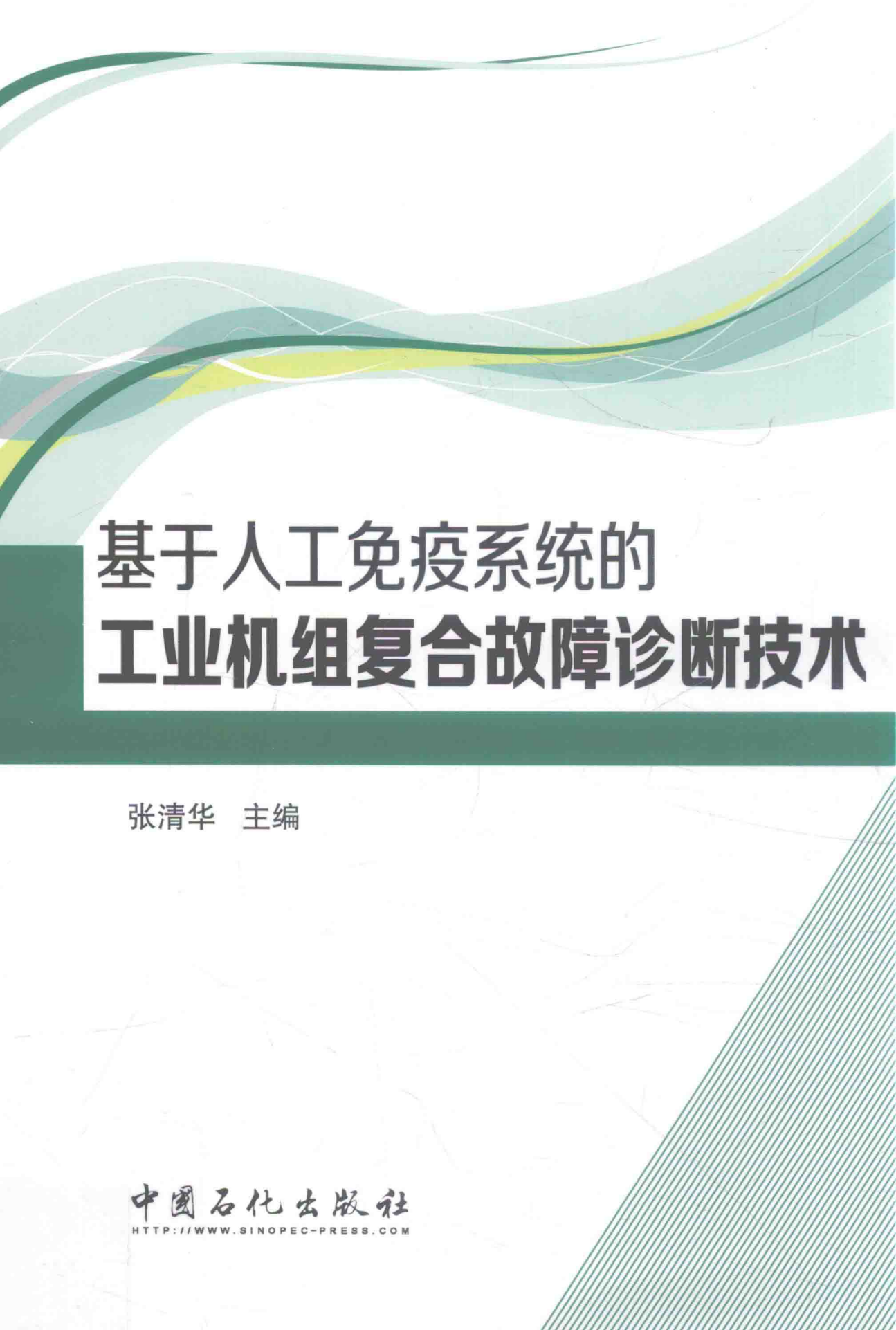


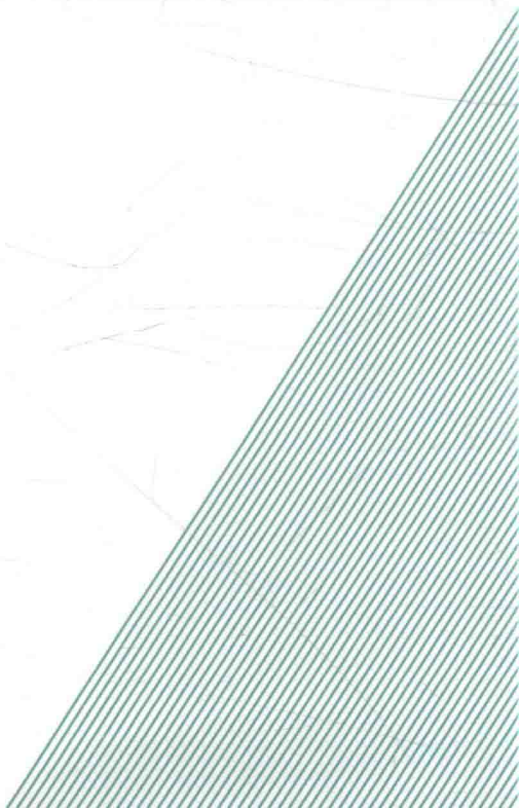


基于人工免疫系统的 工业机组复合故障诊断技术

张清华 主编

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)



基于人工免疫系统的工业机组 复合故障诊断技术

张清华 主编

中国石化出版社

内 容 提 要

本书针对工业机组因为大型化、高速化、复杂化而造成多重故障并发概率不断增大的情况,提出了一种基于人工免疫系统的工业机组复合故障诊断技术。全书共6章,内容包括旋转机械复合故障诊断原理、基于人工免疫系统的复合故障诊断技术、基于证据理论的复合故障诊断技术、基于粗糙集的权重确定方法、基于频谱的复合故障诊断方法、旋转机械复合故障诊断技术在现场工业中的应用。

本书可供从事机械设备管理、运行维护、检维修等人员使用,也可供普通高等院校相关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于人工免疫系统的工业机组复合故障诊断技术 /
张清华主编. —北京:中国石化出版社,2016.9
ISBN 978-7-5114-3636-8

I. ①基… II. ①张… III. ①故障诊断-工业技术
IV. ①TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 211160 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 8.5 印张 162 千字

2016 年 9 月第 1 版 2016 年 9 月第 1 次印刷

定价:40.00 元

前言

PREFACE

生物免疫系统是一个具有模式识别、分布式检测、记忆能力、自学习能力、多样性等特征的系统。人工免疫系统是对生物免疫系统的模拟,具有强大的信息处理能力。由免疫系统“自己-非己”识别机理衍生而来的阴性选择算法能有效地识别被检测对象的正常模式(自己)及异常模式(非己),且不需要有异常模式的先验知识。该算法的提出为故障诊断领域提供了新的思路和方法。

随着旋转机械的大型化、高速化、复杂化,多重故障的并发概率也在不断地增大。旋转机械发生复合故障时,不同故障特征相互混杂呈现出多耦合、模糊性等复杂征兆,并非多个单故障的简单线性叠加,很难用准确的数学模型加以描述,也难以完全依靠确定性判据进行故障诊断。针对这一情况,本书提出了一种基于人工免疫系统的工业机组复合故障诊断技术。

本书共分6章。第1章介绍了旋转机械复合故障诊断原理,包括旋转机械复合故障诊断的目的和意义、旋转机械复合故障诊断的特点及任务、旋转机械复合故障诊断的发展趋势、故障诊断的基本概念、故障信息的获取与诊断方法以及振动诊断的基础工作和振动信号的分析与处理;第2章介绍了基于人工免疫系统的复合故障诊断技术,包括基于人工免疫系统的复合故障诊断概述、人工免疫系统的生物原型、人工免疫系统的仿生机理、人工免疫系统模型和阴性选择算法及新的改进;第3章介绍了基于证据理论的复合故障诊断技术,包括基于证据理论的复合故障诊断方法概述和证据理论的原理,并提出一种新的证据组合规则及其在故障诊断中的应用;第4章、第5章分别介绍了基于粗糙集的权属性权重确定方法和基于频谱的复合故障诊断方法;第6章介绍了基于人工免疫系统的旋转机械复合故障诊断在现场工业中的应用。

本书由张清华主编。全书由张清华负责策划、部分书稿编写与统稿工作。其中第1、2、3章由张清华、孙国玺、熊建斌、司小胜编写,第4、5、6章由张清华、王世华、何俊、邵龙秋、胡勤、覃爱淞编写。

本书的出版得到清华大学周东华教授、叶昊教授，中国人民解放军火箭军工程大学胡昌华少将，茂名石化公司韩建宇教授级高工等专家的大力支持和指导，在此表示衷心的感谢。本书还得到阿尔斯通创为实公司、茂名石化公司、广州石化公司、湛江东兴石化公司等企业的支持与配合，提供了大量宝贵的现场数据，在此，谨代表本书的广大读者对他们为故障诊断技术的应用及推广所作出的贡献，一并表示谢意。

由于旋转机械故障诊断技术发展较快，作者水平有限，书中难免存在遗漏和不妥之处，敬请读者批评指正。我们真诚希望本书能对从事和学习故障诊断技术的广大读者有所帮助。

编者

目 录

CONTENTS

第1章 旋转机械复合故障诊断原理	(1)
1.1 旋转机械复合故障诊断概述	(2)
1.1.1 旋转机械复合故障的定义	(2)
1.1.2 常见的旋转机械复合故障	(4)
1.1.3 旋转机械复合故障诊断的目的和意义	(5)
1.2 旋转机械复合故障诊断原理	(7)
1.2.1 故障诊断的基本概念	(8)
1.2.2 故障信息的获取和诊断方法	(9)
1.2.3 振动诊断的基础工作	(13)
1.2.4 振动信号的分析与处理	(16)
1.3 本章小结	(20)
第2章 基于人工免疫系统的复合故障诊断技术	(21)
2.1 人工免疫系统的原理及模型	(22)
2.1.1 人工免疫系统的生物原型	(22)
2.1.2 人工免疫系统的仿生机理	(22)
2.1.3 人工免疫系统模型	(27)
2.2 阴性选择算法	(28)
2.2.1 阴性选择算法	(29)
2.2.2 检测信号处理及检测器训练	(30)
2.2.3 阴性选择算法新的改进	(31)
2.3 无量纲指标	(37)
2.3.1 概率密度函数	(37)
2.3.2 无量纲指标的定义	(38)
2.3.3 无量纲指标的优越性	(40)
2.3.4 构建新的适用于复合故障诊断的无量纲指标	(40)

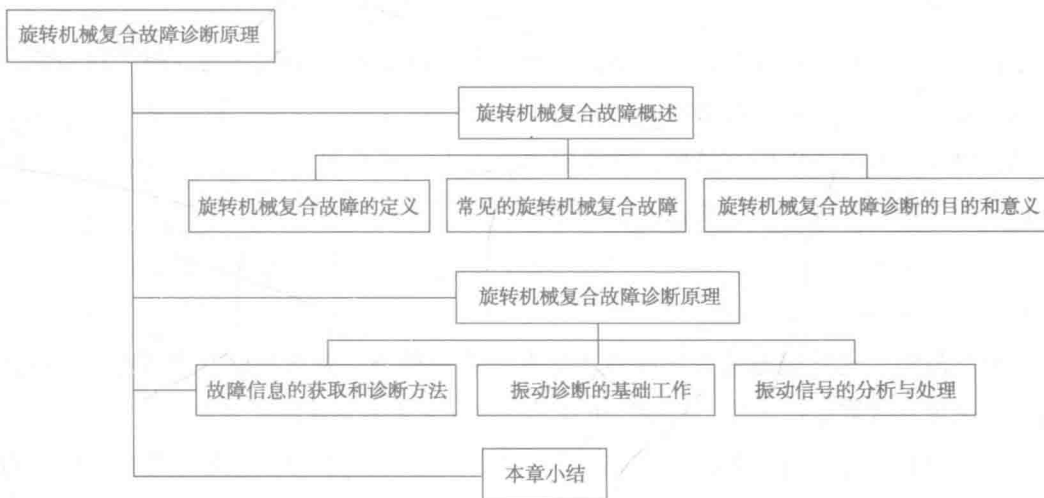
2.4 应用实例及仿真	(42)
2.4.1 无量纲指标计算与故障特征提取	(42)
2.4.2 无量纲免疫检测器的生成	(44)
2.4.3 集成诊断	(46)
2.4.4 多无量纲免疫检测器的旋转机械复合故障诊断实验及仿真	(47)
2.5 本章小结	(50)
第3章 基于证据理论的复合故障诊断技术	(51)
3.1 基于证据理论的复合故障诊断方法概述	(52)
3.1.1 机械故障诊断的意义	(52)
3.1.2 基于证据推理的机械复合故障	(53)
3.2 证据理论复合故障诊断原理	(56)
3.2.1 K最近邻法算法	(56)
3.2.2 经典的证据理论故障诊断方法	(57)
3.2.3 改进的证据理论故障诊断方法	(58)
3.2.4 相关证据下并发故障诊断的信息融合方法	(61)
3.2.5 证据组合规则的随机集统一表示及其在故障诊断中的应用	(62)
3.2.6 证据组合规则的随机集统一表示模型	(64)
3.2.7 经典组合规则的随机集统一表示	(65)
3.2.8 一种新的证据组合规则及其在故障诊断中的应用	(66)
3.3 本章小结	(67)
第4章 基于粗糙集的属性权重确定方法	(68)
4.1 粗糙集概述	(69)
4.1.1 粗糙集概述	(69)
4.1.2 粗糙集与证据理论	(71)
4.2 粗糙集的基本概念	(71)
4.2.1 等价关系与粗糙集	(71)
4.2.2 精度与粗糙度	(72)
4.2.3 知识约简	(73)
4.3 粗糙集的属性权重确定方法	(73)
4.3.1 基于条件属性的属性重要度确定方法	(74)
4.3.2 基于决策属性的属性重要度确定方法	(75)
4.3.3 基于粗糙集的属性权重确定方法	(76)

4.4 改进的粗糙集属性权重确定方法	(76)
4.4.1 改进的基于条件的属性重要度确定方法	(76)
4.4.2 改进的基于决策的属性重要度确定方法	(77)
4.4.3 改进的基于粗糙集的属性权重确定方法	(78)
4.5 基于粗糙集的权重分配的仿真、实验	(78)
4.5.1 实验环境	(78)
4.5.2 实验数据	(80)
4.5.3 基于条件属性重要度的指标权重计算仿真实验	(82)
4.5.4 基于决策属性重要度的指标权重计算仿真实验	(84)
4.6 本章小结	(86)
第5章 基于频谱的复合故障诊断方法	(87)
5.1 经典谱分析	(88)
5.1.1 幅值谱	(88)
5.1.2 功率谱	(89)
5.1.3 倒频谱	(90)
5.1.4 包络谱	(92)
5.1.5 相位谱	(93)
5.2 现代频谱技术	(95)
5.2.1 最大熵谱	(95)
5.2.2 最大似然法	(96)
5.3 时频域方法	(98)
5.3.1 连续小波变换	(98)
5.3.2 EMD 算法	(98)
5.3.3 基于余弦窗的端点效应处理	(100)
5.3.4 线性相关方法	(100)
5.3.5 希尔伯特包络	(101)
5.4 本章小结	(102)
第6章 旋转机械复合故障诊断在现场工业中的应用	(103)
6.1 工业现场复合故障诊断的背景	(104)
6.2 旋转机械复合故障诊断核心算法	(104)
6.2.1 工作任务	(104)
6.2.2 工作目标	(105)

6.2.3 实施方案	(105)
6.3 工业机组复合故障无量纲免疫检测器集成诊断装置	(119)
6.3.1 机组组成	(119)
6.3.2 远程机组状态监控系统	(120)
6.3.3 诊断系统组成	(122)
6.4 旋转机械复合故障诊断在现场工业中的综合应用实例	(125)
6.5 本章小结	(127)

第1章 旋转机械复合故障诊断原理

本章知识架构



随着旋转机械结构和功能的日趋复杂化，人们对机械正常、安全、稳定运行的要求越来越高，因而，旋转机械复合故障诊断技术已成为现代工业发展的迫切需要。由于该项技术有利于提高旋转机械安全运行的技术保障水平和科学维护水平，有助于实现机械复合故障预示和机械预知维护，因此，系统地、深入地研究探讨旋转机械的复合故障诊断技术具有重要科学研究价值和工程实际意义。

旋转机械复合故障诊断技术是一门综合性技术，它涉及多门学科，如人工智能、现代控制理论、可靠性理论、数理统计和信号处理等。针对旋转机械复合故障的主要特点，本章首先系统地介绍了常见的旋转机械复合故障诊断以及旋转机械复合故障诊断的目的、意义及任务；其次介绍了旋转机械故障信息的获取和诊断方法；最后重点介绍了旋转机械的振动诊断工作，深入地介绍通过对振动信号分析进行旋转机械复合故障诊断的理论。



1.1 旋转机械复合故障诊断概述

1.1.1 旋转机械复合故障的定义

对于机械设备故障的定义目前尚未有统一的说法,各种文献上的定义也都不尽相同,按照《电工术语 可信性与服务质量》(GB/T 2900.13—2008)规定,故障是指产品不能完成要求的功能的状态。

故障有时也应用特定词“失效”来表达,在一般情况下两者是同义词。但严格地说,失效与故障是有区别的,失效是指零部件失去原有设计所规定的功能,包括完全丧失原定功能、功能降低和有严重损伤或隐患,继续使用会失去可靠性和安全性。故障则是在工作过程中因某种原因丧失规定功能或危害安全的现象。

由于机械设备多种多样,因而故障的形式也有所不同。故障的分类形式主要有以下几种:

1) 按故障存在的程度分类

暂时性故障:这类故障带有间断性,是在一定条件下,系统所产生的功能上的故障,通过调整系统参数或运行参数,不需要更换零部件又可恢复系统的正常功能。

永久性故障:这类故障是由某些零部件损坏而引起的,必须经过更换或修复后才能消除故障。这类故障还可分为完全丧失所应有功能的完全性故障及导致某些局部功能丧失的局部性故障。

2) 按故障发生、发展的进程分类

突发性故障:出现故障前无明显征兆,难以靠早期试验或测试来预测。这类故障发生时间很短暂,一般带有破坏性,如转子的断裂、人员误操作引起设备的损毁等属于这一类故障。

渐发性故障:设备在使用过程中某些零部件因疲劳、腐蚀、磨损等使性能逐渐下降,最终超出所允许值而发生的故障。这类故障占有相当大的比重,具有一定的规律性,能通过早期状态监测和故障预备来预防。

3) 按故障发生的数量分类

单一故障:设备产生故障时,设备只发生一种故障,发生故障的部件只有一处。

复合故障:设备产生故障时,设备同时发生两种或多种互相关联交叉影响的故障,发生故障的部件同时存在多处,这些故障同时或级联出现。

4) 按故障相关性分类

相关故障:也可称间接故障。这种故障是由设备其他部件引起的,如滑动轴承因断油

而烧瓦的故障是因油路系统故障而引起的,这一点在故障诊断中应予注意。

非相关故障:也可称直接故障。这是因零部件本身直接因素引起的,对设备进行故障诊断首先应诊断这类故障。

旋转机械复合故障主要具有以下几个主要特点:

(1) 复杂性 复杂性是复合故障的最基本的特性。由于构成设备的各部件之间相互联系、紧密耦合,致使故障原因与故障征兆之间表现出极其复杂的关系,即同一种故障征兆往往对应几种故障原因,同一种故障原因又会引起多种故障征兆。

(2) 相关性 某一故障可能对应若干征兆,而某一征兆可能对应若干故障,它们之间存在着错综复杂的关系。这种故障与征兆间并非一一对应的关系是造成故障诊断困难的一个主要原因。

(3) 不确定性 故障和征兆信息的随机性、模糊性,加上某些信息的不确知性,组成了信息的不确定性。不确定性是复杂系统故障的一个重要特征,也是目前智能诊断理论与方法的一个重要研究内容。不确定性产生的原因复杂,涉及主观和客观的因素,给诊断工作带来很大的困难。

针对复合故障的这三个主要特点,旋转机械复合故障诊断的任务是监测机组的运行状态,判断是否发生了故障,并且发生的是哪几种故障;预测和诊断机组故障并消除故障;指导机组管理人员的管理维修。

状态监测的任务是了解和掌握机组的运行状态,采用各种检测、测量、监视、分析和判断方法,结合系统的使用时间和现状并考虑环境因素,对系统运行状态进行评估,判断其处于正常状态还是故障状态,并对状态进行记录和显示,对故障状态作出报警,以便运行人员及时处理,并为故障诊断、性能评估、合理使用和安全生产工作提供信息。

故障诊断的任务是根据状态监测所获得的信息,结合已知的结构特性、参数、环境条件以及该系统的运行历史,对可能要发生的或已经发生的故障进行预报、分析和判断,确定故障的性质、类别、程度、原因和部位;指出故障发生和发展的趋势及其后果,提出制止故障继续发展和消除故障的具体调整措施、维修方法和治理对策,并加以实施,最终使机组恢复到正常状态。

指导机组的管理维修的任务就是视情维修,视情维修是一种更科学、更合理的维修方式。但要做到视情维修,必须依赖于完善的状态监测和故障诊断技术的发展和实施,这也是国内外近年来对故障诊断技术如此重视的一个原因。随着我国故障诊断技术的进一步发展和实施,我国的设备管理、维修工作将上升到一个新的水平,工业生产的设备完好率将会进一步提高,恶性事故将会进一步得到控制,经济建设将会得到更健康的发展。



1.1.2 常见的旋转机械复合故障

由于构成旋转机械的各部件之间相互联系、紧密耦合,旋转机械动部件之间存在相互作用,正常运行时摩擦比较轻微,但随着旋转机械的运行,直到出现某个部件发生故障时,部件之间的摩擦会越来越严重,当发展到一定程度时将会引起部件之间碰撞式大面积摩擦,这种情况下会造成机组的强烈振动,同时会引起其他部件的工作出现异常,因此,大多数情况下,旋转机械发生的故障属于复合故障。

目前,常见的旋转机械复合故障有以下几类:

(1) 转子不平衡与连接松动的复合 由于转子结构设计不合理、制造或安装误差、转子材质不均匀、转子上的零部件脱落等原因都会导致转子的不平衡。这种不平衡引起的振动会使整个机组发生不连续的位移,从而造成的机组连接的松动。

(2) 轴承磨损与转轴弯曲的复合 由于预负荷过大或开机时暖机不够、提速过快等原因都会造成转轴临时变形不均匀。另外由于长期停放方法不合理、热态停机时不及时盘车或受到外界急冷却等原因会引起不可恢复的弯曲。转轴弯曲引起的振动会引起轴承滚珠与轴承内圈(或外圈)的非正常作用,从而使轴承发热、振动,加剧滚动轴承表面之间的磨损,导致轴承磨损。

(3) 齿轮箱大、小齿轮磨损与转子与联轴器的不对中的复合 转子的不对中一般都是指轴系不对中,其故障原因在联轴器上。由于转子与转子之间通过联轴器连接时没安装好,或是由于转子的弯曲、转子与轴承之间的缝隙和承载之后转子与轴承的变形,或由于轴承中心线的偏移等原因都会引起轴系不对中而产生振动。齿轮箱大、小齿轮的磨损是由于转子与联轴器的不对中、联轴器磨损以及扭转共振等,会在齿轮啮合点引起较大的扭矩变化,或使冲击加大,从而加速磨损。

(4) 轴承疲劳剥落(点蚀)与齿轮箱大、小齿轮磨损的复合 轴承使用时滚动体和内外圈相互接触,要承受相当大的载荷,而轴承的材料也有一定的使用寿命,当轴承使用达到一定使用次数后,应力就会改变那些有问题的接触面,从而使一些部位出现鱼鳞状的疲劳剥落点,这时,轴承也会随之失去设计的能效,不能圆滑、平稳地继续运转。在这种情况下,轴承疲劳剥落(点蚀)会引起齿轮啮合点引起较大的扭矩变化,或使冲击加大,将加速磨损。

(5) 齿轮箱断齿与轴承磨损的复合 由于齿轮箱轮齿根部在载荷作用下所产生的弯曲应力为脉动循环交变应力,以及在齿根圆角、加工刀痕、材料缺陷等应力集中源的复合作用下,会产生疲劳裂纹。裂纹逐步蔓延扩展,最终导致轮齿发生疲劳断齿。此外,由于严重过载或受到冲击载荷作用,会使齿根危险截面上的应力超过极限值而发生突然断齿。齿

轮箱断齿引起的振动会引起轴承滚珠与轴承内圈(或外圈)的非正常作用,从而使轴承发热、振动,加剧滚动轴承表面之间的磨损,导致轴承磨损。

(6) 转子与联轴器的不对中与连接松动的复合 转子的不对中一般是指轴系不对中,其故障原因在联轴器上。由于转子与转子之间通过联轴器连接时没安装好,或是由于转子的弯曲、转子与轴承之间的缝隙和承载之后转子与轴承的变形,或由于轴承中心线的偏移等原因都会引起轴系不对中而产生振动。同样这种不平衡引起的振动亦会使整个机组发生不连续的位移,从而造成机组连接的松动。

1.1.3 旋转机械复合故障诊断的目的和意义

随着现代化大生产的发展和科学技术的进步,机械设备日益趋向大型化、高速化和自动化,其组成和结构越来越复杂。机械设备中很大部分是旋转机械,旋转机械指汽轮机、发电机、压缩机、电动机、风机等,它涉及石油、化工、电力、冶金和机械制造等重要的工程领域,往往是工厂的关键设备,由于生产的需要,这些机组长期处于高温高压、单机、满负荷和连续运行等工作状态,很容易发生各种各样的故障,一旦发生故障,则很可能导致停产甚至灾难性事故,严重影响企业的经济效益和社会效益。为了保证这些机组可靠运行,有必要对旋转机械开展故障诊断工作,从而保障机组安全、稳定、优质地运行。

我国开展机械设备故障诊断从1983年起步,迄今已有30多年,一些企业已将故障诊断技术应用于烟气轮机、汽轮发电机组、船舶发动机、冶金设备、大型电网系统、石油化工设备、矿山设备和机床等领域,取得了显著的经济效益和社会效益。目前中国的机械设备诊断技术接近当代世界先进水平,特别是进入21世纪以来,由于世界高新技术的发展极为迅速,国际学术交流分外活跃,因而有力地推动了我国机械设备故障诊断工作的进展,使其无论在理论上还是在实践上,都进入了一个新的历史阶段。同时,一些现代诊断技术不断进入国内科研生产领域,包括近年应用颇显成效的神经网络、人工免疫系统、遗传算法、信息集成与融合等。正是这些发展中的现代诊断技术,它们与传统诊断技术并肩齐进、互为补充,为机械设备诊断工程界呈现了百花齐放的大好局面。

由于旋转机械等大型设备结构和工艺上的复杂性,往往发生的是复合故障。复合故障指机组同时发生两个或多个相互关联、交叉影响的故障,这些故障同时或级联出现,多重故障并发时,不同故障特征相互混杂呈现出多耦合、模糊性等复杂征兆。旋转机械复合故障诊断技术为提高旋转机械的可靠性、可维护性和有效性开辟了一条新的途径。对于工业生产过程来说,为了避免某些生产环节发生故障而引起整个生产过程瘫痪,必须在故障发生前迅速进行有效处理,维持机组的功能基本正常,从而提高机组的利用效率和使用安全性,保证生产过程安全可靠运行。目前使用复合故障诊断系统检测生产过程中的故障并分



离出故障源已成为生产过程控制的重要任务。众所周知,由于可靠性、维修性不佳导致机组发生故障,已成为维修使用费用剧增的重要因素。

旋转机械复合故障诊断技术是指在机组运行状态或工作状态下,通过各种监测手段判别其工作是否正常。如果不正常,经过分析与判断指出发生了哪些故障,便于管理人员维修;或者在故障未发生之前提出可能发生故障的预报,便于管理人员尽早采取措施,避免发生故障造成停机停产,给生产带来重大经济损失。这是故障诊断技术的任务,也是发展故障诊断技术的目的。旋转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。目前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的可靠性、安全性和可维护性等关键技术列为重要的研究方向。

发展复合故障诊断技术的重要意义体现在以下几个方面:

(1) 此对生产单位而言,安装故障诊断系统能降低事故停机率,具有很高的收益/投资比。

(2) 对生产单位而言,安装故障诊断系统能延长机组检修周期,缩短维修时间,为制定合理的检测维修制度提供基础,可极大地提高经济效益。

(3) 从全社会生产的角度看,机组维修费是一笔巨大的数目,故而实施故障诊断带来的经济效益是巨大的。

(4) 从全社会生产的角度看,安装故障诊断系统能避免重大事故的发生,减少事故危害性。

复合故障诊断方法可以分为基于信号处理的诊断方法和基于知识的诊断方法。其中基于知识的故障诊断技术是机械设备故障诊断领域中最为引人注目的发展方向之一,也是研究最多、应用最广的故障诊断方法,它不需要精确的数学模型,故具有良好的应用前景。复合故障诊断中较多采用基于专家系统的复合故障诊断、基于模糊逻辑推理的复合故障诊断、基于神经网络的复合故障诊断和基于人工免疫系统的复合故障诊断等单一诊断方法,但这些诊断方法存在诸多不足和局限,通用性差,而基于以上各方法并使之融合的智能诊断方法可充分发挥各自优势、克服各自的缺陷,将成为今后较长一段时间的研究热点。旋转机械复合故障诊断发展趋势可概括如下:

(1) 混合化 即将几种诊断方法融合到一起的集成故障诊断研究,单一智能故障诊断技术都有各自的优缺点,将多种不同的单一智能技术结合起来,互取所长以提高诊断效果是当前复合故障诊断研究的一个发展趋势。

(2) 融合化 目前,在旋转机械复合故障诊断中没有有效利用各种信号,仍然是以旋转机械振动信号为主,对温度、声音和油液等信号综合考虑较少。因此,在继续进行多个

同类传感器信号融合研究的基础上,应该研究考虑异类信号的共同平台,提取统一特征,对描述相同对象的不同类型信号进行融合。

(3) 系统化 实现诊断自动化,把分散的故障诊断装置系统化,并使之与电子计算机相结合实现自动采集信号、特征提取、识别故障种类。

(4) 智能化 故障诊断专家系统是一种拥有人工智能的计算机系统,它不但具备系统诊断技术的全部功能,而且它还将多个专家的经验、智慧和思想方法同计算机的巨大运算和分析能力相结合,组成知识库。

(5) 仿真化 旋转机械复合故障振动特征的获取,往往需要反复更换旋转机械装置的各种故障轴承座、故障轴系和故障齿轮箱等,这个过程费时耗力,并且还具有破坏性、偶然性和难以再现性,近年来基于模型的故障仿真技术成为了研究热点。

(6) 集成化 随着电子集成化程度的提高,电子元器件的尺寸越来越小,便携式计算机的发展给诊断装置集成化提供了保证。

(7) 远程化 旋转机械工作在各工地上,分散性大,流动性强,给故障的及时排除带来了很大困难,建立旋转机械的远程监测与故障诊断系统是当前的一个发展趋势。

(8) 实用化 旋转机械往往发生的是多重复合故障,国内外专家近年来一直不懈地在探索复合故障的诊断技术,但真正能有效地应用于工业机组的成功范例寥寥无几,因此,如何将先进的故障诊断方法广泛应用到实际中去还有待深入的研究。

综上所述,将旋转机械复合故障诊断系统研发集成混合化、融合化、系统化、智能化、仿真化、集成化、远程化和实用化于一体,已成为复合故障诊断技术研究的发展趋势。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、广度扩展,最终实现若干重点突破。

1.2 旋转机械复合故障诊断原理

机械故障诊断是一门起源于20世纪60年代的新兴学科,其突出特点是理论研究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。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。

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。

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 2015 年已举办 28 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。

故障诊断技术由于现代大生产的迫切需要而正在迅猛发展,已成为当今科技研究的热点。从早期对故障的各种直接检测手段到依靠经验积累的诊断过程,再到当前基于知识的智能化故障诊断技术,其发展过程中广泛吸取了相关学科的各种有效方法和手段。发展到现在,故障诊断技术的内容日益丰富。但是由于诊断对象十分复杂,故障多种多样,故障诊断技术尚在发展之中,有许多理论和方法还有待进一步探讨,国内外学者为此正在做出巨大的努力,开展广泛的研究。

1.2.1 故障诊断的基本概念

故障诊断技术作为一个统一的学科,必须在一定的范围内建立起针对不同诊断领域、不同类型系统的统一诊断理论、方法和策略。为此,必须研究故障诊断问题的基本概念体系和各种诊断问题的共同特性,建立适应于各个诊断领域的通用方法。

故障诊断方法是在检测基础上发展起来的一整套方法,为管理者提供系统状态监测、故障诊断和预测评估信息。不同故障诊断方法虽有不同,但其大体实施过程基本相同。旋转机械复合故障诊断过程可概况为如图 1.1 所示的框图。可以发现旋转机械复合故障诊断过程主要包括信号采集、特征分析与提取、状态识别及诊断决策这几个过程。

信号采集,机械设备在运行过程中必然会有力、热、振动及能量等各种量的变化,由此会产生各种不同信息。根据不同的诊断需要选择能表征机械设备工作状态的不同信号(如振动、压力和温度等)是十分必要的。这些信号一般是用不同的传感器来获取的。特征分析