

# 旋转机械非平稳故障诊断

任国全 康海英 吴定海 郑海起 著

科学出版社



科学出版社

# 旋转机械非平稳故障诊断

任国全 康海英 吴定海 郑海起 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书主要阐述旋转机械非平稳故障诊断的原理、技术、方法及应用,内容包括机械故障诊断技术的应用和发展、齿轮箱动力学建模及变速变载动力学特性分析、机械故障诊断测试与试验因素对诊断结果的影响分析、旋转机械变速变载工况阶次分析诊断原理与非线性拟合阶次分析法、非平稳振动信号降噪方法、非平稳振动信号时频分析与处理方法、基于分形理论的非平稳振动信号分析方法、角域伪稳态振动信号分析与诊断方法、旋转机械故障诊断特征参量提取及模式识别方法等。

本书可供从事机械设备故障诊断领域研究的人员阅读和借鉴,也可作为高等学校从事机械故障诊断研究的高年级本科生和研究生的参考教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

旋转机械非平稳故障诊断/任国全等著. —北京:科学出版社, 2018.10

ISBN 978-7-03-058229-4

I. ①旋… II. ①任… III. ①旋转机构-故障诊断 IV. ①TH210.66

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 153597 号

责任编辑:余江任俊 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:吴兆东 / 封面设计:迷底书装

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>

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018 年 10 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018 年 10 月第一次印刷 印张:15 1/4

字数:304 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

在旋转机械故障诊断领域，广大学者已研究了振动检测法、油液分析、噪声分析、声发射等多种技术和方法，且许多技术和方法已在工程实际中得到广泛应用。其中，由于振动检测法具有信号测量方便、信号处理技术比较成熟、可在线检测等优点，该方法应用最为广泛，也是机械系统常见的、有效的诊断方法。然而，长期以来，受诊断原理和方法所限，人们在对旋转机械如齿轮箱进行故障诊断时要求测取稳态信号，这就需要对设备施加稳态载荷以保证其工作在稳态工况下；当难以满足稳态条件时，往往只能假设机械设备近似处于稳态，而忽略了非稳态因素带来的影响。上述稳态条件的要求给诊断试验和信号处理带来了许多困难。一是在工程实际中，稳态条件是很难满足的，这是因为速度、负载等因素的波动变化无法避免，旋转机械的实际工况特别是启动和停止过程是一种非平稳过程，在此情况下，系统振动响应信号在时域、频域中的变化都是非常复杂和剧烈的。因此，基于稳态条件的信号处理方法和诊断原理会受到一定的限制，导致故障诊断精度降低，影响诊断结果的准确性，有时甚至导致诊断结论误判。二是在基于稳态条件的故障诊断理论中，振动响应信号的变化是表征机械故障的重要指标。许多诊断工作的目的正是将这种变化进行数量化，而在非平稳状态时，即使故障没有发生，其信号的变化也是不可避免的，速度、负载等多种因素的变化都会引起响应信号的变化，而且这些因素的影响往往互相调制、耦合，提高了故障诊断难度。三是对于许多旋转机械，如履带车辆的齿轮箱或变速箱，无法在原位检测条件下施加稳态载荷，因此不能以稳态为前提实施故障诊断。四是机械系统非稳态响应信号中通常包含比稳态响应信号更为丰富的信息，可以使更多的系统特性呈现出来，一些稳态条件下不易显现的故障特征也可能会得到反映，因此非稳态条件下的故障诊断可以突破稳态假设并具有独特的价值。当然，开展非稳态条件下的机械故障诊断研究还面临许多新问题，如故障特征机理、响应信号的遍历性假设、测量与试验技术、非稳态信号特征提取方法、信号降噪及解调技术、信号平稳化技术、模式识别技术和方法等。

本书以齿轮箱非平稳故障诊断为研究对象，开展基于非平稳信号分析的齿轮箱故障诊断研究。通过该研究，希望探索一套旋转机械非平稳工况下的故障诊断理论、技术和方法，以进一步提高机械故障诊断的针对性、准确性及可靠性，从而为预防大型旋转设备发生严重事故和降低维修成本提供一种有效的思路与技术方法。

本书分工如下：任国全撰写第 2、6、7 章，康海英撰写第 4、8、9 章，吴定海撰写第 2 章的部分内容和第 5 章，郑海起撰写第 1、3 章。全书由任国全统稿。在本书编写过程中，作者广泛参阅和借鉴了国内外有关著作及研究文献中的精华部分，尽量反映该领域的新理论、新技术、新方法，尽力做到集思广益和取众之长。在此，作者向书中所列参考文献的所有作者表示诚挚的谢意！

作者要特别感谢国家自然科学基金项目(编号：50375157、50775219、51305454)对本书的研究和出版给予的资助，还要感谢科学出版社的编辑们为本书顺利出版提供的帮助。

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏和不足，衷心地希望能得到读者的批评指正。最后，希望本书能为机械故障诊断学科的发展尽些微薄之力。

作者

2018 年 4 月

# 目 录

第 1 章	机械故障诊断技术概述	1
1.1	发展历程	1
1.2	技术分类	4
1.3	一般步骤	6
1.3.1	诊断原理与方案	6
1.3.2	理论模型建立	7
1.3.3	试验设计与测试	7
1.3.4	信号分析处理	8
1.3.5	状态识别与故障诊断	8
1.4	发展方向	9
1.5	旋转机械非平稳故障诊断研究	12
1.5.1	非平稳故障诊断问题的提出	12
1.5.2	齿轮传动系统动力学建模与求解	12
1.5.3	非平稳振动信号分析方法	14
第 2 章	动力学建模及非平稳工况特性分析	16
2.1	齿轮传动系统动力学建模	16
2.1.1	基本假设	16
2.1.2	激励分析	17
2.1.3	弹性变形协调条件	19
2.1.4	弹性动力学模型	20
2.1.5	驱动电机模型	21
2.1.6	闭环模型	21
2.2	时变参数动力学模型的离散解析法	23
2.2.1	变系数线性微分方程解法	23
2.2.2	离散解析法原理	24
2.2.3	离散解析法求解过程	27
2.2.4	改进的离散解析法	27
2.2.5	算法对比与分析	28
2.3	非平稳故障箱体动力学分析	35
2.3.1	变速变载工况下齿轮故障动力特性分析	36

2.3.2	轴承故障引起的箱体振动分析	40
2.3.3	轴故障引起的箱体振动分析	42
2.3.4	齿轮箱箱体的振动响应信号分析	43
2.4	基于周期循环平稳理论的非平稳故障诊断原理	43
2.4.1	随机过程和振动信号的分类	43
2.4.2	齿轮箱加速过程振动信号循环平稳特性分析	44
2.4.3	振动信号周期循环平稳特性的数学描述	46
<b>第3章</b>	<b>诊断测试与试验因素影响分析</b>	<b>49</b>
3.1	测试对诊断工作的影响	49
3.1.1	测试对诊断方法的影响	49
3.1.2	测试对诊断效果的影响	50
3.1.3	测试对诊断效益的影响	50
3.2	机械故障诊断试验类型	51
3.2.1	基于试验台的故障诊断试验	51
3.2.2	实际工况条件下的故障诊断试验	59
3.3	试验因素的影响分析	63
3.3.1	转速变化对故障信号的影响分析	63
3.3.2	负载变化对故障信号的影响分析	68
3.3.3	惯性负载有效性分析	71
<b>第4章</b>	<b>阶次分析与非线性拟合阶次分析法</b>	<b>74</b>
4.1	变速变载测试试验台	74
4.2	计算阶次分析法	76
4.2.1	计算阶次分析法简介	76
4.2.2	频谱分析与阶次谱分析的对比	77
4.2.3	阶次谱应用的仿真分析	78
4.2.4	阶次域单位的讨论	79
4.3	非线性拟合阶次分析法	79
4.3.1	多项式拟合原理	80
4.3.2	拟合多项式阶数的确定	80
4.3.3	算法与步骤	81
4.3.4	阶次分析法应用实例和对比分析	83
4.4	角域采样定理	88
4.4.1	基本原理	88
4.4.2	角域采样率	90
4.4.3	信号仿真分析	90

第 5 章	非平稳振动信号降噪方法研究	93
5.1	常用信号降噪方法	93
5.2	基于奇异谱的降噪方法	94
5.2.1	奇异值分解和奇异谱理论	95
5.2.2	基于奇异谱的降噪算法	97
5.2.3	奇异谱降噪方法的仿真应用	98
5.3	基于小波包变换的降噪方法	100
5.3.1	小波包变换与 Mallat 算法	100
5.3.2	提升小波与小波包变换算法	101
5.3.3	基于渐变式阈值的小波包降噪	104
5.4	基于改进卡尔曼滤波的降噪方法	108
5.4.1	卡尔曼滤波技术	108
5.4.2	卡尔曼滤波技术的改进	111
5.4.3	状态空间模型的建立	112
5.4.4	改进卡尔曼滤波信号降噪应用	114
第 6 章	基于时频分析的非平稳振动信号分析	117
6.1	非平稳信号时频分析的方法	117
6.1.1	时频分析方法简介	117
6.1.2	短时傅里叶变换	118
6.1.3	连续小波变换	120
6.1.4	Cohen 类时频分布与修正	121
6.1.5	典型信号的时频分布	122
6.2	时频分布图像信息特征的提取	124
6.2.1	Hough 变换	124
6.2.2	矩分布	125
6.2.3	边缘分布	125
6.2.4	Renyi 信息	126
6.3	齿轮箱变速过程振动信号的时频分析	126
6.4	HHT 理论与方法	128
6.4.1	瞬时频率	128
6.4.2	IMF	129
6.4.3	EMD	129
6.4.4	HHT 方法	133
6.4.5	边际谱	134
6.5	齿轮箱非平稳振动信号 HHT 分析	134
6.5.1	仿真故障数据分析	134



6.5.2	故障诊断实例分析	136
<b>第 7 章</b>	<b>基于分形理论的非平稳振动信号分析</b>	<b>143</b>
7.1	混沌动力学系统的分析方法	143
7.2	基于分形理论的振动信号描述	144
7.2.1	分形理论简介	144
7.2.2	分形维数	145
7.2.3	基于关联维数的振动信号描述	147
7.3	分形无标度区的求取方法	151
7.3.1	无标度区的概念	151
7.3.2	分形无标度区的界定方法	152
7.4	基于遗传算法的非平稳振动信号无标度区求取	155
7.4.1	进化算法与最优化方法	155
7.4.2	遗传算法及其发展与应用	156
7.4.3	遗传算法的基本实现	156
7.4.4	基于遗传算法的分形无标度区求取	158
7.4.5	齿轮箱加速过程振动信号的分形研究	161
<b>第 8 章</b>	<b>基于角域伪稳态振动信号分析与诊断方法</b>	<b>165</b>
8.1	角域伪稳态信号的改进卡尔曼包络谱分析	165
8.1.1	包络谱分析	165
8.1.2	改进卡尔曼包络谱的基本原理	167
8.1.3	滚动轴承故障诊断	167
8.1.4	齿轮故障诊断	171
8.2	角域伪稳态信号的改进卡尔曼倒谱分析	172
8.2.1	改进卡尔曼倒谱的基本原理	172
8.2.2	齿根裂纹故障诊断	173
8.2.3	齿轮磨损故障诊断	175
8.2.4	轴承内圈裂纹故障诊断	177
8.3	角域伪稳态信号的改进卡尔曼双谱分析	178
8.3.1	双谱分析	179
8.3.2	角域双谱	179
8.3.3	角域双谱切片分析	180
8.3.4	轴承内圈裂纹故障诊断	180
8.3.5	齿轮齿根裂纹故障诊断	181
8.4	角域伪稳态信号的修正 HHT 分析	182
8.4.1	修正 HHT 分析方法	182
8.4.2	工程信号验证	183

8.5	角域伪稳态信号的修正 HHT 包络谱分析 .....	187
8.5.1	轴承内圈裂纹故障诊断 .....	187
8.5.2	轴承外圈裂纹故障诊断 .....	189
8.6	角域伪稳态信号的修正 HHT 倒谱分析 .....	191
8.6.1	轴承内圈裂纹故障诊断 .....	191
8.6.2	轴承外圈裂纹故障诊断 .....	193
8.6.3	齿轮磨损故障诊断 .....	195
8.7	角域伪稳态信号的修正边际谱分析 .....	198
8.7.1	角域边际谱 .....	198
8.7.2	角域边际谱计算方法的改进 .....	199
8.7.3	轴承内圈裂纹故障诊断 .....	200
8.7.4	轴承外圈裂纹故障诊断 .....	203
<b>第 9 章</b>	<b>特征参量提取与模式识别 .....</b>	<b>207</b>
9.1	齿轮箱故障诊断特征参量提取 .....	207
9.1.1	幅域特征参量提取 .....	207
9.1.2	阶次域特征参量提取 .....	209
9.1.3	能量域特征参量提取 .....	210
9.2	SVM 方法 .....	212
9.2.1	一般机器学习方法存在的问题 .....	213
9.2.2	统计学习理论 .....	213
9.2.3	最优分类面 .....	214
9.2.4	SVM 模型 .....	216
9.2.5	算例分析 .....	217
9.2.6	SVM 多分类算法 .....	219
9.2.7	基于 SVM 的多故障分类器的改进 .....	220
9.3	基于改进 SVM 与 BP 神经网络的故障模式识别 .....	220
9.3.1	基于改进 SVM 的齿轮箱故障模式识别 .....	220
9.3.2	基于 BP 神经网络的齿轮箱故障模式识别 .....	222
9.3.3	两种识别方法的性能比较 .....	223
	参考文献 .....	225

# 第 1 章 机械故障诊断技术概述

关于机械故障诊断的基本概念与术语,如诊断目的、意义、任务等在已出版的有关著作和手册中有详细叙述(虞和济,1989;丁玉兰,1994;钟秉林和黄仁,2007;屈梁生,2009)。在此不再重复。

## 1.1 发展历程

实际上机械的故障诊断自工业生产以来就存在。早期,人们依据对机械的触摸,对声音、振动等状态特征的感受以及工匠的经验,可以判断某些故障的存在,并提出修复的措施。例如,有经验的工人常利用听棒来判断旋转机械轴承及转子的状态。但故障诊断技术作为一门学科,则是从 20 世纪 60 年代发展起来的。最早开展故障诊断技术研究的是美国。美国 1961 年开始执行阿波罗计划后出现一系列设备故障,促使美国机械故障预防小组(Mechanical Fault Prevention Group, MFPG)积极从事故障诊断技术的研究和开发。1971 年, MFPG 划归美国国家标准局领导,成为一个官方领导的组织,下设故障机理研究,检测、诊断和预测技术,可靠性设计,材料耐久性评价四个小组。美国机械工程师学会(American Society of Mechanical Engineers, ASME)领导下的锅炉压力容器监测中心对锅炉压力容器和管道等设备的诊断技术作了大量的研究,制定了一系列有关静态设备设计制造、试验和故障诊断及预防的标准规程。其他如 Johns Mitchell 公司的超低温水泵和空压机监测技术, Spire 公司的用于机械的轴与轴承诊断技术, Vickers Tedeco 公司的润滑油分析诊断技术等都在国际上大放异彩。在航空运输方面,美国在可靠性维修管理的基础上,大规模对飞机进行状态监测,发展了应用计算机的飞行器数据综合系统(aircraft integrated data system, AIDS),该系统利用飞行中大量的信息来分析飞机各部位的故障原因并能发出消除故障的指令。这些技术已普遍用于波音 747 和 DC9 这一类大型客机,对提高飞行的安全性发挥了重要作用。在旋转机械故障诊断方面,首推美国西屋公司,该公司从 1976 年开始研制,到 1990 年已发展成网络化的汽轮发电机组智能化故障诊断专家系统,其三套人工智能诊断软件(汽轮机 TurbinAID、发电机 GenAID、水化学 ChemAID)共有诊断规则近万条,且已对西屋公司所产机组的安全运行发挥了巨大的作用,取得了很高的经济效益。此外,还有以 Bentley Nevada 公司的 DDM (digital diagnosis and monitoring)系统和 ADRE(automated diagnostics for rotating equipment)系统为代表的多种机组在

线监测诊断系统。

20世纪60年代末70年代初,以Collacott为首的英国机械健康监测中心(UK Mechanical Health Monitoring Center)开始从事诊断技术的开发研究。1982年,曼彻斯特大学成立了几家公司,负责政府的顾问、协调和教育工作,开展了咨询、制定规划、合同研究、业务诊断、研制诊断仪器、研制监测装置、信号处理技术开发、教育培训、故障分析、应力分析等业务活动。在核发电方面,英国原子能机构(UK Atomic Energy Authority, UKAEA)下设系统可靠性服务站从事诊断技术的研究,包括分析噪声对炉体进行监测,以及对锅炉、压力容器、管道的无损检测等,在当时起到了英国故障数据中心的作用。在钢铁和电力工业方面,英国也有相应机构提供诊断技术服务。

美国的诊断技术在航空、核工业以及军事部门中占有领先地位,而日本的诊断技术在某些民用工业,如钢铁、化工、铁路等部门发展得很快并占有某种优势。它们密切注视世界性动向,积极引进、消化最新技术,努力发展自己的诊断技术,研制自己的诊断仪器。例如,在英国提出设备综合工程学后,日本设备工程协会紧接着开始发展自己的全员生产维修,并每年向欧美派遣“设备综合工程学调查团”,及时了解诊断技术的开发研究工作。日本机械维修学会、计测自动控制学会、电气学会、机械学会也相继设立了自己的专门研究机构。日本国立研究机构中,机械技术研究所与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、早稻田大学等高等学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、东京芝浦电气等以企业为中心开展应用水平较高的实用项目。例如,三菱重工的白木万博在旋转机械故障诊断方面开展了系统的工作,其研制的“机械健康系统”在汽轮发电机组监测和诊断方面起到了有效的作用。

设备诊断技术在欧洲其他一些国家也有很大进展,它们在广度上虽不大,但都在某一方面具有特色或占领先地位,如瑞典的SPM(system performance monitor)轴承监测技术、挪威的船舶诊断技术、丹麦的振动和声发射技术等。

1979年以前,我国一些大专院校和科研单位结合教学与有关设备诊断技术的研究课题,尝试进行机械设备状态监测与故障诊断技术的理论研究工作和小范围工程实际应用研究,特别是某些工厂机组的事故频繁发生,促进了对该技术发展的重视。但从维修体制改革或从设备综合管理的观点探求寿命周期费用经济性来研究这一问题,带有一定的局限性和临时性。从1979年开始,有不少工厂在熟悉苏联维修体制的基础上,开始研究美国、日本、德国、瑞典等国的各种维修体制,从中了解到状态监测与诊断维修能改善设备管理的优点,进而开始研究这方面的问题。

1979~1983年,全国有较多的企业对机械故障诊断从初步认识进入初步实践的阶段。1983年初,国家经济贸易委员会和有关部门经过对前一段工作的分析,

把开展机械诊断工作的要求纳入《国营工业交通企业设备管理试行条例》之中，明确指出，“要根据生产需要，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”，从而把机械诊断技术工作列入了企业管理法规，并指出了诊断技术要为维修体制改革服务这一方向。

1983年，中国机械工程学会的设备维修分会在南京召开了首届设备诊断技术专题座谈会，交流了国内外的情况，分析了国内设备现状及开展设备诊断技术的必要性；也看到了我国与国外存在的差距。1985年，有关部门在郑州聚集了国内有关机械设备状态监测与故障诊断技术方面的众多专家、教授，正式成立了以机械设备故障诊断命名的研究会，并于次年加入中国振动工程学会，更名为机械故障诊断学会，同年在沈阳召开第一届全国机械设备故障诊断学术年会。

1985年以后，国内在诊断技术研究方面发展十分迅速，专题性会议和技术交流活动十分活跃，国际交往也日渐频繁。在国内举办的故障诊断学术会议上，大批从事设备故障诊断研究的学者和专家进行学术与经验交流，发表了大量的论文，有力地促进了我国设备故障诊断研究的深入发展。此外，还广泛举办了有关设备诊断技术的专题讲座、经验交流会以及各种形式的学习班、培训班。

国内仪器行业和有关企业为适应诊断仪器的需要，积极进行了研制生产和规划工作。监测手段曾经是影响工作开展的关键问题，一批接近先进水平的测试分析仪器与监测诊断系统已开始批量供应。随着设备诊断工作的开展，全国有关部门陆续组建了一些设备诊断技术协会、研究会以及咨询中心等。在一些大企业里还建有课题小组、监测站、诊断中心等，配合行政部门开展机械设备诊断技术工作，对机械设备诊断技术的发展起到了积极作用。

全国各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，其中突出的有电力系统、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。针对大型旋转机械故障诊断，我国已经开发了大量的机组故障诊断系统和可用来做现场简易故障诊断的便携式现场数据采集设备。

为适应企业和有关部门对设备诊断技术的学习与培训的需要，一些出版社积极从事设备诊断技术书籍的出版工作，如西安交通大学出版社出版了《机械故障丛书》(16分册)、冶金工业出版社出版了《机械故障诊断丛书》(10分册)、科学技术文献出版社出版了《设备状态监测与故障诊断技术》等。国内一些著名期刊，如《振动工程学报》《振动、测试与诊断》等都将故障诊断作为重要内容。另外，一些有关设备管理的期刊，如《中国设备管理》《设备管理与维修》《国外设备工程译文集》《修理科技动态》也都设立了诊断技术专栏。在这些研究工作的基础上，我国一些专家学者先后出版了系列既具有理论性又结合实际工程应用的专著。例如，屈梁生和何正嘉编写的《机械故障诊断学》、邝朴生等编写的《设备诊断工程》、黄文虎等编写的《设备故障诊断原理、技术及应用》、徐敏等编写的《设备故障诊

断手册》。

近年来，我国从事机械故障诊断技术研究的队伍越来越大，研究的范围也逐渐扩大，研究工作越来越系统、深入，技术进步的速度越来越快，取得的成果也越来越多。

## 1.2 技术分类

机械故障诊断技术的分类方法很多，主要有以下几种。

### 1. 按诊断对象的性质分类

(1) 旋转机械故障诊断。其诊断对象为齿轮箱、转子、轴系、叶轮、泵、鼓风机、离心机、蒸汽透平、燃气透平、电机及汽轮发电机组、电机-齿轮增速-轴流压气机组、水轮发电机组等。

(2) 往复机械故障诊断。其诊断对象为内燃机、压气机、活塞曲柄和连杆机构、柱塞-转盘机等。

(3) 工程结构故障诊断。其诊断对象为金属结构、框架、桥梁、容器、建筑物、地桩等。

(4) 机械零件故障诊断。其诊断对象为转轴、轴承、齿轮、连接件等。

(5) 液压设备故障诊断。其诊断对象为液压泵、液压马达、液压缸、液压阀、液压管路、液压系统等。

(6) 电气设备故障诊断。其诊断对象为发电机、电动机、变压器、开关电器及电路系统等。

(7) 生产过程综合故障诊断。其诊断对象为机械加工过程、轧钢生产过程、纺织生产过程、造纸生产过程、铁路运输过程、船舶运输过程、核电站生产过程、发电厂生产过程、石化生产过程等。

### 2. 按信号检测方法分类

(1) 参数检测法。以机械系统或子系统的某些功能或性能特征参量为检测参量，如发动机的转速、缸压、窜气量、喷油压力等，通过对这些特征参量的分析，判断被检机械系统的运行状态，诊断其故障性质和发生部位。

(2) 振动检测法。以机械系统工作时所产生的振动信号为检测参量，从而进行故障诊断。

(3) 油液分析法。通过从运行设备中所取得的有代表性的润滑油样的检测分析，获得设备在用润滑油性能指标变化、油中磨损物、污染物和变质产物的宏观或微观物态特征信息，并由此评判设备润滑与磨损状态或诊断相关故障的技术过程，包括油品分析和油液中颗粒分析。

(4) 声学检测法。以机械系统工作时所产生的声信号为检测参量, 进行声压、声级、声强、声源、声场、声谱分析, 从而进行故障诊断。为了能验证或获取更多的特征信息, 将振动检测法和声学检测法同时应用, 能得到更好的效果。

(5) 温度检测法。以机械体或其润滑油、冷却液、工作介质的温度为检测参量, 进行温度量、温度场、红外热像识别与分析, 达到故障诊断的目的。

(6) 污染物检测法。以泄漏物、残留物、气体、固体的样本为检测对象, 进行液气成分变化、气蚀油蚀、油质及其中所含磨损物质的分析, 从而达到故障诊断目的, 如油液光谱分析、铁谱分析等。

(7) 强度检测法。以力、扭矩、应力、应变信号为检测参量, 进行冷热强度变形、结构损伤容限分析, 达到故障诊断或寿命估计的目的。

(8) 压力流量检测法。以压力或流量为检测参量, 进行气流压力场、油膜压力场、流体传动、流量变化分析, 实现故障诊断。

(9) 电参数检测法。以机械系统工作时所耗用或产生的电压、电流、电功率或电磁信号为检测参量, 进行机械系统故障诊断。

(10) 光学检测法。以光学信号为检测参量, 进行机械系统故障诊断。

(11) 表面形貌检测法。检测机械体或其零部件表面的裂纹、变形、斑点、凹坑、色泽等特征, 进行结构强度、应力集中、裂纹破损、气蚀化蚀、摩擦磨损等分析, 实现机械故障诊断。

### 3. 按诊断目的、要求和条件分类

(1) 定期诊断和连续诊断。定期诊断是每隔一定时间对机械设备的运行状态进行检测和诊断。连续诊断是对机械设备运行状态进行连续监测、分析和诊断。

(2) 直接诊断和间接诊断。直接诊断是根据关键零部件的状态信息直接确定其工作状态。直接诊断有时受到机械设备结构和工作条件限制而无法实现, 这时就不得不采用间接诊断。间接诊断是通过二次诊断信息来间接判断机械设备中关键部件的状态变化。多数二次诊断信息属于综合信息, 因此容易发生误诊断, 或出现伪警和漏检的可能。

(3) 常规诊断和特殊诊断。在常规情况下, 也就是在机械设备正常运行条件下进行的诊断称为常规诊断。大多数诊断均属于此类。但在个别情况下或特殊条件下, 需要创造特殊的工况条件来采集检测信号。例如, 在动力机组的启动和停车过程中要跨越转子扭转、弯曲的几个临界转速, 利用启动和停车过程的振动信号, 做出转速特征谱图, 常常可以得到常规诊断中所得不到的诊断信息。

特殊诊断中也包括失事诊断。失事诊断是指针对关键机械设备, 判断其失事原因, 弄清是外因还是内因, 是人为损坏、技术性损坏还是受外界强制性突然袭击毁坏。

(4) 在线诊断和离线诊断。在线诊断是指对现场正在运行中的机械设备进行实

时诊断。这类诊断对象一般都属于关键的机械设备。而离线诊断是通过信号记录仪将现场测取的检测信号采集下来，结合机组状态的历史档案资料做离线分析诊断。

(5) 简易诊断和精密诊断。简易诊断一般是使用便携式检测诊断仪表，由现场作业人员实施，对机械设备的状态迅速有效地做出概括性的评价。精密诊断是对简易诊断难以确诊的机械设备进行专门、细致和更准确的诊断。

还有一些其他的诊断方法，如按照诊断不同阶段所采用的技术分类等，在此不作介绍。

## 1.3 一般步骤

理想、完整的机械故障诊断过程分为两个大的阶段：诊断技术研究阶段和诊断实施阶段。在诊断技术研究阶段，其主要任务是研究、探索、形成针对该机械系统有效的诊断技术方法，并建立相应的标准状态和故障模式。在诊断实施阶段，根据诊断技术研究阶段所形成的诊断技术方法，实施对被诊断系统的诊断，并对照所建立的标准状态和故障模式进行状态识别与故障诊断。但在工程实际中受各种条件限制，诊断技术研究阶段有时开展得不够充分，有的甚至合并到诊断实施阶段予以考虑。

基于测试分析的现代机械故障诊断，一般是在某种设定的条件下，对机械设备的某些物理量进行测量和分析，根据这些物理量的变化情况，确定机械设备的状况，判断其是否发生故障；对故障状态进行更深入的分析，按照一定的推理准则和计算方法，判断故障性质、发生部位及原因，有时还预估被测机械设备的剩余使用寿命。

### 1.3.1 诊断原理与方案

诊断原理与方案是对整个故障诊断工作的总体设计和规划。例如，为了完成某项诊断任务，应采用什么样的技术途径和方法；当有几种方法可选时，根据已有的经验和条件，采用哪种方法可能得到较好的诊断精度或诊断效益；如何进行试验建立标准状态和暴露被测参量；采用何种测量手段不失真地测取信号；采用哪些信号分析处理技术，提取哪些特征参量；采用何种诊断识别算法进行状态或故障识别分类等。显然，它是整个诊断工作的大纲和灵魂，贯穿于诊断工作的始终，且根据诊断工作的进展和所遇到的问题而不断加以修改与完善。

例如，当进行齿轮箱故障诊断时，首先要根据诊断任务要求、已有的经验和所具备的检测诊断条件确定采用的方法，如选用振动检测法、声学检测法、油液分析法或几种方法综合运用。若确定采用振动检测法，就要进一步根据齿轮箱的



结构特征和工作特征,考虑其主要故障模式、对振动信号的影响、怎样进行试验、如何测取振动信号、用什么仪器设备进行信号记录和分析处理、用什么识别技术进行诊断运算、可能达到什么样的诊断效果,以及可能会遇到什么难题等。若估计该方法尚难满足诊断要求,考虑是否选用其他方法弥补。若故障模式设置困难,考虑能否通过其他模式试验得到弥补等。

### 1.3.2 理论模型建立

现代机械故障诊断是在理论指导下的诊断。进行理论建模,就是要根据诊断对象的工作原理,分析、建立被诊断机械状态(或故障)与检测信号(或其特征参量集)之间的解析或经验关系式。它是被诊断系统工作特性的客观描述。在诊断过程中,它是根据提取的特征参量进行故障识别的理论基础。正确的理论建模,不仅有利于指导诊断工作的进行,而且可以促进诊断理论的深化和发展,对机械故障诊断学术研究具有重要意义。

例如,当采用振动检测法进行齿轮箱故障诊断时,就要研究被诊断齿轮箱的结构特点和工作特性,尤其是齿轮箱的动力学特性,建立齿轮箱工作状态与振动响应信号的关系,明确齿轮、轴承或轴系发生故障对不同测点振动响应信号的影响,显然,这样的理论分析对诊断测点选择、特征参量提取以及故障模式识别都是十分重要的。

### 1.3.3 试验设计与测试

测试包括试验和测量两个方面。试验是根据诊断要求,使被诊断机械系统处于某种设定的工作状态,从而反映其内部客观规律性,产生所需的测量信号的工作。当研究某些状态(如正常或某种故障)的标准模式时,还要求在试验中设定相应的状态或故障,或者创造条件使其在运行中产生某种状态或故障,从而使测得的信号中包含相应的状态或故障信息。例如,要进行齿轮箱故障诊断,就要让齿轮箱在一定载荷条件下按照规定的挡位、转速工作,这可以结合齿轮箱的实际工况进行,但当进行某种故障模式研究时(如齿轮故障),就要在试验前设置相应的故障,或创造条件使齿轮箱在工作中产生相应的齿轮故障。因此,试验工作实际上是故障诊断的前提性工作,试验工作做不好,便无法充分反映诊断对象的客观规律性,诊断工作也就无法达到预期目的。在实际工程中,有一些重要的故障诊断研究无法开展或效果不佳就是由试验困难所造成的。

测量就是根据诊断方案要求,对诊断对象在试验中所产生的各种有用信号进行不失真地测取工作。其内容一般包括:测量方案的制定与测量系统的组成、被测参量(主参量和辅助参量)的确定、测点优化选择、传感器安装与仪器调试、测量系统标定、信号显示与记录,有时也包括一些简单的信号处理等。例如,进行齿轮箱故障诊断,首先就要确定采用振动检测法还是声学检测法或是油液分析法