

基于模糊神经网络的航空装备故障 诊断专家系统框架

ES Framework for Default Diagnosis in Aviation Equipment Based on FNN

空军工程大学工程学院 陈友森 郭建胜

[摘要] 在剖析航空装备故障诊断特点的基础上,提出了基于模糊神经网络的航空装备故障诊断专家系统框架结构,并阐明了专家系统和模糊神经网络相结合的推理机制、模糊神经网络生成方法、知识获取和自学习等关键技术。系统框架的提出为航空装备故障诊断研究提出了新的思路。

关键词: 模糊神经网络 专家系统 故障诊断 航空装备

[ABSTRACT] On the basis of analysis of default diagnosis characteristics of aviation equipment, an expert system (ES) framework of default diagnosis in aviation equipment based on FNN is put forward. Some key technologies, such as the reasoning mechanism under combination of ES and FNN, generative method of FNN, the knowledge acquisition and self-learning are described. The system framework method provides a new thinking for research on default diagnosis of aviation equipment.

Keywords: Fuzzy neural network (FNN) Expert system (ES) Default diagnosis Aviation equipment

专家系统(Expert System, ES)在故障诊断方面具有其独特的优点:专家级的知识和推理能力、交互性(人机对话)、透明性(解释能力)、灵活性(推理机和知识库分离)。它应用于故障诊断已被证实能提高故障诊断能力,但是还存在知识获取“瓶颈”,规则推理“组合爆炸”,无“联想记忆能力”等缺点。人工神经网络是对人脑神经网络系统的模拟,它的自学习能力和容错性、自适应性与人在故障诊断时的思维一致^[1]。

实践已证明神经网络能避免传统专家系统在故障诊断中的“组合爆炸”,能解决知识获取的“瓶颈”问题,并且神经网络采用分布式并行推理技术可以解决基于模糊规则推理的冲突和低效率问题^[2-3]。模糊神经网络(Fuzzy Neural Network, FNN)是神经网络和模糊逻辑

的结合,它有利于故障诊断中的不确定性和模糊性故障的表示和推理,因此模糊神经网络和专家系统的结合给故障诊断带来了新的思路,必将促进故障诊断研究的快速发展。

1 需求分析

航空装备技术先进、结构复杂,故障诊断、维修繁琐;绝大部分设备是“准单次系统”,要求在飞行过程中不能出现故障,否则将发生安全事故,后果不堪设想;装备在地面发生故障后要求快速维修,保证其完好率;在战时,航空装备战伤或者故障将影响飞机出动率,因此准确地诊断、快速地抢修以保证装备安全性、可靠性,并降低装备的维修费用,是提高航空装备战斗力的必然之举。

目前列装的故障检查仪器和机内自检设备(Build-in Test, BIT)由于故障频繁、虚警率高等原因不为维修人员采用。传统的故障诊断是在维修人员直观经验的指导下,通过采取可疑部件更换测试的方式来定位、识别故障部件,然后通过串换件的方式来消除故障。这种方式耗时、费力、效率低、经济效益不佳,还影响部队的战斗力和应急反应速度。同时,由于一些航空装备的维修性、可达性设计不佳,也不便采用传统故障诊断方法进行离位检测、串换件等操作。

通过对航空装备故障特征和装备保障特殊性的分析,航空装备故障诊断专家系统有如下需求:(1)知识丰富的需求:知识应包括广泛征集的维修一线人员的经验、故障诊断理论、电子电器机械故障原理;(2)自学习能力的的需求:通过事例学习提炼简化知识,自行处理不重复发生故障和偶然故障,降低知识工程师对规则知识提炼的难度;(3)推理效率的需求:增强诊断的实时性,避免推理规则“组合爆炸”;(4)降低诊断虚警率的需求:对推理结论进行适当的融合处理;(5)模糊推理需求:对规则的事实、证据进行模糊性、不确定性处理;(6)对复杂系统和设备进行分阶段诊断的需求:采

用模块分解技术进行分阶段诊断; (7) 快速诊断效率的要求; (8) 对疑难故障诊断的需求。

2 基于模糊神经网络的故障诊断专家系统框架

根据系统需求分析提出了基于模糊神经网络的故障诊断专家系统框架结构(图 1)。该系统结合模糊逻辑在不确定性知识表示和推理中的利用, 吸收了神经网络具有自学习能力、容错推理性能好的优点, 在具有交互性、模块性强、推理清晰的传统专家系统中构建。总体上看, 系统由人机接口、推理机、知识库和知识管理系统、数据库和数据库管理系统、解释机构、知识获取机构、自学习机、任务调度机等部件组成。

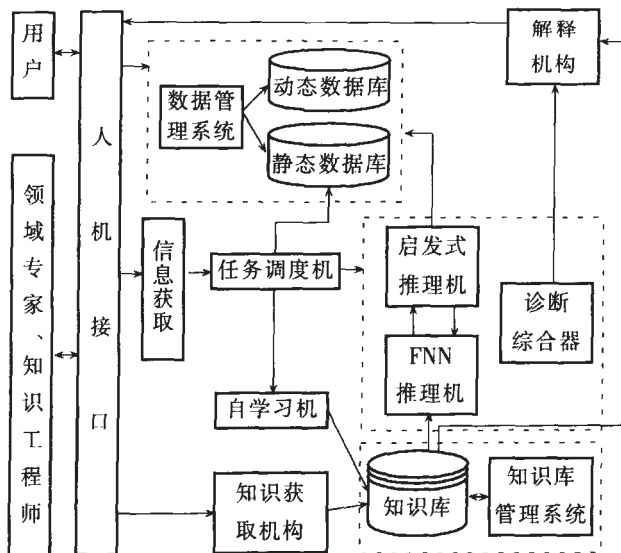


图 1 基于模糊神经网络的航空装备故障诊断专家系统框架

Fig.1 Expert system framework for aviation equipment default diagnosis based on FNN

知识库: 知识来源有 2 处——知识获取机构和自学习机。知识获取机构获取领域内的原理性知识、专家的经验; 自学习机获取事例学习知识。

自学习机: 是神经网络的自学习机构, 它依据一定的学习算法自动地从训练事例中学习, 并且根据外界环境变化修改自己的行为。

推理机: 是专家系统的“思维机构”, 它根据当前已知的故障征兆, 利用知识库中的知识, 按照一定的推理方法和控制策略获得故障结论和解决办法。在系统中,

推理机的推理方式主要有两种——基于规则的推理和基于模糊神经网络的推理, 两种推理方式的结合是系统研究的重点。

任务调度机: 用于协调推理机、数据库和自学习机的工作; 对故障诊断征兆数据进行初步判断, 然后根据判断启动相应的推理机进行推理诊断。

3 关键技术

3.1 专家系统与神经网络的集成

吸取神经网络和专家系统两种方法的优点、弥补各自的不足, 把启发式规则推理和神经网络诊断方法进行有机集成, 建立一个集成专家系统, 从而更加准确地模拟人脑的真实思维过程。根据专家系统与神经网络的集成方式的不同, 可将其分为 3 种类型^[4]: (1) 数据神经网络规则专家系统结论; (2) 征兆专家系统数据神经网络结论; (3) 征兆、数据专家系统、神经网络结论。

根据集成侧重点的不同可把集成分为 3 种模式^[5]: (1) 神经网络支持专家系统模式: 以传统的专家系统技术建立框架, 辅以神经网络技术。比如把神经网络用于专家系统的知识获取解决“知识瓶颈”问题, 在推理中运用神经网络的并行推理、容错推理技术提高专家系统的推理效率。本文采取此模式。(2) 专家系统支持神经网络模式: 以神经网络技术为核心, 运用神经网络进行推理和学习, 然后吸取专家系统的一些优点弥补神经网络在解释、模块化等方面的不足而建立的系统。(3) 专家系统和神经网络对等模式: 将复杂的系统分为若干子系统, 然后根据实际需要对各子系统分别采用神经网络或专家系统等方式来推理诊断, 在它们之间建立一种松耦合或紧耦合的联系。

3.2 推理机的结构

专家系统的推理机是对领域专家思维过程的一种模拟。一般来说, 在诊断故障时, 领域专家首先利用经验思维确定出可疑故障, 然后通过严密的逻辑推理得出最终的结论。在航空装备故障诊断中, 由于故障征兆多, 故障原因多, 如果神经网络的输入层神经元数目太大, 会影响到整个网络的学习速度和训练质量, 因此采用模块分解技术, 将故障征兆、故障原因分为若干个学习模块(模糊神经网络子模块)。

模糊神经网络-启发式规则推理机(图 2)原理: 推理机采用正反向混合推理, 由正向和反向推理机构成。正向推理机由神经网络充当, 每个神经网络对应一类

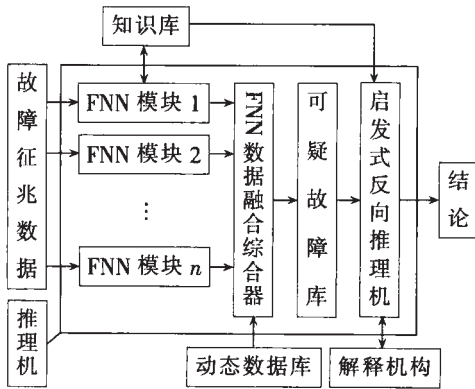


图2 模糊神经网络-启发式规则推理机结构
Fig.2 FNN-heuristic rule reasoner structure

故障，然后由数据融合器对各个子神经网络的输出结果进行融合，并且设定阈值，淘汰权值小的可能故障，将可疑故障输入可疑故障库；而后让专家系统的启发式反向推理机最后确诊。

启发式规则-模糊神经网络推理机(图3)原理:由于神经网络囿于输入节点数，故障征兆在输入模糊神经网络进行诊断前就通过专家系统的正向推理规则推断出故障类型或故障大概位置，将结果输入可疑故障库；然后用模糊神经网络进行分模块精确诊断。在模糊神经网络子模块诊断后将结果送入数据融合综合器采用合并规则合并，最后取得故障诊断结论。

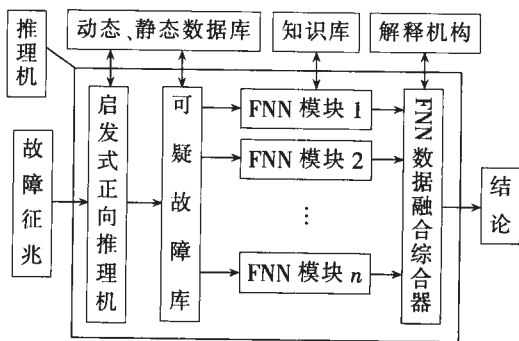


图3 启发式规则-模糊神经网络推理机结构
Fig.3 Heuristic rule-FNN reasoner structure

3.3 模糊神经网络的建立

在航空维修故障诊断中，由于元件参数超出容许范围而又没有产生严重后果的软故障占相当大的比例，它们的形成时间比较长，故障没有明显的界限，呈渐增式增长；同时，检测获得的证据中可能混有噪声、检测手段和装置的误差及外界环境干扰等因素的影

响，这些都导致产生式推理规则中事实、证据的不确定性和模糊性，在故障诊断中通常采用模糊数学的方法来处理。

模糊神经网络(FNN)是神经网络和模糊数学结合的产物。FNN的构造方式有2种，一种是传统神经网络模糊化，一种是直接根据模糊规则或模糊分类算法构造相应的网络。图4所示是一种典型的FNN推理构造。图中，X是输入向量，Y是输出向量， \tilde{X} 、 \tilde{Y} 分别是输入模糊向量、输出模糊向量。

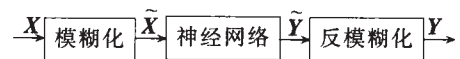


图4 BP模糊神经网络结构
Fig.4 Structure of BP FNN

3.3.1 神经网络模糊化

在故障诊断中，FNN常采用著名的BP(Back Propagation)模型，它是一个三层前向神经网络的反传学习算法，包含一个隐含层。其结构见图5。

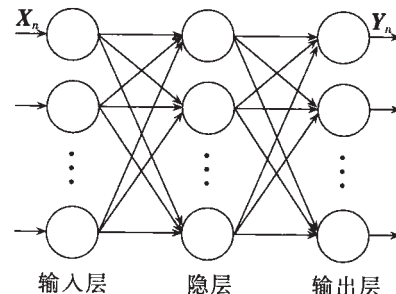


图5 模糊诊断中的BP模型
Fig.5 BP model in fuzzy diagnosis

为了处理模糊规则，神经元的作用函数f选用：

$$f(x) = 1 / (1 + e^{-x})$$

式中，x为输入函数，假设观测到某设备的一征兆群样本 $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ ，同时得出此样本各分量元素 x_i 对征兆i的隶属度，则将X中的各元素转换成隶属度，构成故障征兆模糊向量：

$$\tilde{X} = [u_{x_1}, u_{x_2}, u_{x_3}, \dots, u_{x_n}]$$

式中，u为隶属度，假设该征兆样本是由故障原因Y产生的，Y对各种故障原因的隶属度为 $U_{Y_i}(y)$ 则构成了故障原因模糊向量：

$$\tilde{Y} = [u_{y_1}, u_{y_2}, u_{y_3}, \dots, u_{y_n}]$$

由于航空装备中同一故障原因可能对应多种故障征兆,同一故障征兆也可能对应多种故障原因,为了能从故障征兆中诊断出故障原因,需要预先确定它们之间的隶属程度,而模糊隶属函数(权重的大小)与实际情况的复合程度会直接影响诊断的结果。确定隶属函数的常用方法有:模糊统计实验法、二元对比排列法、加权统计法、动态信号分析法,同时还需确定 Y_i 的阈值,作为故障诊断结论的确定依据。

3.3.2 模糊产生式规则转变成模糊神经网络

在神经网络支持专家系统模式中,神经网络需要完成自学习或执行并行推理,而传统专家系统知识库中的知识一般采用启发式推理规则,因此在本系统中必然要把已有的一部分规则转变成模糊神经网络。转变过程如下:

(1) 模糊产生式规则推理网络转变成基于神经网络的推理网络。

把推理网络中的每一个目标节点和中间节点分别作为一个神经元来处理,它的证据节点当作神经元的输入,并把前提的置信度、规则的置信度分别融于神经网络的输入信息、输出信息中,从而使神经网络同传统的知识系统的推理网络对应起来,见图6(图中是一个3条规则的模糊推理网络,圆:证据节点;长方形:中间节点;椭圆:目标节点;圆弧:关系“与”)。

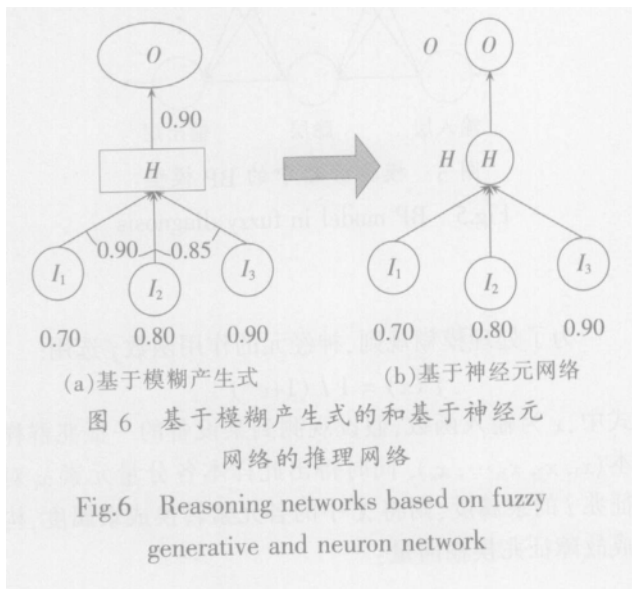


图6中O为输出值,H为中间处理单元,I为确认度。

(2) 模糊神经元的构造。

模糊神经元依然采取BP算法,作用函数为s函数,定义其误差为:

$$E(x, y) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \hat{y}_{ij})^2 ;$$

$$\hat{y}_{ij} = f(s(x_{ij}, w_{ij})) ,$$

式中, m 为学习样本, n 为输出层节点数; x_{ij} 、 y_{ij} 、 \hat{y}_{ij} 分别为第 i 个节点输入、期望输出和实际输出; w_{ij} 为输入层与隐层之间、隐层与输出层之间的权系数; θ_j 为隐层、输出层的阈值; $s(\cdot)$ 为输出层神经元的输入。学习算法采用 Rumelhart, Hinton, Williams 等人提出的最速下降法^[2]。

(3) 模糊产生式规则转变成模糊神经元矩阵。

模糊产生式规则一般为:

IF $A_1(b_1)$ AND $A_2(b_2)$ AND ... AND $A_n(b_n)$
THEN $B(u)$

这里: A_i 为前提, b_i 为前提置信度; B 为结论, u 为规则置信度; 假设获得的出示证据为 $A_1(b_1)$ 、 $A_2(b_2)$ 、 $A_n(b_n)$, 实现规则的匹配需要做些处理, 一般采用改进的加权匹配法来完成:

如果 $\max\{0, b_i - b_i\} \geq \theta_i$, 则称匹配成功, 其中 θ_i 是专家制定的匹配阈值。

根据领域专家的置信度遗传算法可知, 当规则为真时, 结论的置信度:

$$CF = (t_1 \cdot t_2 \cdot \dots \cdot t_n) u,$$

即 $CF = \min(t_1, t_2, \dots, t_n) u,$

$$CF = (t_1 \cdot t_2 \cdot \dots \cdot t_n) u,$$

即 $CF = 1 - [(1 - t_1 u_1) \cdot (1 - t_2 u_2) \cdot \dots \cdot (1 - t_n u_n)]$ 。

基于以上的模糊规则网络各节点与神经网络的各神经元的对应关系, 由模糊产生式规则的前提置信度、规则及其置信度就可以产生对应神经网络的学习样本, 通过学习就能完成模糊推理。

3.4 知识的获取和学习

专家系统的关键是知识的获取, 知识的多寡是决定航空装备故障诊断系统诊断能力的关键因素, 传统的专家知识可由领域专家的经验知识工程师总结, 通过人机接口传入知识获取机构, 在知识获取机构检索、取精后进入知识库中。在航空维修过程中, 由于个人知识有限, 集合大家的经验成为必然; 在实践中故障诊断经验还可直接吸收故障树或者故障字典等成熟知识, 经知识工程师转变成规则后导入知识库。

目前, 航空装备的电子部件经常会遇见一些偶然故障、疑难故障, 用传统的串换件方法来诊断效率低下; 采用 BIT 检测时故障虚警率高, 故障检测能力低。

模糊神经网络有自学习能力,通过学习可以拓宽航空维修中的偶然故障、疑难故障的解决思路,通过隶属度的限制可以降低虚警率。自学习机的运用还可以完成故障监测和预测,以利于目前的“以可靠性为中心”的维修思想。其自学习过程如下:(1)确定一组学习样本;(2)在 $[-1, 1]$ 之间由计算机随机或者专家确定权值(隶属度)和阈值;(3)输入事实数据,通过计算机得到实际输出;(4)通过误差公式计算误差;(5)判断:如果误差小于某一事先设定值,则学习结束,将阈值、权值写入静态数据库,学习或将规则知识写入知识库;否则修改权值和阈值继续迭代。

4 结束语

本文提出了基于模糊神经网络和模糊规则的航空装备故障诊断专家系统框架,它结合了人工智能和专家系统的优点,能广泛吸收一线工作者和专家的经验 and 理论分析,能增加系统的自学习能力,通过模糊推理、结论合并来提高故障定位、识别、诊断能力。并且根据航空装备故障诊断特点设计了专家系统和模糊神经网络相结合的2种推理方式,在此基础上阐述了模糊神经网络的2种生成方法:神经网络模糊化和模糊规则构造模糊神经网络。

我们应当看到航空装备技术先进、结构复杂,是一个复杂的系统,在航空维修实践中还有许多的课题亟待解决,比如本文提出的分阶段分模块诊断技术在实际诊断设计中诊断阶段的划分及层次数的确定,故障诊断过程中如何共享智能检测装置提供的监测数据,如何实现故障的远程诊断、多媒体诊断,如何实现故障诊断后的监测和预防,如何开展故障诊断后的故障原因挖掘等等。

参 考 文 献

- 1 杨廷勇,施冲.基于经验和逻辑思维的故障诊断专家系统.电力自动化设备,2002,22(10):24~26
- 2 史天运,王信义.神经网络与模糊故障诊断专家系统结合的应用研究.北京理工大学学报,1998,18(1):81~86
- 3 潘茂庆,惠克翔.基于神经网络的机载航炮故障诊断专家系统.光电与控制,2002,9(4):59~62
- 4 方晓斌,何勇.基于模糊神经网络的汽油机发动机故障诊断专家系统的研究.上海交通大学学报,2001,19(2):105~111
- 5 王永庆.人工智能原理与方法.西安:西安交通大学出版社,2001

(责编 咏智)

(上接第78页)

程中要设定各功能的权值,并设定相似度值。大于相似度值的实例将被检索出来并在实例结果中显示。

(2)实例推理。选择一个实例,系统将按照事先设定的知识项进行推理,并给出建议。

(3)实例修改。如接受步骤(2)给出的建议,就将实例导入当前窗口进行修改;如不接受给出的建议就开启全新设计。

(4)实例入库。如果修改后的工装满足实例要求,就将其作为新的实例保存到实例库中,从而使实例库不断得到扩充。

3.2.3 参数化功能实现

根据合作单位实际,选取(零)部件建立了参数化库,利用参数化技术来实现快速设计。在对模型进行分析的基础上设置控制模型的尺寸参数。控制模型的尺寸参数分为两种:一种是与其他参数无关的独立参数;另一种是与其他参数相关的非独立参数。前者主要用来控制三维模型的几何尺寸和拓扑关系,后者可用以独立参数为自变量的关系式来表达。

3.2.4 辅助功能

在设计过程中有时希望快速找到以往设计的工装,我们提供了工装浏览和工装查找的功能。通过人机交互找到需要的工装,可以察看该工装的详细信息,打开工装模型进行修改或者将其导入装配环境进行装配。

4 结束语

将基于实例推理技术和参数化技术应用到工装设计中,以Pro/E三维设计软件为平台,开发了工装设计与管理系统的。该系统能有效利用以往成功的设计实例,借助前人的设计经验快速设计生产中所需要的工装。该系统具有自学习功能,随着实例库的扩充,系统的设计能力不断得到增强。该系统的参数化功能也为工装的快速设计提供了实现的可能,同时该系统的管理功能也为设计人员提供了很大的便利。利用该系统可以显著提高工装设计的效率,从而为企业赢得更大的效益。

参 考 文 献

- 1 钱晓明.支持快速变形设计的产品模型研究.机械科学与技术,2003(7):670~674
- 2 殷国富,陈永化.计算机辅助设计技术与应用.北京:科学出版社,2000
- 3 齐从谦.基于参数化技术的设计方法研究.机械设计与研究,2002(10):13~15

(责编 宇迪 凌川)