

jixie guzhang zhenduan jishu ji yingyong

# 机械故障诊断 技术及应用

黄 民 肖兴明 编著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

TH17  
408

# 机械故障诊断技术及应用

黄 民 肖兴明 编著

江苏工业学院图书馆  
藏书章

中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

本书系统介绍了机械故障诊断的基本原理和方法。第1、2章简介了机械故障诊断的意义、发展概况、研究内容和基本原理;第3章介绍了信号处理与分析的基础知识;第4、5、6章分别介绍了振动诊断技术、油样分析技术和超声及声发射诊断技术等常用故障诊断技术;第7章阐述了机械故障诊断专家系统的基本理论;第8章在介绍了计算机辅助工况监测与故障诊断系统的构成和工作原理的基础上,重点介绍了虚拟仪器技术和智能检测技术在机械故障诊断中的具体应用实例;第9章结合作者的实际科研项目及成果,对矿山运输提升机械的工况监测与故障诊断的原理、方法和技术等作了系统全面的介绍。

本书可作为本科生或研究生的教材,也可供有关工程技术人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

机械故障诊断技术及应用 / 黄民, 肖兴明编著. — 徐州: 中国矿业大学出版社, 2002. 12

ISBN 7 - 81070 - 622 - 5

I. 机... I. ①黄... ②肖... III. 机械—故障诊断  
IV. TH17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 098486 号

书 名 机械故障诊断技术及应用  
编 著 黄 民 肖兴明  
责任编辑 钟 诚  
责任校对 周俊平  
出版发行 中国矿业大学出版社  
(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)  
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com  
排 版 中国矿业大学出版社排版中心  
印 刷 中国矿业大学印刷厂  
经 销 新华书店  
开 本 787×1092 1/16 印张 11 字数 267 千字  
版次印次 2002 年 12 月第 1 版 2002 年 12 月第 1 次印刷  
定 价 25.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

# 前 言

目前,机械工业正朝着机电一体化、自动化、连续化、大型化的方向发展。如何对机械设备进行工况监测与故障诊断,以确保设备安全可靠、高效地运行,显得日益重要。作为一门新兴的综合性学科,机械故障诊断技术至今尚未形成较为完整的科学体系。然而,随着传感技术、信号分析与处理技术、计算机技术以及人工智能等相关技术的不断发展,机械设备故障诊断的理论、方法和技术正日益丰富、成熟和完善。

本书在内容组织上,既考虑作为相关专业本科生和研究生的教材,又考虑到了从事故障诊断技术工作的科技人员的一些实际需要,在系统介绍机械故障诊断技术的基本原理和方法的基础上,还增加了一些反映故障诊断技术最新发展的内容(如故障诊断专家系统、虚拟仪器技术、智能诊断技术等),并结合实例说明诊断技术在工程中的实际应用。通过本书的学习,读者能掌握机械故障诊断的基本知识和一些实用技能,同时还能对其最新发展动态有所了解。

本书中所举的应用实例均来自我们的实际科研工作,是我校机电与材料工程学院有关科研单位和集体研究成果的汇集。其中,在本书第9章,我们结合多年来从事相关科研工作的经验和成果,系统详细地介绍和探讨了矿用运输提升机械的工况监测与故障诊断技术的发展概况、关键技术、实际监测中存在的问题及其解决办法与措施等,同时,对我们自行研制的钢绳芯胶带输送机计算机实时工况监测与故障诊断系统和矿用提升机安全监护系统作了介绍。这些内容对于煤炭系统从事运输提升设备监测、管理或维护的技术人员来说,具有一定的参考价值 and 实际意义,对于其他类似的机械设备的监测技术的研究也具有一定的借鉴意义。

本书共分九章,其中第2~8章以及第9章第1节由黄民副教授编写,第1章和第9章第2节由肖兴明教授编写,全书由黄民副教授负责统稿。

作者在写作过程中参阅了大量有关文献,在此向这些文献的作者一并致谢。本书在内容和材料的组织等方面,曾得到张永忠教授的悉心指导,在此谨表谢意。

由于作者水平有限,加之时间仓促,书中错误或不妥之处在所难免,恳切希望各位读者能不吝批评指正。

编 著 者

2002年11月

# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 机械故障诊断的意义 .....	1
1.2 机械故障诊断技术的研究发展概况 .....	2
<b>2 机械故障诊断的基本原理</b> .....	4
2.1 机械故障诊断的内容及过程 .....	4
2.1.1 机械故障的定义和分类 .....	4
2.1.2 机械故障诊断及其分类 .....	5
2.1.3 机械故障诊断的过程 .....	5
2.2 机械故障特征参量 .....	6
2.2.1 故障特征参量的定义 .....	6
2.2.2 故障特征参量的选取原则 .....	6
2.3 故障分析理论与方法 .....	7
2.3.1 对比分析法 .....	7
2.3.2 逻辑判别法 .....	8
2.3.3 故障树分析法 .....	12
<b>3 信号分析基础</b> .....	17
3.1 信号的分类 .....	17
3.1.1 确定性信号与非确定性信号 .....	17
3.1.2 能量信号与功率信号 .....	19
3.1.3 时限信号与频限信号 .....	19
3.1.4 连续时间信号与离散时间信号 .....	19
3.2 信号的幅值域分析 .....	20
3.2.1 均值 .....	20
3.2.2 均方值 .....	20
3.2.3 方差 .....	20
3.2.4 概率密度函数 .....	20
3.2.5 概率分布函数 .....	22
3.3 信号的相关分析 .....	23
3.3.1 相关分析的基本概念 .....	24
3.3.2 相关函数的性质 .....	25

3.3.3	相关分析的工程应用举例	27
3.4	信号的频域分析	28
3.4.1	周期信号及离散频谱	28
3.4.2	非周期信号及频谱	31
3.4.3	随机信号的频谱分析	32
<b>4</b>	<b>机械故障的振动诊断技术</b>	<b>35</b>
4.1	振动监测系统的组成	35
4.1.1	测振传感器	36
4.1.2	测振放大器	37
4.1.3	信号记录和分析设备	38
4.2	振动诊断的基本原理和方法	43
4.2.1	确定诊断对象	43
4.2.2	选定测量参数	43
4.2.3	选择监测点	44
4.2.4	确定测量周期	44
4.2.5	确定诊断方法和标准	45
4.3	旋转机械转子系统的故障诊断	47
4.3.1	旋转机械转子故障的起因	47
4.3.2	旋转机械转子振动信号的拾取和处理	47
4.3.3	旋转机械转子故障的诊断方法	48
4.4	齿轮箱的故障诊断	49
4.4.1	齿轮箱的故障类型及原因	50
4.4.2	齿轮的故障诊断	50
4.5	滚动轴承的故障诊断	54
4.5.1	滚动轴承缺陷的振动特征频率	54
4.5.2	滚动轴承典型故障的振动特性分析	55
4.5.3	滚动轴承的振动监测与诊断	58
<b>5</b>	<b>机械故障诊断的油样分析技术</b>	<b>59</b>
5.1	油样分析的基本原理	59
5.2	油样铁谱分析技术	60
5.2.1	铁谱分析仪	60
5.2.2	铁谱分析的程序	63
5.2.3	铁谱的定性分析	64
5.2.4	铁谱分析的定量指标	65
5.2.5	铁谱分析的特点	66
5.3	油样光谱分析技术	67
5.3.1	油样光谱分析的基本原理	67

5.3.2	油样光谱分析的特点	67
5.3.3	光谱分析的磨损界限	67
<b>6</b>	<b>超声及声发射故障诊断技术</b>	<b>69</b>
6.1	超声检测的物理基础	69
6.1.1	超声波的类型	69
6.1.2	超声波的特性	71
6.1.3	超声场及其特征参数	72
6.1.4	超声波的传播	72
6.2	超声检测仪及常用检测方法	75
6.2.1	超声波检测的基本原理	76
6.2.2	超声波检测设备	76
6.2.3	超声波检测方法	84
6.3	超声波诊断中的基本问题	86
6.3.1	探测条件的选择	86
6.3.2	超声检测中的“三定”问题	88
6.4	声发射故障诊断技术	90
6.4.1	声发射诊断的基本原理	91
6.4.2	声发射检测技术	92
6.4.3	声发射技术在故障诊断中的应用	96
<b>7</b>	<b>故障诊断专家系统</b>	<b>97</b>
7.1	专家系统概述	97
7.1.1	专家系统的基本结构及其功能	97
7.1.2	专家系统的特点和适用范围	98
7.1.3	专家系统的开发工具	99
7.2	知识表示	100
7.2.1	产生式规则表示法	101
7.2.2	不精确知识的表示法	101
7.3	知识获取	102
7.3.1	知识获取方法	102
7.3.2	基于实例的学习	103
7.3.3	基于人工神经网络的学习	103
7.4	推理机制	106
7.4.1	问题规划	106
7.4.2	搜索策略	107
7.4.3	推理机制	107
7.5	机械故障诊断专家系统	108

<b>8 计算机辅助工况监测与故障诊断系统</b> .....	110
8.1 计算机辅助工况监测与故障诊断系统分类 .....	110
8.2 计算机辅助工况监测与故障诊断系统构成 .....	111
8.2.1 硬件系统 .....	111
8.2.2 软件系统 .....	114
8.3 基于虚拟仪器技术的轴承故障诊断系统 .....	115
8.3.1 虚拟仪器概述 .....	116
8.3.2 基于虚拟仪器的轴承故障诊断系统 .....	117
8.4 金属材料超声波检测缺陷智能识别系统 .....	120
8.4.1 超声检测仪器的计算机化 .....	120
8.4.2 金属材料超声波检测缺陷信号的采集与处理 .....	121
8.4.3 基于 MATLAB 的超声检测缺陷智能识别系统的设计 .....	126
<b>9 矿用运输提升机械故障诊断技术</b> .....	131
9.1 矿用胶带输送机故障诊断技术 .....	131
9.1.1 胶带输送机概述 .....	131
9.1.2 钢绳芯胶带断带及张力超限的故障诊断 .....	132
9.1.3 钢绳芯胶带纵向撕裂的故障诊断 .....	137
9.1.4 钢绳芯胶带机火灾故障诊断 .....	141
9.1.5 钢绳芯胶带输送机实时工况监测与故障诊断系统 .....	144
9.2 矿井提升机故障诊断技术 .....	150
9.2.1 概述 .....	150
9.2.2 提升机的工作原理 .....	151
9.2.3 矿井提升机常见故障及分析 .....	152
9.2.4 矿井提升机的安全监护 .....	156
9.2.5 矿井提升机安全监护系统 .....	158
<b>主要参考文献</b> .....	163



# 1 绪论

## 1.1 机械故障诊断的意义

机械故障诊断是一门综合性的交叉学科,研究的是如何通过测取机械设备在运行过程中的状态信息,进而识别机械设备及其零部件的运行状态,判定其是否异常并进行故障分析和预测。在现代化生产中,机械设备的特点是自动化、连续化、高速化和复杂化,因此在许多情况下,都需要确保设备安全可靠地运行。设备一旦出现故障,而又未能及时发现和排除,则不仅可能导致设备本身损坏,甚至可能造成机毁人亡的严重后果。为使机械设备高效、安全、可靠地运行,就需要利用故障诊断技术及时发现故障,并采取合理的维修或保护措施来排除故障,以预防和避免事故的发生。由此可见,机械故障诊断技术的意义就在于它能够满足现代化工业生产的要求,具体体现在以下几个方面:

### (1) 满足现代化设备的维修要求

当今现代化生产日益高速化和连续化,致使机械设备因故障停工而造成的损失相应增加,同时维修费用在生产成本中的比例也随之提高。之所以出现这种局面:一方面是由于不恰当的维修,另一方面是现行的定期维修或事后维修制度。如果采用机械状态监测和故障诊断技术,便可根据监测和诊断装置所测得的设备故障状态及其趋势预报来确定维修工作的内容和时间,这样既避免了过剩维修而造成的材料消耗以及维修工作量、停产时间和维修费用的增加,又减少了因维修安排不当所引起的过失维修。

### (2) 避免或降低事故危害

现代化设备对安全性和可靠性提出越来越高的要求,特别是在航天、航空、矿山、核工业等部门,许多设备的故障如果不能事先发现并加以预防,一旦发生事故,将会造成严重的后果甚至人员伤亡。当然,在现代化生产中要做到不出事故是很困难的,但还是应立足于尽早发现故障,防患于未然。故障诊断技术中的故障分析和诊断方法,一方面可以用于设计、制造和运行的各阶段,从而为避免或早期发现故障提供技术保障;另一方面,还可以通过对已出故障的分析,找出故障原因,避免同类故障再次发生。

### (3) 实现对机械设备不解体监测和诊断

现代化设备技术先进、结构复杂、点检工作量较大,对检测的质量要求很高,在一般情况下很难依靠人的感官和经验把故障原因检查出来。同时对于许多设备,又不允许随便解体检查。有人认为,对现代化的机器设备进行检查时动不动就把它拆开来看,就好像医生在给病人看病时动不动就对病人开刀剖腹来检查一样的荒唐可笑。这就要求我们必须采用先进的仪器和科学的方法对现代化设备进行不解体监测和诊断。

## 1.2 机械故障诊断技术的研究发展概况

据有关资料介绍,最早从事故障诊断技术研究的是美国。1961年开始执行阿波罗计划后出现的一系列因设备故障造成的悲剧导致1967年在美国宇航局提议下,由美国海军研究室主持成立了美国机械故障预防小组(MFPG),积极从事故障诊断技术的研究。1971年,MFPG正式划归美国国家标准局领导,从事故障机理、检测、诊断和预报技术的研究以及可靠性分析和耐久性评价;美国机械工程师学会(ASME)领导下的锅炉压力容器监测中心在应用声发射诊断技术(AE)进行静态设备故障诊断方面也取得了较大的进展;美国在航空方面,在可靠性维修管理的基础上,对飞机进行大规模的状态监测,采用了飞行器计算机数据综合系统(AIDS),通过分析处理大量飞行中的信息来确定飞机各部位的故障原因,并发出排除故障的命令,这一技术已用于B747和DC9等巨型客机中,大大提高了飞行安全性。

英国在20世纪60年代末70年代初,以R. A. Coilacott为首的英国机器保健中心最先开始研究故障诊断技术,1982年曼彻斯特大学成立了沃福森工业维修公司(WIMU),还有一些其他公司也相继开展了这方面的研究工作。设备故障诊断技术在欧洲其他国家也有很大发展,它们均在某一方面具有一定的特色或处于领先地位,比如瑞典的SPM公司的轴承监测技术、挪威的船舶诊断技术、丹麦B&K公司生产的振动监测诊断仪和声发射监测仪器等。

日本在钢铁、化工、铁路等民用工业部门的诊断技术方面发展也很快,占有某些优势。他们密切注意世界动向,积极引进消化最新技术,努力发展自己的诊断技术,研制相应的诊断仪器。新日铁从1971年起开发诊断技术及装备,到1976年基本上达到实用阶段;日本的机械维修、计测自动控制、电气和机械学会相继设立了自己的专门研究机构;日本国立研究机构中的机械技术研究所和船舶技术研究所重点研究机械基础件的诊断技术;东京大学、东京工业大学、京都大学等高等院校着重基础性理论研究;其他民办企业如三菱重工、川崎重工、日立制作所、东芝电器等以企业内部的工作为中心,着重研究应用水平较高的实用项目。

我国在诊断技术方面的研究起步较晚,但发展很快,当前我国的一些民用工业,尤其是冶金、石化和电力等,在开发和应用设备故障诊断技术方面走在了前面。原冶金工业部首先在东北大学和北京科技大学培养了从事故障诊断的研究生,已有一批硕士生和博士生毕业。其次,以北京冶金设备研究所为基地建立设备诊断研究室,开展测试、培训和咨询工作。1983年,又确定宝山钢铁集团公司和太原钢铁公司为开展诊断技术的试点单位,建立了振动、红外和铁谱三个实验室,在振动监测方面,对烧结和高炉的风机、制氧站的空压机进行了测试和分析,研制了ZJCY85型风机轴承在线监测系统;在红外和热像方面,对电气设备的简易诊断、对炉壳炉衬腐蚀的诊断都取得了较好的效果;在铁谱技术方面,对175t脱镀吊车的油泵油液进行铁谱分析,为液压泵、随动阀等部件的磨损找出了预防措施。

石化工业中成套单系列大机组较多,停产一天要损失几十万元到几百万元。石化总公司从20世纪70年代组织无损检测到80年代开展设备状态监测,已投资600多万元,为其所属企业装备了各类监测仪表1400多套,加强对旋转机械的振动监测及故障原因分析;采用轻便高效的探伤仪、测厚仪、内窥镜及声发射技术,加强对压力容器的检测;同时,利用红外热像仪测定厂内散热损失,并选用隔热材料以达到节能的效果。

水电行业以大机组为重点开展了机械设备故障诊断的研究,应用红外热像技术进行设备诊断,对安全运行起到了良好作用,制成了比国外漏水继电器性能更优越的双水内冷发电机漏水报警系统,研制出用于变压器故障诊断的气相色谱仪,利用声发射技术探测锅炉炉管和汽包焊缝。

此外,机械行业在现场简易诊断和精密诊断方面、航空工业在研制诊断仪器方面、核工业在进行反应堆故障诊断和寿命预测方面、铁道部门在进行内燃机车油液的光谱、铁谱分析和电力机车故障诊断方面,以及交通部门在实施汽车不解体检测、原煤炭部在矿井一些关键设备的在线监测等方面都做了卓有成效的工作,国内一些重点大学也都相继建立了故障诊断中心。

随着现代工业技术的发展,特别是计算机技术的发展,进一步推动了故障诊断技术的发展,主要体现在以下几个方面:

#### (1) 诊断方法的发展

从开发技术诊断的方法上看,国内外对别的领域中的诊断方法、理论和各种现代化仪器的最新成果都保持高度敏感性,凡是成熟的、可用的就借鉴过来用,不成熟的也设法完善它,使其适用于诊断的目的。像信号处理技术、声发射技术、红外测温技术、油液分析技术以及各种无损检测技术,都被借用,成为机械设备诊断技术的重要方法和手段。由于两种以上方法的综合诊断数据融合具有较高的确诊率(振动和声诊断的结合就是其中最活跃的代表),所以,目前诊断过程中通过将多种诊断方法相互结合,并采用数据融合技术已成为故障诊断方法发展的一个趋势。

#### (2) 诊断理论的发展

由于诊断信息的多样性,诊断技术的理论基础也是非常广泛的,已经用到自然科学的各个学科知识,因此其他学科的发展也带动了诊断理论的发展。目前已有统计诊断、分析诊断、模糊诊断、灰色诊断、神经网络诊断及专家系统诊断等理论。

#### (3) 诊断装置的发展

诊断装置的发展与现代传感技术、计算机技术密切相关,正朝着集成化、多功能化、智能化、结构小型化、性能标准化、实时在线化等方向发展,出现了虚拟仪器、智能诊断仪器或系统。随着网络技术的发展,还可能发展成为与网络相联系的网络诊断装置及系统。

## 2 机械故障诊断的基本原理

### 2.1 机械故障诊断的内容及过程

#### 2.1.1 机械故障的定义和分类

机械故障是指机械系统或零部件丧失或部分丧失原有设计功能的现象。比如通常见到的发动机发动不起来、胶带输送机打滑、轴承损坏等现象都是机械故障的表现形式。机械故障可以从不同的角度进行分类：

##### 1. 按故障的性质分类

###### (1) 间断性故障

在较短时间内,设备丧失某种功能,以后又恢复了功能。

###### (2) 永久性故障

故障造成的设备功能丧失必须在某些零部件更换或修复后才能恢复。这类故障还可细分为导致全部功能丧失的完全性故障和导致部分功能丧失的部分性故障。

##### 2. 按故障发生的快慢程度分类

###### (1) 突发性故障

故障出现前无明显可察征兆,发生突然,且通常有着较大的破坏性。该类故障往往不能靠早期试验或测试来预测。

###### (2) 渐发性故障

故障是逐渐发生的,因而通常能通过早期试验或测试来预测和监视。

##### 3. 按故障危害性分类

###### (1) 灾难性故障

机械的安全保护装置、传动系统的制动装置及其他关键零部件所发生的,导致机械毁坏或人员伤亡等后果严重的故障。

###### (2) 非灾难性故障

未造成机械毁坏或人员伤亡等严重后果的非危险性故障。但这类故障仍可能造成机械性能降低、影响使用、中断生产或导致较大的经济损失等后果。

##### 4. 按故障产生的原因分类

###### (1) 磨损性故障

机械设备正常工作磨损引起的故障,这实际反映了机械设备的寿命。

###### (2) 错用性故障

机械设备运行过程中,因操作使用不当而产生的故障。

###### (3) 先天性故障

由于设计和制造不恰当造成机械设备中存在某些薄弱环节而引发的故障。

## 5. 按照故障发生的频次分类

### (1) 偶发性故障

发生频率很低的一类故障。

### (2) 多发性故障

频繁发生的一类故障。

## 2.1.2 机械故障诊断及其分类

所谓机械故障诊断,就是对机械设备工作状况的正常与否及异常程度等作出判断,从而在事故发生之前查明故障产生的原因、部位及其发展趋势,以便采取相应措施和决策,预防和避免事故的发生。机械故障诊断技术按诊断的目的、方式、要求、条件或功能的不同可分为如下几类:

### 1. 功能诊断和运行诊断

对新安装或维修好的机械设备需要诊断其功能是否正常,并根据检查或诊断结果对其进行必要的调整,称为功能诊断;对正在服役的机械设备或系统进行运行状态的监测和故障诊断,称为运行诊断。

### 2. 定期诊断和连续监控诊断

定期诊断是指对机械设备进行定期的常规检查和诊断,亦称巡检;连续监控诊断则是采用现代化仪器仪表和计算机信号处理系统对机器或系统的运行状态进行连续监测和控制。

### 3. 直接诊断和间接诊断

诊断对象与诊断信息的来源是直接对应的诊断,称之为直接诊断;诊断对象与诊断信息的来源不是直接对应的诊断,即通过二次、三次等非一次信息进行的诊断,称之为间接诊断。

### 4. 常规诊断和特殊诊断

在机械设备的正常运行下(即常规工况下)进行的诊断称为常规诊断;在机械设备的特殊工况下(如机组的启动和停车过程)进行的诊断称为特殊诊断。

### 5. 简易诊断和精密诊断

简易诊断相当于初诊,能对机械设备的状态迅速有效地作出概括性的评价,一般由现场作业人员实施;对简易诊断不能完全确定的故障要进行专门的精密诊断,一般由精密诊断的专家及仪器来实施。

### 6. 在线诊断和离线诊断

所谓在线诊断,是指对现场正在运行的机械设备进行在线、实时诊断,一般来说这类诊断的对象属于十分重要的关键设备;而离线诊断则是通过磁带记录仪等记录设备将现场的状态信号记录下来,带回实验室进行离线分析和诊断,一般属于定期诊断。

此外,机械故障诊断还可以根据所采用的技术手段不同而分为:振动诊断技术、油样分析技术、无损检测技术等。本书后续章节将按照这种分类方法分别进行讨论。

## 2.1.3 机械故障诊断的过程

机械故障诊断的过程如图 2-1 所示,其主要内容包括:

① 根据机械设备的类型和工况,采取合适的检测方式,在设备的适当位置测取与机械设备状态有关的特征信号。

② 从获取的特征信号中提取机械设备状态的故障特征参量。此时,要求故障特征参量能够充分反映故障的特征信息。

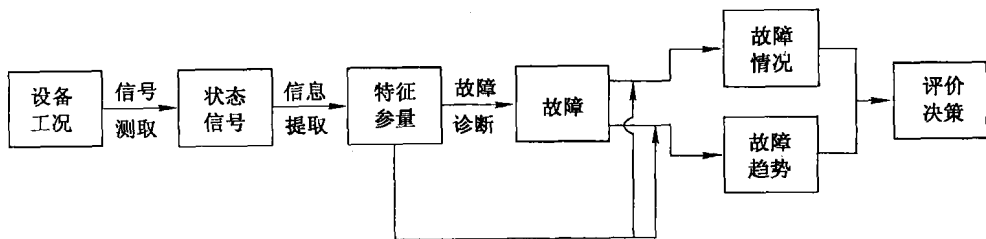


图 2-1 机械故障诊断过程

③ 采用合适的状态分析装置和方法,根据设备的故障特征参量及其变化情况或与某种故障特征参数(模式)进行比较,判别设备是否存在故障。

④ 根据设备的故障特征参量,进一步分析故障的类型、部位、产生的原因及严重程度,并对其发展趋势进行预测。

⑤ 根据设备的故障及其发展趋势,做出评价和决策,包括控制、自诊治、调整、维修、继续监测等措施。

如何选取特征信号及设备的故障特征参量?怎样进行故障识别?判断的依据是什么?诊断的正确性和准确性如何?这些都是故障诊断中的重要理论问题。故障诊断的任务就是可靠地报告和预测故障的发生与发展,排除漏报和误报,从而保证系统的正常运行。

## 2.2 机械故障特征参量

### 2.2.1 故障特征参量的定义

通常在机械设备的运行过程中,其故障总会通过一些物理参量表现出来,我们把这些与某种故障类型有着密切关系且灵敏稳定的物理参量称作故障特征参量。

机械系统的故障类型有多种,每一种故障类型必然是由一种或多种原因所引起的,并由其故障特征参量表征出来,这就是说,故障与特征参量及故障原因之间存在着某种对应关系:

$$F = f(\alpha_1, \alpha_2, \dots)$$

式中  $F$ ——某种类型的故障;

$\alpha_1, \alpha_2, \dots$ ——特征参量或故障原因。

故障诊断就是要确定  $F$  与  $\alpha_1, \alpha_2, \dots$  之间的某种对应关系  $f$ , 从而通过检测  $\alpha_1, \alpha_2, \dots$  来判断故障  $F$  是否发生,或在已知  $F$  发生的情况下去查明造成  $F$  的原因  $\alpha_1, \alpha_2, \dots$  等。

### 2.2.2 故障特征参量的选取原则

一般来讲,某种类型故障的发生会引起许多个物理量的变化,但可用作故障诊断的特征参量却是很有有限的,这就需要我们z从设备的状态信号中分离和提取出能反映设备故障的特征参量。实践证明,选择故障特征参量应遵循如下原则:

#### 1. 敏感性

在与机械设备运行有关的诸多特征参量中,并不是所有的特征参量都能够准确、敏感地反映设备某种故障的特征,正如一个人患了心脏病,心率变化就比体温更敏感;但若是患了

感冒,这时体温变化就比心率变化要显著得多。同理,不同的机械设备在不同运行状态下,各种特征参量对于我们所关心故障的敏感程度也各不相同。因此,选择一个或一些对故障最为敏感的特征参量是至关重要的。

### 2. 可实现性

应该充分考虑被检测对象的工况条件以及我们的仪器设备条件,以保证故障特征参量是便于检测的。

### 3. 在线性和实时性

对于连续运行的机械设备,它的许多工况参数及运行状态往往需要进行在线监测,这就要求我们在选择设备的故障特征参数时,应充分考虑工况监测与故障诊断的实时性要求。

总之,不同的故障类型有不同的故障特征与之对应,也就是说,故障类型不同,其故障特征参量也不同;即使是同一种故障类型,其环境条件(包括故障主体)发生变化时,故障特征参量也会不同。因此,故障特征参量应根据具体的检测对象及环境条件,通过理论分析和实验的方法来确定。

## 2.2.3 故障特征参量的数据融合

通常机械故障总会通过一些故障特征参量表征出来,所以在进行故障诊断时往往可以通过同时测取这些故障特征参量,并对其进行综合分析,进而作出更加准确、可靠的判断。也就是故障诊断的过程应该是对来自多个故障特征参量的多源信息的数据融合过程。具体地讲,就是充分利用不同时间和空间的多源传感器信息资源,采用计算机技术,对按时序获得的多个故障特征参量,在一定的准则下加以自动分析、综合、支配和利用,获得对被测对象的一致性诊断,从而提高工况监测故障诊断的有效性、准确性和可靠性,消除只借助于单个故障特征参量进行诊断可能带来的偏差。

## 2.3 故障分析理论与方法

机械设备的故障诊断就是通过选择一个或一些合适的故障特征参量,借助于相应的理论和方法对其进行分析,获取设备运行状况和故障的有关信息的过程。但由于机械设备自身结构、运行过程及环境的复杂性,致使故障诊断往往也十分复杂,相应的理论分析方法也很多,不仅要用到信号分析、逻辑推理,还要用到神经网络和专家系统等方法。本章将简要介绍几种常见的故障分析理论和方法,如对比分析法、逻辑判别法、故障树分析法等。有关神经网络和专家系统等方面的内容将在第7章详细介绍。

### 2.3.1 对比分析法

对比分析法的基本原理是:首先弄清故障发生的工况和机理。在此基础上,通过计算分析、试验研究、统计归纳等手段,确定与各种故障状态相对应的故障特征参量的标准模式(参考模式),然后在机械设备运行过程中,通过实测故障特征参量及其变化规律,并将其与参考模式相比较,分析判断机械设备的运行状态。

在工程实际中,这种方法有着广泛的应用,使用效果良好。例如,在旋转机械的振动故障诊断中,首先,采用测振仪测得机械设备的振动强度参数,并将其与相应的标准或经验值相比较,初步判断是否存在故障,然后借助于频谱分析仪,通过对振动信号的相关与频谱分析,获得其频率特性,观察频谱中的优势频率成分及其变化情况,将其与标准模式相比较,从而

进一步识别出故障的类型、部位、原因和发展趋势等。比如电机—减速机系统在运转过程中，其振动主要来自齿轮的啮合，但当电机的输出轴与减速机的输入轴轴线不对中时，则会在振动信号的频域图及时域图上看到明显的调制现象（调制频率为电机轴的转频）；又如滚动轴承工作面（内环、外环或滚动体）一旦出现缺陷，其振动信号的频谱上则会出现相应的故障特征频率成分，从而可根据它判断缺陷的部位。

应用这种方法应该具备两个基本条件：一是应该配备有相应的仪器及设备，同时要求技术人员具有相关的专业知识和专业技能；二是对机械设备的性能参数和运行历史要有足够的了解，或是积累了一定的经验、收集了相关的资料。如果是一台新型设备，对它的故障模式一无所知，即没有一个参考模式，要达到精确诊断也很困难。

### 2.3.2 逻辑判别法

#### 1. 基本概念

大多数情况下，特征参数与设备的状态之间并不存在简单的对应关系，然而在某些情况下，如果征兆（特征参量的某种取值状况）与设备状态之间有一定的逻辑上的联系，这时就可以通过逻辑推理的方式判断设备的运行状态。逻辑判别法通常分为物理逻辑判别和数理逻辑判别两种。

物理逻辑判别法是根据征兆与状态之间的物理关系进行推理诊断。典型的方法如油样分析，通过光谱、铁谱或磁塞等方式，分析设备润滑油中金属微粒的含量、尺寸及形貌，而这些金属微粒是由设备有关运动部分互相摩擦和磨损而产生的，可以作为机械设备运行的特征参量，根据机器运动部分有关零件的材料与成分，就可从微粒变化情况推断出设备及零件的磨损情况。

数理逻辑判别法根据征兆与状态之间的数理逻辑关系（即布尔函数），在获得征兆后，按照逻辑代数运算规则判别工况状态。当然，这种方法只能对设备的运行状态判别“有”与“无”故障，或者工况状态“正常”和“异常”两种状态。这种判别方法简单明了，对于某些逻辑关系明确的系统，例如继电器控制系统，采用这种方法可取得良好的效果。但应当注意的是，在设备运行过程中，大多没有这种简单的对应关系，故对较为复杂的运行状态，不能完全依靠逻辑推理。

#### 2. 逻辑代数规则

若变量只能取 1 或 0 这两个值，则称这种变量为逻辑变量；若在函数  $y = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$  中，自变量  $x_i (i=1, 2, \dots, n)$  和因变量  $y$  均为逻辑变量，则这种函数表达的是一种逻辑关系， $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$  称为逻辑函数。基本的逻辑函数及其相应的运算规则为：

##### (1) 逻辑和

记为  $y = x_1 + x_2$ ，其运算规则为：当  $x_1$  和  $x_2$  中任一个取值为 1，则  $y$  值取 1；否则  $y$  值取 0。其真值见表 2-1 所示。

##### (2) 逻辑乘

记为  $y = x_1 \cdot x_2$ ，其运算规则为：当  $x_1$  和  $x_2$  两个均取值为 1 时， $y$  才取值为 1；否则  $y$  取值为 0。其真值见表 2-1 所示。

##### (3) 逻辑非

记为  $y = \bar{x}$ ，其运算规则为：当  $x$  取值为 1 时， $y$  取值为 0；当  $x$  取值为 0 时， $y$  取值为 1。其真值见表 2-2 所示。



(4) 同一

记为  $y=x$ , 即  $y$  和  $x$  的取值相同。见表 2-2 所示。

(5) 蕴涵

记为  $y=x_1 \rightarrow x_2$ , 其逻辑关系等价于  $y=\bar{x}_1+x_2$ , 即表示如果有  $x_1$  存在, 则必有  $x_2$  存在, 称为  $x_1$  蕴涵  $x_2$ , 其真值见表 2-1 所示。

表 2-1 逻辑和、逻辑乘和蕴涵真值表

$x_1$	$x_2$	$y$		
		逻辑和	逻辑乘	蕴涵
0	0	0	0	1
0	1	1	0	1
1	0	1	0	0
1	1	1	1	1

表 2-2 逻辑非和同一真值

$x$	$y$	
	逻辑非	同一
0	1	0
1	0	1

根据上述基本逻辑运算关系推得逻辑运算的基本法则列于表 2-3 中, 据此可以对逻辑表达式进行简化。

表 2-3 逻辑运算的基本法则

名称	公 式	说明	名称	公 式	说明
逻辑和	$A+B=B+A$	交换律	否定律	$\bar{\bar{A}}=A$	非非律
	$A+(B+C)=(A+B)+C$	结合律		$A+\bar{A}=1$	互补律
	$A+A+\dots+A=A$	重叠律		$A\bar{A}=0$	互补律
	$A+1=1$	0-1 律	摩根律	$\overline{ABC\dots K}=\bar{A}+\bar{B}+\bar{C}+\dots+\bar{K}$	反演律
	$A+0=A$	自等律		$\overline{A+B+C+\dots+K}=\bar{A}\bar{B}\bar{C}\dots\bar{K}$	反演律
逻辑乘	$AB=BA$	交换律	分配律	$A(B+C)=AB+AC$	
	$A(BC)=(AB)C$	结合律		$(A+B)(A+C)=A+BC$	
	$AA\dots A=A$	重叠律	吸收律	$A+AB=A$	
	$A \cdot 1=A$	自等律		$A(A+B)=A$	
	$A \cdot 0=0$	0-1 律			

### 3. 逻辑诊断原理

设  $K_1, K_2, \dots, K_n$  表示机械设备的征兆, 若  $K_i=1$ , 则称有第  $i$  种征兆; 若  $K_i=0$ , 则称无第  $i$  种征兆; 又设  $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_m$  表示机械设备的状态, 若  $\Omega_j=1$ , 则称有第  $j$  种状态; 若  $\Omega_j=0$ , 则称无第  $j$  种状态。定义征兆布尔函数为  $G(K_1, K_2, \dots, K_n)$ , 状态布尔函数为  $F(\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_m)$ , 描述诊断规则的决策布尔函数为  $E(K_1, K_2, \dots, K_n, \Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_m)$

逻辑诊断的基本问题是根据机械设备的征兆函数  $G$  和决策函数  $E$  来求出状态函数  $F$ 。用逻辑语言来表示, 即有如下形式

$$E = (G \rightarrow F) \quad (2-1)$$

其含义是机械设备具有某种征兆, 则处于相应的状态。也可以用另一种形式来表达

$$E = (\bar{F} \rightarrow \bar{G}) \quad (2-2)$$

其含义是如果机械设备不具有某种状态, 则相应的特征就不会存在。

在应用蕴涵逻辑关系进行诊断时, 要运用蕴涵真值表(见表 2-1)中的最后一行, 即要使