

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

# 机械故障诊断学

第3版

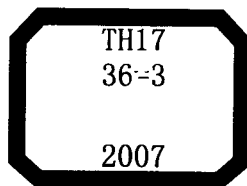
*Introduction to Machine  
Fault Diagnosis*

钟秉林 黄仁 主编

机械工业出版社



研究生教学用书  
教育部研究生工作办公室推荐



# 机械故障诊断学

Introduction to Machine  
Fault Diagnosis

第 3 版

主编 钟秉林 黄 仁  
参编 贾民平 许飞云 胡建中  
主审 杨叔子

机械工业出版社

本书是第3版。随着科学技术的发展,与第1、2版比较,全书内容体系都有很大的改变。全书共3篇13章分四部分:第一部分是第1章绪论,主要是说明工况监视与故障诊断的意义、发展概况、研究和系统设计的指导思想;第二部分即第1篇第2~第5章,主要是说明信号检测与特征信号处理方法的原理,旨在为读者在工程实践中能正确应用这些方法奠定必要的基础;第三部分即第2篇第6~第9章,介绍当代几种典型的人工智能技术原理和实际应用;第四部分即第3篇第10~第13章,其中前3章分别介绍机械故障诊断技术在三种典型的工程领域(旋转机械、液压系统及机械制造的质量控制)中的应用;第13章以某一工程项目为例,说明系统的设计和故障诊断技术的综合应用,以及当前正在发展的某些新技术的原理和方法。

本书于2000年被教育部研究生办公室推荐作为“研究生教学用书”,也可作为大学本科及机械设备运行管理工程技术人员的参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

机械故障诊断学/钟秉林,黄仁主编. —3版. —北京:机械工业出版社,2006.12

研究生教学用书,教育部研究生工作办公室推荐

ISBN 978-7-111-05866-3

I. 机... II. ①钟... ②黄... III. 机械设备—故障诊断—研究生—教材 IV. TH17

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第147112号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:高文龙 版式设计:霍永明 责任校对:陈延翔

封面设计:鞠杨 责任印制:洪汉军

北京振兴源印务有限公司印刷厂印刷

2007年2月第3版第1次印刷

169mm×227mm·13.25印张·497千字

标准书号:ISBN 978-7-111-05866-3

定价:45.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)88379730

封面无防伪标均为盗版

## 第3版序

“爆竹声中一岁除”。选择在2006年元旦，我国“十一五”规划开始的第一天，来为钟秉林教授、黄仁教授所写的《机械故障诊断学》的“再版”来写这个“序言”，最重要的原因，就是表达我对“再版”更加喜悦的心情与更深祝贺的真意，并对他们工作的未来发展寄予充满信心的期望。

作者是我十分熟悉的，故障诊断的重要性是我深为了解的，《机械故障诊断学》的“初版”，1997年3月，我写了“序”，表达了我的喜悦与祝贺。经过作者们近十年的不懈努力，他们又在故障诊断这个重要的领域进一步取得了丰硕的成果。“问渠哪得清如许？为有源头活水来！”本书正是总结了他们近十年来有关故障诊断理论、技术与方法的研究与应用的成果，又广泛地吸取了国内外有关的优秀成果，并引用了丰富的典型案例及对其深入分析来阐述他们的观点；正因如此，在前版《机械故障诊断学》的基础上，进一步加强了基础理论，增加了该领域最新的技术进展，适当增加了工程应用实例，较好地做到了基础性、系统性、学术性和实用性的统一。

本书具有以下特点：

1. 以作者们自己的最新研究成果为基础，广泛吸取国内外在本领域的最新研究成果，因而其内容具有先进性和新颖性；
2. 从工程应用角度出发，阐述故障诊断的原理和技术，对科研人员和工程技术人员具有很好的参考价值和很强的实用性；
3. 全书结构合理，内容深入浅出，工程背景明确。既有基本方法，又有综合方法，适应面广。所提供的成功的分析案例，便于加深对内容的理解，具有很强的可读性。

本书是故障诊断领域近几年来难得的一本好书，这将为广大科技工作者与高校有关师生（特别是研究生）提供关于状态监测与故障诊断工作大有好处的参考。深信本书的出版将为我国故障诊断技术的发展起到积极的推动作用；并深信，广大读者会将如同作者所期望的那样，对本书不足之处，提出批评与指正。

谨为之序。

中国科学院院士

华中科技大学学术委员会主任

2006年1月1日

## 第 1 版 序

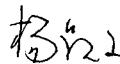
故障诊断技术进入 20 世纪 90 年代以来, 以前所未有的势头在国内得到了十分迅速的发展, 并在机械、石化、冶金、电力等行业得到了十分广泛的应用, 在国内形成了一个十分庞大的研究与应用队伍, 为这一技术的进一步普及提供了一个良好的契机。这就要求我们能提供一批适合于不同层次科技工作者的参考用书, 也同时需要一些适合于本科和研究生使用的教学用书。钟秉林教授、黄仁教授等所编著的《机械故障诊断学》一书就是这方面的一个很好尝试。

我是很赞成出版这本书的。一方面本书较为系统地阐述了机械故障诊断的基本原理, 由浅入深, 非常适合于作为教学用书。另一方面, 本书中的许多研究内容是作者多年来的研究成果, 集中反映了这一领域的一些最新进展。书中内容具有很强的实践性, 内容直观, 易于理解, 因而也可作为从事故障诊断工作的一种范例。

作者所在的研究集体, 在旋转机械的故障诊断、制造过程的状态监测与故障诊断等领域进行了许多卓有成效的研究工作, 取得了许多重要的理论研究成果, 并积累了许多宝贵的实践经验, 这些都全面地融入了本书的内容之中, 使本书具有很好的可读性和示范性, 因此, 是一本很好的教学及参考用书。

希望本书的出版能够在推广和普及故障诊断技术, 培养更多的从事故障诊断技术的后备力量方面起到积极的作用。值本书出版之际, 谨为作序, 祝本书的出版在促进学科建设、普及故障诊断技术方面发挥重要作用。祝本书出版成功。

中国科学院院士  
华中理工大学校长



1997 年 3 月

## 第3版 前言

机械故障诊断学是近年来发展迅速的一门综合性学科。就学科本质而言,是属于动态系统辨识的研究范畴;就工程特点而言,是研究机械设备运行状态的科学。由于机械设备和工况条件的复杂性和多样性,某种诊断技术在某一工厂应用效果显著,而在另一工厂并不一定就很合适;或者在实验室是成功的,而在生产现场就行不通。因此本书第1版(1997年4月)兼有专著和教材的特点,编著的指导思想是以阐明方法原理为主,结合笔者经过实验室研究和生产现场应用检验的科研成果,说明监视与诊断的策略、方法和技术的工程应用,以增强实用性。在2000年6月本书被教育部列为研究生教学用书后,根据研究生教学的特点和要求,本书第2版(2001年8月)在原有框架下作了局部增删,并对部分内容进行了修改;但经过几年的教学和科研实践,仍感覆盖面较窄。为此,本书第3版进行了较大的改动,篇幅亦有所增加。新版的修改原则是:适度加强基础理论、适当扩大知识范畴、适当增加工程实例、适度介绍最新成果;兼顾系统性、学术性和实用性。

本书第3版在结构上亦做了必要调整。本着上述原则,将原“特征分析与特征量选择”一章拓展为“动态系统特性的时域分析”、“动态系统特性的频谱分析”和“非平稳信号特征分析”三章;同时还增加了“模拟退火与演化算法原理与应用”和“液压系统的状态监测与故障诊断”两章。为便于课堂教学、学生自学和工程技术人员参阅,新版将第1章“绪论”之后的12章分为3篇:

第1篇“特征信号检测与动态系统特性分析”是本书的基础篇。故障诊断的理论基础涉及多个学科,如数学、控制理论、信息理论、人工智能、计算机科学与技术等,它们都有各自相对独立的学科体系以及专著和教材。鉴于这个特点并考虑到研究生学习的连贯性,本篇以特征分析和特征量提取为主线,在介绍特征信号检测的基本原理和手段的基础上,分别从时域特性、频域特性和非平稳信号特性分析的角度介绍特征信息的获取及其分析和处理方法,旨在为研究生和工程技术人员在工程实际中正确而有效地应用这些方法奠定基础。

第2篇“基于人工智能的故障诊断技术”是本书的技术篇。本篇从机械设备工况监视与故障诊断的工程应用角度出发,在阐明状态识别方法一般原理的基础上,重点介绍了几种基于人工智能技术的智能化故障诊断方法,如模糊识别方法、人工神经网络方法、模拟退火与演化算法和专家系统等,旨在为研究生和工程技术人员在实际工作中研发或使用智能诊断系统奠定基础。

第3篇“机械故障诊断技术的工程应用”是本书的应用篇。本篇结合诊断

技术研发和系统研制的实例，介绍了机械故障诊断技术在不同类型机械系统（如旋转机械系统、机械制造过程和液压系统等）中的应用；最后融方案设计、系统研制和调试运行为一体，分析了一个状态监测与故障诊断系统的工程实例，并且介绍了两种正在发展之中的智能诊断系统的结构和实现。旨在使读者在深刻理解监视与诊断的基本原理并掌握其基本方法的基础上，能够针对不同的诊断对象，在工程实际中创造性地加以应用。

本书是东南大学工况监视与故障诊断研究室全体教师及历届研究生集体研究的成果，有关理论和方法的研究先后得到了国家自然科学基金、国家高技术研究发展计划（“863”计划）和江苏省自然科学基金等的资助，有关技术研发和工程系统研制的成果来源于公司企业的委托项目。钟秉林教授负责全书修改和定稿工作以及第1、2、6、7章的部分修改编写，黄仁教授负责第1、3、4、11章的修改编写和全书的统稿工作，贾民平教授负责第2、5、10、12章的修改编写，许飞云教授负责第7、8、13章的修改编写，胡建中博士负责第6、9章的修改编写。

本书第3版在修改编著过程中一直得到中国科学院院士、华中科技大学杨叔子教授的指导与支持，提出了许多宝贵意见并再次作序，特致以诚挚的感谢。华中科技大学史铁林教授参加了审稿工作；并提出了具体的修改意见，在此致以衷心的感谢。本研究室毕业生，上海交通大学朱向阳教授和朱利民教授、在英国工作的颜廷虎博士和吴少敏博士、清华大学何永勇博士、北京化工大学杨国安博士、华为集团张雪江博士、东南大学孙蓓蓓博士和张晓玲副教授等先后为本书的编写做出过贡献，并提出过许多建设性意见，在此一并致谢。

虽然经过一年多的努力，在听取有关学者、同行和学生意见的基础上进行了反复推敲和认真修改，但由于水平有限，仍然恳切地希望广大读者能够对修改后的第3版提出批评指正，笔者将不胜感谢。

钟秉林、黄仁 2006年1月

## 第2版 前言

本书第1版1997年问世以来,得到各方面的关心、指正与鼓励,在此致以深切的谢意。

故障诊断是一门新发展的科学领域,还没有形成较为完整的科学体系,第1版编写的指导思想是以本校经过实践的科研新成果为主,增加可实践性。根据2000年6月教育部研究生工作办公室的推荐,本书已列为研究生教学用书,从全国各高等学校的需要来看,有些章节的覆盖面偏窄。为此,本书第2版修改的指导思想是“面要宽些,保持必要的先进性与可实践性”的原则,在原有基础作了以下修改:

(1) 第8章进行了改写:由于工况监视与故障诊断技术在机械制造领域中的系统研究与应用,还只是处于起步阶段,而它的内容与生产模式有关,考虑到未来发展与当前的实际生产状况相结合,改写的思路是突出质量控制,具体来说分3个方面:①以敏捷制造系统为例介绍质量监视与控制系统的构成,使初学者能从发展的观点了解一个监视与控制系统所必须具备的主要功能;明确要解决的基本问题,即过程控制与质量控制的原理和方法;②从广义理解“控制”的含义,不仅是“自动控制”,而且包括在科学方法论的指导下有人参加对过程的组织安排,因此着重介绍统计过程控制(SPC)的理论基础,说明它在机械制造过程控制与质量控制中的适用范围;③由于生产过程是动态的,而传统的统计过程控制是静态的,因此提出基于动态过程分析对加工过程及质量状态的研究方法。

(2) 第7章对齿轮箱故障诊断进行修改,补充了齿轮箱振动信号分析的特征及几种现代常用的主要分析方法,如倒谱、希尔伯特(Hilbert)包络分析法、时频分析法及时域模型法等。

(3) 全书进行了文字的修改,改正了某些错误或不妥之处。

虽然作者们经过很大努力,但由于水平有限,仍然恳切地希望广大读者能对修改后的第2版提出批评指正,不胜感谢。

钟秉林、黄仁 2001年8月



# 第 1 版 前言

在现代化生产中，机械设备的故障诊断技术越来越受到重视，如果某台设备出现故障而又未能及时发现和排除，其结果不仅会导致设备本身损坏，甚至可能造成机毁人亡的严重后果。在连续生产系统中，如果某台关键设备因故障而不能继续运行，往往会殃及全厂生产系统设备的运行，而造成巨大的经济损失。

本书编写的指导思想是从以下两点考虑的：

首先，故障诊断是一门新发展的技术，还没有形成较为完整的科学体系。因此除对其研究目的、研究内容范畴的理解之外，往往与工程应用背景，乃至工程技术人员的专长不同而有很大差异。因此，很有必要说明机械设备故障的含义、性质、诊断方法原理等，但现有出版著作偏重应用者较多。任何一种科学方法，必须理解它，才能得到更好的应用与发展。

其次，考虑到一个重要的实际问题是目前国内已开发了不少的诊断系统，但在生产中能正常应用，发挥应有的效益的还不多。其原因很多，一是使用者对基本原理不够理解之外，一些小问题不能排除，或者操作不当，使系统不能正常运行；二是不理解机械设备运行是动态过程，故障现象是随机的。试验室数据与实际机组运行数据不属于同一母体，只能用于研究故障现象的一般原理和发展规律，而监视诊断系统需要的是针对某台机器设备的具体数据。即使同一型号的机器设备，由于装配、安装及运行条件不同，其工况状态边界是有差别的，应从实际机组运行状态出发，研究故障工况状态的实际边界作为监视诊断的门限值。为此必须理解方法原理，灵活运用，才能达到应有目的。

因此，编写的指导思想是以方法原理为主，通过旋转机械和机械制造的典型实例说明所述诊断方法的应用，举一反三，最后以大型旋转机械为例，给出一个完整的诊断系统，说明系统的结构、主要模块内容及尚待解决的问题。

本书所提供的数据、图表，大部分都是作者在试验室及工程实践中的研究成果，也有些采用其他单位的研究成果，但也经过实验验证。如前所述，主要用于说明试验方法原理，所提供的数据图表，也主要是说明基本规律，在实际生产中，需根据具体对象决定相应的数据。

鉴于工况监视与故障诊断是一门综合性学科，在诊断方法方面涉及人工智能、数学、信号处理、自动控制、计算机等许多学科，这些学科都有各自的领

域,有许多参考文献,限于篇幅,本书只能从故障诊断的角度出发,简述其原理及应用。

本书适用于高校学生、研究生及工厂有关设备运行管理工程师使用。

本书是我校工况监视与故障诊断研究室全体教师及历届研究生集体研究的成果。第4章由钟秉林教授编写,第1及第8章由黄仁教授编写并负责全书统稿,第6、7、9章由贾民平教授编写,第2、3章由朱向阳副教授编写。第5章由许飞云副教授编写。参加本书编写工作的还有颜庭虎副教授、何永勇博士、张雪江博士和孙蓓蓓博士等。

本书在编写过程中一直得到华中理工大学杨叔子教授的指导与支持。杨叔子教授对本书认真进行了审查并为本书作序;在本书内容上,中国科技大学李川奇教授提出了许多宝贵意见,在此特致以诚恳的感谢。

由于故障诊断是一门新发展的科学技术,还没有形成自身的科学体系,本书所提出的思路、体系、观点是几年来在教学、科研、工程技术讲座中逐步形成的,只是抛砖引玉,旨在促进故障诊断学科的发展和故障诊断技术的应用。但是由于作者水平有限,恳切希望读者对书中的错误和不妥之处提出批评指正,我们将不胜感激。

东南大学  
钟秉林、黄仁 1997年4月

# 目 录

第3版 序	
第1版 序	
第3版 前言	
第2版 前言	
第1版 前言	
第1章 绪论	1
1 故障诊断学的意义	1
2 故障诊断技术的发展	6
3 工况监视与故障诊断系统的主要环节和模式	8
4 故障诊断与机械系统可靠性及可维修性的关系	11

## 第1篇 特征信号检测与动态系统特性分析

第2章 特征信号检测	18
1 概述	18
2 特征信号的选择	18
3 振动信号的检测	20
4 特征信号的采集	32
第3章 动态系统特性的时域分析	38
1 概述	38
2 随机过程的基本概念及其数字特征	38
3 时间序列的统计分析	44
4 线性时间序列模型分析及其应用	48
5 工况状态变化趋势性模型分析	58
6 时间序列的预报	66
第4章 动态系统特性的频谱分析	72
1 概述	72
2 周期信号的傅里叶级数及频谱	72
3 非周期信号的傅里叶变换原理	75
4 卷积定理	77
5 采样信号的傅里叶变换	78
6 傅里叶变换的周期性与离散性	84

7 功率谱 .....	87
8 最大熵谱 .....	89
9 其他几种谱函数 .....	94
<b>第 5 章 非平稳信号特征分析</b> .....	<b>97</b>
1 概述 .....	97
2 非平稳信号的频域分析 .....	97
3 非平稳信号的时频域分析 .....	105
4 经验模式分解及希尔伯特谱 .....	119
5 周期平稳信号分析 .....	127
<b>第 2 篇 基于人工智能的故障诊断技术</b>	
<b>第 6 章 状态识别方法原理</b> .....	<b>134</b>
1 概述 .....	134
2 对比分析法 .....	134
3 距离及相似度量分类原理 .....	135
4 近邻决策算法 .....	139
5 贝叶斯 (Bayes) 分类法 .....	141
6 Fisher 判别方法 .....	149
7 势能函数分类法 .....	151
8 模糊诊断方法 .....	154
9 故障树分析法 .....	162
10 基于粗糙集理论的诊断方法 .....	167
11 主成分分析及独立成分分析 .....	171
<b>第 7 章 神经网络诊断原理</b> .....	<b>181</b>
1 概述 .....	181
2 人工神经网络的拓扑结构及学习规则 .....	181
3 多层前向神经网络模型及 BP 算法 .....	186
4 径向基函数 (RBF) 网络及其学习算法 .....	191
5 模糊神经网络模型 .....	195
6 无监督神经网络模型 .....	200
<b>第 8 章 模拟退火与演化算法的原理及应用</b> .....	<b>207</b>
1 概述 .....	207
2 模拟退火算法原理 .....	209
3 演化算法原理 .....	215
4 模拟退火和演化算法在知识获取中的应用 .....	226
<b>第 9 章 专家系统诊断原理</b> .....	<b>236</b>
1 概述 .....	236
2 专家系统的基本结构及功能 .....	236
3 推理机制 .....	238

4 知识表示与知识获取 .....	240
5 粗糙集理论与知识获取 .....	245
6 人工神经网络与专家系统 .....	249
7 基于行为的故障诊断系统 .....	251
8 多专家诊断系统 .....	256
<b>第 3 篇 机械故障诊断技术的工程应用</b>	
<b>第 10 章 旋转机械的状态监视与故障诊断 .....</b>	<b>266</b>
1 概述 .....	266
2 振动基础 .....	266
3 转子系统振动故障诊断 .....	268
4 齿轮箱故障诊断 .....	284
5 滚动轴承的振动信号分析及研究 .....	298
<b>第 11 章 机械制造过程质量控制与状态识别 .....</b>	<b>314</b>
1 概述 .....	314
2 质量管理的模式 .....	316
3 正态分布曲线性质及不合格品率的计算 .....	325
4 工序过程质量状态的识别与控制 .....	337
<b>第 12 章 液压系统的状态监测与故障诊断 .....</b>	<b>357</b>
1 概述 .....	357
2 液压系统的故障模式及其特征 .....	357
3 液压系统检测与故障诊断方法 .....	362
4 液压系统故障诊断的基本方法与步骤 .....	367
<b>第 13 章 计算机辅助状态监测与故障诊断系统 .....</b>	<b>375</b>
1 概述 .....	375
2 汽轮机压缩机组工况监视与故障诊断系统实例 .....	375
3 面向 Web 的多代理故障诊断系统 .....	384
4 嵌入式智能故障诊断系统 .....	391
<b>附录 A 正态分布表 (12 位小数) .....</b>	<b>398</b>
<b>附录 B 合格率与不合格率表 (12 位小数) .....</b>	<b>406</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>407</b>

# 第 1 章 绪 论

## 1 故障诊断学的意义

随着现代工业的发展，机械设备的故障诊断技术越来越受到重视，已经成为保证生产系统安全稳定运行和提高产品质量的重要手段和关键技术。在连续生产系统中，如果某台关键设备因故障而不能继续工作，往往会影响全厂生产系统的正常运行，从而造成巨大的经济损失，甚至可能导致机毁人亡的严重后果。例如电力系统的汽轮发电机组、冶金过程及化工等流程工业的关键设备等。因此，故障诊断具有极为重要的意义。在现代机械制造领域中，如柔性制造系统（FMS）、计算机集成制造系统（CIMS）等，故障诊断技术也具有相同的重要性。然而在传统的机械制造领域中，大量的单件、小批量生产，机床设备操作与质量控制主要靠人工进行，一般故障比较容易发现和排除，这时故障诊断技术的地位就没有前述连续生产系统显得那么重要；但对于某些关键机床设备，因故障存在而导致零件加工质量降低，使整个机器产品质量不能保证，这时故障诊断技术也不容忽视。

故障诊断是一门发展中的新兴学科，还没有形成完整的学科体系。对其研究目的和研究内容范畴的理解，往往因工程应用背景乃至工程技术人员的专业特长不同而有很大差异。因此，正确理解故障诊断的研究目的和研究内容范畴，是涉及本学科指导思想和发展策略的关键。为此，有必要说明以下 4 个问题。

### 1.1 故障的含义

从系统的观点来看，机械故障包括两层含义：一是机械系统偏离正常功能（Malfunction），它的形成原因主要是因为机械系统的工作条件（含零部件）不正常，通过参数调节或零部件修复又可恢复到正常功能；二是功能失效（Failure），是指系统连续偏离正常功能，且其程度不断加剧，使机械设备基本功能不能保证。一般零件失效可以更换，关键零件失效，往往导致整机功能丧失。

上述系统是针对某一机械设备（机组或生产线）而言，如果从产品的“生命周期”来看，则系统应包括“设计—制造（含装配）—运行—维修—市场”几个环节。目前机械故障诊断学主要是研究某一机械设备在运行过程中动态性

能的变化规律及其运行状态的识别方法。

## 1.2 故障的类型

故障按其性质、状态的不同分为以下几种类型。

(1) 按工作状态分有间歇性故障和永久性故障 间歇性故障是时有发生, 有时又消失。永久性故障是故障出现后, 除非人工修理就一直存在。

(2) 按故障程度分有局部功能失效和整体功能失效的故障 局部功能失效的故障是指机器设备某一部分存在故障, 使这一部分功能不能实现, 而其他部分功能仍可实现。整体功能失效的故障, 虽然也可能是机器设备某一部分出现故障, 但导致整机功能不能实现。

(3) 按故障形成速度分有急剧性故障和渐进性故障 急剧性故障是故障一经发生之后就使工况状态急剧恶化, 不停机修理, 机器就不能继续运行。渐进性故障发展缓慢, 可以继续运行一定时间后再修理。

(4) 按故障程度及形成速度分有突发性故障和缓变性故障 突发性故障发生在瞬间, 它和急剧性故障不同之处是没有明显的征兆, 难于预测, 往往导致整机功能失效, 甚至影响人身、设备安全。缓变性故障具有渐进性和局部功能失效的特点, 可能预测。

(5) 按故障形成的原因分有操作或管理失误形成的故障和机器内在原因形成的故障 操作或管理失误形成的故障主要是由于操作者技术水平不高或工作责任心不强等人为的外在因素造成的。机器内在原因形成的故障一般是由于机器设计、制造遗留的缺陷(如残余应力)或材料内部潜在的缺陷造成的, 难于检测, 是形成突发性故障的重要原因。

(6) 按故障形成的后果分有危险性故障和非危险性故障 突发性故障和急剧性故障均属于危险性故障, 可导致整机损坏、车间破坏, 乃至人身伤亡事故等灾难性后果, 是系统运行过程中应重点预防的问题。非危险性故障一般是指可修复的故障。

(7) 按故障形成的时间分有早期故障、随时间变化的故障和随机性故障 早期故障具有征兆, 可早期发现, 一般不影响机器的继续运行, 但应注意其发展趋势, 防止故障扩大。随时间变化的故障是渐进性故障, 如轴承磨损等。大部分故障都具有随机性特点, 没有明显的规律, 不可重复。

上述故障的类型往往是相互交叉的, 而且随着故障的发展, 可以从一种类型转移到另一种类型。

## 1.3 故障诊断方法

目前人们对故障诊断概念的理解不同, 各工程领域都有其各自的方法和手

段,可以概括为以下4个方面:

### 1.3.1 按诊断模式分

有离线人工分析诊断、在线监测诊断和远程监测诊断三种,三者要求有很大差别。本书立足于在线监测诊断。

### 1.3.2 按检测手段分

(1) 振动检测诊断法 以机器振动作为信息源,在机器运行过程中,通过振动参数的变化特征来判别机器的运行状态。

(2) 噪声检测诊断法 以机器噪声作为信息源,在机器运行过程中,通过噪声参数的变化特征来判别机器的运行状态。此方法的本质与振动检测诊断法是一致的,因为噪声的形成源主要是振动。虽检测简便,但易受环境噪声影响,不如振动检测诊断法准确。

(3) 温度检测诊断法 以机械系统中可观测的温度(如轴瓦、润滑油等的温度)作为信息源,在机器运行过程中,通过温度参数的变化特征来判别机器的运行状态。

(4) 压力检测诊断法 以机械系统中的气体、液体的压力作为信息源,在机器运行过程中,通过压力参数的变化特征来判别机器的运行状态。

(5) 声发射检测诊断法 以金属零件在磨损、变形、破裂过程中产生的弹性波作为信息源,在机器运行过程中,通过分析弹性波的频率变化特征来判别机器的运行状态。

(6) 铁谱分析诊断法 在机器运行过程中,通过分析润滑油或切削液中金属含量、颗粒大小和形状、导磁性等的变化,来判别机器的运行状态。

(7) 金相分析诊断法 通过对某些运动零件的表面层金属显微组织、残余应力、裂纹及物理性质进行检查,研究其变化特征,来判别机器设备存在的故障及形成原因。

### 1.3.3 按诊断方法的原理分

(1) 频域诊断法 应用频谱分析技术,根据频谱特征变化,判别机器的运行状态及故障形成原因。

(2) 时域分析法 应用时间序列模型及其有关的特性函数,判别机器工况状态的变化。

(3) 统计分析法 应用概率统计模型及其有关的特性函数,实现机器的工况状态监视与故障诊断。

(4) 非平稳信号分析法 机械设备的测试信号常常是非平稳的,可应用Wigner分布、小波变换和时-频分析等方法进行研究并提取特征量,判别故障性质。

(5) 信息理论分析法 应用基于信息理论建立的某些特性函数,如 Kull-



back 信息数、 $J$  散度等在机器运行过程中的变化, 进行机器的工况状态分析与故障诊断。

(6) 人工智能方法 如模式识别、人工神经网络、专家系统等。由于人工智能技术的发展而提出来的诊断方法。随着计算机和网络技术的发展, 分布式人工智能方法的提出, 近年来又提出多代理协作诊断方法等。

以上仅是从诊断模式、检测手段和方法原理出发进行了归纳, 而从故障诊断学科内涵和工程实践应用角度而言, 这些方法往往是相互交叉、相互融合的, 例如许多统计分析方法都融于模式识别方法之中, 不少时域和频域分析方法都与计算机人工智能方法相融合等。

#### 1.3.4 按诊断对象分

有汽轮机故障诊断、压缩机故障诊断、化工机械故障诊断、液压系统故障诊断等。从故障诊断原理来看, 不同诊断对象的动态性能和外部表征各具特点, 但诊断的策略和方法却具有基本的共性。

### 1.4 机械系统故障的特点和故障诊断学的研究目的及范畴

#### 1.4.1 机械系统故障的特点

机械系统故障的特点可以归纳为以下两点:

(1) 随机特性 机械设备种类很多, 但具有共同的基本特点, 即机械系统的故障现象大部分具有随机特性。此处‘随机’一词包括两层含义: 一是在不同时刻的观测数据是不可重复的。我们说机器现时刻的工况状态和过去某时刻相比没有变化(或者相同), 只能理解为其观测值在统计意义上没有显著差别; 二是表征机器工况状态的特征值不是不变的, 而是在一定范围中波动。机器的运行过程是一个动态过程, 可以用数学方法(微分方程或差分方程)进行描述。描述不同机器动态特性的模型参数和特征方程不同, 因而描述工况状态的特征域就有差异; 即使是同型号的机械设备, 由于装配、安装及工作条件上的差异, 也往往导致机器的工况状态及故障模式发生改变。因此, 研究机械系统工况状态的基本出发点是必须遵循随机过程的基本原理。文献资料上所提供的有关数据和图表等可以作为重要参考, 但如果仅仅依据这些数据和图表进行工况状态判断, 往往达不到满意的效果。故障诊断的出发点应立足于对具体诊断对象的实际运行状态进行分析, 参考该诊断对象的历史资料及其他有关资料, 结合专家的知识 and 经验, 并运用相应的诊断技术, 进行综合判别。

(2) 多层次性 从系统特性来看, 除了前述诸如连续性、离散性、间歇性、缓变性、突发性、随机性、趋势性和模糊性等一般特性外, 由于机械设备都是由成百上千个零部件装配而成, 零部件间相互耦合、相互作用, 这就决定了机械设备故障的多层次性。一种故障由多层次的故障原因所导致, 故障与现