

用模糊支持逻辑推理模型 建立诊断型专家系统

熊国良

邹慧君

(机械工程系)

(上海交通大学)

摘 要 本文提出了一种新的理论—模糊概率逻辑理论. 该理论将目前常用的模糊逻辑和经典的概率逻辑结合起来, 以处理专家系统中的不确定性问题. 在此理论的基础上, 设计了一个新的推理模型(FSL); 建立了用于旋转机械故障诊断的专家系统(ROSLES). 最后在 300MW 汽轮发电机组振动模拟试验台(1:10)上对 ROSLES 进行了试验考核, 结果表明系统的可靠性和准确性都令人满意.

关键词 专家系统; 故障诊断; 模糊概率逻辑

分类号 TP391

0 引 言

旋转机械故障诊断专家系统由于其固有的特点渐渐被发现, 而近年来形成了研究的热点. 但是由于存在着许多共同的问题, 其中很大部分是关于不确定性处理方面的问题, 因而致使已有的专家系统在诊断性能方面达不到人类领域专家的水平.

很多研究领域都存在着不同形式的不确定性. 这些不确定性可以划分为两大类, 即事件发生的随机性和概念描述的模糊性. 已有的专家系统基本上是沿着两条不同的途径对不确定性问题进行处理: 第一条途径是经典的概率逻辑体系; 第二条途径是目前常用的模糊逻辑体系. 显然, 这样两种不同的方法各自本身并不能充分表达和处理现实世界中不确定性问题的多样性.

本文将概率逻辑理论和模糊逻辑理论结合了起来, 并发展成一种新的理论—模糊概率逻辑理论. 根据该理论和针对旋转机械的特点, 设计了一个新的推理模型(FSL), 用于建立旋转机械故障诊断专家系统(ROSLES). 最后在 300MW 汽车发电机组振动模拟试组振动模拟试验台(1:10)上对该系统进行了试验考核, 结果表明, ROSLES 的可靠性和准确性与实际情况基本相吻.

收稿日期: 1995-06-20. 熊国良, 男, 1963 年生, 讲师.

1 模糊概率理论

1.1 不确定性测度

在概率空间 $(\mathcal{U}, \mathcal{M}, P)$ 中, 设有一函数 $f(x): \mathcal{U} \rightarrow R$, 其相对于 P 的期望值为:

$$\mathcal{E}(\mathcal{M}_{\tilde{A}}, P) = \int_{\mathcal{U}} \mathcal{M}_{\tilde{A}}(x) p(x) dx, \quad (1)$$

其中 $\mathcal{U}$ 为辨别框架, $p(x)$ 为 P 的概率密度函数. $\mathcal{E}(\mathcal{M}_{\tilde{A}}, P)$ 被定义为 $\tilde{A}$ 的模糊概率测度. 对于离散的概率空间, $\mathcal{M} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 其模糊概率测度为

$$\mathcal{E}(\mathcal{M}_{\tilde{A}}) = \sum_{i=1}^n \mathcal{M}_{\tilde{A}}(x_i) P(x_i). \quad (2)$$

1.2 信任度

因为模糊事件 $\tilde{A}$ 的概率密度函数 $P(x)$ 通常是未知的, 所以确定 $\mathcal{E}(\mathcal{M}_{\tilde{A}})$ 的最好方法是通过计算其边界值来实现的. $\mathcal{E}(\mathcal{M}_{\tilde{A}})$ 的上确界和下确界可由以下两式求出:

$$N_{\epsilon}(\tilde{A}) = E_{\epsilon}(\tilde{A}) = \max_{P \in \mathcal{F}} \mathcal{E}(\mathcal{M}_{\tilde{A}}, P), \quad (3)$$

$$P_r(\tilde{A}) = E^*(\tilde{A}) = \min_{P \in \mathcal{F}} \mathcal{E}(\mathcal{M}_{\tilde{A}}, P), \quad (4)$$

其中 $\mathcal{F}$ 是定义在 $\mathcal{U}$ 中的所有概率函数的集合. $N_{\epsilon}(\tilde{A})$ 和 $P_r(\tilde{A})$ 称为模糊事件 $\tilde{A}$ 的信任度. 其中 $N_{\epsilon}(\tilde{A})$ 称为 $\tilde{A}$ 的必要信任度, $P_r(\tilde{A})$ 为可能信任度. 两者之间的关系为

$$P_r(\tilde{A}) = 1 - N_{\epsilon}(\tilde{A}). \quad (5)$$

1.3 信任度算法

虽然信任度能够通过式(3), (4)求得, 但是如果概率密度函数较为复杂甚至难以积分时, 计算的过程将变得很繁琐. 以下通过定义一个基本概率派给函数 $m()$, 引导出信任度的另一种算法.

设定辨别框架 $\mathcal{U}$, $\mathcal{F}$ 为 $\mathcal{U}$ 中所有模糊子集的集合, 基本派给函数 $m()$ 是一个从 $\mathcal{F}$ 到单位区间的映射: $m: \mathcal{F} \rightarrow [0, 1]$. m 满足以列条件: (1) 对于 $\exists \tilde{A} \subseteq \mathcal{U}$, $0 \leq m(\tilde{A}) \leq 1$; (2) 如果

$\max_{x \in \mathcal{U}} \mathcal{M}_{\tilde{A}}(x) < 1$, 则 $m(\tilde{A}) = 0$; (3) $\sum_{\tilde{A} \subseteq \mathcal{F}} m(\tilde{A}) = 1$.

由此, 可得信任度算法如下:

$$N_{\epsilon}(\tilde{A}) = \sum_{\tilde{B} \subseteq \mathcal{F}'} m(\tilde{B}) \cdot \bigcup (\tilde{B}, \tilde{A}) \quad (6)$$

$$P_r(\tilde{A}) = \sum_{\tilde{B} \subseteq \mathcal{F}'} m(\tilde{B}) \cdot \bigcap (\tilde{A}, \tilde{B}) \quad (7)$$

上式中 $\mathcal{F}'$ 是 $\mathcal{F}$ 中所有焦点元素的集合 (在 $\mathcal{F}'$ 中, $m(\tilde{A}) \neq 0$). $\bigcap$ 和 $\bigcup$ 分别表 $\tilde{A}$ 和 $\tilde{B}$ 元之间的交和并, 且

$$\bigcap (\tilde{A}, \tilde{B}) = \bigvee_{x \in \mathcal{U}} (\tilde{A}(x) \wedge \tilde{B}(x)), \quad (8)$$

$$\bigcup (\tilde{B}, \tilde{A}) = \bigwedge_{x \in \mathcal{U}} (\tilde{A}(x) \vee \tilde{B}(x)), \quad (9)$$

2 推理模型——模糊支持逻辑理论(FSL)

2.1 更新结论命题不确定性的算法

在FSL模型中,一条规则被表达成

$$(h/e):[N_{\alpha}(h/e),P_r(h/e)]$$

其中 e 是证据命题, h 是结论命题.两者既可以是单独命题,又可以是复合命题.后一部分 $[N_{\alpha}(h/e),P_r(h/e)]$ 表示规则的支持对.

考虑如下一般形式的逻辑推理结构:

$$(h/e) : [N_{\alpha}(h/e), P_r(h/e)]$$

$$(h/\bar{e}) : [N_{\alpha}(h/\bar{e}), P_r(h/\bar{e})]$$

$$e : [N_{\alpha}(e), P_r(e)]$$

$$h : [N_{\alpha}(h), P_r(h)] ?$$

更新算法应至少满足下面两条公理:

a. 如果 $N_{\alpha}(\cdot)=P_r(\cdot)$,则 $N_{\alpha}(h)=P_r(h)$;

b. 如果 $N_{\alpha}(e)=0, P_r(e)=1$,则 $N_{\alpha}(h)=0, P_r(h)=1$.

根据上述公理,应用全概率计算公式并通过灵敏度分析,可推出最佳更新算法为

$$\begin{cases} N_{\alpha}(h) = N_{\alpha}(h/e) \cdot N_{\alpha}(e) + N_{\alpha}(h/\bar{e}) \cdot (1 - P_r(e)), \\ P_r(h) = P_r(h/e) \cdot P_r(e) + P_r(h/\bar{e}) \cdot (1 - N_{\alpha}(e)). \end{cases} \quad (10)$$

当 $P_r(h/e) + P_r(h/\bar{e}) \leq 1$ 时

$$\begin{cases} N_{\alpha}(h) = N_{\alpha}(h/e) \cdot P_r(e) + N_{\alpha}(h/\bar{e}) \cdot (1 - N_{\alpha}(e)) - (P_r(e) - N_{\alpha}(e)), \\ P_r(h) = P_r(h/e) \cdot N_{\alpha}(e) + P_r(h/\bar{e}) \cdot (1 - P_r(e)) + (N_{\alpha}(e) - P_r(e)). \end{cases} \quad (11)$$

当 $N_{\alpha}(h/e) + N_{\alpha}(h/\bar{e}) \geq 1$ 时

$$\begin{cases} N_{\alpha}(h) = N_{\alpha}(h/e) \cdot N_{\alpha}(e) + N_{\alpha}(h/\bar{e}) \cdot (1 - P_r(e)), \\ P_r(h) = P_r(h/e)P_r(e) + P_r(h/\bar{e}) \cdot (1 - P_r(e)) + (P_r(e) - N_{\alpha}(e)). \end{cases} \quad (12)$$

当 $N_{\alpha}(h/e) + N_{\alpha}(h/\bar{e}) \leq 1 \leq P_r(h/e) + P_r(h/\bar{e})$ 时

2.2 多个支持对的组合

在规则基的专家系统中,同一个命题可能来自若干个不同的信息源.如考虑下面最简单的两个信息源的情况:

$$\underline{A}_1 : [N_{\alpha 1}, P_{r1}]$$

$$\underline{A}_2 : [N_{\alpha 2}, P_{r2}]$$

$$\underline{A} : [N_{\alpha}(\underline{A}), P_r(\underline{A})]?$$

可以看出,以上两种情况是矛盾的.为此,定义冲突系数和归一化因子如下:

冲突系数: $\text{Con}(\underline{A}) = N_{\alpha 1} \cdot (1 - P_{r2}) + N_{\alpha 2} \cdot (1 - P_{r1})$,

归一化因子: $K = 1 - \text{Con}(A)$.

因而,得到两个信息源的独立模型的组合支持对为

$$\begin{cases} N_{\alpha}(A) = (N_{\alpha 1} \cdot N_{\alpha 2} + N_{\alpha 1} \cdot (P_{\alpha 2} - N_{\alpha 2}) + N_{\alpha 2} \cdot (P_{\alpha 1} - N_{\alpha 1}))/K, \\ P_{\alpha}(A) = 1 - ((1 - P_{\alpha 1}) \cdot (1 - N_{\alpha 2}) + (1 - P_{\alpha 2}) \cdot (P_{\alpha 1} - N_{\alpha 1}))/K. \end{cases} \quad (13)$$

3 一个旋转机械故障诊断专家系统(ROSLES)

图 1 所示为 ROSLES 系统的总体结构. 整个系统分为八个模块, 其中几个主要模块的特点为:

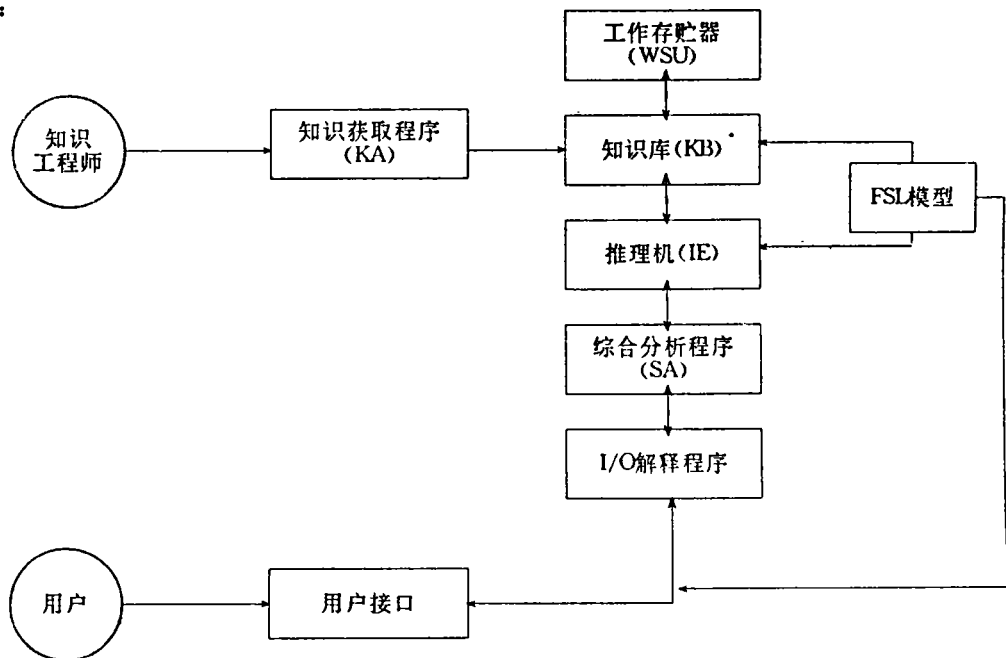


图1 ROSLES的总体结构图

(1)知识库模块将旋转机械的故障归结为 17 类,而症状划分为 3 大组. 这 3 组症状归结为:振动频谱症状群、运行过程症状群以及轴心轨迹症状群. 其中前两类组为主要症状群,最后一组为辅助症状群;

(2)知识推理应用了 FSL 模型;

(3)知识获取程序模块的主要功能是管理知识库中的知识,包括修改、删除或增加知识库中的知识;

(4)工作存储器是用于存放系统运行过程中所需要的或新产生的所有信息,包括问题的描述、结果和解题过程记录等;

(5)输入/输出解释程序设置了四个 W()函数,其中 W1()函数解释 What 性质的问题; W2()函数回答 Why, W3()函数回答 When, W4()函数回答 Where. 这几个函数的设置增加了系统的透明;

(6)全部程序均由 C 语言设计.

4 ROSLES 系统的试验考核

试验考核在 300MW 汽轮发电机组振动模拟试验台(1:10)上进行。该试验台由高压、中压、低压 I、低压 II、发电机和励磁机共六级转子组成。本试验主要在高、中压转子上进行。中压转子和低压 I 转子之间的联轴节被脱开。图(2)为试验台高、中压部分的结构图。高压转子第一临界转速 $n_1 = 2000\text{rpm}$, 中压转子 $n_1 = 2500\text{rpm}$ 。

图 3 所示为测试结果。它包括三部分数据:(a)3"轴承座水平方向的振幅——转速关系图;(b)中压转子轴心轨迹图;(c)3"轴承座水平方向振动频谱图。诊断结果为

- (1) 初始不平衡: [0.444, 0.522]; (2) 联轴器不对中: [0.475, 0.800]; (3) 支承部体松动: [0.000, 0.512];

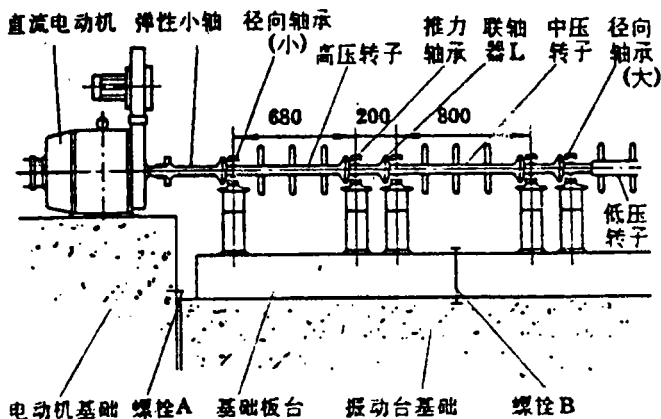
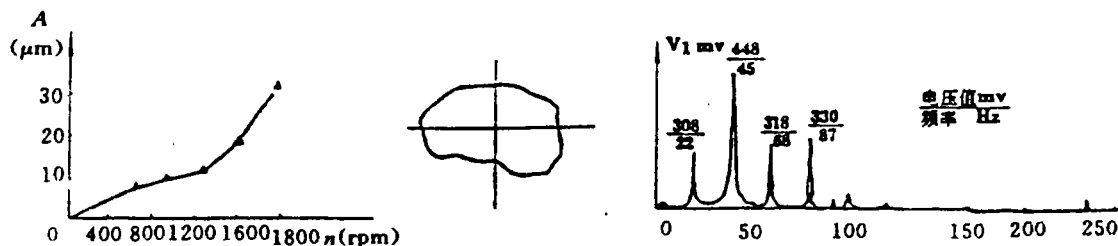


图 2 300MW 汽轮发电机组振动模拟试验台(1:10)

高、中压转子部分结构图



(a) 3" 轴承水平方向振幅
转速关系, ($A-n$) 图

(b) 中压转子轴心轨迹图

(c) 中压转子轴心轨迹图

图 3 测试结果 ($n = 1796\text{rpm}$)

试验后经检修测得下列故障:

- (1) 中压转子不平衡量为 $61.2\text{g} \times 160\text{mm}$; (2) 高、中压转子高度不对中差 $y = 1.5\text{mm}$;
(3) 螺栓 A 没有转紧; (4) 3" 轴承略有偏心。

检修情况与诊断结果基本吻合。

5 结束语

- (1) 提出了模糊概率理论, 并将其应用到旋转机械的故障诊断专家系统中。

(2)建立了一个新的专家系统知识推理模型——模糊支持逻辑函数推理模型(FSL),该模型具有知识表达简明、清晰和合理等特点.

(3)建立了一个基于FSL模型的旋转机械故障专家系统(ROSLES),该系统共由八个模块组成,在知识库模块中装有120条规则,能够诊断出17种常见故障.

(4)在300MW汽轮发电机组振动模拟(1:10)试验台上考核了ROSLES对多故障的综合诊断能力.结果表明:系统的诊断结果与实际检修情况基本相吻.

参 考 文 献

- 1 Shafer G. A Mathematical Theory of Evidence. Princenton University Press, 1976.
- 2 Dempster A P. Upper and Lower Probabilities Induced by a Multivalued Mapping. An, Math Statist. 1967, 38, 325~329
- 3 Zadeh L A. Probability Measures of Fuzzy Events. J. Math and Appl. ,1968, 23:421~427
- 4 White. Fault Diagnosis in Rotating Machinery. Proc. of the Int, Conference on Rotordynamics, 1986.
- 5 熊国良,黄步玉,邹慧君. 基于模糊支持逻辑函数推理模型的旋转机械故障诊断系统专家系统的研究:[博士学位论文]. 上海:上海交通大学, 1994

A Diagnosis Expert System Built up with the Fuzzy Support Logic Inference Model

Xiong Guoliang

Zuo Huijun

(Department of Mechanical Engineering) (Shanghai Jiaotong University)

Abstract

This paper has put out a new theory—the fuzzy Probability Logic theory which incorporates the generally—used fuzzy logic and the traditionally—used probability logic theory in attempt to emulate rational fault diagnosis under uncertainty. According to the theory, an inference model, named as FSL, is designed to be devoted to the building of a fault diagnosis expert system for rotating machinery (ROSLES). The system has been put into operation on a vibration simulator stand (1:10) for 300MW turbine generator set and satisfactory results have been gained.

Key words

Expert system; Fault diagnosis; Rotating machinery; Uncertainty; Fuzzy probability logic