

高等院校规划教材

机械故障诊断

主编 梁为李洛虎

煤炭工业出版社

高等院校规划教材

机械故障诊断

主 编 梁 为 李洛虎
副主编 秦文艺 李佰茹 贾 敬 刘 琛 陈树义
参 编 刘 贞
主 审 张洪斌

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书是作者在多年教学、科研基础上编写而成的，内容精练，重点突出，系统性强。

全书共8章，内容包括基础和应用两大部分。基础部分阐述了诊断参数的选择、状态信号的处理和故障诊断的各种技术。应用部分阐述了机械设备典型零部件的故障诊断方法和液压系统的故障诊断方法。

本书可作为高等工科院校及高等专科学校机械类专业的教材，对从事这方面工作的工程技术人员也可用作自学、进修的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械故障诊断/梁为, 李洛虎主编. —北京: 煤炭工业出版社, 2005

高等院校规划教材

ISBN 7-5020-2771-8

I. 机… II. ①梁…②李… 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(2005)第 106820 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
网址: www.cciph.com.cn
煤炭工业出版社印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*
开本 787mm×1092mm¹/₁₆ 印张 8
字数 186 千字 印数 1—1,700
2005 年 11 月第 1 版 2005 年 11 月第 1 次印刷
社内编号 5552 定价 13.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，本社负责调换

前 言

本书是根据作者从事多年机械故障诊断课程的教学实践对所用讲义经过多次整理、提炼、扩充之后编写而成的。本书可作为高等工科院校及高等专科学校机械类专业的教材，对从事这方面工作的工程技术人员也可用作自学、进修的参考书。

本书由梁为、李洛虎主编，并由梁为负责全书统稿，秦文艺、李佰茹、贾敬、刘琛、陈树义为副主编，刘贞为参编，张洪斌审稿。梁为编写第7章，李洛虎编写第8章，秦文艺编写第5章，李佰茹编写第3章，贾敬编写第2章，刘琛编写第6章，陈树义编写第1章，刘贞编写第4章。

本书在编写过程中参考了许多文献资料，作者在此向相关人员表示谢意。

因作者学识有限，时间紧迫，书中难免有不当和错误之处，恳请有关专家和读者批评指正。

编 者

2005年7月

目 录

1 概述	1
1.1 机械故障诊断的基本内容	1
1.2 故障种类	1
1.3 监测与诊断技术种类	2
1.4 一般设备的故障规律	4
1.5 机械设备故障诊断技术发展概况	4
2 技术基础	6
2.1 状态信号与特征参数	6
2.2 信号处理与分析	16
2.3 状态识别	29
3 振动诊断	34
3.1 概述	34
3.2 振动判别标准	38
3.3 振动信号分析方法	39
4 油液分析	44
4.1 概述	44
4.2 铁谱分析法	46
4.3 磁塞检查法	50
5 故障树分析	52
5.1 概述	52
5.2 建造故障树	53
5.3 故障树的结构函数	54
5.4 故障树分析	56
6 故障诊断新技术	64
6.1 故障模糊诊断	64
6.2 故障诊断专家系统	70
6.3 神经网络诊断系统	73

7 机械零部件故障诊断技术	79
7.1 转轴组件故障振动诊断技术.....	79
7.2 滚动轴承故障诊断技术.....	87
7.3 齿轮故障振动诊断技术.....	96
8 液压系统故障诊断技术	108
8.1 概述	108
8.2 诊断参数与判别标准	109
8.3 液压系统故障诊断方法	113
8.4 液压系统状态监测的仪器设备	118
8.5 液压系统故障诊断实例	119
参考文献.....	122

1 概 述

1.1 机械故障诊断的基本内容

机械故障诊断是机械设备状态监测与故障诊断的简称，它是识别机械设备运行状态的一门科学技术。随着科学技术和现代工业的发展，设备大型化、自动化、复杂化的程度日益提高，生产依赖设备的程度也越来越大，因此，设备的任何故障都会给生产带来巨大的损失。因此，在设备运行期间对它的运行状态进行监测、分析和诊断，越来越受到各方面的重视。

机械故障诊断研究的内容包括状态监测、状态识别、状态预测以及故障诊断与处理对策等几个方面。诊断过程如图 1-1 所示。

1) 信息采集

信息采集即指按不同诊断目的将最能表征设备运行状态的信息，用传感器转变为电信号（状态特征信号）。

2) 信号处理

信号处理指排除混入状态信号的干扰信息，并对它进行适当处理，提取最能反映设备状态的特征参数（诊断参数）作为识别状态的依据。

信号处理的方法很多，最基本的是：时域分析法和频域分析法。前者是对信号幅值随时间变化的特性进行分析，从中提取所需的特征信息供状态识别使用；后者是对信号的频率结构（不同频率组成的幅值和相位）进行分析，从中提取所需的特征信息供状态识别使用。

3) 状态识别

状态识别是指将得到的诊断参数值与档案库的标准值进行比较，按一定判别准则对设备作出正常与否的判断。

4) 诊断决策

诊断决策是指根据识别结果，对异常状态作进一步分析，确定故障的原因、部位、程度、类别，并根据诊断结果推测其发展趋势、提出相应的处理措施，如加强监测继续使用、调整、维护或停机修理等。

1.2 故障种类

机械设备状态是指设备的工作状况（工况）。机械设备的状态很多，但可归纳为正常、

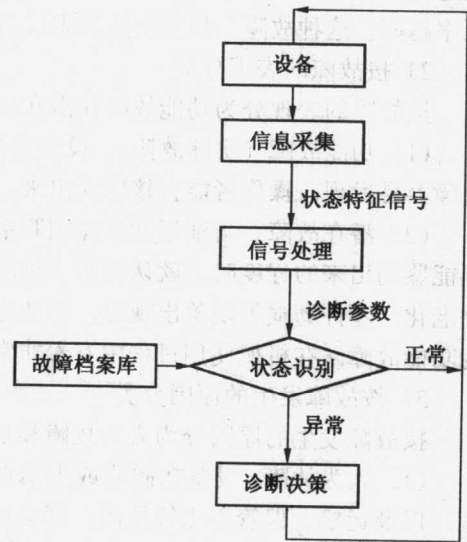


图 1-1 设备故障诊断过程

异常和故障3类。所谓故障是指设备的功能达不到规定要求，设备已无法正常工作的状态；所谓异常是指设备的性能劣化，但还能维持工作的状态。也可把机械设备的状态归纳为正常和故障两类，一切达不到规定和要求的状态都称为故障。

故障可以从不同角度进行分类。

1) 按故障发生、发展的快慢分类

按故障发生、发展的快慢分为突发性故障和渐进性故障。

(1) 突发性故障。这种故障的发生具有偶然性，与使用时间的长短无关，不可预测，发生前没有任何可察觉的征兆，发生后状态急剧恶化必须立即排除。但是这种故障通常不影响设备的使用寿命，例如液压系统的油路堵塞，设备的润滑油中断，电气系统的断路，操作人员的失误等都会引起这类故障。

(2) 渐进性故障。大部分机械故障都是渐进性故障，这种故障是由于设备的技术指标逐渐劣化（受磨损、腐蚀、疲劳、老化等因素的影响），最终超出允许限度而引起的。发生这种故障的概率与使用时间的长短有关，可以预测，设备使用的时间越长，发生故障的概率越高。这种故障一旦发生就标志设备寿命的结束，需要进行大修。

2) 按故障的表现分类

按故障的表现分为功能故障和潜在故障。

(1) 功能故障（实际故障）。设备丧失了或明显降低了工作能力，叫功能故障。这类故障容易发现，操作者能直接感受出来。

(2) 潜在故障。与渐近性故障相联系。虽然故障在功能方面尚未表现出来，但已发展到能鉴别出来的程度时，就认为是一种故障现象，并称为潜在故障，例如疲劳裂纹、密封件老化、零件磨损等现象出现时，就认为存在潜在故障。及时处理潜在故障，防止发展成为功能故障，在机械使用过程中有着非常重要的意义。

3) 按故障发生的原因分类

按故障发生的原因分为人为故障和自然故障。

(1) 人为故障。设备在制造或大修时，使用了不合格的零件，运行时不遵守操作规程，以及运输、保管不当等原因，都会使设备出现故障，这种故障称为人为故障。

(2) 自然故障。设备在使用和保存期间，由于受到外部和内部各种自然因素的影响而引起的故障，都叫自然故障，如正常情况下的磨损、老化、腐蚀等引起的故障都属于这个范畴。

1.3 监测与诊断技术种类

故障监测、诊断技术分类的方法很多，最主要的有以下几种：

1.3.1 按监测信息与诊断对象的关系分类

按监测信息与诊断对象的关系分为直接诊断和间接诊断。

1) 直接诊断

直接诊断是根据诊断对象本身的信息（一次信息）变化，直接判断诊断对象状态的一种方法。监测轴承的间隙、齿轮齿面的磨损、轴的疲劳裂纹和变形量，可根据这些信息的变化，判断轴承、齿轮和轴的状态都是直接诊断。由于受设备结构和条件的限制往往很难进行直接监测，难以取得一次信息，所以一般都要采用间接诊断。

2) 间接诊断

间接诊断是监测运行中设备的温度、声音、振动等二次信息的变化判断诊断对象状态的一种方法。间接诊断的依据一般是综合信息，但用综合信息来判断诊断对象的运行状态有可能得出错误的结论。例如采用润滑油温度诊断轴承的运行状态，在判别时就可能出现误判或漏判的错误，因为影响润滑油温度的因素不仅是轴承的运行状态，还有室温的高低，油量的多少和散热条件的变化等诸多因素。因此，根据综合信息提高状态识别的成功率，在故障诊断领域是一个深受重视的研究课题。

1.3.2 按诊断时间分类

按诊断时间分为定期诊断和连续诊断。

1) 定期诊断

每隔一定时间例如一个星期、一个月或数月，对运行中的设备进行一次检测诊断，称为定期诊断，也叫巡回检测诊断。

2) 连续诊断

采用现代化仪表和计算机信息处理系统对设备的状态进行连续不断的监测诊断叫连续诊断。

两种诊断方式的选择取决于设备的关键程度和设备性能的劣化速度等许多因素。

1.3.3 按诊断环境分类

按诊断环境分为在线诊断和离线诊断。

1) 在线诊断

在线诊断是指不离开现场，对运行中的设备用传感器采集信息后，直接送入分析处理仪器或计算机进行分析处理和诊断。它的优点是实时性好，不漏报故障，但不灵活，费用也高，只适用于关键设备。在线监测所用的传感器及诊断仪器一般不应干扰被监测对象的正常运行。

2) 离线诊断

离线诊断是指在现场将设备的状态信号记录下来，在实验室或其他合适的地方进行分析处理和诊断。离线诊断的优点是灵活方便、费用少，但不及时，容易漏报故障，一般用于普通设备的常规检查。

1.3.4 按诊断方法的完善程度分类

按诊断方法的完善程度分为简易诊断和精密诊断。

1) 简易诊断

简易诊断的目的是对设备有无故障及故障的严重程度作出初步判断，对故障发展趋势作出初步估计。一般来说，简易诊断使用的仪器多为便携式，主要由现场工作人员实施。

2) 精密诊断

精密诊断是在简易诊断的基础上进行的，其目的除对设备有无故障及故障的严重程度进行验证外，还对故障的部位、类别、原因和发展趋势作出准确的判断与预报。精密诊断使用的仪器设备有4类：

(1) 精密的分析诊断仪器。这类仪器主要用作频域分析，不能实现实时监测和自动诊断。

(2) 以计算机为基础的多功能自动监测、诊断系统。这类系统主要由传感器、接口装置及计算机组成，可以实现实时监测和自动诊断。但目前主要用作辅助监测、诊断系统，

还不能真正达到自动诊断水平。

(3) 专家系统。这是一种用计算机程序模拟大脑功能的人工智能系统，是诊断技术的高级形式。只要事先将故障诊断专家的知识和推理方法存入计算机，输入监测信号后，计算机就可模拟专家的工作，对设备状态作出专家水平的分析、判断与预测并提出相应的处理决策。

(4) 人工神经网络。它是模拟大脑神经结构建成的网状系统，是另一种人工智能系统。通过学习，它具有大脑处理信息的某些特性，对设备状态能够根据输入的监测信息作出适当的分析、判断并提出相应的处理决策。

1.4 一般设备的故障规律

机械设备工作到 t 时刻不发生故障，而在下一个单位时间内发生故障的概率叫设备故障率，用 $\lambda(t)$ 表示。实际工作中， $\lambda(t)$ 用 t 时刻后单位时间内同类设备中出现的故障数量 Δn 与 t 时刻设备总数 N 的比值表示。即

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n}{N} \quad (1-1)$$

大多数设备在运行期间故障率随时间变化而变化的规律如图 1-2 所示，它反映了使用中设备发生故障的可能性。曲线由 3 个区段组成，形如浴盆，故称“浴盆曲线”。

1) 磨合期

设备在使用初期故障率较高，这是由于设计、制造和检测等缺陷造成的。随着运转时间的增加和对故障的不断排除，故障率下降很快。当设备进行大修或改造后再次使用时，也会出现这种情况。

2) 正常使用期

故障率低而稳定，近似常数，是设备工作的最佳时期。故障是由随机因素引起的，不可预测，不能用预防维修方法防止。但容易排除，不影响寿命。不过应及时排除，不然也可能影响设备寿命，甚至酿成重大事故。

3) 耗损期

设备使用后期故障率不断增加，这是由设备的零部件磨损、疲劳、老化、腐蚀等因素造成的。这类故障的发生是设备接近寿命终点的征兆。

由于设备在出厂前已经过充分试车（磨合）与调整，消除了设计、制造和检测造成的缺陷，使用后期又可通过及时的预防性维修推迟耗损期的到来，因此设备在运行期间可认为故障率大体保持为恒定值。

以上 3 个区段的划分是就一般情况而言，并不是所有设备都是如此，所以监测对象的实际故障曲线尚需通过认真探索与研究。

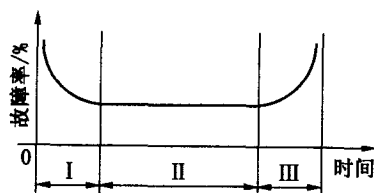


图 1-2 典型故障率曲线

I—磨合期；II—正常使用期；III—耗损期

1.5 机械设备故障诊断技术发展概况

机械设备故障诊断技术的历史悠久，从人类学会利用机械设备进行生产的时候起，就

有了眼看、手摸、耳听、鼻嗅等简单的监测手段和凭靠经验的判别准则。随着生产技术的不断发展,诊断技术也在不断进步。到20世纪60年代,一方面,生产机械化、自动化的发展对机械设备运行的连续性、可靠性提出了更高的要求,极大地促进了诊断技术的发展;另一方面,电子技术和微型计算机的迅速发展,为诊断技术的发展提供了极大的技术支持,因而出现了各种精密的电子监测和故障诊断仪器,使故障诊断技术在20世纪70年代就发展成为一门新的综合性学科,出现了划时代的变化。

故障诊断发展最早的国家是美国,在20世纪60年代对诊断技术就开始了有组织的研究工作,目前在航天、航空、军事、核能等尖端部门仍处于领先地位。英国从20世纪70年代初开始起步,目前在摩擦、磨损、汽车、飞机发动机监测和诊断方面居于领先地位。瑞典的轴承监测技术、红外热像技术,丹麦的振动、噪声监测技术,挪威的船舶诊断技术,日本的钢铁、化工、铁路等部门的诊断技术也各有千秋,有较大的优势。

我国起步较晚,1983年才正式把状态监测和故障诊断技术列入设备管理条例,但发展很快,在石化、冶金、电力、交通等行业中已得到了广泛应用,特别是在大型旋转机械的故障诊断方面已自行开发出实用的监测诊断系统,取得了可观的效益。但是,从整体看与先进国家相比,我国还有一定差距,特别是在监测、诊断仪器设备方面亟待加强。近年来由于高智能检测系统、信息融合技术、混沌理论与分形理论的发展,给故障诊断带来了广阔的发展空间,相信在这个领域不久将出现许多新的进展。

□ □ 思 考 题

1. 机械设备故障监测与诊断研究的主要内容有哪些?
2. 画图简述机械设备故障监测与诊断的过程。
3. 机械设备运行状态的种类有哪些?
4. 设备故障的种类有哪些?
5. 故障监测与诊断技术的分类有哪些?
6. 为什么一般机械设备的故障率曲线是“浴盆”形式?
7. 为什么机械设备故障诊断技术能够得到迅速发展?

2 技术基础

任何机械设备在运行过程中都有各种各样的表现，如振动、噪声、温度等，这些表现都可由传感器转换为信号。根据这些信号特征参数的变化，我们就可诊断出设备的运行状态。为了使诊断的结论正确、可靠、实时，应认真研究以下几个技术问题。

(1) 选择作为诊断依据的特征参数。机械设备的状态特征参数是诊断设备状态的出发点，没有监测信号的特征参数，诊断就是一句空话。但设备的特征参数很多，选用哪个或哪些参数作为诊断的依据，才能取得最好的诊断效果？这是需要认真研究的首要问题。

(2) 从监测信号中提取所要特征参数的方法。监测信号一般不能直接用于诊断，因为监测信号中除有需要的信息外还有许多干扰信息，所以必须对信号进行各种处理和转换，以取得所需的特征参数，这个过程称为信号处理与分析。信号处理与分析的方法很多，随着科学技术的发展，新的处理与分析方法还在不断出现，所以正确选用这些方法提取所需的特征参数，是故障诊断应认真研究的重要问题

(3) 根据提取的特征参数识别设备状态的方法。识别设备状态是故障诊断的根本任务，前面的一切工作都是为它创造条件。设备的故障状态既复杂又模糊，状态与特征参数之间通常没有一一对应的关系；适合各种情况的诊断方法也发展了很多，所以正确选用这些方法取得最好的诊断效果是故障诊断领域应认真研究的核心问题。

这些问题都是故障诊断应解决的基本问题，也是在这里要阐述的基本内容：特征参数的选择，信号处理与分析和状态识别。

2.1 状态信号与特征参数

机械设备运行状态的各种表现，我们不可能、也不必要都用传感器收集起来作为诊断设备用的状态特征信号；更不可能、也不必要把状态特征信号的所有特征参数都作为诊断设备状态的依据（诊断参数），必须进行选择。为了选好合适的诊断参数，应该掌握各种特征参数的特性，选择特征参数的原则，以及综合、压缩特征参数的方法。

2.1.1 选择特征参数的原则

选择特征参数的原则除考虑监测目的，使用方便和经济效益外，还应考虑以下几方面。

1) 灵敏度

特征参数的敏感度用下式表示

$$\eta(x/y) = \frac{\partial (\ln x)}{\partial (\ln y)} = \frac{\partial x/x}{\partial y/y} \quad (2-1)$$

式中 y ——设备状态参数；

x ——特征参数。

当然，应该尽量选择灵敏度高的特征参数作为诊断参数。建立了设备状态的数学模型时，根据数学模型容易找出对设备状态反映最灵敏的特征参数；没有建立数学模型时，可

以用实验方法通过分析比较找出最灵敏的特征参数。图 2-1 是止推轴承的载荷状态与止推轴承的温度、轴承的轴向位置和排油温度间的关系图形，从无载荷到满载荷，止推轴承的轴瓦温度增加了 55℃，而轴向位置和排油温度只分别变化了 50~70 μm 和 3℃，所以如果监测目的仅是防止过载，止推轴承的轴瓦温度应是灵敏度最高的诊断参数。

2) 稳定性

诊断参数受设备的工作条件（载荷，转速等）和测试条件（放大倍数、采样频率、采样长度和起始点位置等）的影响越小越好，即应选择对工作条件和测试条件变化不敏感的特征参数作诊断参数。在时域中无量纲特征参数的稳定性比有量纲的好，例如诊断参数若选用振动信号的位移峰值 x_{max} ，则因载荷或转速的变动都要使 x_{max} 发生变化，所以稳定性差。若选用无量纲参数峰值系数 x_{max}/x_{rms} 作诊断参数，就可避免这些变动带来的影响，提高稳定性。

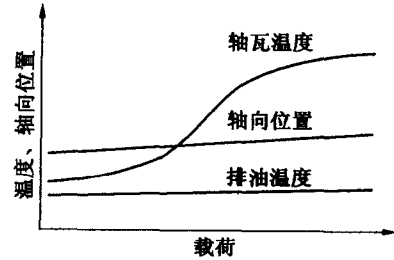


图 2-1 止推轴承特征参数与载荷的关系

3) 对应性

特征参数应能充分反映设备的状态，一一对应的单值函数关系对应性最好。但在很多情况下这是不可能的，同一特征参数可对应设备多种状态是常见的情况。在医学领域咳嗽这种特征（症状）对应的状态（病症）就有感冒，肺炎，肺结核等多种疾病，在这种情况下为了得出确切的诊断结论，就需要采用多个特征参数组成诊断向量进行综合评定。在故障诊断领域使用诊断向量判别设备状态的情况是很多的，例如要区分不对中和不平衡两种不同的故障状态时，就必须采用两个特征参数（信号频率结构的基频成分和二倍频成分）组成的诊断向量进行综合判断。

实际上，以上几方面要求很难同时满足，例如对滚动轴承的早期疲劳剥落故障，振动信号的峰值 x_{max} 比均方根值 x_{rms} 的灵敏度高，但稳定性则相反。因此，在选择诊断参数时，要根据具体情况权衡利弊妥善处理。

2.1.2 常用的状态特征信号

目前广泛采用的状态特征信号有以下几种。

1) 机械设备的输出变化

机械设备的输出用功能参数描述，在使用过程中它的大小是变化的，可直接用来识别设备的运行状态。例如监测粉碎机的产品粒度和产量，机床的加工精度，泵的流量和压力，柴油机的耗油量和功率就可判断它们的运行状态是否正常。一般来说，这种参数比较容易检测，使用人员容易接受。但是它们的灵敏度往往不高，一些主要零部件即使已有缺陷，机械设备的功能参数可能仍没有可察觉的变化。并且根据这类参数的变化也很难诊断故障的部位和原因。

2) 振动

选择振动信号诊断设备状态有以下优点：

(1) 应用面广，任何机械设备运行时都有振动，劣化程度增加振动强度也增大。据统计，机械设备 70% 以上的故障都是以振动形式表现出来的。

(2) 振动量是多维的（幅值、频率和相位），而且变化范围很广，便于区分不同种类、

不同程度的故障状态。

(3) 测量方便, 技术成熟, 可以在线监测, 国内外已有许多专门的振动测量仪器系列。

(4) 振动传递性强, 传感器可以感受到较大范围内存在的故障振动。所以机械设备内部的齿轮、轴等的振动信息可以用安装在机壳上的传感器拾取。

因此, 振动信号应用很广泛, 所有的机械设备, 特别是旋转机械都常用振动信息诊断它们的运行状态。

3) 噪声

选择噪声诊断设备的状态有以下优点:

(1) 噪声是振动在弹性介质中的传播, 包含的信息量大。

(2) 测量时和设备不接触, 不受地方限制, 比较方便。

但是易受环境噪声影响, 技术上对噪声的分析、处理也是一件很复杂的工作, 所以应用较少。

4) 温度

设备在运行过程中发热是一种普通现象, 摩擦面损伤、超载、运动件有碰撞等原因都会促使温度升高, 而且温度测量也容易。所以温度是识别设备状态常用的重要信息, 在设备运行过程中经常检测温度, 已成为使用者必须进行的工作。但温度对故障的响应慢, 灵敏度也低, 一般只用作简易诊断。

5) 磨损微粒

机械零件在运行过程中的磨损产物都在润滑油中, 所以通过对油中磨损产物的收集、分析可以确定零件的磨损状况。磨损是使零件损伤, 导致设备故障的主要原因, 因此, 监测磨损微粒的状况是诊断设备故障的一种重要手段。

2.1.3 常用的特征参数(特性指标)

广泛用作故障诊断的特征参数(诊断参数)有两类: 状态特征信号的特征参数和状态特征信号的数学模型参数。

通常认为机械设备的正常运行过程是随机过程, 一般都具有平稳、正态、各态历经性质。所谓平稳是指随机过程的集合统计特征参数不随时间改变而改变; 所谓正态是指随机过程中每一随机变量都按正态分布; 所谓各态历经是指随机过程的集合统计特征参数与任一样本函数(一次长时间的监测记录)的时间统计特征参数相同。因此, 设备运行过程的集合统计特征参数(设备状态特征参数)可以根据通过监测手段得到的一个样本函数(设备的一个状态信号)计算出来。这样不仅节省了大量计算时间, 而且也极大地减少了监测工作量。当然, 在实际应用中样本的长度总是有限的(称样本记录), 所以根据有限长的状态信号计算出来的统计特征参数值都是估计值, 不是真值, 有一定误差。

特征参数很多(时域特征参数、频域特征参数、时频域特征参数、倒频域特征参数和小波特征参数等), 在这里我们只介绍一些时域和频域的常用简单参数。

2.1.3.1 设备状态信号常用的特征参数

根据监测的有限长状态信号计算诊断参数, 一般都以计算机为工具。因此, 下面介绍的计算式都是以一个(或几个)有限长状态信号的离散数据(时间序列)为依据。

若状态特征信号的一个时间序列为 x_1, x_2, \dots, x_N , 则在时域和频域中常用的特征

参数及其估计值的计算式如下：

1) 时域特征参数

(1) 均值：
$$\mu_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2-2)$$

(2) 方差：
$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2 \quad (2-3)$$

标准差：方差的正平方根值叫标准差或均方根差，即 σ_x 。

(3) 均方值（平均功率）：
$$\Psi_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 \quad (2-4)$$

均方根值：均方值的正平方根叫均方根值，即 x_{rms} 。

(4) 峰值：
$$x_{\max} = E \{ \max |x_i| \} \quad (2-5)$$

式中， $\max |x_i|$ 为时间序列各等分段中绝对值最大的数据。

(5) 偏度：
$$\alpha_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^3 \quad (2-6)$$

(6) 峭度：
$$\beta_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^4 \quad (2-7)$$

均值是信号的静态（稳定）分量，是信号取值的分布中心；方差、标准差反映信号取值对分布中心的分散程度，标准差是信号动态分量的度量；均方值反映信号的能量。设备运行正常时，状态稳定，信号的动态分量小，方差小，均方值也小，设备发生故障时这些值都增大。峰值反映瞬时冲击的幅值，常用作速度，加速度度量，位移的度量常不用峰值，而用峰—峰值（信号的波峰到波谷间距离的最大值）。

偏度反映数据 x_1, x_2, \dots, x_N 的分布对理想中心的偏离程度。设备正常运行时监测数据应是正态分布，分布中心为理想值 μ_0 ，如图 2-2a 所示。若监测数据的均值为 μ ，且有

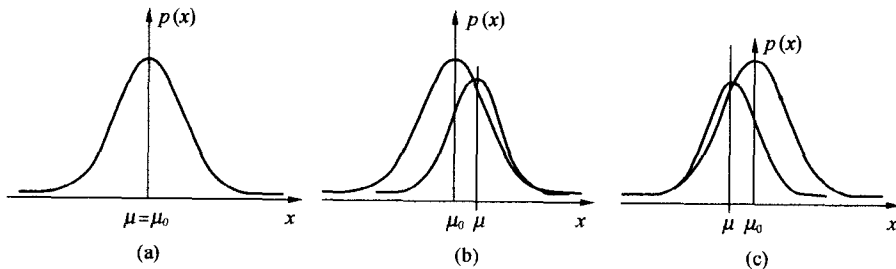


图 2-2 偏度的意义

a—标准状态；b—正偏度；c—负偏度

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^3 = 0 \quad (2-8)$$

即数据 x_i 对均值 μ 的偏差值三次方的平均值等于 0，则 $\mu = \mu_0$ ，数据的分布是正常的，没有偏度；若有

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^3 > 0 \quad (2-9)$$

则 $\mu > \mu_0$ ，数据的分布不正常，偏向右侧，如图 2-2b 所示；若有

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^3 < 0 \quad (2-10)$$

则 $\mu < \mu_0$ ，数据的分布也不正常，偏向左侧，如图 2-2c 所示。无论偏向哪侧都是设备异常的征兆，绝对值越大，异常的程度越严重。

峭度反映数据分布曲线的凸峰状况。如图 2-3 所示，峭度值大意味着数据的分布对均值的分散大，远离均值的数据概率大，凸峰低平，称负峭度；反之，则分散小，接近均值的数据概率大，凸峰陡峭，称正峭度。随着故障的发生与发展，峭度取值会逐渐增大。这个参数对大幅值特别敏感，对探测信号中是否含有脉冲成分特别有效。

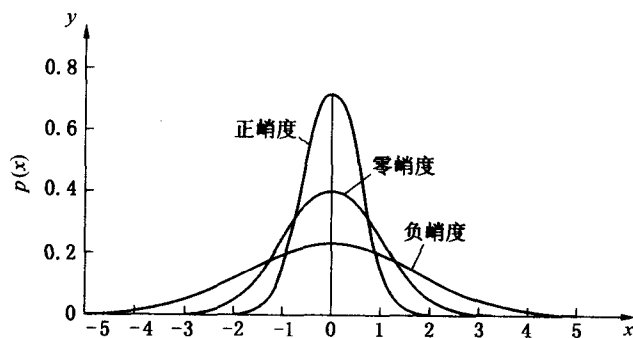


图 2-3 峭度的意义

因为信号的均值是信号的稳定部分，一般对诊断不起作用，所以在计算诊断参数时常从原始数据中扣除均值，只用信号的动态部分参与运算。

上述特征参数不仅随设备状态的变化而变化，还随工作条件、测量条件的改变而改变（如载荷、转速、仪器灵敏度等），所以稳定性差。为此，引入了以下几个常用的无量纲特征参数。

(7) 波形系数: $k = \frac{x_{rms}}{|\bar{x}|} \quad (2-11)$

(8) 峰值系数: $C = \frac{x_{max}}{x_{rms}} \quad (2-12)$

(9) 脉冲系数: $I = \frac{x_{max}}{|\bar{x}|} \quad (2-13)$

式中 $|\bar{x}|$ ——绝对平均幅值, $|\bar{x}| = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i|$ 。

(10) 裕度系数: $L = \frac{x_{max}}{x_r} \quad (2-14)$

式中 x_r ——方根幅值, $x_r = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{|x_i|} \right)^2$ 。

(11) 偏度系数:
$$S_v = \frac{\alpha_x}{\sigma_x^3} \quad (2-15)$$

(12) 峭度系数:
$$k_v = \frac{\beta_x}{\sigma_x^4} \quad (2-16)$$

在时域中除反映信号幅值统计特征的上述特征参数外, 还有两个反映信号波形结构的特征参数。

(13) 自相关函数。自相关函数用来描述信号相隔一定时间间隔两取值之间的线性依赖关系。函数值(相关值)越大, 信号的关联程度越强, 反之则弱。自相关函数定义为

$$R_x(n) = E[x_t x_{t+n}] \quad (2-17)$$

它的估计值计算公式为

$$R_x(n) = \frac{1}{N-n} \sum_{i=1}^{N-n} x_i x_{i+n} \quad (2-18)$$

式中, n 称为延时数, 它的值为 $0, 1, 2, \dots, m$ 且 $m \ll N$ 。

随机信号的自相关函数当 $n=0$ 时, 函数值(相关值)最大, 相关性最好, 完全线性相关; 当 n 增大时, 函数值迅速减小, 相关性迅速减弱; 周期信号的自相关函数是同频率的周期函数。

图 2-4 是某轴承振动信号的自相关函数曲线。图 2-4c 是轴承正常状态的自相关函数图, 曲线衰减很快, 没有明显的周期性, 说明轴承的振动是随机振动。图 2-4a 和图 2-4b 是轴承异常状态的自相关函数曲线, 具有明显的周期性, 说明轴承的振动除随机振动成分外, 还有周期振动成分。由图 2-4a 的振动周期为 14 ms, 可推算出振动的原因是外圈滚道上有损伤斑点; 由图 2-4b 的振动周期 11 ms, 可推算出振动的原因是内圈滚道上有损伤斑点。3 种状态的自相关函数差别明显, 这对判别故障是十分有利的。

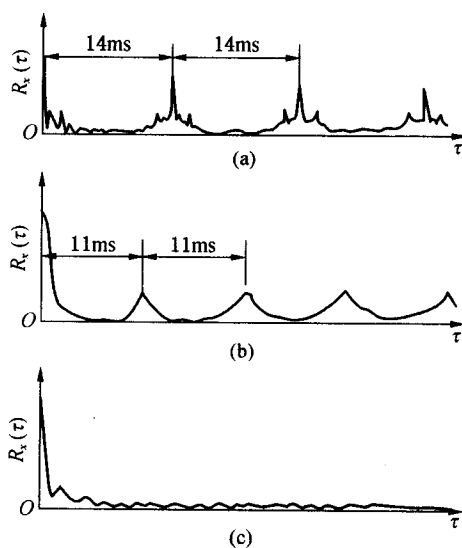


图 2-4 轴承振动信号自相关函数图
a—外圈滚道上有斑点; b—内圈滚道上有斑点; c—正常轴承

(14) 互相关函数。互相关函数用来描述两个信号之间的依赖关系, 其计算公式为

$$R_{xy}(n) = \frac{1}{N-n} \sum_{i=1}^{N-n} x_i y_{i+n} \quad (2-19)$$

图 2-5 是利用互相关函数诊断驾驶员座椅振动源的例子, 从互相关函数图上可以看出座椅的振动主要是由前轮轴梁振动引起的, 因为座椅振动信号与前轮轴梁振动信号的互相关曲线有最大值。

2) 频域特征参数

时域特征参数一般只能给出设备正常与否的信息, 很少给出故障部位等重要信息。再加上监测信号中除含有我们需要的故障信息外, 还有许多干扰信息(特别是在设备早期故障时, 故障信息很弱, 常常被干扰信息淹没), 所以在时域很难得到故障的许多重要信息。