

综 述

光纤传感器在飞行器结构健康监测中的应用

尚柏林, 宋笔锋, 万方义
(西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

[摘 要] 阐述了在飞行器结构健康监测领域应用的几种典型光纤传感器的工作原理。分别介绍了高密度光纤布拉格光栅应变传感器、长周期光纤光栅腐蚀传感器、光纤声发射传感器在飞行器结构疲劳裂纹、腐蚀、冲击损伤监测方面的应用。阐明了该领域进一步发展存在的关键技术问题。

[关键词] 光纤光栅; 光纤传感器; 飞行器; 结构健康监测

[中图分类号] TP277; TN253 [文献标识码] A [文章编号] 1006-1908(2008)03-0007-04

Application of Optical Fiber Sensors in Structural Health Monitoring of Flight Vehicle

SHANG Bo-lin, SONG Bi-feng, WAN Fang-yi

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

Abstract: The working principles of some typical optical fiber sensors used in flight vehicle structural health monitoring are described. The applications of high density fiber Bragg grating sensor, long period grating-based pH sensor, and optical fiber acoustic emission sensor in crack monitoring, corrosion monitoring and impact damage monitoring of flight vehicle structures are presented, respectively. Some key problems in this field for further development are explained.

Key words: fiber grating; optical fiber sensor; flight vehicle; structural health monitoring

0 引 言

结构系统的完整性对于飞行器的安全极其重要。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, 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。新兴的飞行器结构健康监测系统可以将先进的传感元件集成在飞行器的结构中, 利用构成的网络对结构的损伤、疲劳、冲击、缺陷、腐蚀等情况进行实时监测, 从而提高飞行器运行的安全性、可靠性、可用性, 降低维修费用, 显著提高使用效益^[1]。

飞行器结构健康监测系统需要对应力、应变、温度、振动、腐蚀等重要的结构健康信息进行在线监测

和分析, 不同损伤模式的监控需要选取相应的传感器件。目前在飞行器结构健康监测领域应用较广泛的传感器包括: 光纤传感器、主动和被动超声波传感器、压电材料传感器、远距离无线传感器以及非接触传感器等。在经济性、载重、成本等约束条件下, 根据飞行器结构健康监测的特点和要求(如: 大面积监控、安装结构相容性、信号多路复用性等), 合理选择传感器类型是构建飞机结构健康监测系统的关键。

光纤传感器以其对外界环境变化的敏感, 质径细、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行器结构健康监测中得到日益广泛的应用。目前, 飞行器结构健康监测中应用的光纤传感器主要有: 光纤 F-P 应变传感器、光纤布拉格光栅传感器以及长周期光纤光栅传感器。

1 用于飞行器结构健康监测的光纤传感器

1.1 光纤 F-P 应变传感器

根据光纤 F-P 腔的结构, 光纤 F-P 传感器主

[收稿日期] 2007-10-15
[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, 四川省广元市人, 空军工程大学副教授, 西北工业大学飞行器设计专业博士研究生。
[作者地址] 西安空军工程大学工程学院一系, 710038

要可以分为本征型、非本征型、线型复合腔型三种。其中线型复合腔光纤 F-P 传感器的实践研究极少^[2]。

本征型光纤 F-P 传感器原理如图 1 所示, 光纤分为 A、B、C 三段, 在 A、C 的端面镀上高反射膜, B 段的长度 L 就是光纤 F-P 腔的腔长, 它作为传感器的敏感元件感受外界作用。其长度 L 以及折射率 n 都会受到外界作用参量的影响, 导致 F-P 腔的反射输出光强 I 成为 L, n 的双参数函数。其中:

$$\frac{I}{I_0} = 2R[1 + \cos(\frac{4\pi nL}{\lambda})] \quad (1)$$

式中 I_0 为入射光强, R 为界面反射率, λ 为工作波长。

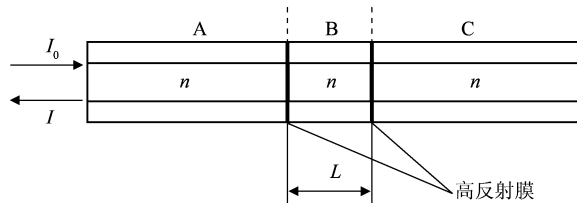


图 1 本征型光纤 F-P 传感器原理图

非本征型光纤 F-P 传感器由密封在一个长度为 D , 内径为 d 的特种管道内的两个端面镀高反射膜的单模光纤和多模光纤组成, 如图 2 所示。

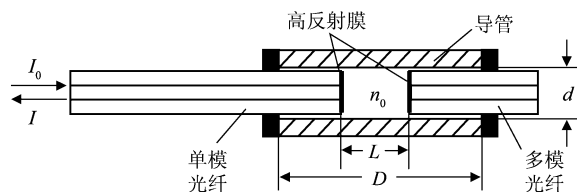


图 2 非本征型光纤 F-P 传感器原理图

当光纤 F-P 传感器受到纵向应力并产生应变 ϵ 时, L 变为 $L + \Delta L (=L + \epsilon L)$, 反射输出光强由 I 变为 $I + \Delta I$, 此时式(1)变为:

$$\frac{I + \Delta I}{I_0} = 2R\{1 + \cos[\frac{4\pi nL}{\lambda}(1 + \epsilon)]\} \quad (2)$$

式中 I 和 ΔI 为测量值; I_0, R, λ, n 为已知, 因而可以得到应变 ϵ 。此外, 通过测量应变引起的峰值波长的移动, 也可以得到应变 ϵ ^[3]。

1.2 光纤布拉格光栅应变传感器

光纤布拉格光栅(FBG)是在一小段光纤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纤芯体光栅。用宽带光源从一端入射, 由于折射率的周期变化, 使纤芯中前向和后向传输的光波耦合。当满足布拉格条件时, 波长为 λ_B 的光功率耦合到后向传输波中, 在反射谱中形成 λ_B 的峰值, 在透射谱中形成 λ_B 的凹陷。布拉格条件为:

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (3)$$

式中 λ_B 为布拉格波长, n 为纤芯的有效折射率, Λ

为纤芯折射率的调制周期。 λ_B 在应变 ϵ 和温度 T 的作用下发生变化, 其变化量 $\Delta\lambda_B$ 为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_\epsilon\epsilon + K_T\Delta T \quad (4)$$

式中等式右边第一项代表应变对波长的影响, K_ϵ 是由应变导致的 FBG 周期的变化和弹光效应导致的折射率变化决定的; 第二项代表温度对光纤的影响, K_T 是由光纤的线膨胀和热光效应导致的折射率变化决定的。

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的扰动。将不同栅距 Λ 的 FBG 间隔制作在同一根光纤上, 各个 FBG 只反射它自己特定波长的光波, 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 FBG 反射的布拉格波长的变化, 从而完成光纤光栅传感器的多传感器复用, 实现结构应力和温度的分布测量^[4]。

1.3 长周期光纤光栅传感器

通常把周期小于 $1 \mu\text{m}$ 的光纤光栅称为短周期光纤光栅, 如上述的 FBG; 而把周期为几十至几百微米的光纤光栅称为长周期光纤光栅(LPG)。LPG 是近几年才出现的一种新型光纤无源器件, 它在某些方面具有比 FBG 更好的光学特性。LPG 的特点是同向传输的纤芯基模和包层模之间的耦合, 无后向反射, 属于透射型带阻滤波器, 在传感测量系统中不需隔离器, 测量精度较高。由于 LPG 的周期相对较长, 满足相位匹配条件的是同向传输的纤芯基模和包层模, 这一特点导致了 LPG 的谐振波长和幅值对外界环境的变化非常敏感, 具有比 FBG 更好的温度、应变、弯曲、浓度和折射率灵敏度。LPG 谐振波长随温度变化而线性漂移, 是一种很好的温度传感器。利用 LPG 制成的化学传感器可以实现对液体的折射率和浓度的实时测量, 在外表面涂有特殊塑料涂覆层的 LPG 可以实现对相对湿度的实时监测。

2 应用实例

2.1 在结构载荷及裂纹监测方面的应用

结构中几乎所有的非安全因素都会导致结构承力状态的变化, 进而导致结构中应力应变分布的改变, 因此根据结构中应力应变的改变对结构进行健康监测是一种有效的方法。光纤传感器适用于分布式应力测量和载荷监测, 是飞行器结构健康监测的首选传感器。例如, 在航天领域, 美国洛克希德·马丁公司将 FBG 传感器网络用于 X-33 飞行器箱体结构件的应力和温度的准分布监测。在航空方面, 美国的诺斯罗普·格鲁门公司利用光纤传感器监测

F-18 机翼结构的损伤及应变; 欧洲的台风战斗机采用光纤传感技术进行飞行载荷的监测, 实际的飞行载荷是通过飞机主要受力部位应变测量值、飞行参数(速度、高度、舵面位置等)和载荷传递函数进行估算; 欧洲开展的 Monitor 研究项目采用 FBG 传感器构建了在线载荷监测(OLM)系统对飞行载荷进行监测。

另外, 疲劳裂纹是飞行器结构最主要的损伤模式, 结构裂纹带来的危害也是最为严重的。实际的航空航天飞行器结构, 具有大型化、复杂化、可靠性要求高、工作环境复杂等特点, 这对结构裂纹监测所需的传感器性能提出了很高要求。大面积的结构元件和新型的疲劳裂纹形式(如: 广展式疲劳裂纹损伤(WFD), 裂纹在物理空间上广泛分布, 曾导致 1988 年发生在夏威夷的波音 737 飞机机身撕裂事故)要求传感器必须是分布式的, 传感器的数量也必须满足监测精度的需要, 光纤传感器同样适用于对结构裂纹损伤的监测。美国 NASA 的兰利研究中心开展了对飞机机身金属结构疲劳裂纹的监控实验研究, 验证了先进的高密度光纤传感器阵列, 如图 3a) 所示, 在飞机搭接件结构健康监控上的应用^[5]。这种新型技术是基于光频域反射计(OFDR)的原理, 可以消除波分复用(WDM)技术带来的带宽限制, 将同样波长范围的成百上千个 FBG 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。图 3b) 是满足同样的监测需求, 采用传统的电阻应变计的布线情况, 比较结果表明, 采用高密度光纤传感器阵列大大减少了传感器的电源需求和布线的自重, 且监测精度和数据处理的便利性

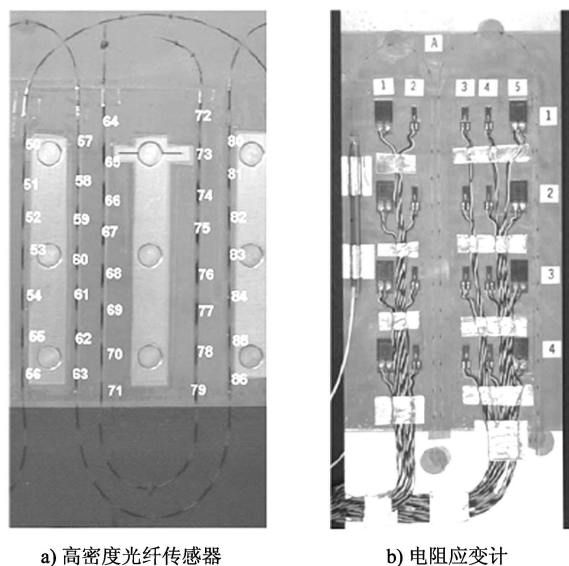


图 3 两种飞机搭接件结构健康监测技术的比较

也优于传统的电阻应变计。

2.2 在结构腐蚀监测方面的应用

飞行器结构腐蚀将导致结构强度降低, 严重的甚至会发生突发性结构破坏事故。图 4 为典型飞行器结构件的腐蚀易发部位与腐蚀类型。对结构腐蚀监测的传统方法是目视和各类无损探伤方法, 不能做到在线监测。新型的光纤传感技术为飞行器结构腐蚀在线监测提供了支持。对于腐蚀类损伤, 可以通过检测腐蚀保护层的破坏, 也可以通过检测腐蚀产物, 或者环境的腐蚀特性(如 pH 值), 判断腐蚀发生的时机与程度。

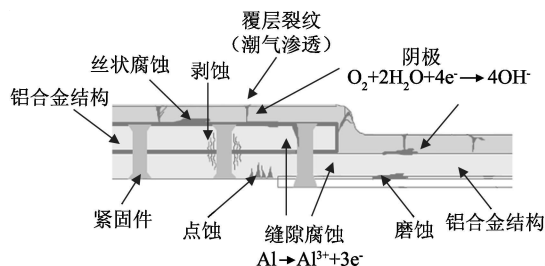


图 4 飞行器结构腐蚀的典型部位和类型

由于 LPG 的谐振波长和幅值对外界环境的变化非常敏感, 成为结构腐蚀环境监测的最常用光纤传感器。在外表面涂有特殊覆层的 LPG 化学传感器可以实现对相对湿度、pH 值的实时监测, 其原理是湿度或 pH 值的改变会引起涂覆层折射率的变化, 从而改变 LPG 的模式耦合特性。

美国在海军服役飞机上采用光纤传感器进行了结构腐蚀监控的应用研究, 对传感器性能指标提出了要求。弗吉尼亚理工学院采用 LPG 传感器, 对环境腐蚀特性 pH 值的变化进行了监测实验研究^[6]。这种传感器采用对 pH 值变化敏感的聚乙烯醇与聚丙烯酸的混合涂覆层, 环境 pH 值的变化会导致涂覆层折射率的变化, 从而使透射谱发生偏移, 图 5 为环境 pH 值的变化导致 LPG 传感器透射谱的显著变化。

2.3 在结构冲击损伤监测方面的应用

飞行过程中遭受的意外撞击将对飞行器结构造成冲击损伤, 严重的将危及飞行安全, 如美国“哥伦比亚”号航天飞机失事就是因为是在上升过程中脱落的泡沫塑料对机翼前缘的撞击。可以通过结构遭受冲击产生的声发射信号来监测冲击的部位和强度。由于对灵敏度、尺寸、质量、电源、环境适应性等方面的特殊要求, 光纤声发射传感器是一种适用于结构冲击监测的新型传感器。图 6 示出了美国 NASA 开展的对碳—碳增强复合材料机翼前缘冲击损伤监控的研究试验, 沿机翼前缘桁条内侧布置了 8 个光

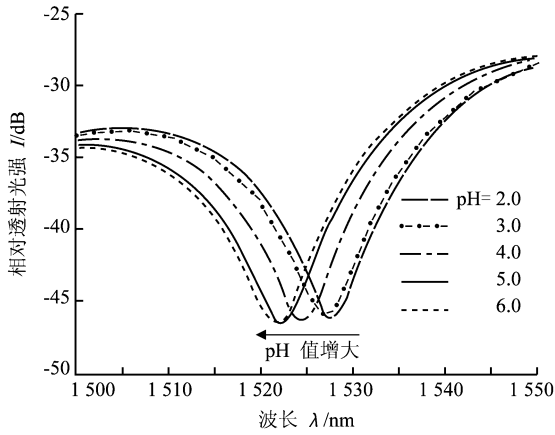


图 5 pH 值变化导致 LPG 传感器透射光谱的变化

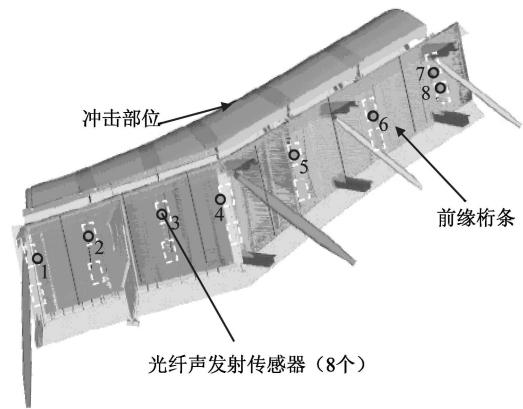


图 6 机翼前缘光纤声发射传感器的布局

纤声发射传感器,用于监测机翼前缘受冲击后产生的声发射信号。

图 7 是各个传感器监测到的信号,可以看到距离冲击位置最近的 5 号传感器具有最高信号幅值,信号到达时间最短。利用信号分析处理软件,综合各个传感器的信号可以确定冲击的位置和程度。

3 结束语

传感器是实现飞行器结构健康监测的核心功能器件,光纤传感器因其特有的性能优势在这一领域日益受到青睐。如果要实验室的研究结果应用于实际飞行器的结构健康监测,还有许多问题有待进一步研究,例如:如何优化光纤传感器的性能,包括精度、稳定性、带宽、电磁相容性,降低器件的尺寸、自重以及能耗;如何实现光纤传感同被监测结构的集成;如何确定光纤传感器的最优数目和最优布局;对于寿命较长的结构而言,光纤传感器的可靠性如何对整个监测系统可靠性产生影响等。这些关键

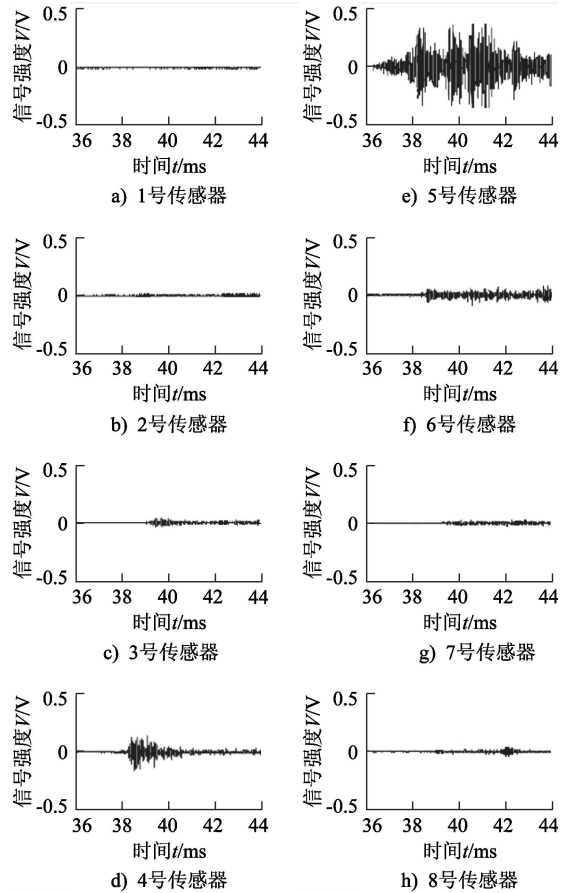


图 7 各个传感器采集的信号

问题的突破,将加速光纤传感器在飞行器结构健康监测领域的应用。

[参 考 文 献]

- [1] 陈勇,熊克. 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.
- [2] 靳伟,阮双琛. 光纤传感技术新进展 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [3] 杨大智. 智能材料与智能系统 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2000.
- [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] PROSSER W H. Development of structural health management technology for aerospace vehicles [R]. USA: NASA Langley Research Center, 2001.
- [6] ELSTER L. Long period grating-based pH sensors for corrosion monitoring [D]. USA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999.