



飞机结构健康监测中的信息处理技术*

Information Processing 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

编者注:在今年本刊第三期刊登的《飞机结构健康监测中的信息获取技术》中,详细介绍了结构健康系统中信息获取的各种手段和途径,本文主要介绍通过上述途径获得信息之后的处理技术,这些信息处理技术可以剔除与结构健康状态无关的干扰信号,并对能反映结构的损伤状态的信号进行压缩、提炼、转化,使之成为有用的信号以确定结构的健康状态,并对结构健康监控系统做出了展望。

关键词: 信号处理与分析技术; 时域分析法; 频域分析法; 小波分析法; Hilbert—Huang变换法

Keywords: signal processing and analysis technology; time domain analysis method; frequency domain analysis method; wavelet analysis method; Hilbert-Huang transform method

1 信号处理与分析技术

在飞机结构健康监控系统中,由于被监测的结构所处的环境较复杂,载荷的随机性以及外界环境变化(强电磁干扰、振动)等因素都会对传感器监测到的有用信号产生干扰,严重时外界的扰动信号甚至可能掩盖传感器信号,或者监测到的信号比较微弱,因此需要对传感器网络监测到的信号进行处理,过滤掉大部分无用的和干扰信号,以获得信噪比高、精确可用的能够反映结构状态的信号参数。

信号分析则是对信号进行结构损伤特征的提取,从而判断结构的健康状况,实现状态信息的分析和故障特征的提取、故障模式的识别与诊断。

传感器获得的信号和参数可能是各种各样的,特别是对一个传感网络来说,传感器的种类和数量很多,因此得到的信号种类也很多,必须对各

种信号进行综合考虑,分析处理以得到实际结构精确的损伤结果。

由传感器网络监测到的结构参数值,往往是不能直接表征结构健康状况的参数,如应力、应变、位移、温度、湿度等,这些参数必须也经过信号处理方法加以综合,提取出能够直接反映结构中损伤的参数,才能有效评判结构的状态。

目前国内外在先进信号处理技术方面的研究颇多,时域分析法、频域分析法、时频域分析法(包括小波分析、Hilbert—Huang变换)等方法都取得了很大进展。

1.1 时域分析法

故障诊断系统包含的时域处理方法分为时域统计分析法和时域波形分析法,主要是针对最大值、最小值、绝对值、均值、方差、偏斜度、峭度等数值和形状参数进行分析的方法。常用的时

域统计特征主要包括信号的均值、均方差、方差以及概率密度、概率分布等函数,常用的时域波形特征包括信号的到达时间、上升时间、持续时间、信号的峰值、信号的能量、信号的响铃个数等。时域分析法可以对信号的振级和能量的大小进行初步分析,从而对故障进行初步判别。

这种信号处理技术存在的缺陷是,只与提供的信息时间有关,不具备频域特性,即不能提供某个频率上的信息。而且此方法只能提供对信号的初步辨识,不能对损伤的状态进行精确判断。

1.2 频域分析法

频域分析法主要是通过傅里叶变换,将监测到的信号从时域变换到频域,进行频域特征提取,然后根据频率分布的特征和变化趋势来判定故障类型和故障程度。该方法是目前信号分析中较常见的一种方法,在特定条件下或对某一类故障有一定的效果,

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



但是不适用于整体性能的判断。频域分析处理方法分为古典谱估计法和现代谱估计法。古典谱法基于快速傅里叶变换(FFT),包括周期图法、相关分析、相干分析、自谱、互谱、细化谱、倒频谱、传递函数、谱趋势分析等;现代谱法包括最大熵谱估计、ARMA时序分析以及最小方差法等^[1]。在结构健康监测中,信号在频域的频率分布、主要峰值出现的频率、某些频段的能量大小都可以用作表征结构特征的参数。

这种信号处理技术的缺陷在于,首先不具备时域特性,即不具备信号在某个时刻上的频率信息。这是因为傅里叶谱反映的是信号的统计特征,没有局部化分析信号的功能。另外,该方法不适用于分析非平稳信号,因为傅里叶分析采用的是一组正弦和余弦函数去逼近信号,由于正弦和余弦函数都为无限长的周期信号,因此非平稳的信号,特别是瞬态信号是无法采用该方法来有效逼近的^[2]。

1.3 小波分析法

理论上讲,对信号来说时域分析对时间的分辨率是无穷的,但对频率的分辨率为零;而频域分析对频率的分辨率是无穷的,但对时间的分辨率为零,因此都不适用于突变、非平稳、时变信号的分析处理。在信号分析中,一般情况下人们感兴趣的往往不仅仅是信号的频率成分,还要了解某频率发生的时间,小波变换法就是近年来从傅里叶变换的基础上发展起来的一种新的数学方法,它在时域和频域内都具有良好的分辨力,可实现多分辨率分析。法国地球物理学家Morlet于1980年首先将小波变换法应用于信号处理与检测领域。小波分析的实质就是采用一簇小波函数来代替

正弦基去表示或逼近被分析的信号。一次小波分析在结构健康监测系统中可以有两部分作用,一是用于对信号进行去噪处理,二是对信号进行时频分析。此后,Morlet又与Grossmann共同研究,发展了连续小波变换的几何体系,将任意一个信号分解为对空间和时间尺度的贡献。小波变换的时频窗口具有很好的尺度自动伸缩功能,低频时具有大的尺度,高频时具有很小的尺度,从而能够从高频信号提取有用的局部特征^[3]。由于小波变换系数的平方具有能量的量纲,因此基于小波分析的故障特征提取是一种有效的方法。

小波函数的优点在于,它是采用了一簇小波函数去逼近或表示信号,因此小波函数更容易逼近非平稳信号,尤其是瞬态信号。另外小波分析结果具有时频双重信息,明显优于傅里叶分析。但是,小波分析在低频部分具有较差的时间分辨率,在高频部分具有较差的频率分辨率。另外一个不足之处是小波分析法依赖于小波函数的选取。

1.4 Hilbert-Huang分析方法

Hilbert-Huang transform (HHT)分析方法是信号处理领域里最新发展的技术。为了寻求准确良好的时频局部化性质,1996年Norden E Huang等人提出了一种新的非线性、非平稳信号的HHT时频分析方法^[4],该方法不需要基函数,也不需要各种变换,目前已经应用于各种领域,如海洋地震工程、核物理、生物医学诊断、图像处理 and 故障诊断等。HHT变换由EMD分解和HILBERT变换组成,这种分解不需要利用特定的函数形式(如傅里叶变化的三角函数、小波变化的小波基函数等),是一种可对数

据进行分解的具有自适应能力的先进的时频域信号处理方法。

与小波分析法相比,HHT分析方法有一定的优势。如小波分析结果中会混杂很多虚假的频率成分,而HHT法谱有了很大的进步,信号被准确地定位在时间-频率轴上,虚假频率成分较少。但HHT分析方法也存在其他很多问题,其中最值得关注的几个问题是,如何才能获得信号的最佳包络、何时中止筛选过程以及如何克服包络中因为信号的起始端和中止端产生的边界效应等^[2]。

除了信号处理技术外,当前的人工神经网络技术也可用于辨识结构参数,从而得到结构的损伤信息。

2 健康监测系统的展望

结构健康监测系统的最终目标是让飞行器有着与人类皮肤一样的感知能力,不管哪里有伤口,皮肤都能通过神经末梢迅速感知并将产生的神经冲动以动作电位的形式通过神经纤维传到大脑,经过大脑的处理后将指令信号反馈给肌肉和其他器官,快速确定皮肤受伤的位置并迅速地反应。在飞机健康监测系统中,各种不同种类和数量的传感器就相当于皮肤中的神经末梢,连接传感器的光纤或导线就相当于用来传输传感器信号的神经纤维,而计算机或其他的信号处理终端设备就相当于人的大脑,这就构成了结构健康系统的主要脉络,如图1所示。但目前飞机结构健康监测的研究大多处于实验验证阶段,要想进一步提高结构健康系统的效率和实用性,需要从提高健康监控系统的组成入手,主要包括以下几个方面。

1) 提高传感器精度、稳定性、频带宽、电磁相容性,降低传感器件



图1 飞机的神经网络

的尺寸、重量以及能耗。

2) 实现传感元件与被监控结构的集成;实现传感器和与其配套的信号处理器件的微型化等;提高结构健康监测系统的有效性,包括提高精度、降低成本、提高可靠性。

3) 实际应用中还需进一步考虑传感器优化配置问题,如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分布。

4) 对于寿命较长的结构,应研究传感器的可靠性如何对整个监测系统的可靠性产生影响等。

5) 根据不同的失效模式,设计针对性更强的结构健康监控系统,有利于提高经济性和精确度。

6) 结构健康监测系统的集成化、规范化、模块化、便于应用的设计制造技术、智能结构自身的质量评定技术也是应该得到重视的发展方向,现阶段主要采用分离的传感元件、驱动元件,将功能元件埋入或粘贴在结构表面,导致一致性和规范性不足。

7) 结构健康监控系统本身的可靠性,其自身损坏或失效对结构的影

响,以及如何方便、通用地更换已经损坏的健康监控系统。

飞机具有大型化、复杂化、可靠性要求高、工作环境复杂等特点,其结构健康监控系统在物理分布上遍布飞机各个区域,在功能实现上互有耦合交联,本质是分布式、强耦合的非线性系统。因此带来的问题包括:监控网络复杂程度增加,需要通信与传输的信息量和用于信息处理的运算量急剧增大,监测网络所需消耗的能量急剧增加等。这些问题的解决需要借助于分布式信息处理及信号传输等关键技术,分布式的传感元件、驱动元件、数据处理和控制功能需要构建与其相适应的分布式的体系结构等。

未来的结构健康监控系统将与“物联网”技术相结合,物联网是新一代信息技术的重要组成部分,通过射频识别(RFID)、红外感应器、全球定位系统、激光扫描器等信息传感设备,将任何物体与互联网连接,进行信息交换和通信,实现对物体的智能化识别、定位、跟踪、监控和管理。使用了物联网技术的飞机健康管理信息系统可以实现天上地面的即时联动,不论飞机飞到哪里,运行信息都

会反馈到地面。由于物联网技术实施后所传达的信息将是“黑匣子”信息的两个量级以上,传感器将被安装到飞机内部各个角落,随时监控零部件的运行情况,即时将信息传回地面数学模型,第一时间将监控结果传给地面使用部门、制造部门,在飞机没有降落之前做好准备,使问题零部件得到及时检修,从而减少了飞机起飞前的准备时间、飞机的维修费用和维修时间。

AST

参考文献

- [1] 王珍,马孝江.局域波边界谱在缸盖振动信号分析中应用研究[J].内燃机工程,2002,23(3):50-53.
- [2] 袁慎芳.结构健康监测[M].北京:国防工业出版社.2007.
- [3] McCormick A C, Nandi A K. Cyclostationarity in rotation machine vibrations[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1998, 12(2): 225-242.
- [4] Huang N E, Shen Z, Long S R, Wu A, Shih H, Zheng Q, Yen N C, Tuang C C, Liu H H. The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings of Royal Society London, A454. 1998:903-995.

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。