感层的线路布局应该尽量简洁,一方面减少对结构的影响,另一方面减少不同传输通道的串扰,还要考虑一定的功率容量,在线路布局方面,借鉴了电路设计的电磁兼容措施,可减少驱动回路对传感回路的影响。

智能夹层的优点包括:传感器预制在传感层内,通过标准的接口输出,便于连接和输出;根据不同的监

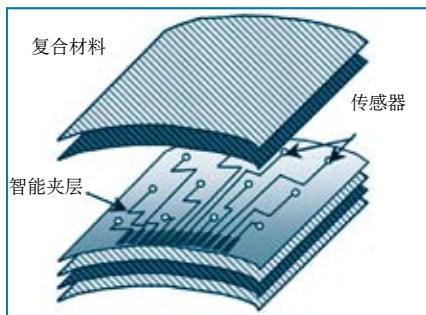


图1 智能夹层的埋入

测对象,夹层可以进行平面和三维的立体设计,可设计性强、易成型;传感层可用于金属与复合材料结构,应用范围广;既可埋入也可粘贴在结构表面,使用方便。但其缺点是:工艺比较复杂,一旦损坏,检修、更换比较困难。

2.2 光纤Bragg光栅传感器

如图2所示,温度的变化、应变都会引起光纤Bragg光栅的周期和折射率的变化,从而使光纤Bragg光栅的反射谱和透射谱发生变化,通过检测反射谱和透射谱的变化,就可以获得相应的温度和应变信息。光纤技术可以利用结构损伤状态和损伤征兆之间的关系,监测重要构件的应变、振动模式以及声发射等信息的变化,通过信息处理、计算分析和损伤模式识别等途径判断损伤的性质、位置和程度。光纤Bragg光栅传感器应用于飞机结构健康监控的优势包括:质量轻、体积小;灵敏度高;耐腐蚀,适用于结构的长期监测;传输频率带宽;抗电磁干扰,不会与电磁场产生作用;分布式或者准分布式测量,通过一根光纤即可完成机构上无限多自由度分布参数的测量,节约成本和重量。

光纤Bragg光栅传感器首要解决的问题是如何测量波长的变化,即

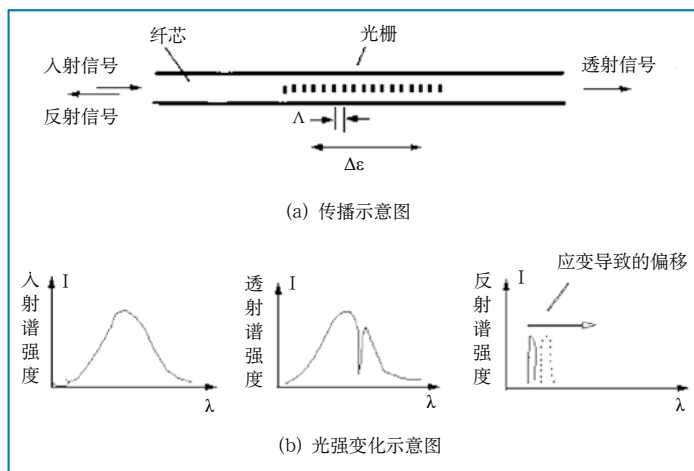


图2 光纤Bragg光栅传感器原理图

Bragg光栅解调的问题。解调的精度也就是传感器的精度。常用的解调方法包括光谱仪检测法、匹配光栅滤波法、非平衡马赫-曾德干涉仪法、边缘滤波器法、可调谐光纤法布里-珀罗滤波器法等。

为使光纤Bragg光栅传感器得到广泛应用,还有几个必须解决的问题,包括温度与应变交叉敏感问题、安装布设问题、稳定性和耐久性问题、信号调解问题、传感器复用和网络化问题、埋入结构之后对结构原性能的影响问题等。

2.3 碳纳米管

碳纳米管是近几年发展起来的新材料,具有很多优良特性,Bily等人研究了碳纳米管用于复合材料界面裂纹扩展的监测,不仅可以监测界面的裂纹长度,还可以提高复合材料承受载荷的能力。这是因为碳纳米管具有良好的导电性,将其埋入复合材料后,通过接口测量埋有碳纳米管界面的电阻,实验结果显示裂纹的扩展长度与界面之间的电阻有很好的线性关系。碳纳米管不仅可以用于监测裂纹的扩展程度,最为重要的是它还可以用来实现结构表面裂纹的自修复。一旦确定了裂纹区域,通过碳纳米管传递一种更强的脉冲电流,由电流加热的愈合剂混入环氧基体,然后流入裂纹以阻止裂纹扩展。目前,碳纳米管的生产工艺还不成熟,用碳纳米管来检测界面的裂纹还处于实验验证阶段。图3所示为碳纳米管用于监测复合材料界面裂纹的实验。

2.4 电位法

电位法又称电位差法或电导法。当电流从构件的被检测部位通过时,产生一定的电流和电位场。当构件上出现裂纹时,电流和电位场也随之发

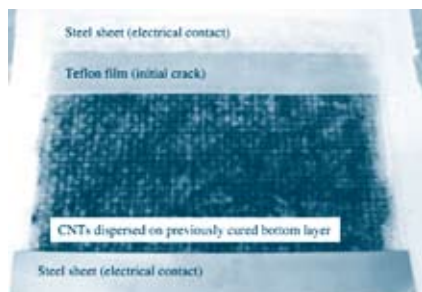


图3 碳纳米管用于监测裂纹扩展的实验

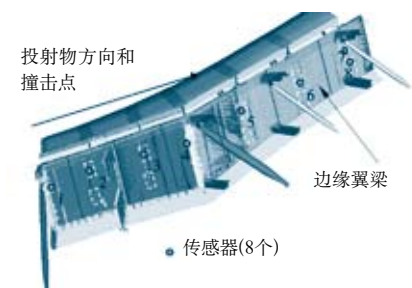


图5 声发射定位损伤实验

生变化，并且通过电位 U 的改变体现出来，如图4所示。裂纹的位置、形状和尺寸不同，对被检测部位电流和电位场的影响也不同，相应的电位 U 的变化也不同。因此电位差可以当作表征裂纹的位置与尺寸参数的函数，通过测量和分析电位差信号，即掌握构件表面疲劳裂纹的产生和扩展情况，与微机电系统(MEMS)技术相结合就能够实现实时的测量。

电位法用于监测结构健康状态的优点是简单易用、线性强、灵敏度高、可靠性高、抗干扰能力强，缺点在于对微裂纹的监测能力较弱，可以通过信号放大等措施来改善。

2.5 声发射法

声发射是指材料或结构受外力或内力作用产生塑性变形或断裂，以弹性波的形式迅速释放出应变能的现象，通过专用仪器采集和分析这种弹性波(声发射)，即可以做出对材料或结构的损伤状态的评价，这就是声发射技术。声发射信号来自被测试件的缺

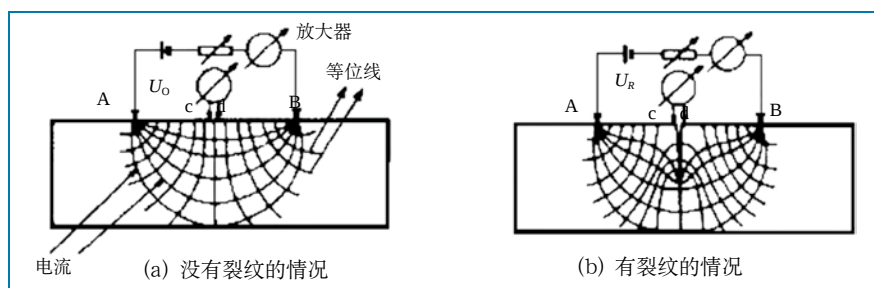


图4 电位法的监测原理图

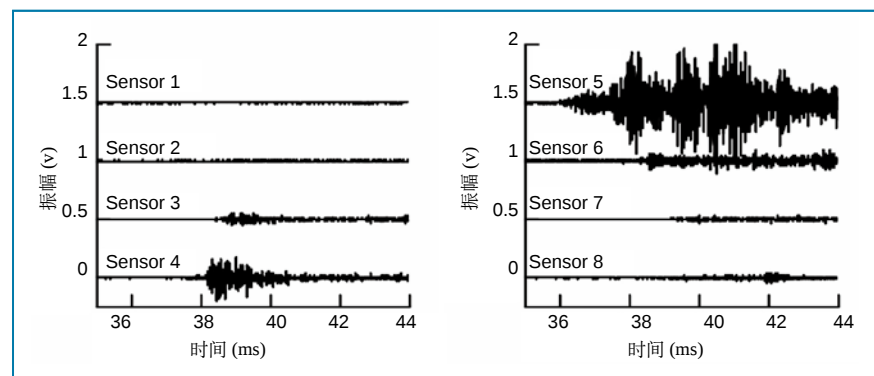


图6 声发射定位损伤实验结果

陷本身，因此它携带着材料内部的缺陷的发展，一般来说，当材料缺陷还处于微观状态在宏观上尚未成形时，声发射现象就已经比较明显。如图5所示，8个声发射传感器被安装在试件主要边缘翼梁的表面，投射物撞击在边缘翼梁上。该撞击产生声信号，离撞击点最近的传感器(即传感器5)接收到了最大幅度并且是最早到达的信号，如图6所示。其他传感器离撞击点越远，接收到的信号越弱，到达时间越迟。除泡沫塑料外，以冰块、金属等其他材料撞击试件，都得到了相似的结果，实验结果表明，声发射技术可以用于飞行器在线冲击和疲劳裂纹损伤的监测。

声发射法常用声发射试件、振铃计数以及事件总数来表示材料的损伤发展情况，此外，还可通过测量振幅、计数、持续时间、增长时间、能量等来判断结构中裂纹的形式、大小

以及程度。另外，声发射法对结构中损伤的定位也很有效。声发射法的缺点在于，由于飞行器的飞行环境很复杂，结构受载复杂，因此干扰信号和无用信号很明显，对损伤判断的精确性造成一定影响。

2.6 lamb波法

在片状结构中沿平行于板表面方向传播的波被定义为lamb波或称为引导波。lamb波可以传播很远的距离，在监测大面积结构如机翼和机身方面有较大潜力。通过测试，lamb波可用于监测各种损伤，如侵蚀、分层、裂纹(结构表面或结构内部)等，通过增加损伤监测信号的频率就可以获得对小损伤的探测能力。与其他诊断方式如穿透法、涡流、X射线等方法不同的是，lamb波信号的产生和收集可以较为容易地通过集成在结构上的波发生器和传感器来完成。目前，这种方法已经通过压电陶瓷元件实现，

如图7所示, 1~8分别表示8个压电元件, 任选其中一个作为 λ 波的发生器, 另外的7个作为传感器, 使这8个压电陶瓷元件轮流作为 λ 波的发生器和传感器。

在试验数据处理时, Zhao Xiaoliang等人采用一种“RAPID”计算方法, 通过概率论的方法来实现损伤的定位和辨识, 图8是在MTLAB中建立的损伤的概率分布图, 试验证实了RAPID方法的有效性和准确性。

2.7 基于天线传感器的裂纹监测系统

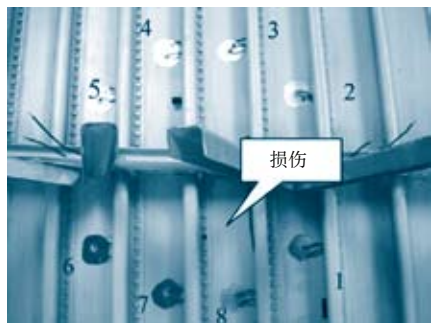


图7 基于 λ 波的损伤监测实验

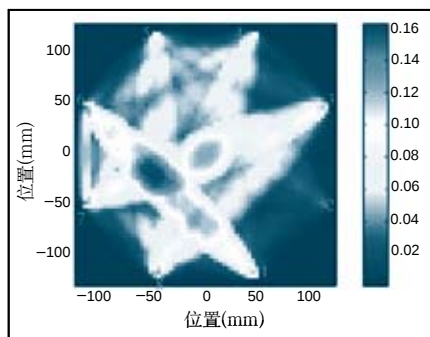


图8 基于 λ 波的实验结果

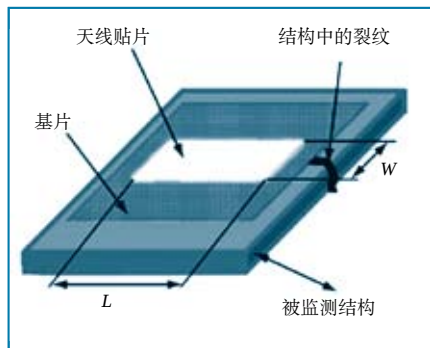


图9 天线传感器监测裂纹的原理

基于天线传感器的构造简单, 由一个天线贴片粘贴在一个柔软的可以自由弯曲的不导电基片上, 而基片的另一面则粘贴在被监测的结构上, 如图9所示, 形成了一个具有特定发射频率的电磁共振腔, 其中共振频率和反射损失是两个重要的监测指标, 通过对这两个参数的分析就可以得到裂纹扩展的信息。如果天线贴片是长方形的, 那么电磁发射的方向为沿着宽度和长度两种模式, 相应的共振频率也有两种模式。共振的频率取决于电磁传播的路径长度, 路径越长共振频率越小, 如长度方向的共振频率就比宽度方向的共振频率小。当出现裂缝时, 电磁的传播受到裂纹的阻碍, 使共振频率变小, 从而监测出裂纹以及裂纹的长度。

基于天线传感器的优点是无需电源, 可以通过无线方式对结构进行监测, 质量轻、灵敏度高、经济可靠, 监测精度较高。

2.8 基于结构振动的结构健康监测系统

基于结构振动分析的结构健康监测方法是结构健康监测中的经典方法, 其基本原理是结构中的损伤或者状态的变化会导致结构动力学参数发生变化, 因此将记录的结构动力学参数与基准参数相比较, 通过分析、处理, 最终判断结构的真实情况。目前用到的结构动力学参数有固有频率、振型、模态曲率、频响函数、应变模态、传递函数、功率谱、能量传递比(ETR)、模态保证准则(MAC、COMAC)、模态应变能、动力柔度矩阵等。

固有频率是结构最基本和最易获得的动态参数, 精度较高, 通过监测固有频率的变化来识别结构的损伤情况最为简单实用, 但是该方法仅能发

现损伤, 却无法确定损伤的位置和程度。Allemang和Brown提出的以MAC为指标的方法能较好地表征结构损伤前后两组实测数据间的差异, 但无法准确定位损伤位置。Lieven和Ewins在MAC指标的基础上发展了COMAC指标。随后又出现了模态应变能、动力柔度矩阵和基于振型或频响函数曲率的识别方法。

基于结构振动的结构健康监测方法在建筑和桥梁结构上的应用较多, 这种监控方法的缺点是: 模态参数的微小改变与裂纹等小缺陷的监测准确性之间的关系还存在争议, 因为这在很大程度上依赖于激励类型、测量位置、测量数量和边界条件。该方法不适合监测局部损伤, 对结构的整体动态特性改变不明显。另外, 早期损伤对系统模态参数的变化影响不大, 加之结构复杂、测量误差、材料性能等因素的影响, 该方法无法探测到早期损伤。

2.9 基于机电阻抗法的结构健康监测系统

利用压电材料的压电效应可制成传感元件, 用来监测结构的损伤。压电陶瓷的耦合电阻抗不仅与压电陶瓷的几何尺寸、压电常数、弹性模量、机械阻抗、介电常数、激励信号角频率有关, 还与结构的机械阻抗有关。在其他参数不变的情况下, 压电陶瓷电阻抗的变化可以直接反映结构的机械阻抗变化。因此, 当结构有微小损伤时, 其机械动态阻抗的变化就可以由压电传感元件直接感知。

机电阻抗法采用的工作频率即压电片的驱动电场频率较高, 一般为30~400kHz。因此, 其敏感范围限于压电片附近区域, 远场作用如载荷、刚度和边界条件的改变将被隔



离,使之可以准确地识别局部破坏和位置,不依赖模型分析,检测时不需要考虑结构的形状和复杂程度。这些特点使机电阻抗法十分适用于复杂结构的健康状况监测。

机电阻抗技术的突出优点是对结构微小的缺陷和表面缺陷比较敏感。但是高频阻抗技术也有不足之处,对损伤指数的确定还不是令人很满意,对其他因素如温度变化也比较敏感。

3 健康监测系统的展望

结构健康监控系统是一个多学科综合交叉的前沿研究领域,其将在新型飞行器上得到广泛应用,并对飞行器的设计、制造、维护等方面产生广泛深远的影响。强调综合评价,引入知识工程,将有限元分析等数值计算方法与结构检测方面的专家经验结合起来,将使结构健康监控朝着更加智能化和实用化的方向发展。针对实际工程项目的背景需求,重点突破关键技术问题,可以推进该项技术的发展和运用,将对多个行业产生深远的影响。但目前技术还处于实验验证阶段。

健康监控技术正在成为新一代航空产品设计和运用中的一个有机组成部分,是新世纪一项非常有前途的军民两用技术,这一技术的实现将使原来的事后维修或定期维修被基于状态的维修取代。随着航空航天领域越来越广泛地使用复合材料,结构健康监控系统为针对复合材料的多种损伤形式的检测提供了便利,相信该技术将为航空航天事业的发展带来不可估量的作用。

AST

参考文献

- [1] 张宝珍.预测与健康治理技术的发展及运用[J].测控技术,2008(2):5-7.
- [2] Kiriker G R,Shinde V,Schulz

M J,Ghoshal A,Sundaresan M,Allemang R. Damage localization in composite and metallic structures using a structural neural system and simulated acoustic emissions[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2007,21:280-297.

[3] M Lin, Qing Xinlin, Kumar A, Beard S J. SMART layer and SMART suitcase for structural health monitoring application [J]. Smart Structures and Materials,Proc. SPIE 4332,2001:98-106.

[4] 尚柏林,宋笔锋,杨建军.飞机结构健康监测传感器新技术[J].无损检测,2008,30(5):289-291.

[5] 袁慎芳.结构健康监测[M].北京:国防工业出版社,2007.

[6] Bily M A,Kwon Y W,Pollak R D. Study of Composite Interface Fracture and Crack Growth Monitoring Using Carbon Nanotubes[J]. Applied Composite Materials,2010,17(4):347-362.

[7] Zhang S Z,Yan Y J,Wu Z Y. Electric potential detection for structural surface crack using coating sensors [J]. Sensors and Actuators,2007,137(2):223-229.

[8] Prosser W H, Allison S G. Structural health management for future aerospace vehicles[C]// NASA. 2nd Australasian Workshop on Structural Health Monitoring. 2004.

[9] 陶宝祺、熊克、袁慎芳,等.智能材料结构[M].北京:国防工业出版社,1997.

[10] Zhao X L,Gao H D,Zhang G F,Ayhan B,Yan F,Kwan C,Rose J L. Active health monitoring of an aircraft wing with embedded piezoelectric sensor/actuator network: I. Defect detection localization and growth monitoring[J].

Smart Material & Structures,2007,16:1208-1217.

[11] Mohammad I,Huang H Y. An Antenna Sensor for Crack Detection and Monitoring[J]. Advances in Structural Engineering,2011,14(1):47-53.

[12] Allemang R J,Brown D L. A Correlation Coefficient for Modal Vector Analysis[C]//Proceedings of the 1st IMAC. USA,1982:110-116.

[13] Lieven N A J,Ewins D J. Spatial Correlation of Mode Shapes[C]//The Coordinate Modal Assurance Criterion(COMAC). Florida: Proc. of IMAC VI,1988:690-695.

[14] 徐茂华.结构损伤检测PZT阻抗法的理论与试验研究[D].湖北:华中科技大学,2005.

[15] Gopal V, Annamdas M, Soh C K. Uniplexing and Multiplexing of PZT Transducers for Structural Health Monitoring [J]. Intelligent Material Systems and Structures,2007,19(4):457-467.

[16] Park G, Sohn H, Farrar R C, Inman D J. Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward [J]. The Shock and Vibration Digest,2003,35(6):451-463.

作者简介

熊峻江,教授,博士生导师,主要从事疲劳断裂可靠性工程学、结构全寿命可靠性设计与评定、缺损结构复合材料修补力学,流-固-磁耦合数值模拟方面的教学与科研工作。

刘晓明,在读硕士,主要从事结构健康监控系统、结构的疲劳断裂可靠性,复合材料相关科研工作。