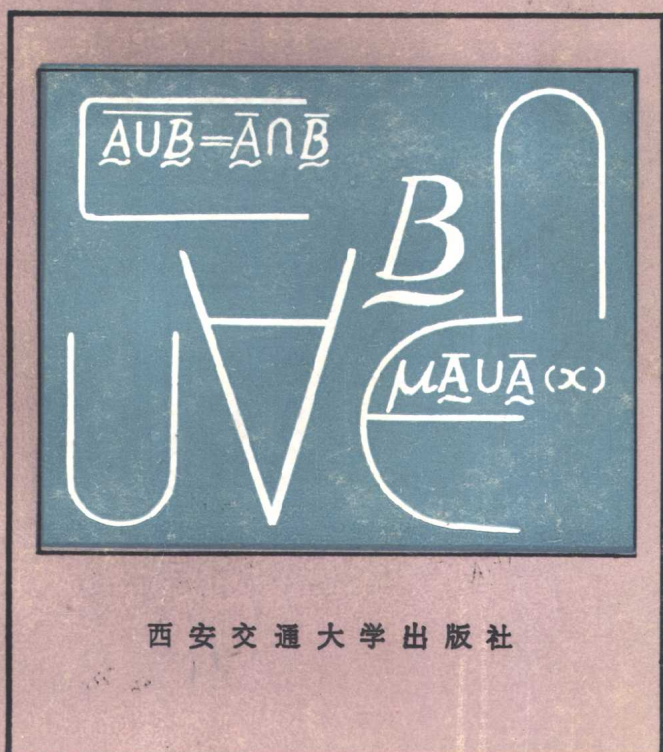




机械故障诊断丛书

模糊诊断原理及应用

张涵埙 何正嘉 编



西安交通大学出版社

15

机械故障诊断丛书之十五

模糊诊断原理及应用

张涵埽 何正嘉 编著

西安交通大学出版社

内 容 提 要

模糊数学是数学的一个新分支,已应用于国民经济的各个领域。近几年来,在机械故障诊断技术中,它的应用虽属刚刚起步,却取得了显著的效果。

本书共分六章,通过电力、石油、机械、交通、电子等部门的应用实例,分别介绍了各种模糊诊断原理及其在工程中的应用。本书可作为科研、工程设计、设备管理等人员进行机械故障诊断工作的参考用书,亦可作为高等学校各工程类专业(如航空、电子、电力、机械制造、交通等)本科生和研究生的教学参考书。

(陕)新登字 007 号

模糊诊断原理及应用

张涵埙 何正嘉 编著

· 责任编辑 杨 玲

*

西安交通大学出版社出版

(邮政编码:710049)

西安交通大学出版社印刷厂印装

· 陕西省新华书店经销

*

开本 787×1092 1/32 印张 4.75 字数:95 千字

1992 年 6 月第 1 版 1992 年 6 月第 1 次印刷

印数:1—2500

ISBN7-5605-0447-7/TH·22 定价:2.80 元

“机械故障诊断丛书”总前言

机械故障诊断技术是有关设备运行、维护的一项新兴技术。它的推广应用不但根本改变了原有设备维修制度，而且在保证设备安全运行、消除设备事故方面起着巨大的作用。当前，机械设备运行状态的监测，已经从单凭直觉的耳听、眼看、手摸发展到采用先进的传感技术、计算机和信息处理技术。新的监测手段，诸如超声、声发射；红外等，层出不穷。人工智能、专家系统、模糊数学等新兴学科在机械故障诊断技术中也找到了用武之地。

近年来，在国家计委、中国设备管理协会和有关学会的大力支持下，机械故障诊断技术在各行各业中推广应用。它已经并将继续在实践中获得巨大的经济效益和社会效益。本丛书是为满足广大工程技术人员的迫切需要而编写的；同时，也希望这套丛书能引起高等学校机械类专业广大师生和有关研究人员的兴趣。

在组织编写这套丛书时要求既注意科学性，又注意实用性。内容有一定的理论深度，力求阐明机械故障诊断技术的理论基础，努力避免过多的数学推导，既能为广大实际工作者所接受。对研究人员和高等学校的师生也有参考价值。为了尽量节省读者的精力和时间。每本就一个专题编写，简洁明了，以便于读者阅读和使用。

由于各类产业机械既有各自的特点，又有某些共同点，机械故障诊断技术本身又正处于迅速发展的阶段，本丛书在编

写时着重讨论多个行业中机械设备的共同技术问题，诸如轴承、齿轮、转子、润滑油等的监测与诊断，同时尽量向读者介绍和展示一些诊断方面的新技术、新动向，以开阔视野。丛书也注意总结作者的理论研究成果和实际经验，以促进这些成果和经验在生产中发挥应有的作用。

本丛书和广大读者见面之后，编者和作者衷心希望能得到广大读者的反馈信息，以便改进我们的工作，提高丛书的质量。

“机械故障诊断丛书”编辑委员会

1988年2月

前 言

自从美国自动控制理论家 L. A. 查德创立模糊数学以来,短短的 20 年中,模糊数学及其应用得到了迅速的发展,已经应用于人文学、社会学、经济学和自然科学等各个领域。实践证明,模糊数学是一个崭新而行之有效的工具,在应用中取得了很好的效果。

模糊数学是研究事物模糊现象的。这些事物其本身在概念上是不清晰的,其定义没有精确的外延。例如,人们常用“青年”、“中年”和“老年”来说明年龄的大小;机械运行中常用“轰隆声”、“转速不稳”、振动“太大”或“很小”、噪声“悦耳”来说明机器的动态质量,而这些都是模糊不清的概念。机械故障诊断中经常用这些模糊不清的自然语言来说明故障的特征,而为了更准确、更有效地判断具有模糊征兆的故障,就必须用模糊集合的概念对故障征状是否属于某个故障原因进行描述。这种描述不是简单地加以肯定或否定,而是用归属的程度“隶属度”予以刻画,或者通过分类、预报、综合评判、模式识别和可靠性分析作出定量判断,从而诊断出故障原因。

尽管模糊数学发展历史还很短,理论体系尚不完备,但应用于国民经济的各个研究部门时,却大有异军崛起之势。一些复杂的机械系统,其故障形成的原因与征兆的因果关系错综复杂,故障信息用测试手段不易分离,征兆与故障之间无法建立数学模型,这时只有在猎取系统故障的综合效应,积累维修经验和集中专家意见的前提下,用模糊方法进行故障诊断。这是目前工程技术界极为关注的课题。

模糊数学在机械故障诊断中的应用,已引起人们的极大兴趣,并且已取得了一些对生产实际很有价值的成果,对此广大工程技术人员渴望得到系统了解。作者以近几年来本单位及国内一些部门解决机械故障诊断中的一系列问题的研究成果为实例,在阐明模糊诊断基本原理的同时,着重讲述了其在机械故障诊断中的使用方法。

本书的编写以模糊数学方面的知识为基础,读者在学习和使用这本书时,可先阅读模糊数学基础知识方面的图书,如本书参考文献[1~6]所列。我们真诚地希望本书对工程技术人员,特别是从事设备维修与故障诊断的工作人员有所启示和帮助。

作者 1991 年 12 月

常用数学符号

U, V, X, Y 论域

$\in$ 属于

$\notin$ 不属于

A, B, C 普通集

$\underline{A}, \underline{B}, \underline{C}$ 模糊集

$\emptyset$ 空集

$\subset$ 包含

$\cup$ 并

$\cap$ 交

$\neg A$ 或 A^c (A^c 或 $\neg A$) 集合 A ($\underline{A}$) 的补集

$\forall$ 对于所有的

$\exists$ 至少存在一个

$\rightarrow$ 映射

$\mapsto$ 指明对应规则的映射

$\equiv$ 恒等于

$\vee$ 或 $\max$ 取大运算

$\wedge$ 或 $\min$ 取小运算

$\Rightarrow$ 等价关系

$\sum_{i=1}^n$ n 项求和

$\oplus$ 有界和运算, 外积

$\cdot$ 内积, 直积

$\int$ 连续情况下模糊元素的总括

$\uplus$ 上积

$\Downarrow$ 下积

$\prod_{i=1}^n, \times$ 在四则运算中表示乘积, 在向量空间中表示直积

$\mu_{\underline{A}}(x), \underline{A}(x)$ 元素 x 隶属于模糊集 $\underline{A}$ 的隶属度, 即 $\underline{A}$ 的隶属函数

$A_{\lambda} = \{x | \mu_{\underline{A}}(x) \geq \lambda\}$ 模糊集 $\underline{A}$ 的 λ 水平截集

$\underline{R}_1 \cdot \underline{R}_2$ 模糊关系 $\underline{R}_1$ 与 $\underline{R}_2$ 合成运算

xRy x 和 y 有关系 R

$d(\underline{A}, \underline{B})$ $\underline{A}$ 与 $\underline{B}$ 间的距离

$\sigma(\underline{A}, \underline{B})$ $\underline{A}$ 与 $\underline{B}$ 间的贴近度

目 录

“机械故障诊断丛书”总前言

前言

常用数学符号

第 1 章 模糊诊断信息的获取

- 1.1 隶属函数 (1)
- 1.2 模糊统计 (2)
- 1.3 二元对比排序法 (3)
- 1.4 几种常见的模糊分布 (11)
- 1.5 动态信号处理 (19)
- 1.6 精密齿轮箱杂音质量检验 (24)

第 2 章 模糊综合评判

- 2.1 模糊变换 (26)
- 2.2 模糊综合评判方法 (26)
- 2.3 多级模糊综合评判 (32)
- 2.4 模糊综合评判常用的数学模型 (36)
- 2.5 齿轮磨床精度综合评判 (39)
- 2.6 录音机机芯动态特性模糊诊断 (50)

第 3 章 模糊模式识别

- 3.1 模糊模式识别方法 (57)
- 3.2 模糊性度量 (58)
- 3.3 汽轮发电机组运行状态模糊识别 (64)
- 3.4 精密齿轮箱低频撞击杂音的模糊识别 (68)

第4章 模糊聚类分析

- 4.1 相似系数..... (71)
- 4.2 基于等价关系的聚类分析..... (75)
- 4.3 基于模糊相似关系的聚类分析..... (78)
- 4.4 回转机械振动谱模糊分类..... (86)

第5章 近似推理

- 5.1 自然语言的量化..... (94)
- 5.2 模糊逻辑 (100)
- 5.3 模糊推理 (101)
- 5.4 模糊逻辑在机器故障诊断中的应用 (107)

第6章 模糊集在机械产品可靠性分析中的应用

- 6.1 寿命分布模型的模糊识别 (114)
- 6.2 故障树的模糊分析方法 (122)

参考文献

第 1 章 模糊诊断信息的获取

1.1 隶属函数

现代技术的飞速发展,使机器不断精密化和系统化。机器的运行复杂程度越高,精确程度就越低,故障现象的模糊性就越强。机器状态监测和故障诊断中采用的多种手段,诸如振动和噪声监测、润滑油油样分析、温度测定、声发射测定等等有一个共同特点,那就是用机器运行过程中的某种动态特性进行测量间接得到的信息作为判断机器运行状态的特征时就带有某些“不确定性”。采用模糊诊断,也就是将模糊数学引进模糊领域,使问题变得比较清晰。

模糊性概念的外延对应的不是普通集合,而是模糊集合。当确定了某一研究对象,也就是给定了论域 U 上的一个模糊子集,这样的模糊子集完全由其隶属函数所描述。进行模糊诊断首先要获取诊断信息,模糊诊断信息可借助模糊集合论中最基本和最重要的隶属函数来获得。所以在进行机器故障模糊监测和诊断时,首先应研究如何确定隶属函数。

隶属函数的确定,需从模糊现象的具体特点出发,要符合客观规律,不能主观臆造。由于模糊现象在亦此亦彼中存在着差异,因此,借助专家和操作人员的丰富经验,通过机器正常运行与故障状态的相互比较,采用一定的人为技巧,将会使所

确定的隶属函数具有一定的客观规律性。

确定隶属函数,常用的方法大致有以下几种:

- (1)通过模糊统计来确定。
- (2)采用二元对比排序法来确定。
- (3)借用常见的模糊分布来确定。
- (4)利用动态信号处理的结果,经过适当转换得到隶属函数。

此外,尚有不少其它方法,例如在某些场合下可吸取概率统计的处理结果;可用推理的方法及专家评分的方法来确定隶属函数。

1.2 模糊统计

模糊统计,在形式上类似于概率统计,都是用确定性手段研究不确定性。但是,模糊统计与概率统计属于两种不同的数学模型,它们有着重要的区别。

随机试验最基本的要求是,每次试验中,事件 A 发生与否必须是确定的,各次试验中,基本空间 Ω 上的元素 ω 是在变动的。作 n 次试验,可进行如下计算:

$$A \text{ 发生的频率} = \frac{“\omega” \in A \text{ 发生的次数}}{n} \quad (1.1)$$

随着 n 的增大,将会呈现出频率的稳定性。频率稳定所在的那个数,叫做 A 在限制 S 下的概率,这是概率统计的特点。

模糊统计试验的基本要求是,要对论域上的一个固定元素 u_0 是否属于论域上的一个可运动的普通集合 A 。(A 联系于一个模糊集合 A ,其相应的模糊概念为 a , A 的每一次固定

化,都是对 a 作出的一个确定划分,它表示 a 的一个近似外延),作出确切的判断。这就要求每次试验中 A 的性质必须是个确定的普通集合。在各次试验中, u_0 是固定的, A 的值是在变动的,作 n 次试验,可进行如下计算:

$$u_0 \text{ 对 } A \text{ 的隶属频率} = \mu(u_0) = \frac{\text{"}u_0 \in A\text{" 的次数}}{n} \quad (1.2)$$

随着 n 的增大,隶属频率也会呈现稳定性(称为隶属频率的稳定性),频率稳定所在的那个数,叫做 u_0 对 A 的隶属度。这是模糊统计的特点。

1.3 二元对比排序法

二元对比排序法是一种实用的确定隶属函数的方法,它通过事物之间的两两对比,确定某种特征下的顺序,由此决定隶属函数的大体形状。二元对比排序法可分为相对比较法、对比平均法、优先关系定序法和相似优先比法四种。

1.3.1 相对比较法

设定论域 U 中的元素 $x, y, \dots$, 等等在按某种特性进行排序前,首先在二元对比中建立比较级,然后再按一定方法转化为总体的排序。

设定一对元素 (x, y) , 所谓二元比较级就是指数对 $(f_r(x), f_s(y))$ 需满足:

$$0 \leq f_r(x) \leq 1, \quad 0 \leq f_s(y) \leq 1$$

其含义是,在 x 和 y 的二元对比中,如果 x 具有某特性的程度用 $f_r(x)$ 表示,则 y 具有该特性的程度用 $f_s(y)$ 表示,举例如

下。

设论域 $U = \{x, y, z, w\}$, 其中, x 表示长子, y 表示次子, z 表示三子, w 表示父亲。若只考虑长子和次子与父亲的相似问题, 则长子相似于父亲的程度为 0.8, 次子相似于父亲的程度为 0.5; 若仅考虑次子与三子, 则次子相似于父亲的程度为 0.4, 三子相似于父亲的程度为 0.7; 若仅考虑长子和三子, 则长子相似于父亲的程度为 0.5, 三子相似的程度为 0.3。这时建立的关系如下:

$$f_z(x) = 1, \quad f_y(x) = 0.8, \quad f_x(x) = 0.5$$

$$f_z(y) = 0.5, \quad f_y(y) = 1, \quad f_x(y) = 0.4$$

$$f_z(z) = 0.3, \quad f_y(z) = 0.7, \quad f_x(z) = 1$$

以上的 $f_i(x)$ 等表示他们之间的相似程度, 也可归纳为表 1.1。

表 1.1 二元相对比较级举例

$f_i(i) \backslash j$	x	y	z
i			
x	1	0.8	0.5
y	0.5	1	0.4
z	0.3	0.7	1

$$\text{令} \quad f(x/y) = \frac{f_y(x)}{\max(f_z(y), f_y(x))} \quad (1.3)$$

显然有

$$f(x/y) = \begin{cases} f_1(x)/f_z(y) & f_y(x) \leq f_z(y) \\ 1 & f_y(x) > f_z(y) \end{cases} \quad (1.4)$$

此处 $x, y \in U$, 以 $f(x/y)$ 为元素作成矩阵, 并将 $f(x/x)$ 取值为 1, 则这个矩阵叫做相及矩阵。以上问题由式(1.3)和(1.4)可得到

$$\begin{aligned} f(x/x) &= 1, & f(x/y) &= 1, & f(x/z) &= 1 \\ f(y/x) &= \frac{5}{8}, & f(y/y) &= 1, & f(y/z) &= \frac{4}{7} \\ f(z/x) &= \frac{3}{5}, & f(z/y) &= 1, & f(z/z) &= 1 \end{aligned}$$

构成的相及矩阵为:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \frac{5}{8} & 1 & \frac{4}{7} \\ \frac{3}{5} & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

上述矩阵中, 每一行取最小值, 然后按大小排序, 得

$$1 > \frac{3}{5} > \frac{4}{7} \text{ (亦即 } 1 > 0.60 > 0.57 \text{)}$$

结论是长子最像父亲(1), 幼子次之(0.60), 次子最不像父亲(0.57)。

1.3.2 对比平均法

设定一对元素 (x, y) , 其二元比较级的数对 $(f_s(y), f_s(x))$ 仍满足

$$0 \leq f_s(x), f_s(y) \leq 1$$

设论域 $U = \{x, y, z, \dots\}$ 是要按某种属性排序的全体对象, 定义一个二元函数:

$$g: U \times U \rightarrow [0, 1]$$

它代表 U 中元素之间的一种模糊关系, 有

4.5.3.3.3

$$g(x, y) = f_x(x), g(y, x) = f_x(y), \dots \quad (1.5)$$

这里 $f_x(x), f_x(y)$ 就是二元比较级。

在论域 U 中假设有测度 σ , 则可定义

$$f(x|U) = \int_U g(x, y) d\sigma(y) \quad (1.6)$$

这样可按 $f(x|U)$ 从大到小排出具有某种特性的优劣顺序。

若归一化 $\int_U d\sigma(y) = 1$, 则 $f(x) = f(x|U)$ 便可作为排序所依据的模糊属性的隶属函数。

例如, 设论域为某机器的故障源 U , 则

$U = \{\text{直流电动机}(x), \text{齿轮减速器}(y), \text{传动轴轴承}(z)\}$

现考虑各故障源的安全可靠性, 则论域 U 中元素之间的模糊关系, 即两两之间安全可靠的比较级如下。

只考虑直流电动机和齿轮减速器, 直流电动机的安全可靠程度为 0.8, 齿轮减速器的为 0.7, 则

$$g(x, y) = 0.8, \quad g(y, x) = 0.7$$

如果只考虑直流电动机和传动轴轴承, 则

$$g(x, z) = 0.9, \quad g(z, x) = 0.5$$

同理, 只考虑齿轮减速器和传动轴轴承, 则

$$g(y, z) = 0.8, \quad g(z, y) = 0.4$$

上述二元比较级的情况可列成表 1.2。

表 1.2 直流电动机、齿轮减速器、传动轴轴承二元比较级

$g(u, v)$	$u \backslash v$	x	y	z
x		1	0.8	0.9
y		0.7	1	0.8
z		0.5	0.4	1