



第十四届全国设备监测与诊断学术会议 论文集

设备状态监测与 故障诊断技术 及其工程应用

中国机械工程学会设备与维修工程分会 编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



第十四届全国设备监测与诊断学术会议论文集

设备状态监测与故障诊断技术 及其工程应用

中国机械工程学会设备与维修工程分会 编



机械工业出版社

本书是“第十四届全国设备监测与诊断学术会议”论文集，由中国机械工程学会设备与维修工程分会编，汇集了152篇论文。

全书共分7篇，其中：第一篇为设备状态监测与故障诊断技术综述、原理及方法；第二篇为设备状态监测与故障诊断专项技术——振动、声检测分析；第三篇为设备状态监测与故障诊断专项技术——油液检测分析；第四篇为设备状态监测与故障诊断专项技术——电气检测分析；第五篇为设备状态监测与故障诊断专项技术——检测分析仪器系统；第六篇为设备状态监测与故障诊断技术的工程应用；第七篇为其他。

本书供设备管理、设备故障检测与维修人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

设备状态监测与故障诊断技术及其工程应用：第十四届全国设备监测与诊断学术会议论文集/中国机械工程学会设备与维修工程分会编. —北京：机械工业出版社，2010.9

ISBN 978-7-111-31795-1

I. ①设… II. ①中… III. ①机械设备—监测—学术会议—文集②机械设备—故障诊断—学术会议—文集 IV. ①TH—53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 174423 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：沈 红 责任编辑：沈 红 责任校对：李秋荣

封面设计：姚 毅 责任印制：乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2010 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 36.5 印张 · 1149 千字

0 001—1 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-31795-1

定价：139.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

编辑热线：(010) 88379778

社服务中心：(010) 88361066

网络服务

销售一部：(010) 68326294 门户网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：(010) 88379649 教材网：<http://www.cmpedu.com>

读者服务部：(010) 68993821 封面无防伪标均为盗版

编 委 会

主 任：邢 敏

副主任：洪孝安（常务） 徐小力 王书茂 杨申仲

编 委：（以姓氏笔画为序）

卜铁生 马汉元 马 彪 马 涛 王书茂 王太勇

王少红 叶晓明 乔文生 任 彬 刘景元 何正嘉

张永祥 杨申仲 杨世锡 洪孝安 徐小力 高立新

主 编：徐小力 王书茂

副主编：洪孝安 杨申仲

前 言

在设备工程领域实现设备安全、可靠、高效、低耗和环境优化的运行是发展低碳经济的重要保证，设备状态监测与故障诊断技术是保障设备正常运行和优化运行的重要手段。

设备状态监测与故障诊断的主要目的是利用运行设备所表现出的各种信息，有效地分析其当前工作状态，科学地诊断和预报故障，同时为设备现代维修提供技术手段。

近年来设备状态监测和故障诊断技术快速发展，在相关理论方法方面不断吸收机械动态特性分析技术、光机电一体化技术、综合传感技术、测试技术、信号处理技术、微计算机技术和人工智能技术等，并取得了众多科研成果，不断提高了状态监测和故障诊断技术的有效性和可靠性，不断提升了相关物化仪器系统的数字化、自动化、集成化和网络化水平，设备状态监测和故障诊断技术已获得了广泛工程应用，并正在成为设备工程相关领域科研人员和设备工程师需要掌握的知识和具备的能力。

设备状态监测与故障诊断技术在我国经济建设中发挥着日益重要的作用。为开展学术研究，促进设备状态监测与故障诊断技术在工程中的广泛应用，推动本领域相关技术的深入研究和广泛实践。中国机械工程学会设备与维修工程分会于2010年度组织召开第十四届全国设备监测与诊断学术会议。该学术会议的主题为：努力在设备工程领域发展低碳经济，探讨设备状态监测与故障诊断技术并促进其在工程上的应用。

本届学术会议交流的主要内容包括：设备状态监测与故障诊断技术综述、原理与方法，设备状态监测与故障诊断专项技术——振动、声检测分析，设备状态监测与故障诊断专项技术——油液检测分析，设备状态监测与故障诊断专项技术——电气检测分析，设备状态监测与故障诊断专项技术——检测分析仪器系统，设备状态监测与故障诊断技术的工程应用等。

本届学术会议自2009年12月发出征文通知，到2010年7月15日，得到了大量论文作者积极响应，共收到应征论文160余篇，经过论文评审组专家评审，共有152篇论文入选，经编委会编辑后在论文集中出版。入选论文按照专业分为七类，包括：设备状态监测与故障诊断技术综述、原理与方法，设备状态监测与故障诊断专项技术——振动、声检测分析，设备状态监测与故障诊断专项技术——油液检测分析，设备状态监测与故障诊断专项技术——电气检测分析，设备状态监测与故障诊断专项技术——检测分析仪器系统，设备状态监测与故障诊断技术的工程应用以及其他相关论文；从中评选出优秀论文50篇。

本届学术会议得到了各级领导的大力支持，企业设备工程人员和设备管理人员、广大学者和专业技术人员积极参与。学术交流在理论方法方面进行了多角度、多层面的讨论，在工程实践方面结合企业生产实际，强调应用推广。研究和应用成果涉及机械、石油、石化、冶金、化工、轻工、铁路、航运、航天、材料和仪器仪表等20余个行业，来自高等院校、科研院所、企事业单位和仪器研发厂家40余家。

为了体现近年来设备状态监测与故障诊断技术的研究与实践，展示我国现阶段本领域的现状与发展，将本届学术会议的有关论文编撰成专业书籍，并通过此书的出版对辛勤工作在设备状态监测与故障诊断领域的工程技术人员和科研人员表示衷心感谢。

本书是在编委会和论文作者的共同努力下完成的，借此机会对参与本书撰写、编辑和出版工作的有关单位和人员表示衷心的感谢；同时向关心我国设备状态监测与故障诊断技术的研究、应用和推广工作的各界人士表示崇高敬意。

本书内容涉及了大量参阅文献，这些文献启发了编写者思路，提供了丰富的素材。在此，对列在本书参考文献中的作者，表示真诚的感谢。

中国机械工程学会设备与维修工程分会
《设备状态监测与故障诊断技术及其工程应用》编委会
2010年10月

目 录

前言

第一篇 设备状态监测与故障诊断技术综述、原理与方法

深入开展设备状态监测与故障诊断技术应用,提升设备管理水平	陈兆虎 何振歧 黄梓友	1
基于阶次小波包与粗糙集的齿轮磨损预测研究	沈仁发 董自卫 涂继峰等	5
基于精度退化的精密数控机床故障诊断技术研究	王红军 徐小力 吴国新	10
改进的多级可拓评价方法的输油泵机组故障诊断及评价	梁伟 张来斌 段礼祥等	14
汽轮机叶片早期故障诊断磁记忆技术的应用	郭钢 徐锋	21
往复发动机故障诊断实验平台开发	王立勇 赵二辉 徐小力等	25
离心锅炉引风机状态监测系统的建立与应用	龚惠玲	29
基于 PCA-HMM 旋转机械早期故障退化状态识别方法研究	孙晓宇 张来斌 梁伟	35
模糊诊断技术在机械设备维修中的应用	聂阳文 杨永刚 石祥辉	40
基于参数融合的模糊评价模型在往复压缩机故障诊断中的研究	李磊 魏杰	43
基于信息融合技术的转子早期裂纹识别	王仲生 李双	48
浅析红外监测在化肥厂电气设备的运用	姚芳	52
往复压缩机失效的故障树分析	徐小平 张来斌 段礼祥	55
设备备件综合保障管理的分析与思考	朱一飞	59
制氧行业设备状态监测技术	黄成	63
BOTDR 分布式光纤传感技术在冶金设备变形及温度监测中的可行性研究	张凤琴	66
基于模型的离心压缩机转子稳定性预测方法研究	孙译 王维民 张娅等	69
旋转机械设备状态监测的不同途径及其特点	曾志生 盛丹萍 刘恋辉等	75
如何做好石化设备状态监测	蒋丕 吴莲	78
小波分析在刀具磨损监测中的应用	刘学斌 高亚 邓三鹏等	81
阶次跟踪和奇异谱降噪在齿轮早期故障诊断中的应用	康海英 杨雄 李兴才等	85
在线诊断技术在转动设备监测中的应用	徐锋 郭钢	89
化工机械设备管理中状态监测在故障判断中的应用	李治国	92
多工位自动冷镦机故障的程序化分析	薛复健	94

第二篇 设备状态监测与故障诊断专项技术——振动、声检测分析

振动分析技术在大型风力发电机组故障诊断中的应用	乔文生 陈兴辉 李忠伟等	96
高档数控机床典型功能部件的故障预报试验技术研究	徐小力 任彬 景敏卿等	100
冷轧带钢轧机振动及振纹问题研究	谢志江 谢思远 陈平	105
基于小波理论的旋转机械故障信号降噪技术研究	朱春梅 徐小力 叶晓明	109
基于声发射的 SIEMENS 840D 数控系统故障预测技术研究	邓三鹏 缪亮 贺琼义等	113
基于故障诊断与状态监测技术的转子实验装置应用研究	谷玉海 鲁甜 刘鑫等	117
基于振动及油液监测技术的船舶往复压缩机故障诊断	程明	120
小波神经网络在滚动轴承故障诊断中的应用	程壮壮 徐小力 马超	123
转子不平衡故障的诊断	赵宝林	126
振动精密诊断技术在烧结风机上的应用	郭晓峰	128

时变自回归在轴承故障诊断中的应用	常乐	132
振动分析在大型锅炉引风机滚动轴承故障诊断中的应用	毛亚红	140
丁辛醇搅拌机 D3401B 振动原因诊断	张子敬 高明亮	144
基于 D-S 证据理论的往复压缩机气阀监测与故障诊断	魏杰 李磊	146
基于灰色理论的烟气轮机状态趋势预测	李辉 王吉芳 徐小力	150
二氧化碳压缩机透平振动故障分析及处理	肖萍	154
齿轮打齿故障的振动特征辨识	只金柱 赵金恒 高立新等	158
基于信号源输出和传感器校准的故障测控系统	谷玉海 刘鑫 鲁甜等	162
天然气处理厂高速泵的振动特征的分析研究	潘贲 陆酃	166
工程机械用 16Mn 钢焊接裂纹缺陷的声发射检测技术研究	窦艳涛 徐小力 蔡晓君等	171
声质温差信息识别判断实用方法	郑妍 宋忠利 孙恒文等	176
运用振动频谱分析诊断滚动轴承故障	黄齐亮	179
LABVIEW 和 MATLAB 混合编程在烟气轮机状态监测中的应用	李慧 朱春梅 严长鹏	182
莱钢热电厂 5 号汽轮鼓风机组轴承座故障诊断及处理	张剑	187
数控机床主轴振动测试方法研究	刘然 许宝杰 吴国新等	190
增压空气透平机故障诊断与处理	田新生 陈韬 徐健等	194
声发射技术在工程陶瓷磨削加工监测中的应用	胡磊 曾涛 王民等	198
基于旋转机械振动信息下的故障分析与诊断	申志冲	203
声发射方法在铣床刀具故障诊断中的应用	周峰 黄民 徐小力等	206
上悬式离心机的振动测试与分析	娄斌超	211
故障诊断技术在电动机维修管理上的应用	安磊 关静伟	215
振动分析在大型空压机上的成功诊断	张国新 王俊洪	218
催化鼓风机齿轮箱故障诊断	申大勇	222
振动状态监测及故障诊断技术浅析	穆立辉	225
基于振动分析的往复泵泵阀故障诊断	王长忠	228
高线线材轧机轴承故障简易诊断的分析与应用	耿丽霞 高继明	232
浅谈立式加工中心噪声的来源及控制	杨省云	236

第三篇 设备状态监测与故障诊断专项技术——油液检测分析

基于 ν -支持矢量机的综合传动故障分类研究	张英锋 马彪 张振明等	238
发动机润滑油监控技术与实践	宋兰琪 陈立波 张占纲	242
基于数字同轴全息油液磨粒形貌三维检测系统的实验研究	徐元强 王玉荣	246
油液监测技术及其在拖轮状态监控中的应用	熊军魁 边洪峰 伊杰等	252
石化大型机组润滑油监测新体系的建立	山崧	255
田湾核电站汽轮机顶轴油系统油压异常的分析处理	石岭 胡冬清	258
试论润滑设备管理和油液监测	马先贵 丁津原	263
空压机的润滑磨损状态监测及故障诊断	何晓斌	268
钢缆带式输送机减速器合理选油实验分析	楚绍辉 尚慧岭 司美霞	272

第四篇 设备状态监测与故障诊断专项技术——电气检测分析

太阳能电池阵列故障诊断方法研究	王欢 徐小力 左云波	276
基于起动电压特征分析的内燃机起动故障诊断研究	徐小涛	281
西门子 840D 数控系统在大型滚齿机上的应用	许渊	283
电动机轴电流引起的轴承烧损及防止措施	杨华 唐志伟 樊铭等	286
变频器的故障诊断与维修	李彬 戴怡 张亚东等	288

基于扰动抑制的混联数控机床冲击故障分析与抑制	李丽娜 孙宏昌	293
三相电动机单相运行的原因及预防	金跃	297

第五篇 设备状态监测与故障诊断专项技术——检测分析仪器系统

具有在机监测与远程维护功能的智能数控系统与装备	王太勇 刘路 林锦州等	299
机械工程测控软件孵化平台研究	罗瑞龙 王书茂 王新等	305
基于 PCI Express 的图像采集压缩系统的设计	张琴 乔文生 艾士娟等	309
基于 Labwindows/CVI 的虚拟示波器设计	陈月德 郑永军 王书茂	314
精密离心机综合检测系统开发	吴国新 谷玉海 张凤山	319
浅谈虚拟仪器的概念、结构及远程故障诊断应用	钱永梅 张来斌 段礼祥	324
光伏发电监测系统应用软件设计	王茂 许宝杰 徐小力等	328
基于 LabVIEW 的往复发动机故障诊断系统开发	赵二辉 王立勇 徐小力	331
基于组态思想的充气膜建筑智能控制系统	刘秋爽 佟伟 张凤山等	335
移动式拖拉机安全性能检测系统研究	杨伟平 王新 王书茂	339
机车涡轮增压器的状态监测与故障诊断	范纪文 郑福奇	343
闪底泵轴承故障的监测诊断分析及处理	陈兆虎 何振歧	346
基于 PLC 的提升机自动控制系统研究	周连杰	349
Mchart 在基于 Web 的光伏电站监控系统中的应用	宋福霞 徐小力 乔道鄂等	352
基于 FPGA 的风电监测系统数据采集单元的研究	韩宏宇 袁洪芳 王华庆	356
鱼雷热动力装置振动异常溯源系统设计	蔡鐸 孙涛 梁霖等	359

第六篇 设备状态监测与故障诊断技术的工程应用

海洋金属涂层腐蚀监测系统	魏世丞 梁义 孙虎元等	363
基于 S8000 系统的设备故障灵敏监测技术应用研究	叶晓明 朱春梅 徐小力	367
声发射技术在冲裁加工故障诊断中的应用	王少红 张胜 孙鹏	371
磁栅在机床进给系统中的监测技术	刘景元 任继舜	375
利用遗传算法优化支持矢量机分类过程参数	郭永伟 王华庆 刘文彬等	377
可用于轧钢机械零部件损伤快速现场检测的磁记忆装置	刘书选 张卫民 高玄怡等	381
基于 PLC 的医疗废物焚烧自动控制系统的研究	邓三鹏 蒋丽 杨雪翠等	386
设备状态监测系统在大理卷烟厂复烤车间的应用	李雪峰 曹玲芝	389
高线和大盘卷生产线在线状态监测与故障分析	尹燕涛	394
浅谈数控机床故障诊断与维护	常继承 李方建 马洪波等	398
基于负压波分析的管道检漏与定位技术	董伟伟 张来斌 梁伟	400
基于表面工程的机床绿色维修技术研究	谢雷 邓三鹏 杨军	404
设备状态监测与故障诊断技术在塔里木油田的应用	张毅 张来斌 段礼祥	407
高炉炉渣处理粒化轮损坏原因分析及改进	陈庆凯 赵兴永	412
循环水泵电动机消除振动总结	张建民	414
机车涡轮增压器状态监测和故障诊断实验研究	吴国新 谷玉海 徐小力	417
向阳 4 号 500t 浮式起重机臂架下横梁(薄壁圆管)纵向裂纹故障分析	刘稚钧 李华彪 王殿臣	421
煤矿电网电能质量测试及治理的实践	周连杰	425
RCM 方法在往复压缩机中的应用	黄君玲 张来斌 段礼祥	428
风机不平衡的研究及现场校正实例	柳枫	432
两台 10t/h 热水锅炉微机监控设备的应用与实践	王新	437
高速旋转机械的频谱分析故障诊断	张剑	440
旋转机械松动故障的研究	曲佳 兴成宏 李迎丽等	444

尿素 0.7MPa 吸收塔底给料泵振动原因分析及处理	
基于网络的关键机组远程监测与故障诊断系统在中石油炼化企业的应用	
利用在线监测诊断技术解决 EC301 机组故障	
状态监测在滚动轴承故障诊断方面的应用	
莱钢热电厂 12MW 汽轮发电机组低频振动处理	
汽轮鼓风机组振动大的原因分析及处理	
混凝土喷射机减速器的损坏原因分析	
水氢氢 600MW 发电机与集电环轴的安装与振动处理	
基于维修记录的设备监控与故障预报	
拨风系统在高炉鼓风系统中的应用	
组合机床断轴故障分析与处理	
高炉电动鼓风机联轴器故障诊断及处理	

徐忠祥	447
曲佳 何其伟 兴成宏	449
董玉华	453
张桂林 吴举民 李俊峰	456
张剑 逯斌	459
张雷 李强	462
尚慧岭 庞言民 朱有斌等	465
张权 李海霞 朱伟华等	468
杨华峰 张宏闯 赵朝阳	473
赵鑫	476
于建波	479
赵鑫	481

第七篇 其 他

基于 ZigBee 的联合收割机性能参数检测	
基于西门子 810D 数控系统的电动刀架控制的研究	
数控机床维修仿真系统在教学中的应用研究	
轧辊数控磨床主轴系统的动态特性分析	
基于 ABAQUS 的渐开线圆柱齿轮传动动态应力分析	
刀具半径补偿在数控加工中的应用	
关于齿轮热处理断裂原因的探讨	
基于华中世纪星数控系统的车床改造方案	
冷轧机张力辊齿轮箱失效分析及对策	
矢量变频调速技术在高线风冷风机中的应用	
提高设备管理水平 降低设备事故	
汽轮机同步器结构的改进设计	
浅析设备的腐蚀与防腐措施	
压力容器爆炸效应分析	
Atlas 离心压缩机联轴器、冷却器芯子国产化改造	
带式卸料车行走轮啃轨的分析和改进	
航姿与雷达天线仿真器自动校准装置的研制	
基于甚宽带脉冲电流法的变压器局部放电模式识别	
基于 FANUC Oi MATE TD 的多功能数控实验系统开发与故障调试	
电厂 445t/h 煤粉炉水冷壁结焦机理探讨与实践	
论润滑技术公司——应运而生的新行业	
解析论述一种新颖的链条、传动带监控器多功能一体的巧妙设计	
陕京线压缩机输气站场排污池防冻与监测的实践	
基于扩展卡尔曼滤波的输油管道泄漏检测与定位	

尹彦鑫 张成涛 吴刚等	485
刘朝华 邓三鹏 石秀敏	488
李彬 戴怡	493
张峰武	496
张金乐 马彪 张振明等	502
李伟 邓三鹏 王倩	507
季宪平 毛楠	510
孔令晓	515
周为民	520
郭妍文 段志霞 郭宝林等	523
杨振军 赵玉武 姜明等	526
刘秉权 李洪洲 张俊峰等	529
张学方等	531
成曙 李涛 王丽等	534
唐蒲飞	537
唐天新	539
李效辉 黎琼炜 李爱军	542
阮羚 高胜友	546
李丽娜 戴怡 孙宏昌	550
苗红军	555
马先贵 丁津原	558
李东进	562
么子云 邓三鹏 王倩	564
刘超 张来斌 梁伟	567

第一篇 设备状态监测与故障诊断技术 综述、原理与方法

深入开展设备状态监测与故障诊断技术应用， 提升设备管理水平

陈兆虎 何振歧 黄梓友

(516086 惠州 中国海油惠州炼油分公司设备中心)

摘要 结合中海石油惠州炼油分公司的设备运行情况，阐述了开展设备诊断技术应用的目标和任务。提出建立以专业人员为核心，以现场设备运行和点检人员为基础的二级监测诊断网络系统。通过监测诊断网络系统使各层次管理及技术人员及时掌握设备运行情况，采用状态维修和改良性计划维修并举进行的维修方式，实现“设备可靠性的改善、设备缺陷的及时发现、避免设备事故发生”的目的，形成设备状态监测“全员化”的格局，为设备长周期运行和经济维修提供技术支持。

关键词 状态监测 故障诊断 网络建立 设备管理与维修

1 引言

惠州炼油是中国海油的第一个炼油厂，1200 万 t/年单套原油加工量为全国最大之一。随着装置转入到正常的生产阶段，如何科学地管理和使用好设备，保证生产装置的安全、平稳、长周期、连续运行是一个十分重要的课题。这就要求采用设备诊断技术对装置中一些重点、关键机组和设备等进行状态监测、信号分析、故障诊断、信息积累，捕捉机组的运行隐患，做到对设备故障能早发现、早诊断和早预防，以消除灾难故障、避免严重故障，减少一般故障。因此在惠州炼油开展设备监测与故障诊断技术应用非常必要。

2 开展设备状态监测与故障诊断的工作目标

着眼于未来的设备资产管理，以科学管理为核心的战略指导思想，迎合 IT 时代设备管理理念，充分利用公司网络优势，使各层次人员及时掌握设备运行情况，实现设备动态量化管理，采用状态维修和改良性计划维修并举进行的维修方式，以设备为生产服务为主导，以实现“设备可靠性的改善、设备缺陷的及时发现、避免设备事故”为目的，形成设备状态监测“全员化”的格局，注重状态监测与故障诊断短期效益，放远长期效益，为设备长周期运行和经济维修提供技术支持。

3 目前情况及存在问题

目前，惠州炼油统计在册的动设备（不包括空冷风机）1048 台，其中压缩机组 44 台（离心机组 29 台，往复机组 15 台），离心泵 954 台、鼓引风机 50 台。这些设备中需要特别关注的大型关键离心机组 16 台，除了机组外剩下 1004 台泵、风机中需要重点关注的功率大于 160kW 的有 200 台左右，功率介于 75 ~ 160kW 的泵、风机等需要一般关注的有 300 台左右。如何科学地管理和使用好设备，保证生产装置的安全、平稳、长周期、连续运行是一个十分重要的课题。

目前，国内炼化企业的设备监测与故障诊断工作都是由企业的设备研究所或监测中心的专业技术队伍来承担。惠州炼油分公司是中国海油的第一个炼油厂，也是一个全新的炼化企业，人员编制精简，虽然也设置了一名动设备专业工程师来负责此项工作，但不可能像国内其他炼化企业成立专门的机构来开展这项工作。面对监测诊断技术人员紧缺的情况，如何构建设备状态监测与故障诊断网络，确立设备有效的监控体系，这是中海石油惠州炼油分公司设备状态监测与诊断工作面临的问题。

4 应对策略及措施

一个成功的状态监测计划的实施应被放到整个工厂的运营绩效中去考虑,状态监测真正作为新的维修方式的要素融合到工厂管理中去,管理的作用由此被凸现出来。搞好状态监测不再仅仅是一个技术问题,更主要的是要取决于对这个项目的管理,取决于如何组织、如何实施、如何评价、如何奖惩和如何改善。状态监测如何与现场设备运行管理、点检管理相结合,如何与设备维修计划以及生产管理相结合,如何实现维修成本控制和创造价值,越来越成为设备管理新的关注内容。惠州炼油状态监测诊断工作主要采取了以下措施。

(1) 领导重视,各部门密切配合 开展设备状态监测是一项综合的系统工作,涉及到机械设备、振动理论、信号分析与处理、现代测试技术、计算机控制理论、信息化管理技术、转子动力学等多门学科的知识。在实施过程中既要涉及到人力资源配置的人力资源部、购买监测仪器的商务部、财务部,信息网络及实时数据库提供的 IT 部门,生产运行过程中设备运行管理的运行部、故障设备的检修单位等,如果没有各级领导的重视、各部门密切配合和大力支持,设备监测工作是没有办法深入开展下去的。

(2) 建立健全组织机构,推动状态监测的开展 为了便于组织管理,建议成立以公司主管设备的领导为组长,设备中心经理、专业组长、状态监测专业工程师及各运行部设备主管和设备工程师为组员的状态监测小组。该小组在公司领导和设备中心经理的领导下,开展各项工作,使设备状态监测工作得以在公司内顺利开展。

(3) 建立二级监测诊断网络系统 二级监测诊断网络的思路,就是以专业人员为核心,以设备点检和设备运行管理人员为基础的监测网络,现场各生产运行部作为第一级监测,设备中心为第二级监测。严格执行《惠州炼油转动设备状态监测规定》,按照“五定”(定点、定时、定期、定人、定指标)原则实施监测,基本的职责划分为:日常监测由第一级执行,系统及监测数据库建立、报警值设置与修正和机器异常故障诊断由第二级完成。

第一级监测是运行部,运行部的设备负责人为设备监测的第一责任人,负责指定本部门专职状态监测人员(必须是学设备专业的大学生,为后续的状态监测深入开展打下基础),负责运行部的状态监测工作,定期检查对应的维保单位的点检工作开展情况。第一级监测的实施分两方面工作:

第一方面利用智能巡检系统开展设备点检和工艺巡检,设备点检数据库的设置由设备中心定,点检路径和工艺巡检路线由运行部确定,维保单位用智能点检仪每天一次把点检和每天的巡检结合起来,按照指定的巡检路线采集数据,操作工用智能巡检仪按照指定的工艺巡检路线采集数据,将采集的数据通过各个运行部的采集站上传到巡检中心的服务器数据库,这样构成了全厂的设备、工艺巡检综合信息数据平台,管理人员通过该平台及时掌握我们的维保单位和装置外操的巡检情况;专职状态监测人员和运行部的设备工程师定期的浏览和关注本部门的在线监测机组和点检设备的运行情况,动态掌握设备运行状态,定期出监测报告。

第二个方面给生产运行部配备 01DB 数据采集器等利用网络化的离线监测预测维修系统 XPR300,按中心数据库设定及规范定期采集设备 160kW 以上的机器振动(状态)数据,将数据上传到中心数据库;监测和报告责任区设备的报警状态,分析设备状态趋势,进行基本的故障诊断。专职状态监测人员和运行部的设备工程师一起协商并结合 ERP 系统提报预测维修工单,逐步开展预测维修工作。

第二级监测是设备中心,建立和维护状态监测数据库(机器测点位置、数据采集参数、报警设置等),定期查询设备状态和趋势;对状态数据进行各种图形分析,发送故障设备精密诊断报告,必要时对设备疑难故障进行另外的数据采集和更专业化的分析诊断。同时作为专业管理职责指导、培训、规范和考核第一级的监测工作。

(4) 点面结合,突出重点,逐步推进 状态监测系统工作的“重点”是大机组和关键设备的监测,“面”就是全员参与的点检、巡检工作。监测手段上 16 台关键的离心机组建立了 S8000 在线监测系统,200 台左右关键机泵离线振动监测预测维修系统 XPR300,对往复压缩机组和关键离心机组 90 个点开展润滑与磨损状态监测(外委托给广州机械科学研究院承担此项工作),基层建立了全员参与的点检、巡检有网络化的智能巡检系统。该巡检系统不仅仅是规范目前保运单位的巡检、点检,更重要是对装置设备的状态有

全面的掌握，更深入地落实领导要求的“装置设备的精细化管理”，对运转设备完好率、故障率、累计运行时间、设备润滑记录、设备故障等设备管理信息能动态掌握。这样逐步构建了智能巡检、离线监测、大机组在线三大系统均采用网络化的数据管理和分析软件来实现设备状态信息共享，打造具有惠州炼油特色的“精细化、信息化、现代化”设备管理网络。图1是中海石油惠州炼油分公司的二级监测诊断网络系统状态维修决策流程图。

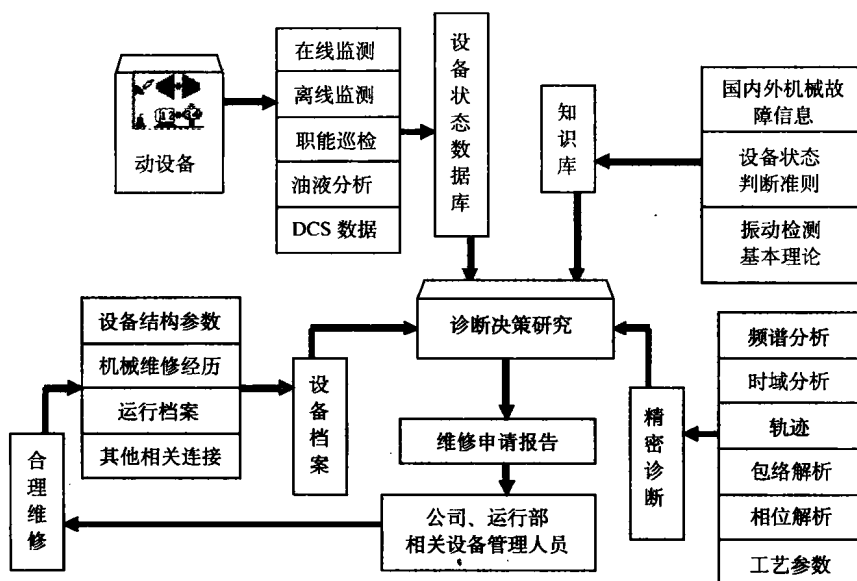


图1 状态维修决策流程图

5 应用设备监测诊断技术取得的显著效果

(1) S8000 在线监测诊断分析系统的应用 运用 S8000 系统对机组开车试运全过程的在线监测诊断分析，对大机组的安装质量验收、机组性能、振动情况等有全面的掌握。该系统的投用，在机组试车开工及运行中发挥“保驾护航”的作用。

【案例】 动力站凝气发电机组在试车过程中振动超标准。通过监测诊断机组存在转子不平衡故障，停机检查发现三瓦、四瓦已经磨损。追查到发电厂家出厂时，厂家没有做转子动平衡，责成厂家来现场补做转子动平衡，处理后机组开机的振动值由先前的 $120\mu\text{m}$ 下降到最大 $50\mu\text{m}$ ，恢复正常，机组运行平稳。重整进口循环氢 110-k201 在开机过程中通过在线监测系统诊断 110-K201 循环氢压缩机汽轮机的临界转速（ $4421 \sim 4516\text{r/min}$ ）与压缩机的临界转速（ $2210 \sim 2255\text{r/min}$ ）不一致，且汽轮机的临界转速（ $4421 \sim 4516\text{r/min}$ ）刚好与我们操作规程规定的汽轮机正常转速范围 $4099 \sim 5843\text{r/min}$ 不相符，这样给机组正常运行和操作埋下事故隐患。并以此为依据，跟厂家进行交涉，厂家答复再进行设计核算，同时提醒操作人员在该区间快速越过，确保机组安全正常运行，避免机组共振。有了机组的在线监测系统的监测实现了全厂大机组顺利开车成功。从装置开工至今，监测显示，所有的大型离心机组运行良好，机组的运行处于受控状态。

(2) XPR300 振动监测预测维修系统的应用 运用 XPR300 振动监测预测维修系统在动设备的试车过程中发挥了质量验收把关、查找设备故障原因的作用，确保关键设备的顺利试车投用。

【案例】 101-P-101/AB 闪底泵在水联运行时，泵振动大，通过跟踪监测分析发现，该泵选型时选大了，建议其切割叶轮，切割叶轮处理后该机泵正式开车正常平稳。102-K102B 增压机组空试时振动超标准，通过跟踪监测分析发现该机组齿轮啮合故障，责成厂家现场服务技术人员开盖重新调齿轮啮合间隙、轴瓦间隙及瓦背预紧力。开机后振动值显著下降，机组恢复正常，保证了装置正常开工。

在装置的运行过程，103 单元 103-P006 丙烯塔回流泵从试运到正式运行，机泵振动一直很大。在水运

时, 监测分析该泵振动达 28mm/s 超标准属不合格, 要求把泵返到生产厂家。正式运行时机泵振动仍一直很大, 并多次损坏机械密封, 影响了装置安全平稳运行。通过跟踪监测分析, 该泵存在严重的叶轮流体激振现象, 激发出泵共振。建议厂家核算叶轮尺寸, 对叶轮进行切割。006A 泵没按要求切割整改, 效果不大。006B 按要求对叶轮进行切割, 振动值从最高 24.9mm/s 降低到 5.36mm/s, 机泵运行良好。101 单元闪底泵 101-P101A 通过监测发现泵轴承故障并及时换泵, 避免了重大抱轴事故发生, 后来换轴承时发现, 轴承滚动体有明显点蚀和内圈磨损现象。

(3) 润滑油监测分析应用 应用润滑油光谱、铁谱分析技术对关键机组的关键回油部位进行监测分析, 对发现设备早期磨损故障十分有用。

232 单元通过对 232-k01C 螺杆压缩机润滑油油液分析, 油品理化指标基本正常, 但污染度等级偏高, 油中有少量油泥颗粒污染, 影响润滑效果; 但从磨损分析看油中有少量铜合金及个别钢质异常磨损金属颗粒, 从铁谱分析图片看有明显磨损现象, 典型谱片如图 2 所示, 停机检查发现, 给螺杆压缩机供油的齿轮泵铜套出现磨损, 更换铜套后恢复正常。

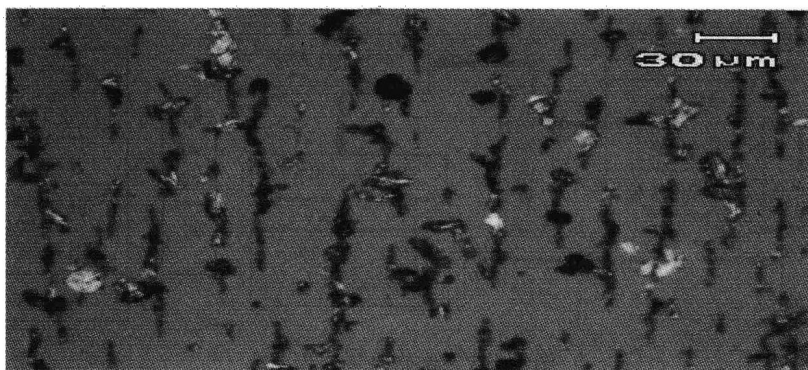


图 2 232-k01C 螺杆压缩机润滑油铁谱图

6 结论

惠州炼油分公司从开工试车到现在的正常生产过程近一年中, 利用该网络系统平台, 运用设备状态监测与故障诊断技术通过设备监测诊断技术找出故障原因, 有针对性地进行维修整改, 避免了盲目整体维修而造成维修过剩且不能解决实际问题的大量维修资金浪费, 节约了人力资源, 取得了明显的经济效益, 保障了炼油设备的安全平稳运行。

设备在各级领导齐抓共管情况下, 状态监测诊断技术人员和仪器设备都能及时到位, 通过不断的学习、培训、实践, 经过 3~5 年逐步培养锻炼出有惠州炼油特色的状态监测队伍, 状态监测工作就一定会稳步推进。监测工作全面深入开展的情况下, 有一支强有力的监测诊断技术队伍提供技术支持, 适时将状态监测与诊断结果和 ERP 系统的维修工单系统结合。一级监测生产运行部根据设备的运行状态和监测情况提出预测维修工单, 二级监测设备中心根据故障诊断结果审核维修工单进行设备维修优化, 逐步推行状态维修、预测维修工作。实现既注重状态监测短期效益, 又放远长期效益, 为设备长周期运行和经济维修提供技术支持, 提升设备现代化管理的综合水平。

参考文献

- [1] 徐敏, 等. 设备故障诊断手册 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.
- [2] 盛兆顺, 等. 设备状态监测与故障诊断技术及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [3] 张鄂. 铁谱技术及其工业应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.

基于阶次小波包与粗糙集的齿轮磨损预测研究[⊖]

沈仁发¹ 董自卫² 涂继峰³ 刘治星³ 黄勇军³

(1. 050003 石家庄 军械工程学院火炮工程系; 2. 430075 武汉
武汉军械士官学校枪炮系; 3. 850000 拉萨 77611 部队 55 分队)

摘要 为了能有效地对不同磨损状况下的齿轮振动信号进行分析, 预测出齿轮的磨损程度, 提出了一种新的故障诊断方法。该方法将阶次小波包和粗糙集理论引入到齿轮的故障诊断中, 首先利用计算阶次跟踪算法对瞬态振动信号进行重采样, 得到了等角度分布振动信号, 再采用小波包对该信号分解—重构, 并对每个频段的能量进行归一化, 构成一个特征向量, 通过粗糙集理论得到清晰、简明的决策规则。最后通过故障实例验证了此方法的有效性, 它具有广阔的应用前景。

关键词 阶次跟踪 小波包 粗糙集理论 磨损预测 决策规则

1 引言

齿轮传动是机械设备中最常用的传动方式之一, 齿轮由于常工作于高速度、重负荷、强冲击的环境下, 容易产生磨损、裂纹和断齿等多种故障, 并进一步诱发其他机械故障。磨损失效是齿轮传动的主要失效形式之一, 为保证齿轮传动能正常可靠地工作, 应对投入使用的齿轮传动进行监测和预测。齿轮磨损一般用磨损量来衡量; 而磨损量是通过对齿厚的测量确定的。这种方法需要停机测量, 效率低, 没有适时性。实际上, 由于齿轮磨损会导致齿轮齿厚度减小, 齿轮工作状况变坏, 齿轮振动加剧, 振动能量增加。齿轮磨损状况与齿轮振动状况有十分密切的关系, 因此可通过对齿轮的振动信号分析来估计齿轮的磨损状况^[1]。在故障诊断振动分析中, 常常采用的是传统的频谱分析方法, 这种方法对转速稳定的稳态信号有较好的效果。但是, 许多旋转机械在工作过程中其旋转速度并不是处于稳定匀速状态, 如起动和停车过程, 这使得旋转机械表面的振动信号表现为非平稳特征。因此实际测得的振动信号大多数情况下是非平稳的, 特别是在发生故障时更是如此。若此时再用传统的频谱分析方法, 由于其自身的局限性, 它们把信号视为线性、平稳的, 从而难以提取信号中足够多的反映非线性、非平稳性的信息^[2]。为解决这一问题, 角域采样理论和建立在其基础上的阶次跟踪理论便应运而生。

众所周知, 故障信号与正常信号相比, 在某些频带内的能量会有较大的差异, 可能减小也可能增大。因此, 在这些频带内信号的能量包含了丰富的故障信息, 某个或某几个频带内信号能量的改变可以表征某种故障的状态^[3]。小波包分析是一种先进的时频分析手段, 它能有效的提取振动信号中含有冲击信号的故障特征, 是旋转机械故障特征提取的有效方法。小波包分解后特征频带空间的总能量作为突变信号特征值的方法是一种被广泛采用的基于小波包分析的故障特征提取方法。

粗糙集理论是由波兰的 Pawlak Z 教授首先提出的一种处理模糊和不确定性问题的新的数学工具。它以不可分辨关系作为研究的基石, 处理信息时, 能在不损失关键信息的前提下对数据进行约简并求得知识的最小表达, 从中得到最简规则。基于粗糙集理论的智能故障诊断方法实际上就是基于知识的方法, 在应用时无需提供除问题所需处理的数据集合之外的任何先验信息, 这是与模糊理论、证据理论相比的最大优点^[4]。因此, 开展设备故障诊断的粗糙集方法研究具有非常重要的意义。

在机械故障诊断的发展过程中, 人们发现最重要、最关键也是最困难的问题之一就是故障特征信号的特征提取。本文采用阶次小波包变换作为信号的处理工具, 对齿轮箱起动过程中的振动信号进行了阶次跟踪分析, 对角域重采样后的信号进行小波包分解, 然后提取了特征参量, 结合粗糙集理论, 求出了齿轮的故障诊断决策规则, 最后通过故障实例验证了此决策规则的有效性。

⊖ 国家自然科学基金资助 (项目编号: 50775219)。

2 阶次跟踪分析法

阶次跟踪技术是针对转频不稳定机械的一种专门的振动测量技术，它可将机械变速过程中产生的与转速有关的振动信号有效地分离出来，同时对与转速无关的信号起到一定的抑制作用。对于转速变化的机械，该方法的优点是显而易见的。由于它是按转角位置分配采样间隔的，所以剔除了转速变化对频谱图的影响。另外，随转速升高而提高采样频率的特性也保证了该方法对振动测量的精确性。因为转速越高，振动波形的变化越剧烈，这时提高采样频率就加密了采样点，从而避免了振动信号中一些特征点的丢失。

阶次跟踪的关键在于，如何实现相对于参考轴的恒角度增量 ($\Delta\theta$) 采样。精确的阶次跟踪要求对振动信号进行同步采样，监测系统的精确度和可靠性取决于同步采样的质量。计算阶次跟踪 (Computed Order Tracking, COT) 法比传统的方法更加灵活，可产生相同或更好的精度。其最大的优点在于它无需特定的硬件，这一点对于许多状态监测的应用都是非常重要的。COT 法在成本和使用上比传统方法已大为简化，并成功地用于工程实际，其关键问题在于信号的重采样^[5,6]。

3 小波包能量谱分析的原理^[7]

实际应用中，采集来的故障信号为数字信号。为了实现数字信号的小波包分解，设 $\{S_k, k \in N\}$ 为离散序列，定义算子：

$$F_0 \{S_k\}_{(j)} = \sum_{k \in N} h_{k-2j} S_k \quad (1)$$

$$F_1 \{S_k\}_{(j)} = \sum_{k \in N} g_{k-2j} S_k \quad (2)$$

设 $\{f_p\}_{(0)}, p \in N$ 为原始故障信号的离散序列，小波包分解的算法为^[1]

$$f_p(2n, j+1) = F_0 \{f(n, j)\}_{(p)} \quad (3)$$

$$f_p(2n+1, j+1) = F_1 \{f(n, j)\}_{(p)} \quad (4)$$

式中， p 为小波包分解各序列序点； j 为小波包分解层数。分解后，各频段信号的能量特征值综合了信号在时域和频域内所包含的全部故障信息。对各频段内的信号能量进行统计分析，形成反映故障信号的特征向量。各个频段能量表示为

$$E = \sum_{k=1}^N |S_{jk}|^2 \quad (5)$$

式中， j 为倍频小波分解层数； N 为采样信号数。

如果对信号进行小波包分解，以能量为元素可以构造一个特征矢量。特征矢量 T 构造如下：

$$T = [E_p, E_{j1}, L, E_{jm}] \quad (6)$$

式中， $m = 2^j - 1$ 。

当能量较大时 E_m 通常是一个较大的数值，在数据分析上会带来一些不方便的地方。为方便分析，可以对特征矢量进行归一化处理，令

$$E = \left(\sum_{m=1}^{2^j-1} |E_{jm}|^2 \right)^{1/2} \quad (7)$$

则

$$T' = [E_p/E, E_{j1}/E, L, E_{jm}/E] \quad (8)$$

其中，矢量即为归一化的特征矢量。

为了更方便比较各个频带能量的大小，将能量矢量进行归一化处理，便得到故障信号的能量特征矢量，从而得到表征轴承故障的特征矢量。

4 粗糙集理论的基本知识

目前粗糙集在故障诊断中的应用主要有^[8]：

1) 利用基于粗糙集理论及其各种推广模型进行故障诊断特征的提取。

2) 利用粗糙集理论简化故障诊断特征，减小故障特征输入量的维数，以降低故障诊断系统的规模和复杂性，从而得出简约的故障诊断模式。

3) 与其他理论结合并应用于诊断系统, 诸如模糊逻辑、神经网络等。

(1) 决策表及其离散化 知识系统可以方便地用数据库中的表格来表达, 列表示属性, 行表示记录。每行表示该记录的信息, 表中的每个值都是对应行(记录)在对应列(属性)下的值, 即为属性值。决策表是一类特殊而重要的知识表达系统, 多数决策问题都可以用决策表形式来表达, 这一工具在决策应用中起着重要的作用。欲从一个具有连续量的决策表中提取知识, 首先要对条件属性的值域进行离散化处理。对任意属性 a 的值域 $V_a = [l_a, r_a]$ 的离散化, 就是在闭区间 $[l_a, r_a]$ 上由小到大选取 k_a 个确定的数(断点), 用这些断点将 $[l_a, r_a]$ 划分成 $k_a + 1$ 个连续的小区间, 然后用码值 $i \in \{0, 1, \dots, k_a\}$ 由小到大分别对应表示这 $k_a + 1$ 个区间, 如果属性 a 的值域集合 $V_a = \{v_1^a, v_2^a, \dots, v_{k_a+1}^a\}$ 中的某个值落入那个小区间, 则该值就用小区间所对应的离散码表示, 如果决策信息表中所有属性的值域都被离散化了, 则决策信息表就变成了一个离散化的决策信息表。在粗糙集理论中, 常用的离散化方法有等间距法、等频距法、最小熵法等^[9]。

(2) 决策表的简化 在一个决策系统中, 各条件属性对于最后的决策而言不是同等重要的, 甚至是冗余的。决策表的简化就是化简决策表中的条件属性, 化简后的决策表具有化简前的决策表的功能, 但化简后的决策表具有更少的条件属性, 即同样的决策可以基于更少的条件。在知识约简中核是不能消去的知识特征的集合。核属性的约简可以通过求差别矩阵来实现, 差别矩阵 (discernibility matrix) 也称可辨识矩阵, 它在核的计算中有重要作用。它是由波兰华沙大学数学家 Skowron 于 1992 年提出的^[10], 其定义如下。

定义: 决策表 $S = \langle U, A, V, f \rangle$ 的差别矩阵是一个对称的 $|U \times U|$ 矩阵, 矩阵的每一项 C_{ij} 表示为

$$C_{ij} = \begin{cases} \{a \in A: (x_i \neq x_j)\} & D(x_i) \neq D(x_j) \\ 0 & D(x_i) = D(x_j) \end{cases} \quad (9)$$

式中, a 为条件属性值; $D(x_i)$ 和 $D(x_j)$ 为决策属性值, $i, j = 1, 2, \dots, n$, 其中 n 为记录信息的行数。

5 故障诊断实例

在某型单级齿轮箱上进行试验验证。在该系统中, 由电动机带动输入轴, 输出轴带动负载。主动齿轮齿数 $Z_1 = 30$, 被动齿轮齿数 $Z_2 = 50$ 。选四个主动齿轮用于实验, 其中三个用于磨损故障实验: 在两个主动齿轮的一个轮齿上分别设置轻微磨损和严重磨损故障; 在一个主动齿轮的每一个轮齿上设置均匀磨损故障。对齿轮箱的升速过程进行分析, 输入轴转速由静止加速至 1200 r/min 左右, 将由 B&K4508 振动加速度传感器测得的振动信号及转矩转速测量仪测得的速度信号传给 B&K3560 多分析仪进行数据处理, 首先对振动信号和转速信号在时域里进行等时间间隔的同步采样, 采样频率为 16384 Hz , 采样时间长度为 2 s 。

对正常状态和三种故障分别测取 30 组数据, 其中 20 组用作训练数据, 10 组用作待诊数据。

图 1 是某组齿轮严重磨损故障实验中, 原始振动信号的时间历程, 由图中可以看出: 信号的幅值随着输入轴转速的升高而逐渐增大, 说明该信号为一个非平稳的过程信号, 不满足 FFT 对信号平稳性的要求, 需要对其进行角域重采样。

图 2 是与图 1 对应的对原始振动信号进行角域重采样后的信号。与图 1 相比, 其稳定性已大为改善, 基本符合 FFT 对信号平稳性的要求。

以齿轮的运行状态为研究对象。针对齿轮的正常状态和三种故障状态, 分别从 20 组待训练样本中任取 2 组, 形成论域 $U = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$ 。对各组信号进行阶次跟踪后, 选用 db1 小波对重采样后的角域故障信号进行二层小波包分解, 得到四个归一化

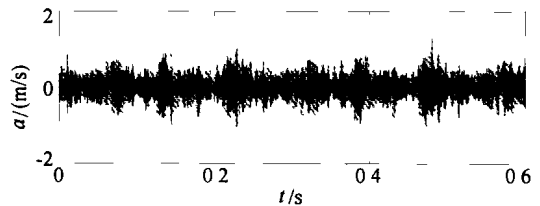


图 1 原始振动信号的时间历程

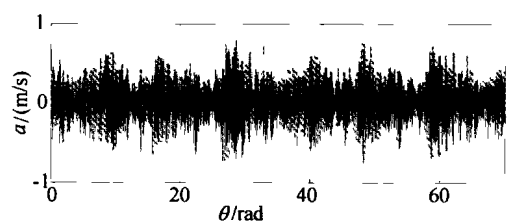


图 2 重采样后的振动信号