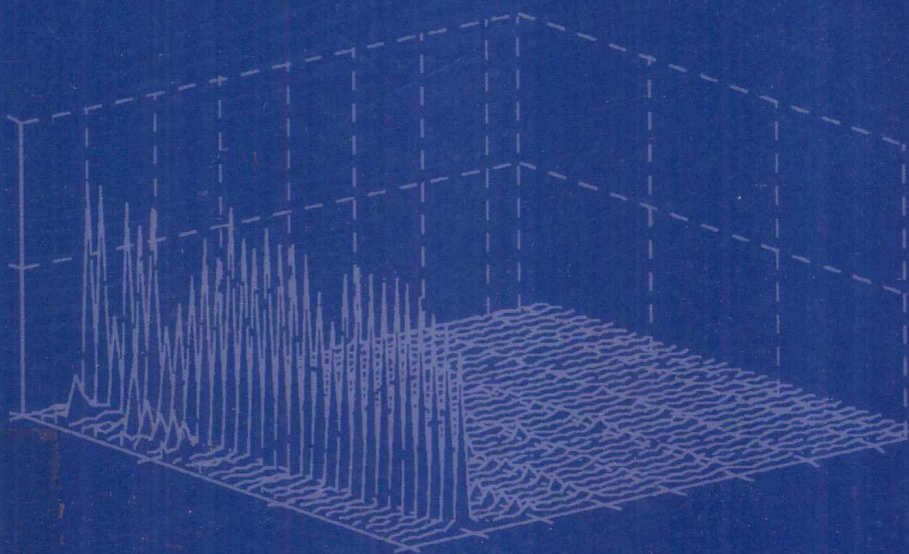


旋转机械故障特征提取 与模式分类新方法

吴昭同 杨世锡 等 著



科学出版社

国家自然科学基金项目(50075079,50205025,50405023,50775208)
国家高技术研究发展计划(2008AA04Z410,2007AA04Z424)

旋转机械故障特征提取 与模式分类新方法

吴昭同 杨世锡 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书首先介绍了基于经验模态分解(EMD)的时频分析、基于独立分量分析(ICA)的机械源盲分离、基于时序模型盲识别的时序谱分析及其故障特征提取等新的信号处理方法与应用。其次,阐明了一维、二维隐 Markov 模型(1D、2D-HMM)一类优良的长时序模式分类方法及其与 EMD、自回归滑动平均(ARMA)谱等分别经转换成随时间变化的二维特征相结合的新技术,以及它们在旋转机械典型的启停机非平稳过程故障诊断中的应用。最后,还介绍了转子系统如转子裂纹、油膜失稳、径向碰摩等非线性故障分析及其特征提取技术。全书内容新颖,既有单一新方法的工程应用,又有多方法结合的综合实现技术;既有系统理论,又有仿真与实验,易于读者理解与应用。

本书可作为高校机械、动力与能源、工程力学、控制等专业高年级学生、研究生的教科书或参考书,也可供机械设备状态监测与故障诊断、设备管理与维护的科技人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

旋转机械故障特征提取与模式分类新方法/吴昭同,杨世锡等著. —北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-032645-4

I. ①旋… II. ①吴…②杨… III. ①旋转机构-故障诊断 IV. ①TH21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 220990 号

责任编辑:耿建业 / 责任校对:林青梅

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 1 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012 年 1 月第一次印刷 印张:21 3/4

字数:418 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

大型旋转机械,如发电机组、炼油化工机组、冶金机组等,其状态监测与故障诊断技术的有效实施以保证机组运行安全性,关系到毁灭性事故的消除和国民经济的稳定发展,具有重大意义。目前,大型旋转机械正向高速化、自动化、超临界化发展,因此其运行安全可靠越来越受到关注。

旋转机械运行过程中存在着多发性故障,常伴有复合故障,再者系统内非线性因素及其动态响应的非线性等常导致非线性、非平稳状态的出现。以平稳信号为对象的传统信号处理方法难以处理频域特征随时间而变化的非平稳信号。目前已出现多种适于非平稳过程状态分析的时频分析方法,如小波变换、经验模态分解(EMD)、维格纳分布等。国内已有较多该领域的“方法与工程应用”研究与介绍,各有创新点,但均属故障特征分析与提取一类的方法,尚少有见到有关与之相结合的适于非平稳过程的故障模式分类方法,以及二者集成形成完整的旋转机械运行过程故障诊断方法的介绍。

本书作者较早地将经验模态分解(EMD)和一维、二维隐 Markov 模型(1D、2D-HMM)等现代信号处理方法引入到旋转机械运行过程振动信号故障提取与模式分类中;同时,将独立分量分析(ICA)、高阶统计量等盲信号处理方法用于机械源盲分离和时序模型盲识别及其故障特征提取上。EMD 是一种优秀的时频分析方法,可提取时、频域二维故障特征,但是目前仍存在“端点效应”,需从源头上予以抑制,以及分解中出现“虚假振动分量”亦需予以识别等以提高分解拟合精度与工程实用性。ICA 可用于盲分离平稳、非平稳信号的干扰源及复合故障,适于非高斯信号处理,亦可提取优良的故障特征。但是,由于复杂系统中不相关或独立源数的合理估计,是以合理数量的观测传感器信号来重构源的基础,需予以有效确定;其次,ICA 仍存在着盲不确定性(幅值、相位与排序),影响着该法的进一步应用。时序模型盲识别方法需要有效地提供足够拟合精度的自回归滑动平均(ARMA)谱和双谱一类的模型参数应用于故障特征提取与分析。隐 Markov 模型(HMM)这一类方法具有强大的长时序模式分类能力,适于非平稳、再现性不佳的过程信号处理。经实验证明,包括启停机各转速区故障特征的非平稳过程故障识别率远高于单一转速区所得故障识别率与有效性,具有重要的学术意义与应用价值。

目前,转子系统现有的基于线性和经典非线性振动理论的故障诊断方法是采用近似的模型线性化方法研究其非线性实系统。当强烈非线性故障存在及其恶化时,就无法解释和辨识出现的非线性动力学现象以及进行正确的故障特征提取,因此必须采用非线性动力学相关理论进行分析。另外,近年来转子裂纹故障引发灾难性事故频繁,服役或超服役期运行引起疲劳扩展裂纹危害最大,亟须采用一种新裂纹闭合模型及其新方法,研究其各共振区内的振动特性及其分岔与混沌特性,以供故障特征提取与识别。

本书针对上述大型旋转机械故障诊断中理论与过程应用命题一一进行了深入有益的探索工作。

本书研究成果基于以下项目。国家自然科学基金项目 4 项:基于隐马尔可夫模型的旋转机械故障诊断新方法的研究,基于独立分量分析的旋转机械故障诊断新方法研究,基于隐马尔可夫与支持向量机的非平稳故障诊断新方法研究,旋转机械故障诊断中的非线性频谱分析盲识别新方法研究(编号分别为:50075079,50205025,50405023,50775208);国家高科技发展计划(“863”计划)项目 2 项:超临界、超超临界大型汽轮机发电机组状态监测与故障诊断技术及其系统研究,汽轮机故障诊断集成技术研究(编号分别为:2008AA04Z410,2007AA04Z424);中国博士后科学基金 1 项:基于盲系统辨识的旋转机械故障诊断的研究(编号为:20040350061)等的大力支持,完成了上述现代信号处理方法在旋转机械故障诊断工程应用中的一些命题的研究工作,取得了一些成果并发表了相关研究论文。这些命题与论文,具有一定的相关性、系统性。因此,作者们在取得成果的基础上撰写本书,其内容新颖,具有先进性,既有单一方法在工程应用上的创新点,又有多种方法集成应用的实现技术。本书力求读者易于阅读、理解和应用。期望本书的出版能为从事机械设备故障诊断的广大科技人员提供参考并起着抛砖引玉的作用,亦为本领域的科技进步尽微薄之力。

参加本书各章撰写的人员有:第 1 章,杨世锡教授(浙江大学教授、博士生导师),童进博士;第 2 章,李志农教授(南昌航空大学教授、硕士生导师);第 3 章,胡劲松副教授(宁波工程学院副教授),曹冲锋博士,杨世锡教授;第 4 章,焦卫东教授(嘉兴学院教授、硕士生导师),杨世锡教授;第 5 章,冯长建副教授(大连民族学院副教授);第 6 章,李志农教授;第 7 章,叶大鹏教授(福建农林大学教授、硕士生导师),曹冲锋博士,杨世锡教授;第 8 章,汪慰军高级研究员;第 9 章,曾复副教授(杭州电子科技大学副教授)。全书由吴昭同教授(浙江大学教授、博士生导师)策划、统稿,严拱标教授(浙江大学教授)为本书审稿。

本书作者衷心感谢国家自然科学基金委员会给予的有力支持,国家高技术研究发展计划(863 计划)委员会的支持,科学出版基金委员会的支持,同时感谢冯培

恩、何正嘉两位教授以及学术界同仁对作者工作的一贯热情支持与帮助。此外,严拱标教授为本书审稿,杨将新教授、丁启全教授也曾给予大力支持,特一并表示感谢。

限于作者水平,书中难免存在不足之处,恳请广大读者批评和指正。

吴昭同
2011年9月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 旋转机械故障诊断	1
1.2 旋转机械故障及其主要特征	2
1.2.1 旋转机械典型故障振动分类	2
1.2.2 旋转机械典型故障机理及振动特征分析	3
1.3 状态监测与故障诊断系统组成	11
1.3.1 故障信息检测	12
1.3.2 状态监测	12
1.3.3 故障特征提取	12
1.4 旋转机械故障诊断的发展	13
1.4.1 基于信号分析的常规故障诊断	13
1.4.2 基于知识推理的智能故障诊断	14
1.4.3 基于神经网络故障诊断技术	15
1.5 机械故障特征提取与模式分类方法研究现状	16
1.5.1 独立分量分析方法	16
1.5.2 经验模态分解方法	17
1.5.3 基于隐 Markov 模型特征提取与识别方法	18
1.6 旋转机械故障非线性动力学分析	19
主要参考文献	22
第 2 章 基于时间序列模型盲辨识的故障特征提取方法	26
2.1 时序模型	27
2.2 盲系统辨识	29
2.2.1 系统辨识的基本过程	29
2.2.2 盲系统辨识的基本概念	31
2.3 时序模型的盲辨识算法	34
2.3.1 高阶累积量的定义及其计算	34
2.3.2 AR 模型的盲辨识算法	35
2.3.3 MA 模型的盲辨识算法	40
2.4 ARMA 模型盲辨识方法及其仿真比较	42

2.4.1	时序模型的经典辨识方法	42
2.4.2	几种经典辨识方法与盲辨识法仿真比较	43
2.5	基于时序模型盲辨识的参数化双谱分析及其应用	46
2.5.1	双谱分析	47
2.5.2	实验研究	52
	主要参考文献	58
第3章	基于经验模态分解的时频分析及其故障特征提取方法	60
3.1	基于 EMD 时频分析的基本原理和算法	60
3.1.1	EMD 方法的基本原理	60
3.1.2	EMD 方法的算法	65
3.1.3	EMD 方法的完备性和正交性	66
3.1.4	基于 EMD 的希尔伯特谱的基本原理和算法	66
3.2	端点效应及信号序列的延拓技术	72
3.2.1	端点效应的机理与影响	72
3.2.2	周期延拓技术	73
3.2.3	基于时间序列预测的延拓技术	75
3.2.4	基于神经网络的预测延拓方法	80
3.2.5	信号序列端点优化对称延拓方法	83
3.2.6	信号序列延拓技术比较分析	89
3.3	基于 EMD 的时频分析与其他时频分析方法的比较	89
3.3.1	基于 EMD 的时频分析与短时傅里叶变换时频分析的比较	89
3.3.2	基于 EMD 的时频分析与 Wigner-Ville 分布的比较	93
3.3.3	基于 EMD 的时频分析与小波分析的比较	96
3.4	基于白噪声统计特性的机械振动模式检验方法	104
3.4.1	虚假振动模式产生的原因分析	104
3.4.2	基于 EMD 的白噪声统计特性	106
3.4.3	白噪声的 EMD 分析及其特性	108
3.4.4	基于白噪声统计特性的机械振动模式检验方法流程	111
3.4.5	仿真及实验验证	111
3.5	基于 EMD 时频分析的故障特征模式	116
3.5.1	瞬时能量分布特征模式	116
3.5.2	希尔伯特时频谱和边际谱	117
	主要参考文献	118
第4章	基于独立分量分析的机械源分离及特征提取	121
4.1	ICA 的定义与模型	121

4.1.1 ICA 定义	121
4.1.2 ICA 模型及其模型估计性质	123
4.2 ICA 目标函数和算法	127
4.2.1 目标函数(参照函数)和优化算法	127
4.2.2 ICA 算法的一般流程	129
4.2.3 一些重要的 ICA(BSS)典型算法	129
4.2.4 算法性能评价指标	135
4.3 基于 ICA 机械源分离方法	136
4.3.1 分离方法	136
4.3.2 信号特性校验	137
4.3.3 算法选择与性能分析	143
4.3.4 基于 FFT-MCC 分析的 ICA 盲不确定性消除	145
4.3.5 机械源 ICA(BSS)的实现方法	151
4.4 基于 ICA 的机械源分离实验与应用	152
4.5 基于 ICA 的机械故障特征提取与分类器	165
4.5.1 基于 ICA 残余总体相关和残余互信息的特征提取	165
4.5.2 基于 ICA 特征提取的机械故障分类器	168
主要参考文献	180
第 5 章 基于隐 Markov 模型的故障模式分类方法	184
5.1 HMM 的基本理论与算法	184
5.1.1 HMM 基本理论	184
5.1.2 HMM 基本算法	187
5.1.3 HMM 的类型	191
5.1.4 HMM 在实际应用中的实现技术	192
5.1.5 HMM 在故障诊断中的模式分类作用	197
5.2 旋转机械升速过程 DHMM 故障分类方法	198
5.2.1 振动信号的特征提取	199
5.2.2 幅值谱矢量的标量量化	201
5.2.3 多观测样本序列 DHMM 算法的改进	203
5.2.4 DHMM 故障诊断步骤	206
5.3 诊断实验	208
5.3.1 升降速过程转子振动特点与在各转速区的表现	209
5.3.2 转子启动过程模拟实验	210
5.3.3 DHMM 训练和诊断结果	213
主要参考文献	216

第 6 章 基于因子隐 Markov 模型的模式分类方法	218
6.1 FHMM 的基本概念与算法	218
6.1.1 FHMM 模型的基本概念	218
6.1.2 FHMM 模型的算法	220
6.2 基于时序模型盲辨识的 FHMM 故障诊断方法	223
6.2.1 BSI-FHMM 故障诊断方法	223
6.2.2 实验研究	224
6.3 基于 ICA 的 FHMM 分类器故障诊断方法	226
6.3.1 基于 ICA 的 FHMM 分类器的设计	227
6.3.2 实验研究	228
主要参考文献	232
第 7 章 基于二维隐 Markov 模型的故障模式分类方法	233
7.1 2D-HMM 的拓扑结构与特点	233
7.2 2D-HMM 基本理论和算法	235
7.2.1 2D-HMM 模型信号描述	235
7.2.2 2D-HMM 模型的算法	236
7.3 基于 2D-HMM 的振动信号特征提取	241
7.3.1 2D-HMM 特征提取方法	241
7.3.2 状态数确定原理与方法	244
7.4 基于 2D-HMM 的旋转机械故障识别与应用	247
7.4.1 2D-HMM 故障诊断原理及步骤	247
7.4.2 实验验证与应用	250
主要参考文献	262
第 8 章 旋转机械故障非线性特征提取技术	265
8.1 转轴系统油膜失稳的 Hopf 分岔行为	266
8.1.1 Hopf 分岔的 Poore 判据	266
8.1.2 力学模型	267
8.1.3 理论分析	268
8.1.4 数值分析	270
8.2 转子系统径向碰摩故障的分岔与混沌行为	272
8.2.1 转子系统径向碰摩故障的分岔与混沌行为概述	272
8.2.2 转子-定子冲击作用的数学模型	274
8.2.3 转子径向碰摩故障的力学模型与理论分析	275
8.2.4 转子径向碰摩故障的实验研究	280
8.3 基于延时嵌入法的非线性故障特征提取技术	284

8.3.1	延时嵌入相空间重构的理论概要	284
8.3.2	重构参数的选取原则	285
8.3.3	故障实例分析	286
8.4	基于关联维数的非线性故障特征提取技术	289
8.4.1	关联维数的定义与计算方法	289
8.4.2	故障实例分析	293
8.5	基于柯尔莫哥洛夫熵的非线性故障特征提取技术	295
8.5.1	柯尔莫哥洛夫熵的概念与基本性质	295
8.5.2	柯尔莫哥洛夫熵的应用实例分析	296
	主要参考文献	297
第9章	裂纹转子非线性故障振动特性分析	299
9.1	裂纹转子数学模型	299
9.1.1	裂纹转子刚度的计算	300
9.1.2	常见裂纹模型	302
9.1.3	一种新的裂纹模型	303
9.2	开裂纹转子振动特性分析	306
9.2.1	开裂纹转子的数学模型	306
9.2.2	开裂纹转子运动稳定性分析	307
9.2.3	开裂纹转子稳态响应分析	307
9.3	基于多尺度分析法的开闭裂纹转子振动特性分析	310
9.3.1	求解非线性振动方程的多尺度分析法	310
9.3.2	开闭裂纹转子的数学模型	312
9.3.3	非共振转速区的振动特性分析	313
9.3.4	共振转速区的振动特性分析	320
9.4	考虑非线性涡动的开闭裂纹转子分岔和混沌特性分析	324
9.4.1	考虑非线性涡动的开闭裂纹转子数学模型	324
9.4.2	裂纹转子的分岔和混沌特性分析	325
	主要参考文献	331

第 1 章 绪 论

1.1 旋转机械故障诊断

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、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、自动化的方向发展。生产系统中各设备之间的联系也越来越紧密。由于各种随机因素的影响,这些机械难免出现一些故障现象,即降低或失去一定的功能;而机组一旦出现故障就可能引起连锁反应,导致整个设备无法正常工作甚至整个生产过程无法继续,造成巨大的经济损失,严重时还会引起灾难性人员伤亡事故。在技术高度发展的今天,国内外因设备故障而引起的灾难性事故仍时有发生,例如,1987 年山西大同发电厂 200MW 机组转子断裂,1988 年秦岭电厂 5 号机组主轴断裂,两次事故经济损失均达亿元以上^[1]。据国内石化行业统计:1976~1985 年期间,化肥五大机组由于事故停车造成的直接经济损失高达 47500 万元。在国外,类似事故从 1970 年以来仅正式报道的就有 50 多起^[2],如 1971 年美国 300MW 发电机组联轴器螺栓断裂、1972 年日本关西电力公司南海电站 3 号 600MW 汽轮发电机因振动而引起的断轴毁机事件、1973 年原西德 600MW 发电机组联轴器变形等;印度伯帕尔化工厂和前苏联契尔诺贝利核电站的事故对整个社会环境造成的巨大灾难和带来的生命财产损失更是尽人皆知。因此研究、发展并应用先进的状态监测与故障诊断技术,保证这些关键设备的安全而高效地运行,避免巨额的经济损失和灾难性事故的发生,将为国民经济创造巨大财富,这是当前科技和工业发展的重要研究问题之一。

研究并应用先进的状态监测与故障诊断技术不仅可以早期发现故障,避免恶性事故的发生,还可以从根本上解决目前设备定期维修中维修不足和维修过剩的问题。这样,可以节约大量的维修费用,据美国统计局统计,美国 1990 年全年税收为 7500 亿美元,而工业设备的维修费用达 2500 亿美元,专家估计其中约 750 亿美元是“过剩维修”费用;据有关资料可知,在日本,机组设备诊断技术的应用使每年的维修费用减少 25%~50%,故障停机时间减少 75%;而国内仅鞍钢每年的维修费用达 2.3 亿~2.7 亿元,约占设备投资的 10%,占总产值的 6%~7%^[3];据文献[4]估计,如果我国电力部门全面推广设备诊断技术,仅维修费用每年可节约

3.5 亿元。另外,采用故障诊断技术可以大大减少非计划停车和生产停顿所造成的损失。以一台 200MW 汽轮发电机组为例,如能将故障分析和处理时间减少一天,则可以多发电 480 万千瓦时,挽回经济损失达数百万元;一台 30 万吨合成氨压缩机,停车一小时直接损失就高达数十万元^[5]。至于对工农业生产的意义就更大了。

我国于 1983 年初正式把开展诊断工作的要求纳入《国营工业交通设备管理试行条例》,明确地指出:“要根据生产的需要,逐步采用现代故障诊断和状态监测技术,发展以状态监测为基础的预防维修体制”^[6],并持续将设备状态监测与故障诊断确定为重大攻关课题,由国家投入巨资,组织科研人员进行研究,目前已取得了一些可喜的成果,积累了一些成功的经验,开发了一些故障诊断系统,并在一些实际生产中得到初步应用。

尽管在故障诊断方面做了一定的研究工作,包括许多基础理论的研究,但实践证明,这一技术本身发展还远远不能满足实际生产的需要,尚未形成一个比较系统而完善的理论体系;已投入运行,应用比较成功的大型旋转机械故障诊断系统并不多见。因此,开展大型旋转机械状态监测与故障诊断技术和实用化研究仍是当今科技发展的一个重要研究内容。

《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020)》中将“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”和“基于高可靠性的大型复杂系统和装备的系统设计技术”列为先进制造技术中急需解决的前沿技术。高档数控机床与基础制造技术、大型飞机和载人航天与探月工程等重大专项均将基于状态监测与故障诊断的可靠性保证技术列为专项的重要内容。国家自然科学基金委员会每年也资助许多相关的项目开展研究工作。

1.2 旋转机械故障及其主要特征

1.2.1 旋转机械典型故障振动分类

旋转机械是机械设备中应用面最广、数量最多,而且最具有代表性的机械设备之一,尤其是在电力、石化、冶金、机械、航空等行业,转速相对较高的旋转机械如汽轮机、燃气轮机、发电机、电动机、离心式压缩机泵等,更是占有举足轻重的重要作用。

振动是旋转机械故障的主要表现形式,根据振动的不同,可对各种振动故障可作如下分类。

1. 按振动频率分类

按振动频率的高低,可分为基频 f_0 振动、倍频振动(如 $2f_0$ 、 $3f_0$ 振动等)、频率

为基频的分数(如 $1/2f_0$ 、 $1/3f_0$ 等)的振动、频率与基频成一定比例关系(如 $38\%f_0 \sim 49\%f_0$)的振动、超低频(5Hz 以下)振动、超高频(10kHz 以上)振动等。如果知道转子的一阶临界转速、故障时的转速及特征频率,就可以大体了解故障的起因。这是一种初步确诊故障的方法,它能帮助我们找到故障产生的可能原因。

2. 按振动原因分类

根据引起旋转机械振动的原因,可分为转子不平衡所引起的振动、轴系不对中所引起的振动、滑动轴承与轴颈偏心所引起的振动、滚动轴承损坏所引起的振动、滑动轴承油膜涡动和油膜振荡所引起的振动、轴承座刚度不对称所引起的振动、摩擦(如密封件摩擦、转子与定子摩擦等)所引起的振动、电气方面原因所引起的振动、机器零部件松动所引起的振动、空气动力、水力等因素所引起的振动等。

3. 按振动发生的部位分类

按照旋转机械振动发生部位的不同,可分为转子或轴系振动、轴承(包括油膜滑动轴承和滚动轴承)振动、壳体及轴承座振动、基础(包括机座、工作台、支架等)振动、其他如管道结构及阀门等各种振动等。

此外,若按振动的特征和形式,还可分为同步振动(强迫振动)和亚同步振动(自激振动)等。

1.2.2 旋转机械典型故障机理及振动特征分析

1968 年 Sohre 在美国 ASME 石油机械工程年会上发表了论文“高速涡轮机械运行问题(故障)的起因和治理”,将其关于旋转机械故障机理的几十年研究成果总结成振动征兆分析表,把高速涡轮机械的典型故障分为 9 类 27 种,清晰而简洁地描述了典型机械故障的症状及其可能原因之间的关系,并推广到大型旋转机械故障诊断领域。该分类方法已为国内外广泛采用。本书就旋转机械在正常和各种典型故障状态下的振动特征表现进行分析,并给出具体的特征谱,以供故障特征分析和诊断参考。

1.2.2.1 旋转机械正常情况及振动特征

在旋转机械运行中,当机组工作转速低于一阶临界转速,此时转轴称为刚性轴;反之,当机组工作转速高于一阶临界转速时,该转轴则称为柔性转轴,柔性转轴旋转机械比刚性转轴的机组运行较为平稳。由于柔性转轴旋转机械的工作转速高于临界转速,在启停机过程旋转机械经过临界转速时,转子会产生很大的挠曲变

形,机组强烈振动,即使此时旋转机械缓慢地升降速,这种强烈的振动也是不可避免的,而当转子转速超越临界转速后,转子的挠曲变形与机组振动也随之减小,机组运行趋向平稳。机组在升降速过程中的许多表征都与机组的各种状态有着紧密的关系,如其中的临界转速,与系统的各种力学参数都是密切相关的。一些参数的微小变化非常敏感,转轴抗弯刚度、转轴长度、转子质量、轴承座质量、轴承座等效静刚度、轴承座油膜刚度、支承刚度系数等诸多因素的变化都会或多或少地影响临界转速值的大小,这也是为何在升降速过程中振动的重复再现性不佳的原因。

由转子经过的升降速过程转速区间可分为一阶临界转速以下的低速运行区、一阶临界转速附近的一阶共振区、一阶临界转速与二阶临界转速之间的中速运行区、二阶临界转速附近的二阶共振区、二阶临界转速以上的高速运行区等 5 个区间,转子在经过升降速过程这 5 个区间后,到达平稳匀速运行的工作区间。在本书的转子升降速实验中,转子试验台的两个共振区分别位于 3800r/min 与 7000r/min 左右,5 个区间对应的转速段为:500~3000r/min、3000~4500r/min、4500~6700r/min、6700~7400r/min、7400~8000r/min。图 1.1 上部分为正常状态下升降速过程 5 个转速区间的运行谱图。

以下介绍了旋转机械几种故障的机理、振动特征与其轴心轨迹图和各类振动谱图^[7~11]。

1.2.2.2 转子不平衡故障及其振动特征

转子不平衡是旋转机械最常见的故障,转子不平衡故障可表现在转子质量不平衡、初始弯曲、热态不平衡、部件脱落结垢、联轴器不平衡等方面。不同原因引起的转子不平衡虽各有特点,但规律相近,因为所有的不平衡均可视为由转子的质量偏心引起。转子不平衡故障在一阶临界转速前的转子振动幅度随转速的升高呈抛物线规律增大,在一阶临界转速时,由于转子发生共振而出现振动峰值,转子出现呈半个正弦波的一阶振型,一阶临界转速后的振幅有所下降,而当转速上升至接近二阶临界转速时,如本书实验中的 7000r/min 附近,转子则会产生呈正弦波的二阶振型,振幅将再度出现一个共振峰值。图 1.1 下部分为转子不平衡状态下升降速 5 个转速区间的运行谱图。

转子质量不平衡的振动特点为:

(1) 转子质量不平衡引起整个机组轴承均发生较大振动,在转子通过临界转速时振动幅值明显增大;

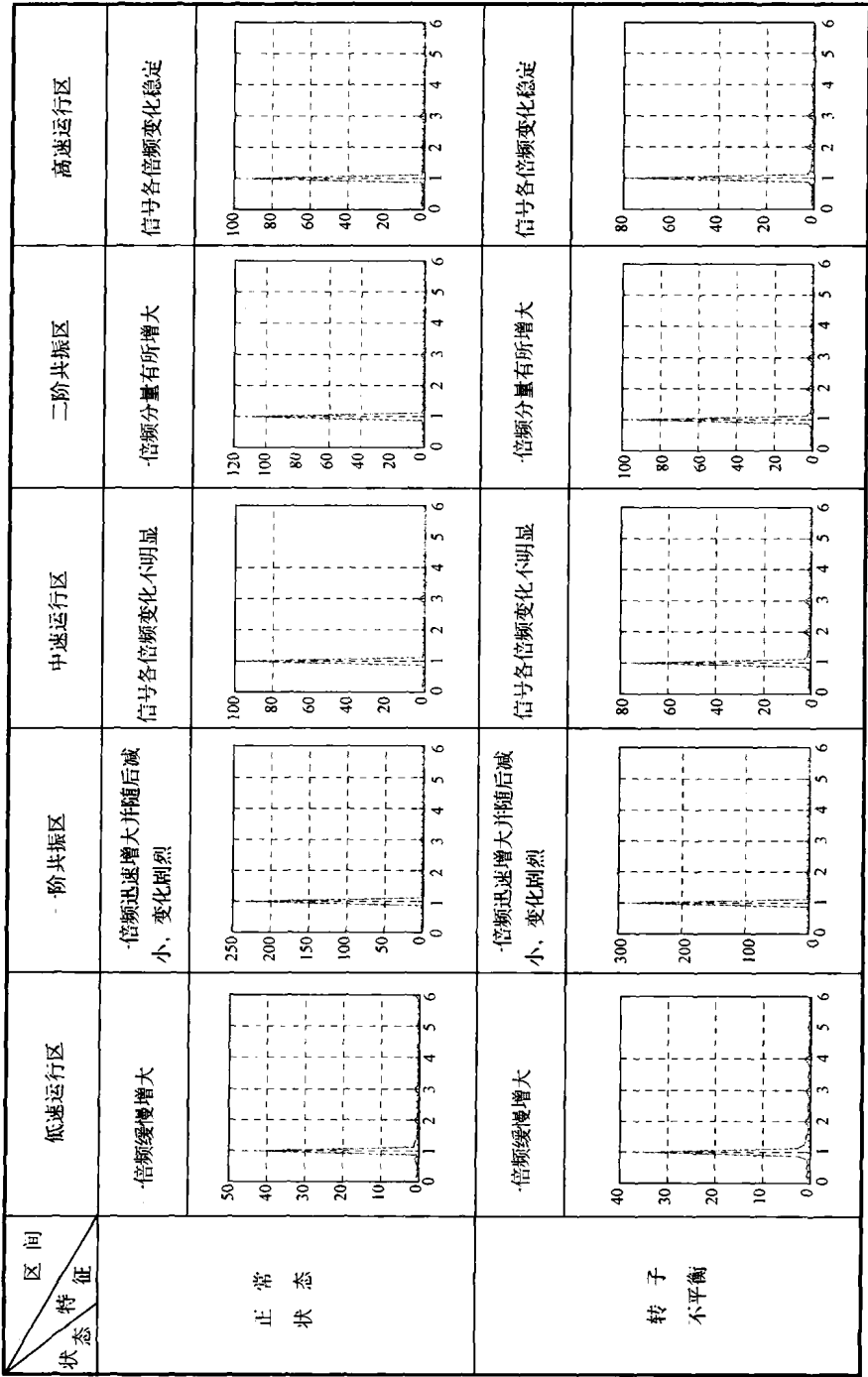


图 1.1 正常状态和转子不平衡状态下升降速 5 个转速区间的运行幅频谱图

- (2) 振动频率与转子转速一致,以一倍频振幅为主,其他谐波的振幅较小;
- (3) 轴心轨迹为椭圆形。

1.2.2.3 转轴不对中故障及其振动特征

转轴不对中是指相邻两转子的轴心线与轴承中心线的倾斜或平移,本书着重进行了联轴器平行偏角不对中实验。联轴器平行不对中时振动频率为转子工频的两倍,而联轴器偏角不对中又使转子在轴向产生工频振动,联轴器平行偏角不对中是以上两种情况的综合。图 1.2 上部分为转子不对中状态下升降速过程 5 个转速区间的运行谱图。

转轴不对中故障的振动特点为:

- (1) 转轴径向振动出现二倍频,以一、二倍频分量为主,不对中越严重,二倍频所占的比例就越大,并有可能出现高次谐波;
- (2) 转轴不对中典型的轴心轨迹呈香蕉形;
- (3) 振动对负荷变化敏感,当负荷改变时,联轴器扭矩发生改变,如果联轴器不对中,则振动状态也立刻发生变化。

1.2.2.4 转轴碰摩故障及其振动特征

由于机组参数的变化,动静配件间隙的缩小,以及运行过程中不平衡、不对中、热弯曲等影响,经常会发生转轴碰摩故障。从不同角度,摩擦可分为轴向碰摩和径向碰摩,局部碰摩和全周碰摩,早期、中期和晚期碰摩等。转轴碰摩是一个复杂的过程,可能导致全周摩擦从而引起自激振动,也有可能改变机组临界转速并造成非线性不稳定振动,另外期间产生的冲击作用使机组振动成为叠加的复杂振动,这些现象都会影响转子正常运行,甚至损坏机组。当转轴与静止件发生摩擦时,受到其附加作用力,由于作用力是时变非线性的,所产生的非线性振动在频谱图上表现出频谱成分丰富,不仅有工频,还有低次和高次谐波分量,当摩擦加剧时,这些谐波分量的增长很快。当转子在一阶临界转速以下时,碰摩发生在振动高点处并产生热弯曲,转轴被越磨越弯,转子处于一阶临界转速以上时,不平衡部分由于被磨掉而不再发生摩擦,而当转子远离一阶临界转速接近二阶临界转速时,摩擦后引起的二阶不平衡量将明显增大,从而引起进一步摩擦,甚至使转轴发生弯曲,在这种情况下是很危险的。图 1.2 下部分为转子碰摩状态下升降速过程 5 个转速区间的运行谱图。

转轴碰摩故障的振动特点为:

- (1) 转子失稳前频谱丰富,波形畸变,轴心轨迹不规则变化,失稳后波形严重畸变或削波,轴心轨迹发散;
- (2) 轻微摩擦时同频幅值波动,轴心轨迹带有小圆环;