

# 基于知识与模糊神经网络的故障诊断技术

(浙江大学) 邱忠宇 史挺进 吴昭同 顾 晔

**摘 要:** 论述了建立规则型模糊神经网络的理论和方法, 针对大型旋转机械提出了一种采用多层规则库结构及智能推理机的故障诊断技术。该技术以 Rule 型模糊联想记忆器作为诊断系统的分类和综合算法, 把基于知识的符号处理方法与模糊神经网络有机地结合在一起。讨论了模糊神经网络输入和输出模糊化的问题。为电厂汽轮发电机组故障诊断专家系统提供了新的思路。

**关 键 词:** 旋转机械; 故障诊断; 模糊神经网络; 专家系统

中图分类号: TH165.3; TP206.3

## 1 引言

大型旋转机械在电力、石化、冶金、机械等部门中处于举足轻重的关键地位, 一旦发生故障将会造成巨大的经济损失和严重的社会影响。因此必须对这些重要设备进行监测和诊断, 以保证设备安全、可靠地运行, 降低设备的维护费用。传统的故障诊断专家系统大多都是基于知识的 (如基于规则的故障诊断系统), 基于知识的故障诊断系统是以领域专家和操作者的启发性经验知识为核心, 通过演绎推理或产生式推理来获取诊断结果。

基于知识的诊断推理具有知识表达直观、模块性强、推理逻辑清晰等优点。但是这种方法具有较大的局限性, 主要表现有: 知识获取的瓶颈问题、推理效率低、自适应能力差、实时性差等。因此, 人们正在积极寻求解决这些局限性的方法。例如: 采取机器学习的方法解决知识获取的瓶颈问题; 采取多种知识表示方法及多种求解策略, 提高系统的灵活性; 采用并行处理和分布式系统结构, 提高其准确性、实时性等。近年来发展迅速的模糊神经网络理论为旋转机械故障诊断技术的进一步发展提供了理论依据。

## 2 规则型的模糊神经网络理论

由于故障诊断中许多症状是界限不分明模糊集合, 利用模糊数学隶属度函数来描述某界限不明显的症状或这些症状存在的倾向性是一种比较合理的方式。神经网络对信息处理是通过大量称为结点的简单处理单元之间的相互作用而进行的。通过对经验样本的学习, 将专家知识以权值和域值的形式存贮在网络中, 并且利用网络的信息保持性来完成不精确诊断推理, 较好的模拟了专家凭经验、直觉而不是复杂的计算推理过程。采用基于神经网络的自学习功能、联想记忆功能、分布式并行信息处理功能, 在诊断系统的知识表示、获取和并行推理等方面有一定的优势。

模糊神经网络诊断是由神经网络和模糊逻辑相集成的技术。模糊神经网络 (FNN) 是由两个或两个以上模糊神经元相互连接形成的网络。它的构造方法一般有两类: 一是传统神经网络模糊化, 这种 FNN 保留原来的神经网络结构, 而将神经元进行模糊化处理, 使之具有模糊信息的能力; 二是直接根据模糊规则或模糊分类算法构造相应的网络结构。

在旋转机械诊断领域中, 通常采用前一类网络结构, 本文中采用的 Rule 型模糊联想记忆 (FAM) 网络就属于这一类, 它能和专家系统较好地融合在一起, 其系统结构如图 1 所示。

在这种联想记忆系统中, 规则库可以写成  $(A_1, B_1), (A_2, B_2), \dots, (A_p, B_p)$  每个输入  $A$  可以不同程度地作用模糊联想记忆中的每一条规则。最小模糊联想记忆系统  $(A_i, B_i)$  映射输入  $A$  到  $B_i$ ,  $B_i$  为  $B$  的一部分。相应的输出模糊集合  $B$  可以通过各部分作用的模糊集合结果的组合来获得。即有公式:

$$B = w_1 B_1 + w_2 B_2 + \dots + w_p B_p$$

收稿日期: 1998-07-31; 修订日期: 1998-11-01

作者简介: 邱忠宇 (1971-), 男, 博士生, 浙江大学机械制造及自动化系, 主要从事旋转机械故障诊断理论及系统方面的研究工作。通讯处:

310027 浙江大学 537 信箱

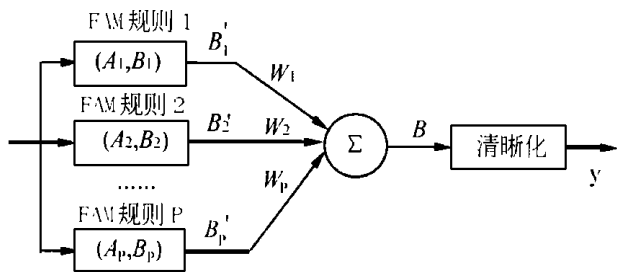


图 1 模糊联想记忆网络

其中,  $w_i$  反映模糊联想记忆规则  $(A_i, B_i)$  的可信度 (或强度)。在实际中, 还将输出模糊向量  $B$  通过清晰化 (defuzzify) 变成输出  $y$ 。

模糊联想记忆规则的获取是此模糊神经网络设计的关键, 而且隶属函数形状的合理取定也对模糊系统的性能影响极大。在模糊专家系统中, 一般的“IF - THEN”规则来自对专家经验的总结, 这是一项相当费时费力的工作。由于利用模糊神经网络能从过程数值中直接抽取“IF - THEN”规则, 这就为实现知识的自动获取开辟了一条有效的途径。

由于模糊神经网络的节点和权值可用隶属函数和模糊规则来解释, 因而从模糊神经网络的权值和节点参数可直接写出模糊规则和隶属函数。因此, 模糊联想记忆规则提取的神经网络方法可理解为对给定样本集合

$$S_1 = \{ (Z_i, Y_i) \mid Z_i \in R^n, Y_i \in R^m, i = 1, 2, \dots, p \}$$

和容许误差  $\lambda$  按一定的推理计算模型求出规则  $R^i$  的具体表达过程。

如果考虑三个输入、一个输出的结构, 采用 Sugeno 模糊推理计算模型, 则模糊联想记忆规则表达形式及计算公式如下:

$R^i$ : IF  $x_1$  IS  $A_{1j}$  AND  $x_2$  IS  $A_{2k}$  AND  $x_3$  IS  $A_{3l}$   
THEN  $y$  IS  $f_i$

$$\bar{u}_i = A_{1j}(x_1) \cdot A_{2k}(x_2) \cdot A_{3l}(x_3)$$

$$\bar{u}_i = \bar{u}_i / \sum_{k=1}^p \bar{u}_k$$

$$y^* = \sum \bar{u}_i f_i$$

其中:  $A_{1j}, A_{2k}, A_{3l}$  为模糊变量;

$A_{1j}(x_1), A_{2k}(x_2), A_{3l}(x_3)$  为隶属度函数;

$f_i$  为常数。

如果给出了训练样本及隶属度函数 (下面将要讨论), 依据 Sugeno 模糊推理计算模型, 我们就可以构造出一个模糊联想记忆网络。通过此网络, 可以实现故障诊断中模式分类和模式综合功能。

### 3 基于知识与模糊神经网络故障诊断专家系统的实现

电厂汽轮发电机组结构的复杂性使得其故障具有多层次性、模糊不确定性等特点, 很难用单一的判别方式将各种故障截然分开。基于知识的符号推理故障诊断系统和基于模糊神经网络的故障诊断系统在很多方面都具有互补的特性。前者具有模块知识表示明确, 无需大量样本和较强逻辑思维能力等优点。后者具有高度非线性映射及自学习、自组织能力。两者集成的基于知识与模糊神经网络的诊断系统将为大型汽轮发电机组的故障诊断提供更高的准确率及更强的适应能力。系统的整体框架如图 2 所示。

诊断信息获取是整个系统的输入, 包括自动获取和人工交互获取两种途径。通过系统组态启动任务调度机, 进入智能推理机工作。由任务调度机控制, 规则符号推理和模糊神经网络推理交替进行, 并根据需要随时调入知识库中各种形式的规则。首先是诊断信息模糊化, 并激活模糊神经网络推理机, 推理的中间结论存入动态数据库中, 并和已在其中的各种信息或征兆相结合。然后同时启动一个或多个规则推理机进行推理, 最后规则推理机产生的结果和动态数据库交互后, 再次启动模糊神经网络推理机, 经过模糊的清晰化、解释机的解释, 输出诊断结果。自学习机由任务调度机来触发, 随时可以对推理机和规则库进行学习、完善。

知识库作为诊断专家系统的核心, 它的结构特点反映了整个系统的实现思路, 知识库中规则库组织的好坏与否是专家系统成败的关键, 根据基于规则的模糊神经网络专家系统的特点, 本文把 rule 型模糊神经网络结构也定义为一种形式的规则, 则系统定义了广义三规则结构, 即元规则。故障诊断规

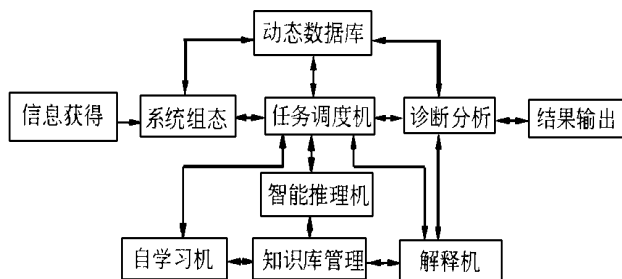


图 2 系统框架

则、结论合并规则。

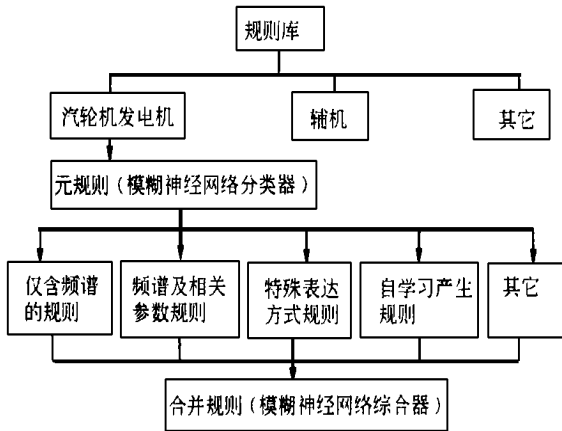


图 3 规则库的结构

图 3所示为面向汽轮发电机组的基于知识与模糊神经网络诊断专家系统的规则层次结构。

3.1 元规则

在故障诊断过程中,元规则是控制策略规则。元规则激活后,控制转移到待诊断故障框架,如不平衡框架 转子碰磨框架 油膜故障框架等,限制对知识库进行盲目搜索和匹配。元规则一般由故障的主要征兆构成(频谱征兆等),反映了故障的特征和故障诊断策略,它满足比故障诊断规则弱的条件,以免发生漏诊。这部分的规则由模糊神经网络分类器实现。

由于采用基于 rule 的 FAM 作为分类器,它的输入矢量的模糊化通过适当的隶属度函数进行。因为在汽轮发电机组状态监测诊断中,机组振动频谱中各频段振幅分布对机器工作状态反映最为敏感,所以,对于频域征兆输入取为振动频谱中各频段的振幅分布。由于在实际工程中,不同机组乃至同一机组不同测点,不同时期的振动频谱分布差异较大,考虑到模糊神经网络的适应性,本文中的隶属度函数取为每个频段振幅占所取特征频段总振幅的比值,即

$$\mu(x_i) = x_i / \sum_{j=1}^n x_j \quad i = 1, 2, \dots, n$$

式中  $x_i, x_j$  分别为第  $i$  个和第  $j$  个特征频段的最大谱值,  $n$  为特征频段数。另外,对于语义形式征兆(如温度、压力过高、过低等),其隶属度函数可取为梯形函数。

3.2 故障诊断规则

故障诊断规则对故障可能出现的各种情况进行描述,反映了故障的因果关系和故障诊断的难易程度。这部分采用了产生式规则结构,其中涉及到的故障征兆和故障原因的数目比较多,是模糊神经网络规则不能包括的。通常将某几类的故障诊断规则放在一个框架内。触发此规则库的输入是模糊神经网络分类器的输出,此规则库推理的结论经过模糊

化作为模糊神经网络综合器的输入。

3.3 结论合并规则

按照分布式并行诊断的思想,通过不同的知识库、规则库或是不同的专家系统得出的结论的统一,构成了专家系统的最终结论。对于本系统,由于规则库中规则的形式多样,不同形式的规则都可能对结论有影响,而且结论如何能模糊反映机组的实际状态,都需要采用规则的合并算法来进行综合。模糊神经网络综合器是此规则库的实现方式。

通过对模糊识别中常用的众多相似度和贴近度函数的考察和对比,本文选取了夹角余弦函数作为隶属度函数以求得输出的分类隶属度。对于  $i$  类模式问题,网络有  $i$  个输出节点,用  $n$  维矢量  $G$  表示第  $i$  类模式的聚类中心,则第  $i$  个模式对第  $j$  类的隶属度函数取为

$$\mu_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n x_{ik} \cdot c_{jk}}{\sum_{k=1}^n x_{ik}^2 \cdot \sum_{k=1}^n c_{jk}^2}$$

式中  $x_{ik}, c_{jk}$  分别为第  $i$  个模式  $x_i$  和第  $j$  类模式中心  $c_j$  的第  $k$  个特征元素,且  $c_{jk}$  由下式确定

$$c_{jk} = \frac{\sum_{m=1}^{n_j} x_{mk}}{n_j} \quad k = 1, 2, \dots, n$$

这里  $x_{mk}$  为第  $j$  类第  $m$  个模式的第  $k$  个元素,  $n_j$  为第  $j$  类的模式数。

4 小结

通过以上分析,我们可以看到,采用广义三层规则结构将模糊神经网络技术和基于知识的故障诊断技术结合起来,应用于电厂汽轮发电机组故障诊断专家系统中,具有层次清晰、容易理解、推理效率高、诊断准确的特点。它不仅体现了旋转机械故障发生的模糊不确定性,解决了故障征兆和故障原因的非线性映射问题,而且实现了符号推理与神经网络推理的有机结合,从而使诊断专家系统能够较好地模拟人类专家的逻辑思维和形象思维能力。该技术在电力系统有着广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 刘增良,刘有才.模糊逻辑与神经网络.北京航空航天大学出版社,1996.
- [2] 王向周,王渝,白志大.电液伺服阀故障诊断专家系统的研究.北京理工大学学报,1997,6.
- [3] 许云飞,贾平民等.旋转机械振动故障诊断的一种模糊神经网络方法研究.振动工程学报,1996,9.
- [4] Jian Guan, James H. Graham. An integrated approach for fault diagnosis with learning. Computers in Industry, 1996, 7.

(何静芳 编辑)

itability. The foregoing can be conducive to an enhancement of the failure diagnosis automation level. **Key words** symptom acquisition, vibration, fault diagnosis

风机转子的振动与临界转速计算分析 = **Calculation and Analysis of Fan Rotor Vibrations and Critical Speeds** [刊,中] / Gao Chunshan, et al (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 385~ 386

The forced draft fans of a certain power station suffered repeated failures because of blade ruptures, seriously disrupting the normal operation of the power station. Calculations were conducted of the fan rotor natural frequency, vibration modes and critical speeds. On the basis of a contrast analysis of the calculation results, the assumption that an irrational rotor construction caused the failure has been ruled out. This made it possible to avoid the unnecessary work relating to the modification of the fan rotor structure. **Key words** fan rotor, vibration, critical speed, calculation

电厂旋风分离器计算机仿真与优化 = **Computer-based Simulation and Optimization of a Power Plant Cyclone Separator** [刊,中] / Yang Weihong, Xiao Zeqiang (South China Industrial University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 387~ 389

With the help of a computational fluid mechanics CFX4.2 software a three-dimensional numerical simulation was performed of the gas-solid two-phase flow of a power plant cyclone separator for pulverized-coal following its modification. The rotational flow of its gas-phase flow field was calculated by the use of a differential Reynolds stress model with the particle movement being computed in Lagrangian coordinates. To attain an optimized solution, employed is a multi-block grid with appropriate-shaped meshes. Discrete equations were solved by a SIMPLE algorithm. The velocity distribution at various sections and particle trajectory within the modified cyclone separator were presented. It is demonstrated that the modified cyclone separator enjoys a higher efficiency as compared with conventional cyclone separators. **Key words** cyclone separator, numerical calculation, rotational flow

基于知识与模糊神经网络的故障诊断技术 = **Knowledge and Fuzzy Neural Network-Based Fault Diagnostic Techniques** [刊,中] / Qiu Zhongyu, et al, (Zhejiang University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 390~ 392

Discussed in this paper are the theory and method of constructing a rule-based fuzzy neural network (FNN). With respect to a large-sized rotating machine the authors have come up with a fault diagnostic technique, which employs a multi-layer rule base and intelligent reasoning approach. With the rule-type fuzzy association memory device serving as a classification and synthesis algorithm of the diagnostic system the knowledge-based symbol processing method is organically integrated with the FNN. Discussed are the issues of FNN input and output vectors. This paper has provided a new approach for setting up a fault-diagnosis expert system suitable for power plant turbogenerators. **Key words** rotating machinery, fault diagnosis, fuzzy neural network, expert system

承担冷负荷的热水网水力工况模拟计算及应用 = **Simulated Calculation on an Hourly Basis of Hydraulic Operating Conditions for a District Heating and Cooling water Network and its Applications** [刊,中] / Fu Lin, Jiang Yi (Qinghua University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 393~ 396

The basic principles are described of a simulated calculation on an hourly basis of the hydraulic operating conditions for a district heating and cooling (DHC) water network. The method for determining heat loads of this kind of network is given and specific examples of calculating pump working points and energy consumption in the DHC project are provided to explain the above-mentioned principles. **Key words** DHC network, hydraulic operating conditions, heat load, pump, simulated calculation

供热机组特性分析的循环函数法 = **Cycle Function Method for the Analysis of Heat Supply Unit Character-**