

南京信息工程大学



《故障诊断与专家系统》作业

题 目： 模糊数学在故障诊断中的应用

学 院 信 息 与 控 制 学 院

专 业 15 控 制 工 程

姓 名 史 凯

学 号 20152283418

任课教师 李 涛

成 绩

故障诊断与专家系统

1. 故障诊断

1.1 故障诊断的定义

利用各种检查和测试方法，发现系统和设备是否存在故障的过程是故障检测；而进一步确定故障所在大致部位的过程是故障定位。故障检测和故障定位同属网络生存性范畴。要求把故障定位到实施修理时可更换的产品层次（可更换单位）的过程称为故障分离。故障诊断就是指故障检测和故障分离的过程。

系统故障诊断是对系统运行状态和异常情况作出判断，并根据诊断作出判断为系统故障决策提供依据。要对系统进行故障诊断，首先必须对其进行检测，在发生系统故障时，对故障类型、故障部位及原因进行诊断，最终给出解决方案，实现故障决策。

1.2 故障诊断的主要任务

故障诊断的主要任务有：故障检测、故障分离、故障估计及故障决策等。其中：故障检测是指与系统建立连接后，周期性地向下位机发送检测信号，通过接收的响应数据帧，判断系统是否产生故障；故障分离就是系统在检测出故障之后，通过分析原因，判断出系统故障的类型；故障估计是在前两部的基础之上，细化故障种类，诊断出系统具体故障部位和故障原因，为故障决策做准备；故障决策是整个故障诊断过程中最后也是最重要的一个环节，需要根据故障原因，采取不同的措施，对系统故障进行排除。

2.故障诊断系统的性能指标

1) 故障检测的及时性：是指系统在发生故障后，故障诊断系统在最短时间内检测到故障的能力。故障发生到被检测出的时间越短说明故障检测的及时性越好。

2) 早期检测的灵敏度：是指故障诊断系统对微小故障信号的检测能力。故障诊断系统能检测到的故障信号越小说明其早期检测的灵敏度越高。

3) 故障的误报率和漏报率：误报指系统没有出去故障却被错误检测出发生故障； 漏报是指系统发生故障却没有被检测出来。 一个可靠的故障诊断系统应尽可能使误报率和漏报率最小化。

4) 故障分离能力：是指诊断系统对不同故障的区别能力。故障分离能力越强说明诊断系统对不同故障的区别能力越强， 对故障的定位就越准确。

5) 故障辨识能力：是指诊断系统辨识故障大小和时变特性的能力。故障辨识能力越高说明诊断系统对故障的辨识越准确， 也就越有利于对故障的评价和维修。

6) 鲁棒性：是指诊断系统在存在噪声、干扰等的情况下正确完成故障诊断任务，同时保持低误报率和漏报率的能力。鲁棒性越强，说明诊断系统的可靠性越高。

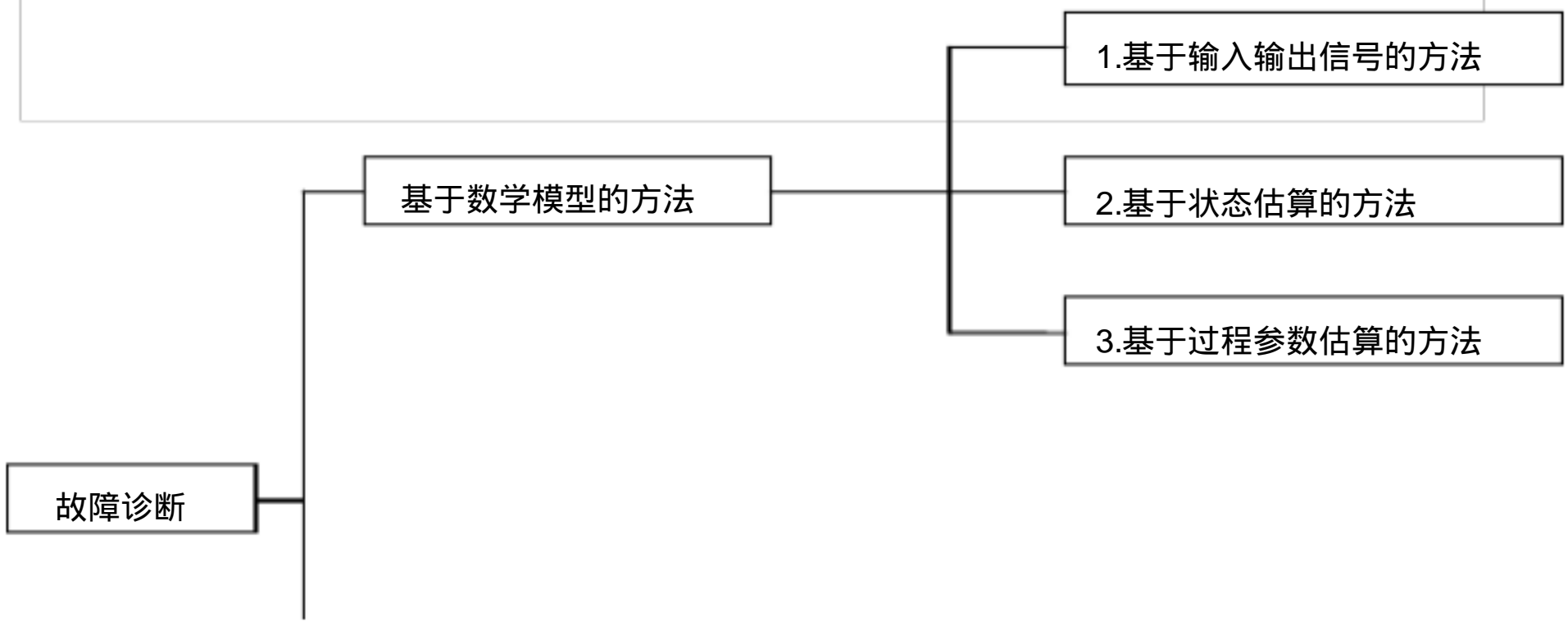
7) 自适应能力：是指故障诊断系统对于变化的被测对象具有自适应能力，并且能够充分利用变化产生的新信息来改善自身。

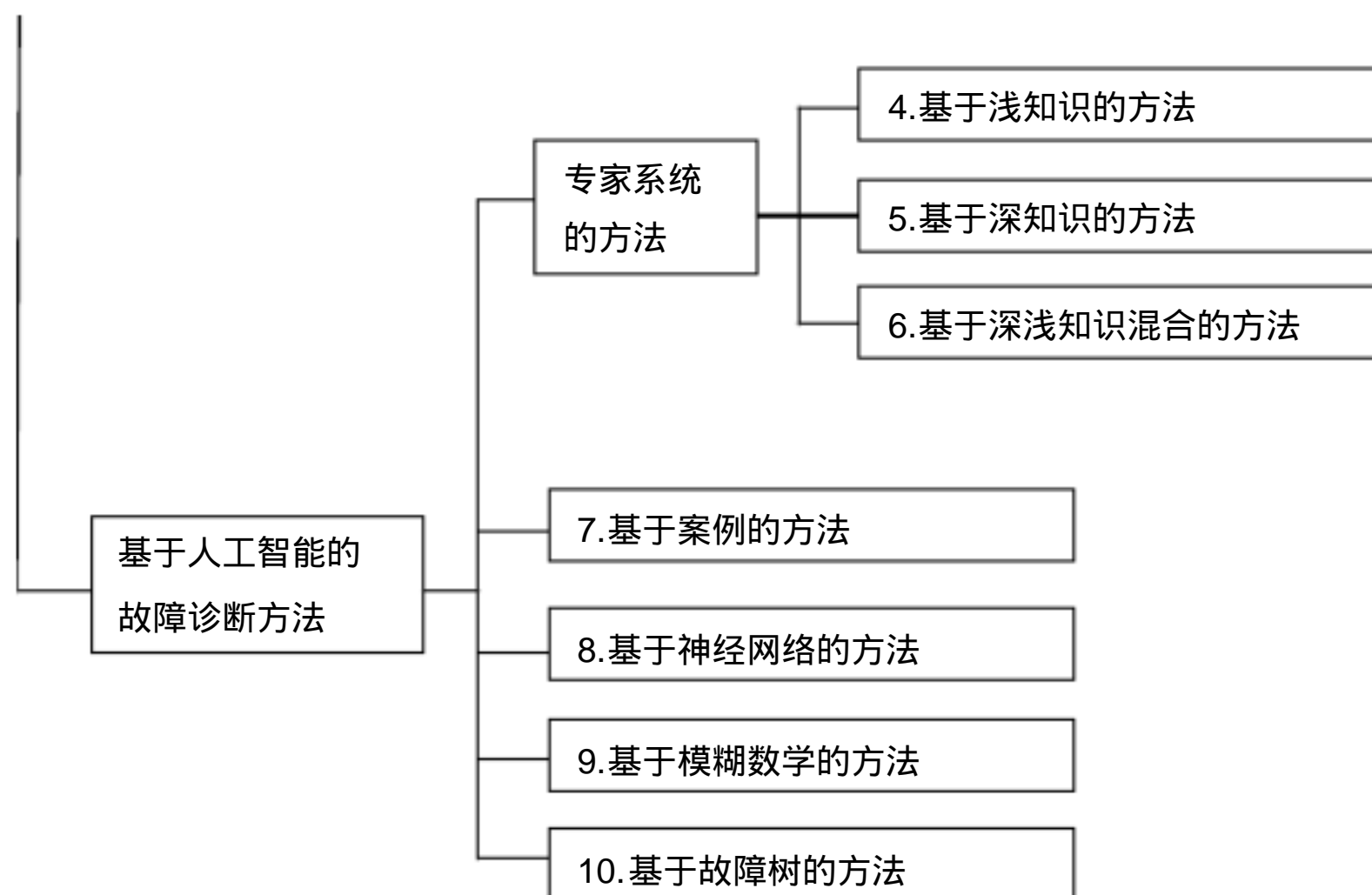
以上性能指标在实际应用中， 需要根据实际条件来分析判断哪些性能是主要的，哪些是次要的，然后对诊断方法进行分析，经过适当的取舍后得出最终的诊断方案。

2.1 故障诊断的方法

近代故障诊断技术的发展已经历 30 年 ,但形成一门 “故障诊断学” 的综合性新学科，还是近几年逐步发展起来的，以不同的角度来看，有多种故障诊断的分类方法，这些方法各有特点。

概括而言，故障诊断方法可以分成两大类： 基于数学模型的故障诊断方法、基于人工智能的故障诊断方法。





2.1.1 基于专家系统的诊断方法

基于专家系统的诊断方法是故障诊断领域中最为引人注目的发展方向之一，也是研究最多、应用最广的一类智能型诊断技术。它大致经历了两个发展阶段：基于浅知识领域专家的经验知识的故障诊断系统、基于深知识诊断对象的模型知识的故障诊断系统。

（1）基于浅知识的智能型专家诊断方法 浅知识是指领域专家的经验知识。基于浅知识的故障诊断系统通过演绎推理或产生式推理来获取诊断结果，其目的是寻找一个故障集合，使之能对一个给定集合产生的原因作出最（ ）包括存在的和缺席的（的征兆佳解释。基于浅知识的故障诊断方法具有知识直接表达、形式统一、高模组性、推理速度快等优点。但也有局限性，如知识集不完备，对没有考虑到的问题系统容易陷入困境；对诊断结果的解释能力弱等缺点。

（2）基于深知识的智能型专家诊断方法 深知识则是指有关诊断对象的结构、性能和功能的知识。基于深知识的故障诊断系统，要求诊断对象的每一个环境具有明显的输入输出表达关系，诊断时首先通过诊断对象实际输出与期望输出之间的不一致，生成引起这种不一致的原因集合，然后根据诊断对象领（域中的第一定律知识）及其具有明确科学依据的知识他内部特定的约束联系，采用一定的算法，找出可

能的故障源。 基于深知识的智能型专家诊断方法具有知识获取方便、维护简单、完备性强等优点，但缺点是搜索空间大，推理速度慢。

（3）基于浅知识和深知识的智能型专家混合诊断方法 基于复杂设备系统而言，无论单独使用浅知识或深知识，都难以妥善地完成诊断任务，只有将两者结合起来，才能使诊断系统的性能得到优化。因此，为了使故障智能型诊断系统具备与人类专家能力相近的知识，研发者在建造智能型诊断系统时，越来越强调不仅要重视领域专家的经验知识，更要注重诊断对象的结构、功能、原理等知识，研究的重点是浅知识与深知识的整合表示方法和使用方法。事实上，一个高水平的领域专家在进行诊断问题求解时，总是将他具有的深知识和浅知识结合起来，完成诊断任务。一般优先使用浅知识，找到诊断问题的解或者是近似解，必要时用深知识获得诊断问题的精确解。

2.1.2 基于神经网络的人工智能型诊断方法

知识获取上，神经网络的知识不需要由知识工程师进行整理、总结以及消化领域专家的知识，只需要用领域专家解决问题的实例或范例来训练神经网络；在知识表示方面，神经网络采取隐式表示，并将某一问题的若干知识表示在同一网络中，通用性高、便于实现知识的总动获取和并行联想推理。在知识推理方面，神经网络通过神经元之间的相互作用来实现推理。

2.1.3 基于模糊数学的人工智能型诊断方法

许多诊断对象的故障状态是模糊的，诊断这类故障的一个有效的方法是应用模糊数学的理论。基于模糊数学的诊断方法，不需要建立精确的数学模型（membershipfunction），适当的运用局部函数和模糊规则，进行模糊推理就可以实现模糊诊断的智能化。

2.1.4 基于故障树的人工智能型诊断方法

故障树方法是由电脑依据故障与原因的先验知识和故障率知识自动辅助生成故障树，并自动生成故障树的搜索过程。诊断过程从系统的某一故障为什么出现这种显现开始，沿着故障树不断提问而逐级构成一个梯阶故障树，透过对此故障树的启发式搜索，最终查出故

障的根本原因。在提问过程中，有效合理地使用系统的及时动态数据，将有助于诊断过程的进行。于故障树的诊断方法，类似于人类的思维方式，易于理解，在实际情况应用较多，但大多与其他方法结合使用。

3. 基于模糊数学的故障诊断专家系统的设计与实现

机械故障诊断中，故障现象与故障原因之间通常没有一一对应的关系，一种故障现象可能是由多种原因引起，而一种原因发生故障可能会产生多种现象。因此，机械故障具有一定的模糊性，具体表现为：a. 同一故障表现形式呈多样性；b. 几种故障同时发生并互相诱发；c. 故障间的分类具有模糊性，即不同故障具有相似或相近的特征；d. 故障的存在程度具有模糊性，不能把故障绝对识别为“存在”与“不存在”。

对于机械故障的模糊现象，用传统的数学工具进行定量诊断往往存在一些困难，而模糊数学方法则显示出其优越性。模糊诊断法是一种基于知识的自动诊断方法，它是利用模糊逻辑来描述故障原因与故障现象之间的模糊关系，通过隶属函数和模糊关系方程解决故障原因与状态识别问题。

3.1 模糊数学理论基础

3.1.1 模糊关系矩阵的数学表述

设是因素甲的状态集，是因素乙的状态集，同时考虑甲乙两因素，可能状态集是和任意搭配的元素 (x,y) 所构成，记为：

$$X \times Y = \{(x,y): x \in X, y \in Y\}$$

从 X 到 Y 的一个模糊关系 R 是指 $X \times Y$ 上的一个模糊子集，其隶属度表示 x 与 y 具有关系 R 的程度。

当 $X=\{x_1, x_2, \dots, x_m\}, Y=\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 为有限集时， $(x_i, y_j) \in X \times Y$ ，记 $r_{ij} = R(x_i, y_j)$ ，则 $0 \leq r_{ij} \leq 1$ ，且 R 可用矩阵 $(r_{ij})_{n \times m}$ 表示，称模糊关系矩阵。在模糊数学理论中，隶属度用 0 与 1 之间的数值表示。

3.1.2 贴近度与择近原则

在模糊模式识别中，可以用模糊集的内积和外积的概念来构造模糊集的贴近度。如果 A 和 B 是论域 Z 上的两个模糊集，则有：

A 和 B 的内积：

$$A \cdot B = \bigwedge_{z \in Z} [\mu_A(z) \wedge \mu_B(z)]$$

A 和 B 的外积：

$$A \times B = \{ \langle z, Z[\mu_A(Z) \wedge \mu_B(Z)] \rangle \mid z \in Z \}$$

则模糊集 A 和 B 贴近度为：

$$(A, B) = \frac{1}{2} [A \times B + (1 - A \times B)]$$

择近原则：给定论域 z 上的模糊子集 A_1, A_2, \dots, A_n ，及另一个模糊子集 B，若有 $1 \leq i \leq n$ 使得：

$$(B, A_i) = \max_{1 \leq j \leq n} (B, A_j)$$

则认为 B 与 A_i 最贴近。

3.2 模糊诊断专家系统的设计与实现

该模糊诊断专家系统有模糊故障诊断知识库、模糊诊断程序和人机界面三部分组成。

3.2.1 模糊故障诊断知识库的建立

故障知识库文件中包含故障隶属度矩阵维数、故障隶属度表（故障原因与故障现象的模糊关系矩阵）、故障现象名称、故障原因名称及相应处理意见等内容。

对于一个特定的诊断目标，确定它的典型故障现象集合为 X，而将故障原因集合称为 Y，R 为具有密切关系的模糊集合。因此，R 表示了现象 X 到故障 Y 上的一个模糊关系。其值可根据经验和专家统计等方法综合评定。这种故障诊断可以描述如下：诊断目标（原因集）：原因集 1，原因集 2，...；现象集：现象集 1，现象集 2，...。模糊关系矩阵： $[r_{ij}]$ ， r_{ij} 是矩阵第 i 行、第 j 列的元素， $r_{ij} \in [0, 1]$ ， r_{ij} 反映了故障现象、原因相关程度的量化模糊值，该值的可靠性决定了诊断成果的优劣与成败。

3.2.2 实际故障现象的模糊描述

故障诊断是根据故障现象判别故障原因的识别过程。模糊智能故障诊断就是以模糊数学理论为基础，对机械故障进行模式识别的过程。

建立模糊矩阵时，一个故障的所有故障原因是一个集合，故障原因相互独立，是一个单元素集合。这样每种故障原因与故障现象可以生成一个模糊关系集，这个模糊关系集可以作为一个故障模式。所以一

种故障现象有多少种故障原因就应有多少个故障模式。具体的故障诊断中,需要知道待诊断故障原因与实际故障现象之间的模糊关系。

在模糊诊断中哪一个故障原因对应的模糊关系向量与此模式最接近,哪一个就是诊断结果。

4. 模糊数学在阀门故障诊断中的应用

阀门广泛应用于工业容器和管道系统中,阀门工作可靠性不仅关系到企业的生产,还涉及到设备和人身安全,因此,阀门故障诊断和预测显得尤为重要。然而,阀门除了本体外,还有复杂的控制部分和执行器,其故障原因和症状间很多时候不是一一对应的,因而呈现出复杂的关系,从而导致诊断的决策出现多义性。并且,在状态监测中,设备状态从正常到不正常都有一个渐变过程,这时由于征兆的非典型表现也会出现判断的多交性。这种故障诊断的模糊性,以往主要依靠经验解决。随着模糊数学的产生和发展,使得计算机处理模糊信息成为可能。利用模糊数学的理论基础,对故障诊断的模糊事物进行推理、判断并作出决策,在阀门智能诊断和故障预测方面有着重要意义。

4.1 模糊数学模型

4.1.1 隶属函数

在传统的故障诊断中,对应于故障症状,做出的结论是某零部件是否存在故障,一般用逻辑代数就可表示。如当表示“零件 u 有故障”时,可用 $R=\{1\}$ 表示,表示“零件 u 完好”时,可用 $R=\{0\}$ 。但表示“零件 u 有轻微/一般/严重/相当严重故障”时,无准确的表示方式。为了解决这个问题,模糊数学引入隶属函数 $\mu_A(u)$ 进行描述,且有 $0 \leq \mu_A(u) \leq 1$ 。因此对“零件 u 有轻微/一般/严重/相当严重故障”的模糊数学集合表示为 $A=\{\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4\}$ 。对每一隶属函数赋值 μ_1 (轻微)=0.2, μ_2 (一般)=0.4, μ_3 (严重)=0.7, μ_4 (相当严重)=1。

4.2 故障诊断的模糊关系

设故障检测状态集合 $U=\{u_1, u_2, u_3, \dots, u_{n-1}, u_n\}$, 故障原因集合 $V=\{v_1, v_2, v_3, \dots, v_{m-1}, v_m\}$, 则 $U \times V$ 的一个模糊子集 R 就是从 U 到 V 的

模糊关系。 它表示检测状态到故障原因的一种模糊映射关系。 R 的隶

属函数 $\mu_R(u,v)$ 用 $n \times m$ 阶矩阵表示：

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \dots \\ R_N \end{bmatrix} = (r_{ij})_n$$

其中 $r_{ij} = R(u, v) \in [0, 1]$, 即是检测状态量化后对故障原因的相关程度。 r_{ij} 的确定需要考虑很多因素 ,应尽量多的收集相的信息 ,以反映故障现象和故障原因间的关系。 隶属度 r_{ij} 一般采用专家打分法、 模糊统计法和二元对比排序法确定。

4.3 故障原因综合评判

故障诊断是对异常状态的检测、 异常原因的识别及异常状态预测。 现场检测故障原因评判公式为 $B = A \circ R$

式中 A——加权向量 ,与状态集 U 的量化集合 U 有关

$$U = [u_1, u_2, u_3, \dots, u_1, u_n]$$

u_i ——通过检测结果按一定的指标给予隶属度的值 (不能量化的检测结果 ,按评价语义确定其隶属度)

R——模糊关系矩阵

\circ ——模糊算子

对 $U = [u_1, u_2, u_3, \dots, u_{n-1}, u_n]$ 归一化处理 ,得到 $A = [a_1, a_2, \dots, a_n]$, $a_i = 1/n \quad u_j$

在应用中 , “ \circ ” 可表示不同的运算法则。 $M(\quad, \quad)$ 用在主元素决定评介结合的情况。 $M(\circ, \quad)$ 体现一种加权 ,但仍然突出主元素情况。 $M(\quad, \oplus)$ 以求和代表取大 ,削弱主元素的作用。 $M(\circ, \oplus)$ 体现一种综合 ,其实已转化为矩阵乘法。

4.4 故障识别

对计算结果可按最大隶属函数或择近原则进行故障识别。

(1) 最大隶属原则

设论域 U 上的 n 个模糊子集 A_1, A_2, \dots, A_n 构成一个标准模型库 , 若对任一元素 $u_0 \in U$ 有

$$\mu_{A_i}(u_0) = \max\{\mu_{A_1}(u_0), \mu_{A_2}(u_0), \dots, \mu_{A_n}(u_0)\}$$

则认为相对隶属于 A_i 。

(2) 择近原则

设 A_1, A_2, \dots, A_n 是论域上的模糊子集, 构成一个标准模型库。
 B 是待识别模糊子集。若存在

$$(B, A_j) = \max\{ (B, A_1), (B, A_2), (B, A_3), \dots, (B, A_n) \}$$

则称 B 与 A 最贴近, 即认为 B 属于 A 。

4.5 实例应用

以安全阀为例, 运用模糊数学理论, 进行故障诊断分析。安全阀常见故障现象有阀门泄漏、阀体结合面渗漏、冲量安全阀不动作、冲量安全阀回座、后主安全阀延迟回座时间过长、安全阀回座压力低和安全阀频跳等。故障症状集 $U = \{a, b, c, d, e, f\}$ 。而相应的故障原因有密封面损伤 v_1 、密封垫失效 v_2 、设计制造缺陷 v_3 、螺栓紧力不够或紧偏 v_4 、相应运动部件有卡阻 v_5 、活塞室漏气量误差和安全阀回座压力过高 v_6 等。故障原因集

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7\} = \pi \, du \, \frac{1}{n} n P e^{2f} \frac{h-y}{S} dy$$

式中 dy ——单元填料厚度。

$$\begin{aligned} T &= \pi \, du P \int_0^h e^{2f \frac{h-y}{S}} dy = \pi \, du P \left[e^{2f \frac{h-0}{S}} = e^{2f \frac{h-h}{S}} \right] \\ &= \pi \, du P \left[e^{2f \frac{h}{S}} - 1 \right] = 8035 \text{ N} \end{aligned}$$

若用石棉盘根, 其摩擦力为

$$T' = \pi \, du P \left[e^{2f \frac{h}{S}} - 1 \right] = 14348.8 \quad \text{N}$$

根据国内各使用单位所选用的执行器可知, 自动控制阀的全行程调节需要 $30 \sim 60\text{s}$, 自动控制阀是全天投运 (24h)。经调查实际调节率为 75% 。即每天工作 18h , 由于使用了柔性石墨可减小摩擦力 6kN , 实际做功 935.6kJ (0.26kW/h 电)。一个使用单位如果有自动控制阀约 213 只 (场所大小不同数量各异), 由于阀杆直径不同其摩擦力也不同, 自动控制阀偏大, 一般也是自动控制阀的一半, 这样可节 9968.4kW/h 。由此可知, 在使用单位和阀门制造厂大力推广使用柔性石墨是节约能

源的一项主要措施 ,也是十分有必要的 ,建议阀门的设计使用柔性石墨 ,为此可以节约更多的能源。

5. 总结

采用了基于模糊理论的模糊诊断法 ,能显著缩短故障诊断时间 ,提高故障诊断效率 ;故障知识库与故障诊断程序相互独立 ,有利于程序和知识的升级、更新与维护。

通过应用模糊数学的理论 ,对阀门诊断的模糊性进行了分析 ,建立了阀门模糊诊断的数学模型 ,给出一个实例验证此种模型的可行性。诊断的准确性很大程度上由 R 确定。因此 ,模糊关系矩阵应根据实际应用 ,结合历史数据和专家意见 ,不断进行修正 ,以期达到准确诊断的目的。在故障识别过程中 ,模型库的建立也是至关重要的。实际上 ,诊断不能仅仅考虑隶属度大的因素 ,如果能对故障识别的模型库有精确的建模 ,不仅可以识别出关键的故障原因 ,还能发现潜在的故障 ,达到故障预测的目的。

参考文献

- [1] 郑家亨,莫曰达,铁大章等.《统计大辞典》:中国统计出版社,1995
- [2] 吴吉平,吴运新等.摊铺机智能故障诊断技术研究[J].株洲工学院学报,2002,(6).
- [3] 石涛.模糊数学在机械故障诊断专家系统中的应用[J].武汉造船,2006,(6):17-18.
- [4] 吴今培.模糊诊断理论及其应用[M].北京:科学出版社,1995.
- [5] Louis Gary Lamit.Pro Engineer2000i 实用教程[M],李世国,蒋晓等译.北京:机械工业出版社,2001.
- [6] David S.Kelley.Pro Engineer200i2 实用教程[M].陆劲昆,蔡石蒙等译.北京:北京大学出版社,2003.
- [7] 黄文虎,等.设备故障诊断原理、技术及应用[M].北京:科学出版社,1996.
- [8] 张戌社,宁辰校.模糊数学在机械设备故障诊断中的应用[J].河北科技大学学报,2002,23(2): 55
- [9] 杨贵,李仁旺,颜忠仔,张鹏举.模糊数学在阀门故障诊断中的应用[J].浙江理工大学学报,2007,(05): 6-10.