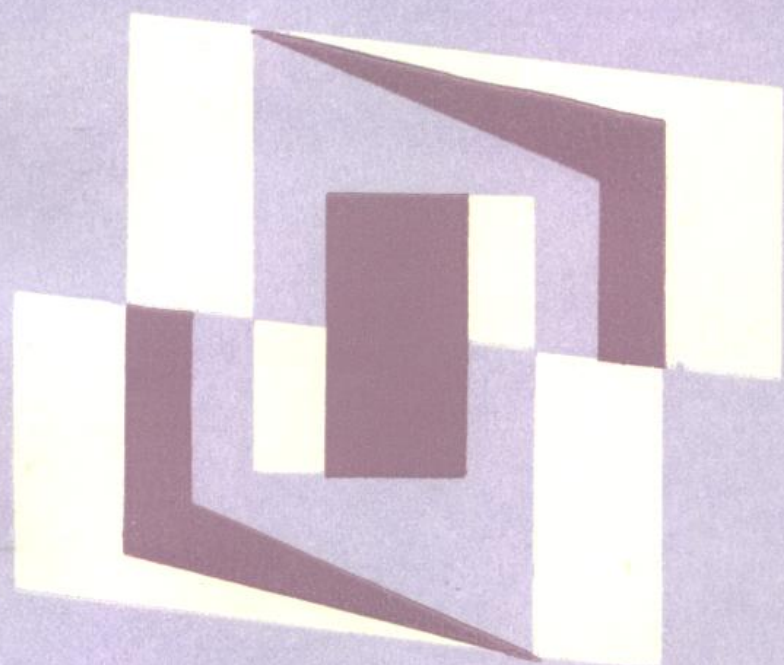


模糊诊断理论 及其应用

吴今培 编著



科学出版社

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书主要从模糊信息处理的角度系统地论述了现代机器故障诊断的原理和方法,诊断模型和算法,人工智能、神经网络和专家系统在机器状态监测及故障诊断中的应用。

全书共分七章,内容包括:现代机器诊断方法的综述,模糊逻辑诊断,模糊聚类诊断,可能性模型诊断,模糊时序模型诊断,智能化模糊诊断以及模糊可靠性分析。本书的特点是:概念清晰,内容新颖,应用面广,可读性强,书中还结合作者的研究成果和国内外应用实例深入浅出地介绍模糊诊断领域内的新课题。

本书可供石油化工、冶金、电力、航空、交通、电子、电气等领域从事机械和机电系统工作的工程技术人员、科研与开发人员、管理维护人员学习参考,也可作为动态系统的模糊信息处理、状态识别、故障诊断以及模糊数学应用等有关专业的参考教材。

模糊诊断理论及其应用

吴今培 编著

责任编辑 鞠丽娜

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂印刷

蓝地公司激光照排

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1995 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1995 年 6 月第一次印刷 印张: 8½

印数: 1—2515 字数: 191000

ISBN 7-03-004513-0/TB·124

定价: 14.80 元

前 言

诊断学(diagnostics)一词源于希腊文,意指鉴别、确定.最早的诊断学莫过于医疗诊断.随着人类文明的进步和科技的发展,人们在越来越多的领域里开展了诊断活动,比如企业诊断和环境诊断等.在工程技术领域中,自从机器问世以来,人们就非常关心它的健康——能否正常工作.对机器设备的运行状态进行诊断的技术至今已有很长的历史,可以说几乎是与机器的发明同时产生的,我们把它叫做传统的诊断技术.

最初,机器设备较为简单,维修人员主要靠感觉器官、简单仪表和个人经验就能胜任故障的诊断和排除工作.在科学技术发展日新月异的今天,生产设备日趋大型化、高速化、自动化和智能化,传统的诊断技术已远远不能适应了.现代化工业生产,一旦因故障停机,损失巨大.现代机器故障诊断学就是为适应这一新形势而产生的.它是以可靠性理论、信息论、控制论和系统论为理论基础,以现代测试仪器和计算机为技术手段,结合各种诊断对象(系统、机器、工程结构、工艺过程)的特殊规律而逐步形成的一门新兴学科.

对机器故障机理、状态监测、诊断和预报的研究,始于美国 and 欧洲.70年代美国的飞机诊断技术,挪威的船舶诊断技术,瑞典的轴承监测技术,以及丹麦的振动监测诊断技术都各有千秋,并取得了显著的社会和经济效益.80年代以来,日本在钢铁、化工、铁路等民用工业部门的诊断技术方面发展很

快,尤其是将模糊理论应用于诊断领域,具有明显优势.当前有关故障诊断的基础性理论研究和应用技术研究的机构已遍及美国、日本的许多大学以及国防军事和民用工业企业的研究部门.1982年由欧洲著名的国际测量学会(IMEKO)技术诊断委员会发起召开的国际学术会议每隔一年或二年举行一次,这对促进诊断技术的发展起了积极作用.目前我国在这一领域的研究已蓬勃开展,并且在冶金、化工、机械、交通、电力及核工业部门取得了一批卓有成效的成果.可以预料,现代机器故障诊断学这一新兴学科的发展将充满生机,并越来越显示出旺盛的生命力.

针对不同的诊断对象及不同的诊断问题产生了众多的诊断方法.每一种诊断方法既有共性,也有特殊的理论和技术关键.本书重点讨论现代机器故障诊断学的一个重要分支——模糊诊断理论及应用.众所周知,机器状态监视与诊断的信息环境,在很多情况下基本上是一个模糊环境.模糊诊断理论就是依据机器的模糊症状进行状态识别、推理并作出决策的科学.犹如司机凭借大脑接收和处理模糊信息的能力可以驱车安全穿越闹市,医生可以根据病人的模糊症状进行准确诊断.因此,模糊诊断是一种颇有前途的诊断方法,现已成为引人入胜的研究热点.

当代模糊诊断的研究主要朝着两个方向进行:一是将模糊诊断与其它诊断相结合,相辅相成;二是为模糊诊断引进自组织、自学习的功能.近年来,国内外学者在上述研究领域发表了大量学术论文,均散见于各类刊物之中,而全面系统地介绍模糊诊断理论及其应用的书籍尚未见到.作者试图在此方面做一初步尝试,以期在某种程度上起到抛砖引玉的作用.尤

其希望能有更多的科技工作者注意到这一新的动向,并参加到它的开发和建设行列中来,以推动它的进一步发展.

本书是在综合国内外有关文献,并结合作者及其研究生们近年来的一些研究工作的基础上撰写的.本书主要从模糊信息处理的角度,阐述了现代机器故障诊断的基本原理,诊断模型和算法,应用技术和实例,并通过人工智能、专家系统和神经网络技术在模糊诊断中的应用,反映出这门学科的最新发展动态.

本书在内容上力求做到深入浅出,理论与应用并重,以使更多的实际工作者能够成为本书的读者.本书可作为高等院校从事动态系统的模糊信息处理、状态识别、故障诊断以及模糊数学应用的教师、研究生的参考书,也可供有关工程技术人员参考.

本书获得广东省高校重点学科项目资助,在撰写过程中得到了中国科学院院士、华中理工大学校长杨叔子教授和华南理工大学博士生导师刘永清教授的关心和指导,在此向他们表示衷心的感谢.

鉴于作者学识水平所限,书中错误和不妥之处恳切希望读者给予批评指正.

吴今培

一九九四年七月

目 录

第一章 现代机器故障诊断方法综述	(1)
1.1 频谱分析诊断法	(3)
1.2 状态模型辨识诊断法	(6)
1.3 随机模型参数估计诊断法	(9)
1.4 灰色模型关联分析诊断法	(12)
1.5 统计诊断法	(14)
1.6 模糊诊断法	(20)
1.7 专家系统诊断法	(23)
第二章 模糊逻辑诊断	(27)
2.1 机器故障诊断中的模糊性	(27)
2.2 模糊逻辑诊断原理	(29)
2.3 模糊诊断矩阵的建立	(34)
2.4 模糊逻辑诊断方法	(53)
2.5 模糊逻辑诊断的工程应用实例	(73)
第三章 模糊聚类诊断	(81)
3.1 模糊聚类诊断的基本原理	(81)
3.2 基于模糊等价关系的聚类诊断法	(87)
3.3 基于模糊相似关系的聚类诊断法	(94)
3.4 柴油机磨损故障部位的模糊聚类诊断	(97)
第四章 可能性模型诊断.....	(107)
4.1 可能性线性系统辨识的 FLP 方法	(107)
4.2 可能性线性系统辨识的 FLS 方法	(112)
4.3 可能性模型诊断的基本原理	(116)

4.4	柴油发动机磨损故障的可能性诊断模型	(118)
第五章	模糊时序模型诊断	(134)
5.1	模糊时序模型的建立	(134)
5.2	模糊时序模型的诊断原理	(145)
5.3	模糊时序模型诊断的判别函数	(149)
5.4	征兆的提取	(153)
第六章	智能化模糊诊断.....	(163)
6.1	基于知识的诊断方法	(163)
6.2	基于知识的诊断推理	(174)
6.3	故障诊断的专家系统方法	(189)
6.4	故障诊断的神经网络方法	(201)
6.5	基于神经网络的故障诊断专家系统方法	(218)
第七章	模糊可靠性分析.....	(224)
7.1	模糊可靠性概论	(224)
7.2	模糊可靠度计算	(227)
7.3	系统的模糊可靠度	(236)
7.4	系统的动态可靠度	(247)
参考文献		(259)

第一章 现代机器故障诊断方法综述

当前国内外流行的“诊断”技术方面的术语有两种：一种叫做机械故障诊断(mechanical fault diagnosis)，包括机械设备、工程结构和工艺过程的故障诊断；另一种叫做技术诊断(technical diagnosis)或工程诊断(engineering diagnosis)，这样可以从更广泛的角度来理解诊断. 本章着重介绍机械设备故障诊断的主要方法.

机械设备故障诊断技术是指对异常状态的检测、异常状态原因的识别以及包括异常状态预测在内的各种技术的总称.

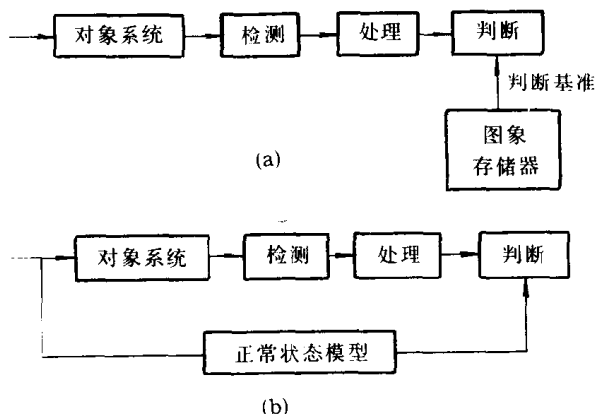


图 1.1 异常状态检测

异常状态的检测要求能够准确又方便地发现状态正常还

是异常,发现有哪些故障.检测的基本方法是将系统正常运行的值作为标准值加以记录,当数值超过标准值允许的误差时,认为是异常状态.当运行条件出现种种变化时,标准值也会随之发生变化.通常是通过图 1.1 所示的系统来判断其标准值,检测其异常状态的.即有两种检测异常的方法,第一种是如图 1.1(a)所示的运行模式,记录其正常的图形,并与图象存贮器中的内容进行校核.第二种如图 1.1(b)所示,它是以控制理论的模式为基础来进行判断的.

异常状态原因的识别是由故障现象(亦称症状或征兆)寻找故障原因,以期从根本上予以排除.寻找原因的任务包括:故障起因是什么?故障发生在什么部位?识别的方法大致为三种.第一种是对收集的数据,采用多变量解析和因果关系的树形结构的处理方法.第二种是基于系统理论的识别法.如图 1.2 所示,它是从系统的输入、输出信息中寻求系统状态的模型,估计非测定参数后,再根据这一非测定参数与正常值之间差值的大小来识别异常状态的方式.该方法实质上是在时域内识别出每个时刻的系统——被诊断对象的实时状态,抽象到理论上来看诊断问题就是系统辨识问题.所以,这种方法能够适用于不同的系统,其应用范围很广.第三种方法是利用知识工程学,即采用专家系统的诊断法.专家系统实际上是人工智能计算机程序系统,它能利用目前大量人类专家的专门知识和经验,用仿人类专家推理过程的计算机模型来解决工程技术中的某些复杂问题,并能达到人类专家解决问题的水平.

异常状态预测是指推测故障发展的后果及相应的时间历程.例如机器的轴出现了裂缝,就需要诊断:1)是否还可运行?2)还能运行多久?可见识别和预测是诊断技术的两个不可缺少的方面.

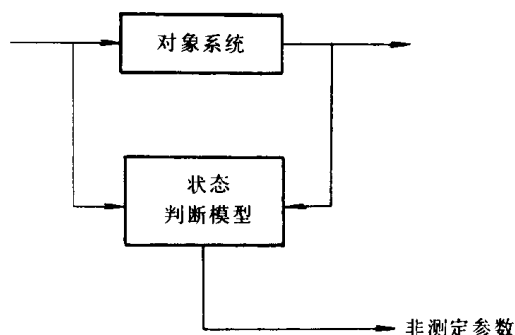


图 1.2 异常原因判断

综上所述,诊断技术是根据机械设备运转过程中发生的各种各样的信息来进行识别和诊断的,或者对机器的零件、部件和整机进行激励使之产生各种不同的信息来对系统的运行状态做出判断. 诊断信息的多样性,决定了诊断方法将涉及到数学、物理、力学和化学等方面. 这些涉及数学、物理、力学和化学的方法为机械设备、工艺过程和生产系统的正确诊断提供了各方面的信息,并且为由局部推测整体和由现象判断本质建立了可靠的依据. 抽象到理论上来看,工程系统的诊断就是信息处理和系统辨识在现代诊断技术中的应用.

1.1 频谱分析诊断法

随着机械设备向着大型、精密和自动化方向的发展,机械设备的状态监测与故障诊断问题的重要性则日益突出. 频谱分析技术推动了现代机器故障诊断学的发展,尤其是在对旋转机械的监测和诊断方面,频谱分析技术的应用更加广泛而

有效,这主要表现在两个方面:一方面理论工作者对旋转机械的振动机理做了越来越深入的研究,为更好地运用频谱分析技术提供了理论基础;另一方面工程技术专家在实践中不断总结经验,将各种频谱图与相应的故障原因及可能出现的频率分布进行统计、归纳、对比,为后人分析频谱图提供了较为有效的手段.因为机械设备的运行状态及故障有其特定的征兆,反映在振动功率谱中,则是某些特定的谱峰.如果将大量典型的振动信号频谱值和故障信号频谱值以一定的表格形式存放在计算机中,构成诊断用频谱数据库,那么通过谱峰的寻找对比,由其高度变化和各种故障原因可能出现的频率分布概率,便可得出相应的诊断结论.但要得到数据库的对应关系,则有赖于进行大量的模拟实验,这往往需要付出很大的代价,有时甚至是不可能做到的.因此,提出另外一种做法,就是在机器正常运行状态下采集一组时域信号,通过傅里叶变换成频域信号,给出正常运行的功率谱的极限指标,一旦超过此极限指标时,则将机器判为异常运行状态.整个步骤如下:

(1)将传感器采集的时域信号 $\{x_t\}(t=0,1,\cdots,N-1)$ 经过傅里叶变换或时序建模得到傅里叶功率谱^[1]和时序模型谱^[2],傅里叶功率谱由下式求出:

$$\begin{aligned} S_x(\omega) &= \frac{1}{2\pi N} \left| \sum_{t=0}^{N-1} x_t e^{-j\omega t} \right|^2 \\ &= \frac{1}{2\pi N} |X(\omega)|^2, \quad -\pi \leq \omega \leq \pi \quad (1.1.1) \end{aligned}$$

其中 $X(\omega)$ 是信号序列 $\{x_t\}$ 的快速傅里叶变换(FFT).

时序模型谱由下式求出:

$$S_x(\omega) = \frac{\sigma_a^2 \Delta}{\left| 1 - \sum_{k=1}^n \varphi_k e^{-j\omega k \Delta} \right|^2}, \quad -\frac{\pi}{\Delta} \leq \omega \leq \frac{\pi}{\Delta} \quad (1.1.2)$$

其中 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ 及 σ_a^2 为自回归模型 $AR(n)$ 的参数估计值及方差; Δ 为采样间隔。

(2) 将功率谱等分为 n 个区域, 其中心频率为 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$, 相应的每一矩形面积内的平均功率为 $p_1, p_2, \dots, p_n$, 这样, 每张功率谱可以用一个 n 维向量表示, 如图 1.3 所示。

$$\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_n)^T \quad (1.1.3)$$

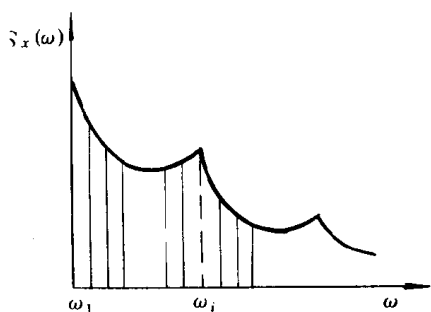


图 1.3 用 n 维向量表示功率谱

(3) 以上划分的结果, 往往需要用 50—100 维的向量表示一张功率谱, 并且向量中的每个元素并不都是线性独立的. 为了简化计算机运算和监视过程, 需要进行特征抽取, 同时将原来的 n 个元素, 用新的 p 个元素组成的向量来代替:

$$\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_p), \quad p \ll n \quad (1.1.4)$$

特征抽取的基本方法是主成分分析, 将在第四章阐述。

(4) 决定极限指标 a_i, b_i . 设向量 $\mathbf{y}$ 的元素 y_i 具有概率密度 $p_i(y_i)$, 则有

$$\left. \begin{aligned} p(y_i \leq a_i) &= \int_{-\infty}^{\infty} p_i(y_i) dy_i \\ p(y_i \geq b_i) &= \int_{b_i}^{\infty} p_i(y_i) dy_i \end{aligned} \right\} \quad (1.1.5)$$

如果 y_i 的任一观察值超过 (a_i, b_i) 的界限之外, 则认为机组是处在不正常状态. 给定 $p(y_i \leq a_i)$ 和 $p(y_i \geq b_i)$ 之值, 用数值积分的方法对式(1.1.5)求解 a_i 和 b_i 值, 即是要求的极限指标.

(5) 概率密度函数 $p_i(y_i)$ 的估计. 由于 $p_i(y_i)$ 是单独进行估计的, 我们用 $p(y)$ 来表示任意向量元素 y_i 的概率密度函数. 设 y_i 的 N 个观察值在 0 与 $y_{\max}$ 间变化, 则可将 $(0, y_{\max})$ 区间分为 I 个等分, 作出如图 1.4 所示的直方图, 极限指标 a 与 b 可直接由直方图上确定. 这种方法称为直方图近似法.

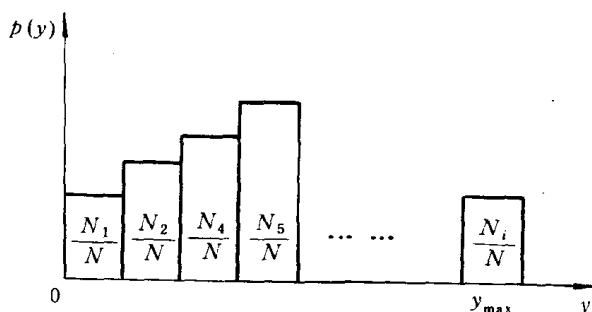


图 1.4 直方图近似法

另外还有统计推理近似法^[3], 谱峰自动识别法^[4]等, 这里不逐一介绍.

1.2 状态模型辨识诊断法

在工业生产过程中出现故障是常见的事. 如果把一个工业过程看成是一个系统, 则系统的任何一部分都有可能出现故障. 比如在化工过程中就有可能出现局部堵塞、泄漏等故障. 最初, 故障是不稳定的、随机的, 而后就有可能变为稳定的, 甚至是永久性的, 最后还可能会导致重大事故. 因此, 应及

时诊断出系统的故障,了解系统的情况以保证安全生产.

传统的诊断故障的方法是观察一些重要变量的变化情况. 如果这些变量都在设定值附近,就认为系统是正常的. 但是,对于一个动态系统,特别是当系统的各个变量变化幅度较大时,单纯由这些变量来直接判断故障是不容易的. 而且,系统中往往还存在有反馈(自动控制或人工控制回路),于是,系统中不太严重的故障就会由于反馈的存在而被掩盖. 例如,一个用水冷却的换热器结垢时,由于换热效率降低,就应当人工或自动地把冷却水的阀门开大,以使温度保持不变. 这样,从整个系统的重要变量(比如温度)上就很难及时地诊断出系统的故障.

最近提出一种新的故障诊断方法,它是应用在线系统辨识技术来实时地为系统建立数学模型. 当系统中存在故障时,系统的输入输出关系就会改变,这些变化就反映在数学模型中. 因此,当系统的数学模型参数变化较大时,系统就有可能存在故障.

所谓参数是指系统的状态模型的参数. 设系统的状态模型为

$$\left. \begin{aligned} x_{i+1} &= f(x_i, \theta_i, t) + w_i \\ y_i &= h(x_i, \theta_i, t) + v_i \end{aligned} \right\} \quad (1.2.1)$$

其中 $x_i \in R^n$ 与 $y_i \in R^m$ 分别为系统的状态向量和观测向量; w_i 和 v_i 分别为系统噪声与观测噪声; $\theta_i \in R^p$ 为系统的参数向量.

在应用系统辨识的诊断方法时^[5],首先要在系统正常运行时建立一个正常状态的数学模型,并用卡尔曼滤波器的原理递推地估计出参数 $\hat{\theta}_0$,然后在系统运行中实时地辨识系统

的参数 $\hat{\theta}_M$ ，以求出系统参数的变化 $\Delta\hat{\theta} = |\hat{\theta}_M - \hat{\theta}_0|$ 。当然，直接由 $\Delta\hat{\theta}$ 是不容易判断系统是否有故障存在。为此可求出参数变化的协方差矩阵：

$$\Sigma = E\{(\hat{\theta}_M - \hat{\theta}_0)(\hat{\theta}_M - \hat{\theta}_0)^T\} \quad (1.2.2)$$

利用这个协方差矩阵和参数估计值组成的检验量便可进行假设检验，以判断系统中是否存在故障。

系统辨识的诊断方法曾用于一个中试设备上。如图 1.5 所示的两个水槽，它们的液位是由一台计算机控制。当水槽 T_2 出现泄漏时，该水槽的输出（液位 H_2 ）与输入（流量 Q_2 ）之间的关系将发生变化，从而使系统的参数发生变化。利用所选的检验量成功地诊断出了这一变化。

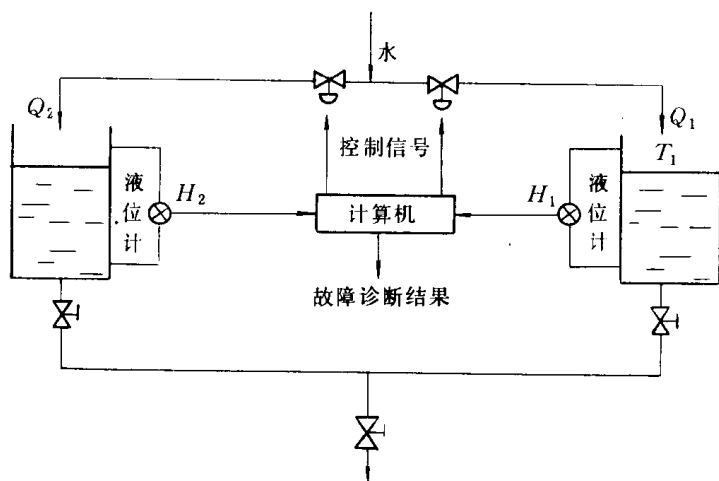


图 1.5 系统辨识诊断的中试系统

系统辨识诊断方法的优点是在线跟踪参数的变化，故障

检测快而准,诊断的实时性强;缺点是对非线性系统与时变系统,由于参数辨识有一定困难,所以应用受到一定的限制。

1.3 随机模型参数估计诊断法

对任何系统进行过程的状态监测,只需提取反映系统当前时刻的总体平均势态信息的参数和当前时刻瞬时状态信息变化率参数,就可对系统运行状态作出合理的表征^[6]。

表征系统总体平均势态的信息,主要是信号的能量、信息距离、散度、方差、散布矩阵、相关矩阵、信号所建时序模型的参数和残差以及它们的有效组合等,定义为 $\Sigma(k)$ 。 $\Sigma(k)$ 反映系统运行状态相对初始设定状态的偏离程度。这种偏离越大, $\Sigma(k)$ 也越大;超出一定范围,则认为系统当前状态已不属于初始设定的系统状态。如果系统运行状态平稳, $\Sigma(k)$ 也相对稳定,变化不大。因此,对缓变性状态或故障一直存在的过程,在 $\Sigma(k)$ 的值的大小上能客观地反映,而对冲击性、阶跃性的随机故障的起始点则反映迟钝且相对滞后。

反映系统瞬时状态信息变化参数,实质上是以前一时刻的状态信息来检测后一时刻的状态变化情况。设 $\Phi(k)$, $\Phi(k-1)$ 分别为 k 时刻、 $(k-1)$ 时刻反映系统运行状态的状态信息参数,则 $\Delta\Phi(k)=\Phi(k)-\Phi(k-1)$ 为 k 时刻的状态信息变化程度或变化率。相对状态变化越大, $\Delta\Phi(k)$ 也越大,超过一定的变化阈值,则认为状态发生显著变化。显然,这一参数不受工况变化的影响。从 $\Delta\Phi(k)$ 可知,对状态平稳的正常过程, $\Phi(k)$ 很小,接近于0,对冲击性变化, $\Delta\Phi(k)$ 迅速增大后很快变小,因为系统很快又恢复了原来的状态;对于阶跃性状态变化, $\Delta\Phi(k)$ 增大后,很快衰减;而对状态变化缓慢过程以及一

开始就处于异常的过程状态, $\Delta\Phi(k)$ 始终保持很小的值. 因而 $\Delta\Phi(k)$ 对冲击性、阶跃性等随机变化的起始点反映灵敏, 能迅速反映系统状态的突变过程, 而对缓变过程、一直存在的异常状态和阶跃变化后的状态, 不能正确客观地反映.

综上所述, 只需提取这样性质的两类特征参数, 就能全面表征系统的运行状态, 对系统实行状态监测和故障诊断.

如何提取 $\Delta\Phi(k)$ 和 $\Sigma(k)$ 呢?

我们提取机器运行时的振动信号去建立时序模型 $AR(n)$, 其参数特征向量 $(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n, \sigma_a^2)^T$ 凝聚了动态信号的主要信息, 能体现系统的运行状态. 因此, 选择 $AR(n)$ 模型参数估计的变化率作为 $\Delta\Phi(k)$, 而选择动态信号的方差作为 $\Sigma(k)$ 就能对系统运行状态的好坏作出评价.

$AR(n)$ 模型为

$$x_k = X^T(k)\Phi(k) + a_k \quad (1.3.1)$$

式中

$\Phi(k) = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n)^T$ 为模型参数;

$X(k) = (x_{k-1}, x_{k-2}, \dots, x_{k-n})^T$ 为样本序列;

a_k 为均值等于零的白噪声.

利用递推最小二乘算法可得到 $AR(n)$ 模型的参数估计:

$$\left. \begin{aligned} \Phi(k) &= \Phi(k-1) + K(k)[x_k - X^T(k)\Phi(k-1)] \\ K(k) &= P(k-1)X(k)[1 + X^T(k)P(k-1)X(k)]^{-1} \\ P(k) &= P(k-1) - K(k)X^T(k)P(k-1) \end{aligned} \right\} \quad (1.3.2)$$

式(1.3.2)具有深刻的意义, 它表示模型参数的新估计 $\Phi(k)$ 等于原估计 $\Phi(k-1)$ 予以校正. 校正项为 $K(k)[x_k - X^T(k)\Phi(k-1)]$, 它是新数据 x_k 与新数据的估计 $X^T(k)\Phi(k-1)$ 之差的加权处理, 加权系数为 $K(k)$, $K(k)$ 又称校正系数.