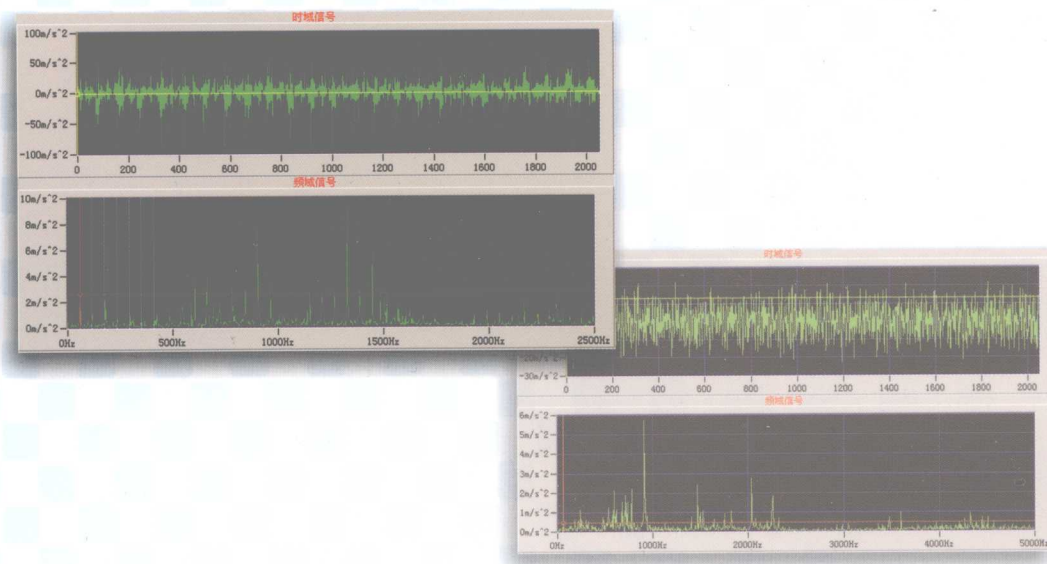


普通高等教育机电类规划教材

# 机械故障 诊断技术

张键 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育机电类规划教材

# 机械故障诊断技术

张 键 编著

高立新 主审



机械工业出版社

本书分为两大部分,第1部分介绍机械设备故障诊断技术的基础理论和基础知识,内容包括:第1章绪论、第2章机械振动及信号、第3章振动信号测取技术、第4章信号特征提取——信号分析技术、第5章设备状态的判定与趋势分析。第2部分介绍机械故障诊断技术在工程实践中的应用,内容包括:第6章旋转机械故障诊断、第7章滚动轴承故障诊断、第8章齿轮箱故障诊断、第9章电动机故障诊断、第10章设备状态调整。

本书为高等院校机械类专业本科生、专科生教材,也可供从事机械设备故障诊断工作的工程技术人员参考。

著者 张键  
审主 滕立高

## 图书在版编目 (CIP) 数据

机械故障诊断技术/张键编著. —北京:机械工业出版社,2008.9

普通高等教育机电类规划教材

ISBN 978-7-111-25091-3

I. 机… II. 张… III. 机械设备—故障诊断—高等学校—教材  
IV. TH17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 140753 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:蔡开颖 版式设计:霍永明 责任校对:张媛

封面设计:张静 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(兴文装订厂装订)

2008年10月第1版第1次印刷

184mm×260mm·14印张·343千字

标准书号:ISBN 978-7-111-25091-3

定价:25.00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) 88379713

封面无防伪标均为盗版

# 序

自从英国机械健康监测中心主席、莱斯特大学哲学博士、主任工程师 R. A. Cotlacot, 于 1977 年在伦敦出版了著名的《机械的故障诊断及在线监测》一书之后, 迄今已过去整整 30 年了。30 年来国内外在机械设备的状态监测与故障诊断这一先进技术上, 已取得了完全一致的共识, 从而在实践上得到了很大的进步和提高。设备诊断技术 (包括设备状态监测和故障诊断的总称) 不仅是一个能保障设备安全、提高产品质量、节约维修费用、降低能源消耗、防止环境污染、能给企业带来较大经济效益的既先进、又适用, 而且在设备维修管理上, 也完全是可以靠得住的好的工程技术。

当前我国的设备诊断工作, 在经历了 20 多年的实践与探索之后, 一方面正在总结自己的成功经验, 肯定科学客观规律, 进行新的探索; 另一方面也在努力学习和引进一些国外新的理论和成果, 在进行了严格的考核论证后, 择优选用, 使之与我国的设备工程结合起来。而其中重要的一个方面, 就是不少企业已大都从单一的计划维修模式转化到以状态为基础的预防维修等多种维修体制上来。一些过去曾受国外规章制度所严格约束的国内企业, 也都逐步明确了利弊, 建立了状态维修这一新的体制并取得了好的结果, 这都说明了国内企业的设备诊断工作确实在向前推进。在每年的学术会议、经验交流和各个期刊著作中, 少不了并还多占优势的仍然是诊断技术专栏。还有就是国内的诊断仪器生产, 尽管在功能和精度上, 与国外产品尚有差距, 但其经济性和适用性已完全改变了过去必须依靠进口的局面。

在回顾过去 20 多年来所取得的成就同时, 也还必须清醒地看到我国与一些先进国家在设备诊断方面所存在的差距, 尽管我国早已采取了院校、科研与生产三单位相结合的方针, 但在结合的紧密程度上, 以及对一个工作项目负责到底的服务精神上, 都还有所不足。其中一个很重要的问题就是专业人员的技术素质问题。一个好的现场诊断工作者, 既需要一定的基础理论知识, 也需要掌握熟悉的技术方法, 还有不可缺少的是丰富的现场工作经验, 只有全面具备了以上三个方面的素质, 才可以说是有了高素质的现场诊断人员。因此, 世界各国都很重视设备诊断师的培养工作。国际标准化组织制定的《机器的状态监测和诊断 人员的培训和认证要求 第 2 部分: 振动状态监测和诊断》标准, 即 ISO 18436-2—2003, 现已在日本实施, 对保障和提高诊断从业人员的素质取到了良好的作用。该标准所规定的必备内容, 也已在国内的刊物上先后发表了。

当前服务于我国工业企业现场的设备诊断人员, 已经绝大部分都是初始从事诊断的第三代新人了。他们一般具有良好的科学知识和善于学习探索的科学精神, 但是他们在设备诊断的基础理论和技术方面上还有不足, 特别是在处理复杂问题的分析诊断上更缺少经验。因此, 对于各个工业部门, 于今后相当长的时间内, 在加强这个方面的技术培训就显得十分重要。近年来, 国内有关设备诊断这方面的培训班、交流会尽管多如雨后春笋, 也不乏邀请一些专家前来讲授, 但都限于时间短促, 什么都要讲, 一般讲不清楚。再者也缺少一本能切合实际需要的规范教材, 不少是临时发挥、就事论事。国内近年来出版的个别教材, 不是重点介绍理论知识却联系实际不够, 就是联系实际好的又缺少理论支持。

基于这一情况，张键老师以冶金行业和武汉钢铁（集团）公司（简称武钢）的经验为基础，精心编著了这本《机械故障诊断技术》教材，试图为初步进入这一领域的大学生及工作人员，进行技术上培训，这真是一个好的壮举，冶金行业是我国开始设备诊断技术较早的三大行业之一，武钢又是其中开展设备诊断进行万点受控取得卓有成效的大型企业，且在1991年，由吴瑞钦高工所发表的诊断论文，就曾得到了各界好评，随着武钢与北京工业大学的合作，近年来更开发了更多更好的成果，他们的经验，不仅对本企业的工作有指导意义，而且对于众多的其他企业也都有一定的参考价值。

本书可以说是贴近 ISO 18436-2—2003 的要求，也符合国际标准化组织关于设备状态监视和诊断培训标准的指导精神的。全部内容是本着求真务实原则，以现场实用为基础。相当于 ISO18436-2—2003 中四级人员分类的 1 级、2 级水平。全文没有复杂的公式推导，条理清楚，通俗易懂。从章节设计上，贯彻了从数据采集、信号处理、状态识别、趋势预测直至调理整治等五个设备诊断不可缺少的工作过程，而对于每一种故障的诊断，不仅能重点分析其故障机理以及征兆特点，并还大都附上了现场的案例说明，使读者能通过案例深理解。而且可贵的是其中还介绍了一些安装、检查和测量的实践经验，可供读者学习参考。

本书是以振动诊断为专题的，这也是由于在各类设备诊断工作中，振动方法应用广泛，处于重要地位。当然此后，也还可以组织编写其他一些如油液、红外、无损、电气等诊断方法的教材，以便设备诊断技术的大家庭更为丰富。总之，本书是为贯彻 ISO18436-2—2003 的一项重要的尝试，需要大家的理解和支持。正由于本书是真正的国产化了的教材，从而可对我国的设备诊断技术工作能逐步规范化进入世界共同的经济领域，并取得进一步的成功和发展作出贡献。

中国设备管理协会诊断工程分会  
中国机械工程学会设备维修分会  
黄昭毅

# 前 言

对信号分析结果的解释永远比信号分析的算法更重要，因为解释是作出正确决策的依据。在这个意义上说，能否作出简明、清晰、正确的解释是一切信号分析方法的试金石。

在过去的数十年里，故障诊断领域曾出现过多种信号分析算法，但是除了以 FFT 快速傅里叶变换算法为基础的信号分析算法外，其他一些信号分析算法都未能得到工程实践的广泛应用，究其原因，就在于这些信号分析算法对分析出来的数据、图形，难以作出简明、清晰、正确的解释。实践是检验真理的唯一标准。

一切科学技术都源于前人的实践，所有知识都是前人经验的总结。书本只是传承这些科技知识的载体。本书分为两大部分，第 1 部分为基础理论和基础知识部分，内容包括：第 1 章绪论、第 2 章机械振动及信号、第 3 章振动信号测取技术、第 4 章信号特征提取——信号分析技术、第 5 章设备状态的判定与趋势分析。这样编排的目的是汇集前人的经验，为故障诊断技术建立一个完整的科学体系。第 2 部分是工程实践部分，内容包括：第 6 章旋转机械故障诊断、第 7 章滚动轴承故障诊断、第 8 章齿轮箱故障诊断、第 9 章电动机故障诊断、第 10 章设备状态调整。在工程实践部分，有针对具体机械类型的诊断技术介绍，也汇集了大量的工程案例。这些工程案例中一部分来自本领域的前辈和同行的文章著作，在此，我向这些令人尊敬的前辈和同行表示深切的敬意；另一部分来自我多年来对武汉钢铁（集团）公司、安阳钢铁集团公司、宣化钢铁集团有限责任公司、石家庄钢铁有限责任公司、邯郸钢铁集团有限责任公司等企业的故障诊断报告，感谢武汉昊海立德科技有限公司的同仁们对这些报告的整理和保管。感谢武汉钢铁（集团）公司的魏厚培高工和宝钢集团有限公司的杨大雷高工提供了电动机方面的部分诊断案例。

本书于 2006 年 2 月开始动稿，在编写过程中得到了中国设备管理协会诊断工程分会、中国机械工程学会设备维修分会高级顾问黄昭毅先生的关心与支持，他亲自为本书写了序。本书由高立新教授担任主审。本书的整理和习题编写工作得到了余秋兰老师的大力帮助，武汉昊海立德科技有限公司的夏淑萍女士和其他工作人员在武汉、北京两地之间做了大量事务性工作。在此，向他们表示衷心的感谢。

作 者

# 目 录

序	
前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 设备的寿命及劣化曲线	1
1.2 故障诊断的内容	2
1.3 故障诊断的基本方法	2
思考题	4
第 2 章 机械振动及信号	5
2.1 机械振动基础	5
2.2 振动信号的描述	10
2.3 设备状态信号的物理表现	12
思考题	13
第 3 章 振动信号测取技术	14
3.1 加速度传感器	14
3.2 速度传感器	18
3.3 电涡流传感器	20
3.4 结构的激振方法	24
3.5 传感器的校准与选用	27
3.6 信号预处理	28
3.7 传输中的抗干扰技术	38
3.7.1 噪声干扰的形成	38
3.7.2 噪声源	39
3.7.3 噪声的耦合方式	40
3.7.4 噪声的干扰模式	41
3.7.5 硬件抗干扰技术	42
3.8 模拟量转换为数字量	45
3.8.1 数/模 (D/A) 转换器	45
3.8.2 模/数 (A/D) 转换器	47
3.8.3 模/数转换器的性能指标	49
3.9 监测与诊断系统的组成与工作程序	51
3.9.1 监测与诊断系统的任务	51
3.9.2 监测与诊断系统的组成	52
3.9.3 实施故障监测与诊断系统的工作程序	54
思考题	59
第 4 章 信号特征提取——信号分析技术	60
4.1 信号特征的时域提取方法	60
4.1.1 平均值	60
4.1.2 均方值、有效值	60
4.1.3 峰值、峰值指标	61
4.1.4 脉冲指标	61
4.1.5 裕度指标	61
4.1.6 歪度指标	61
4.1.7 峭度指标	61
4.2 信号特征的频域提取方法	62
4.2.1 频域分析与时域信号的关系	62
4.2.2 周期信号与非周期信号的频谱	63
4.2.3 截断、泄露与窗函数	65
4.2.4 频混和采样定理	66
4.2.5 量化误差和栅栏效应	68
4.3 信号特征的图像表示	69
4.3.1 统计指标的图像表示	69
4.3.2 频谱的图像表示	69
4.3.3 时间历程的频谱图像表示——三维维瀑布图	71
4.3.4 轴心轨迹的图像表示	72
4.3.5 轴心轨迹的空间图像表示 (三维全息图)	73
思考题	73
第 5 章 设备状态的判定与趋势分析	75
5.1 设备状态诊断标准	75
5.1.1 振动诊断标准的判定参数	75
5.1.2 状态判定标准的分类	75
5.1.3 振动判定标准介绍	76
5.2 设备状态劣化趋势分析	86
5.2.1 状态趋势分析在故障监测预警中的作用	86
5.2.2 趋势分析应用方法	90
思考题	92
第 6 章 旋转机械故障诊断	93
6.1 旋转机械振动的动力学特征及信号特点	93

6.1.1 转子特性 .....	93	9.2.1 交流感应电动机的电磁振动 .....	162
6.1.2 转子—轴承系统的稳定性 .....	94	9.2.2 直流及同步电动机的电磁振动 .....	165
6.1.3 转子的不平衡振动机理 .....	94	9.3 电动机的故障特征 .....	167
6.1.4 转子与联轴器的不对中振动机理 .....	95	9.3.1 定子异常产生的电磁振动 .....	167
6.1.5 转轴弯曲故障的机理 .....	96	9.3.2 气隙不均匀引起的电磁振动 .....	169
6.1.6 转轴横向裂纹的故障机理 .....	96	9.3.3 转子绕组异常引起的电磁振动 .....	170
6.1.7 连接松动故障的机理 .....	97	9.4 电动机故障诊断案例 .....	171
6.1.8 碰摩故障的机理 .....	97	思考题 .....	180
6.1.9 喘振的机理 .....	98	<b>第 10 章 设备状态调整</b> .....	182
6.2 不平衡分析案例 .....	99	10.1 滑动轴承的间隙与测量调整 .....	182
6.3 轴弯曲分析案例 .....	100	10.1.1 滑动轴承工作原理 .....	182
6.4 不对中分析案例 .....	104	10.1.2 滑动轴承衬的材料 .....	183
6.5 热变形分析案例 .....	109	10.1.3 滑动轴承的装配 .....	184
6.6 支承松动分析案例 .....	110	10.1.4 间隙的检测与调整 .....	186
6.7 油膜涡动及振荡分析案例 .....	113	10.2 滚动轴承的间隙与测量调整 .....	188
6.8 碰摩分析案例 .....	116	10.2.1 滚动轴承的分类 .....	188
6.9 喘振分析案例 .....	117	10.2.2 滚动轴承的精度等级与配合制度 .....	189
思考题 .....	122	10.2.3 滚动轴承的装配工艺 .....	191
<b>第 7 章 滚动轴承故障诊断</b> .....	124	10.2.4 滚动轴承的游隙及调整 .....	193
7.1 滚动轴承的失效形式 .....	124	10.3 齿轮的装配与调整 .....	196
7.2 滚动轴承的振动机理与信号特征 .....	125	10.3.1 齿轮传动的精度等级与公差 .....	197
7.3 滚动轴承信号分析方法 .....	128	10.3.2 齿轮传动的装配 .....	198
7.4 滚动轴承故障诊断案例 .....	132	10.4 联轴器对中调整 .....	202
思考题 .....	146	10.4.1 联轴器装配的技术要求 .....	203
<b>第 8 章 齿轮箱故障诊断</b> .....	147	10.4.2 联轴器装配误差的测量和求解调整量 .....	204
8.1 齿轮失效形式 .....	147	10.4.3 联轴器激光对中法 .....	206
8.2 齿轮的振动机理与信号特征 .....	148	10.5 转子现场动平衡技术 .....	207
8.3 齿轮的故障分析方法 .....	149	10.5.1 静不平衡与动不平衡 .....	207
8.4 齿轮故障诊断案例 .....	153	10.5.2 刚性转子与柔性转子、静平衡与动平衡 .....	208
思考题 .....	158	10.5.3 刚性转子的静平衡方法 .....	209
<b>第 9 章 电动机故障诊断</b> .....	159	10.5.4 刚性转子的动平衡方法 .....	210
9.1 电动机的类型特点与测定标准 .....	159	思考题 .....	213
9.1.1 电动机的主要部件与电动机类型 .....	159	<b>参考文献</b> .....	215
9.1.2 电动机振动的测量与判定标准 .....	160		
9.2 电磁耦合系统的振动原理 .....	162		



# 第1章 绪论

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。在企业的连续生产系统中，如果某台关键设备因故障而不能继续运行，往往会涉及整个企业的生产系统设备的运行，造成巨大的经济损失。因此，对于连续生产系统，例如电力系统的汽轮发电机组、冶金过程及化工过程的关键设备等，故障诊断具有极为重要的意义。

在机械制造业中，大量的单件、小批量生产。在传统的生产环境中，一般机床设备与质量控制主要靠人操作，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。

故障诊断是一门新发展的科学领域，还没有形成较为完整的科学体系。因此，对其研究目的、研究内容范畴的理解，往往与工程应用背景，乃至工程技术人员的专业专长不同而有很大差异。正确理解故障诊断的研究目的、研究内容的范畴是涉及本门学科指导思想和发展策略的问题。

故障诊断的基础是建立在能量耗散原理上的。所有设备的作用都是能量的转换与传递，设备状态愈好，转换与传递过程中的附加能量损耗愈小。例如机械设备，其传递的能量是以力、速度两个主要物理参数来表征的，附加能量损耗主要通过温度及振动参数表现。随着设备劣化程度加大，附加能量损耗也增大。因此，监测附加能量损耗的变化，可以了解设备劣化程度。同理，对于传递不同能量参数（电压及电流、压力及流量）的设备，也可以通过监测附加能量损耗的变化，来了解设备劣化程度。

## 1.1 设备的寿命及劣化曲线

一台设备，由成千上万个零件组成，经过一段时间运转，有的零件就会失效，造成故障。有的机器只用了两三天就坏了，有的机器却连续用了四五年，这是怎么回事？事实上，设计合理的机器不应当出现较多的早期故障。设备维修工程中根据统计得出一般机械设备劣化进程的规律如图 1-1 所示，由于曲线的形状类似浴盆的剖面线，因此常称为浴盆曲线。

曲线沿时间轴可分为三个阶段：

I——磨合期，表示新机器的磨合阶段，这时故障率较高。

II——正常使用期，表示机器经磨合后处于稳定的阶段，这时故障率最低。

III——耗损期，表示机器由于磨损疲劳腐蚀已处于老年阶段，因此故障率又逐步升高。

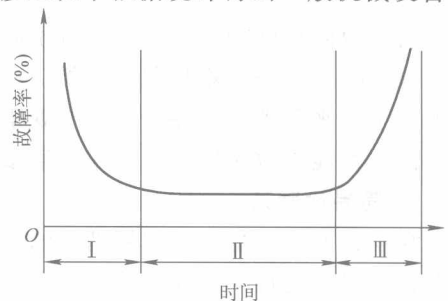


图 1-1 浴盆曲线

一般现场运行的设备都处于Ⅱ、Ⅲ阶段，因此可取浴盆曲线的一半，称为劣化曲线，如图1-2所示。劣化曲线沿纵轴可分为三个区间：

(1) 绿区 (G) 包括浴盆曲线的Ⅱ阶段，即故障率最低的阶段，它表示机器处于良好状态。

(2) 黄区 (Y) 包括浴盆曲线Ⅲ阶段，即初始阶段，故障率已有抬高的趋势，它表示机器处于警戒注意状态。

(3) 红区 (R) 包括浴盆曲线Ⅲ阶段，即故障率已大幅度上升的阶段，它表示机器已处于严重或危险状态，要准备随时停机。

以上所述为一般规律，但对于某一台机器，究竟什么时刻处于黄区，什么时刻处于红区则是未知的，因此按一般规律应在处于黄区时就进行必要的测量及诊断，以确定是否处于黄区还是已进入红区。对于重要的设备，处于绿区时就可以进行必要的测量及诊断，这样可以避免个别设备提前进入黄区及红区。

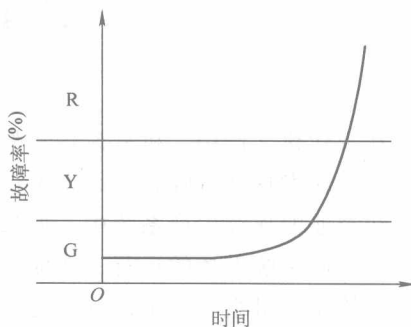


图 1-2 劣化曲线

## 1.2 故障诊断的内容

机械故障诊断的内容包括以下三个方面：

(1) 运行状态的监测 根据机械设备在运行时产生的信息判断设备是否运行正常，其目的是为了早期发现设备故障的苗头。

(2) 设备运行状态的趋势预报 在状态监测的基础上进一步对设备运行状态的发展趋势进行预测，其目的是为了预知设备劣化的速度，以便为生产安排和维修计划提前作好准备。

(3) 故障类型、程度、部位、原因的确定 最重要的是故障类型的确定，它是在状态监测的基础上，确认当机器已处于异常状态时所需要进一步解决的问题，其目的是为最后的诊断决策提供依据。

## 1.3 故障诊断的基本方法

机械故障诊断的基本方法可按不同的观点来分类，目前流行的分类方法有两种：一是按机械故障诊断方法的难易程度分类，可分为简易诊断法和精密诊断法；二是按机械故障诊断的测试手段来分类，主要分为直接观察法、振动噪声测定法、无损检测法、磨损残余物测定法、机器性能参数测定法。下面分别叙述这些方法。

### 1. 简易诊断法

简易诊断法指主要采用便携式的简易诊断仪器，如测振仪、声级计、工业内窥镜、红外点温仪对设备进行人工巡回监测，根据设定的标准或人的经验进行分析，了解设备是否处于正常状态。若发现异常，应通过对监测数据的分析进一步了解其发展的趋势。因此，简易诊断法主要解决的是状态监测和一般的趋势预报问题。

## 2. 精密诊断法

精密诊断法指对已产生异常状态的原因采用精密诊断仪器和各种分析手段（包括计算机辅助分析方法、诊断专家系统等）进行综合分析，以了解故障的类型、程度、部位和产生的原因及故障发展的趋势等问题。精密诊断法主要解决的问题是分析故障部位、程度、原因及较准确地确定发展趋势。

## 3. 直接观察法

传统的直接观察法，如“听、摸、看、闻”是早已存在的古老方法，并一直沿用到现在，在一些情况下仍然十分有效。但因该方法主要依靠人的感觉和经验，故有较大的局限性。随着故障诊断技术的发展和进步，目前出现的便携式测振仪、泄漏听诊仪、光纤内窥镜、红外热像仪、激光全息摄影等现代手段，大大延伸了人的感觉器官功能，使这种传统方法又恢复了青春活力，成为一种有效的诊断方法。

## 4. 振动噪声测定法

机械设备在运动状态（包括正常和异常状态）下都会产生振动和噪声。进一步的研究还表明，振动和噪声的强弱及其包含的主要频率成分和故障的类型、程度、部位和原因等有着密切的联系。大多数机械设备是定速运转设备，各零部件的运动规律决定了它的振动频率。由于是定速运转，零件的振动频率即为该零件的特征频率，观测特征频率的振幅变化，可以了解该零件的运动状态和劣化程度。因此，利用这种振幅变化的信息进行故障诊断是比较有效的方法，也是目前发展比较成熟的方法。其中特别是振动法，由于不受背景噪声干扰的影响，使信号处理比较容易，因此应用更加普遍。

## 5. 无损检测法

无损检测是一种从材料和产品的无损检验技术中发展起来的方法，它是在不破坏材料表面及内部结构的情况下检测机械零部件缺陷的方法。它使用的手段包括超声、红外线、X射线、 $\gamma$ 射线、声发射、磁粉探伤、渗透染色等。这种方法目前已发展成一个独立的分支，在检测由裂纹、砂眼、缩孔等缺陷造成的设备故障时比较有效。其局限性主要是某些如超声、射线等检测手段不便在动态下采用。

## 6. 磨损残余物测定法

机器的润滑系统或液压系统的循环油路中携带着大量的磨损残余物（磨粒），它们的数量、大小、几何形状及成分反映了机器的磨损部位、程度和性质，根据这些信息可以有效地诊断设备的磨损状态。目前，磨损残余物测定法在工程机械及汽车、飞机发动机监测方面已取得了良好的效果。

## 7. 机器性能参数测定法

机器的性能参数主要包括显示机器主要功能的一些数据，如泵的扬程、机床的精度、压缩机的压力、流量、内燃机的功率、耗油量、破碎机的粒度等。一般这些数据可以直接从机器的仪表上读出，由此可以判定机器的运行状态是否离开正常范围。这种机器性能参数测定方法主要用于状态监测或作为故障诊断的辅助手段。

当判定一台设备的故障部位和原因时，往往需要综合地运用多种检测方法。在判定前，要列举各种可能及该种可能的特征参数值，再与检测得到的数据进行对比验证，将对比结果中不相符合的可能排除，剩下相符的可能，即为设备的故障部位和原因。这就是故障诊断中普遍使用的方法——排除法。

## 思 考 题

1-1 故障诊断的基础是建立在\_\_\_\_\_原理上的。

1-2 机械故障诊断的基本方法可按不同观点来分类,目前流行的分类方法的有两种:一是按机械故障诊断方法的难易程度分类,可分为\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_法;二是按机械故障诊断的测试手段来分类,主要分为\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_。

1-3 设备运行过程中的浴盆曲线是指什么?

1-4 机械故障诊断包括哪几个方面的内容?

1-5 请叙述机械设备的故障诊断技术的意义。

1-6 劣化曲线沿纵轴分成的三个区间分别是什么,代表什么意义?

## 第2章 机械振动及信号

机械设备出现的故障种类很多，很复杂，可用于测试与诊断的信息包括温度、声响、变形、应力以及润滑油的物理化学参数等。机械设备的作用是传递力和运动，其中任何一个运动部件或与之相关的零件出现故障，必然破坏机械运动的平稳性，在传递力的参与下，这种力和运动的非平稳现象表现为振动。因而在众多的诊断技术中，没有任何技术能比振动信号分析更深刻地了解机器设备状况，另外，由于机械设备在运行中易出现受安装质量影响（如不对中）或受工艺外力作用（如喘振）而产生振动的现象，其大小与安装质量和使用中的故障有直接关系，由此可见，振动分析及测量在诊断机械故障中有着重要的地位。当然，振动分析对不影响运动平稳性的故障（如泄漏）是无能为力的。为此，本章主要介绍设备诊断技术中振动分析及振动测量的基本知识。

振动测量简单地讲就是通过对机械设备所表现的振动信号进行检测、分析，用以判断机械自身的劣化程度及预测其寿命，一般进行的振动测量大致有以下两方面的内容：

(1) 振动基本参数的测量 测量振动构件上某点的位移、速度、加速度、频率和相位，用于识别该构件的运动状态是否正常。由于机械设备往往有多个振源存在，如齿轮啮合处、联轴器处、转子处、轴承处等，而测点又受到诸多限制，因此某一测点所收到的振动信号往往是从多个振源发出，经各个传导通道到达测点处的合成信号。

(2) 结构和部件的动态特性测量 这种测量方式以某种激振力作用在被测件上，使被测件产生受迫振动，测量输入（激振力）和输出（被测件振动响应）在不同的激振频率下的振幅比，从而确定被测件的固有频率、振型等动态参数，这一类测量称为“频率响应试验”或“机械阻抗试验”。

在机械设备上进行振动测量后，对测试数据进行分析和处理也是十分重要的。数据处理就是将所测的实际数据与预先确定的判断标准进行比较，这是确定设备劣化的关键步骤。设备劣化的确定主要是判断造成机械内部损伤的因素，如开裂、碰撞、磨损、松动、不同心、老化等故障因素，这些故障因素的出现将影响设备的正常运行，确定了故障点后，才能采取对策，进而判断该设备是否可以继续工作。

### 2.1 机械振动基础

各种机器设备在运行中，都不同程度地存在振动，这是运行机械的共性。然而，不同的机器，或同一台机器的不同部位，以及机器在不同的时刻或不同的状态下，其产生的振动形式又往往是有差别的，这又体现了设备振动的特殊性，所以应当从不同的角度来考察振动问题。机械振动一般有以下几种分类方法。

#### 1. 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 所示几种类型。

这种分类，主要是根据振动在时间历程内的变化特征来划分的。大多数机械设备的振动

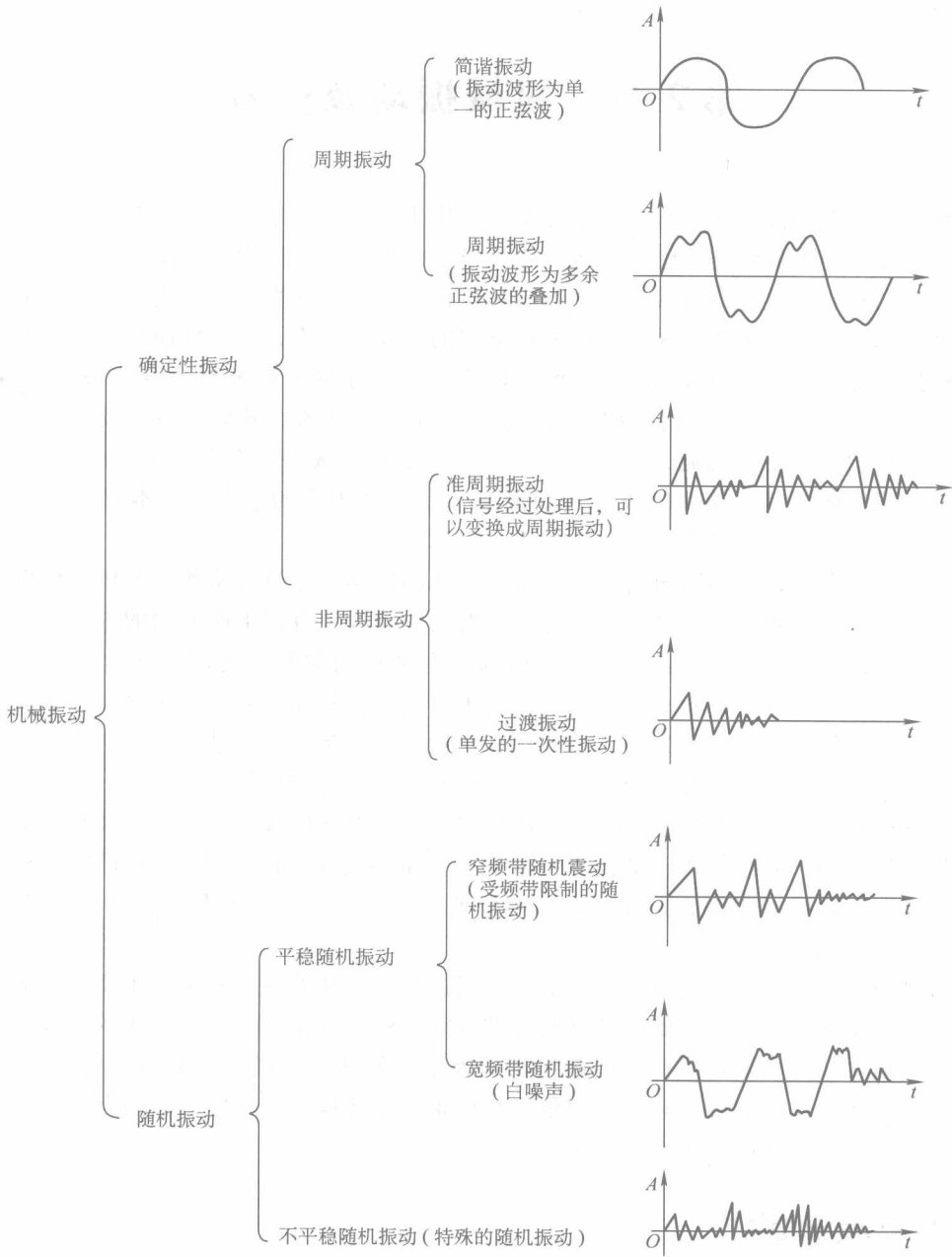


图 2-1 按振动规律分类

是周期振动、准周期振动、窄带随机振动和宽带随机振动中的一种,或是某几种振动的组合。一般在起动或停机过程中的振动信号是非平稳的。设备在实际运行中,其表现的周期信号往往淹没在随机振动信号之中。若设备故障程度加剧,则随机振动中的周期成分加强,从而整台设备振动增大。因此,从某种意义上讲,设备振动诊断的过程,就是从随机信号中提取周期成分的过程。

## 2. 按振动的动力学特征分类

机器产生振动的根本原因，在于存在一个或几个力的激励。不同性质的力激起不同类型的振动。了解机械振动的动力学特征不仅有助于对振动的力学性质作出分析，还有助于说明设备故障的机理。因此，掌握振动动力学知识对设备故障诊断具有重要的意义。据此，可将机械振动分为三种类型：

(1) 自由振动与固有频率 自由振动是物体受到初始激励（通常是一个脉冲力）所引发的一种振动：这种振动靠初始激励一次性获得振动能量，历程有限，一般不会对设备造成破坏，不是现场设备诊断所必须考虑的因素。自由振动给系统一定的能量后，系统产生振动。若系统无阻尼，则系统维持等幅振动；若系统有阻尼，则系统为衰减振动。描述单自由度线性系统的运动方程式为

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + kx(t) = 0 \quad (2-1)$$

式中  $x$ ——振动位移量。

通过对自由振动方程的求解，导出了一个很有用的关系式：无阻尼自由振动的振动角频率  $\omega_n$  为

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2-2)$$

式中  $m$ ——物体的质量；

$k$ ——物体的刚度。

这个振动频率与物体的初始情况无关，完全由物体的力学性质决定，是物体自身固有的称为固有频率。这个结论对复杂振动体系同样成立，它揭示了振动体的一个非常重要的特性。许多设备强振问题，如强迫共振、失稳自激、非线性谐波共振等均与此有关。

但是要注意，物体并不是一受到激励都可发生振动，这是在作激振试验时应该了解的。实际的振动体在运动过程中总是会受到某种阻尼作用，如空气阻尼、材料内摩擦损耗等，只有当阻尼小于临界值时才可激发起振动。临界阻尼是振动体的一种固有属性，用  $C_e$  表示。

$$C_e = 2 \sqrt{km} \quad (2-3)$$

实际阻尼系数  $C$  与临界阻尼  $C_e$  之比称为阻尼比，记为  $\zeta$ 。

$$\zeta = \frac{C}{C_e} \quad (2-4)$$

当阻尼比  $\zeta < 1$  时，是一种振幅按指数规律衰减的振动，其振动频率与初始振动无关，振动频率  $\omega$  略小于固有频率  $\omega_n$  ( $\omega = \sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n$ ,  $\omega < \omega_n$ )；当  $\zeta \geq 1$  时，物体不会振动，而是作非周期运动。

(2) 强迫振动和共振 物体在持续周期变化的外力作用下产生的振动叫强迫振动，如由不平衡、不对中所引起的振动。强迫振动的力学模型如图 2-2 所示。其运动方程式为

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = F_0 \sin \omega t \quad (2-5)$$

式中  $m$ ——振动体质量；

$c$ ——阻尼系数；

$k$ ——弹性系数；

$x$ ——振动位移；

$m \frac{d^2x}{dt^2}$ ——惯性力；

$c \frac{dx}{dt}$ ——阻尼力；

$kx$ ——弹性力；

$F_0$ ——激振力。

这是一个二阶常系数线性非齐次微分方程，其解由通解和特解两项组成，即

$$x(t) = Ae^{-\zeta\omega_n t} \sin(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t + \varphi) + B \sin(\omega t - \psi) \tag{2-6}$$

(通解, 衰减自由振动)                      (特解, 稳态强迫振动)

式中  $A$ ——自由振动的振幅；

$B$ ——强迫振动的振幅；

$\zeta$ ——阻尼比；

$\varphi$ 、 $\psi$ ——初相角。

该强迫振动的时间波形如图 2-3 所示。

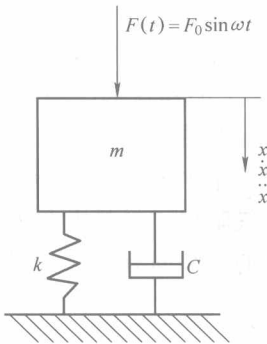


图 2-2 强迫振动的力学模型

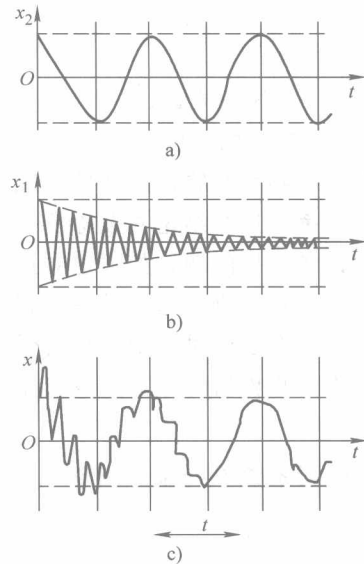


图 2-3 强迫振动的时间波形  
a) 强迫振动 b) 衰减振动 c) 合成振动

如图 2-3 所示，衰减自由振动随时间的推移迅速消失，而强迫振动则不受阻尼影响，是一种和激振力同频率的振动。由此可见，强迫振动过程不仅与激振力的性质（激励频率和振幅）有关，而且与物体自身固有的特性（质量、弹性刚度、阻尼）有关，这就是强迫振动的特点。

具体地说：

1) 物体在简谐力作用下产生的强迫振动也是简谐振动，其稳态响应频率与激励力频率相等。

2) 振幅  $B$  的大小除与激励力大小成正比、与刚度成反比外，还与频率比、阻尼比有



关。当激励力的频率很低时，即  $\omega/\omega_n$  很小时，振幅  $B$  与静力作用下位移的比值  $\beta=1$ ，或者说强迫振动的振幅接近于静态位移（力的频率低，相当于静力）。当力的频率很高时， $\beta \approx 0$ ，这是物体由于惯性原因跟不上力的变化而几乎停止不动。当激励力的频率与固有频率相近时，若阻尼很小，则振幅很大。这就是共振现象。注意，共振频率不等于振动体的固有频率，因最大振幅不单和激振频率有关，还和阻尼的大小有关。经推导得知，发生共振的频率  $\omega_r = \sqrt{1-\zeta^2}\omega_n < \omega_n$ 。此时共振振幅

$$B_r = \frac{\lambda_u}{2\zeta \sqrt{1-\zeta^2}}$$

为了避免共振振幅过大造成的危害，设备转速应避开共振区，共振区的宽度视角频率上、下限而定，一般为  $(0.7 \sim 1.4)\omega_n$ 。

3) 物体位移达到最大值的时间与激振力达到最大值的时间是不相同的，两者之间存在有一个相位差。这个相位差同样和频率比与阻尼比有关。当  $\omega = \omega_r$ ，即共振时，相位差  $\psi$  等于  $90^\circ$ 。当  $\omega \gg \omega_r$  时，相位差  $\psi \approx 180^\circ$ 。了解这些特点，对故障诊断是很有用的。

(3) 自激振动 自激振动是在没有外力作用下，由系统自身原因所产生的激励而引起的振动，如油膜振荡、喘振等。自激振动是一种比较危险的振动，设备一旦发生自激振动，会使设备运行失去稳定性。

顾名思义自激振动是由振动体自身能量激发的振动。比较规范的定义是：在非线性机械系统内，由非振荡能量转变为振荡激励能量所产生的振动称为自激振动。自激振动也称为负阻尼振动，这是因为这种振动在振动体运动时非但不产生阻尼力来阻止振动，反而按振动体运动周期持续不断地输入激励能量来维持物体的振动。物体产生自激振动时，很小的能量即可产生强烈振动。只是由于系统的非线性，振幅才被限制在一定量值之内。

自激振动有如下特点：

1) 随机性。因为能引发自激振动的激励力（大于阻尼力的失稳力）一般都是偶然因素引起的，没有一定规律可循。

2) 振动系统非线性特征较强，即系统存在非线性阻尼元件（如油膜的粘温特性，材料内摩擦）、非线性刚度元件（柔性转子、结构松动等）时才足以引发自激振动，使振动系统所具有的非周期能量转为系统振动能量。

3) 自激振动频率与转速不成比例，一般低于转子工作频率，与转子第一临界转速相符合。只是需要注意，由于系统的非线性，系统固有频率会有一些变化。

4) 转轴存在异步涡动。

5) 振动波形在暂态阶段有较大的随机振动成分，而稳态时，波形是规则的周期振动，这是由于共振频率的振值远大于非线性影响因素所致；与一般强迫振动近似的正弦波（与强迫振动激励源的频率相同）有区别。

自由振动、强迫振动、自激振动这三种振动在设备故障诊断中有各自的主要使用领域。

对于结构件，因局部裂纹、紧固件松动等原因导致结构件的特性参数发生改变故障，多利用脉冲力所激励的自由振动来检测，以测定构件的固有频率、阻尼系数等参数的变化。

对于减速箱、电动机、低速旋转设备等的机械故障，主要以强迫振动为特征，通过对强迫振动的频率成分、振幅变化等特征参数的分析，来鉴别故障。