

JIXIE GUZHANG ZHENDUAN JI  
DIANXING ANLI JIEXI

# 机械故障诊断及 典型案例解析

时献江 王桂荣 司俊山 编著



化学工业出版社

013069714

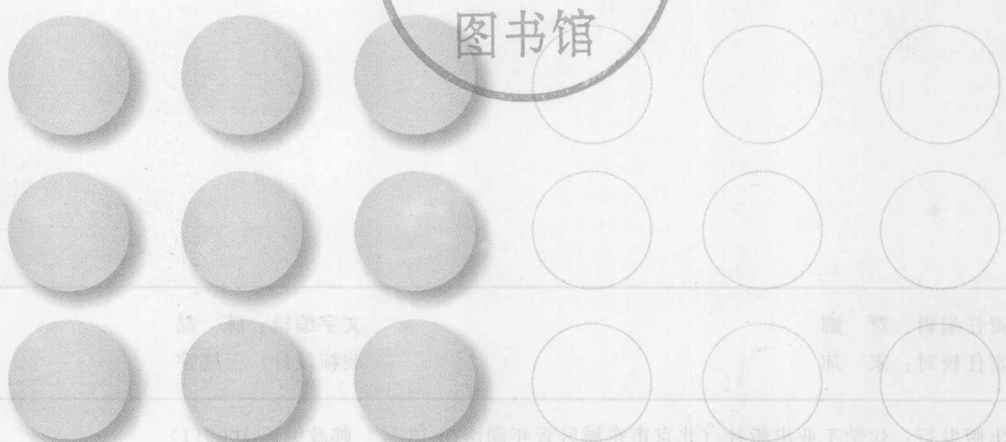
TH17  
67



JIXIE GUZHANG ZHENDUAN JI  
DIANXING ANLI JIEXI

# 机械故障诊断及 典型案例解析

时献江 王桂荣 司俊山 编著



TH17  
67



化学工业出版社

· 北京 ·



北航

C1677774

定价：39.00元

39.00元

013082714

图书在版编目 (CIP) 数据

机械故障诊断及典型案例解析/时献江, 王桂荣, 司俊山编  
著. —北京: 化学工业出版社, 2013. 7

ISBN 978-7-122-17471-0

I. ①机… II. ①时…②王…③司… III. ①机械-故障诊  
断-案例 IV. ①TH17

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 111639 号

机械故障诊断及典型案例解析

时献江 王桂荣 司俊山



---

责任编辑: 贾娜  
责任校对: 宋玮

文字编辑: 陈喆  
装帧设计: 王晓宇

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 12 字数 294 千字 2013 年 10 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 49.00 元

版权所有 违者必究





机械故障诊断是一种了解和掌握机器在运行过程中的状态,确定其整体或局部正常或异常,早期发现故障及其原因,并能预报故障发展趋势的技术。诊断技术发展几十年来,产生了巨大的经济效益,成为各国研究的热点。我国机械故障诊断起步较晚,但经过几年的发展,也取得了不小的成绩。全国许多行业都很重视在关键设备上装备故障诊断系统,特别是智能化的故障诊断专家系统,比如电力系统、石化系统、冶金系统以及高科技产业中的核动力电站、航空部门和载人航天工程等。

本书以机械振动分析为主线,主要介绍了机械故障诊断的基本原理、方法和应用。在讲解机械振动、信号基本时频域分析及特殊信号处理技术的基础上,着重介绍了滚动轴承、齿轮、旋转机械、滑动轴承等典型零部件的故障监测和诊断方法,并介绍了大量相关诊断实例。本书还从实用角度对现代诊断方法,如小波分析和EMD方法等进行了简单介绍,并列举了相关应用实例。

为了适应现代机械故障诊断技术的发展与需要,本书具有以下特点。

① 以机械振动分析为基础,在深入研究机械设备的振动故障机理的基础上,介绍了典型零部件的故障特征及诊断方法,有一定的通用性,有助于各行业读者或初学者理解与掌握。

② 信号处理部分附有必要的 MATLAB 计算程序,充分利用 MATLAB 提供的函数或工具包,使复杂的信号处理过程简易化,解决一般读者信号处理入门困难的问题。

③ 诊断实例丰富,很多诊断及过程融入到诊断实例中,便于读者对诊断方法的理解和掌握。

本书主要针对从事机电设备运行、维护、设备点检和运行状态监测以及故障诊断与事故分析等方面工作的人员编写而成,可供从事机械设备故障诊断工作的工程技术人员参考,也可作为高等院校机械类专业本科生、研究生教材使用。

本书由时献江、王桂荣、司俊山编著。其中,时献江编写第1章、第4章、第5章和第8章,王桂荣编写第3章、第6章、第7章和第9章,司俊山编写第2章,时献江负责全书的统稿工作。

由于编著者水平所限,书中不足之处在所难免,敬请读者批评指正。





<b>第 1 章 绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1 机械故障诊断技术的定义 .....	1
1.2 机械设备故障诊断的研究内容 .....	2
1.3 机械设备故障诊断方法的分类 .....	3
1.4 机械设备故障诊断技术的发展趋势 .....	5
<b>第 2 章 机械故障诊断的振动力学基础</b> .....	<b>7</b>
2.1 机械振动的概念及分类 .....	7
2.1.1 机械振动的基本概念 .....	7
2.1.2 机械振动的分类 .....	7
2.1.3 机械振动的描述 .....	8
2.2 机械系统振动的动力学基础 .....	12
2.2.1 无阻尼自由振动 .....	12
2.2.2 有阻尼自由振动 .....	13
2.2.3 简谐受迫振动 .....	13
2.2.4 单自由度系统振动理论的应用 .....	16
2.3 机械振动测量与分析诊断系统简介 .....	21
2.4 机械振动故障信号测取传感器 .....	22
2.4.1 电涡流式位移传感器 .....	22
2.4.2 速度传感器 .....	23
2.4.3 加速度传感器 .....	23
2.5 传感器的选择与安装 .....	26
2.5.1 传感器的选择原则 .....	26
2.5.2 传感器的安装方式 .....	26
<b>第 3 章 机械故障信号的幅域与时域分析</b> .....	<b>29</b>
3.1 随机信号的概率密度函数 .....	29
3.2 信号幅域分析 .....	31
3.2.1 随机信号的统计参数 .....	31

3.2.2	有量纲幅域参数	31
3.2.3	无量纲幅域参数	32
3.3	信号的相关分析	34
3.3.1	自相关函数	34
3.3.2	互相关函数	36
3.3.3	相关函数的应用	37

## 第4章 故障诊断信号的频域分析方法 39

4.1	傅里叶级数和傅里叶积分	39
4.1.1	傅里叶级数	39
4.1.2	傅里叶积分	41
4.2	傅里叶变换的基本性质	43
4.3	典型信号的傅里叶变换	46
4.3.1	单位脉冲信号 ( $\delta$ 函数)	46
4.3.2	周期单位脉冲函数 (梳状 $\delta$ 函数)	48
4.4	信号的采样	50
4.4.1	连续信号的采样	50
4.4.2	采样定理	51
4.4.3	采样点数与频率分辨率	52
4.5	离散傅里叶变换 (DFT)	53
4.5.1	DFT 的理论公式	53
4.5.2	DFT 计算过程的图解说明	54
4.6	快速傅里叶变换 FFT	56
4.6.1	直接 DFT 计算的缺点	56
4.6.2	快速傅里叶变换 FFT 的原理及应用	56
4.7	提高频谱分析精度的方法	59
4.7.1	整周期采样方法	59
4.7.2	窗函数法	60
4.8	傅里叶频谱信息的表示方法	62
4.8.1	确定信号的傅里叶谱分析	62
4.8.2	随机信号的功率谱分析	64
4.9	机械故障信息的其他表示方法	66
4.9.1	振动趋势图	66
4.9.2	三维瀑布图	66
4.9.3	级联谱图	66
4.9.4	波德图	66
4.9.5	极坐标图	67
4.9.6	相位及相位差图	68
4.9.7	轴心轨迹	68
4.9.8	轴心位置分析	69

4.9.9	全息谱	69
-------	-----	----

## 第5章 故障诊断信号处理的特殊方法 71

5.1	时域平均方法	71
5.2	倒谱技术	73
5.2.1	倒谱的定义	74
5.2.2	倒谱分析法应用	74
5.2.3	倒谱分析法 MATLAB 实现	76
5.3	调制与解调分析方法	76
5.3.1	幅值调制与频率调制	76
5.3.2	幅值解调分析	78
5.4	细化频谱方法	80
5.4.1	复调制移频 ZFFT 法基本原理	80
5.4.2	实调制移频 ZFFT 法基本原理	81
5.4.3	实调制移频 ZFFT 法计算流程	82
5.5	细化包络解调方法	83
5.6	小波变换	83
5.6.1	小波变换的基本原理	84
5.6.2	小波变换时频图	85
5.6.3	小波变换的计算	86
5.6.4	小波变换在故障诊断中的应用	87
5.7	经验模态分解方法	88
5.7.1	EMD 方法的基本原理	88
5.7.2	Hilbert 谱与 Hilbert 边际谱	91
5.7.3	EMD 分析的 MATLAB 程序	92
5.7.4	基于 EMD 的 Hilbert 变换解调分析及应用	93

## 第6章 滚动轴承的故障诊断与实例解析 94

6.1	滚动轴承失效的形式和振动信号特征	94
6.2	滚动轴承振动信号的特征频率分析	96
6.2.1	滚动轴承运动产生的特征频率	96
6.2.2	轴承刚度变化引起的振动	97
6.2.3	滚动轴承元件的固有频率	98
6.3	滚动轴承的典型故障特征	98
6.3.1	疲劳剥落损伤	98
6.3.2	均匀磨损的轴承振动信号	101
6.3.3	与滚动轴承安装有关的振动	101
6.4	滚动轴承的振动监测诊断方法	102
6.4.1	振幅监测法	102



6.4.2	冲击脉冲法	103
6.4.3	共振解调法	104
6.4.4	频谱分析法	105
6.5	滚动轴承的故障诊断实例分析	107
6.5.1	用冲击脉冲法诊断滚动轴承故障	107
6.5.2	冲击脉冲法在离心泵电机轴承故障诊断中的应用	107
6.5.3	胶乳分离机滚动轴承故障的共振解调法分析与应用	109
6.5.4	倒频谱分析在鞍钢线材厂设备滚动轴承故障诊断中的应用实例	110
6.5.5	时域指标在滚动轴承故障诊断中的应用	113
6.5.6	小波变换在滚动轴承故障分析中的应用	115

## 第7章 齿轮的故障诊断及实例解析 117

7.1	齿轮的失效形式和原因	117
7.1.1	齿轮的常见故障	117
7.1.2	齿轮故障的原因	118
7.2	齿轮副运动特点及振动机理	119
7.3	齿轮故障的频谱特征信息	121
7.4	齿轮故障的监测与诊断方法	125
7.4.1	时域平均法	125
7.4.2	故障齿轮的时域波形特征和频域波形特征	125
7.4.3	边频带分析	127
7.4.4	倒频谱分析	128
7.4.5	Hilbert 解调法	129
7.5	齿轮故障诊断实例分析	129
7.5.1	边频带分析在齿轮故障诊断中的应用	129
7.5.2	大庆炼化增压鼓风机增速箱振动故障的频谱分析	130
7.5.3	某海上采油平台的原油外输泵齿轮增速箱故障诊断	133
7.5.4	基于细化谱分析的车床齿轮故障诊断	133
7.5.5	基于 Hilbert 解调技术的重载汽车齿轮箱故障诊断	135
7.5.6	基于 EMD 的空分机齿轮箱故障诊断	137

## 第8章 旋转机械的故障诊断及实例解析 139

8.1	旋转机械及其故障分类	139
8.1.1	旋转机械的分类	139
8.1.2	旋转机械的主要故障类型	139
8.2	旋转机械的典型故障的振动机理分析	141
8.2.1	转子不平衡故障的振动机理分析	141
8.2.2	转子不对中故障振动机理分析	142
8.3	旋转机械的典型故障特征	145

8.3.1	转子不平衡时的故障特征	145
8.3.2	转子不对中时的故障特征	146
8.3.3	转子基础松动的故障特征	148
8.3.4	转子碰摩故障振动特征	148
8.3.5	基础共振时的振动特征	149
8.3.6	旋转机械振动特征总结	149
8.4	不平衡故障诊断实例解析	150
8.4.1	通风电动机组不平衡故障分析研究	150
8.4.2	某钢厂转炉煤气引风机设备状态检测	151
8.4.3	催化轴流风机叶片断裂不平衡故障的诊断	152
8.4.4	基于 EMD 的转子不平衡振动分析	153
8.5	不对中故障诊断实例分析	155
8.5.1	离心风机不对中的故障分析	155
8.5.2	大型机组不对中的故障诊断	155
8.5.3	汽油加氢泵不对中的故障诊断	156
8.5.4	汽轮发电机组基础下沉引起的不对中故障分析	157
8.5.5	基于小波的汽轮发电机组振动故障诊断方法研究	158
8.5.6	基于小波降噪的汽轮发电机组不对中故障检测	158
8.5.7	基于 EMD 的模拟不对中振动信号时频谱分析	159
8.6	转子的其他故障诊断实例分析	161
8.6.1	引风机地脚螺栓松动故障及其诊断	161
8.6.2	某化工厂一催装置中锅给水泵不平衡故障诊断	162
8.6.3	基于 EMD 的烟气轮机动静摩擦故障诊断	163

## **第 9 章 滑动轴承的故障诊断及实例解析** ..... 164

9.1	滑动轴承工作原理	164
9.2	滑动轴承常见故障的原因和防治措施	165
9.3	滑动轴承的故障诊断及其对策	167
9.3.1	油膜失稳故障的机理	167
9.3.2	油膜振荡特征及诊断	171
9.3.3	油膜振荡的防治措施	173
9.4	滑动轴承故障诊断实例	174
9.4.1	透平鼓风机油膜涡动的故障诊断	174
9.4.2	离心压缩机油膜涡动故障原因分析及治理	175
9.4.3	超超临界 1000MW 机组油膜涡动故障分析和处理	175
9.4.4	牡二电厂 200MW 机组油膜振荡故障诊断及处理	178
9.4.5	离心压缩机油膜振荡的诊断	179
9.4.6	基于 EMD 和 HT 的旋转机械油膜涡动信号分析	181

## **参考文献** ..... 183

# 第 1 章

## 绪 论

随着现代化大生产的发展和科学技术的进步,现代设备向着结构复杂化和自动化方向发展,机械设备工作强度不断增大,生产效率、自动化程度越来越高,同时设备更加复杂,各部分之间的关联愈加密切,因此往往某处微小故障就爆发连锁反应,导致整个设备甚至与设备有关的环境遭受灾难性的毁坏。这不仅会造成巨大的经济损失,而且会危及人身安全,后果极为严重。因此,企业需要及时了解和掌握大型或关键设备的运行工况,正确估计可能发生的故障或趋势。另一方面,随着科学技术与生产的高度发展,信息传感技术、信号处理技术及现代测试技术的发展,特别是计算机技术的飞速发展,各学科相互渗透、相互交叉、相互促进,为设备故障诊断提供了技术支持,从而使上述需要成为可能,并形成了设备诊断技术这一生命力旺盛的新兴学科。

促进机械设备诊断技术日益获得重视与发展的一个主要原因是,现代设备故障造成的经济和人员损失巨大。例如,1986年前苏联切尔诺贝利核电站泄漏事故,2003年美国航天飞机“哥伦比亚号”的坠毁事故,都是设备故障造成的震惊世界的恶性事故。在我国,1985年大同电厂和1988年秦岭电厂的200MW汽轮发电机组的严重断轴毁机事件,都造成了巨大的经济损失。

据统计,重要设备因事故停机造成的损失极为严重:300MW发电机组停产一天损失电720万千瓦时,约144万元,30万吨化肥装置停产一天损失约150万元,更换一台大型风力发电设备齿轮箱的费用就达100万元。这表明采用设备诊断技术,保证设备可靠而有效地运行是极为重要的。

设备诊断技术日益获得重视与发展的另一个重要原因是维修体制的改革。当前,国内外对机械设备多数还是采用事后维修或计划维修方式,而不是先进的预测维修体制。显然,预测维修体制的推广,首先需要完善的是设备监控与故障诊断技术支持,即需要故障监测与诊断系统来提供维修建议和时机。

目前,采用振动信号监测机械设备的运行状态,诊断其故障,是一个简单易行、准确可靠的方法。也是一个发展较早和较为成熟的领域。通过对机械运行过程中的工况进行监测,对其故障发展趋势进行早期诊断,找出故障原因,采取措施进行维修保养,避免设备的突然损坏,使之安全运转,可极大地提高经济效益与社会效益,所以开展机械设备故障诊断技术的研究具有重要的现实意义。

## 1.1 机械故障诊断技术的定义

### (1) 机械故障的定义



机械故障的定义，包含两层含义。

① 故障：机械系统偏离正常功能，它的形成原因主要是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以恢复到正常功能。

② 失效：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，一般称为失效。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。

根据机器设备出现故障后能不能修复的区别，可以把设备划分为可修复的和不可修复的两大类。而在机械设备中，大多数产品是属于可修复的产品，因而，机械设备故障诊断技术的故障对象多指“故障”，而非“失效”。

### （2）机械故障诊断技术的定义

机械故障诊断技术是一种利用各种检测方法，测取并分析、处理机械设备在运行中的状态信息，确定其整体或局部是否正常，早期发现故障及其原因，并能预报故障发展趋势的技术。

通俗地说，设备故障诊断技术是一种给机器“看病”的技术，包含“监测”和“诊断”两层意思。因此，设备故障诊断技术，又称机械设备状态监测和故障诊断技术，通常简称为设备诊断技术。

### （3）机械设备故障诊断的目的

设备诊断技术的目的是“保证可靠地、高效地发挥设备应有的功能”。这包含了三点。

① 保证设备无故障，工作可靠。

② 保证物尽其用，设备要发挥其最大的效益。

③ 保证设备在将有故障或已有故障时，能及时诊断出来，正确地加以维修，以减少维修时间、提高维修质量，节约维修费用，使重要的设备能按其状态进行维修（即视情维修或预知维修），促进目前计划维修体制的改革。

### （4）机械设备故障诊断的特点

① 机械运行过程是动态随机过程。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；二是表征机器工况状态的特征值不是不变的，而是在一定范围内变化。即使同型号机械设备由于装配、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改变。

② 从系统特性来看，机械设备都是由成百上千个零部件装配而成，零部件间相互偶合，决定了机械设备故障的多层次性。一种故障可能由多层次故障原因所构成，故障与现象之间没有简单的对应关系。

③ 机械故障诊断是多学科融合的技术。机械故障诊断涉及机器学、力学、材料科学、信息学、测试及信号处理、仪器科学、计算机技术等，其涉及的应用领域也非常广泛，如电力、石化、冶金、航空、航天等。

因此，机械故障诊断并不是一一对应的简单求解过程，如果仅从某一个参数或某一个侧面去分析而做出判断，一般很难做出正确的决策。应该从随机过程的理论出发，运用各种现代多学科融合的分析工具，综合判断机械的故障现象、属性、形成及其发展趋势。

## 1.2 机械设备故障诊断的研究内容

机械故障诊断过程一般包括：机械状态信号的测量、机器状态或失效信息的提取、状态识别、诊断决策等几个步骤。其中，机械状态信息提取的结果往往表现为提取到的状态特征参数。状态识别过程实质上是一个比较、分类过程。通过将当前状态特征与标准（或历史）

状态或故障特征的比较,判断当前机械状态或故障类别。根据诊断目的和诊断方法不同,其具体的实施过程也有所不同,但基本过程是相同的,如图 1.1 所示。机械故障诊断的具体研究内容叙述如下。

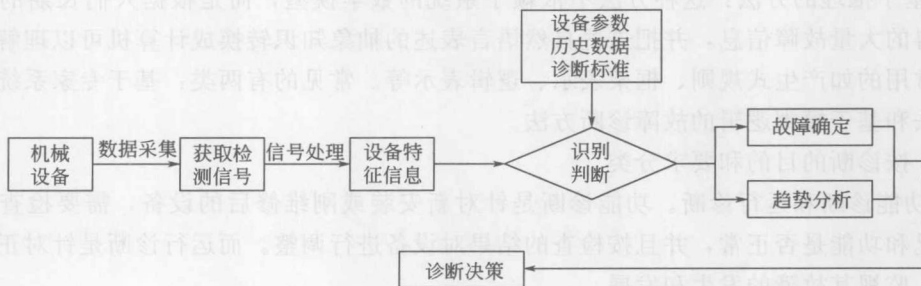


图 1.1 机械设备故障监测与诊断的实施过程

### (1) 信号采集

设备在运行过程中,必然会产生力、热、振动、噪声等各种参数的变化,按照不同的诊断目的和要求,使用传感器、数据采集器等技术手段,采集能表征设备工作状态的不同信息,就是信号采集过程。

### (2) 特征提取

将信号采集获得的数据信息进行分类、处理、加工,获得能表征设备运行特征的特征参量的过程,也就是特征的提取过程。

### (3) 状态识别

将经过信号处理后获得的设备特征参量,采用一定的判别模式、判别准则和诊断策略,对设备的状态做出判断,确定是否存在故障以及故障的类型和性质、程度等。

### (4) 诊断决策

根据状态识别的结果,决定采取的对策、措施,同时根据当前的检测信息预测机械设备运行状态可能的发展趋势,进行趋势分析。

以上四个步骤构成了一个循环,一个复杂、疑难的故障往往并不能通过一个循环就正确地找出症结所在,通常都需要经过多次诊断、重复循环,逐步加深认识的深度和判断的准确度,才能最后解决问题。

## 1.3 机械设备故障诊断方法的分类

机器设备有各种类型,其工作条件又各不相同,故对不同机器的故障往往需要采用不同的方法来诊断。对机器进行故障诊断的方法可以按如下几种方式进行分类。

### (1) 按诊断方法分类

① 基于信号处理的方法:对测得的振动量在时域、频域和时-频域进行特征分析,用于确定机器各种故障的类型和性质。

② 基于知识的方法:此方法通过处理测量到的输入输出信号来实现故障诊断。例如贝叶斯分类方法、神经网络分类方法和支持向量机等方法。其前提是必须拥有大量的关于系统故障的经验知识,具有实测到的大量的各类故障样本数据。这样才能够从这些故障样本实例中学到故障模式集,并对未知的故障模式进行判别。

③ 基于解析模型的方法：利用测得的振动参数对机器零部件的模态参数进行识别，以确定故障的原因和部位。此方法需要建立被诊断对象的较为精确的数学模型，其最大的优点是对于未知故障有固有的敏感性。

④ 基于推理的方法：这种方法不依赖于系统的数学模型，而是根据人们长期的实践经验和获得的大量故障信息，并把这些自然语言表述的抽象知识转换成计算机可以理解的表示形式，常用的如产生式规则、框架表示、逻辑表示等。常见的有两类：基于专家系统的故障诊断方法和基于模糊逻辑的故障诊断方法。

#### (2) 按诊断的目的和要求分类

① 功能诊断和运行诊断。功能诊断是针对新安装或刚维修后的设备，需要检查它们的运行工况和功能是否正常，并且按检查的结果对设备进行调整。而运行诊断是针对正常运行的设备，监视其故障的发生和发展。

##### ② 定期（离线）诊断和连续（在线）诊断。

a. 定期诊断，也称离线（off line）诊断。定期或不定期地采用巡检方式采集现场数据，就地分析与诊断，或回放到计算机，由计算机软件进行监测与诊断分析。特点是离线分析，对突发故障无能为力，但可精细分析。

b. 连续诊断，也称在线（on line）诊断。此时，传感器及数据采集硬件、控制计算机及监测分析软件均为固定式，与被测设备连在一起，可以实时监测设备的当前状态，捕捉突发故障并进行及时精细分析。

两种诊断方式的采用取决于设备的关键程度、设备事故影响的严重程度、运行过程中性能下降的快慢以及设备故障发生和发展的可预测性。一般来说，对于大型、重要的设备多采用在线诊断；对于一般中小型设备往往采用离线诊断方式。

③ 直接诊断和间接诊断。直接诊断是直接确定关键部件的状态，如主轴承间隙、齿轮齿面磨损、燃气轮机叶片的裂纹以及在腐蚀环境下管道的壁厚等。直接诊断往往受到机器结构和工作条件的限制而无法实现，这时就不得不采用间接诊断。

所谓间接诊断，是通过二次诊断信息来间接判断机器中关键零部件的状态变化。多数二次诊断信息属于综合信息，例如用润滑油温升来反映主轴承的运行状态，因此，在间接诊断中出现误诊和漏检两种情况的可能性都会增大。

大多数情况下，机械故障诊断属于间接诊断方法。

④ 简易诊断和精密诊断。简易诊断一般通过便携式简单诊断仪器，如测振仪、声级计、红外测温仪等对设备进行人工监测，根据设定的标准或凭人的经验确定设备是否处于正常状态。

精密诊断一般要采用先进的传感器采集现场信号，然后采用精密诊断仪器和各种先进分析手段进行综合分析，确定故障类型、程度、部位和产生故障的原因，了解故障的发展趋势。

⑤ 常规工况下诊断和特殊工况下诊断。多数诊断是在机器正常工作条件下进行的，有时需要在特殊的工作条件来拾取信息。例如动力机组的启动和停车过程，需要跨过转子扭转、弯曲的几个临界转速。利用启动和停车过程的振动信号做时频分析等，能够得到许多在常规诊断中所得不到的诊断信息。

#### (3) 按诊断信号及诊断手段分类

① 振动诊断技术。对机器主要部位的振动值如位移、速度、加速度、转速及相位值等



进行测定,并对测得的上述振动量在时域、频域、时-频域进行特征分析,判断机器故障的性质和原因。

② 噪声诊断技术。对机器噪声的测量可以了解机器运行情况并寻找故障源。

③ 温度、压力等常规参数诊断技术。机器设备系统的某些故障往往反映在一些工艺参数,如温度、压力、流量的变化中。例如火车轴温在线监控系统,就是利用车轴轴承的温度来监控轴承的运行状态的。常规参数检测的特点是价格便宜,形式多样,例如,目前在一些特殊场合使用的红外测温仪和红外热像仪等,都是采用非接触方式测温。

④ 无损诊断技术。包括超声波探伤法、X射线探伤法、渗透探伤法和磁粉探伤法等,这些方法多用于材料表面或内部的缺陷检测,应用很广。例如在役铁路轨道的超声波探伤技术,锅炉或输油(气)管道焊接过程中的X射线探伤法等。

⑤ 油液分析技术。油液分析技术可分为两大类:一类是油液本身的物理、化学性能分析;另一类是对油液污染程度的分析。具体的方法有光谱分析法与铁谱分析法。

## 1.4 机械设备故障诊断技术的发展趋势

机械故障诊断技术虽然只有半个多世纪的发展历史,但机械故障诊断技术在理论和实际应用中均取得了显著的成果。机械故障诊断技术的应用领域也从最早期的航天、军工等不断扩大到汽轮机、发电机、压缩机、发动机、机床以及电子工业中的设备。另外机械故障诊断的手段也越来越丰富。这些都显示出了机械故障诊断技术强大的生命力。

当前设备故障诊断技术的研究重点集中在以下几个方面。

### (1) 故障机理与征兆联系方面的研究

故障机理研究的目的是掌握各种故障的成因,研究故障征兆与故障原因间的关系。弄清故障的产生机理和表征形式。转子裂纹、磨碰、轴系扭振以及现代大型复杂机电系统耦合机理问题都是目前研究的重点。主要依赖机械振动力学等相关的基础学科,建立相应的动力学模型,进行计算机仿真计算,它是设备状态监测与故障诊断的基础。目前国内外学者在这个方面已经取得了显著的研究成果<sup>[20]</sup>。

### (2) 多种故障诊断方法融合的复合诊断技术

随着新的信号处理技术方法在设备故障诊断领域中的应用,传统的基于快速傅里叶变换的机械设备信号分析技术有了新的突破,国内外主要应用的诊断理论、技术和方法层出不穷,如神经网络、模糊理论、小波分析、数据融合技术、混沌理论、分形理论、灰色理论、粗糙集理论等。每一种故障诊断理论和方法都存在自己的优缺点,这些方法交叉融合,从而构成复合故障诊断方法,它充分利用各种特征信息,提高诊断速度和精确度,实现优势互补,在机械设备的故障诊断中显示出极大的潜力。

### (3) 故障诊断的远程化、网络化

随着网络技术的发展,实现多专家与多系统的共同诊断,一种有效的解决途径就是建立基于网络的远程故障诊断与监测系统。网络化的远程设备故障诊断系统中储存了多种设备的故障诊断知识和经验,可响应不同监测现场用户的使用要求,可以避免系统的重复开发和维护,显著降低了系统的费用。另一方面,由于构造于网络之上,系统知识库中的专家知识来源广泛,可以得到不断的充实,诊断规则可以是来自现场的企业单位的经验,也可来自于从事设备故障理论研究的科研单位,知识库比较丰富,相应的诊断能力也增强了。

### (4) 多元传感器信息的融合技术

现代化的大生产要求对设备进行全方位、多角度的监测与控制,以便对设备的运行状态有全面的了解。可以采用多个传感器同时对设备的各个位置进行监测,然后利用迅速发展起来的信息融合技术对多传感器的信息进行融合,以得到较好的诊断结果。

总之,随着科学技术的发展,单一参数阈值比较的机器监测与诊断方法正开始向全息化、智能化监测方法过渡,监测手段也从依靠人的感官和简单仪器向精密电子仪器以及以计算机为核心的监测系统发展。应用领域也在从应用较多的石化、电力等行业,向一般的机械制造业等行业逐步发展。

### 4.1

... 4.1.1 ...

... 4.1.2 ...

... 4.1.3 ...

... 4.1.4 ...

... 4.1.5 ...

## 第 2 章

# 机械故障诊断的振动力学基础

机械设备在运行过程中难免会出现故障，故障的原因很多而且复杂。机械设备故障诊断技术就是根据机械设备在运行过程中产生的各种现象，判断机械设备的运行状态，确保其正常运行。机械设备故障诊断与医学诊断有许多相似之处，机械设备出现故障（隐患）时，会反映出各种征兆，诸如振动、温度、压力等信号的变化。其中获取机械设备振动信号是一种行之有效的办法。本章首先介绍机械振动基础知识，然后介绍机械设备故障诊断中与振动信号的获取方法。

## 2.1 机械振动的概念及分类

### 2.1.1 机械振动的基本概念

机械振动是系统在某一位置（通常是静平衡位置）附近做往复运动。振动的强弱用系统的位移、速度或加速度表征。机械振动广泛存在于机械系统中，如钟摆的摆动、汽车的颠簸及活塞的运动等。机械振动的一个主要应用就是振动诊断。其以机械系统在某种激励下的振动响应作为诊断信息的来源，通过对所测得的振动参量（振动位移、速度、加速度）进行各种分析处理，并借助一定的识别策略，判断机械设备的运行状态，进而给出机械的故障部位、故障程度以及故障原因等方面的诊断结论。

### 2.1.2 机械振动的分类

#### （1）按产生振动的原因分类

根据机器产生振动的原因，可将机械振动分为三种类型。

① 自由振动。给系统一定的初始能量后所产生的振动。若系统无阻尼，则系统维持等幅振动；若系统有阻尼，则系统为自由衰减振动。

② 受迫振动。元件或系统的振动是由周期变化的外力作用所引起的，如不平衡、不对中所引起的振动。

③ 自励振动。在没有外力作用下，只是由于系统自身的原因所产生的激励引起的振动，如旋转机械的油膜振荡、喘振等。

机械故障领域所研究的振动，多属于受迫振动和自励振动。

对于减速箱、电动机、低速旋转设备等机械故障，主要以受迫振动为主，通过对受迫振动的频率成分、振幅变化等特征参数分析，来鉴别故障。

对于高速旋转设备以及能被工艺流体所激励的设备,除了需要监测强迫振动的特征参数外,还需监测自励振动的特征参数。

#### (2) 按激振频率与工作频率的关系分类

① 同步振动:机械振动频率与旋转转速同步(即激振频率等于工作频率),因此产生的振动称为同步振动。例如转子不平衡会激起转子的同步振动。

② 亚同步振动:振动频率小于机械的旋转频率称为亚同步振动,滑动轴承的油膜涡动是典型的亚同步振动。

#### (3) 按振动所处频段分类

按照振动频率的高低,通常把振动分为如下3个频段。

① 低频振动,  $f < 1\text{kHz}$ 。采用低通滤波器(截止频率  $f_b < 1\text{kHz}$ )滤除高频信号,进行谱分析等处理。这个频段通常包含设备的直接故障频率成分,故不需要太复杂的信号处理手段,缺点是各种部件的故障频率混叠在一起,微弱故障信号分离与识别困难。

② 中频振动,  $f = 1 \sim 20\text{kHz}$ 。采用高通或带通滤波器滤除低频信号,再进行相关谱分析等处理。这个频段通常包含设备的结构共振故障频率成分,可采用加速度传感器获得。通常需要采用包络解调或细化等特殊信号处理方法,提取结构共振频率调制的低频故障信息,克服其他部件的低频故障频率的干扰。

③ 高频振动,  $f > 20\text{kHz}$ 。这个频段仅用于滚动轴承诊断的冲击脉冲法,采用加速度的谐振频率来获取故障的冲击能量等。

应当指出,目前,频段划分的界限尚无严格的规定和统一的标准。不同的行业,或同一行业中对不同的诊断对象,其划分频段的标准都不尽一致。

#### (4) 按描述系统的微分方程分类

可分为线性振动和非线性振动。线性振动可用常系数线性微分方程来描述,其惯性力、阻尼力及弹性力只分别与加速度、速度及位移成正比;非线性振动不存在这种线性关系,需要用非线性微分方程来描述。

#### (5) 按振动系统的自由度分类

可分为单自由度和多自由度系统。自由度是指在任意时刻确定机械系统位置所需的独立坐标数目。

#### (6) 按振动规律分类

按振动的规律,一般将机械振动分为如图2.1所示的几种类型。

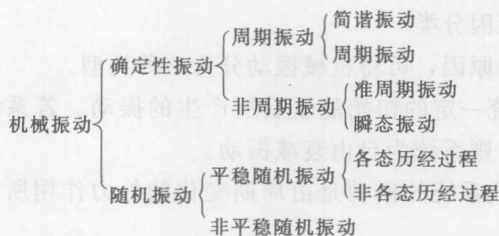


图 2.1 机械振动的分类

本文主要依据这种分类方式,对机械振动进行详细描述。

### 2.1.3 机械振动的描述

#### (1) 简谐振动