

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.08.018

## 结构健康监测及其关键技术研究

顾钧元<sup>1</sup>, 徐廷学<sup>2</sup>, 余仁波<sup>1</sup>, 陈海建<sup>1</sup>

- (1. 海军航空工程学院研究生管理大队, 山东 烟台 264001;
2. 海军航空工程学院兵器科学与技术系, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 针对目前健康监测系统存在的不足, 在详细介绍结构健康监测(structural health monitoring, SHM)技术的应用和发展概况的基础上, 建立结构健康监测系统的开放式体系结构, 研究应用结构健康监测需要解决的几项关键技术, 展望结构健康监测技术未来的应用前景, 指出目前需要解决的主要问题。

**关键词:** 结构健康监测; 传感器; 光纤光栅

**中图分类号:** TP306 **文献标志码:** A

## Study on Structural Health Monitoring and Its Key Technologies

Gu Junyuan<sup>1</sup>, Xu Tingxue<sup>2</sup>, Yu Renbo<sup>1</sup>, Chen Haijian<sup>1</sup>

- (1. Administrant Brigade of Postgraduate, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China;
2. Dept. of Ordnance Science & Technology, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** Aiming at the shortage of health monitoring systems at present, on the basis of introduced the development and applications structural health monitoring in detail, introduced the development and applications of structural health monitoring in detail, built on the open system architecture for structural health monitoring, researched on some key techniques to apply structural health monitoring, finally, set forth the prospect of structural health monitoring, pointed out that the main problem to be solved.

**Keywords:** structural health monitoring; sensor; fiber grating

### 0 引言

结构健康监控技术是采用智能材料结构的新概念, 利用集成在结构中的先进传感/驱动元件, 在线、实时地获取与结构健康状态相关的信息(如应力、应变、温度、振动模态、波传播特性等), 结合先进的信号信息处理方法和材料结构力学建模方法, 提取结构损伤特征参数, 识别结构的状态(包括损伤), 并对结构的不安全因素, 在其早期就消除安全隐患或控制安全隐患的进一步发展, 从而实现结构健康自诊断、自修复, 保证结构的安全和降低维修费用。一个结构健康监控系统应包含 2 种功能: 一是对结构状态的监测功能; 二是对结构状态的自适应控制功能。对仅有监测功能而没有主动控制功能的系统一般称为结构健康监测(structural health monitoring, SHM)系统<sup>[1]</sup>。尽管结构健康监测技术已经有了长足的发展和一定的工程经验, 但仍未成为一个完全成熟的技术领域, 因此, 笔者对其进行研究, 为相关人员提供参考。

### 1 结构健康监测的发展及研究概况

结构健康监测技术起源于 1954 年, 最初目的是

进行结构的载荷监测。随着结构设计日益向大型化、复杂化和智能化发展, 结构健康监测技术的内容逐渐丰富起来, 不再是单纯的载荷监测, 而是向结构损伤检测、损伤定位、结构剩余寿命监测、乃至结构损伤的自动修复等方面发展。

1979 年, 美国 NASA 启动了一项智能蒙皮计划, 弗吉尼亚理工学院及州立大学的 Claus 等人首次将光纤传感器埋入在碳纤维增强复合材料蒙皮中, 使材料具有感知应力和判断损伤的能力, 这是世界上第一次关于结构健康监测系统的初步尝试, 当时称这种材料系统为光纤机敏结构与蒙皮。1995 年, 白宫科技政策办公室和国家关键技术评审组将智能材料与结构技术列入“国家关键技术报告”中。1997 年, 智能结构被列为“基础研究计划”的 6 项战略研究任务之一<sup>[2]</sup>。

在航空领域, 美国军方和政府部门的多项研究计划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 等飞行器, 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, 监测具有隔断的 F-18 机翼结构的损伤及应变<sup>[3]</sup>。欧

收稿日期: 2011-03-07; 修回日期: 2011-04-06

作者简介: 顾钧元(1982—), 男, 山东人, 博士研究生, 从事装备综合保障工程研究。

洲联合研制的 Eurofight2000 新型战机也采用了先进的结构健康监测技术进行了飞行载荷的监测<sup>[4]</sup>。在民用航空领域，波音公司计划在新型飞机波音 7E7 上探索采用结构健康监测技术探测结构裂纹，此前他们已经在 Delta767 飞机上进行了湿度监测研究。空客公司也积极开展这一领域的研究，以探索结构健康监测新技术在新机型，如 A380 飞机上的应用<sup>[5]</sup>。

在航天领域，洛克希德·马丁公司将 Bragg 光栅光纤传感网络用于 X-33 箱体结构件的应力和温度准分布监测。此外，DALTA II 火箭的复合材料火箭发动机箱采用了基于光纤传感器网络的结构健康监测系统。德国宇航研究院是欧洲从事这一研究的主要机构，目前正从事植入光纤的自诊断智能结构，用于可重复使用运载器的损伤探测和评估。

在舰艇方面，美国海军的光纤传感器健康监测主要研究了一套光纤传感器系统用于监测美国海军舰艇推进系统中装配的水润滑轴承中疲劳裂纹及船体的结构应变。美国马里兰大学也参加了该项目的研究，传感器主要采用 Bragg 光纤光栅传感器，他们为此项目研制了高速解调设备，可以 3 kHz 的频率同时监测 160 个光栅传感器。

在土木工程领域，美国于 20 世纪 80 年代中后期就开始在多座桥梁上布设监测传感器，监测环境荷载、结构振动和局部应力状态，用以验证设计假定、监视施工质量和实时评定服役安全状态。1989 年，美国 Brown 大学的 Mendez 等人首先提出把光纤传感器用于混凝土结构的健康监测。此后，结构

健康监测技术在土木工程结构中的应用研究就成为一个研究热点。应用的对象包括桥梁、水坝、高层建筑、公路等。仅 1995 年，美国就投资 1.44 亿美元，在 90 座大坝配备了安全监测设备。由于结构健康监测系统的成本较高，结构健康监测技术在土木工程中主要应用于大型桥梁，但在一些经济发达地区，如美国、加拿大、日本、德国等，结构健康监测的应用已经扩展到高层建筑、大型复杂结构、重要历史建筑的监测。

在我国，结构健康监测目前主要在一些重要的大跨桥梁上使用，如香港的青马大桥、汲水门大桥和汀九大桥、上海徐浦大桥以及江阴长江大桥。此外，在大坝安全综合评判与决策的研究和应用方面，国内学者提出并开发了建立在“一机四库”（推理机、数据库、知识库、方法库和图库）基础上的大坝安全综合评价专家系统，应用模式识别和模糊评判，通过综合推理机，对四库进行综合调用，将定量分析和定性分析结合起来，实现对大坝安全状态的在线实时分析和综合评价。此系统已应用于丹江口、古田溪三级大坝和龙羊峡大坝的安全分析。

## 2 结构健康监测的系统框架设计

由美国波音公司牵头，来自工业制造、军事、商业制造、传感器技术以及科研院所等其它 10 多个组织机构制定了开放式基于状态的维修 (the open system architecture for condition based maintenance, OSA-CBM)，它涵盖了 SHM 系统的设计思想及应用方法。笔者借鉴 OSA-CBM 的体系结构，设计了 SHM 系统的通用框架体系，如图 1。

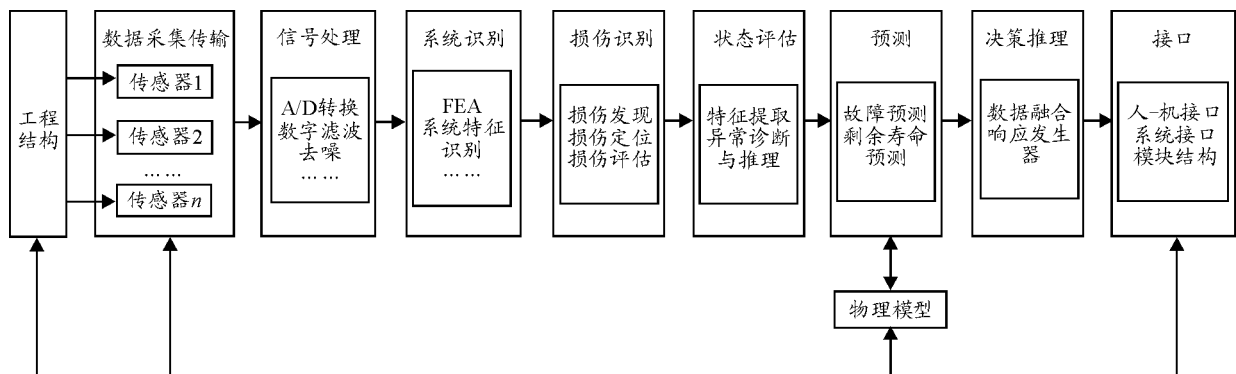


图 1 结构健康监测框架体系结构

由图 1 可看出，结构健康监测系统由数据采集与传输、信号处理、系统识别、损伤识别、状态评估、预测及接口等 8 个子系统组成：

1) 数据采集与传输子系统：利用各种无源和智

能传感器采集结构的相关参数信息，作为 SHM 系统的数据基础。该部分主要包括各类数据的采集、存储和传送的硬件系统。

2) 数据信号处理子系统：接收来自传感器的信

号和数据,并将数据处理成后继工作所需的格式,输出为经过过滤和压缩简化后的传感器数据、频谱数据以及其他特征数据。该部分主要包括各类数字信号的处理,如A/D转换及数字滤波去噪等,以便为系统识别和损伤识别准备充分的数字信息。

3) 系统识别子系统:通过计算机模拟仿真计算,结合有限元模态分析,识别出结构系统的静动力特性参数,即系统特征识别。

4) 损伤识别子系统:即通过一定的分析技术,对已获得的数据进行处理,与结构系统特征联合,应用各种有效的手段识别结构损伤,完成损伤预警、损伤定位和损伤定量分析。

5) 结构健康状态评估子系统:接收来自前面模块的数据,把损伤结果与专家经验相结合,进行评估被监测系统(也可以是分系统、部件等)的健康状态(如是否有退化现象等),分析结构的强度储备,评估结构的可靠度。

6) 预测子系统:综合利用前面各部分的数据信息,对被监测系统状态进行评估和预测未来的健康状态,包括剩余寿命预测等。

7) 决策推理子系统:决策推理子系统接受来自状态评估和预测子系统的信息,主要作用是给出所建议的活动和可选方案。

8) 接口:主要包括人-机接口和机-机接口。人-机接口包括状态监测模块的警告信息显示以及健康评估、预测等模块的数据信息的表示等;机-机接口使得上述各模块之间以及SHM系统同其他系统之间的数据信息可以进行传递。

整个结构健康监测系统就像一个医生,对结构健康状态进行诊断,首先对系统输入荷载能量,激励结构体系产生响应,并通过各种传感器对结构响应进行监测;得到测试数据后,先完成数据处理,再结合数值模拟的先验知识对结构进行诊断,分析结构可能发生的损伤;最后对结构的健康状态进行评估,确定维修保养策略。

### 3 结构健康监测的关键技术

当结构发生损伤时,结构性能将发生改变,如材料性状的变化、几何属性的变化、内部结构体系的变化等。结构健康监测系统就是要利用测试仪器瞬时地获得能表征这些改变的结构实时测试数据,来确定结构的损伤时刻和损伤位置,分析损伤程度,

从而正确评价结构的健康状态。因此一个健康监测系统的优劣主要由以下3个因素决定:

1) 传感器的灵敏性和精度,以及数据传输和采集设备的性能。高质量的仪器设备能减少测量误差,提高监测效率;

2) 测点的空间分布,即传感器的最优布置问题。测点布置应使获得的测试数据尽量包含更多的结构整体和局部的信息,且这些测点信息对于损伤应是足够敏感的,即具有较小的信息熵。实际工程中,传感器数量受经济性限制不可能太多,因此优化测点布置具有重要意义;

3) 测试数据的分析处理,现场采集的数据不仅包含着大量的结构信息,还有很多测量噪声。而尽量克服噪声的干扰,从测试数据中准确地捕捉出能反应结构损伤的特征信息是关键的一步。

其中第1点为硬件条件,第2、第3点为软件条件。从目前的发展来看,用于结构健康监测的硬件设施越来越先进,高性能的智能传感器元件和信号采集装备越来越多地在工程中得到应用。最近发展起来的智能感知材料与传感元件如光导纤维、电阻应变计、疲劳寿命计、压电材料、碳纤维、半导体材料和形状记忆合金等被应用到结构健康监测中。这些感知材料和传感元件使结构具有感知特性,能更好地实现结构的实时监测与安全预警的功能。同时,无线传感器网络与互联网先进通讯技术的发展为结构健康监测信号的传输提供了有效手段,结合高性能的计算机工作站,对现场采集的实时数据进行存储、调用、在线分析成为可能。从多次国际健康监测和损伤识别会议的成果来看,当前的传感器技术已经达到较高的水平,在结构健康监测系统中传感器信息的获取已经不是一个至关重要问题。

传感器的优化布置决定了能否获得大型结构的整体信息和局部信息,也决定了测试数据对结构损伤变化的敏感性。如何安排有限数量的传感器实现对结构状态改变信息的最优采集,是大型结构健康监测的关键技术之一。较早研究传感器的最优布置问题是在航天领域和大型机械结构的动态控制和系统识别中。最为人熟知的方法是Kammar提出的有效独立法,即EI法,它是基于每个传感器布点对所监测模态的线性无关的贡献,通过迭代使得初始测点迅速减少到可行的数目。Guyan模型缩减法也是一种常用的测点选择方法,通过刚度或质量子矩阵

构成的转换矩阵, 可以把那些对模态反应起主要作用的自由度保留下来作为测点的位置。Udwadia 基于 Fisher 信息阵提出了一种适合线性和非线性系统的传感器最优布置的快速算法。还有一些基于遗传算法和退火算法的优化测点方法等。

测试数据的分析处理首先要完成的就是结构损伤识别, 然后再结合专家系统对结构的整体健康状况作出评估, 根据当前的健康状况给出系统的可靠性预测。因此可以看出, 在结构健康监测中最关键的就是测试数据的分析处理, 一旦健康监测投入运营, 主要的工作就是如何从测试信号中提取出有关结构损伤的状态信息。

#### 4 结构健康监测的发展趋势

结构健康监测技术的发展趋势主要包括:

- 1) 高精度、宽频带、无线化、低功耗、小尺寸的智能传感元件。
- 2) 鲁棒性强、实时性高、灵敏度高的结构状态特征参数提取技术。
- 3) 新的损伤控制方法的研究。
- 4) 进一步加快针对典型工程结构中的应用研究。

随着研究的深入, 一些新的研究方向也是今后的发展趋势。

分布式结构健康监测的实现技术是需要着重强调的一个重要方向。目前针对智能材料的研究基本都在实验室进行, 多针对尺寸较小的试件, 采用的器件数量也较少, 需要决策的目标相对简单, 所需信号信息处理的运算量不大, 需要传输的信息也较少, 还不需要一些管理和协调的功能。作为一些原理性研究, 这些方法是可行的。但对于实际航空航天飞行器结构, 由于其具有大型化、可靠性要求高的特点, 加之可能工作在高速、高温等复杂环境下, 结构健康监测技术在应用时的情况就要复杂、困难得多, 特别是结构的大型化使得结构监测所需要的传感器件的数目、所需决策对象的复杂性大大增加, 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地应用。为解决上述问题, 必须对分布式结构健康

监测技术进行研究, 具体包括分布式传感网络的实现, 信号处理器件的微型化技术。这些研究在国际上都还处于初步探索阶段。

结构健康监测智能结构的规范化、模块化、便于应用的设计制造技术及智能结构自身的质量评定技术也是逐渐得到重视的一个研究方向。现阶段主要采用分立的传感元件, 以手工设置的方式制作, 将功能元件埋入或粘贴在结构表面, 导致一致性和规范性严重不足, 很大程度上影响了结构健康监测技术的实用性。

另外, 采用智能结构技术实现的结构健康监测系统设计制作完成后, 其自身的质量评定技术及在使用过程中自身的损伤和失效研究也是该技术真正实用化的基础, 这方面的研究也越来越受到重视。

#### 5 结语

作为一个新兴的领域, 结构健康监测技术将在不久的将来迎来巨大的发展机遇。目前存在的主要困难有: 1) 在大结构上安装一定数量的小尺度的传感器, 会出现损伤识别不确定问题; 2) 根据现场海量实测数据(环境、荷载效应、结构抗力)挖掘, 更新模型参数的技术; 3) 不同量测指标对结构不同损伤的灵敏度分析; 4) 时变可靠度分析方法和寿命预测方法; 5) 理论模型近似性带来的误差; 6) 实际环境中参数的稳定性和实测准确度的控制; 7) 错综复杂的环境因素对系统的影响等。下一步, 将逐步解决这些技术难题。

#### 参考文献:

- [1] 袁慎芳. 结构健康监测[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [2] Boller C. Next Generation Structural Health Monitoring and Its Integration into Aircraft Design[J]. International Journal of System Science, 2000, 31(11): 1333-1349.
- [3] Staszewski W, Boller C. Structural Health Monitoring of Aerospace Structure[M]. Wiley Inter science, John-Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [4] Austin R E. The X-33 Program: Proving Feasibility of the Next Generation Reusable Launch Vehicles[C]. The Proceedings of Structural Health Monitoring, Stanford University, Stanford, CA, 1999: 3-22.
- [5] Kabashima S, Ozaki T. Damage Detection of Satellite Structures by Optical Fiber with Small Diameter[C]. Smart Structure and Materials 2000, Proceedings of SPIE, 2000: 343-351.