

大型旋转机械状态监测与故障诊断研究进展*

杨世锡¹, 尚小林², 柳亦兵³, 严可国⁴, 刘学坤¹

(1. 浙江大学机械工程学院 杭州, 310027) (2. 四川东方电气自动控制工程有限公司 德阳, 618000)
(3. 华北电力大学能源动力与机械工程学院 北京, 102206) (4. 北京英华达软件工程有限公司 北京, 100086)

摘要 分析了旋转机械状态监测与故障诊断研究的重要意义。提出了一种由状态监测与故障诊断理论和方法、状态监测与故障诊断关键技术、状态监测与故障诊断系统、状态监测与故障诊断工程应用四个方面相互支撑的旋转机械状态监测与诊断研究的体系架构, 给出了一个超越临界汽轮发电机组状态监测与故障诊断系统研究的实例。分别综述了大型旋转机械状态监测与故障诊断的理论和方法、关键技术、应用系统研究及其工程应用的进展, 提出了对于旋转机械状态监测与诊断研究的思考与建议。

关键词 旋转机械; 状态监测; 故障诊断; 特征提取

中图分类号 TH17

引言

大型旋转机械是指汽轮机、燃气轮机、水轮机、发电机、航空发动机和离心压缩机等机械设备, 是电力、石油化工、冶金、机械、航空以及一些军事工业部门的关键设备。随着现代工业和科学技术的发展以及自动化程度的进一步提高, 旋转机械正朝着大型化、高速化、连续化、集中化、自动化方向发展。生产系统中各设备之间的联系越来越紧密。由于各种随机因素的影响, 机械难免出现一些故障, 即降低或失去一定的功能; 而机械一旦出现故障就可能引起连锁反应, 导致整个设备甚至整个生产过程无法正常工作, 造成巨大的经济损失, 国内外因设备故障而引起的灾难性事故时有发生。例如, 2014 年 11 月 10 日南航 CZ3739 航班空客 A330 飞机飞行中发生左侧发动机故障而迫降广州机场^[1]。因此, 研究应用大型旋转机械状态监测与故障诊断理论、技术及系统, 对于促进“预期维修体制”的形成, 保障这些关键设备的安全可靠、长期高效地运行, 避免巨额的经济损失和灾难性事故的发生具有重要的理论意义和巨大的应用价值。《国家中长期科学与技术发展纲要(2006~2020)》中将“基于高可靠性的大型复杂系统和装备的系统设计技术”、“关键设备装置的监控与

失效控制技术”、“重大产品和重大设施寿命预测技术”等作为重要的研究方向^[2]。《机械工程学科发展战略报告(2011~2020)》也将“极端环境下重大机械产品的安全监测与健康监测”作为当前迫切需要解决的问题^[3]。

1 状态监测与故障诊断研究应用体系

大型旋转机械状态监测与故障诊断研究内容主要包括: 揭示机械故障发生、发展的机理, 攻克机械在线状态监测与故障诊断的关键技术, 研制先进的状态监测与故障诊断系统并应用于工程实践。大型旋转机械状态监测与故障诊断研究方法上一般采用理论研究、实验验证和应用验证相结合, 串行反馈和并行协同相结合, 从单项技术研究到系统集成逐渐推进的整体研究方法与技术路线, 如图 1 所示。

状态监测与故障诊断理论和方法的研究, 从方法论上研究设备状态监测的方法, 以获得正确的敏感信号; 研究设备的故障机理, 探索故障诊断特征信息提取新方法, 实现从监测信号中获取准确充分的故障特征信息; 在故障案例库、故障信息库和诊断知识的支持下, 研究基于模式识别方法的多物理量综合故障诊断集成方法, 以实现故障的识别与决策。

状态监测与故障诊断关键技术研究, 是在常规

* 国家自然科学基金资助项目(51375434, 11172260); 国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)资助项目(2008AA04Z410)

收稿日期: 2014-11-25

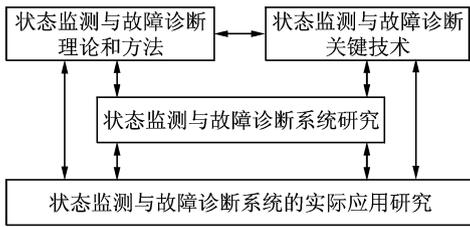


图 1 大型旋转机械状态监测与故障诊断研究体系
Fig. 1 The research system of state monitoring and fault diagnosis for large rotating machinery

轴振动、压力、流量等信号监测技术基础上,研究运用合适的状态监测与故障诊断理论和方法获得机组运行状态信息,通过提取特征信息、识别故障模式,构建状态监测与故障诊断系统的核心功能。

状态监测与故障诊断系统研制,以状态监测和

故障诊断的理论和方法以及关键技术为基础,研究系统的可靠性设计、振动信号整周期等相位多通道同步高速采集技术,设计具有运行保护功能的在线状态监测系统、典型故障数据库和故障特征数据库以及多物理量综合远程故障诊断系统,实现大型旋转机械的状态监测与故障诊断功能。

通过状态监测与故障诊断系统的实际应用研究,可以对所研究的理论方法、关键技术和系统进行实验测试,进一步完善和提高理论方法、关键技术以及系统的适用性和可靠性。

参照上述大型旋转机械状态监测与故障诊断研究体系,结合超超临界发电机组状态监测和故障诊断的实际需求,笔者给出了一个超超临界汽轮发电机组状态监测与故障诊断的研究应用实例,如图 2 所示。

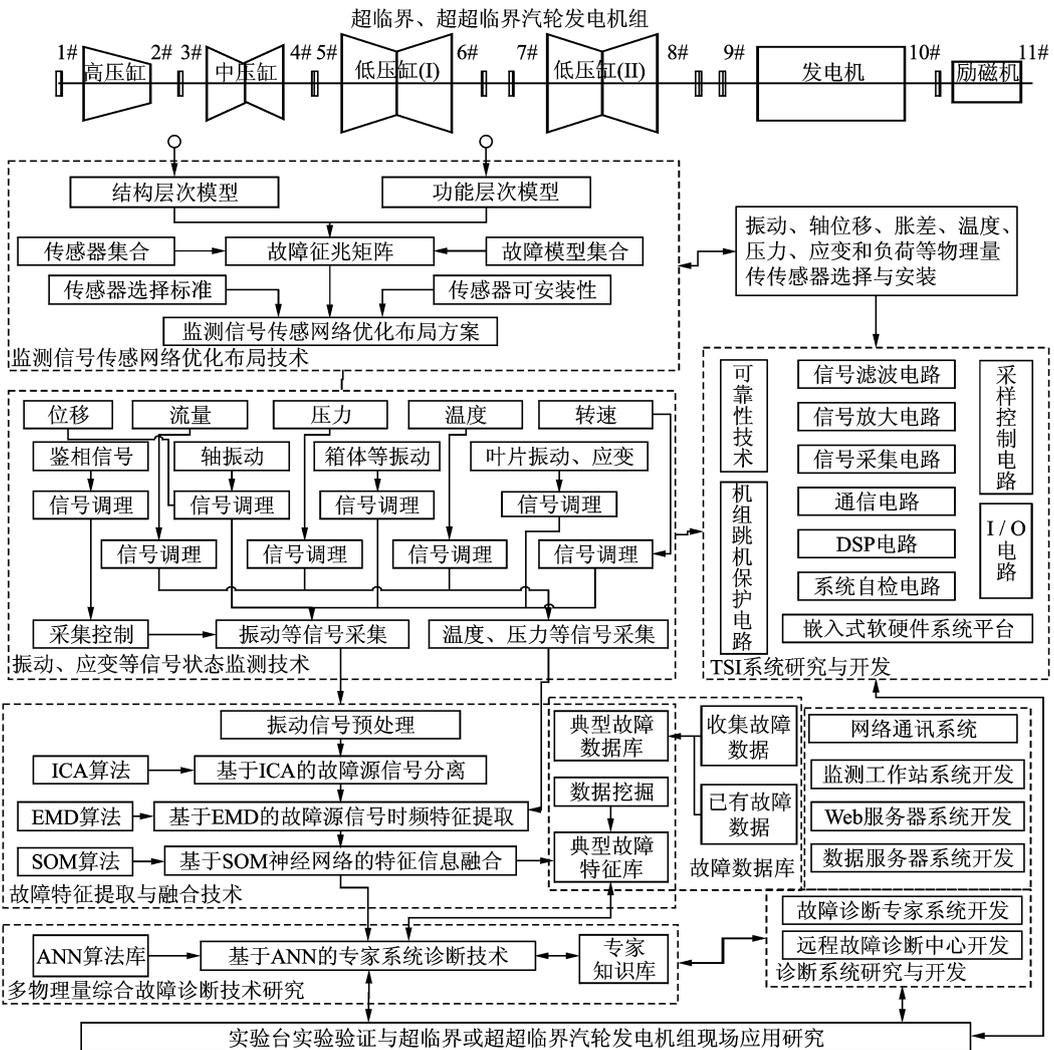


图 2 超超临界汽轮发电机组状态监测与故障诊断的研究应用实例

Fig. 2 The application example of the system of state monitoring and fault diagnosis for Ultra-supercritical steam turbine generator

2 大型旋转机械状态监测与故障诊断理论和方法研究

大型旋转机械状态监测与故障诊断的前提是对故障发生发展及其演化机理、静态与动态表现特征的充分认识。随着科学技术的发展,大型旋转机械呈现结构更复杂、精度更高、转速更快、耦合更紧密的特点,使得其故障的诱发、传播、演变也更加复杂且具有更强的非线性。因此,对大型旋转机械进行准确的建模,研究故障发生、发展和表征等系列问题,为故障诊断提供准确的诊断知识,显得更加重要。笔者分析故障建模与分析、故障诊断模式识别理论两方面的研究进展以及重要工作。

2.1 故障建模与分析

故障建模与分析不仅可以从理论上对设备故障的产生机理做出具体的解释,同时,通过建立被监测对象的数学模型(正常状态和故障状态),分析模型的特征参数或模型输出的差异,从而实现故障模式的识别,一直是故障诊断领域的主要研究问题。Silani等^[4]利用更为精确的积分计算裂纹单元的刚度矩阵,采用一种新的有限元方法,重新建立了转子呼吸裂纹模型。Han等^[5-6]研究了含有两条呼吸裂纹的转子-轴承系统的参数不稳定性以及含有斜裂纹和时变刚度的齿轮转子系统的稳态响应。何成兵等^[7]建立了刚性支承的纯弯曲振动、弯扭耦合振动和轴承支承的弯扭耦合振动模型,分析了裂纹转子系统响应的分叉与混沌特性。Chouksey等^[8]建立了转轴系统的动力学模型,模型根据模态阻尼因素、临界转速、频率响应函数、转轴的不同涡动方向等参数,研究了内部转子阻尼和滑动轴承油膜力对系统动力学特性产生的影响。这些研究成果对旋转机械的状态监测与故障诊断起到了一定的指导作用。

近几年,机械系统非线性因素的影响日益受到重视,以非线性动力学为基础的故障诊断技术是解决大型复杂装备故障诊断的重要发展方向^[9-10]。王炳成等^[11-12]深入研究旋转机械故障转子的非线性动力学理论,在旋转机械的典型故障和耦合故障诊断方面取得了成果。Gan Chunbiao等^[13-16]对随机非线性系统的动力学特性进行了研究,取得了一系列研究成果。这些研究及成果对提示和认识旋转机械设备故障的线性与非线性动力学振动特性具有重要的理论意义,也为故障诊断提供了科学依据。

由于故障建模与分析过程中通常对某些因素进行简化处理,在实验过程中未能充分考虑振动信号在传播过程中的衰减、迟滞、混叠等特性的变化,导致建模分析的理论成果未能在故障诊断中得到充分的应用。因此,深入研究振动信号在设备中的传播机理,完善模型的验证方法,是故障建模分析亟待开展的一项工作。Gan Chunbiao等^[17-18]对杆、转轴等机械构件中弹性波传播特性进行研究,发现轴或者杆介质中纵波传播时存在阻带,变截面杆中传播常数图如图3所示。研究结果有助于解决杆、转轴等构件中弹性波传播机理问题,对认识振动信号的传播过程进而完善故障建模分析方法具有重要意义。

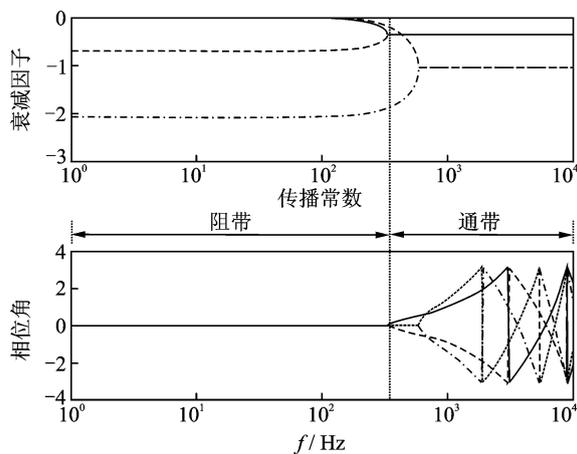


图3 变截面杆或轴中传播常数

Fig. 3 Propagation constants in a rod or shaft with variable cross-section

大型旋转机械通常工作在一个复杂的系统中,与复杂系统其他部分存在着物质、能量、信息的复杂耦合关系。例如,大型发电机组的电网负载和谐波等因素对发电机组导致的输入性振动异常现象日益受到重视,国家自然科学基金委近年来一直资助此类项目。故障建模与分析是揭示故障产生、发展与传播机理的主要手段,是故障诊断重要科学依据,其研究水平和进展直接决定了故障诊断领域的研究水平和应用情况。随着系统的日益复杂和研究进展,随机激励、强非线性和多域耦合的故障建模与分析还有待进一步深入研究。

2.2 故障模式识别理论

机械状态监测与故障诊断的根本问题是故障模式识别,即根据机械设备的运行信息形成的状态特征集,映射(识别)机械设备故障集(类型)。机械状态监测与故障诊断一般的技术流程如图4所示^[19]。

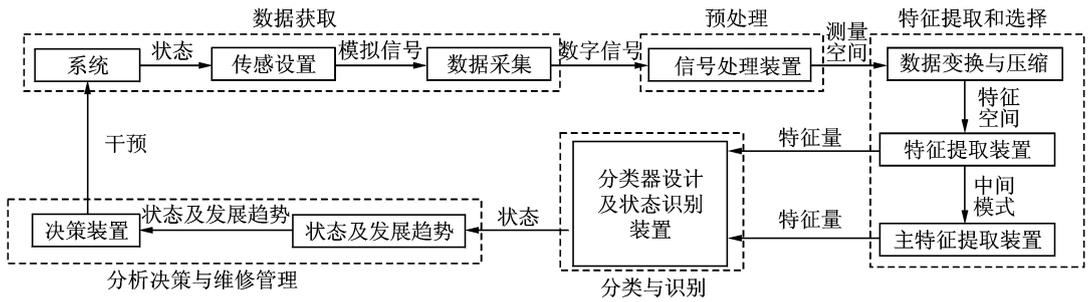


图 4 状态监测与故障诊断技术流程

Fig. 4 Technical flow of the state monitoring and fault diagnosis

基于对故障机理的认识(故障知识)和现场状态信息(状态特征),故障模式识别的方法主要有故障树、专家系统、神经网络、支持向量机、模糊推理、粗糙集等。杨苹等^[20]将模糊理论与神经网络技术相结合,构造适合于大型复杂系统故障诊断的自组织模糊神经网络系统体系结构,实现了 600MW 汽轮发电机组常见振动故障的诊断。Jiang 等^[21]针对转子轴承振动信号为非线性、非高斯信号,运用高阶累计量估算自回归模型的参数,并将参数作为故障特征向量,用模糊聚类分析方法实现转子轴承故障模式识别。Shen 等^[22]将经验模态分解(empirical mode decomposition, 简称 EMD)方法与多分类直推式支持向量机相结合,实现了齿轮减速器的多故障识别。Lautour 等^[23]针对设备的长序列定期采样数据,采用自回归模型(auto regressive model, 简称 AR 模型)参数作为故障敏感参数,运用人工神经网络模型(artificial neural network, 简称 ANN)实现故障的分类与评估。Li 等^[24]将独立分量分析(independent component analysis, 简称 ICA)与隐 Markov 模型(hidden Markov models, 简称 HMM)联合运用,ICA 用于特征提取,HMM 用于故障模式分类,实现旋转机械在加速与降速过程中的故障模式识别。杨世锡等^[25]采用 ICA 方法与自组织映射(self-organizing map, 简称 SOM)神经网络结合,实现旋转机械故障的特征提取与故障模式的分类。

故障模式识别理论的研究取得了巨大的进展,但状态特征集与故障集之间往往是一个多对多的复杂映射关系,一个特征(向量)往往对应着多个故障类型,一个故障类型对应着多种特征(向量),这给故障诊断带来了极大的困难,造成了“诊”而不“断”的结果,严重影响故障诊断应用的实际效果。基于故障机理、故障特征提取、数据挖掘、人工智能和大数据等领域的研究进展,故障模式识别有望在日益完

备的状态数据库、故障知识库和人工知识的模式分类方法库支撑下解决故障模式的准确识别问题。

3 状态监测与故障诊断关键技术

大型旋转机械由于结构和功能复杂,工作环境比较特殊,现场得到的机械状态信号往往受到强干扰和噪声的影响。如何准确获取与故障关联的状态信号,得到纯净的故障信息,形成与故障集强映射的故障特征(集)是大型旋转机械状态监测与故障诊断研究与应用中的关键问题。

3.1 监测传感器网络优化布局技术

大型旋转机械结构复杂且机、电、液耦合,故障信号的背景噪声干扰、传播过程途径与衰减特性复杂,这对故障信号(特别是对早期故障的微弱信号)的检测提出了特殊要求。在实际机组结构、功能和环境约束下,根据故障信号及其传播特性,优化布置各种各类监测传感器网络、正确捕捉机组状态或故障信息,是状态监测与故障诊断中急待解决的技术难点。

张亮等^[26]以传感器代价和漏检故障的危害程度为最小优化目标,检测性能为约束条件,建立了传感器优化配置模型。Yi 等^[27]提出了一种基于改进的猴群算法优化传感器布置,用于结构的状态监测。刘睿等^[28]将偶图描述和关联矩阵描述结合起来,建立两者的转化关系,对航天器部件进行可诊断性测点配置。Pourali 等^[29]提出了基于贝叶斯网络的传感器位置优化方法,并用于电力系统的状态监测。陈仲生等^[30]通过分析嵌入式传感下故障振动信号与备选传感器之间的传递特性,建立齿轮箱嵌入式传感器优化配置的量化模型。王荣等^[31]从滑动轴承动力学特性出发,分析轴承动态特性对同一截面

上振动水平测点和垂直测点所测振动量的影响,提出多跨转子中振动传感器布置的策略。Cao 等^[32]建立了一个含有局部故障的主轴承系统的集成有限元模型,用于预测轴承的振动响应,据此确定传感器的优化布置方案。

于保华等^[33-34]针对大型流程工业系统状态监测与故障诊断的传感器优化配置特点,建立能够定量反映测点获取故障信息效率的故障-测点互信息矩阵,如图 5 所示。在此基础上,提出传感器系统测点-故障关联度优化目标函数,建立了多目标优化配置模型。

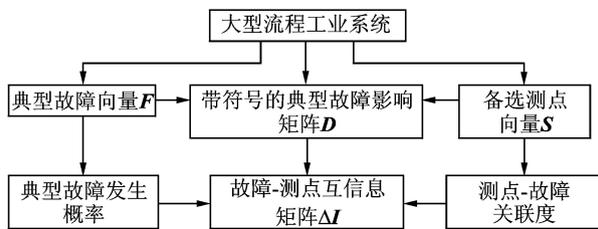


图 5 故障-测点互信息分析

Fig. 5 Fault and measurement point mutual information analysis

这些研究对于探索对故障较敏感的状态物理量的选择和测点的布置提供了有益的参考,但在实际应用中由于受大型旋转机械物理空间和传感检测等条件的限制,难以得到很好地应用。在故障机理、信号传播机理及传感理论研究成果的支持下,传感器优化布置研究将取得进一步成果。

3.2 信号降噪与振源识别技术

在复杂运行环境下获取的大型旋转机械状态信号具有背景噪声干扰大,非平稳、非线性的特点,其传播途径与衰减特性复杂,往往是多故障源信号以复杂的形式混叠(线性混叠、卷积混叠)在一起,严重影响了故障诊断的准确性。从现场状态监测信号中去除噪声干扰的影响、得到准确的故障源信号,是故障诊断的关键技术之一,得到了研究者充分重视。

文献^[35-36]采用了随机共振技术,差分振子检测方法用于微弱信号的识别,为早期故障检测提供了一条新途径。张弦等^[37]以小波变换作为含噪信号分解与重构工具,以近似实现均方误差最小意义下的最优降噪。Du 等^[38]运用 EMD-ICA 方法从柴油机单通道振动信号中分离出振源信号。Sun 等^[39]采用自适应神经网络算法解决盲源分离的源

数目是未知的和动态的问题。李志农等^[40]提出一种基于局域均值分解的欠定盲源分离方法,有效解决传统的盲源分离方法要求源信号满足非高斯、平稳和相互独立的假设,且要求观测信号数多于源数的不足等问题。Cheng 等^[41]研究将去噪源分离(denoising source separation,简称 DSS)应用于从舰艇舱壁混合信号中提取振源的振动特征信息。Hou 等^[42]通过计算最优的延迟时间和嵌入维数优化全局投影降噪算法,并用于旋转机械轴心轨迹的提纯。叶红仙等^[43]提出一种复合的 EMD-SVD-BIC 的机械振动源信号数量估计方法,如图 6 所示,解决卷积混合的机械振动源在观测数小于振动源数情况下的源数估计问题。周晓峰等^[44]提出负熵最大化的机械振源半盲分离技术,将构造的参考源信号与目标源信号均方差作为约束条件,求解约束最优问题,实现机械振源信号的分离。

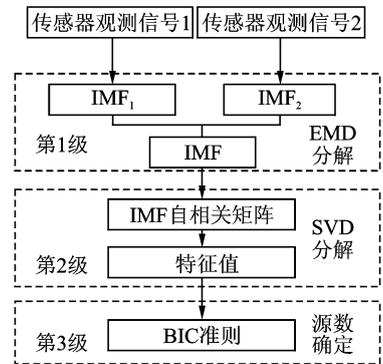


图 6 基于 EMD-SVD-BIC 的振源数估计结构图

Fig. 6 Chart of vibration source number estimation based on EMD-SVD-BIC

3.3 故障特征提取技术

根据分离出的故障源信号特点,采取适用于非平稳、非线性的信号时频分析方法,准确提取各类故障特征信息,是提高故障诊断准确率的关键问题。

大型旋转机械故障特征提取的非平稳信号分析方法主要有短时傅里叶变换、小波变换和小波包分析、循环平稳信号分析和经验模态分解等。Feng 等^[45]比较系统地总结了主要的时频分析方法,讨论了各种时频分析方法的原理、特点以及在故障诊断中的应用。Antoni^[46]详细介绍了循环平稳信号分析方法用于机械信号的分析。Sun 等^[47]对多尺度小波分析的原理和在工程上的应用做了较为详细的讲解,并对该方法应用在故障诊断中存在的问题和发展前景做了论述。Cai 等^[48]采用调 Q 小波和稀疏分解方法

有效提取出齿轮箱的啮合频率成分和冲击成分。

雷亚国等^[49]通过敏感度评估算法从集合经验模式分解(ensemble empirical mode decomposition,简称 EEMD)所有的固有模态函数(intrinsic mode function,简称 IMF)中选择故障特征的敏感 IMF,改进 Hilbert-Huang 谱,提高了故障诊断的诊断精度。Jiang 等^[50]将多尺度小波包同 EEMD 相结合,提取旋转机械振动信号各窄频带中较弱的多故障成分。陈向民等^[51-53]针对变速齿轮箱的复合故障特点,分别采用阶次解调谱、形态分量分析和阶次跟踪算法有效地提取齿轮与滚动轴承的故障特征。文献^[54]通过分析转子不对中、裂纹和碰摩故障的振动信号,提出联合运用双谱和三阶谱分析可以更好地实现转子系统的故障诊断。

笔者团队根据超超临界汽轮机组的典型故障信号特点,研究适用于非平稳、非线性基于经验模态分解方法的故障时频特征分析与提取技术。曹冲锋等^[55]针对汽轮机运行状态复杂多变的信号使用 EMD 方法容易分解出噪声分量和虚假分量的问题,提出一种机械振动信号的振动模式提取方法。此外,还通过基于 EMD 的希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform,简称 HHT)方法,获取非平稳振动信号的瞬时能量分布特征,用于识别汽轮机发电机组转子系统的不同运行状态^[56],如图 7 所示。

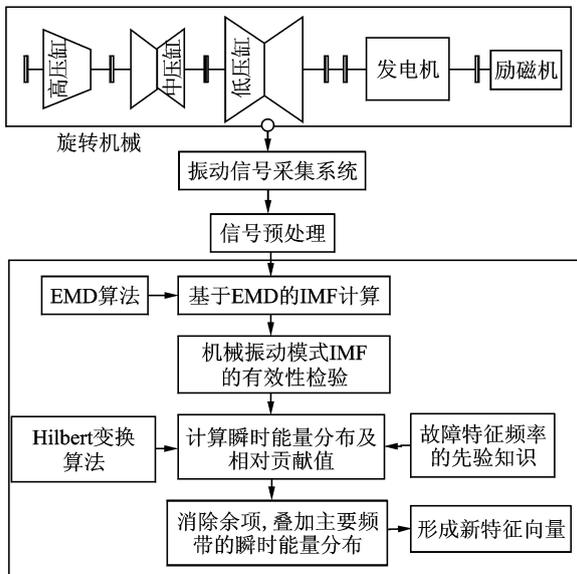


图 7 基于 EMD-HT 的旋转机械振动信号的瞬时能量分布特征的提取流程

Fig. 7 Feature extracting procedure for the instantaneous energy distribution of vibration signal in rotating machinery based on EMD-HT

Xiong 等^[57]提出了一种基于谱峭度(spectral kurtosis,简称 SK)的 SK-HHT 故障特征提取新方法,能够根据故障敏感频率成分及其带宽构建最优的带通滤波器组,进而提取更为显著的碰摩故障振动模式。

实际中的机组往往会同时或者先后联级发生几类不同的故障,这些故障的耦合必然会在振动信号等监测信号中叠加,容易造成故障的漏诊。在系统故障机理研究的基础上,寻求新的或者改进已有的故障识别与特征提取方法,实现耦合(复合)故障的特征提取与识别,仍是故障特征提取技术研究的热点问题之一。

4 状态监测与故障诊断系统研制

大型旋转机械状态监测与故障诊断系统是集成状态监测与故障诊断领域、信号传感、数据库、网络通讯、计算机信息系统等成果研制的,应用于工程实践的应用系统。状态监测与故障诊断系统与理论方法、技术研究同步发展,经历了单机离线巡检测试系统、单机在线监测与诊断系统、网络化远程诊断系统等阶段的发展,在电力、冶金、交通和航空等领域得到广泛应用。

目前,大型旋转机械状态监测与故障诊断代表性的系统有:本特利公司的 7200 系统、3300 系统和 3500 等产品;西门子的 SPPA-D3000 PLANT Monitor;Entek 公司的 MPUSE 网络系统;申克公司的 VIBROCOM4000 系统;北京英华达公司的 800 系列、900 系列等。多年来,以本特利公司为主的国外主流产品占据了国内状态监测与故障诊断系统应用市场的大部分市场。近年来,以英华达、华北同科等国内公司及部分科研院所开发的系统凭借较高的技术水平逐渐显示较强的竞争力。

本特利 3500 系统是本特利内华达采用传统框架形式的系统中功能最强、最灵活的系统,可以根据需要监测的参数安装不同数量和种类的插件。该状态监测系统适用于多种行业的旋转或者往复机械,已广泛应用于国内各大电厂^[58]。西门子的 SPPA-D3000 PLANT Monitor 采用神经网络算法,对整个热力系统及辅助设备进行早期预警和故障诊断,2010 年引入中国后已经在华能金陵电厂、新疆米东热电厂等发电机组中获得应用^[59]。此外,菲利普公司的 PR3000 系统、SKF-DYMAC 公司的 M6000 和

M800A、Entek 公司的 MPUSE 网络系统等也得到了一定的推广和应用。

国内的一些高校及科研院所,如哈尔滨工业大学、清华大学、西安交通大学、华中科技大学、郑州大学和浙江大学等在政府和企业的资助下研制了一些状态监测与故障诊断系统,并在工业生产实际中应用,但未能形成与国外公司产品抗衡的系统。

本课题组在科技部“八六三”项目下,研制了超临界、超超临界汽轮机组状态监测与故障诊断系统,并与国内主机厂配套,广泛应用于国内外机组,初步形成了主流产品的能力。该系统典型应用架构如图 8 所示,系统采用分布式架构体系,通过厂内局域网将现场的各分布式机组群状态信号检测系统与数据服务器、现场故障诊断中心及其他浏览终端连接在一起实现现场状态监测和故障诊断,再通过 Internet 连接到远程诊断中心及远程工作站,实现远程状态监测与故障诊断。

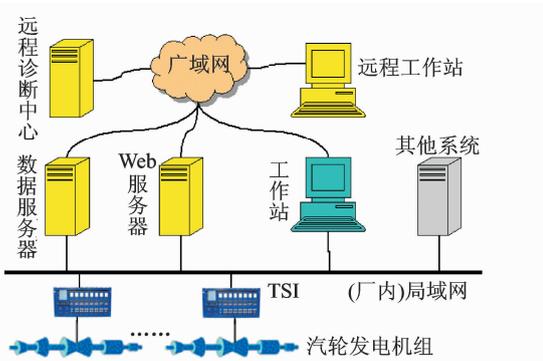


图 8 大型汽轮发电机组状态监测与故障诊断系统典型应用架构

Fig. 8 The typical application framework of state monitoring and fault diagnosis for large steam turbine generator sets

汽轮发电机组状态监测 (turbine supervisory instrumentation, 简称 TSI) 系统采用“堆栈”式模块化的架构,以 ARM 主控板为核心通过 PC/104 总线实现旋转机械振动信号、热工参量以及过程保护量等状态信号采集。应用课题组自主研发的电源双冗余、带电热插拔、板卡自检、传感器线路自检、跳车保护技术,保证了系统的高可靠性。系统创新性地集成了故障分析显示模块。除了具备机组各类常规状态显示功能外,系统还能够进行在线和离线快速傅里叶变换分析、进行 EMD-HHT 时频分析、通过 TCP/IP 协议向数据服务器传输各类采集信号,并根据预先设定的异常报警机制密集存储异常数据。

超临界、超超临界汽轮机组状态监测系统实物如图 9 所示。超临界汽轮发电机组的轴的主监测界面如图 10 所示。轴系仿真图以及监测的频谱图如图 11 所示。



图 9 超临界、超超临界汽轮机组状态监测系统

Fig. 9 The state monitoring system of supercritical and ultra-supercritical turbine generator sets

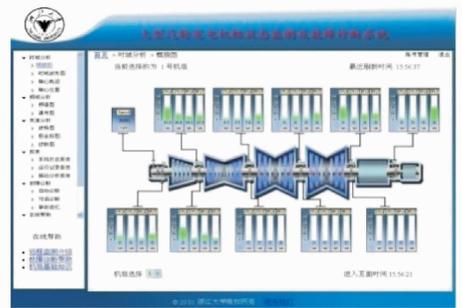
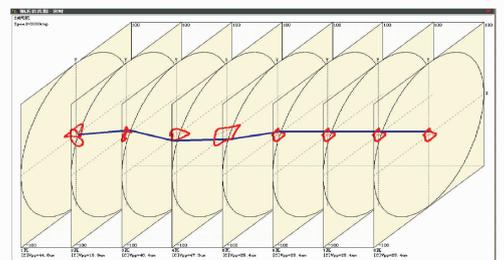


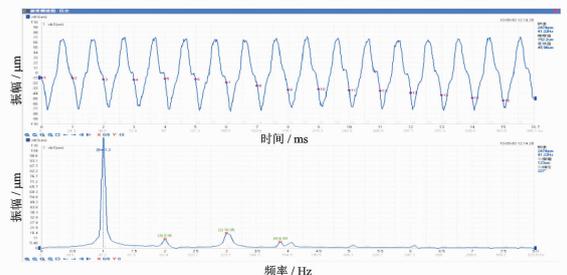
图 10 主监测界面

Fig. 10 The main monitoring interface



(a) 轴系仿真图

(a) The shafting simulation map



(b) 波形频谱图

(b) The wave spectrogram

图 11 监测效果图

Fig. 11 Chart of monitoring effects

为了考核系统的功能和可靠性等性能指标,分

别利用转子故障模拟系统、联网的300 MW的汽轮机组实验模型和四川东方电气自动控制工程有限公司的试车车间的仿真试验台,对所研制的系统进行反复地实验验证,实验现场如图12,13所示。



图12 模拟汽轮发电机组现场实验

Fig. 12 The field trial of simulated steam turbine generator sets



图13 汽轮发电机组故障诊断系统实验现场

Fig. 13 The test site of fault diagnosis system for turbine generator sets

研制的超临界、超超临界汽轮机组状态监测与故障诊断系统由于其小型化、低功耗、低成本和高可靠度等特点,在性能和价格方面与国内外同类产品相比具有优势,总体技术水平已达到国际先进水平。已在华能灵武热电厂、国电河北龙山发电公司、内蒙古京隆发电公司、宁夏京能宁东发电公司等数十家国内大型发电公司的多项工程中应用,取得了良好效果,并与主机厂配套出口印度、越南。

5 结论

1) 多域耦合、多故障复合、随机激励、强非线性等背景下的故障建模与分析,揭示复杂系统的故障机理,是提高故障诊断准确率的重要途径。

2) 利用数据挖掘、大数据理论、特征提取技术,研究获取故障完备知识和敏感特征的方法,是解决复杂故障诊断问题的基础。

3) 研究多域多维故障特征向量与故障集向量

的非线性映射关系、解决故障模式的识别,是故障诊断实际应用的关键问题。

参 考 文 献

- [1] 广州日报. 淡定机长开过15年轰炸机[EB/OL]. http://gzdaily.dayoo.com/html/2014-11/15/content_2797891.htm. 2014-11-15/2014-11-16.
- [2] 国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020年)[Z]. 北京,2006.
- [3] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械工程学学科发展战略报告(2011-2020)[M]. 北京:科学出版社,2010:127-128.
- [4] Silani M, Ziaei-Rad S, Talebi H. Vibration analysis of rotating systems with open and breathing cracks[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(24): 9907-9921.
- [5] Han Qinkai, Chu Fulei. Parametric instability of a rotor-bearing system with two breathing transverse cracks[J]. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 2012, 36: 180-190.
- [6] Han Qinkai, Zhao Jingshan, Lu Wenxiu, et al. Steady-state response of a geared rotor system with slant cracked shaft and time-varying mesh stiffness[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2014, 19(4): 1156-1174.
- [7] 何成兵, 顾煜炯, 宋光雄. 裂纹转子弯扭耦合振动非线性特性分析[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(9): 33-38. He Chengbing, Gu Yujiong, Song Guangxiong. Non-linear analysis on coupled flexural and torsional vibrations of cracked rotor[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(9): 33-38. (in Chinese)
- [8] Chouksey M, Dutt J K, Modak S V. Modal analysis of rotor-shaft system under the influence of rotor-shaft material damping and fluid film forces[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2012, 48: 81-93.
- [9] 吴昭同, 杨世锡. 旋转机械特征提取与模式分类新方法[M]. 北京:科学出版社, 2011: 265-297.
- [10] 陈予恕. 机械故障诊断的非线性动力学原理[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(1): 25-34. Chen Yushu. Nonlinear dynamical principle of mechanical fault diagnosis[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(1): 25-34. (in Chinese)
- [11] 王炳成, 任朝晖, 闻邦椿. 基于非线性多参数的旋转机械故障诊断方法[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(5): 63-69. Wang Bingcheng, Ren Chaohui, Wen Bangchun. Fault

- diagnoses method of rotating machines based on non-linear multi-parameters[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(5): 63-69. (in Chinese)
- [12] 马辉,李焕军,刘杨,等. 转子系统耦合故障研究进展与展望[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(17): 1-11.
Ma Hui, Li Huanjun, Liu Yang, et al. Review and prospect for research of coupling faults in rotor systems[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(17): 1-11. (in Chinese)
- [13] Gan Chunbiao, Lei Hua. Stochastic dynamical analysis of a kind of vibro-impact system under multiple harmonic and random excitations[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2011, 330(10): 2174-2184.
- [14] Gan Chunbiao, Lei Hua. A new procedure for exploring chaotic attractors in nonlinear dynamical systems under random excitations[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2011, 27(4): 593-601.
- [15] Gan Chunbiao, Yang Shixi, Lei Hua. Noisy scattering dynamics in the randomly driven Hénon-Heiles oscillator[J]. *Physical Review E*, 2010, 82(6): 1-10.
- [16] Gan Chunbiao, Wang Qingyun, Perc M. Torus breakdown and noise-induced dynamics in the randomly driven morse oscillator [J]. *Journal of Physics A-Mathematical and Theoretical*, 2010, 43(12): 1-13.
- [17] Gan Chunbiao, Wei Yimin, Yang Shixi. Longitudinal wave propagation in a rod with variable cross-section [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2014, 333(2): 434-445.
- [18] Gan Chunbiao, Wei Yimin, Yang Shixi. Longitudinal wave propagation in a multi-step rod with variable cross-section[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2014: 1-16.
- [19] 钟秉林,黄仁. *机械故障诊断学*[M]. 3版. 北京:机械工业出版社, 2006: 134-256.
- [20] 杨苹,陈武. 基于自组织模糊神经网络的汽轮发电机组振动故障诊断系统[J]. *电力系统自动化*, 2006, 30(14): 66-70.
Yang Ping, Chen Wu. Fault Diagnosing system for turbo-generator unit based on self-organized fuzzy neural network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(14): 66-70. (in Chinese)
- [21] Jiang Lingli, Liu Yilun, Li Xuejun, et al. Degradation assessment and fault diagnosis for roller bearing based on AR model and fuzzy cluster analysis[J]. *Shock and Vibration*, 2011, 18(1-2): 127-137.
- [22] Shen Zhongjie, Chen Xuefeng, Zhang Xiaoli, et al. A novel intelligent gear fault diagnosis model based on EMD and multi-class TSVM[J]. *Measurement*, 2012, 45(1): 30-40.
- [23] de Lautour O R, Omenzetter P. Damage classification and estimation in experimental structures using time series analysis and pattern recognition[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2010, 24(5): 1556-1569.
- [24] Li Zhong, Han Junjie, Sun Jie, et al. Fault recognition method based on independent component analysis and hidden Markov model[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2007, 13(2): 125-137.
- [25] 杨世锡,焦卫东,吴昭同. 基于独立分量分析特征提取的复合神经网络故障诊断法[J]. *振动工程学报*, 2005, 17(4): 438-442.
Yang Shixi, Jiao Weidong, Wu Zhaotong. Multi-neural networks for faults diagnosis based on ICA feature extraction[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2005, 17(4): 438-442. (in Chinese)
- [26] 张亮,张凤鸣. 装备健康管理中的传感器优化配置问题研究[J]. *传感器与微系统*, 2008, 27(7): 18-20.
Zhang Liang, Zhang Fengming. Research on optimal sensor placement in equipment health management[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2008, 27(7): 18-20. (in Chinese)
- [27] Yi Tinghua, Li Hongnan, Zhang Xudong. A modified monkey algorithm for optimal sensor placement in structural health monitoring[J]. *Smart Materials and Structures*, 2012, 21(10): 1-9.
- [28] 刘睿,周军,李鑫,等. 基于 DG 的航天器部件可诊断性测点配置方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2014, 36(10): 2013-2017.
Liu Rui, Zhou Jun, Li Xin, et al. Design of sensor location based on directed graph of the aircraft components on diagnostic criteria[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(10): 2013-2017. (in Chinese)
- [29] Pourali M, Mosleh A. A functional sensor placement optimization method for power systems health monitoring[J]. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 2013, 49(4): 1711-1719.
- [30] 陈仲生,杨拥民,李聪,等. 基于振动传递符号有向图的齿轮箱嵌入式传感器优化配置模型与算法[J]. *航空动力学报*, 2009(10): 2384-2390.
Chen Zhongsheng, Yang Yongmin, Li Cong, et al. Model and algorithm of optimal embedded sensors placement for gearboxes based on signed directed graph of vibration propagation[J]. *Journal of Aero-*

- space Power, 2009 (10):2384-2390. (in Chinese)
- [31] 王荣, 贾民平, 刘桂兴. 状态监测振动传感器优化布置理论及应用[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2011, 41(1):77-81.
- Wang Rong, Jia Minping, Liu Guixing. Theory and application of sensor placement in condition monitoring [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2011, 41(1):77-81. (in Chinese)
- [32] Cao Hongrui, Niu Linkai, He Zhengjia. Method for vibration response simulation and sensor placement optimization of a machine tool spindle system with a bearing defect[J]. Sensors, 2012, 12(7):8732-8754.
- [33] 于保华, 杨世锡, 周晓峰. 基于故障-测点互信息的传感器多目标优化配置[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2012, 46(1):156-162.
- Yu Baohua, Yang Shixi, Zhou Xiaofeng. Optimization of sensor allocation based on fault-measurement point mutual information[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2012, 46(1): 156-162. (in Chinese)
- [34] 于保华, 杨世锡, 周晓峰. 一种基于 MFM 的传感器优化配置方法[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(2):282-286.
- Yu Baohua, Yang Shixi, Zhou Xiaofeng. Optimization method for sensor allocation based on MFM[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(2):282-286. (in Chinese)
- [35] 陈敏, 胡葛庆, 秦国军, 等. 参数调节随机共振在机械系统早期故障检测中的应用[J]. 机械工程学报, 2009, 45(4):131-135.
- Chen Min, Hu Niaoqing, Qin Guojun, et al. Application of parameter-tuning stochastic resonance for detecting early mechanical faults[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(4):131-135. (in Chinese)
- [36] 胥永刚, 冯明时, 马海龙, 等. 微弱信号的差分振子检测方法[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(2):224-230.
- Xu Yonggang, Feng Mingshi, Ma Hailong, et al. Method of weak signal detection based on differential oscillator[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(2):224-230. (in Chinese)
- [37] 张弦, 王宏力. 进化小波消噪方法及其在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. 机械工程学报, 2010 (15):76-81.
- Zhang Xian, Wang Hongli. Evolutionary wavelet denoising and its application to ball bearing fault diagnosis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010 (15): 76-81. (in Chinese)
- [38] Du Xianfeng, Li Zhijun, Bi Fengrong, et al. Source separation of diesel engine vibration based on the empirical mode decomposition and independent component analysis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(3):557-563.
- [39] Sun Tsungying, Liu Chancheng, Tsai S J, et al. Blind source separation with dynamic source number using adaptive neural algorithm[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(5):8855-8861.
- [40] 李志农, 刘卫兵, 易小兵. 基于局域均值分解的机械故障欠定盲源分离方法研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(7):97-102.
- Li Zhihong, Liu Weibing, Yi Xiaobing. Underdetermined blind source separation method of machine faults based on local mean decomposition[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(7):97-102. (in Chinese)
- [41] Cheng Wei, Zhang Zhousuo, Lee S, et al. Investigations of denoising source separation technique and its application to source separation and identification of mechanical vibration signals[J]. Journal of Vibration and Control, 2013, 20(14):2100-2117.
- [42] Hou Shumin, Liang Ming, Li Yourong. An optimal global projection denoising algorithm and its application to shaft orbit purification[J]. Structural Health Monitoring, 2011, 10(6):603-606.
- [43] 叶红仙, 杨世锡, 杨将新. 基于 EMD-SVD-BIC 的机械振动源数估计方法[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(3):330-334.
- Ye Hongxian, Yang Shixi, Yang Jiangxin. Mechanical vibration source number estimation based on EMD-SVD-BIC[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(3): 330-334. (in Chinese)
- [44] 周晓峰, 杨世锡. 基于负熵最大化的机械振源半盲分离方法[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2011, 45(5):846-850.
- Zhou Xiaofeng, Yang Shixi. Semi-blind sources separation of mechanical vibrations base on maximization of negentropy[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2011, 45(5):846-850. (in Chinese)
- [45] Feng Zhipeng, Liang Ming, Chu Fulei. Recent advances in time-frequency analysis methods for machinery fault diagnosis: A review with application examples[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 38(1):165-205.
- [46] Antoni J. Cyclostationarity by examples[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(4):987-1036.

- [47] Sun Hailiang, He Zhengjia, Zi Yanyang, et al. Multi-wavelet transform and its applications in mechanical fault diagnosis-a review[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 43(1):1-24.
- [48] Cai Gaigai, Chen Xuefeng, He Zhengjia. Sparsity-enabled signal decomposition using tunable Q-factor wavelet transform for fault feature extraction of gearbox [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 41(1):34-53.
- [49] 雷亚国. 基于改进 Hilbert-Huang 变换的机械故障诊断[J]. 机械工程学报, 2011, 47(5):71-77.
Lei Yaguo. Machinery fault diagnosis based on improved Hilbert-Huang transform[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(5):71-77. (in Chinese)
- [50] Jiang Hongkai, Li Chengliang, Li Huaxing. An improved EEMD with multiwavelet packet for rotating machinery multi-fault diagnosis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 36(2):225-239.
- [51] 陈向民, 于德介, 李蓉. 基于阶次解调谱的变速齿轮箱复合故障诊断方法[J]. 振动工程学报, 2013, 26(6):951-959.
Chen Xiangmin, Yu Dejie, Li Rong. A compound faults diagnosis method for variational-speed gearbox based on order tracking demodulation spectrum [J]. Journal of Vibration Engineering, 2013, 26(6):951-959. (in Chinese)
- [52] 陈向民, 于德介, 李蓉. 齿轮箱复合故障振动信号形态分量分析[J]. 机械工程学报, 2014, 50(3):108-115.
Chen Xiangmin, Yu Dejie, Li Rong. Analysis of gearbox compound fault vibration signal using morphological component analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(3):108-115. (in Chinese)
- [53] 陈向民, 于德介, 李蓉. 基于形态分量分析与阶次跟踪的齿轮箱复合故障诊断方法[J]. 航空动力学报, 2014, 29(1):225-232.
Chen Xiangmin, Yu Dejie, Li Rong. Compound fault diagnosis method for gearbox based on morphological component analysis and order tracking[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(1):225-232. (in Chinese)
- [54] Yunusa-Kaltungo A, Sinha J. Combined bispectrum and trispectrum for faults diagnosis in rotating machines[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2014, 228(4):419-428.
- [55] 曹冲锋, 杨世锡, 杨将新. 基于白噪声统计特性的振动模式提取方法[J]. 机械工程学报, 2010(3):65-70.
Cao Chongfeng, Yang Shixi, Yang Jiangxin. Vibration mode extraction method based on the characteristics of white noise [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010(3):65-70. (in Chinese)
- [56] 曹冲锋, 杨世锡, 杨将新. 一种基于瞬时能量分布特征的汽轮发电机组转子故障诊断新方法[J]. 振动与冲击, 2009, 28(3):35-39.
Cao Chongfeng, Yang Shixi, Yang Jiangxin. A new fault diagnosis method for a rotor of a steam turbine generator set based on instantaneous energy distribution characteristics [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(3):35-39. (in Chinese)
- [57] Xiong Xin, Yang Shixi, Gan Chunbiao. A new procedure of extracting fault feature of multi-frequency signal from rotating machinery[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 32:306-319.
- [58] 肖玲. 本特利 3500 系统在大型机组中的应用[J]. 自动化应用, 2013(11):53-54.
Xiao Ling. Application of the Bentley 3500 system in large units [J]. Automation Application, 2013(11):53-54. (in Chinese)
- [59] 王源. 基于模型的 Plant Monitor 早期预警与故障诊断系统分析[J]. 工业控制计算机, 2013(1):47-48.
Wang Yuan. Analysis of early warning and fault diagnosis system of model-based plant monitor [J]. Industrial Control Computer, 2013(1):47-48. (in Chinese)



第一作者简介:杨世锡,男,1968年1月生,博士、教授、博士生导师,浙江省151人才。主要研究方向为机械振动分析、智能检测、信号处理、机械故障诊断等。兼任中国振动工程学会理事、全国高校机械工程测试技术研究会常务副理事长、动态测试专业委员会常务副主任委员、中国自动化学会技术过程的故障诊断与安全性专业委员会、中国机械工程学会设备与维修工程学会委员、浙江省振动工程学会理事等学术职务。发表论文150余篇,出版专著1本,参编教材3本,获国家发明专利10余项,获省部级科技二等奖1项。

E-mail: yangsx@zju.edu.cn

