

飞机结构健康监测传感器新技术

尚柏林, 宋笔锋, 杨建军

(西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

摘 要:飞机结构健康监测是在传统的结构无损检测基础上发展起来的对结构损伤的一种实时、在线监测方式。采用结构健康监测系统可以提高飞机的可靠性、安全性和延长运行时间, 同时降低结构使用和维护费用。概述了飞机结构健康监测技术研究现状, 介绍了几种新型的结构健康监测传感器技术的原理及应用, 展望了结构健康监测传感器技术的发展前景。

关键词:飞机; 结构健康监测; 传感器

中图分类号: TG115. 28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2008)05-0289-03

New Sensor Technologies in Aircraft Structural Health Monitoring

SHANG Bo-Lin, SONG Bi-Feng, YANG Jian-Jun

(College of Aeronautics, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Aircraft structural health monitoring is a new in-situ, on line structure detection method which was developed on the basis of the traditional NDT method. It can increase the reliability, safety and run-time of aircrafts while reduce the structure's operating and maintenance costs. This paper described this new technology and the principles and application of some new sensor technologies of structural health monitoring. Finally the paper gave a perspective view on further research in this field.

Keywords: Aircraft; Structural health monitoring; Sensors

结构完整性对飞行安全极其重要。对于飞机结构系统的检测, 传统上多采用无损探伤(NDT)的方法, 这种周期性的检测方式在增加了费用的同时也减少了飞机可运行的时间。此外, 为了检测需要而拆装结构组件时, 甚至会引起结构或辅助系统的损伤或退化^[1]。

如果要求增加飞机结构的安全性和可用性, 同时降低其运行成本, 相对于传统的定期检测方式, 可采用在线的结构健康监测系统, 通过传感器感知细微的异常信号, 推断系统的整体健康状况。

1 飞机结构健康监测研究现状

飞机结构健康监测系统将先进的传感/驱动元

件集成在飞机结构中, 利用构成的网络对结构的损伤、疲劳、冲击、缺陷和腐蚀等情况进行实时检测^[2], 其支撑技术可以追溯到智能材料与智能结构领域。该系统从发展历程上看, 可以分为整机疲劳寿命监测和重要结构损伤监测两类^[3]。

1.1 整机疲劳寿命监测

飞行载荷是描述飞机实际使用状况的最基本参数, 使用载荷监控系统(OLM, Operational Loads Monitoring)和分析程序, 可以估计结构的疲劳累积损伤, 以便评估飞机结构的健康状态。载荷监控可以采用两种方式, 一种是基于飞行参数估计载荷, 另一种是在关键部位测量结构应变, 再通过应变估算全机载荷。将载荷监控和疲劳寿命分析程序相结合, 就可以实现疲劳寿命监控^[4]。OLM的优点在于能够准确掌握每架飞机的实际使用情况, 有利于控制剩余寿命, 提高飞行安全。如加拿大空军 CF-18 战斗机进行了机体结构的同步疲劳监控, 使得机群使用寿命延长了 12 年。

收稿日期: 2007-08-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10402035)

作者简介: 尚柏林(1973—), 男, 副教授, 主要研究方向为飞机结构健康监测。

1.2 重要结构损伤监测

重要结构损伤监测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、振动模态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^[5]。损伤监控可分为基于振动模态分析和基于试验信号处理两类方法^[3]。前者是寻找与结构动力特性相关的动力指纹,通过这些指纹的变化来判断结构的健康状况;后者不需要识别结构的动力参数,而是通过对比所检测结构与无损结构响应信号或信号的某种特征参数来识别损伤,通常是针对结构局部构件的检测^[3]。

2 飞机结构健康监测传感器

目前在飞机结构健康监测领域应用的传感器既有传统的疲劳寿命元件、电阻应变元件等,又有一些新型传感器,如光纤传感器、主动/被动超声波传感器、远距无线传感器以及可以从结构的外部来监测特定组件的非接触式传感器。

2.1 光纤传感器技术

光纤传感器以其对外界环境的变化敏感、抗电磁干扰能力强、耐腐蚀、能实现绝对测量、稳定性好、容易复用、能埋入工程结构等特点,在飞机结构健康监测中得到日益广泛的应用。此外,由于飞机结构健康监测涉及的被监测结构元件数量多,几何分布广,监测传感器的需求数量大,而光纤传感器具有径细质轻、并且能在一根光纤上实现传感器复用的优点,可以大大减少附加重量和布线需求,因而成为结构健康监测应用最多的一种传感器。

目前,光纤传感器的主要类型有:光纤法珀应变传感器、光纤布拉格光栅传感器^[6]。监测的参数有应变、温度、腐蚀环境(pH 值)和声发射信号等。

光纤法珀传感器以光纤中的一段谐振腔的腔长作为传感器的敏感元件,感受外界作用。谐振腔的长度以及折射率都会受到外界参量影响,导致光学法珀腔的反射输出成为腔长及折射率的双参数函数^[7]。当结构应变或环境温度变化时,通过测量反射输出,可以得到结构应变或温度。根据光纤法珀腔的结构形式,该传感器主要可以分为本征型、非本征型和线型复合腔三种,但线型复合腔的实践研究极少^[7]。虽然光纤法珀传感器在高温、强电磁干扰环境下得到大量的应用,但是因为它难以在同一根光纤上实现传感器复用,如果应用于大面积的飞机

结构健康监测,会导致光纤布设量大量增加,增加信号处理难度。

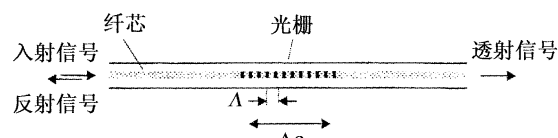
光纤布拉格光栅是在一小段范围内,沿光纤轴向使纤芯折射率发生周期性变化而形成的芯内体光栅(图 1)。用宽带光源从一端入射,由于折射率的周期变化,使纤芯中向前和向后传输的光波耦合。当满足布拉格条件时,波长为 λ_B 的光功率耦合到向后传输波中,在反射谱中形成 λ_B 的峰值,在透射谱中形成 λ_B 处的凹陷^[7]。布拉格条件为:

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

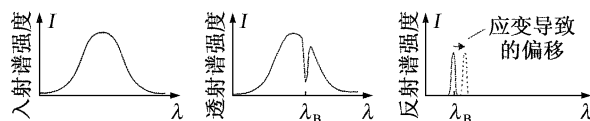
式中 λ_B ——布拉格波长;

n ——纤芯的有效折射率;

Λ ——纤芯折射率的调制周期。



(a) 传播示意图



(b) 光强变化示意图

图 1 光纤布拉格光栅传感器原理

光纤的布拉格波长会在应变 ϵ 和温度 T 的作用下发生变化,其变化量 $\Delta\lambda_B$ 由下式给出:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_\epsilon \epsilon + K_T \Delta T \quad (2)$$

式中 K_ϵ 表示应变对波长的影响,系数 K_ϵ 由应变导致的光纤光栅周期的变化和光弹效应导致的折射率变化来共同决定。 $K_T \Delta T$ 表示温度对光纤的影响,系数 K_T 由光纤的热膨胀和热光效应导致的折射率的变化来共同决定^[7]。

上述特性表明,通过监测 $\Delta\lambda_B$ 的变化可以测出外界应力和温度扰动。将具有不同栅距 Λ 的布拉格光栅间隔制作在同一根光纤上,各个布拉格光栅只反射相应特定波长的光波,彼此之间互不干涉,因此可以方便地用一个波长检测系统同时检测所有光纤布拉格光栅反射的布拉格波长的变化,从而完成多传感器复用,实现结构应力和温度的分布测量。如美国 NASA 的兰利研究中心开展的对飞机机身金属结构疲劳裂纹的监控实验,验证了先进的高密度光纤传感器阵列在飞机搭接件结构健康监测的应

用^[1]。这种新型技术基于光频域反射计(OFDR)原理,可以消除波分复用(WDM)技术所带来的带宽限制,将同样波长范围的成百上千个布拉格光栅集成在同一根光纤上,很好地满足了监测裂纹导致的结构应力场变化的需求。

2.2 主动/被动超声波传感器技术

主动超声检测技术是无损探伤(NDT)的一种重要方法。传统的单换能器可以实现对结构损伤的局部检测,但是难以实现结构健康监测要求的实时、在线和大面积监测。解决问题的途径是将小型化的超声波传感器永久性粘贴于结构表面或埋入结构,构成超声波发射/接收传感器阵列。结合信号分析算法,对沿发射器和接收器路径上的结构损伤以及超声波在结构边界反射后通过路径上的结构损伤进行监测。其典型研究成果是美国斯坦福大学的智能夹层结构 SMART(Stanford Multi-Actuator Receiver Transduction),这种智能化结构直接将分布式的超声波发射/接收传感器集成在复合材料中间,利用构成的网络对结构健康状况进行适时监测。此外,美国南卡罗莱纳州立大学的压电晶片主动传感技术(PWAS)研究也取得了突出进展^[8]。主动超声波传感技术进行结构健康监测的主要问题包括:在传感器小型化、适应性、可埋入性方面的进一步提高和验证;对结构全面健康状况进行监测的传感器布设方法和数据分析方法;当薄壁结构粘贴或埋入传感器件后,对超声波传播模式的建模研究等。

被动超声波传感技术(即声发射传感技术)是利用超声波传感器阵列来被动监测结构本身因为某种损伤机制(例如裂纹扩展)产生的声发射信号。但是声发射技术如果要完全应用于结构的实时在线监测,还必须满足各种特殊要求,成功的应用必须做到传感器体积小、重量轻、适应性强和灵敏度高,相配套的设备必须满足在体积、重量和电源方面的需求。在软件算法方面,需要能对结构损伤进行精确定位,而且能有效消除干扰信号影响的先进分析方法与算法。研究包括:声发射传感器的复用技术,以减轻相应仪器设备的重量;对光纤声发射传感器的研究;建立对声发射传播现象进行解释和预测的精确模型,为传感器评价和优化布设提供理论分析基础。

2.3 远程无线传感器技术

传统类型的传感器(如应变计、热电偶等)都需要布设大量的线缆用于供电和数据通信,这一方面会导致重量增加,另一方面,在现役的飞机(如老龄

飞机)结构上增加监测系统,将遇到不易安装和空间局限等困难。这时可用远程无线传感器,使得构成的监测系统自成体系,与原来的结构系统耦合要求降低。

NASA 的兰利研究中心采用无线传感器技术在波音 757 飞机的主起落架上完成了一种可适应性飞机健康监控体系的验证实验。该体系结构分为三层,第一层包括一个或多个分布在飞机上的远程数据采集单元(RDAU, remote data acquisition units),第二层是安装在飞机上的控制单元(CCU, command and control unit),第三层是收集所有飞机上分析结果的终端处理单元(TCU, terminal collection unit)。每层都可用一个训练过的专家系统自动分析数据,各层通讯均通过无线方式进行^[1]。

2.4 非接触传感器技术

传统的传感器都是通过粘贴或埋入的方式与被监测结构集成在一起,目前一些新型的传感器可以不直接和结构相连接,从而实现非接触测量(如激光测振仪、剪切应力仪、激光超声以及红外热谱仪等)。增强了在地面对飞机结构损伤进行全面检测的能力,可以对在线传感器探测的结构损伤进行进一步的诊断和定位。该技术进一步发展后,也可能应用到对飞机的大部件结构进行实时、在线监测。

激光测振仪是非接触传感器中的一个典型代表^[1]。由于结构的损伤会导致结构系统本身物理特性(质量、阻尼和刚度)的变化,结构模态参数(固有频率、模态振型等)是结构物理特性的函数,因而物理特性的改变会引起系统动力响应的改变。所以,通过将损伤结构实测振动信号与正常结构信号比较,采用时域、频域信号的分析或者小波分析技术等就可对损伤进行识别。图 2 是多点激光测振仪组成原理示意图,可以实现平板结构多个测试点振动信号的同步测量,能更加有效地对结构损伤进行识别和定位。

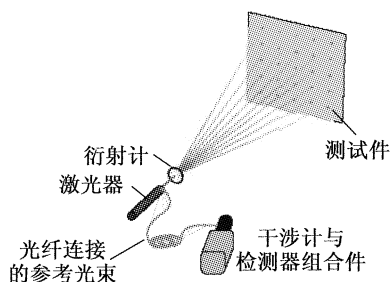


图 2 多点激光测振仪组成原理

(下转第 324 页)

上海科桥无损检测有限公司

www.KeQiaoNDT.com

英国 SONATEST(Asia)CO.Ltd
华东地区总代理,专门经销英国
声纳集团公司各成员单位的产品,
如 DAKOTA,SONATEST 的超声
探伤仪和测厚仪。BALTEAU 的
射线机,NDT SOLUTION 的快速
扫描仪以及 HAFANG 公司的
便携式超声相控阵等。

地址:201600 上海市莘松路1288弄绿洲长
岛花园21号601室
电话:(021)6769 2080/6769 2015
传真:(021)6769 2080
E-MAIL:sonatestshg@vip.sina.com
keqiaondt@sina.com.cn

NDT 北京有色金属研究总院 CENTER 无损检测中心

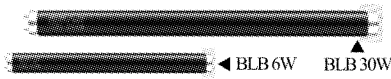
拥有强大的开发和研制涡
流、超声和漏磁等无损检测设
备的技术力量。

与俄罗斯动力诊断公司合
作推广金属磁记忆检测技术,
并设立联合研发培训中心。

地址:(100088)北京市西城区新街口外大街2号
联系人:袁琪 手机:13501390616
电话:010-62010116 传真:010-62352572
E-mail:enerdiag@163bj.com

Sankyo Denki 日本进口 磁粉探伤高强度黑光管

- ◆寿命延长 30% ◆强度提高 15%
- ◆符合 ROHS 标准 ◆适合大面积检测



本公司同时销售世界名牌黑光灯泡灯管
OSRAM, GE, PHILIPS, WINGSPAN

HPA 400S HPW 125
DUV 35W HPW-R 125

上海奇点电子科技有限公司

Tel: 021-65503721 65504069
www.wingspan.com.cn
E-mail:sales@wingspan.com.cn



诚 聘

青岛持恒工程技术有限公司主要从事锅炉、压力容器、压力管道等特
种设备、海上设施检测和钢结构的检测服务,具有对外从事公正的第三方
检测资格。

诚邀锅、容、管、特(II、III级人员);船舶及海上设施(DNV 或 EN473
资质人员);钢结构等检测领域中精英人才,共创伟业。

热忱欢迎全国有志之士加盟,待遇从优。以上招聘长期有效。

联系电话:13906398498 0532-83766886
邮箱:chihengdy@hotmail.com

联系人:董先生 于小姐
http://www.china-ndt.net

青岛持恒工程技术有限公司
QingdaoChiHeng Engineering & Technology Co.,Ltd

152-13 Ruichang Rd Qingdao, P.R China; 青岛市瑞昌路152-13号
TEL:0086-532-83766886 FAX:0086-532-83761213

无损检测资讯网 www.ndtinfo.net

欢
迎
浏
览

- ◆详尽的无损检测业界资讯
- ◆大量的无损检测技术资料
- ◆资讯更新、充实速度最快
- ◆简、繁体中文版同步发布
- ◆2000.4 开通至今 8 周年
- ◆浏览总量已超 18 万人次
- ◆日均浏览量超过 150 人次
- ◆诚恳为无损检测同仁服务
- ◆受广东 NDT 学会支持

(上接第 291 页)

3 技术展望

当前,飞机结构健康监测的研究大多处于实验
验证阶段,有待进一步深入研究的关键问题包括:如
何进一步优化传感器的性能,包括提高精度、稳定
性、频带宽、电磁相容性,降低器件的尺寸、重量以及
能耗;如何实现传感元件与被监控结构的集成;如何
实现传感器和与其配套的信号处理器件的微型化
等。为了提高结构健康监测系统的有效性(提高精
度、降低成本),在实际应用中还需要进一步考虑传
感器优化配置的问题,如如何根据被监测结构的特
点和要求,在经济性、重量和成本等约束条件下,合
理选择传感器类型,确定传感器的最优数目和最优
布局;对于寿命较长的结构而言,研究传感器的可靠
性如何对整个监测系统可靠性产生影响等。

参考文献:

- [1] Prosser W H. Development of structural health man-

agement technology for aerospace vehicles[R]. USA:
NASA Langley Research Center.

- [2] 陈勇,熊克,等.飞行器智能结构系统研究进展与
关键问题[J].航空学报,2004,25(1):21-25.
- [3] 杨智春,于哲峰.结构健康监测中的损伤监测技术研究
进展[J].力学进展,2004,34(2):215-223.
- [4] Staszewski W J, Boller C, Tomlinson G R. Health
Monitoring of Aerospace Structures: Smart Sensor
Technologies and Signal Processing[M]. England:
John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [5] 高维成,刘伟,邹经湘.基于结构振动参数变化的损
伤探测方法综述[J].振动与冲击,2004,23(4):1-7.
- [6] 杨大智.智能材料与智能系统[M].天津:天津大学出
版社,2000:390-391.
- [7] 靳伟,阮双琛.光纤传感技术新进展[M].北京:科学
出版社,2005:390-391.
- [8] Victor Giurgiutiu, Andrei Zagari, Jing Jing Bao. Pie-
zoelectric wafer embedded active sensors for aging air-
craft structural health monitoring [J]. Structural
Health Monitoring, 2002, 1(1):41-61.