

现代设备工程与管理系列培训教材之二  
中国设备管理协会 组织编写

SHEBEI ZHUANGTAI JIANCE  
YU GUZHANG ZHENDUAN

# 设备状态监测 与故障诊断

主 编 杨志伊 副主编 郑 文



中国计划出版社

现代设备工程与管理系列培训教材之二  
中国设备管理协会 组织编写

# 设备状态监测与故障诊断

主 编 杨志伊  
副主编 郑 文  
主 审 黄昭毅

中国计划出版社

## 图书在版编目 ( C I P ) 数据

设备状态监测与故障诊断 / 杨志伊主编, 郑文副主编.  
北京: 中国计划出版社, 2006. 6  
(现代设备工程与管理系列培训教材)  
ISBN 7-80177-672-0

I. 设... II. ①杨... ②郑... III. ①机械设备—状态—监测—技术培训—教材②机械设备—故障诊断—技术培训—教材 IV. TH17

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 048986 号

现代设备工程与管理系列培训教材之二

### 设备状态监测与故障诊断

主 编 杨志伊

副主编 郑 文

☆

中国计划出版社出版

(地址: 北京市西城区木樨地北里甲 11 号国宏大厦 C 座 4 层)

(邮政编码: 100038 电话: 63906481 63906433)

新华书店北京发行所发行

三河富华印刷包装有限公司印刷

---

787 × 1092 毫米 1/16 18.25 印张 462 千字

2006 年 6 月第一版 2006 年 6 月第一次印刷

印数 1—5000 册

☆

ISBN 7-80177-672-0/TB · 005

定价: 38.00 元

# 《现代设备工程与管理系列培训教材》

## 编 审 委 员 会

主 任：马 仪

副主任：陈玉平 王 湘 刘 力

成 员：（以姓氏笔画为序）

马世宁 王卫平 王 松 亓和平 刘 谦 杨志伊

张友诚 张翠凤 范世东 郑 文 赵宝琴 赵维印

黄昭毅 蓝文谨

# 《设备状态监测与故障诊断》编写组

主 编 杨志伊

副主编 郑 文

成 员 (以姓氏笔画为序)

王生效	王庆山	王志刚	亓和平	邝朴生	包春江
刘有为	刘混田	严开勇	李明山	李耀君	杨志伊
宋建玲	郑 文	周志红	周新聪	高泽涵	徐兴科
徐泰富	黄志坚	谢江华			

主 审 黄昭毅

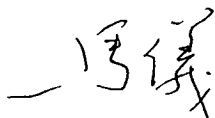
# 序

为进一步推动我国设备管理现代化进程，满足设备管理培训及其对系统教材的需求，为企业提供一套理论与实践相结合，但又侧重于实际操作的系统教材，并为注册设备维修工程师资格认证工作夯实基础，我们组织全国设备管理的有关专家、学者和有丰富实践经验的设备工作者及企事业单位领导共同编写的《现代设备工程与管理系列培训教材》正式出版了。这是中国设备管理协会出版的第一套全面、系统的培训教材，相信它的出版会对推动整个设备管理工作，特别是设备管理的教学、研究、培训与实践工作起到十分重要的促进作用。

设备管理与企业生产正常运行、环境保护、产品质量、节能降耗密切相关，是企业生产的重要物质基础和技术保障。随着社会主义市场经济的飞速发展，设备管理工作的地位和作用愈显重要。因此，党和国家领导人历来十分重视设备管理工作，李先念、江泽民、李鹏、薄一波、邹家华、张劲夫、倪志福、胡厥文、胡子昂等都在不同时期为设备管理题词，为做好设备管理工作指明了方向。在新世纪新时期，做好设备管理工作对于实践“三个代表”的要求和落实科学发展观更具有十分重要的现实意义。

《现代设备工程与管理系列培训教材》将发挥重要的作用：一是为企业培训工作提供一个规范“课本”。企业的设备管理工作迫切需要一套理论与实践相结合，又侧重现场操作的系统教材。二是规范培训市场。目前设备管理培训市场竞争激烈，设备管理书籍名目繁多，良莠不齐，缺乏系统、规范的培训教材。这套教材出版后，将对设备工程培训内容起到很好的规范作用。三是注册设备维修工程师职业资格认证工作，也需要一套与之配套的培训教材，作为考核标准的参考依据。

中国设备管理协会会长



2006年3月17日

# 前 言

为了满足全国设备管理工作和企业设备管理人员培训的需要；为了规范设备管理工作相关知识教育的现状，中国设备管理协会组织了国内设备管理的专家、学者和有丰富实践经验的各企业从事设备管理和设备状态监测故障诊断的技术人员，共同编写了本教材。

本教材力求简要、实用。从设备管理的角度，介绍了典型的设备状态监测与故障诊断的诊断理论、技术手段和具体方法。希望本教材能对设备管理工作起到规范、提高和促进作用。

本教材分十章，第一章对设备状态监测与故障诊断的意义、发展，基础理论和现状进行了介绍，阐述了设备状态监测、故障诊断与设备管理的关系。第二至第六章对振动监测、油—磨屑监测分析、温度监测、无损检测等基本监测手段的原理及诊断方法进行了论述；第七至九章介绍了针对液压设备，电气设备和电子设备的状态监测和故障诊断方法，第十章是一些行业和企业对本企业或行业设备状态监测的现状和先进经验的介绍，这些内容很实用且具有借鉴意义。

本教材第一章、第八章由中国矿业大学杨志伊教授、河北农业大学邝朴生教授执笔编写；第二、三、五章由广州大学郑文教授执笔编写；第四章由杨志伊执笔编写；第六章由聊城大学包春江教授执笔编写；第七章由广东工业大学黄志坚教授执笔编写；第九章由杨志伊和广州大学高泽涵教授执笔编写；第十章介绍了煤、电、油、运、钢铁等行业的大型企业设备管理及状态监测方面的经验，第一节由神东煤炭公司王生效、刘混田高级工程师执笔编写，第二节由西安热高所李耀君、电科院刘有为执笔编写，第三节由大庆石油管理局李明山、王庆山执笔编写，第四节由胜利油田亓和平副总工程师、胜利石化总厂宋建玲高级工程师执笔编写，第五节由胜利油田亓和平副总工程师、胜利发电厂徐兴科高级工程师执笔编写，第六节由武汉理工大学教授周新聪及周志红、徐泰富执笔编写，第七节由武汉钢铁公司严开勇、王志刚、谢江华高级工程师执笔编写。本书由黄昭毅教授主审。

本分册在编写过程中得到了中国设备管理协会培训办的大力支持，特别是赵宝琴女士和王松先生为本书的编写与出版做了大量的工作，在此一并表示谢意。

由于编写人员众多，各人文风不一，加之本人学术水平有限，教材中或有不当之处，尚希望读者不吝指正。

杨志伊  
2006年3月

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	(1)
第一节 设备状态监测和故障诊断的意义和发展历史 .....	(1)
第二节 现代设备故障诊断技术 .....	(4)
第三节 基于知识的故障诊断方法 .....	(7)
第四节 设备故障诊断内容和流程 .....	(10)
<b>第二章 简易振动诊断技术</b> .....	(12)
第一节 概述 .....	(12)
第二节 机械振动的一般描述 .....	(13)
第三节 简易振动监测参数的测量 .....	(17)
第四节 简易振动诊断的常用仪器设备 .....	(18)
第五节 振动监测标准及机器状态评价 .....	(23)
第六节 简易振动诊断的开展方法与实施 .....	(30)
第七节 滚动轴承的简易诊断法 .....	(33)
第八节 齿轮的简易诊断法 .....	(37)
第九节 往复机械的振动监测 .....	(38)
<b>第三章 精密振动诊断技术</b> .....	(40)
第一节 概述 .....	(40)
第二节 机械振动信号的分析方法 .....	(40)
第三节 精密振动诊断的常用仪器设备 .....	(49)
第四节 轴承的故障诊断 .....	(51)
第五节 齿轮的故障诊断 .....	(56)
第六节 旋转机械的故障诊断 .....	(60)
<b>第四章 油-磨屑监测及故障诊断</b> .....	(78)
第一节 概述 .....	(78)
第二节 润滑剂的性能检测与设备管理 .....	(79)
第三节 铁谱监测技术和油液中的磨屑分析 .....	(82)
第四节 油液光谱分析 .....	(93)
<b>第五章 温度监测与红外诊断技术</b> .....	(100)
第一节 温度测量基础 .....	(100)
第二节 接触式温度测量 .....	(102)



第三节	非接触式温度测量 .....	(104)
第四节	红外诊断技术 .....	(111)
<b>第六章</b>	<b>无损检测 .....</b>	<b>(117)</b>
第一节	渗透检测 .....	(117)
第二节	磁粉检测 .....	(121)
第三节	涡流检测 .....	(124)
第四节	射线检测 .....	(126)
第五节	超声检测 .....	(130)
第六节	声发射检测 .....	(137)
<b>第七章</b>	<b>液压设备故障诊断 .....</b>	<b>(145)</b>
第一节	液压故障及其诊断概述 .....	(145)
第二节	压力失控问题的诊断 .....	(151)
第三节	速度失控问题的诊断 .....	(154)
第四节	动作失控问题的诊断 .....	(155)
第五节	温度升高异常问题的诊断 .....	(157)
第六节	液压系统异常振动与噪声的诊断 .....	(157)
第七节	液压系统泄漏的诊断 .....	(161)
<b>第八章</b>	<b>电气设备的故障诊断技术 .....</b>	<b>(163)</b>
第一节	概述 .....	(163)
第二节	电气设备绝缘性能测试及故障诊断 .....	(164)
第三节	电气设备温度诊断 .....	(166)
第四节	变压器故障诊断 .....	(166)
第五节	电机的状态监测与故障诊断 .....	(170)
第六节	电力网谐波的危害及监测 .....	(176)
<b>第九章</b>	<b>电子电路故障诊断技术 .....</b>	<b>(178)</b>
第一节	概述 .....	(178)
第二节	模拟电路故障诊断技术 .....	(179)
第三节	数字电路故障诊断技术 .....	(181)
第四节	数字 IC 芯片的检测与故障诊断方法 .....	(183)
<b>第十章</b>	<b>行(企)业设备状态监测与故障诊断经验介绍 .....</b>	<b>(186)</b>
第一节	煤矿设备故障诊断及神东公司先进经验 .....	(186)
第二节	电力行业设备监测与诊断技术 .....	(205)
第三节	石油行业设备故障诊断 .....	(216)
第四节	石化行业设备故障诊断 .....	(227)

第五节	中石化胜利发电厂设备故障诊断经验 .....	(232)
第六节	船舶行业设备状态监测与故障诊断 .....	(237)
第七节	钢铁行业设备诊断先进经验 .....	(257)

# 第一章 绪 论

## 第一节 设备状态监测和故障诊断的意义和发展历史

### 一、设备故障及故障诊断

随着现代化工业的发展，设备能否安全可靠地以最佳状态运行，对于确保产品质量、提高企业生产能力、保障安全生产都具有十分重要的意义。

设备的故障就是指设备在规定时间内、规定条件下丧失规定功能的状况，通常这种故障是从某一零部件的失效引起的。

任何零部件都有它的寿命周期，因而设备的故障是客观必然存在的，如何有效地提高设备运行的可靠性，及时发现和预测出故障的发生是十分必要的，这正是加强设备管理的重要环节和最重要的工作。设备从正常到故障会有一个发生、发展的过程，因此对设备的运行状况应进行日常的、连续的、规范的工作状态的检查和测量，即工况监测或称状态监测，它是设备管理工作的一部分。

设备的故障诊断则是发现并确定故障的部位和性质。寻找故障的起因，预报故障的趋势并提出相应的对策。

设备状态监测及故障诊断技术（下简称故障诊断技术）是从机械故障诊断技术基础上发展起来的。所谓“机械故障诊断技术”就是指在机械基本不拆卸的情况下，在它运行当中掌握其运行状态，早期发现故障，判断故障的部位和原因，以及预报故障的发展趋势。

设备故障诊断技术不仅在设备使用和维修过程中使用，而且在设备的设计、制造过程中也要为今后的监测和维修创造条件。因此，设备故障诊断技术应贯穿到机电设备的设计、制造、使用和维修的全过程。

### 二、设备故障诊断技术发展历史

设备故障诊断技术的发展是与设备的维修方式紧密相连的。人们可将故障诊断技术按测试手段分为六个阶段，即感官诊断、简易诊断、综合诊断、在线监测、精密诊断和远程监测。若从时间考查，故障诊断技术大致可以分为20世纪60年代以前、60年代到80年代和80年代以后几个阶段。在上个世纪60年代以前，人们往往采用事后维修（不坏不修）和定期维修。但所定的时间间隔难以掌握，过度维修和突发停机（没到维修期、设备已发生故障）事故时有发生，鉴于这些弊端，美国军方首先在20世纪60年代，改定期维修为预知维修；也就是定期检查，视情（视状态）维修。这种主动维修的方式很快被许多国家和其他行业所效仿，设备故障诊断技术很快发展起来。

20世纪60年代到80年代是故障诊断技术迅速发展的年代，那时把诊断技术分为简易诊断和精密诊断两类，前者相当于状态监测，主要回答设备的运行状态是否正常；后者则要

求定量掌握设备的状态，了解故障的部位和原因，预测故障对设备未来的影响。对于回转设备，现场常用的诊断方法以振动法较多，其次是油——磨屑分析法，对于低速、重载往复运动的设备，振动诊断比较困难，而油——磨屑分析技术比较有效。此外，在设备运行中都会产生机械的、温度的、噪声的以及电磁的种种物理和化学变化，如振动、噪声、力、扭矩、压力、温度、功率、电流、声光等等，这些反映设备状态变化的信号均有其各自的特点，一般情况下，一个故障可能表现出多个特征信息。而一个特征信息往往又包含在几种状态信息之中。因此除振动法和油——磨屑分析法之外，实用的诊断方法还有声响法、压力法、应力测定法、流量测定法、温度分布法（红外诊断技术）、声发射法（AE法——Acoustic Emission）等等。这些诊断方法所用仪器方法简便、讲求实效。同时，从信息处理技术角度出发，对反映设备故障的特征信息，通过利用信号模型，直接分析可测信号，提取特征值，从而检测出故障。既然一个设备故障，往往包含在几种状态信息之中，因此利用各种诊断方法对一个故障进行综合分析和诊断就十分必要，如同医生诊断病人的疾患一样，要尽可能多的调动多种诊断、测试方法，从各个角度、各个方面进行分析、判断、以得到正确的诊断结论。此外各种状态信息都是通过一些测试手段获得的，难免存在各种测量误差，如何对这些已获得的信号进行处理，以便去伪存真、提高设备故障诊断的确诊率也是十分重要的。把现代信号处理理念和技术引入设备管理和设备故障诊断是当前的热门。常用的信号模型有相关函数，频谱自回归滑动平均，小波变换等等；从可测信号中提取的特征值常用的有方差、幅度、频率等。以信息处理技术为基础，构成了现代设备故障诊断技术。

20世纪80年代中期以后，人工智能理论得到迅猛发展，其中专家系统很快被应用到故障诊断领域。以信息处理技术为基础的传统设备故障诊断技术逐渐向基于知识的智能诊断技术方向发展，陆续涌现出许多新型的状态监测和故障诊断方法。

### 三、设备诊断的国家政策及发展概况

#### （一）设备诊断的国家政策

早在1983年1月，国家经委下达的“国营工业交通企业设备管理试行条例”，就明确的提出要“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”。在1985年11月国家经委委托中国设备管理协会，在上海金山召开了“设备诊断技术应用推广会议”，后来在1986年第二届全国设备管理优秀单位表彰会上，李鹏总理更明确指出：“应该从单纯的以时间周期为基础的检修制度，逐步发展到以设备的实际技术状态为基础的检修制度。不仅要看设备运转了多长时间，还要看设备的实际使用状态和实际技术状况，实际利用小时和实际负荷状况，来确定设备该不该修。也就是说，要从静态管理发展到动态管理。这就要求我们采用一系列先进的仪器来诊断设备的状况，通过检查诊断来确定检修的项目”。

#### （二）我国开展设备诊断的经历过程

我国工交企业设备诊断从1983年起步，迄今已20多年，不仅获得了较好效益，而且也接近了当代世界先进水平，整个历程大致可分为5个阶段。分述于下：

##### 1. 从1983至1985年：准备阶段

这一阶段的标志是1983年国家经委“国营工业交通企业设备管理试行条例”的发布和同年中国机械工程学会设备维修专业委员会在南京会议上提出“积极开发和应用设备诊断

技术为四化建设服务”倡议书。这一阶段的主要工作是学习国外经验，开展国内调研，制订初步规划，在部分企业试点等。与此同时，积极参加国际交流，邀请外国专家来华讲授，从而形成一支既有理论知识也有工作经验的骨干队伍。此时期的主要困难是手段不足，仪器主要依靠进口，加之实际经验不足，尚缺乏对复杂问题的处理能力，因而在企业创立的信誉较低。

#### 2. 从1986至1989年：实施阶段

这一阶段开始的标志是1985年国家经委在上海召开的“设备诊断技术应用推广大会”。由于经过了两年准备、工作试点，取得了初步成效，企业开始有了较大规模投入，从而使得设备诊断进入到一个活跃时期。中国机械工程学会、中国振动工程学会和中国设备管理协会的诊断技术委员会先后成立，给予设备诊断工作以有力支持。石化、电力、冶金，机械和核工业等行业也都建立了专委会或协作网，辽宁、天津、北京和上海等地还建立了地区组织。1986年国际诊断会议在沈阳召开，促进了我国仪器厂家对诊断仪器的开发研制。这个时期尽管设备诊断在重点企业多已开展，但在一般企业还推广不够，工作水平也相差很大。

#### 3. 从1990至1995年：普及提高阶段

这一阶段开始的标志是1989年中国机械工程学会设备维修分会在天津召开的“数据采集器和计算机辅助设备诊断研讨会”开始。由于“数采器”是普及点检定修的重要手段，而“计算机诊断”又是向高水平迈进的必要手段，因此两者的结合正反映了设备诊断技术向普及和提高的新阶段的到来。这个时期的科研成果层出不穷，一些专家的成就已接近了世界水平。原来发展较慢的行业如有色、铁路、港口、建材和轻纺等相继赶了上来。每年国内都有不少论文被选入国际会议，而在国内的书刊杂志出版上也有改进，由西安交大和冶金工业出版社发行的系列专业诊断技术丛书，亦在这一阶段面市。

#### 4. 从1996至2000年：工程化、产业化阶段

这一阶段开始的标志是1996年10月中国设备管理协会在天津成立设备诊断工程委员会，并提出了“学术化、工程化、产业化和社会化，向设备诊断工程要效益的工作方法”。针对国内的机制转换、体制改革和国外CIMS系统的发展，需要从系统工程、信息工程、控制工程和市场经济学的大系统角度来处理众多的诊断问题。也即是从设备综合管理的角度，把设备诊断作为一个工程产业，实施产、学、研三结合。在此观念指导下，中设协一方面组织了石化、冶金、电力、铁路等部门进行编制规划，一方面开发了EGK-Ⅲ设备诊断工程软件库利振动、红外和油液三个软件包。在此形势下，国内诊断仪器的生产厂、科研院所、代理商比过去增长很多，存在的问题是缺乏统一规划和协调。

#### 5. 从2001年至今：传统诊断与现代诊断并存阶段

我国进入21世纪以来，由于世界高新科技的发展极为迅速，国际学术交流分外活跃，仪器厂家系列产品不断推陈出新，从而有力地推进了诊断工作，无论在理论上和实践中，都进入了一个新的历史阶段。在这个时期内，一方面一些经得起时间考验，并早已为大家所熟练应用的传统诊断技术，如简易诊断和精密诊断等，仍在相当广阔的领域继续发挥其重要作用外，另一方面则又有相当一些在高科技推进下产生的现代诊断技术，进入了国内科研生产领域，包括近年应用颇显成效的模糊诊断、神经网络、小波分析、信息集成与融合等；以及虚拟及智能技术，分布式及网络监测诊断系统等。这些可以称为正在发展的现代诊断技术，它们与传统诊断技术并肩齐进、互为补充，从而呈现了诊断工程界的百花齐放大好局面。

## 第二节 现代设备故障诊断技术

在故障诊断学建立之前,传统的故障诊断方法主要是依靠经验的积累。将反映设备故障的特殊信号,从信息论角度出发对其进行分析,是现代设备故障诊断技术的特点。可以分为统计诊断、逻辑诊断、模糊诊断等等。

### 一、贝叶斯法 (Bayes)

Bayes 法是基于概率统计的推理方法,它是以概率密度函数为基础,综合设备的故障信息来描述设备的运行状态,进行故障分析。其诊断推理过程包括“先验概率的估计”和“后验概率”的计算(利用贝叶斯公式)。设备运行过程是一个随机过程,故障出现的概率一般是可估计的。比如机器运行状态良好时,产品的合格率为 90%,而当机器发生故障时,产品的合格率会猛然下降为 30%,每天早上机器调整到良好状态的概率为 75%,试估算某日早上第一个产品是合格的前提下,设备状态良好的概率是多少?

为此,我们可以利用 Bayes 公式推算。贝叶斯公式为:

$$P(D_i/x) = \frac{P(x/D_i)P(D_i)}{\sum_{i=1}^n P(x/D_i)P(D_i)} \quad (1-1)$$

式中,  $D_1, D_2 \cdots D_i \cdots D_n$  为样本空间  $S$  的一个划分,  $P(D_i) > 0 (i = 1, 2, \cdots, n)$ 。

对于任一事件  $x$ ,  $P(x) > 0$ 。

由概率乘法定理和条件概率定义可知

$$P(D_i/x) = \frac{P(D_i)x}{P(x)} = \frac{P(x/D_i)P(D_i)}{P(x)}$$

由于  $P(x) = \sum_{i=1}^n P(x/D_i)P(D_i)$  (全概公式)

所以逆概公式——Bayes 公式为

$$P(D_i/x) = \frac{P(x/D_i)P(D_i)}{\sum_{i=1}^n P(x/D_i)P(D_i)}$$

我们以“产品合格”记为  $A$  事件,以“设备状态良好”记为  $B$  事件,已知

$$P(A/B) = 0.9$$

$$P(A/\bar{B}) = 0.3$$

$$P(B) = 0.75$$

$$P(\bar{B}) = 0.25$$

那么

$$P(B/A) = \frac{P(A/B) \cdot P(B)}{P(A/B)P(B) + P(A/\bar{B})P(\bar{B})}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{0.9 \times 0.75}{0.9 \times 0.75 + 0.3 \times 0.25} \\
 &= 0.9
 \end{aligned}$$

也就是说,在这日第一个产品是合格的前提下,我们可以估算设备状态良好的概率在90%。

这里的75% [ $P(B) = 0.75$ ],是由以往的数据分析得到的,称为“先验概率”,而经过计算在某日早上第一个产品是合格的前提下设备状态良好的概率为90% ( $P(B/A) = 0.9$ )称为后验概率。

## 二、最大似然法

与贝叶斯准则类似,最大似然法也起源于概率理论,按最大似然法规定

$$L_i = P(D_i/S_1 S_2 S_3 \Delta S_k) = \prod_{j=1}^k P(S_j/D_i) \quad (1-2)$$

式中,  $S_1, S_2, \dots, S_k$  为设备异常的种种信息,  $D_1, D_2, \dots, D_i$  为设备可能的故障种类,而  $P(D_i/S_1, S_2 \dots D_k)$  为故障  $D_i$  在出现  $k$  种异常信息时可能发生的概率。

$P(S_j/D_i) (j=1, 2 \dots k)$  为已知设备发生了  $D_i$  种故障,某一异常信号  $S_j$  出现的概率。 $P(S_j/D_i)$  可以从以往的资料统计中得到。

我们只需按式(1-2),取其中最大的,即可得出诊断的结果。由于(1-2)式连乘计算不方便,可做如下的简化。

$$L'_i = \sum_{j=1}^k [\lg P(S_j/D_i) + 1] \times 10 \quad (1-3)$$

它保持了若  $L_i > L_j$ , 则  $L'_i > L'_j$  的性质可用于比较  $L$  值的大小进行故障诊断。

该法与贝叶斯法(又称最大后验概率法或 Bayes 准则)比较,舍去了先验概率的估计,且一律认为诸事件的先验概率相等,简化了计算,但往往与实际情况有出入。

## 三、时间序列法

时间序列分析(TSA——Time Series Analysis)是又一重要的故障诊断技术。时间序列是以等间隔采集连续信号  $x(t)$ , 所得到的离散序列数据  $x_1, x_2, \dots, x_i \dots x_n$ , 简记为  $\{x_i\}$ , 处理和分析这种数据序列的统计学方法称为时间序列分析。

时间序列可以包括随机过程  $x(t)$  的随机序列,也可以包括按时间顺序或按空间顺序,甚至于按其他物理量顺序排列的数据,数据的排列顺序及其大小,蕴含着客观事物及其变化的信息,表现着变化的动态过程,具有外延特性,因此时间序列也可称为“动态数据”。

时间序列分析分为时域分析和频域分析,时域分析是通过观察信号的时间历程,对其周期性和随机性给出评价,建立和获得序列的统计性规律。频域分析是通过信号序列进行某种变换(如傅立叶变换),将复杂的信号,分解为简单信号的叠加,实现对信号序列的现代谱分析。

时间序列分析的特点是根据观测数据和建模方法建立动态参数模型,利用该模型可进行动态系统及过程的模拟,分析,预报和控制把时间序列分析用于设备的故障诊断,一般采用

自回归滑动平均模型 ARMA (Auto Regressive Moving Average) (也称递进推算分析法)。特别是 AR 模型。

### 1. ARMA, AR 和 MA 模型

ARMA 模型是具有物理意义的随机差分方程模型。设  $x_t$  和  $y_t$  分别表示线性平稳系统的输入和输出在采样时刻  $t$  的数值, 联系  $x_t$  和  $y_t$  的向前差分方程为

$$y_t - \sum_{i=1}^p \varphi_i y_{t-i} = x_t - \sum_{j=1}^q \theta_j x_{t-j}$$

$$\text{式 } y_t = \sum_{i=1}^p \varphi_i y_{t-i} + x_t - \sum_{j=1}^q \theta_j x_{t-j} \quad (1-4)$$

式中  $\varphi_i$  和  $\theta_j$ ——待识别的模型参数;

$\varphi_i$ ——自回归参数;

$\theta_j$ ——滑动平均参数;

$p$ ——自回归阶数;

$q$ ——滑动平均阶数。

(1-4) 式所表达的模型称为自回归平均模型, 简记为 ARMA ( $p \cdot q$ ) 模型, 对于该模型的基本假设是, 系统的输入  $X(t)$  是均值为 0, 方差为  $\sigma_x^2$  的白噪声序列, 即  $(x_t) \sim NID(0, \sigma_x^2)$ 。

如果  $\theta_j = 0$  ( $j=1, 2, \dots, q$ ) 模型中没有滑动平均部分, 则有

$$y_t = \sum_{i=1}^p \varphi_i y_{t-i} + x_t \quad x_t \sim NID(0, \sigma_x^2) \quad (1-5)$$

称为  $P$  阶自回归模型, 简记为 AR ( $P$ ) 模型。

如果  $\varphi_i = 0$  ( $i=1, 2, \dots, p$ ), 模型中没有自回归部分, 则有

$$y_t = x_t - \sum_{j=1}^q \theta_j x_{t-j} \quad x_t \sim NID(0, \sigma_x^2) \quad (1-6)$$

称为  $q$  阶滑动平均模型, 简记为 MA ( $q$ ) 模型。

### 2. ARMA 模型的建模

所谓 ARMA 模型的建模, 就是通过对观测得到的时间序列  $\{y_t\}$  ( $t=1, 2, \dots, N$ ) 拟合出适用的 ARMA ( $p, q$ ) 模型, 建模的内容包括数据采集、数据检验与预处理; 模型形式的选取; 模型参数  $\varphi_i$  和  $\theta_j$  的估计, 模型的适用性检验 (实质上是确定模型的阶次  $p$  和  $q$ ) 和建模的策略等, 最关键的步骤是模型参数的估计和模型的适用性检验。

由于 AR 模型的参数估计是线性估计, 在工况监测、故障诊断中显示出更大的优越性。

根据模型参数和方差均可进行故障诊断。

若以设备的振动信号作为序列数据进行时域分析包括时间历程波形、峰谷值、周期能量、均值、有效值、方差、轴心轨迹和概率分布等等, 频域分析包括特征分析, 谐频分析、边频分析、倒频分析、谱能量分析、相关分析、全息谱分析等等。

必须指出的是, 不同的信号分析方法, 只是从不同的角度去观察, 分析信号, 分析的结果反映了同一信号的不同侧面, 因而更真实, 更全面地揭示了信号的本质特征, 不论进行何种信号处理, 既不能增加, 也不会减少信号中任何信息成分。采用多种分析方法比采用单一



分析方法所获得的信息更丰富，使设备故障诊断的准确率更高，判断依据更科学。

#### 四、灰色系统法

灰色系统是指系统的部分信息已知，部分信息未知的系统，区分白色系统与灰色系统的重要标志是系统各因素之间是否有确定的关系。当各因素之间存在明确的映射关系时，就是白色系统，否则就是灰色系统或一无所知的黑色系统。灰色系统理论是控制论的观点和方法的延拓，它是从系统的角度出发，按某种逻辑推理和理性认知来研究信息间关系的。一台设备的状态监测和故障诊断系统由许多因素组成、针对一定的认知层次和研究需要，如果组成系统的因素明确，因素之间的关系清楚，那么这个系统就是白系统；如果部分信息已知，部分信息未知（即系统因素不完全明确，因素间关系和结构不完全清楚，系统的作用原理不完全明了）那就是灰色系统。

灰色系统理论是解决不确定问题的一种工具。模糊理论、模糊集理论、统计理论、贝叶斯准则、信息熵法和神经网络法等等，都是解决设备故障诊断的工具，但各有优缺点。

#### 五、故障树分析法

故障树分析（FTA——Fault Tree Analysis）模型是一个基于被诊断对象结构、功能特征的行为模型，是一种定性的因果模型。首先写出设备故障事件作为第一级（或称顶事件），再将导致该事件发生的直接原因（包括硬件故障、环境因素、人为差错等）并列地作为第二级（或称中间事件），用适当的事件符号表示，并用适当的逻辑门把它们与顶事件联结起来。其次，将导致第二级事件的原因分别按上述方法展开作为第三级，直到把最基本的原因（或称底事件）都分析出来为止。这样一张逻辑图叫做故障树，故障树分析反映了特征向量与故障向量（故障原因）之间的全部逻辑关系。图 1-1 就是简单的故障树。

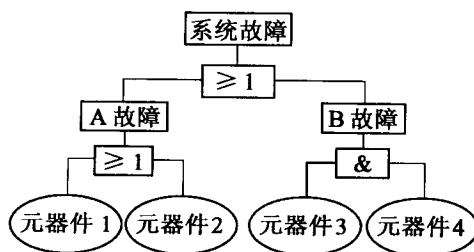


图 1-1 简单故障树

根据故障树来分析系统发生故障的各种途径和可靠性特征量，就是故障树分析法。

### 第三节 基于知识的故障诊断方法

基于知识的故障诊断方法，不需要待测对象精确的数学模型，而且具有智能特性。目前，这种故障诊断方法主要有：专家系统故障诊断方法；模糊故障诊断方法，神经网络故障诊断方法，信息融合故障诊断方法；基于 Agent 的故障诊断方法等。

#### 一、专家系统故障诊断方法

专家系统故障诊断方法，是指计算机在采集被诊断对象的信息后，综合运用各种专家经验，进行一系列的推理，以便快速地找到最终故障或最有可能的故障，再由用户来证实。此种方法国内外已有不少应用实例。专家系统由知识源、推理机、解释系统、人机接口等部分组成，各部分功能如下：