

● 高等学校教学用书 ●

# 机械故障诊断基础

廖伯瑜 主编

G AODENG  
XUEXIAO  
JIAOXUE  
YONGSHU

冶金工业出版社

高等学校教学用书

# 机械故障诊断基础

昆明理工大学 廖伯瑜 主编

冶金工业出版社

**图书在版编目 (CIP) 数据**

机械故障诊断基础/廖伯瑜主编. —北京: 冶金工业出版社, 1995 (2000.12 重印)

高等学校教学用书

ISBN 7-5024-1699-4

I. 机… I. 廖… III. 机械-故障诊断 N. TH17

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 06276 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

北京梨园彩印厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1995 年 11 月第 1 版, 2000 年 12 月第 3 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 13.5 印张; 316 千字; 207 页; 6001-8000 册

19.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100711) 电话: (010) 65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

## 前 言

开展机械故障诊断工作的直接目的和基本任务之一，就是预防事故，保证人身和设备的安全。从历史上看，机械故障诊断技术是在血和泪的反复教训下成长和发展起来的。我们知道，一些设备，特别是流程式的大型设备，一旦发生故障，将会引起链锁反应，造成巨大的经济损失甚至灾难性的后果。例如，1986年1月28日美国“挑战者”号航天飞机由于燃料助推火箭密封圈泄露而发生爆炸，造成七名宇航员丧生，并导致美国宇航计划推迟两年的严重后果，其经济损失无法估量。又如1986年4月27日前苏联切尔诺贝利核电站四号机组发生严重振动而造成核泄露，致使2000多人死亡，经济损失达30亿美元，引起国际上普遍的关注。

类似以上的设备事故每年都有大量的报道，它反复地提醒人们，为了避免设备事故，保障人身和设备的安全，积极推进机械故障诊断技术的研究并在现场开展这方面的工作已到了刻不容缓的地步了。

开展机械故障诊断工作能推动设备维修制度的改革，改早期的“不坏不修，坏了再修”的事后维修制度为预防维修制度或预知维修制度；减少可能发生的事故损失和延长检修周期所节约的维修费用等，从而能带来可观的经济效益。

这一客观形势促使了机械故障诊断（又称为设备诊断）这门学科的兴起。人们可以运用当代一些科技新成就发现设备的隐患，以期对设备事故防患于未然。近年来这一技术和学科发展十分迅速，已对保障生产安全，提高生产率起到了良好的作用，同时也成了现代设备管理与维修人员必备的基础知识。

本书作为教材，将使新一代的大学生尽早接触这门新的技术和学科，能全面了解这门新的技术和学科的基本原理和发展方向，毕业后能在新的工作岗位上解决实际机械故障诊断问题。本书也突出了计算机技术在机械故障诊断中的应用。企业中的工程技术人员也能参阅本书中的基本理论、方法和大量公式，编写相应的计算机程序，解决本企业机械故障诊断的特殊问题。

我们希望通过这本书的出版，能对今后我国的机械故障诊断技术在赶上世界水平方面有较大的促进；也希望大专院校师生、全国各企业中的工程技术人员能对本书存在的问题提出宝贵意见。

本书第二、六章由昆明理工大学廖伯瑜教授和袁立夏副教授编写，第一、四、七、八、十章由西安建筑科技大学常国光教授编写，第三、五、九章由东北大学杨贵修副教授编写，全书由廖伯瑜教授和袁立夏副教授统稿。书稿初审时，云南大学郑苏民教授、昆明理工大学郭之鑽教授、云南工业大学胡志勇教授提出不少宝贵意见，在此表示衷心感谢！

编 者

1994年12月

# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 机械故障诊断的基本原理、基本内容和基本方法 .....	1
1.2 开展设备诊断的重大意义 .....	4
1.3 机械故障诊断技术发展概况 .....	5
参考文献 .....	6
<b>2 信号分析及处理基础</b> .....	7
2.1 信号概念及分类 .....	7
2.2 信号的时域分析 .....	9
2.3 信号的频域分析 .....	15
2.4 模拟信号分析 .....	23
2.5 数字信号分析 .....	29
2.6 频率细化分析技术 .....	47
2.7 时序分析 .....	47
参考文献 .....	53
<b>3 监测与诊断系统</b> .....	54
3.1 监测与诊断系统的作用与工作步骤 .....	54
3.2 监测与诊断系统的组成(简易诊断系统) .....	55
3.3 监测与诊断系统的组成(精密诊断系统) .....	56
3.4 多微机在线监测与诊断系统简介 .....	58
3.5 设备监测与诊断系统举例 .....	59
参考文献 .....	63
<b>4 旋转机械的振动监测与诊断</b> .....	64
4.1 旋转机械的振动及故障概论 .....	64
4.2 旋转机械故障的诊断信息的表达和分析 .....	67
4.3 旋转机械故障的简易诊断方法 .....	81
4.4 旋转机械故障的精密诊断原理及典型故障分析 .....	89
4.5 现场平衡技术 .....	103
参考文献 .....	107
<b>5 滚动轴承的故障监测和诊断</b> .....	108
5.1 滚动轴承失效的基本形式 .....	108

5. 2	滚动轴承的振动诊断	109
5. 3	滚动轴承的其他监测诊断方法	118
	参考文献	121
<b>6</b>	<b>齿轮箱的监测和诊断</b>	122
6. 1	齿轮副运动的特点	122
6. 2	齿轮和齿轮箱的失效形式和原因	124
6. 3	齿轮的振动诊断原理	127
6. 4	齿轮和齿轮箱的监测与诊断方法	138
6. 5	齿轮箱故障的振动诊断实例	142
6. 6	其他分析方法简介	142
	参考文献	146
<b>7</b>	<b>油样分析方法</b>	147
7. 1	油样分析方法的分类及其应用范围	147
7. 2	油样光谱分析法	148
7. 3	油样铁谱分析法	151
7. 4	磨粒的分类和识别——铁谱图	155
7. 5	铁谱分析法的发展应用概况	157
	参考文献	158
<b>8</b>	<b>红外监测方法</b>	159
8. 1	红外方法的基本原理	159
8. 2	红外探测器	162
8. 3	红外测温仪表	166
8. 4	红外热成像系统简介	168
	参考文献	171
<b>9</b>	<b>超声及声发射诊断法</b>	173
9. 1	超声诊断	173
9. 2	超声波探伤方法	182
9. 3	超声波诊断中仪器与探头的选择	183
9. 4	声发射技术	185
	参考文献	187
<b>10</b>	<b>机械故障诊断的新发展</b>	188
10. 1	模糊诊断法	188
10. 2	灰色诊断法	194
10. 3	专家系统在设备故障诊断中的应用	198

10. 4	神经网络及其发展应用概况 .....	201
10. 5	小波分析简介 .....	205
	参考文献 .....	207

# 1 绪 论

现代机械设备发展的一个明显的趋势是向大型化、高速化、连续化和自动化方向发展。由此而使设备的功能愈来愈多，性能指标愈来愈高，组成和结构愈来愈复杂，同时对设备管理与维修人员的素质要求也愈来愈高。一方面大大促进了生产的发展，主要表现在提高了生产率，改善了产品质量，降低了成本和改善了工人劳动条件，同时也节约了能源和精简了人员。另一方面也潜伏着一个很大的危机，即一旦发生故障所造成的直接、间接损失将是十分严重的。随着生产的发展，设备数量的迅速增长，这一危机造成的后果愈来愈严重，影响愈来愈突出。这一客观形势促使了机械故障诊断（又称为设备诊断）这一门新的技术和学科的诞生和兴起。这门新的技术和学科的根本宗旨就是运用当代一切科技的新成就发现设备的隐患，以期对设备事故防患于未然。近年来这一技术和学科发展十分迅速，已对保障生产安全，提高生产率起到了良好的作用，同时也成了现代设备管理与维修人员必备的基础知识之一。

## 1. 1 机械故障诊断的基本原理、基本内容和基本方法

### 1. 1. 1 基本原理

#### 1. 1. 1. 1 设备劣化进程中的一般性规律（浴盆曲线和劣化曲线）

一台设备，有的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部分：

I —— 磨合期，表示新机器的跑合阶段，这时故障率较高。

II —— 正常使用期，表示机器经跑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。

一般现场运行的设备都处于 I、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阶段：

绿区 (G) —— 包括浴盆曲线的正常使用阶段，即故障率最低的阶段，它表示机器处于良好状态。

黄区 (Y) —— 包括浴盆曲线 III 区的初始阶段，故障率已有抬高的趋势，它表示机器处

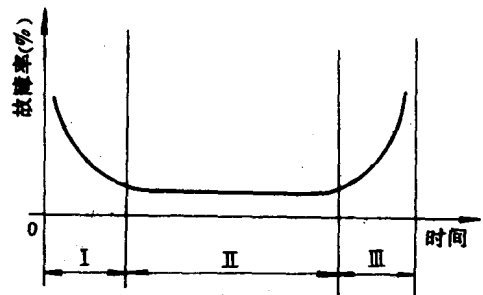


图 1-1 浴盆曲线



于注意状态。

红区 (R) ——包括浴盆曲线Ⅲ区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, 因此应在按一般规律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。

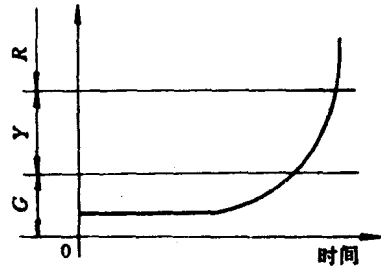


图 1-2 劣化曲线

### 1.1.1.2 利用设备劣化进程中产生的信息进行诊断

诊断的基本概念来源于医学, 我国中医的“望、闻、问、切, 辨证施治”八字诀极其精辟地总结了医学诊断的基本过程和原理。若用现代科技语言来表达。所谓“诊”就是提取信号特征进行状态分析(望闻问切), 而“断”就是进行状态识别和决策(辨证施治)。具体来说, 机械故障诊断就是在动态情况下, 利用机械设备劣化进程中产生的信息(即振动、噪声、压力、温度、流量、润滑状态及其他指标等)来进行状态分析和故障诊断的。

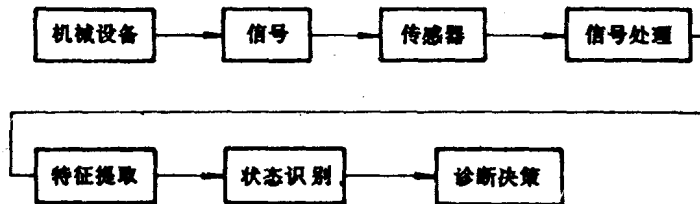


图 1-3 机械故障诊断的基本过程和原理

上述故障诊断的基本过程和原理如图 1-3 所示。

### 1.1.2 基本内容

机械故障诊断的基本内容包括以下三方面:

- 1) 设备运行状态的监测——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, 当确认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. 1. 3 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、振动噪声测试法、无损检测法、磨损物测定法和机器性能参数测定法。下面分别叙述这些方法。

#### 1. 1. 3. 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分析，了解设备是否处于正常状态。若发现异常则通过监测数据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。

#### 1. 1. 3. 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，以期了解故障的类型、程度、部位和产生的原因及故障发展的趋势等问题。由此可见，精密诊断法主要解决的问题是分析故障原因和较准确地确定发展趋势。

#### 1. 1. 3. 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。但因其主要依靠人的感觉和经验，故有较大的局限性。随着技术的发展和进步，目前出现的光纤内窥镜、电子听诊仪、红外热像仪、激光全息摄影等现代手段，大大延长了人的感观器官，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。

#### 1. 1. 3. 4 振动噪声测定法

机械设备在动态下（包括正常和异常状态）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。因此利用这种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。

#### 1. 1. 3. 5 无损检验

无损检验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验机械零部件缺陷的方法。它使用的手段包括超声、红外、X射线、 $\gamma$ 射线、声发射、渗透染色等。这一套方法目前已发展成一个独立的分支，在检验由裂纹、砂眼、缩孔等缺陷造成的设备故障时比较有效。其局限性主要是其某些方法如超声、射线检测等有时不便于在动态下进行。

#### 1. 1. 3. 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方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。

#### 1. 1. 3. 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。

## 1.2 开展设备诊断的重大意义

开展设备诊断的重大意义可从以下三个方面来叙述。

### 1.2.1 预防事故,保证人身和设备的安全

预防事故,保证人身和设备的安全是开展设备诊断工作的直接目的和基本任务之一。但是对这一问题的深刻认识却是来之不易的。从某种意义上来说,设备诊断技术是在血和泪的反复教训下成长和发展起来的。我们知道,一些设备,特别是流程式的大型设备一旦发生故障将会引起连锁反应造成巨大的经济损失甚至灾难性的后果。例如1985年12月29日我国山西某电厂一台20万千瓦发电机在40秒内全部损坏,直接损失达1000万元以上。对连续生产的石化企业事故造成的损失也是相当惊人的。据报道四川某化工厂一台合成氨压缩机停产一天就造成70万元的损失。对一般性事故积累的损失也是不可低估的。1986年1~3季度据冶金工业部的不完全统计,全国26个钢铁厂一般性设备事故的直接经济损失在1100万元以上。此外,国外的一些著名的设备事故更为触目惊心。例如1986年1月28日美国“挑战者”号航天飞机由于燃料助推火箭密封圈泄露而发生爆炸,造成七名宇航员丧生并导致美国宇航计划推迟两年的严重后果,其经济损失就更无法估量了。又如1986年4月27日前苏联切尔诺贝利核电站四号机组发生严重振动而造成核泄露,致使2000多人死亡,经济损失达30亿美元并引起国际上普遍的关注。

类似以上的设备事故每年都有大量的报道,它反复地提醒人们,为了避免设备事故,保障人身和设备的安全,积极发展设备诊断技术的研究并在现场开展这方面的工作已到了刻不容缓的地步了。

### 1.2.2 推动设备维修制度的改革

与生产的发展水平相适应,设备维修制度共有以下三种:

1) 事后维修制度。这是一种早期的维修制度,其特点为“不坏不修,坏了再修。”显然这是一种十分落后的方法。我国在解放前的工厂里普遍采取这种方法。目前对一些不重要的小型设备仍然沿用这种维修方式。

2) 预防维修制度。这种制度简称为PM (Preventive Maintenance),又称为以时间为基础的维修制度[简称为TBM (Time Based Maintenance)]或计划维修制度。解放后,我国由前苏联引进了这种维修方式并一直沿用至今,目前绝大多数工交企业仍然在继续采用。这是一种静态维修制度,其特点是当设备运行到达计划规定的台时或吨公里时便进行强制维修。无疑这种维修制度比上述事后维修要大大前进了一步,对于保障人身和设备的安全,充分发挥设备的完好率起到了积极的作用。

3) 预知维修制度。这种制度简称为PRM (Predictive Maintenance),又称为以状态为基础的维修制度[简称为CBM (Condition Based Maintenance)]。其特点为在状态监测的基础上,根据设备运行状态实际劣化的程度以决定维修时间和维修的规模。显然这种维修方式的主要技术支承是设备诊断技术而且是一种比较理想的动态维修制度。它是目前预

防维修制度改革的方向。

在以上三种维修制度中，我国目前正处于从预防维修制度向预知维修制度逐步过渡的起步阶段。推动目前维修制度改革的主要背景原因有以下几方面：

1) 预防维修制度经过长期实践逐步暴露出明显的缺陷，即过剩维修和失修的问题。以轴承为例，同一型号的滚动轴承其实际使用寿命有时相差可达数十倍。在计划维修制度下，一些轴承虽然使用已达到维修时间但实际上尚有相当长的寿命，但也必须进行更新，这就造成了过剩维修。但也可能有一些轴承尚未达到计划维修时间就已经失效了，这就是失修。失修是造成事故的重要原因之一。计划维修的缺点造成的影响首先在一些西方工业发达国家表现日益突出。以美国的统计资料为例，1980年美国全年税收为7500亿美元而全年工业维修费达2460亿美元，根据专家研究表明其中由于过剩维修和失修而浪费的资金约为750亿美元，约占总维修费用的1/3。这是一个相当惊人的巨额数字。

2) 现代化机械设备一旦发生故障，造成的损失非常严重，特别是在一些高精尖部门（如航空、航天、核能等），尤为如此。

3) 现代化机械设备，特别是大型关键设备，结构十分复杂，在运行中一般又不允许随便停机进行解体检查。

4) 设备数量增长速度远较管理维修人员的素质提高为快，再加上正常的离退休制度，使富有经验的技术人员相对地减少。

在上述原因的综合推动下，大力发展和推行设备诊断技术、改革现行的计划维修制度并逐步向预知维修制度过渡，当前已是势在必行的了。其中发展和普及设备诊断技术是推动改革的中心环节。

### 1. 2. 3 提高经济效益

开展设备诊断所带来的经济效益应当包括减少可能发生的事故损失和延长检修周期所节约的维修费用等两项。由于上述经济效益具有“隐含”的性质，因此往往被人们所忽视甚至拒绝承认。显然这是不正确的。国外一些调查资料显示，开展设备诊断可带来可观的经济效益。英国曾对2000个工厂调查表明，采用设备诊断技术后维修费用每年节约3亿英镑，除去诊断技术的费用0.5亿英镑外，净获利2.5亿英镑。美国PEKRUL电厂的调查资料表明，投入20万美元的设备诊断费年获利可达126万美元。日本资料报道，新日铁八幡厂热轧车间在第一年采用诊断技术后，事故率就由原来的29次/年降低为8次/年。我国1977~1978年对年产30万吨合成氨和48万吨尿素化肥厂的五大透平压缩机组的初步调查表明，两年内机械故障率高达100多次，经济损失高达几个亿。若采用诊断技术可挽回损失的30%，其经济效益就相当可观了。

## 1.3 机械故障诊断技术发展概况

二次世界大战中盟军有大量军事装备，由于缺乏诊断技术和维修手段，而造成非战斗性损坏，使人们认识到发展这种技术的极端重要性。但二次世界大战后的多年间这方面的发展并不快，这是因为作为诊断技术基础的电子技术、计算机技术、信号处理技术等尚未获得充分发展。60年代以来，由于半导体的发展、集成电路的出现，导致电子技术、计算机技术的更新换代，特别是1965年FFT方法获得突破性进展后出现了数字信号处理和分析技术的新分支，这为设备诊断技术的发展奠定了直接的和必须的技术基础。

在此基础上,最早发展设备诊断技术的国家是美国。早在1967年在美国宇航局(NASA)和海军研究所(ONR)的倡导和组织下就成立了美国机械故障预防小组(MFPG),开始了有组织有计划地对诊断技术分专题进行研究。20多年来已召开学术交流大会超过40多次。在此期间很多学术机构如美国机械工程学会(ASME),政府部门如国家标准局(NBS),国家锅炉及高压容器监测中心(NBBI)以及一些高等院校和企业公司都参与或进行了与本行业有关的诊断技术的研究,取得了大量的成果。与此同时还出现了一些专业性的诊断仪器和监测系统制造厂商,如本特利(Bently)公司,科学亚特兰大(Scientific Atlanta)公司;惠普(HP)公司等,对推进诊断技术的应用起到了较大的作用。目前美国诊断技术在航空、航天、军事、核能等尖端部门仍处于世界领先的地位。

英国于70年代初成立了机器保健与状态监测协会(MHMG & CMA),到80年代初在发展和推广设备诊断技术方面作了大量的工作,起到了积极的促进作用。英国曼彻斯特大学创立的沃森工业维修公司(WIMU)和斯旺西大学的摩擦磨损研究中心在诊断技术研究方面都具有很高的声誉。目前英国在摩擦磨损、汽车、飞机发动机监测和诊断方面仍具有领先的地位。

欧洲一些国家的诊断技术发展各有特色。如瑞典SPM公司的轴承监测技术;AGEMA公司的红外热象技术;丹麦B&K公司的振动、噪声监测技术;挪威的船舶诊断技术等都有千秋。

日本的诊断技术也在70年代中开始起步并发展很快,其特点是在民用工业如钢铁、化工、铁路等部门占有较大的优势。

我国起步较晚,1979年机械工业部在长春举办的设备科长学习班上,在学习日本的全员设备维修(TPM)时才初步接触到设备诊断技术的概念,而真正的起步应从1983年南京首届设备诊断技术专题座谈会开始。此后我国政府有关部门曾多次组织外国诊断技术专家来华讲学,如1983年秋日本新日铁的豊田利夫;1984年春瑞典SPM公司的布朗(Brown)等,对宣传推广诊断技术的应用起到了良好的作用。与此同时诊断技术的学术研究也在一些高等院校和科研机关风起云涌地开展起来,并于1986(沈阳),1988(北戴河),1989(天津)已召开了三次学术交流会,其他如油样分析、红外应用等专业诊断方法学术会议也多次举行,出现了不少令人可喜的成果。目前设备诊断技术在石化、冶金、电力等行业中应用情况较好。例如透平发电机、压缩机的诊断技术已列入国家“八五”攻关项目并受到高度重视。与此相适应,一些高等院校已成立了有关的专业,并将设备诊断技术列入教学计划,这为设备诊断的后备人才提供了保证。相信今后我国的诊断技术在赶上世界水平方面将会有更快的发展。

### 参考文献

1. 陈克兴主编,设备状态监测与故障诊断技术,科学技术文献出版社,1991。
2. [日] 豊田利夫,设备现场诊断的开展方法,机械工业出版社,1985。
3. 屈梁生,何正嘉,机械故障诊断学,上海科技出版社,1985。
4. 黄昭毅,中国工交企业设备诊断技术开展简况及其改进意见,CSMDT' 86(沈阳),第48~52页。

## 2 信号分析及处理基础

### 2.1 信号概念及分类

通常把可测量、记录、处理的物理量泛称为信号，它们一般是时间的函数。所谓动态信号是指要进行分析处理的信号随时间有较大的变化，不是近似直流信号的那种随时间缓慢变化的信号。本章主要讨论动态信号分析处理中的有关问题，重点介绍以快速傅里叶变换为基础的各种分析技术。以后凡提到信号之处，均指动态信号。

#### 2.1.1 信号转换与传感器

机械故障诊断中待研究的许多物理量如力、位移、转角、噪声等并不是容易测量、记录、处理的物理量，通常使用各种传感器将其转换为电压、电流等可测物理量。传感器的种类很多，按工作原理可分为电感、电阻、电容、电涡流、压电、光电、热电以及霍尔效应等类型的传感器；按被测量对象可分为力、位移、温度、噪声、应变或其组合如阻抗头（可同时测力和加速度）等类型的传感器；按被测量的物体运动状态可分为直线运动、旋转运动及相应的接触式或非接触式等类型的传感器；按被测量物体的工作状态可分为一般工作环境及特殊工作环境如超高压、超高温、超低压、超低温、强磁场、放射性、特殊气体及液体环境等类型的传感器。这些传感器最重要的指标有：

1) 动态范围。动态范围指传感器输出量与物理输入量之间维持线性比例关系的测量范围。一般动态范围越大越好。

2) 灵敏度。灵敏度指传感器输出量与物理输入量之比。灵敏度高，不需前置放大器即可进行测量；灵敏度较低，需配接适当的放大器。有些传感器使用时就需配接专用放大器，此时灵敏度也可定义为专用放大器输出量与物理输入量之比。

3) 动态特性。动态特性指传感器的响应时延、幅频特性、相频特性等。一般要求在所测信号的频率范围内幅频特性是平直的，相频特性是线性的，响应时延越小越好，否则转换后的信号是失真的，进一步的分析处理也就失去意义。当然也可能为了特殊目的故意利用传感器的非平坦的幅频特性段，例如进行共振解调，诊断滚动轴承的故障等。

4) 稳定性。稳定性指传感器长时间使用后灵敏度、动态范围、动态特性的变化小，重复精度高，否则要经常进行传感器的标定工作。

在实际工作中，应按被测对象选择适当的传感器。

#### 2.1.2 信号传输及干扰噪声

当传感器灵敏度较低时或传感器距分析处理设备较远，通常要使用放大器或长距离电缆，它们也象传感器一样存在灵敏度、动态范围、动态特性及稳定性的问题，在这方面的要求也象传感器一样。传感器输出的信号包括感兴趣的信号和不感兴趣的信号（称为噪声信号），噪声信号通常是由于外界干扰如雷电、空间电磁波、环境温度、湿度、光照、杂质、尘埃等引起，而放大器输出的信号除了传感器输出的信号外，还会附加放大器自身产生的电噪声信号。不论是哪一种噪声，均是有害的，有时甚至会将有用的信号完全淹没。动态信号分析中的一个重要内容就是研究这些噪声信号的特点，采用各种处理技术排除这些噪声

信号，获得不失真的有用信号。

### 2. 1. 3 信号的分类

信号可分为确定性信号及非确定性信号，所谓确定性信号是指可用数学关系式描述的信号，它又可分为周期信号及非周期信号，正弦波、方波等是典型的周期信号，而阶跃脉冲、半正弦脉冲等是典型的非周期信号。所谓非确定性信号是指不能用数学关系式描述的信号，也无法预知其将来的幅值，又称为随机信号，如 2. 1. 2 节中提到的电噪声信号，又如在不平坦的道路上行驶的汽车，车内产生的振动就是随机振动，它使乘客感到颠簸。

信号还可按其取值情况分为模拟信号和数字信号。模拟信号一般都是连续的，而数字信号则是离散的。大多数传感器输出的信号是模拟的，如各种压电式、磁电式、电容式、电涡流式及霍尔效应等类型的传感器；少数传感器输出的信号是离散的，如测量转动的圆光栅，其输出信号为脉冲，通过脉冲计数确定转过的角度。现代电子计算机只能处理数字信号，使用模拟/数字 (A/D) 转换器后才能处理模拟信号。

### 2. 1. 4 随机信号的集合定义

由于随机信号表述的运动规律的不重复性，不确定性，应该使用概率与统计的方法进行研究，即研究在不重复、不确定的运动中是否存在某些重复、确定的东西。如在相同实验条件下得到的  $N$  组随机信号曲线如图 2-1 所示，其中  $x_i(t)$  表示第  $i$  次实验记录。每条波形曲线称为一个样本函数，每个样本函数是不相同的，样本函数的时间区间应是无限的，在有限区间内观察、记录的结果称为样本记录，当样本记录数  $N \rightarrow \infty$  时，就形成了随机过程，即

$$x_i(t) = \{x_1(t), x_2(t) \cdots, x_N(t)\} \quad (2-1)$$

随机过程在参数  $t$  的每一个固定取值，如当  $t=t_j$  时的值称为随机变量，即

$$X_j(t_j), j = 1, 2, \cdots, n$$

对于任意  $n$  个时刻，可以定义  $n$  个随机变量  $X_1(t_1), X_2(t_2), \cdots, X_n(t_n)$ ，随机过程  $X(t)$  还可以表示为：

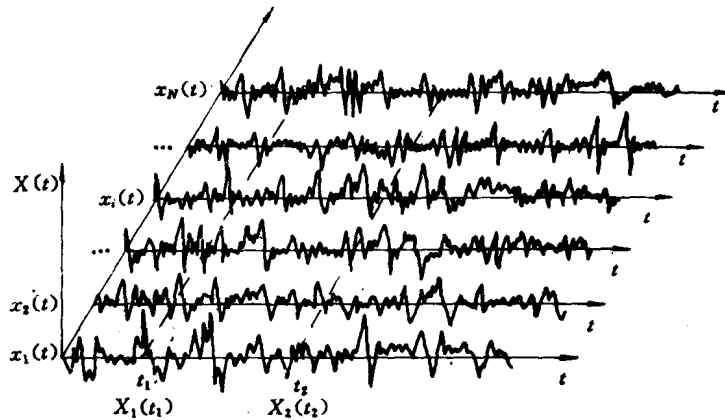


图 2-1 随机过程的集合平均表示法

$$X(t) = \{X_1(t_1), X_2(t_2), \dots, X_n(t_n)\} \quad (2-2)$$

还可以研究随机信号在空间内的不确定性、不可预估性和相同条件下的其它各次信号的不重复性, 此时称为随机信号场, 即随机信号不光与时间有关还与空间坐标有关。机械工程中存在各种各样的随机过程, 若知道它们的统计特性, 就能进行适当的分类, 并找到有效的控制方法。在故障诊断中, 可利用某些干扰噪声的统计特性, 采取滤波、变换、估值等方法, 提取有用信号。

## 2. 2 信号的时域分析

所谓时域是指一个或多个信号其取值大小、相互关系等, 可定义为很多不同的时间函数或参数, 这些时间函数或参数的集合称为时域。时域分析指计算这些函数并进行分析。显然对于确定性信号或随机信号存在不同的定义及处理方法。随机信号的定义及处理方法比较复杂, 确定性信号的处理则与随机信号中的各态历经过程的处理类似, 所以以下叙述中以随机信号的定义及处理方法为主, 确定性信号的处理可参见各态历经过程的处理。根据时间函数或参数的不同, 时域进一步细分还可以分为幅值域、时差域、倒频域、复时域等。倒频域、复时域将在频域分析内叙述。

### 2. 2. 1 幅值域

对样本记录的取值进行统计, 称为在幅值域内对信号进行研究, 在此幅值是广义的幅值, 即样本记录的一切可能取值。在幅值域内几个最重要的基本概念是概率密度函数、概率分布函数、均值、均方值、方差、歪度、峭度等。

#### 2. 2. 1. 1 概率密度函数与概率分布函数

##### A 随机信号的概率表示

在研究如图 2-1 所示的  $N$  个随机信号样本时, 在确定时刻  $t_j$ , 随机变量  $X_j(t_j)$  的大小是不相同的, 若能统计出其值在  $x$  与  $x + \Delta x$  之间的样本为  $n$  个, 可定义其概率为:

$$P_{\text{rob}}\{x \leq X(t) \leq x + \Delta x\} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n}{N} \quad (2-3)$$

##### B 概率密度函数

随机信号研究中, 经常用到概率密度函数, 其定义为:

$$p(x, t) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P_{\text{rob}}\{x \leq X(t) \leq x + \Delta x\}}{\Delta x} \quad (2-4)$$

即概率密度函数与所研究的时刻有关。

##### C 概率分布函数

瞬时值小于或等于某值  $x$  的概率称为概率分布函数或累积概率分布函数, 记作  $P(x, t)$ , 它与概率密度函数的关系为:

$$P(x, t) = P_{\text{rob}}\{X(t) \leq x\} = \int_{-\infty}^x p(\xi, t) d\xi$$

$$p(x, t) = \frac{\partial P(x, t)}{\partial x} \quad (2-5)$$

##### D 多维概率密度函数和多维概率分布函数

若研究随机过程的时刻  $t$  不止一个或要分别对于不同的随机变量  $X_j(t_j)$  计算其瞬时值



小于或等于值  $x_1, x_2, \dots, x_n$  的概率, 应构造多维概率密度函数和 multidimensional probability distribution function, 其定义分别为:

1) 多维概率密度函数:

$$p(x_1, x_2, \dots, x_n, t_1, t_2, \dots, t_n) = \lim_{\Delta x_1 \rightarrow 0} \lim_{\Delta x_2 \rightarrow 0} \dots \lim_{\Delta x_n \rightarrow 0} \frac{P_{\text{rob}}\{x_1 \leq X_1(t_1) \leq x_1 + \Delta x_1, \dots, x_n \leq X_n(t_n) \leq x_n + \Delta x_n\}}{\Delta x_1 \Delta x_2 \dots \Delta x_n} \quad (2-6)$$

2) 多维概率分布函数:

$$\begin{aligned} P(x_1, x_2, \dots, x_n, t_1, t_2, \dots, t_n) &= P_{\text{rob}}\{X_1(t_1) \leq x_1, \dots, X_n(t_n) \leq x_n\} \\ &= \int_{-\infty}^{x_1} \int_{-\infty}^{x_2} \dots \int_{-\infty}^{x_n} p(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n, t_1, t_2, \dots, t_n) d\xi_1, d\xi_2, \dots, d\xi_n \\ p(x_1, x_2, \dots, x_n, t_1, t_2, \dots, t_n) &= \frac{\partial^n P(x_1, x_2, \dots, x_n, t_1, t_2, \dots, t_n)}{\partial x_1 \partial x_2 \dots \partial x_n} \end{aligned} \quad (2-7)$$

### E 联合概率密度函数和联合概率分布函数

若研究的随机过程不止一个, 可按多维概率密度函数和 multidimensional probability distribution function 的方式, 将  $X_i(t_i)$  视为不同的随机过程, 将不同的时刻  $t_i$  视为独立的时间变量, 仍然按式 (2-6) 和式 (2-7) 计算联合概率密度函数和联合概率分布函数。

## 2. 2. 1. 2 均值、均方值、方差、歪度与峭度

### A 均值

均值用以描述信号的稳定分量, 随机过程  $X(t)$  的均值  $\mu_X(t)$  定义为:

$$\begin{aligned} \mu_X(t) &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t) \\ &= E[X(t)] \end{aligned} \quad (2-8)$$

式中,  $E[\ ]$  表示方括号中内容的数学期望或称为算术平均值。均值  $\mu_X(t)$  脚标  $X$  在此表示式 (2-8) 实际上是按  $t$  时刻的随机变量  $X$  统计的, 所以一般随机过程的均值  $\mu_X(t)$  为选定时刻  $t$  的函数。均值又称为一阶矩。

### B 均方值、均方根值

均方值和均方根值用于描述信号的能量, 随机过程  $X(t)$  的均方值  $\Psi_X^2(t)$  定义为:

$$\begin{aligned} \Psi_X^2(t) &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2(t) \\ &= E[X^2(t)] \end{aligned} \quad (2-9)$$

均方根值  $\Psi_X(t)$  定义为均方值的正平方根。均方值又称为二阶矩。

### C 方差、标准差

方差和标准差用于描述信号的波动分量, 随机过程  $X(t)$  的方差  $\sigma_X^2(t)$  定义为:

$$\begin{aligned} \sigma_X^2(t) &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x_i(t) - \mu_X(t)]^2 \\ &= E[(X(t) - \mu_X(t))^2] \\ &= \Psi_X^2(t) - \mu_X^2(t) \end{aligned} \quad (2-10)$$

标准差  $\sigma_X(t)$  是方差  $\sigma_X^2(t)$  的正平方根。方差又称为二阶中心矩。

### D 歪度