DOI: 10.3901/JME.2013.01.063

机械故障诊断基础研究“何去何从”

王国彪¹ 何正嘉² 陈雪峰² 赖一楠¹

(1. 国家自然科学基金委员会 北京 100085;

2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 西安 710049)

摘要: 机械故障诊断是一门起源于 20 世纪 60 年代的新兴学科,其突出特点是理论与工程实际应用紧密结合。该学科经过半个世纪的发展逐渐成熟,在信号获取与传感技术、故障机理与征兆联系、信号处理与诊断方法、智能决策与诊断系统等方面形成较完善的理论体系,涌现了如全息谱诊断、小波有限元裂纹动态定量诊断等原创性理论成果,在机械、冶金、石化、能源和航空等行业取得了大量卓有成效的工程应用。但是,该学科也还存在着故障机理研究不足、诊断方法有限和智能诊断系统薄弱等问题。今后机械故障诊断学科的基础研究和源头探索究竟应该如何开展,未来的发展方向是怎样,将是一个非常急切且需要深入探讨的问题。在对国内外机械故障诊断学科基础理论和工程实际应用研究现状分析的基础上,指出目前该学科基础研究存在的问题和今后研究突破的方向。

关键词: 故障诊断 故障机理 特征提取 寿命预测

中图分类号: TH17

Basic Research on Machinery Fault Diagnosis—What is the Prescription

WANG Guobiao¹ HE Zhengjia² CHEN Xuefeng² LAI Yinan¹

(1. National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085;

2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract: From the 1960s, the machinery fault diagnosis has rapidly developed as an emerging subject, whose prominent feature lies in close combination of theoretical research and engineering practical application. Over the past half a century, the machinery fault diagnosis has been developed into its maturity, which results in relatively comprehensive theoretical framework on signal acquisition and sensing technology, fault mechanism and symptom relationship, signal processing and diagnosis method as well as intelligent decision and diagnosis system. This subject has also made several original theoretical achievements, such as holospectrum diagnosis and crack dynamic quantitative diagnosis with wavelet finite element. Meanwhile, it has been effectively implemented in a number of engineering applications, such as machinery, metallurgy, petrochemical industry, energy and aviation, etc. However, there still exist some shortcomings in this subject, such as research blanks in fault mechanism, limitation in diagnosis methods, weakness in intelligent diagnosis equipment. Therefore, how to develop the basic research and explore the source of machinery fault diagnosis? What are development directions in the future? These are urgent problems needed to be addressed. Based on the review of the recent researches on basic theory of machinery fault diagnosis and its engineering practical application at home and abroad, the deficiency of the basic research and the breakthrough potentials of machinery fault diagnosis are presented.

Key words: Fault diagnosis Fault mechanism Feature extraction Life prediction

0 前言

机械故障诊断技术是监测、诊断和预示连续运行机械设备的状态和故障,保障机械设备安全运行的一门科学技术,也是 20 世纪 60 年代以来借助多种学科的现代化技术成果迅速发展形成的一门新兴学科。其突出特点是理论与工程实际应用紧密

结合^[1]。

机械故障诊断对于保障设备安全运行意义重大。机械设备一旦出现事故,将带来巨大的经济损失和人员伤亡。国内外因机械设备故障而引起的灾难性事故屡有发生^[2],例如我国三峡工地塔带机断裂事故、美国哥伦比亚号载人航天飞机失事、美国空军 F15 战机空中解体事件等。正所谓“千里长堤,溃于蚁穴”,若能准确及时识别设备运行过程中故障的萌生和演变,对保障机械系统安全运行,减少或

避免重大灾难性事故具有非常重要的意义。为此,美国国家航空航天局(NASA)开展了为期 10 年的航空安全专项研究(Aviation safety program, AvSP),并将新的复合材料结构长期服役中性能蜕变、损伤演化和疲劳等的检测、预测和预防问题列为重要的研究内容之一。我国国家中长期规划(2006~2020 年)和《机械工程学科发展战略报告(2011~2020 年)》,均将重大产品和重大设施运行可靠性、安全性、可维护性关键技术列为重要的研究方向^[3-5]。

机械故障诊断是国内外研究热点。近年来,故障诊断技术在国内外受到显著重视,国内外很多学者开展了相关研究工作,本文于 2012 年 6 月利用 Google 学术和 Web of science 数据库进行检索:在 Google 学术搜索中,2008~2012 年标题中含有 fault diagnosis 的文献有 8 070 余篇,标题中含有 damage detection 的文献有 1 900 篇;在 Web of science 数据库中,2008~2012 年标题中含有 fault diagnosis 的文献有 6 127 余篇,其中我国占 46.875%,美国占 14.722%,标题中含有 damage detection 的文献有 928 余篇,美国占 26.078%,我国占 25.862%。不仅如此,许多著名学术组织和研究机构分别就故障诊断前沿问题召开国际会议。设备状态监测与故障诊断(Condition monitoring and diagnosis, CMD)国际学术会议两年一届,由 IEEE 等国际性学术组织技术支持;状态监测与诊断工程管理(Condition monitoring and diagnostic engineering management, COMADEM)国际会议是每年举行一次的,至 2012 年已举办 25 届;机械失效预防技术(Machinery failure prevention technology, MFPT)是致力于工程领域健康管理及失效预防技术研究的国际会议,每年举办一次,至今已具有四十年的发展历程。在国内,中国振动工程学会、中国机械工程学会等均每隔两年召开故障诊断会议,旨在加强学术交流和推广成果应用。

1 国内外研究现状

自 20 世纪 60 年代美国故障诊断预防小组和英国机器保健中心成立以来,故障诊断技术逐步在世界范围内推广普及,全球科研和工程领域工作者在信号获取与传感技术、故障机理与征兆联系、信号处理与特征提取、识别分类与智能决策等方面开展了积极的探索,取得了丰硕的成果。

1.1 在信号获取与传感技术方面

可靠的信号获取与先进的传感技术,是机械故

障诊断的前提。1968 年,美国的 SOHRE^[6-7]根据 600 余次事故分析经验,归纳总结了振动特征分析表;在此基础上, Mosanto 石油化工公司 JACKSON^[8]编写了旋转机械振动分析征兆一般变化规律表,国内外旋转机械状态监测和故障诊断分析和研究人员广泛引用。2009 年美国三院院士、西北大学机械工程系 ACHENBACH 教授^[9]对结构健康监控研究范畴作了重要论述,将传感技术等列为重要研究内容;美国斯坦福大学的 KIREMIDJIAN^[10]开展了传感网络方面的研究;韩国 YUN 等^[11]开展了传感布置的研究;日本东京大学 TAKEDA 等^[12]在复合材料结构健康监测传感方面取得了显著的研究成果;王强等^[13]对结构健康监测中的压电阵列技术进行了研究。

1.2 在故障机理与征兆联系方面

弄清故障的产生机理和表征形式,是机械故障诊断的基础。2008 年意大利学者 BACHSCHMID 等^[14]为纪念裂纹研究 50 周年,在国际期刊 MSSP 上客籍主编了一期裂纹研究综述文章,从裂纹转子模型、裂纹机理等多方面做了相关的论述;美国 Los Alamos 国家实验室的工程研究所 FARRAR 等在结构健康监测、预测方面做了连续卓有成效的理论与试验研究;德国柏林科技大学 ROBERT^[15]深入研究了裂纹转子的动力学行为;日本九州工业大学丰田立夫和三重大学 CHEN 等^[16]在故障机理与特征提取等实用技术方面进行大量研究;印度理工学院的 SEKHAR 等^[17]学者研究了转子裂纹动力学行为及其辨识方法;闻邦椿和陈予恕^[18-19]基于混沌和分岔理论对轴系非线性动力学行为进行了深入研究;钟掘等^[20]研究了现代大型复杂机电系统耦合机理问题;褚福磊等^[21-22]在小波变换理论研究及转子碰摩故障机理等方面取得了显著的进展。

1.3 在信号处理与诊断方法方面

从运行动态信号中提取出故障征兆,是机械故障诊断的必要条件。2006 年,加拿大长期从事维护与可靠性研究的 ANDREW 等^[23]综述了视情维护中的诊断与维护,指出信号处理和故障诊断等方法需要继续深入研究;2011 年马来西亚的 MOHAMMAD 等^[24]归纳了各种常见转子故障类型,讨论了各种状态监测与信号处理方法的原理与特点,总结了当前转子故障诊断中取得的各种研究成果;美国佐治亚理工学院 GEBRAEEL 等^[25]在机床制造与寿命预测的研究中提出了新思路;美国斯坦福大学 IHN^[26]在复合材料结构健康监测方面取得了显著的研究成果;美国康涅狄格大学 ROBERT 与东南大学 YAN

等^[27-28]出版了故障诊断的小波专著; 美国佐治亚理工学院智能控制系统实验室 VACHTSEVANOS 教授等针对直升机的诊断开展研究工作; 英国曼彻斯特和哈德菲尔德大学的 BALL 所在团队长期从事故障诊断的研究工作^[29]; 英国谢菲尔德大学、南安普顿大学、剑桥大学等长期致力于设备在线监测与损伤识别的研究工作^[30]; 法国贡皮埃涅技术大学 ANTONI^[31]一直致力于故障信号处理与特征提取的底层研究; 希腊佩特雷大学 FASSOIS 在随机振动应用于结构健康监测方面进行研究。加拿大阿尔伯塔大学 LEI 等^[32]对齿轮等典型零部件的故障诊断方法进行了深入研究; 澳大利亚悉尼大学 SU 等^[33]长期从事复合材料健康监测研究并提出了数码指纹的新概念; 澳大利亚新威尔士大学 ANTONI 等^[34]一直致力于故障信号处理与特征提取的底层研究; 杨叔子等^[35]在先进制造技术和故障诊断新技术等方面取得一系列成果; 屈梁生、何正嘉等^[36-38]长期致力于全息谱、小波变换等先进故障诊断技术的底层研究; 张莹等^[39-40]采用随机共振技术为早期微弱故障检测开辟了新途径; 陈进等^[41]在信号处理技术与故障诊断专家系统等方面进行了大量研究; 丁康^[42]长期以来致力于研究快速傅里叶变换 (Fast Fourier transform, FFT) 信号处理方法。

1.4 在智能决策与诊断方面

智能故障诊断是模拟人类思维的推理过程, 通过有效地获取、传递和处理诊断信息, 能够模拟人类专家, 以灵活的诊断策略对监测对象的运行状态和故障做出智能判断和决策。智能故障诊断具有学习功能和自动获取诊断信息对故障进行实时诊断的能力。复杂机械设备故障的智能诊断技术与实用诊断系统, 是实现机械故障诊断的应用关键。2001 年, 肖健华^[43]研究了故障诊断中的支持矢量机理论;

2002 年, 张周锁^[44]对基于支持矢量机的多故障分类器进行了研究; 2007 年韩国学者 WIDODO 等^[45]综述了支持矢量机在机械故障诊断中的研究进展和前景。2009 年美国俄勒冈州立大学 KRUZIC 教授^[46]在《Science》著文“Predicting fatigue failures”强调结构疲劳寿命预测研究的重要性; 2009 年澳大利亚学者 HENG^[47]综述了旋转机械故障诊断技术研究进展, 强调结合真实工况开展故障诊断研究的重要性; 美国密执安大学倪军、辛辛那提大学李杰等在美国自然科学基金(NSF)的资助下, 联合工业界共同成立了“智能维护系统(IMS)中心”, 旨在研究机械设性能衰退分析和预测性维护方法^[48]; 高金吉^[49]归纳总结了旋转机械常见故障机理及其征兆和自愈诊断方法, 提出了往复压缩机诊断的冲击信号分析法等; 杨绍普、熊诗波、杨世锡、黄文虎、徐小力、秦树人、韩捷、于德介和李学军等^[50-51]长期从事机械状态监测与故障诊断技术的研究。国内在诊断系统的研发方面取得了很好的成果。

在国内, 国家自然科学基金委员会(NSFC)非常重视对机械故障诊断领域优势项目的培育、优选和资助工作。目前, 该领域的项目申请主要集中在 NSFC 机械工程学科(E05 代码)的 E0503(机械动力学)、E0504(机械结构强度学)、E0510(制造系统与自动化)和 E0511(机械测试理论与技术)等 4 个二级代码。据统计, 1986~2011 年 E05 代码共资助机械故障诊断领域面上项目、青年科学基金和地区科学基金项目 440 项, 资助经费 16 170.4 万元。资助数量和经费从 2009 年开始有较大增长, 2011 年共计资助 91 项, 资助经费总计 6 154 万元。此外, 机械工程学科在“十五”至“十二五”期间, 资助与机械故障诊断直接相关的重点项目 6 项(项目清单如下表所示), 资助经费 1 330 万元。

表 机械故障诊断领域资助的重点项目一览表

项目批准号	申请代码	项目名称	负责人	承担单位	资助金额/万元	时间
50335030	E050302	大型复杂机电系统早期故障智能预示的理论与技术	何正嘉	西安交通大学, 太原理工大学, 上海交通大学	200	2004.1~2007.12
50635010	E050302	机械复杂系统建模仿真、运行优化和自愈调控理论与方法	高金吉	北京化工大学	150	2007.1~2010.12
50935005	E050302	基于光纤光栅传感的复杂机械系统损伤动态监测基础理论与关键技术	周祖德	武汉理工大学, 华中科技大学, 沈阳发动机设计研究所	200	2010.1~2013.12
51035007	E050302	关键设备故障预示与运行安全保障的新理论和新技术	何正嘉	西安交通大学, 太原理工大学, 上海交通大学	250	2011.1~2014.12
51035008	E050302	基于局域强信号与位域空间变换的关键传动设备故障预示与诊断方法研究	邵毅敏	重庆大学, Queen's University, University of Huddersfield	240	2011.1~2014.12
51135001	E0503	透平机械复杂机电系统动力学行为与振动、噪声靶向抑制原理及方法研究	高金吉	北京化工大学	290	2012.1~2016.12

2 机械故障诊断基础研究的突出进展

近年来国内外学者在机械故障诊断的基础研究和重大工程应用方面取得了突出进展,国外重点以转子故障机理和经验模式分解方法进行介绍;国内典型的原创性成果如取得了全息谱、振动故障治理与非线性动力学、小波有限元裂纹诊断和系统故障自愈诊断等,简要介绍如下。

1924 年, NEWKIRK 等^[52-53]发现影响转子稳定性的油膜涡动现象,这是关于转子稳定性研究的较早文献。美国的 MUSZYNSKA 等^[54-56]针对转子-轴承/密封系统,研究了滑动轴承的油膜涡动和油膜振荡机理,并对转子碰摩、气流激振等典型故障机理和特征进行了试验和理论研究,为机械故障的信号特征提取提供了理论基础。在信号特征提取方面,1998 年美籍华人 HUANG 等^[57]创造性地提出了本征模式函数(Intrinsic mode function, IMF)的概念,以及将任意信号分解为本征模式函数组成的新方法-经验模式分解(Empirical mode decomposition, EMD);在此基础上,2004 年 FLANDRIN 等^[58]深入研究随机序列的 EMD 等效滤波器结构,成为一个重要的 EMD 理论研究基础;2009 年 WU 等^[59]提出了总体平均经验模式分解(Ensemble empirical mode decomposition, EEMD)方法,通过添加白噪声使信号在不同尺度上连续,从而有效地解决了模式混淆问题。

屈梁生^[36]首创了机械故障诊断全息谱技术,该技术突破了传统分析方法的局限性,体现了诊断信息全面利用、综合分析的思想。全息谱技术是基于多传感器信息集成和融合的先进诊断方法,它将机组上多个传感器收集到的信息有机地集成和融合在一起,利用了机组的多向振动信号,以及每一方向上振动信号的幅值、频率和相位信息,对频谱上的谱线加以集成而形成的谱图或者轴心轨迹,包括二维全息谱、三维全息谱、提纯轴心轨迹、合成轴心轨迹、滤波轴心轨迹、全息瀑布图、短时复谱和短时轴谱等。典型如全息动平衡技术,利用转频椭圆上初始相点以及三维全息谱的变化,能够确定转子不平衡量的准确配重,从而可以有效减少试重起车次数。目前全息谱诊断技术已经成为旋转机械故障诊断的有效手段,广泛地应用于机械、化工、石化、电力、冶金以及建材等行业中大型旋转机械运行状态的监测和诊断。该技术还出版了《机械故障的全息诊断原理》专著,其研究成果“柔性转子全息现

场动平衡技术及其应用”获得 2003 年国家技术发明二等奖。

陈予恕等针对大型旋转机械的振动故障特点进行综合分析,突破传统以线性理论为基础的故障建模和分析方法,提出了 5 项重大故障的非线性综合治理新技术。对 5 类重大故障,分别进行了非线性动力学建模和分析,揭示了重大振动故障机理与系统参数之间的相关规律,明确了基于系统响应的故障判别特征,并进行了试验验证。5 项综合治理新技术主要包括:① 轴系-支撑内共振综合治理技术;② 偏心-润滑参数综合治理技术;③ 裂纹类型综合治理技术;④ 碰摩综合治理技术;⑤ 轴系不平衡的非线性治理技术。这些治理技术的共同特点:将各种因素综合(交叉、关联和耦合)考虑,以达到对各类故障标本兼治的目的。该技术出版了《机械装备非线性动力学与控制的关键技术》等专著^[60],其研究成果“大型旋转机械和振动机械重大振动故障治理与非线性动力学设计技术”获得 2005 年度国家科技进步二等奖。

何正嘉等^[61-62]提出了基于小波有限元的转子裂纹定量诊断方法。大型回转机械因结构裂纹导致的失效占 80%以上,裂纹这一“隐形杀手”被形象地称为大型回转机械安全运行的“癌症”,具有难发现、易扩展、强破坏的特点,裂纹被称为旋转机械三大故障之一。该技术针对裂纹动态定量诊断,发明了小波有限元构造方法,建立了裂纹位置、裂纹深度与裂纹结构的前三阶固有频率之间的小波有限元模型;发明了运行模态参数识别新方法,提取到重大装备运行中裂纹结构的前三阶固有频率;发明了结构裂纹的动态定量诊断方法,将提取的前三阶固有频率代入小波有限元模型获得三条响应曲线,从而定量诊断出裂纹位置与裂纹深度。该技术成果在电力、石化、军工等领域获得成功应用,同时还出版了《小波有限元及其工程应用》专著,其研究成果“大型回转机械结构裂纹的动态定量诊断技术与应用”获得了 2009 年国家技术发明二等奖。

高金吉^[63]近年来创新提出了装备系统故障自愈诊断原理。装备故障可否在其运行中得到控制或自行消除?故障能否像人和动物的疾病一样可以“自愈”?这一直是一批学者在冥思苦想的学术问题,高院士研究提倡开发一种新的与装备故障作斗争的理论和方法,旨在改变仅靠紧急停车保护机器和完全靠人来检修消除故障的传统方法。这种理论与方法又有别于设备诊断与预知维修技术,是研究使装备系统具备故障自愈功能,在运行中“自行”

消除故障的新原理和新方法。该方法在系统科学的指导下,移植现代医学“自主调理”治疗原理,包括免疫、防御、代偿、自修复和适应等,可以用来指导研究装备自愈原理及工程应用,将为研制出具有自愈功能的新一代智能装备提供科学依据。

3 机械故障诊断基础研究存在的问题

3.1 故障机理研究不足

故障机理是指通过理论或大量的试验分析,得到反映设备故障状态信号与设备系统参数之间的规律^[19],其具体的研究过程如下:首先根据研究对象的物理特点,建立相应数学力学模型;然后通过仿真研究获得其响应特征;再结合试验修正模型,准确获知某一故障的表征。这一反复式的研究过程是故障机理及故障征兆研究的有效手段,也是机械故障诊断技术的重要基础和依据。由于通常获得某一系统较全面的故障数据样本是不现实的,因此只有通过机理仿真研究,才能对系统未知故障和弱故障进行有效的预知和识别,以避免漏诊和误诊。

现有研究中对机械故障机理研究重视不足,很多典型故障特征都是沿用经典的成果,如裂纹转子的倍频响应是 BENTLY 在 20 世纪 80 年代给出的研究结论。故障机理研究不足的主要原因:① 大型装备的故障机理研究通常需要涉及繁多的数学和力学知识,即工程结构的简化和力学模型的建立都存在较大难度;② 故障机理研究需要结合大量的试验验证,一个模型简化合理、故障模拟典型、制造精度保证和测试数据可靠的试验台,往往不是一朝一夕可以实现的;③ 实验室针对单一故障的准确表征,还需要工程实际的验证,单一的故障特征在实际工程中往往可遇而不可求。还有,目前针对旋转机械所建立的故障模拟试验台和理论研究较多,但是针对往复机械和专用机械研究却偏少。

3.2 故障诊断方法有限

机械设备诊断首先要分析设备运转中所获取的各种信号,然后提取信号中的各种特征信息,从中获取与故障相关的征兆,最终利用征兆进行故障诊断。工程应用实践表明不同类型的机械故障在动态信号中会表现出不同的特征波形,如旋转机械失衡振动的波形与正弦波相似;内燃机燃爆振动波形是具有高斯函数包络的高频信号;齿轮和轴承等机械零部件出现剥落和裂纹等故障时,往复机械的气缸、活塞、气阀磨损缺陷,其运行中产生冲击振动呈现接近单边振荡衰减的响应波形,而且随着损伤

程度的发展,其特征波形也会发生改变。近年来,广泛应用的傅里叶变换、短时傅里叶变换、小波变换、第二代小波变换和多小波变换等可以说都是基于内积原理的特征波形基函数信号分解,旨在灵活运用与特征波形相匹配的基函数去更好地处理信号,提取故障特征,从而实现故障诊断^[64]。

故障诊断方法研究中提出了许多有效的“望闻问测”诊断手段,但是针对早期故障、微弱故障、复合故障、系统故障等的诊断方法还存在不足,可靠的诊断方法有限。机械设备运行过程中不可避免产生损伤和出现早期故障,它具有潜在性和动态响应的微弱性;复合故障和系统故障由于多因素耦合和传递路径复杂,往往导致单一的信号处理方法难以有效溯源故障成因。也正因为如此,导致如航空发动机振动故障诊断至今没有很好的解决方法。

3.3 智能诊断系统薄弱

随着机械装备的大型化、复杂化、高速化、自动化和智能化,迫切需求融合智能传感网络、智能诊断算法和智能决策预示的智能诊断系统、专家会诊平台和远程诊断技术等。不同类型的智能诊断方法针对某一特定的、相对简单的对象进行故障诊断时有其各自的优点和不足,例如专家系统诊断技术存在知识获取“瓶颈”,缺乏有效的诊断知识表达方式,推理效率低;神经网络诊断技术需要的训练样本获取困难;模糊故障诊断技术往往需要由先验知识人工确定隶属函数及模糊关系矩阵,但实际上获得与设备实际情况相符的隶属函数及模糊关系矩阵存在许多困难。

现有的智能诊断系统其诊断能力还比较薄弱。虽然所采用的人工智能诊断方法很多,但大部分智能方法都需要满足一定的假设条件和人为设置一定的参数,因此研究中通过仿真验证故障诊断算法的较多。于是智能诊断方法往往给留人下“黑匣子”和“因人而异”的印象,诊断方法的推广性得不到很好的验证。这也就是说,要真正实现智能诊断,只靠单纯一两种方法是很难满足要求的,其应用也会有一定局限。如果将几种性能互补的智能技术适当组合、取长补短、优势互补,其解决问题的能力会大大提高。因此,需要重点研究影响现有人工智能诊断方法推广使用的关键环节,建立在故障机理等底层基础研究的人工智能方法,才能形成知识丰富、推理正确、判断准确、预示合理、结论可靠的设备智能诊断与预示的实用技术。要极力避免只简单地借助人工智能方法和技术进行设备智能诊断的应用,而忽视底层基础研究。没有底层的机械故障

诊断基础研究,上层的人工智能方法和技术就难以解决实际的工程问题。

4 几点思考

综合上述现阶段我国机械故障诊断基础研究存在的问题,总结起来有“八多八少”现象:研究故障表象多,研究故障机理少;研究旋转机械多,研究往复机械少;研究通用机械多,研究专用机械少;研究单一方法多,研究综合诊断少;研究部件故障多,研究系统故障少;研究显著故障多,研究微弱故障少;研究仿真数据多,研究工程数据少。为此,机械故障诊断的基础研究必须实现以下 5 个方面的突破。

4.1 实现由表象研究到机理研究的突破

基于“所见即所得”的表象研究方法,只能对机械故障的解释和诊断获得一知半解;故障机理是反映故障本质的根本原因,加强故障机理研究是认识客观事物的科学实践。传统的机械设备故障诊断多以研究已有故障的信号特征为基础,对于新的设备故障预警便因没有故障案例可循而不免漏诊^[65]。

随着科学技术的迅速发展,新颖、大型和高速机械设备层出不穷,如风电装备、工业燃气轮机、铁路动车与高铁、飞行器动力传动和大功率盾构机等。针对这些新型旋转和往复机械的机电液系统,其特殊服役环境下系统的故障机理和故障演化动力学还有待于深入地分析及研究。例如针对典型的不对中故障,建立数学和力学模型,搭建试验平台,研究不对中所对应的故障征兆和频谱特征;例如利用间隙机构动力学的研究成果,研究不同间隙大小对应的信号频谱特征,甚至建立起间隙大小和信号特征的定量关系,用于指导机构间隙的故障诊断。因此,今后故障诊断无疑将要更加注重机理方面的研究。

4.2 实现由定性研究到定量研究的突破

故障诊断的研究工作通常可以划分为四个层次:首先确定故障是否存在,其次是能够确定故障的位置,第三层次是能够确定故障的损伤程度,第四层次是剩余寿命预测与可靠性评估。如果将第一、第二层次的工作称为定性研究的话,那么第三、第四层次就是定量研究。定性研究是定量研究的重要基础,定量研究的第三和第四层次的研究紧密相连,这是因为缺少准确可靠的初始故障尺寸会导致基于材料特性的剩余寿命预测等技术成为无源之水。

故障的定量诊断需要识别损伤等故障的部位、

种类以及程度,从而揭示设备故障状态的发生、发展及演化规律,从而为机械设备的安全性分析、可靠性评估和寿命预测提供基础性依据。针对重大装备典型结构,如航空发动机转子、大型飞机机身、大型风力机齿轮箱和典型复合材料结构,首先应开展裂纹损伤等故障的动态在线诊断;然后,在裂纹损伤定量诊断的基础上,研究模型与数据驱动的状态退化识别与剩余安全寿命预测、再制造零件的服役寿命评估与预测等。可见,今后故障诊断的研究重点将会从定性研究转向定量研究。

4.3 实现由单故障研究到群故障研究的突破

单故障诊断目前主要是依靠信号处理方法,且引发的振动信号特征与其他干扰成分的频谱容易区分。单故障诊断通常容易实现,但是往往在推广使用时,其精度不高、泛化能力不强和通用性较差,因而制约了其在工程中的应用。况且,由于故障的原因往往不是单一的,特别是旋转机械故障是多种故障因素耦合的结果,因此,盲目地以单一故障对机械装备做以诊断会造成漏判甚至误判。

机械装备核心部件的磨损、剥落、裂纹等故障往往同时出现或者先后级联发生,其振动信号往往并非多个单故障征兆信号的简单叠加,而是表现为故障特征信号相互耦合,这种群故障的产生给故障确诊带来更大的困难。因此,群故障诊断将会是今后故障诊断又一发展方向。群故障诊断实际上是一个多故障的模式识别问题,需要研究群故障耦合特征的一次性分离和诊断方法。

4.4 实现由超强故障研究到微弱故障研究的突破

超强故障意味着机械故障已发展到中晚期,故障特征明显,机械零部件性能已严重退化,若不及时采取处理手段,可能造成重大事故。而针对此时机械设备状态的诊断,故障特征容易提取,故障状态也容易识别,虽然诊断及时也可以避免重大事故的发生。但是机械故障诊断的意义在于提供“治疗方案”,而不是开具“死亡证明”。而超强故障诊断(晚期故障)无疑就是对机械设备开“死亡证明”,而我们需要的是及时掌握设备的性能退化过程以及故障的动态演化过程,对其故障的发生发展做到防微杜渐,并针对不同的故障状态,采取适当的补救措施。也就是说,从超强故障诊断研究转向微弱故障诊断研究势在必行。

微弱故障通常指处于早期阶段的微弱故障或潜在故障,具有症状不明显、特征信息微弱等特点;也指机械故障虽然发展到中晚期,但故障特征被强噪声淹没,致使故障特征微弱,不易识别。因此,

今后微弱故障诊断需要研究有效的微弱故障特征增强方法和强噪声背景下故障特征提取方法; 同时为了准确提取微弱故障特征, 还需要了解故障演化过程与征兆间的映射关系, 从而保证微弱故障特征提取的准确性和有效性。

4.5 实现由零部件故障研究到机械系统故障研究的突破

机械设备的零部件故障诊断主要是针对机械系统中的关键零部件, 如齿轮、轴承和转子等, 进行监测并诊断其服役故障。然而, 机械系统的相互作用才是故障产生的本质原因^[63], 这种零部件级的故障诊断往往只能诊断出诱发性故障, 却不能根治机械系统的故障隐患。因此, 今后的研究应该注重将机械设备看作多层次、非线性的复杂整体, 首先建立多维和多参数复杂系统模型, 然后从系统的整体性和系统的联系性出发, 深入研究系统内部各组成部分的动力特性、相互作用和依赖关系, 得出零部件故障的初步结论, 接着探索系统故障的根源, 找出原发性故障, 从而根除机械设备故障隐患。

5 结论

在国家自然科学基金长期稳定的支持下, 国内机械故障诊断领域在理论基础、框架体系和工程应用等方面不断发展完善, 取得大量具有自主知识产权的研究成果。随着国家进一步加大对科学基金的投入, 未来该领域基础研究应该做什么、如何做等问题需要进一步地思考和总结。为进一步理清本领域的未来发展方向, NSFC 机械工程学科先后于 2010 年 12 月和 2011 年 11 月在西安和石家庄召开了“机械故障诊断基础研究高层论坛”。与会专家学者深入探讨了该领域未来发展重点、发展方向和发展目标。本文正是在对国内外机械故障诊断研究发展及基金资助成果调研的基础上, 综合了两次会议的研讨成果, 对机械故障诊断的基础研究、原始创新和未来发展进行探索性总结。

“问渠哪得清如许, 为有源头活水来”。机械故障诊断还远没有形成一门完备的学科, 从事源头基础研究和实现相关技术突破是推动其继续发展的原动力。展望未来, 机械故障诊断研究应该以工程应用为立足点, 以底层基础研究为基石, 以解决基础科学问题为支柱, 以自主创新研究为目标; 同时, 鼓励广大学者规划和建立标准的故障诊断数据库, 实现标准试验台数据共享、典型工程案例和数据共享、标准算法共享和标准验证模型共享, 避免不必

要的重复建设和研究。总之, 可以通过集中精力开展基础前沿探索, 不断吸收数学、信息、力学和材料等领域的新发现和新发明, 引导机械故障诊断研究向深度、广度的扩展, 最终实现若干重点突破。

参 考 文 献

- [1] 屈梁生, 何正嘉. 机械故障诊断学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1986.
QU Liangsheng, HE Zhengjia. Mechanical fault diagnostics[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publisher, 1986.
- [2] 钟群鹏, 张峥, 有移亮. 我国安全生产(含安全制造)的科学发展若干问题[J]. 机械工程学报, 2007, 43(1): 7-18.
ZHONG Qunpeng, ZHANG Zheng, YOU Yiliang. Several issues of scientific development of safety production (including safety manufacturing) in china[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(1): 7-18.
- [3] 涂善东, 葛世荣, 孟光, 等. 机械结构强度与失效, 机械与制造科学学科发展战略研究报告(2006-2010年)[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
TU Shandong, GE Shirong, MENG Guang, et al. Strength and failure of machinery structures, the study on development strategies for mechanical and manufacturing science (2006-2010)[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [4] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械工程学科发展战略报告(2011-2020年)[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
Department of Engineering and Materials Science of NSFC. The development strategies report of mechanical engineering (2011-2020)[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [5] 中华人民共和国科学技术部. 国家“十一五”科学技术发展规划[Z]. 2006.
The Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China. The national 11th five-year developing plan of science technology[Z]. 2006.
- [6] SOHRE J S. Trouble-shooting to stop vibration of centrifugal[J]. Petrochem Engineers, 1968, 11: 22-23.
- [7] SOHRE J S. Operating problems with high speed turbomachinery causes and correction[C]// ASME Petroleum Mechanical Engineering, September 23, 1968, Dallas, Texas. New York: ASME, 1968.
- [8] JACKSON C. The practical vibration primer[M]. Texas: Gulf publishing Company, 1979.

- [9] ACHENBACH J D. Structural health monitoring-What is the prescription[J]. Mechanics Research Communications, 2009, 36: 137-142.
- [10] NAIR K K, KIREMIDJIAN A S, LAW K H. Time series-based damage detection and localization algorithm with application to the ASCE benchmark structure[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 291(1-2): 349-368.
- [11] PARK S, YUN C B, ROH Y, et al. PZT-based active damage detection techniques for steel bridge components[J]. Smart Materials & Structures, 2006, 15(4): 957-966.
- [12] TAKEDA N, OKABE Y, MIZUTANI T. Damage detection in composites using optical fiber sensors[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2007, 221(G4): 497-508.
- [13] 王强, 袁慎芳, 田峰, 等. 基于圆形压电阵列的主动 Lamb 波损伤成像监测研究[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(10): 75-81.
WANG Qiang, YUAN Shenfang, TIAN Feng, et al. Study on active Lamb wave damage imaging monitoring based on circle PZT array[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2011, 30(10): 75-81.
- [14] BACHSCHMID N, PENNACCHI P. Crack effects in rotor dynamics[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 22: 761-762.
- [15] ROBERT G. Dynamic behaviour of the Laval rotor with a transverse crack[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 22(4): 790-804.
- [16] CHEN P, TOYOTA T, HE Z J. Automated function generation of symptom parameters and application to fault diagnosis of machinery under variable operating conditions[J]. IEEE Transaction on Systems, Man., and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 2001, 31(6): 775-781.
- [17] SEKHAR A S. Multiple cracks effects and identification[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 22(4): 845-878.
- [18] 闻邦椿. “振动利用工程”学科近期的发展[J]. 振动工程学报, 2007, 20(5): 427-434.
WEN Bangchun. Recent development of the course “vibration utilization engineering”[J]. Journal of Vibration Engineering, 2007, 20(5): 427-434.
- [19] 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]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(1): 25-34.
- [20] 钟掘, 唐华平. 高速轧机若干振动问题——复杂机电系统耦合动力学研究[J]. 振动、测试与诊断, 2002, 22(1): 1-8.
ZHONG Jue, TANG Huaping. Vibration problems of high speed rolling mill-study of dynamical of complex electromechanically coupled system[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2002, 22(1): 1-8.
- [21] 褚福磊, 汤晓瑛, 唐云. 碰摩转子系统的稳定性[J]. 清华大学学报, 2000, 40(4): 119-123.
CHU Fulei, TANG Xiaoying, TANG Yun. Stability of a rub-impact rotor system[J]. Journal of Tsinghua University, 2000, 40(4): 119-123.
- [22] PENG Z K, JACKSON M R, RONGONG J A, et al. On the energy leakage of discrete wavelet transform[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(2): 330-343.
- [23] ANDREW K S J, DAMING L, DRAGAN B. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20: 1483-1510.
- [24] MOHAMMAD R M, NORMAN M, MOHAMMAD H M, et al. Rotor fault condition monitoring techniques for squirrel-cage induction machine-A review[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(8): 2827-2848.
- [25] GEBRAEEL N Z, LAWLEY M A. A neural network degradation model for computing and updating residual life distributions[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2008, 5(1): 154-163.
- [26] IHN J B, CHANG F K. Pitch-catch active sensing methods in structural health monitoring for aircraft structures[J]. Structural Health Monitoring, 2008, 7(1): 5-19.
- [27] ROBERT X G, YAN R Q. Wavelets: Theory and applications for manufacturing[M]. Berlin: Springer Publisher, 2011.
- [28] YAN R Q, ROBERT X G. Harmonic wavelet-based data filtering for enhanced machine defect identification[J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329(15): 3203-3217.
- [29] GU F, SHAO Y, HU N, et al. Electrical motor current signal analysis using a modified bispectrum for fault diagnosis of downstream mechanical equipment[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(1): 360-372.

- [30] NEWLANG D E. Ridge and phase identification in the frequency analysis of transient analysis by harmonic wavelets[J]. *Journal of Vibration and Acoustic*, 1999, 121(2): 149-155.
- [31] ANTONI J. Cyclostationarity by examples[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, 23(4): 987-1036.
- [32] LEI Yaguo, ZUO M J, HE Zhengjia, et al. A multidimensional hybrid intelligent method for gear fault diagnosis[J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37(2): 1419-1430.
- [33] SU Z Q, YE L, LU Y. Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 295: 753-780.
- [34] ANTONI J, RANDALL R B. The spectral kurtosis: Application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, 20(2): 308-331.
- [35] 杨叔子, 史铁林. 以人为本——树立制造业发展的新观念[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(7): 1-5.
YANG Shuzi, SHI Tielin. Humanism-establishing a new concept of manufacture's development[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(7): 1-5.
- [36] 屈梁生. 机械故障的全息诊断原理[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
QU Liangsheng. *Holospectrum diagnosis principle of mechanical fault*[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [37] 何正嘉, 瞿艳阳, 陈雪峰, 等. 内积变换原理与机械故障诊断[J]. *振动工程学报*, 2007, 20(5): 528-533.
HE Zhengjia, ZI Yanyang, CHEN Xuefeng, et al. Transform principle of inner product for fault diagnosis[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2007, 20(5): 528-533.
- [38] LIN J, QU L S. Feature extraction based on Morlet wavelet and its application for mechanical fault diagnosis[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 234(1): 135-148.
- [39] 张莹, 王太勇, 冷永刚, 等. 双稳随机共振的信号恢复研究[J]. *力学学报*, 2008, 40(4): 528-534.
ZHANG Ying, WANG Taiyong, LENG Yonggang, et al. Study of signal recovery in bistable stochastic resonance[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2008, 40(4): 528-534.
- [40] 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.
- [41] 李加庆, 陈进, 杨超, 等. 波叠加声场重构精度的影响因素分析[J]. *物理学报*, 2008, 57(7): 4258-4264.
LI Jiaqing, CHEN Jin, YANG Chao, et al. Analysis of the impact factors on the accuracy of sound field reconstruction based on wave superposition[J]. *Acta Physical Sinica*, 2008, 57(7): 4258-4264.
- [42] 丁康. 离散频谱分析校正原理与技术[D]. 西安: 西安交通大学, 2006.
DING Kang. The theory and technology of discrete spectrum correction[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2006.
- [43] 肖健华, 樊可清, 吴今培, 等. 应用于故障诊断的 SVM 理论研究[J]. *振动、测试与诊断*, 2001, 21(4): 258-262.
XIAO Jianhua, FAN Keqing, WU Jinpei, et al. A study of SVM for fault diagnosis[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2001, 21(4): 258-262.
- [44] 张周锁, 李凌均, 何正嘉. 基于支持向量机的机械故障诊断方法研究[J]. *西安交通大学学报*, 2002, 36(12): 1303-1306.
ZHANG Zhousuo, LI Lingjun, HE Zhengjia. Research on diagnosis method of machinery fault based on support vector machine[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2002, 36(12): 1303-1306.
- [45] WIDODO A, YANG B S. Support vector machine in machine condition monitoring and fault diagnosis[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, 21(6): 2560-2574.
- [46] KRUZIC J J. Predicting fatigue failures[J]. *Science*, 2009, 325: 156-157.
- [47] HENG A, ZHANG S, ANDY C C T, et al. Rotating machinery prognostics: State of the art, challenges and opportunities[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, 23(3): 724-739.
- [48] IMS center web. Center for intelligent maintenance systems [EB/OL]. (2012-10-11)[2012-11-06]. <http://www.imscenter.net>.
- [49] 高金吉. 高速涡轮机械振动故障机理及诊断方法的研究[D]. 北京: 清华大学, 1993.
GAO Jinji. Study on the mechanical vibration fault mechanism and diagnosis method for the high speed turbine[D]. Beijing: Tsinghua University, 1993.
- [50] 熊诗波, 王然风, 梁义维. 轧机自激振动诊断和结构动

- 力学修改[J]. 机械工程学报, 2005, 41(7): 147-151.
- XIONG Shibo, WANG Ranfeng, LIANG Yiwei. Self-excited vibration diagnosis of the rolling mills and structure dynamics modification[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(7): 147-151.
- [51] 申永军, 杨绍普, 孔德顺. 基于奇异值分解的欠定盲信号分离新方法及应用[J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 64-70.
- SHEN Yongjun, YANG Shaopu, KONG Deshun. New method of blind source separation in under-determined mixtures based on singular value decomposition and application[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(8): 64-70.
- [52] NEWKIRK B L. Shaft whipping[J]. General Electric Review, 1924, 27: 169-178.
- [53] NEWKIRK B L, TAYLOR H D. Shaft whipping due to oil action in journal bearings[J]. General Electric Review, 1925, 28: 559-568.
- [54] MUSZYNSKA A. Tracking the mystery of oil whirl[J]. Journal of Sound and Vibration, 1987, 2(20): 8-12.
- [55] MUSZYNSKA A, BENTLY D E. Anti-swirl arrangements prevent rotor/seal instability[J]. ASME Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design, 1989, 111(2): 156-162.
- [56] MUSZYNSKA A, BENTLY D E, FRANKLIN W D, et al. Influence of rubbing on rotor dynamics[M]. Nevada: Bently Nevada Corporation, 1989.
- [57] 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]. Proceedings of the Royal Society of London Series A-Mathematical Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903-995.
- [58] FLANDRIN P, RILLING G, GONCALVES P. Empirical mode decomposition as a filter bank[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 1(2): 112-114.
- [59] WU Z H, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1-41.
- [60] 陈予恕. 机械装备非线性动力学与控制的关键技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- CHEN Yushu. The key technology of nonlinear dynamics and control for mechanical equipment[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [61] 何正嘉, 陈雪峰, 李兵, 等. 小波有限元理论及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- HE Zhengjia, CHEN Xuefeng, LI Bing, et al. The theory and engineering application of wavelet finite element[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [62] 何正嘉, 陈雪峰. 小波有限元理论研究与工程应用的进展[J]. 机械工程学报, 2005, 41(3): 1-11.
- HE Zhengjia, CHEN Xuefeng. Advances in theory study and engineering application of wavelet finite element[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(3): 1-11.
- [63] 高金吉. 装备系统故障自愈原理研究[J]. 中国工程科学, 2005, 7(5): 43-48.
- GAO Jinji. Research on the fault self-recovery principle of equipment system[J]. Engineering Science, 2005, 7(5): 43-48.
- [64] 何正嘉, 袁静, 訾艳阳. 机械故障诊断的内积变换原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- HE Zhengjia, YUAN Jing, ZI Yanyang. Inner product principle of mechanical fault diagnosis and application[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [65] 唐德尧. 基于故障机理分析的故障诊断技术的应用和发展[J]. 中国设备工程, 2012(1): 9-11.
- TANG Deyao. The fault diagnosis technique application and development based on the analysis of the fault mechanism[J]. China Plant Engineering, 2012(1): 9-11.

作者简介: 王国彪, 男, 1964 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。
E-mail: gbwang@nsfc.gov.cn