

# 振动测试和分析技术综述

纪国宜<sup>a</sup>, 赵淳生<sup>b</sup>

(南京航空航天大学 a. 精密驱动研究所; b. 振动工程研究所 江苏 南京 210016)

**摘要:** 振动测试和分析对结构和系统动态特性分析及其故障诊断是一种有效的手段。综述了当前振动测试和分析技术,包括振动信号数据采集技术、系统动力学特性测试方法、振动信号的分析 and 处理技术及设备故障诊断技术,简述了各种方法的优缺点及适用范围,最后对振动测试与分析技术的未来发展方向进行了展望。

**关键词:** 振动测试; 信号分析; 动态特性; 故障诊断

**中图分类号:** TH13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2010)03-0001-05

## Summary of Vibration Testing and Analysis

Ji Guo-yi<sup>a</sup>, ZHAO Chun-sheng<sup>b</sup>

(University of Aeronautics and Astronautics, a. Institute of Vibration Engineering;

b. Precision Driving Laboratory, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Vibration testing and analysis is an effective tool in analyzing structure and system dynamic characteristic and detecting the failures of structures, systems and facilities. The present paper reviews the current vibration testing and analysis techniques, including vibration signal data acquisition, the system dynamics testing, vibration signal analysis and processing and equipment fault diagnosis, outlines the advantages and disadvantages of each method and their applications. Finally, the future development in the field of vibration testing and analysis is predicted.

**Key words:** vibration testing; signal analysis; dynamic characteristic; fault diagnosis

## 0 引言

随着科学技术的发展,振动及设备动态特性引起的问题受到各行各业的高度关注。例如:导弹、飞机和火箭在飞行中,由于发动机和气流扰动及结构动态特性所造成的振动直接影响到飞行安全和控制精度;车辆在凹凸不平的路面上行驶时的振动直接关系到驾驶性能与乘坐的舒适性;机械加工设备的振动直接影响到加工的精度和有效性;大型旋转机械的振动信号直接反映了设备运转的主要信息;高层建筑、桥梁由于风载和地震所产生的振动直接关系到这些结构的安全。

要解决各种各样的振动及动态特性问题,研究系统的动力学特性,分析产生振动的原因,考核设备适应振动与环境的关系,除了理论分析外,对结构、系统和设备进行振动测试与信号分析是必不可少的重要手段。振动测试与信号分析技术是机械动力学学科的重要分支之一,是机械动力学工程应用的一个极为普遍的方面。随着设备朝着大型化、高速化的发展,振动引起的问题更为突出,需要解决的问题更为迫切,也对振动测试与振动信号分析技术的研究提出了越来越高的要求<sup>[1]</sup>,对于航空航天、动力机械、交通运输、军械兵器、能源工业、土木建筑、电子工业以

及环境保护等尤为重要。可以说,振动测试与分析技术已广泛应用在产品研究、设计、生产和运行的全过程。

## 1 振动数据采集技术

测量振动信号的物理量常有:位移、速度、加速度、应变和力。与之对应的传感器分别为:位移传感器、速度传感器、加速度传感器、动态应变仪和力传感器。

振动数据采集设备将传感器拾取的模拟信号转换为数字信号。经过多年的发展,振动数据采集设备形成了现在高中低端各种数据采集设备都有的格局。从模数转化精度来说,已经由早期的 12 bit 发展到现在的 16 bit 和 24 bit,动态范围从 70 dB 左右到 110 dB 左右。国外现在的主流数据采集设备几乎都是 24 bit AD 精度了。采样频率从几十 ks/s 到几百 ks/s,甚至高达几 MS/s。一般结构振动测量用的采样频率最高到 256 ks/s 就足够了,但有些特殊场合需要更高的采样频率,比如高采样频率在石油勘探研究等领域有着特殊的应用。Delta-Sigma 模数转换技术是近年来国外著名厂家广泛使用的一种高精度高速数据采集技术。该技术的工作原理思路是在数据采集中对应最高采样频率设计一固定截止频率的抗混滤波器,采用高采样频率加数字滤波实现高速高精度数据采集。

**作者简介:** 赵淳生(1938—),男,湖南衡山人,中科院院士,长期从事振动测试和分析、结构模态分析、激振器、设备故障诊断与状态监测和超声电机等领域的研究,获得多项国家级和部省级发明奖和科技进步奖。

纪国宜(1963—),男,安徽和县人,硕士,副研究员,长期从事振动测试与信号分析、结构模态分析技术、结构自动测频技术和设备故障诊断与状态监测等方面的研究,获得过多项部省级科技进步奖。

采集通道数从单通道到上千个通道并行采集都有。数据采集设备的总线类型有: PCI, VXI, PXI 和其他总线类型。

PCI 是由英特尔(Intel)公司 1991 年推出的用于定义局部总线的标准。此标准允许在计算机内安装多达 10 个遵从 PCI 标准的扩展卡。

VXI 总线规范是一个开放的体系结构标准,其主要目标是使 VXI 总线器件之间、VXI 总线器件与其他标准的器件(计算机)之间能够以明确的方式开放地通信;使系统体积更小;通过使用高带宽的吞吐量,为开发者提供高性能的测试设备;采用通用的接口来实现相似的仪器功能,使系统集成软件成本进一步降低。

PXI 是一种由美国 NI 公司发布的基于 PC 的测量和自动化平台。PXI 结合了 PCI 的电气总线特性与 CompactPCI 的坚固性、模块化及 Eurocard 机械封装的特性发展成适合于试验、测量与数据采集场合应用的机械、电气和软件规范。制订 PXI 规范的目的是为了将台式 PC 的性能价格比优势与 PCI 总线面向仪器领域的必要扩展完美地结合起来,形成一种主流的虚拟仪器测试平台。这使它成为测量和自动化系统的高性能、低成本运载平台。PXI 是以 PCI(peripheral component interconnect)及 CompactPCI 为基础再加上一些 PXI 特有的信号组合而成的一个架构。PXI 继承了 PCI 的电气信号,使得 PXI 拥有如 PCI bus 的极高传输数据的能力,因此能够有高达 132 Mbyte/s 到 528 Mbyte/s 的传输性能,在软件上是完全兼容的。另一方面, PXI 采用和 CompactPCI 一样的机械外型结构,因此也能同样享有高密度、坚固外壳及高性能连接器的特性。VXI 和 PXI 总线都适合构建多通道数据采集系统。PCI 只适合小型的测试系统。

将相对独立的数据采集设备与计算机相连或数据采集器相互之间的连接通常的接口技术规范有 IEEE1394、LAN 和 USB 等。现在涌现出了越来越多的 USB 接口的数据采集设备,这些 USB 接口的数据采集设备真正实现了高性能和便携性。给小型现场测试带来了极大的方便。

## 2 振动测试技术

一般振动测试技术大致可分为两类<sup>[2,3]</sup>:一类是测量设备和结构工作或实验时所存在的振动,这种测量可以利用振动信号对设备和结构的运行状态进行监测评估和故障诊断;另一类是系统特征参数的测试,包括系统的频响函数、脉冲响应函数、模态参数和物理参数等。这类测试往往要对设备或结构施加某种激励或利用环境自然激励,使其产生振动,然后测量其振动,此类测振的目的是研究设备或结构的力学动态特性。

要研究设备或结构的动力学特性,通常需要通过模态实验获得结构的模态参数即固有频率、阻尼比和振型。模态实验的方法可以分为两大类:一类是经典的纯模态实验方法,该方法是通过多个激振器对结构进行激励,当激振频率等于结构的某阶固有频率,激振力抵消结构内部阻尼力时,结构处于共振状态,这是一种物理分离模态的方法。这种技术要求配备复杂昂贵的仪器设备,测试周期也比较

长;另一类是数学上分离模态的方法,最常见的方法是对结构施加激励,测量系统频率响应函数矩阵,然后再进行模态参数的识别。2004 年由 LMS 公司推出的多参考点最小二乘频域模态参数识别法(PolyMAX)已经被证明对大阻尼和密集模态的识别较传统方法好。是近年来发展起来的比较好的频域模态参数识别法。

在有些情况下,无法施加人工激励,比如大型桥梁,这时利用自然激励,比如风载、地震等自然激励来识别模态参数的方法就显得重要了。

为获得系统动态特性,常需要测量系统频响函数。目前频响函数测试技术可以分为单点激励单点测量(SISO)、单点激励多点测量(SIMO)、多点激励多点测量(MIMO)等。单点激励一般适用于较小结构的频响函数测量,多点激励适用于大型复杂机构,如机体、船体或大型车辆机构等。

按激励力性质的不同,频响函数测试分为稳态正弦激励、随机激励及瞬态激励三类,其中随机激励又有纯随机、伪随机、周期随机之分。瞬态激励则有快速正弦扫描激励、脉冲激励和阶跃激励等几种方式。

稳态正弦激励有诸多优点,例如能在特定频率上输入比较大的振动能量。由于正弦激励时,在某一瞬间仅以单一频率的力激励试件,所以激励能量比较集中。此外,激励力容易控制,根据选择的激励器不同,可得到小于 10 N 以下,大至数万 N 的激励力,并且便于控制,信噪比较高。因此,无论是对小型家用电器,还是对大型的飞机、桥梁等结构,稳态正弦激励都是很适用的一种获得较高精度的方法。

但是,稳态正弦扫描激励一个很大的缺点是试验需要较长的时间;这对于某种程度不稳定的系统,更会给试验增加困难和使精度降低。

随机激励是宽带频率(许多频率)的激励力同时作用在结构上,结构的响应是各频率的分力同时作用的结果。随机信号有纯随机、伪随机及周期随机信号三种。

纯随机信号无周期性,每个样本彼此不同。故用纯随机信号激励试件,进行振动测试时,可通过总体平均消除实验中的非线性畸变和噪声随机误差影响,提高测试精度。缺点是由于信号的非周期性,在 FFT 处理时会产生大的泄露误差。加适当窗函数后可以大幅度减小这种泄露误差。

伪随机激励信号是周期性的随机信号,由计算机或伪随机信号发生器产生,通过模数转换器(DAC),每经过一个周期输出同样的信号。由于伪随机信号的周期性,当截断长度正好等于伪随机信号的周期时,在测量窗中所取得的信号正好是一个完整周期,因而在随后的傅里叶变换中则可避免功率泄露。但是这种信号与正弦扫描法一样,由于信号是周期性的,因此不能用总体平均来消除非线性及畸变的影响。

周期随机信号激励,综合了纯随机和伪随机信号激励的优点,而避免了它们的缺点。它也是一种伪随机信号,但第一个伪随机信号在持续几个周期后即被第二个不相关的伪随机信号所代替,再经过几个周期后又被另一个不相关的伪随机信号所代替。振动测试时,在一个伪随机信

号内完成一次测量。周期随机信号的优点是消除了功率泄露,可用总体平均来消除非线性等影响,缺点是测试时间稍长于上述两种随机测试法。

脉冲激励是一种宽频带激励,其力的频谱较宽,一次激励可以同时激出多阶模态,因此,脉冲激励是一种快速测试技术。它的测试设备简单,灵活性大,特别适用于现场试验。脉冲激励可分为单点敲击多点测量和多点敲击单点测量两种。前者是求出频响函数矩阵中的某一列,后者是求出频响函数矩阵中的某一行。根据频响函数矩阵的对称性,其分析完全相同。对于轻小试件,为了减小传感器对试件附加质量的影响,常采用单点测量多点敲击方法。对于大试件可在各测点上同时安装传感器,在一点激励,这样一次便可记录激励及所有响应点的信号,然后可一一求得各点的频响函数。脉冲激励的缺点是测试精度不及正弦激励法和随机激励法高,着力点位置、力的大小、方向的控制,需要熟练的操作技巧和经验,否则会产生很大的随机误差。

### 3 振动信号的分析和处理技术

振动信号的分析和处理技术一般可分为时域分析、频域分析、时频域分析和时间序列建模分析等。这些分析处理技术从不同的角度对信号进行观察和分析,为提取与设备运行状态有关的特征信息提供了不同的手段<sup>[4,5]</sup>。

#### 3.1 信号的时域分析

时域分析包括时域统计分析、时域波形分析和时域相关分析。

##### 1) 时域统计分析

时域统计分析常用的统计特征值包括均值、最大值、最小值、均方值、方根幅值、平均幅值、斜度、峭度、峰值指标、脉冲指标、裕度指标、峭度指标和概率密度分布(概率密度分布有的也算作幅值域分析)等,它是对振动信号进行幅值上的各种处理。振动信号的时域均值反映平均振动能量;而最大值、最小值、峰值指标在一定程度上反映出振动信号是否含有冲击成份;斜度则反映幅值概率密度 $p(x)$ 对于纵坐标的不对称性,不对称越厉害,斜度越大;一般来说,随着设备状态的改变,方根幅值、平均幅值,以及峭度均会逐渐增大,其中,峭度对大幅值非常敏感;峭度、裕度和脉冲指标对于冲击类故障比较敏感,特别是对早期故障有较高的敏感性。所以设备状态监测常选用这几个特征值作为诊断参量。

##### 2) 时域波形分析

时域波形分析的特点是信号的时间顺序,即数据产生的先后顺序。它可以直观的描述振动随时间的变化情况,粗略的估量振动平稳与否及对称程度。时间波形有直观、易于理解等特点,由于是原始信号,所以包含的信息量大。对于某些故障信号,其波形具有明显的特征,这时可以利用时间波形做出初步判断。在旋转机械中,其不平衡故障较严重时,信号中有明显的以旋转频率为特征的周期成份;而转轴不对中时,信号在一个周期内,比旋转频率大一倍的高频成分明显加大,即每周波动两次。

##### 3) 时域相关分析

时域相关分析包括自相关分析和互相关分析。自相关分析是研究信号在振动过程不同时刻的相关程度。利用自相关函数可以区别信号的类型,检测随机噪声中的确定性信号。互相关分析是描述两个振动过程在不同时刻的相关程度。它可以找出两个信号之间的关系和相似之处,也可以找出同一信号的现在值与过去值的关系,或者根据过去值、现在值来估计未来值。相关分析可以协助找出设备振动的振源,也可以在噪声背景下提取有用信息,它是旋转机械状态监测与故障诊断重要的手段之一。

#### 3.2 信号的频域分析

对评价设备运行状态和故障诊断而言,时域分析往往是初步的。频域分析是机器状态监测中信号处理的最重要、最常用的分析方法。工程上所测得的信号一般为时域信号,然而由于故障的发生、发展往往引起信号频率结构的变化,为了通过所测信号了解、观测对象的动态行为,往往需要频域信息。它通过了解测试对象的动态特性,对机械的状态做出评价并准确而有效的诊断机械故障和对故障进行定位,进而为防止故障的发生提供分析依据。通过频域分析把复杂的时间历程经傅里叶变换分解为若干单一的谐波分量,可以获得信号的频率结构以及各谐波幅值和相位信息。根据信号的性质及变换方法的不同,常用的频域分析方法有:频谱、自功率谱、互功率谱、倒频谱、细化谱、解调谱、相干函数、频响函数分析等。这些频域分析的核心算法是快速傅里叶变换(FFT)。

##### 1) 幅值谱、相位谱、功率谱分析

频域分析是基于频谱分析展开的,即在频率域将一个复杂的信号分解为简单信号的叠加,这些简单信号对应各种频率分量并同时体现幅值、相位、功率及能量与频率的关系。频谱分析中常用的有幅值谱、功率谱以及相位谱。幅值谱表示了振动参数(位移、速度、加速度)的幅值随频率分布的情况;功率谱表示了振动参量的能量随频率的分布;在旋转机械故障诊断中,信号的相位谱和幅值谱一样,是重要的识别特征。

频谱分析能够分析信号的能量(或功率)的频率分布,因此频谱分析在设备故障诊断中查找振源、分析寻找故障原因、部位、类型等方面具有极为广泛的用途。频谱分析计算是以傅里叶变换为基础的,它将复杂信号分解为有限或无限个频率的简谐分量。

##### 2) 倒频谱分析

倒频谱分析亦称为二次频谱分析,是近代信号分析科学中的一项新技术。倒频谱可以将输入信号与传递函数区分开来,便于识别;还能区分出因调制引起的功率谱中的周期量,找出调制源。倒频谱分析是对功率谱取对数再进行傅里叶逆变换的结果。经倒频后,滤出传递函数的分量,再经过傅里叶正变换等运算,得到输入信号的幅值。因而倒频谱分析能将响应信号中的输入效应和传输途径效应分离开来,使分析结果受传输途径的影响减小,倒频谱识别能将原来谱图上成簇的边频带谱线简化为单根谱线,以便观察。利用这一特点,可识别出复杂频谱图上的周期结构,分离和提取出密集泛频信号中的周期成份,这

对于具有周期成份及多成份边频等复杂信号的识别尤为有效。

### 3) 细化分析

在故障诊断中,故障的特征信息往往只集中在某些频段内,根据故障敏感频段内各频率成份的变化情况,便可以知道故障产生的原因和程度。为了提高诊断的准确性和可靠性,需在该频段内有较高的频率分辨率。细化分析(ZOOM)对信号频谱中某一频段进行局部放大,使得分析频段的频率分辨率和频谱分析精度大为提高,它是非常重要的—种高精度谱分析手段。

### 4) 解调分析

解调是把包络信号与其载波信号分离开来。目前比较成熟的解调算法有三种:高通绝对值分析、检波滤波和希尔伯特变换,比较常用的是基于复解析带通滤波器的优化希尔伯特变换算法。

### 5) 相干函数分析

相干函数是谱相关分析的重要参数,它类似于时域相关系数,特别是在系统辨识中,相干函数可以判明输入与输出之间的关系。

### 6) 频响函数分析

频响函数是动力学系统的动态特性在频域上的最完善的描述。频响函数测量和分析是振动测试与分析中的重要内容。

## 3.3 信号的时频域分析

对非平稳或时变信号的分析方法统称为时频分析,它在时间、频率域上对信号进行分析。时频分析将时域和频域组合成一体,兼顾到非平稳信号的要求。它的主要特点在于时间和频率的局部变化,通过时间轴和频率轴两个坐标组成的相平面,可以得到整体信号在局部时域内的频率组成,或者看出整体信号各个频带在局部时间上的分布和排列情况。它的基本任务是建立一个函数,要求这个函数不仅能够同时用时间和频率描述信号的能量分布密度,还能够以同样的方式计算信号的其他特征量。时频分析方法应用于设备状态监测与故障诊断,可以很好的为确定设备的运行状态提供判断依据。时频分析中最重要的是短时傅里叶变(STFT)、小波变换(WT)、Wigner-Ville时频分析和Hilbert-Huang变换。

### 1) 短时傅里叶变换

短时傅里叶变换时研究非平稳信号最广泛使用的方法,它的基本思想是:把信号划分成许多小的时间间隔,用傅里叶变换分析每一个时间间隔,以便确定在那个时间间隔存在的频率。这些频谱的总体就表示了频谱在时间上是怎样变化的。

短时傅里叶变换通过对信号的分段截取来处理时变信号,是基于对所截取的每一段信号认为是线性、平稳的。因此,严格地说,短时傅里叶变换是一种平稳信号分析法,只适用于对缓变信号的分析。

### 2) 小波变换

小波分析是一种优良的时频分析方法,可把任何信号正交分解到独立的频带内,同时从时域和频域给出信号特征,为在不同频带内监测设备故障提供了有效手段。小波

变换的核心是多分辨分析,是近年来出现的一种研究非平稳信号有力的时频域分析工具,它在不同尺度下由粗到精的处理方式,使其不仅能反映信号的整体特性,同时也能反映信号的局部信息。由于小波变换的分析精度可调,使其既能对信号中的短时高频成份进行定位,又能对信号中的低频成份进行分析,克服了Fourier分析在时域上无任何分辨率的缺陷,并较短时Fourier变换能提取更详尽的信号信息。由于小波分析具有的优点,在机械故障诊断领域获得了广泛的应用。

虽然小波变换分析取得了很大的成功,但也存在缺点:首先,小波变换的本质是线性的;其次,参数选择的敏感性,基小波的选择要依赖信号的先验信息,目前,基小波的选择在理论上和实际应用上都还是一个难点;再次,小波分析是非自适应的,一旦基本小波函数选定,那么分析所有的数据都必须用此小波函数,因此有可能该基小波在全局上是最佳的,但对某个局部区域来说可能是最差的,从而使某些特征因应用小波分解而失去了其本身的物理意义;最后,小波变换本质上是窗口可调的傅里叶变换,其小波窗内的信号则视为平稳状态,因而没有摆脱傅里叶变换的局限,基小波的有限长会造成信号能量的泄露,使信号能量——时间——频率分布很难定量给出。

小波分析是适应信号处理的实际需要而发展起来的一种时频分析方法,与传统的信号处理方法相比,小波变换在时域和频域同时具有良好的局部化特征,目前,基于小波包和多分辨分析的小波分析方法已经在旋转机械的故障征兆提取中得到了研究和应用。

### 3) Wigner-Ville 时频分析

Wigner-Ville分布真正将一维的时间或频率函数映射为时间-频率的二维函数,比较准确地反映了信号能量随时间和频率的分布情况,但是该方法存在频率干涉现象,难以将含有多成份的信号表示清楚<sup>[6]</sup>。

### 4) Hilbert-Huang 变换<sup>[7]</sup>

美国宇航局Norden E. Huang等学者于1998年首次提出希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT),这是一种先对一时间序列数据进行经验模态分解,将原数据分解成为一系列的固有模态函数分量,然后对各分量做希尔伯特变换(Hilbert Transform)的信号处理方法。Hilbert-Huang变换是一种全新的信号分析方法,它不受Fourier变换分析的局限,能描绘信号时频谱和频域幅值谱等,是一种更具有适应性的时频局部分析方法。该方法被认为是近年来对以Fourier变换为基础的线性和稳态谱分析的一个重大突破。但仍然存在着很多问题<sup>[21]</sup>。

## 3.4 时间序列分析

与经典的基于FFT的分析方法不同,时间序列分析方法是通过对采集到的振动信号建立时间序列模型,通过对模型参数的分析识别系统的特性和状态。

时间序列模型有自回归滑动平均模型(ARMA),自回归模型(AR)和滑动平均模型(MA)三种。因自回归模型(AR)建模比较方便快捷,在设备状态监测等方面获得了很好的应用。自回归谱具有频率精度高、幅值非线性的特点。因时间序列分析是对采集的数据建立差分方程模

型,因而用来进行趋势分析和预报比较方便。<sup>[8]</sup>

## 4 基于振动信号分析的人工智能故障诊断方法

由于振动信号与设备运行状态密切相关,利用振动信号进行设备状态监测与故障诊断得到了广泛应用。设备故障诊断技术的产生和发展为提高设备系统的可靠性和可维修性开辟了一条新的途径。状态监测与故障诊断是以可靠性理论、信息论、控制论和系统论为理论基础,以现代测量仪器和计算机为工具,结合各种诊断对象的特殊规律逐步形成的一门新技术,至今已产生了大量的故障诊断方法<sup>[9]</sup>。这里简述几个人工智能故障诊断方法。

### 1) 专家系统故障诊断方法

利用专家系统对症状的观察和分析,推断故障所在,并给出排除故障的方法。可以将诊断问题分为黑箱系统问题和白箱系统问题。内部子系统间的作用比较复杂,缺乏准确的因果逻辑关系,而且无法完成子系统症状测量的系统是黑箱系统问题;白箱系统问题的子系统之间作用相对简单,且包含一定的因果和逻辑关系,同时还可以测量子系统症状<sup>[10]</sup>。

专家系统故障诊断方法汇集众多的专家知识,能对随机发生的故障进行诊断。但是知识获取困难、知识库更新能力差、多个领域专家知识之间的矛盾难于处理、现有的逻辑理论的表达能力和处理能力有很大的局限性。

### 2) 神经网络故障诊断方法

利用神经网络进行故障诊断的基本思想是:以故障特征信号作为神经网络输入,诊断结果作为神经网络输出。首先利用已有的故障征兆和诊断结果对神经网络进行离线训练,使神经网络通过权值记忆故障征兆与诊断结果之间存在的对应关系;然后将得到的故障征兆加到神经网络的输入端,就可以利用训练后的神经网络进行故障诊断,并得到相应的诊断结果<sup>[11]</sup>。因为每个故障类型必须和输出神经元相对应,否则在出现新的故障类型时系统会显得无能为力。

### 3) 模糊故障诊断方法

模糊故障诊断方法主要有基于模糊模式识别的诊断方法、基于模糊推理的诊断方法、基于模糊模型的诊断方法等<sup>[12]</sup>。模糊逻辑的引入主要是为了克服由于过程本身的不确定性、不精确性以及噪声等所带来的困难,因而在处理复杂系统的大时滞、时变及非线性方面,显示出它的优越性。模糊故障诊断方法的不足之处是对复杂的诊断系统,要建立正确的模糊规则和隶属函数是非常困难,而且需要花费很长的时间。

### 4) 遗传算法故障诊断方法

目前遗传算法单独应用于系统故障诊断的研究还比较少,它主要和其他的诊断方法结合使用,起到优化系统的作用。比如:在与神经网络相结合时,主要优化神经网络的权重和结构输入、输出参数;在与模糊集理论相结合时,主要用于优化模糊推理的规则;在与小波结合过程中优化小波,得到性能优良的小波<sup>[13]</sup>。遗传算法克服了专家系统存在的推理速度慢和先验知识很少情况下知识获

取困难的障碍。

### 5) 粗糙集故障诊断方法

粗糙集理论是在分类能力不变的前提下,通过知识简约,导出问题的决策或分类规则。以其为基础出现了基于粗糙集的专家系统故障诊断方法、基于信息冗余多个属性约简的故障诊断方法、基于粗糙集的神经网络故障诊断方法<sup>[14]</sup>。粗糙集理论可以有效地克服专家系统获取知识难的问题,粗糙集理论通过获取故障信息的多个属性约简集合,避开丢失或错误的故障信号,大大提高故障诊断的准确率;粗糙集可以对训练样本集进行有效的简化,从而降低神经网络的复杂性,减少样本集的训练时间,提高诊断的实时性和准确性。

### 6) 人工免疫算法故障诊断方法

人工免疫算法故障诊断由耐受过程和检测过程构成<sup>[15]</sup>。耐受过程:随机产生大量的候选检测器,把其中不与自体集中的任何一个样本相匹配的候选检测器设置为有效检测器,而发生了匹配的候选检测器将被清除掉。检测过程:用检测器集检测“自体”集合是否发生变化。这个过程模拟了生物免疫系统细胞的非己识别过程。人工免疫算法特别适合于在线监测和自适应故障诊断,但在模型建立、算法选择等方面还存在着一定的问题。

### 7) 故障树故障诊断方法

故障树分析法将系统故障形成原因按树枝状逐级细化。把最容易发生的故障状态作为故障树的顶事件,寻找引起顶事件的直接原因,并将其逻辑关系用特定的逻辑符号表示出来,自上而下逐级分解,直到不能分解的底事件,形成故障树<sup>[16]</sup>。找出系统的薄弱环节,以便采取相应的改进措施。故障树诊断方法直观、形象,能够实现快速的诊断;知识库很容易动态地修改,并能保持一致性;概率推理可在一定程度上用于选择规则的搜寻通道,提高诊断效率;诊断技术与领域无关,只要相应的故障树给定,就可以实现诊断。缺点是不能诊断不可

预知的故障;诊断结果严重依赖于故障树信息的正确性和完整性。

### 8) 支持向量机故障诊断方法

支持向量机故障诊断法先利用小波包信号分解将信号划分为相应的频段,并计算出该频段信号的能量,作为特征向量来表征设备的运行状态。其次,建立多故障分类器。把第一步得到的状态数据集合作为支持向量机的训练样本,建立多个二类分类器,分别用于将某一种故障和其他故障分开,然后将这几个分类器按树结构进行组合,从而形成多故障分类器<sup>[17]</sup>。最后在分类测试中检测故障。在学习样本数较少的情况下,支持向量机分类方法比神经网络分类方法具有较强的适应性、更好的分类能力和更高的计算效率。支持向量机的应用为故障诊断向智能化方向发展提供了一条新的途径,在故障诊断领域具有很好的应用前景。

## 5 结语

综上所述,目前振动信号测量与分析在很多领域得到了广泛应用,测试和分析也发展到了较高的水平。但仍然

(下转第50页)

## 参考文献:

- [1] 全国数控培训网络天津分中心. 数控编程 [M]. 北京: 机械工业出版社 2006.
- [2] 董玉红, 邵俊鹏. 机床数控技术 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社 2005.
- [3] 刘虹. 数控加工编程与操作 [M]. 西安: 电子科技大学出版社 2007.

- [4] 李蓓华. 数控机床操作工(中级) [M]. 北京: 中国劳动保障出版社 2004.
- [5] 裴炳文. 数控加工工艺与编程 [M]. 北京: 机械工业出版社 2005.
- [6] 李斌. 数控加工技术 [M]. 北京: 高等教育出版社 2006.

收稿日期: 2009-11-05

(上接第5页)

存在很多需要解决的问题。展望未来,笔者认为在如下几方面需要突破和发展。

1) 无线智能型传感器。对于大型复杂结构振动测试,测点多至上千个,大量传感器的使用使得传统连线方式工作量很大,如果能用无线的方式传输测量信号,并且将传感器的位置信息也自动传入测量系统中,将大大减少大型复杂结构测试的时间。目前已经有这方面的应用了,但是价格昂贵,信号传输速度也不能令人满意。

2) 传感器的微型化及纳米级结构的动力学测试问题。目前在纳米级结构的动力学测试所开展的研究方面几乎还是空白,但随着纳米动力学问题的研究,相应的测试技术也需要跟上来。

3) 更高速度的数字信号处理技术和更快的数据输出速度。虽然目前的数字信号处理的速度相对以前已经非常快了,但在有的需要适时控制的领域,更快的数字信号处理技术总是受欢迎的。大型复杂结构多通道测试的数据量特别大,现在国际上已经在研究更快的数据传输方式。

4) 在激振力可以测量的情况下,模态参数识别法已经相对较为成熟。但有些情况,激振力无法测量,这种情况下结构模态参数识别是难点。虽然已经有很多人做了研究,但大多基于各种各样的假设,总的来说这种情况下模态参数的识别还很不成熟。

5) 非稳态信号的分析。虽然目前有短时傅里叶变换、小波变换和 Hilbert-Huang 变换等应用,在非稳态信号的分析中,但还存在着这样那样的问题。非稳态振动信号中往往含有更为丰富的系统信息,对非稳态振动信号的研究有着重要的理论和实用价值。

6) 非线性信号分析问题。工程测试中有时会碰到非线性测试和分析问题。这类非线性问题有时被线性化处理了,这种处理虽然也获得了大致的结果,但这种结果与实际问题的差别在有些情况下是不容忽略的。所以非线性系统的信号分析与处理的研究有待输入研究。

7) 微弱信号检测问题。工程中有价值的信息有时会淹没在强噪声环境中,如能从强噪声环境中识别出这些有用的微弱信号,对于状态监测和故障诊断来说是极有价值的。混沌阵子在微弱信号监测中的研究已经取得了一些成果<sup>[8]</sup>,但目前还很不完善,有待输入研究。

8) 激光测振技术的进一步发展。基于多普勒效应的激光测振设备具有非接触式、频率范围宽、测试精度高等优点,因而取得了广泛的应用。多点激光测振设备在某些

结构的测试中具有很大的优点,具有广阔的发展前景。

## 参考文献:

- [1] 杨廷善,等. 航空测控系统实用手册 [S]. 北京: 航空工业出版社 1997.
- [2] 张思. 振动测试与分析技术 [M]. 北京: 清华大学出版社 1992.
- [3] 郭月强. 振动信号的测试与分析及其软件系统的开发 [D]. 北京: 北京工业大学 2002.
- [4] 卢文祥, 杜润生. 机械工程测试、信息、信号分析 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社 1999.
- [5] 秦树人. 机械工程测试原理与技术 [M]. 重庆: 重庆大学出版社 2002.
- [6] 曹冲锋. 基于 EMD 的机械振动分析与诊断方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学 2009.
- [7] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceeding of Royal Society London, 1998, A(454): 903-995.
- [8] Pandit S M & Shien Ming WU. Time series and system analysis with applications [J]. John Wiley & Sons John Wiley & Sons 1983.
- [9] 虞和济. 故障诊断的基本原理 [M]. 北京: 冶金工业出版社 1989.
- [10] 吴今培, 肖健华. 智能故障诊断与专家系统 [M]. 北京: 科学出版社 1997.
- [11] 朱旭东, 戴文战, 郎燕峰. 基于神经网络的方法在故障诊断中的应用 [J]. 机电工程 2003 20(05).
- [12] 王荣杰, 胡清. 基于知识的故障诊断方法的发展现状与展望 [J]. 微计算机信息, 2006 22(23).
- [13] 杨建平. 传感器故障诊断的研究与应用 [D]. 北京: 华北电力大学硕士学位论文, 2004.
- [14] 谭大乐, 宋执环, 李平. 基于粗糙集的故障诊断方法 [J]. 浙江大学学报(工学版) 2003 37(01).
- [15] 陈强, 郑德玲, 李湘萍. 基于人工免疫的故障诊断模型及其应用 [J]. 北京科技大学学报, 2007 29(10).
- [16] 刘志海, 鲁青, 李桂莉. 基于故障树的故障诊断专家系统的研究 [J]. 矿山机械, 2006 34(05).
- [17] 何学文, 赵海鸣. 支持向量机及其在机械故障诊断中的应用 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2005 36(02).
- [18] 张勇, 纪国宜. 基于混沌振子和小波理论检测微弱信号的研究 [J]. 电子测量技术, 2009 (06): 40-43.

收稿日期: 2010-05-04