

卫星复合材料结构在轨健康监测方法

赵发刚¹, 冯彦军¹, 范凡², 周徐斌¹, 周春华¹

1. 上海卫星工程研究所, 上海 201109

2. 上海航天技术研究院, 上海 201109

摘要 对航天器结构中的裂纹、脱层及其他损伤进行及时且准确定位是确保服役航天器可靠、长寿命运行的必要手段。复合材料结构健康监测是确定结构完整的革命性创新技术, 在航天器的结构设计、加工及维护过程中可发挥重要作用, 同时能够提高安全性、降低维护成本。本文简要介绍航天器结构健康监测的国内外研究进展, 并阐述结构健康监测技术在航天器上应用面临的问题。

关键词 航天器结构; 复合材料; 材料结构损伤; 健康监测

纤维增强复合材料因具有重量轻、比强度高、抗疲劳性能好等优点, 在航天器结构中应用广泛。尽管复合材料在减轻结构重量及提高承载能力等方面性能卓越, 但它在损伤、失效等方面的表现却是机制复杂、现象多样, 对其进行故障识别特别困难。与常规金属材料相比, 复合材料的力学性能及损伤模式要复杂得多, 在飞行器上的复合材料结构受载情况亦比较复杂, 作为主承力结构, 多数受有弯、剪、扭的复合载荷, 静载、动载、疲劳载荷俱全, 这为保证其安全性提出了新的要求。复合材料在应用中产生的损伤会直接影响其力学性能, 必须研究其损伤形式和机理。复合材料结构失效是由一系列微观损伤随时间累积的宏观破坏, 其损伤形式主要有纤维断裂、冲击损伤、层间分离(分层)及连接松动。

结构健康监测(structural health monitoring, SHM)技术通过将传感系统埋入或粘贴在被测结构中, 同时引入信号、信息处理等其他技术, 使结构材料具有感知和预报自身变形、缺陷、损伤和失效等一系列非健康状态以及感知环境参数的功能。航天器在轨健康监测技术是提高航天器可靠性、延长运行寿命的重要手段。一般地, 结构健康监测系统主要包括3部分: 1) 传感系统; 2) 数据采集与处理系统; 3) 损伤识别、模型修正、安全评定与预警系统。

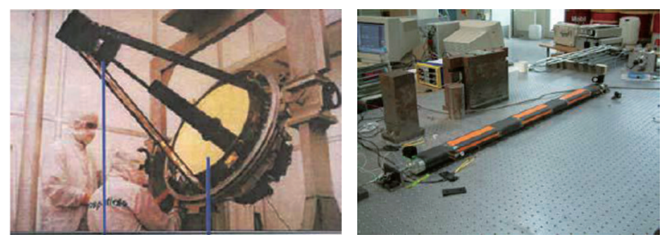
根据对国内外健康监测技术在航天复合材料结构上的应用情况的分析, 本文综述卫星复合材料结构在轨健康监测方法的研究进展。

1 国内外研究现状

20世纪80年代, 国外在结构轨健康监测方面, 已有成熟系统^[1]。欧洲太空局(European Space Agency, ESA)在Olympus卫星上利用加速度传感器进行了在轨振动环境评

测; 日本国家航天发展局(National Space Development Agency, NASADA)利用星地激光链路试验卫星ETS-VI进行了在轨力学环境测量。美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)格伦研究中心(GRC)开发研制了用于测量国际空间站扰动影响的空间加速度测量系统(SAMS-II)和高级微重力加速度测量系统(AMAMS)。ESA也开发出自己的在轨振动测量系统, 并在Olympus卫星上进行了搭载。

2010年4月, 美国在X-37B空天飞机中埋设了光纤光栅传感系统, 进行温度、压力等信息的在线实时监测。2002年, ESA将光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器埋设在太空望远镜三角支架中, 进行三角支架变形监测。在Proba II卫星中采用由光纤传感器组成的监测单元对飞行器推进系统的压力和温度进行监测(图1)。



(a) 空间望远镜结构

(b) 埋设有光纤传感器的三角架结构

图1 光纤光栅传感器应用于空间望远镜

Fig. 1 FBG sensing's application in space telescope

2002年, 法国将FBG传感器埋设在太阳帆中, 监测太阳帆的温度和微应变。此外, 德国在可重复使用运载器(RLV)

收稿日期: 2015-11-03; 修回日期: 2015-12-20

作者简介: 赵发刚, 高级工程师, 研究方向为结构机构设计、试验技术, 电子邮箱: fagang0820@126.com

引用格式: 赵发刚, 冯彦军, 范凡, 等. 卫星复合材料结构在轨健康监测方法[J]. 科技导报, 2016, 34(8): 15-17; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.08.001

的碳纤维复合材料结构中植入了FBG 光纤传感器,以实时监测其压力、温度等信号,实现结构的健康性监测和损伤快速诊断(图2)。

2001年,Wolfgang Eche 等研制了一套基于FBG 传感器的空间分布式传感网络系统,用于X-38 宇宙飞船船体结构的健康监测(图3)。

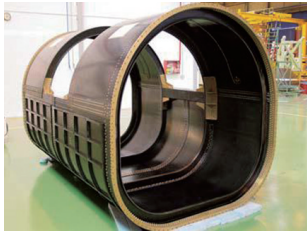
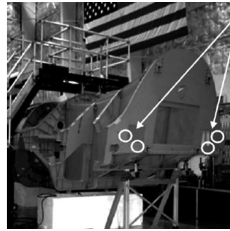


图2 应用FBG 光纤传感器监测
复合材料结构的健康状态
Fig. 2 Using FBG sensor
monitoring health of
composites structure



注:FBG 安装在图示4个圆圈内
图3 光纤传感器布置
Fig. 3 The location of
FBG sensors

洛克希德·马丁公司将FBG 传感网络应用于X-33 航天飞机结构件的应力和温度的准分布监测。美国NASA 通过在X-30 复合材料冷却板内埋入FBG 传感器测量复合材料板的健康状况和温度分布。

国内航天器用复合材料结构健康监测技术的研究目前还处于探索阶段^[2-5],主要在国内高校中开展,还没有成功的上天应用经验。

总之,国外在航天器复合材料结构在轨健康监测领域已经有广泛应用,而国内还没有航天器健康监测方面的相关报道。目前国内与国外的差距表现在国内还未意识到健康监测对于后续卫星型号的复合材料设计、制造及装配的重要性。相关单位的前期工作基本都是从各自领域出发的独立研究,而且开展相对较晚,大多还处于调研分析、理论仿真,以及初步实验尝试阶段,实际应用测试方面基本还是空白。

2 复合材料结构健康监测技术

结构健康监测系统通常由传感器网络、信号驱动与采集硬件、控制与信号处理软件3部分组成(图4)。

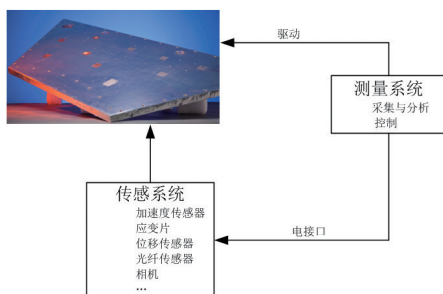


图4 结构健康监测系统组成
Fig. 4 Components of SHM system

目前,可用于结构健康监测的传感器种类很多,包括:压电传感器、光纤光栅传感器、激光器、MEMS 传感器、应变片及摄像机等。根据结构健康监测系统功能的不同,可分为主动监测与被动监测2种。被动监测是传感器对发生在结构上的冲击所产生的波形进行监测,根据测量信号重构载荷历程(冲击位置、冲击能量等)。而主动监测是驱动器向被监测结构输入高频激励信号,分布在驱动器周围的传感器接收结构响应信号,当结构发生变化时,测量信号发生改变,通过分析测量信号的改变,提取信号损伤特征,监测结构损伤(图5)。

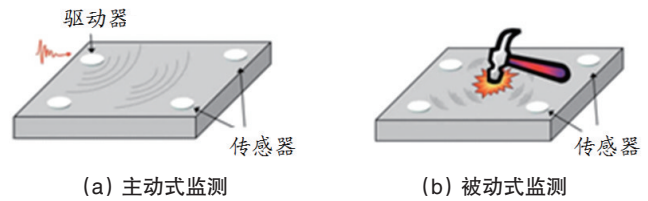


图5 主动与被动监测示意
Fig. 5 Active and passive monitoring

目前,按照健康监测原理的不同,复合材料的健康监测方法可以分为:

1) 基于结构振动分析的监测方法。结构的损伤(裂纹、脱层等)降低了结构刚度,改变了结构固有模态及相关振动特性,通过这些结构状态的变化实现监测。其优点在于成本低,特别适用于较大面积的损伤监测或旋转部件的损伤监测。其缺点是对小损伤及损伤扩展不敏感,同时对边界条件比较敏感。

2) 基于结构应力应变的监测方法。其主要思想是通过监测结构的应变分布、位移等静态参数的变化来实现损伤诊断。优点是适用于结构的大尺寸损伤监测;缺点是对结构小损伤不敏感,且仅当结构损伤足够大时才能有效监测。

3 复合材料结构健康监测应用的关键问题

国外在航天器复合材料结构在轨健康监测领域已经有广泛应用,而国内还没有航天器健康监测方面的相关报道。目前,国内与国外的差距表现在还未意识到健康监测的重要性。鉴于中国航天器结构健康监测技术研究处于起步阶段,为了提高后续航天器的长寿命、高可靠性能,对于航天器复合材料结构的健康监测问题必须高度重视,建议重点开展以下研究:

1) 建立完善有效的健康监测体系。完善在轨航天器复合材料结构力学参量测量体系的论证工作,主要加强测量指标的论证工作、各参变量间的信息融合工作,建议开展在轨健康监测系统指标体系论证研究,制定复合材料结构的健康监测标准;建议开展复合材料健康监测地面验证相关标准与规范的制定工作;建议开展健康监测系统多参量多传感器的数据融合工作。

2) 开展传感系统的优化配置与在轨标定技术研究。针

对卫星平台的典型结构(大阵面、筒等)开展在轨监测传感器布局的理论研究与算法实现研究,理论上,布置的传感器越多,测量的数据也就越能反映出整星在轨状态下的状态,但受到功率、传输能力等方面的限制,同时出于卫星任务的总体考虑而被迫对传感器的个数进行优化,即用最少的传感器布局获取典型结构的参数信息,因此有必要开展传感器系统的优化配置研究。

在轨健康监测系统在长时间在轨运行,受空间环境等影响,传感器系统的各个参数(如增益、零点)必然会发生变化,因此有必要进行在轨微振动测量系统的动态标定,建议开展主动式和被动式传感器在轨标定工作研究。主动式动态标定是采取相应措施,使器件性能维持原先水平;被动式标定是采取相应方法,对环境影响后的误差数据进行校正。

3) 加强复合材料结构损伤的产生机理研究。航天器复合材料结构的在轨应用环境复杂,针对其典型损伤形式开展机理性研究,主要针对结构松动识别、裂纹及脱层等损伤,开展损伤机理的理论研究,夯实理论基础。形成损伤模式的理论模型,并针对损伤的复合材料结构设计制定相应的规则、标准,实现对结构损伤的有效预测理论与方法。

4) 提高复合材料结构损伤特征动态提取能力。开展在轨航天器结构常见的典型损伤形式与信号特征的匹配性研究工作,针对损伤形式、损伤程度开展相应的信号特征提取工作,能够实现通过信号特征有效地表述损伤形式,并固化成果,建立具有针对性的诊断算法库和损伤诊断知识库,为后续在轨复合材料结构损伤提供数据支撑。

4 结论

航天器复合材料结构损伤监测作为一项确定和评价航

天器结构完整性的革命性创新技术,在航天器的结构设计、制造及维护过程中都可发挥重要作用。本文调研了国内外航天器复合材料结构健康监测技术的应用情况。应用案例表明结构健康监测技术在航天器结构上有着广阔应用前景,但结构健康监测技术涉及多学科领域,包括传感器、材料、力学、信号处理、系统集成等,要实现结构健康监测技术在实际航天器上的成功应用仍有很多挑战性课题需解决。

参考文献(References)

- [1] Ansari F. Fiber optic health monitoring of civil structures using long gage and acoustic sensors[J]. Smart Materials and Structures, 2005, 14(3): S1-S7.
- [2] 袁慎芳, 邱雷, 吴键, 等. 大型飞机的发展对结构健康监测的需求与挑战[J]. 航空制造技术, 2009, 22(17): 62-67.
Yuan Shenfang, Qiu Lei, Wu Jian, et al. Challenge in structural health monitoring of large aircraft development[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 22(17): 62-67.
- [3] 卿新林, 王奕首, 赵琳. 结构健康监测技术及其在航空航天领域中的应用[J]. 实验力学, 2012, 27(5): 517-526.
Qing Xinlin, Wang Yishou, Zhao Lin. Structure health monitoring technology and application in aeronautics and aerospace[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(5): 517-526.
- [4] 李鹏. 智能复合结构损伤光修复与监测的相关技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
Li Peng. Research on damage light-repair and detection in the intelligent combined structure[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [5] 苏永振. 航空材料结构低速冲击健康监测研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
Su Yongzhen. Research on low velocity impact health monitoring methods for aeronautical materials structures[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.

Research on on-orbit health monitoring method about composite structure in satellites

ZHAO Fagang¹, FENG Yanjun¹, FAN Fan², ZHOU Xubin¹, ZHOU Chunhua¹

1. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China
2. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China

Abstract Accurate and timely locating of cracks, delamination and other damages in spacecraft structures is necessary for high reliability and long lifespan of the spacecraft. Composite structural health monitoring (SHM) is a revolutionary technology to ensure the completeness of composite structures. SHM plays an important role in the processes of designing, processing and maintaining spacecraft structures. Meanwhile, SHM contributes to the improvement of safety and reduction of cost. This paper first briefly introduces domestic and overseas advances in the spacecraft SHM, and then describes the problems encountered in the application of SHM for spacecraft.

Keywords spacecraft structure; composite materials; composite structure damage; health monitoring

(责任编辑 王媛媛)