

# 基于神经网络和模糊逻辑的工业过程 故障诊断与报警系统

苏建元<sup>1</sup> 孙蔚<sup>1</sup> 孙薇<sup>1</sup> 叶海涛<sup>2</sup>

(1. 河海大学电气工程学院, 南京 210024) (2. 杭州市网通公司, 杭州 310000)

**摘要** 用单一理论和方法对复杂系统进行故障诊断效果不太好, 文章讨论了基于神经网络和模糊系统的故障诊断以及它们之间结合方式的特点, 提出了一种保障工业生产安全可靠运行的有效方法: 分级故障诊断算法 + 过程监控与报警, 仿真并设计了基于工控网络的工业过程故障诊断与报警系统. 研究表明基于径向基函数神经网络 + 模糊逻辑的算法具有较快的训练速度和较好的泛化能力, 可识别多回路故障.

**关键词** 故障诊断, 神经网络, 模糊逻辑, 工业过程

## 引言

我国的故障诊断技术发展于二十世纪七十年代末, 一些自动控制学术会议都有这方面的专题, 在某些理论研究方面我国已和国外不相上下, 在一些特定设备的诊断研究方面也很有特色, 形成了一批自己的监测诊断产品. 但针对工业过程的故障诊断的理论研究和应用则相对较少, 由于实际工业过程存在多故障、多过程、突发性故障等特点, 常规方法和技术不能满足故障诊断的要求. 随着人工智能技术的迅速发展, 特别是知识工程、专家系统和人工神经网络在诊断领域的进一步应用, 人们对智能诊断问题进行了更加深入和系统的研究. 智能诊断技术模拟人类专家对复杂系统进行诊断, 它的优势是综合了多个专家的最优经验, 其功能达到专家水平, 而且比专家更快速. 智能诊断方法可分为两种: 以符号推理为主的方法(如模糊推理方法 Fuzzy)和以网络连接为主的方法(如人工神经网络方法 ANN). 符号处理方法善于模拟人脑的逻辑思维, 但其机制固定于已知知识与推理, 有一定局限性, 网络联接方法适合于模拟人脑的结构, 但由于固定的体系结构与组成方案, 使得所构成的系统达不到开发多种多样知识的要求. 这两类方法结合起来形成混合智能系统, 可以提高知识表达和自学习能力<sup>[1-2]</sup>. 神经网络作为复杂的动力学系统与模糊系统结合, 将是 21 世纪的核心技术, 模糊神经网络用于故障诊断是近年来的研究热点, 包括软、硬件的

工程化的故障诊断系统的研究更具有实际意义.

## 1 基于神经网络和模糊系统的故障诊断

### 1.1 基于神经网络的故障诊断

神经网络之所以能够应用于故障诊断主要是因为: 训练过的神经网络可以根据对象的正常历史数据训练网络, 然后将此信息与当前的测量数据进行比较, 以确定故障. 人工神经网络具有滤出噪声及在有噪声的情况下得出正确结论的能力, 适合在线故障诊断和检测.

目前应用于故障诊断方面的神经元网络模型主要有后向传播神经网络(BP)、径向基神经网络(RBF)、自适应谐振神经网络(ART)、自组织特征映射神经网络(SOM)等. BP 网络和 RBF 网络的学习算法属于有教师型的, 用于故障识别的效果比较好. 训练好的 BP 网络和 RBF 网络计算速度快、内存消耗低, 可用于实时检测和诊断. BP 网络在应用上比较直观易解, 有很多变形及扩展, 这大大优化并弥补了原有 BP 网络的不足, 如 Levenberg-Marquardt 算法(L-M)在时间和速度上应该说已经比较完美. RBF 和 BP 可逼近任意的连续非线性函数, RBF 在逼近能力、分类能力、学习速度均优于 BP, 但 RBF 网络初始中心和样本数目的选择对识别结果影响很大. ART 和 SOM 网络均属于无教师的竞争学习的自组织网络. ART 网络可以在线学习, 边学习边记忆. SOM 网络采用离线的方式进行学习, 它能够很好地进行特征提取. 目前, 这两类网络在

故障诊断中应用还比较少。

单纯利用神经网络进行故障诊断的缺点是难于利用知识经验、训练时间长、大型网络的稳定性分析困难、算法的收敛性实时性难以保证、而且对远离样本的故障诊断结果的准确性难以保证、对于复杂系统存在单一网络规模大和故障空间组合爆炸等问题。

### 1.2 基于模糊系统的故障诊断

模糊理论非常适合于含有模糊现象和不确定信息的系统的诊断。模糊故障诊断由两种基本方法:一种是先建立征兆与故障类型的因果关系矩阵  $R$ ,再建立故障与征兆的模糊关系方程,这是一种基于模糊关系及合成算法的诊断方法。另一种方法是先建立故障与征兆的模糊规则库,再进行模糊逻辑推理的诊断过程。

基于模糊理论的故障诊断也有自身的一些弱点:模糊诊断的知识获取比较困难,故障与征兆的模糊关系较难确定;系统的诊断能力依赖于模糊知识库,学习能力差,容易发生漏诊和误诊;故障诊断时,推理速度慢、效率低、能力弱;难以处理故障诊断中的不确定性问题。

由于模糊语言变量是使用隶属度表示的,如何实现语言变量与模糊数之间的转换,是实现上的一个难点。尽管如此,以模糊集表示的模糊语言变量能更准确的表示具有模糊特征的故障与征兆,符合事物的客观本质而且能处理诊断中的不确定信息和不完整信息。

### 1.3 神经网络与模糊系统的融合形态

通过上述分析知道单纯用神经网络或模糊逻辑对复杂系统进行故障诊断效果不太理想,将这两类方法结合起来形成混合智能系统,功能要比单一系统更强,如 FCM(模糊联想记忆)、FART(模糊自适应谐振网络)、FCM(模糊认知图)、FMLP(模糊多层感知器)等<sup>[3]</sup>。神经网络和模糊系统融合实质上是对人脑结构和思维功能的双重模拟,其形态大致有下列六类:(1)简单结合型。可以用“*If-then*”规则表示的部分用模糊系统描述,难用“*If-then*”规则表示的部分则用神经网络实现,两者之间没有直接联系。(2)Fuzzy 主导型。整个系统由模糊系统表示,但模糊系统的隶属度函数通过神经网络学习确定。(3)ANN 主导型。整个系统由神经网络表示,用模糊系统的知识和规则增强 ANN 学习能力,克服其易

局部收敛的缺点。(4)ANN 与 Fuzzy 完全融合型。模糊系统用一个等价结构的神经网络表示,神经网络的所有节点和参数对应模糊系统的隶属度函数或推理过程。(5)并联型。模糊系统与神经网络的输入相同,在系统中按并联的方式连接。可分为同等型和互补型。互补型中系统的输出主要由一个子系统(可以是模糊系统也可以是神经网络系统)决定,而另一个子系统的输出起补偿作用。这种情况往往是在周围的环境产生变化时,一个系统的输出会产生偏差,需另一个系统进行补偿。(6)串联型。神经网络和模糊系统按串联方式连接。将用符号方法表达的知识交给模糊逻辑系统,将由数值表达的知识交给神经网络,它们相互配合、协调工作,可以根据传感器输出数据先经过神经网络的计算,找出故障发生的大体位置,然后再根据故障征兆,通过模糊逻辑推理找出故障发生的具体部位,这是神经网络+模糊推理的串联方式;反之就是模糊推理+神经网络的串联方式。串联型适用于领域知识由符号和数值共同表达的领域。以上各种方式及其组合形式在故障诊断中均可使用。

### 1.4 一种工业过程分级故障诊断仿真思路

复杂工业过程的对象结构和参数未知或部分未知,其定量数学模型很难建立,问题空间大,此时可采用复合智能诊断方法,将系统分为回路级和元件级(或系统级和检测级),构建一种“ANN + FUZZY”的串联故障诊断方法<sup>[4,5]</sup>。仿真系统结构如图1所示。由于回路级诊断效果影响系统的成败,所以本文对文献[4]的算例进行验证后重点研究了基于 ANN 的回路级故障诊断。出于在线诊断的考虑,选用改进 BP 算法和 RBF 算法,结果表明 RBF 在实时性、泛化能力、多回路故障检测等方面性能略优于改进 BP 算法(如 L-M 法)。

图1中利用神经网络对部分重要数据的处理实现回路级的故障诊断。根据生产流程回路级诊断任务确定 BP 网络的输入层单元数  $N=4$ 、输出层单元数  $M=4$ 、隐含层单元数  $K=6$ ,训练方法选用 BP 网络的改进算法,分别选为 1、增加动量因子法;2、L-M 优化算法(误差为  $1E-22$ );3、贝叶斯正则化算法。仿真发现采用增加动量因子法容易陷入局部极小,训练步数为 590 步;采用 L-M 优化算法和贝叶

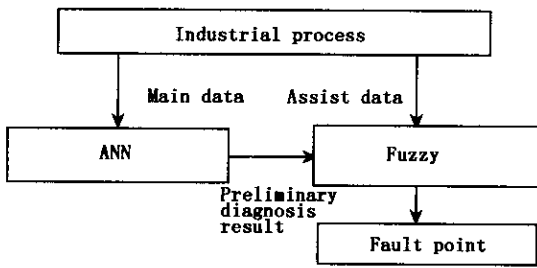


图1 分级故障诊断原理图

Fig.1 Schematic diagram of graduation fault diagnosis

斯正则化算法都不会陷入局部极小,而且收敛速度较快,L-M法训练步数为32步,贝叶斯正则化算法训练步数为60步.理论分析也告诉我们常规BP算法采用梯度下降法,训练中学习速率为一较小的常数,存在收敛速度慢和局部极小问题,L-M法结合了梯度下降法和牛顿法的优点,在网络权值数目较少时收敛非常迅速,性能更好一些.由于在实际应用中需要考虑训练好后神经网络的泛化性,因此论文对神经网络的泛化性进行了研究,按等价类划分原则和边界条件设计了测试用例,通过166组数据测试,说明网络泛化能力强、网络结构和训练样本集合适.其实训练样本数对网络的泛化能力有很大的影响,训练样本数太多,它倾向于记住所有的训练数据,也包括了噪声的影响,反而降低了泛化能力,训练样本数太少,不能拟和样本数据,也就谈不上较好的泛化能力.对于远离训练样本集的测试样本造成网络的误差,可以采用增加隐层的数目调节提高网络的泛化性能.为了进一步提高实时性,对同样的样本集还用RBF网络对其进行了处理,利用MATLAB7工具箱中的newrbe函数创建RBF网络,边创建边训练网络,发现径向基函数的分布常数对不同的测试数据要取不同的值,但只要取值恰当,诊断结果既正确又快速(比L-M法还快).分布常数的寻优可用试探法或全局优化理论(如遗传算法、免疫算法等)<sup>[6]</sup>.实际应用中有时要识别同时出现的多回路故障,仿真发现如果不增加训练样本,则BP和RBF都不能识别,但增加训练样本后,BP仍不能有效识别,而RBF能正确快速地识别!模糊逻辑部分通过对神经网络得到的初步诊断结果和其他测量数据的处理,实现系统元件级的故障诊断<sup>[7]</sup>,各变量采用梯形隶属度函数形式(如降半梯形分布、升半梯形分布等),重叠率为0.3,模糊推理合成规则采用“Mamdani”推理规则,模糊规则库

由若干模糊“if-then”规则组成,根据系统中信号关联关系及专家经验提出了19条模糊推理规则.经测试,故障检测系统的成功率达到了99%.仿真结果表明该思路用于工业生产过程是切实可行的!

## 2 工业过程监控与报警系统

在对故障进行诊断的同时,需要对故障点进行报警和监控故障动态,比如硝酸生产过程中的物料温度、水压、流量、限位开关是否定位、热蒸汽的压力等,许多量之间都有一定关系.硝酸生产过程报警系统的硬件总体结构如图3所示.各个工作部件主要是利用西门子的S7系列可编程控制器(PLC)进行控制以及各种OP控制面板进行现场的控制和显示,然后利用西门子的工业现场总线Profibus-DP,将工业现场的各种数据采集(Data acquisition)到服务器端(Server),在总控室通过局域网访问服务器的数据.当有故障发生时,总控室的客户端(Client)能够立即从服务器端读取故障数据,并且将数据送往下位机报警箱DSR32B,通过报警箱产生声音报警,同时进一步将故障数据传送到报警联动控制箱,从而控制视频矩阵MX2560对故障现场进行视频录像,图2中Camera是前端摄像头,Monitor为监视器输出部分.在具体的通信实现中,客户端利用VB语言通过西门子的S7 OPCSever完成对服务器中WinCC中的变量(Tag)的访问<sup>[8]</sup>,并存储在客户端中,对数据进行必要的判断、处理、转换、编码,从而把数据处理成满足与报警箱通讯协议的数据,最后通过VB中通讯控件MSComm,按照一定的报警时间要求,完成对报警箱数据的发送.对于报警通讯箱的继电器输出复位情况,有2种方法,一种是手动复位,即:报警发生后,一直持续,直到人为干预后报警才能消除.二是自动复位,即:报警发生后3秒钟后,继电器复位,报警自动解除.

为了提高系统的可靠性和扩展性,软件采用标准接口技术(如OLE、COM等),通过标准接口搭建功能框架,然后在框架内根据需求添加各种功能模块,包括故障诊断算法处理模块、数据信息管理模块、报警控制模块、图像信息处理模块、通讯模块等,各模块的添加具有相对的独立性,通过主框架程序进行数据交换.该故障诊断与报警系统的硬件与软件可方便地集成到实际的工业控制系统中.对该系统稍加修改可应用于其它场合.

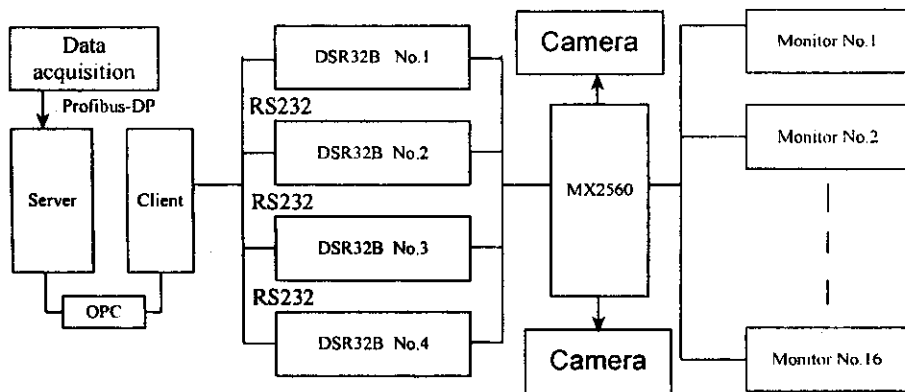


图 2 硝酸生产过程报警系统硬件总体结构

Fig.2 Hardware structure of alarm system about nitric acid production process

### 3 结束语

故障诊断技术是近年来工业控制领域的重要研究方向。故障诊断方法很多,只有针对不同的故障类型选择合适的方法,才能准确及时地排除故障,确保系统的正常运行。神经网络、免疫遗传算法等与模糊系统相结合进行故障诊断可以互相取长补短<sup>[9,10]</sup>。采用改进 BP 算法(如增加动量因子法、L-M 优化算法、贝叶斯正则化算法)或 RBF 网络减少了训练步数,提高了实时性;通过神经网络的泛化能力的研究,增强了实用性;针对同时出现的多回路故障的研究符合实际情况具有应用价值;将故障诊断理论组件化后融合到通用报警系统中使理论研究更具有针对性。理论分析与实践证明,分级故障诊断技术+过程监控与报警将是保障工业生产安全可靠运行的一种有效方法!

### 参 考 文 献

- 1 吴今培,肖健华.智能故障诊断与专家系统(第1版).北京:科学出版社,1997:173~174(WU Jingpei,XIAO Jianhua. Intelligent Fault Diagnosis and Expert System (1st edition). Beijing:Scientific Press,1997:173~174 (in Chinese))
- 2 易继楷,侯媛彬.智能控制技术(第1版).北京:北京工业大学出版社,2001:97~194(YI Jikai,HOU Yuanbin. Intelligent Control Technology (1st edition). Beijing:Beijing Industrial University Press,2001:97~194 (in Chinese))
- 3 王士同.模糊系统、模糊神经网络及应用程序设计.上海:上海科学技术文献出版社,1998:21~169(WANG Shitong. Fuzzy System and Fuzzy Neural Network and Application

Programming. Shanghai:Shanghai Science and Technology Literature Press,1998:21~169 (in Chinese))

- 4 宋彤,孙增国,冯冲.神经网络和模糊系统在故障诊断中的应用.计算技术与自动化,2004,23(2):32~35(SONG Tong,SUN Zengguo,FENG Chong. Neural Network and Fuzzy System Applications to Fault Diagnosis. *Computing Technology and Automation* 2004,23(2):32~35 (in Chinese))
- 5 Diego Ruiz. Fault diagnosis support system for complex chemical plants. *Computer And Chemical Engineering*,2001,25:151~160
- 6 苏建元.免疫控制算法与应用研究.南京师范大学学报(工程技术版),2005,5(4):29~33(SU Jianyuan. Study on Immune Control Algorithm and Application. *Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology)* 2005,5(4):29~33 (in Chinese))
- 7 Wang XZ,Chen BH. Neural nets,fuzzy sets and digraphs in safety and operability studies of refinery reaction processes. *Chemical Engineering Science*,1996,51(10):2169~2178
- 8 叶海涛,苏建元.VB 中利用 OPC 访问 WinCC 实现下位机实时报警.测控技术,2005,24(11):50~52(YE Haitao,SU Jianyuan. Real-Time Alert of Slave Computer Using OPC to Access WinCC in VB Language. *Measurement and Control Technology* 2005,24(11):50~52 (in Chinese))
- 9 冷波,苏建元.聚类融合控制算法研究.自动化博览,2005,22(5):67~68(Leng Bo,SU Jianyuan. Study on Cluster-Fusion control algorithm. *Automation Panorama* 2005,22(5):67~68 (in Chinese))
- 10 师五喜,霍伟,吴宏鑫.柔性关节微操作机器人自适应模糊预测控制.动力学与控制学报,2003,1(1):84~89(SHI Wuxi,HUO Wei,WU Hongxin. Auto-adapted Fuzzy Forecast Control to Flexible Joint Micro-operation Robot. *Journal of Dynamics and Control* 2003,1(1):84~89 (in Chinese))

# FAULT DIAGNOSIS AND ALARM SYSTEM OF INDUSTRIAL PROCESS BASED ON NEURAL NETWORK AND FUZZY LOGIC

Su Jianyuan<sup>1</sup> Sun Wei<sup>1</sup> Sun Wei<sup>1</sup> Ye Haitao<sup>2</sup>

( 1. College of Electrical Engineering , Hohai University , Nanjing 210024 , China )

( 2. Hangzhou Network Communication Company , Hangzhou 310000 , China )

**Abstract** Fault diagnosis to complex system with one method is insufficient. The characteristics of fault diagnosis based on neural networks and fuzzy logic systems and their union were discussed. A kind of effective method to safeguard industrial production was presented : graduation fault diagnosis and alarm system. Fault diagnosis and alarm system based on industrial control nets were simulated and designed. The results show that the algorithm based on radial basis function neural network and fuzzy logic has faster training speed and better generalization ability , and it can distinguish multi-routes faults .

**Key words** fault diagnosis ,neural network ,fuzzy logic inference ,industrial process