

基于模糊神经网络的凝汽器故障诊断及其性能监测

滕丕忠¹, 张 聘², 陈荣生³, 陈 群², 石永恒¹, 禹宝宁², 杨亚平¹

(1. 东南大学 动力工程系, 江苏 南京 210096; 2. 福建永安火电厂, 福建 永安 364013;

3. 泉州电力技术学校 动力系, 福建 泉州 364000)

摘要: 凝汽器是凝汽式汽轮机的主要辅助设备, 其凝汽器系统运行中出现故障的原因与故障征兆之间是非线性关系, 具有复杂性、模糊性和随机性, 难以用数学公式表示。针对此情况, 结合模糊理论与神经网络 2 种故障诊断方法的优势, 提出采用串联型模糊神经网络为凝汽器故障诊断模型, 用 Matlab 6.5 矩阵式运算语言开发故障诊断及其性能监测软件。故障诊断软件包括征兆参数的获得、故障诊断及结果柱状图显示; 性能分析软件主要是相关参数的计算及正常与变化工况曲线的比较。给出了某电厂 100 MW 汽轮发电机组诊断实例。

关键词: 凝汽器; 模糊神经网络; 故障诊断; 动态数据交换

中图分类号: TM 311

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2007)01-0090-03

0 引言

凝汽器是凝汽式汽轮机的主要辅助设备, 是汽轮机的重要组成部分。凝汽器的真空值、凝结水的过冷度和含氧量是评价凝汽器运行好坏的主要指标。凝汽器压力升高 1 kPa, 会使汽轮机汽耗增加 1.5%~2.5%; 凝结水过冷度增加 1℃, 会导致电站煤耗增加 0.13%; 凝结水含氧量的增加将使热力系统管道、低压加热器管道等遭受腐蚀^[1]。因此, 凝汽器系统运行的好坏对汽轮机组运行的安全性和经济性有很大影响。由于凝汽器系统运行过程中出现故障的原因与故障征兆之间是非线性关系, 其具有复杂性、模糊性及随机性, 以至于很难用精确的数学公式表达。最近十几年, 人工智能技术得到了快速发展并在工业上得到一定的应用, 其中有模糊逻辑、神经网络等新技术。本文将这 2 种应用最广泛的技术结合在一起, 使之发挥各自的优势, 构成模糊神经网络的凝汽器故障诊断系统; 同时开发了凝汽器性能参数的监测软件, 投入现场使用后使凝汽器在最好的状态下运行。

1 模糊神经网络的故障诊断

1.1 模糊逻辑推理

模糊逻辑推理是建立在模糊数学的理论基础上, 通过隶属函数的方法, 结合凝汽器设备运行的专业理论知识, 建立故障征兆知识库。模糊逻辑推理中最重要的环节是隶属函数的确定。隶属函数就是根据凝汽器设备运行的影响因素(即征兆参数)对凝汽器的影响程度, 来确定主要故障原因的自定义函数。结合工程

专家和技术人员的经验, 本文将凝汽器的故障论域分为 11 个典型故障 $u_i (i=1, 2, \dots, 11)$, 征兆论域分为 13 个典型征兆参数 $x_j (j=1, 2, \dots, 13)$ 。针对神经网络输入特征向量只有 0 或 1 这 2 种状态的情况, 现将征兆参数的变化分为 5 种状态: 急剧变小、缓慢变小、正常、缓慢变大、急剧变大, 用这 5 种状态描述征兆参数对故障参数的影响程度, 相应的量化值为 $[-1 \ -0.5 \ 0 \ 0.5 \ 1]$ 。考虑到 Matlab 神经网络函数输入向量的范围, 将 5 种状态的量化值范围定为 $[0 \ 1]$, 其相应的量化值为 $[0 \ 0.25 \ 0.5 \ 0.75 \ 1]$ 。根据凝汽器的故障征兆论域, 得到对应的特征向量值, 如表 1 所示。

表 1 故障征兆知识库

Tab.1 Repository of fault symptoms

故障 序列号	征兆参数序列号												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0	1	0	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1	0.5
2	0	0.75	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.75	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3	0	0.75	0.5	0.5	0.5	1	0.75	0.75	0.5	0.5	0.25	0.75	0.5
4	0	0.75	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.75	0.5	0.5	0.25	0.5	0.5
5	0.25	0.75	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.75	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
6	0.25	0.75	0.5	0.5	0.5	0.25	0.25	0.75	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
7	0.25	0.75	0.5	0.5	0.5	1	0.75	0.75	0.5	0.75	0.5	0.5	0.5
8	0.25	0.75	0.5	0.5	0.5	1	0.75	0.75	0.75	0.5	0.5	0.5	0.5
9	0.25	0.75	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.25	0.75	0.5
10	0.25	0.75	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.75	0.75	0.5
11	0.25	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.75	0.5	0.5	0.5	0.75	0.25

故障集: 1 为循环水泵严重故障; 2 为后轴封供汽中断; 3 为凝汽器满水; 4 为真空系统管路破裂; 5 为真空系统不严密; 6 为凝结水泵工作不正常; 7 为凝汽器铜管破裂; 8 为最后一级低压加热器管道破裂; 9 为凝汽器铜管脏污; 10 为循环水量不足; 11 为抽气器工作不正常。

征兆集:1 为凝汽器真空;2 为凝汽器端差;3 为循环水泵电动机电流;4 为循环水泵出口压力;5 为汽轮机低压胀差为负值;6 为凝结水泵电动机电流;7 为凝结水泵出口压力;8 为凝结水过冷度;9 为最后一级低压加热器水位;10 为凝结水导电度;11 为循环水温升;12 为抽气器抽出的空气温度与冷却水进口温差;13 为凝汽器抽气口至抽气器入口之间的压差。

1.2 BP 神经网络

神经网络是具有联想、记忆、自学习、并行处理和非线性映射功能的网络,近几年来,它受到了机械设备故障诊断领域的广泛关注,其中前馈神经(BP)网络是最成熟、应用最广泛的一种神经网络^[2]。BP 是由 Rumhart 提出的多层前馈神经网络模型,采用误差逆传播校正法进行网络学习,一般都是采用 3 层网络结构,包括输入层、隐含层和输出层。文献^[3-4]说明了 BP 神经网络的特点、结构和改进,包括误差算法的改进、学习率的改进及隐含节点数的改进等,这些改进使 BP 神经网络的收敛速度、精确度和稳定性都得到提高,使其在故障诊断方面的技术更加成熟,从而得到更广泛应用^[5-9]。

本文采用 3 层的网络结构,输入层接收经过模糊处理的征兆参数的特征向量,输入节点数对应征兆数为 $N=13$;隐含层节点数为 10;输出层节点数对应故障数为 $L=11$ 。学习率采用带有动量项的自适应学习率算法,以免其陷入局部极小;误差算法采用误差累计算法对网络进行训练,使网络的学习次数减少、精度提高、稳定性增强。BP 神经网络的训练样本就是故障征兆知识库,训练好的 BP 网络对样本值具有很好的故障征兆映射结果。

1.3 模糊神经网络

模糊系统和神经网络连接的形式有:松散型、并联型、串联型、网络学习型和结构等价型^[2]。本文采用串联型,其凝汽器故障诊断系统模型如图 1 所示。



图 1 模糊神经网络框图

Fig.1 Block diagram of fuzzy neural network

模糊神经网络的凝汽器故障诊断过程是:首先,将在线采集到的征兆数据通过动态数据交换(DDE)通信方式采集到诊断界面中,经过模糊处理得到 BP 神经网络需要的特征向量,然后输入到已经训练好的 BP 网络中,即可得到诊断结果。

2 故障诊断软件和性能监测软件的实现

故障诊断软件和性能监测软件都是采用 Matlab 6.5 实现。Matlab 6.5 是一种基于矩阵的运算语言,具有强大的数值计算和处理功能,在信号处理、自动控制、建模仿真、系统辨识和神经网络方面都有各自的工具箱。本软件通过 DDE 数据交换方法,采用客户/服务器的方式实现 Matlab 故障诊断软件和性能监测软件(客户程序)与组态王软件在线数据采集系统

(服务器程序)之间的数据通信。客户与服务器程序之间的数据交换称为会话,发起会话者称为客户程序(client),它从服务器获得数据,响应者称为服务器程序(server),它维护其他应用程序可能使用的数据,客户/服务程序表示既包括客户程序又包括服务程序^[10]。因此,采用客户服务器的数据交换方式,Matlab 可方便地获得组态王的在线采集数据,实现对凝汽器性能的在线分析和可能存在的故障分析,做到凝汽器可能故障的提前预防和警示,同时使汽轮机凝汽器系统随时运行于最佳方式、保持最好状态,从而大幅度提高汽轮机组的经济性和安全性。

凝汽器故障诊断软件主要包括征兆参数的获得、故障的诊断和诊断结果柱状图显示 3 大功能模块,如图 2 所示(图中柱状图的纵轴表示 11 个故障所对应的隶属度(0~10)之间,横轴表示的就是 11 个故障)。

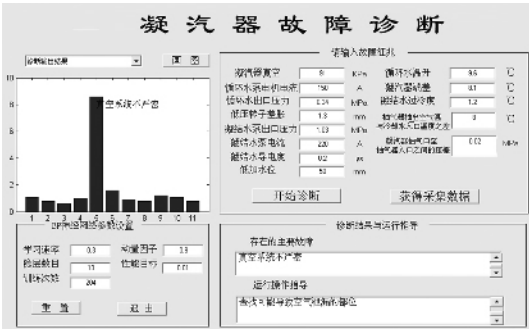


图 2 凝汽器故障诊断实例

Fig.2 Example of condenser fault diagnosis

凝汽器性能分析软件主要包括传热系数、凝汽器端差、循环水温升等凝汽器经济运行相关参数的计算和正常曲线与变工况点的曲线比较,能够方便快捷地了解当前凝汽器的运行状态,从而作出相应的应对措施,实现凝汽器的安全经济运行,其界面如图 3 所示(图中曲线纵轴表示凝汽器的真空值;横轴表示汽轮机末级排汽量与凝汽器额定进汽量的比值,即机组实际运行时的凝汽器进汽量与额定量的比值)。

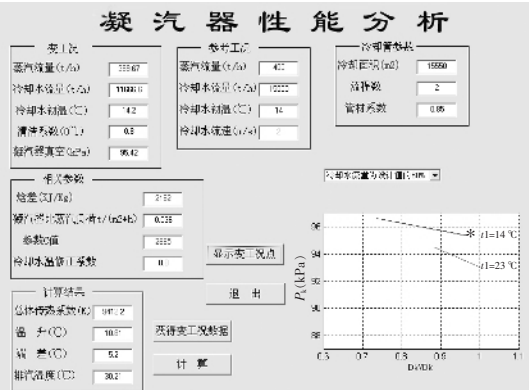


图 3 凝汽器性能分析实例

Fig.3 Example of condenser performance analysis

3 诊断实例

某发电厂 100 MW 汽轮发电机组,在冬季测得凝

汽器系统的运行参数为:凝汽器真空 91 kPa、凝汽器端差 8.1 ℃、循环水泵电动机电流 150 A、循环水泵出口压力 0.34 MPa、汽轮机低压胀差 1.3 mm、凝结水泵电机电流 220 A、凝结水泵出口压力 1.03 MPa、凝结水过冷度 1.2 ℃、最后一级低压加热水位 50 mm、凝结水导电度 0.2、循环水温升 9.6 ℃、抽气器抽出的空气温度与冷却水进口温差 8 ℃、凝汽器抽气口至抽气器入口之间的压差 0.02 MPa。经过模糊处理后的特征向量为[0.25 0.75 0.5 0.5 0.5 0.5 0.75 0.5 0.5 0.5 0.5],神经网络输入层接收特征向量,通过网络自学习得到诊断结果,如图 2 所示。诊断结果为“真空系统不严密”;运行指导为“查找可能导致空气泄漏的部位”;柱状图也直观地显示了诊断结果。

图 3 为凝汽器在该工况时的性能计算和曲线显示,很容易看出变工况点(*)在正常曲线附近。由正常曲线可知,在循环冷却水的进水温度为 14.2 ℃、循环水流量为 11 666.6 t/h 时,凝汽器真空值大约为 95.5 kPa,而该工况真空为 95.42 kPa,在正常范围之内,所以可得凝汽器运行正常。

4 结论

本文采用串连型模糊神经网络作为凝汽器故障诊断的模型,用 Matlab 语言开发了凝汽器故障软件和性能分析软件,并且实现了与组态王数据采集组态软件的 DDE 通信,从而使凝汽器故障诊断和性能、趋势分析更加方便容易。由诊断实例可以看出,该软件准确率高,同时给出诊断结果和操作指导,并具有友好的系统界面,方便在现场使用。

参考文献:

- [1] 张卓澄. 大型电站凝汽器[M]. 北京:机械工业出版社,1993.
 - [2] 石勇,张仲民,武永元,等. 汽轮机组凝汽器故障诊断方法的分析研究[J]. 热力发电,2004,33(8):25-28.
- SHI Yong,ZHANG Zhong-min,WU Yong-yuan,et al. Analysis and study on the fault diagnosis method of vacuum in condenser for steam turbine unit[J]. Thermal Power Generation,2004,33(8):

25-28.

- [3] 郑李坤,顾昌,闫桂焕. 基于 BP 网络的凝汽器故障诊断系统的进一步探讨[J]. 华东电力,2003(5):42-44.
- ZHENG Li-kun, GU Chang, YAN Gui-huan. Further discussion on steam condenser fault diagnosis system based on BP network [J]. East China Electric Power,2003(5):42-44.
- [4] 唐晓军,崔波,李勇,等. 基于 BP 神经网络的凝汽器故障诊断方法研究[J]. 华东电力,2002(1):9-11,69.
- TANG Xiao-jun, CUI Bo, LI Yong, et al. A study on steam condenser fault diagnosis based on back propagation artificial neural network [J]. East China Electric Power,2002(1):9-11,69.
- [5] HORNIK K, STINCHCOMBE M, WHITE H. Multilayer feed-forward networks are universal approximators[J]. Neural Networks,1989(2):359-366.
 - [6] CHUANG Chia-chin, SUE Deng-chen. Performance effects of combined cycle power plant with variable condenser pressure and loading[J]. Energy,2005(30):1793-1801.
 - [7] PRIETO M M, MONTANES E, MENENDEZ O. Power plant condenser performance forecasting using a nonfully connected artificial neural network[J]. Energy,2001(26):65-79.
 - [8] MUNOZ A, SANZ-BOBI M A. An incipient fault detection system based on the probabilistic radial basis function network: application to the diagnosis of the condenser of coalpower plant [J]. Neurocomputing,1998(23):177-194.
 - [9] TIMO S, HEIKKI N K. Application of artificial neural networks in process fault diagnosis[J]. Computer & Chemical Engineering,1999,17(10):1001-1014.
 - [10] 胡大斌,胡锦晖,吴峰. 基于组态王与 Matlab 的监控软件实现[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2005,29(2):234-237.
- HU Da-bin, HU Jin-hui, WU Feng. Realization of control software based on kingview and Matlab [J]. Journal of Wuhan University of Technology:Transportation Science & Engineering,2005,29(2):234-237.

(责任编辑:汪仅珍)

作者简介:

滕丕忠(1982-),男,山东济南人,硕士研究生,研究方向为火电厂汽轮机故障诊断和经济运行优化及其系统应用开发(E-mail:tpz1982@163.com);

张聘(1954-),男,福建漳州人,副厂长,从事电厂设备管理工作;

陈荣生(1958-),男,福建泉州人,从事热能工程、汽轮机性能诊断工作。

Fault diagnosis and performance supervision of condenser based on fuzzy neural network

TENG Pi-zhong¹, ZHANG Pin², CHEN Rong-sheng³, CHEN Qun²,
SHI Yong-heng¹, YU Bao-ning², YANG Ya-ping¹

(1. Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Fujian Yongan Power Plant, Yongan 364013, China; 3. Quanzhou Power School, Quanzhou 364000, China)

Abstract: Condenser is the primarily auxiliary equipment of condensing turbine, and relations between condenser system operation faults and their symptoms are nonlinear, complicated, fuzzy and random, which are difficult to be represented by math equations. Combining advantages of fuzzy theory and neural network, a serial fuzzy neural network is presented as condenser fault diagnosis model and the relevant software of fault diagnosis and performance supervision is developed with Matlab 6.5. The fault diagnosis software includes symptom parameter derivation, fault diagnosis and result display. The performance supervision software is used to calculate relevant parameters and compare changed operation state with normal one. An actual example of a 100 MW steam generation unit is given.

Key words: condenser; fuzzy neural network; fault diagnosis; dynamic data exchange