

汽轮发电机组远程智能故障诊断系统

何 青, 杜冬梅, 李 红

(华北电力大学 能源与动力工程学院 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 北京 102206)

摘 要: 分析研究了汽轮发电机组振动智能故障诊断技术, 将人工神经网络技术与面向对象技术相结合, 建立了振动频谱、轴心轨迹、升降速特性和负荷特性等 4 个征兆神经网络, 同时构建了具有不完全征兆输入的汽轮发电机组振动智能故障诊断神经网络系统。以机组振动频谱征兆为例, 研究了频谱征兆的自动提取方法, 给出了基于频谱征兆的不完全征兆综合故障诊断实例。在此基础上, 采用 BS 模式和 Java 技术, 开发了汽轮发电机组远程智能故障诊断系统, 介绍了系统的结构组成、功能模块以及服务器和客户端程序设计和实现方法。

关 键 词: 汽轮发电机组; 振动; 神经网络; 智能故障诊断; 远程诊断

中图分类号: TM623. 94 文献标识码: A

1 引 言

汽轮发电机组是电力工业生产的关键设备之一, 一旦发生故障将造成严重的社会影响并带来巨大的经济损失。为了保证机组正常高效地运行, 必须对其状态进行有效地监测和诊断。机组出现异常时, 轴系振动是最为直接和有效的故障征兆之一。通过轴系振动对机组进行状态监测和故障诊断, 是一门综合性技术, 对诊断技术人员要求非常高, 而现场运行监控人员的专业知识和运行经验有限, 往往对实际发生的故障无法处理。因此, 研究开发实用的智能故障诊断技术和系统十分必要。在互联网技术、故障诊断技术以及神经网络技术快速发展的今天, 研究开发基于人工神经网络技术和互连网技术的远程智能故障诊断系统成为可能。目前, 国内机组上安装远程智能诊断系统较少, 投入使用的情况和效果更不理想, 远远没有达到远程自动诊断系统的要求, 不能为运行人员和生产管理人员提供有效

的诊断帮助。因此, 研究汽轮发电机组振动智能故障诊断的实用技术, 开发机组振动远程智能诊断系统, 是非常必要的。

本文将人工神经网络技术与面向对象技术相结合, 构建具有 4 个征兆群和 5 个 BP 网络组成的汽轮发电机组振动智能故障诊断神经网络系统, 研究机组振动频谱征兆的自动提取方法。给出了基于频谱征兆的不完全征兆综合故障诊断实例, 验证了本文方法的可行性和实用性。在此基础上, 采用浏览器/服务器模式和 Java 技术, 开发汽轮发电机组远程智能故障诊断系统, 介绍了系统结构、功能模块以及服务器和客户端设计和实现方法。

2 机组振动智能故障诊断

故障诊断是在一定的检测策略的指导下实施对被诊断系统的自动检测^[1]。机组转子的振动是评估机组运行状态的一个重要而关键的控制指标, 通过对机组振动进行监测分析与诊断, 及早发现故障隐患, 将故障消除在萌芽状态, 是十分重要而又有效的方法。

智能故障诊断技术是近年来发展起来且远未达到完善的技术。以数值计算和信号处理为核心的诊断过程被以知识处理和知识推理为核心的诊断过程所代替, 智能故障诊断成为当前诊断技术的发展方向。诊断系统的智能就是它有效地获取、传递、处理、再生和利用诊断信息, 从而对给定环境下的诊断对象进行正确的状态识别、诊断和预测的能力。获取、传递、处理、再生和利用信息的能力越强, 诊断系统的智能水平就越高^[1]。

人工神经网络(ANN)具有其独特的容错、联想、

收稿日期: 2006-02-08; 修订日期: 2006-05-30

作者简介: 何 青(1962-), 男, 江苏扬中人, 华北电力大学教授。

©1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

推测、记忆、自适应、自学习和处理复杂多模式等优点^[1]。因此, 基于人工神经网络的方法, 在故障诊断领域有广泛的发展前景。

3 基于 BP 神经网络的机组振动故障诊断

3.1 BP 神经网络

BP 网络具有良好的模式分类能力, 尤其适合于机组振动故障诊断问题。本文采用三层 BP 神经网络来研究机组振动的故障诊断问题。三层 BP 神经网络结构如图 1 所示。节点的激活函数取为 s 型函数, 即 $f(x) = 1/(1 + e^{-x})$ 。隐层节点数 $n_1 = \sqrt{n+m} + k$, 其中: n —输入层节点数; m —输出层节点数; k —1~10 之间的常数^[2]。为了解决在学习训练过程中收敛速度慢和目标函数可能存在局部极小点等问题, 本文采用改进的 BP 神经网络算法, 通过加入动量因子 α , 微调权值的修正量, 使学习避免陷入局部最小, 收到了良好的训练效果。

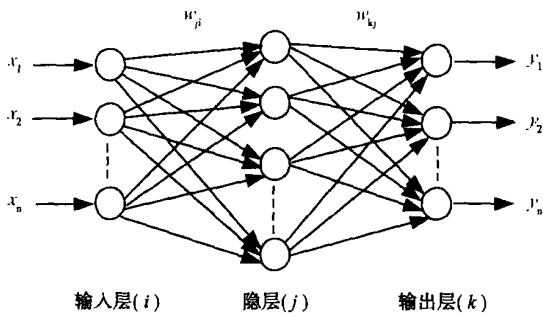


图 1 三层 BP 神经网络结构

3.2 面向对象的诊断技术

机组振动故障诊断可用的故障征兆很多, 仅由文献[3]阐述的振动分析征兆就有 31 项之多。其中, 有些征兆需要从更多的信息中提取, 还有些征兆未列入其中, 例如轴心轨迹图像征兆、振动矢量特性以及振动趋势图信息等。如果将上述信息不加区别地都作为神经网络的输入向量, 可以想象诊断网络规模之大, 要想对此网络进行学习训练并达到收敛精度几乎是不可能的。

为此, 通过对这些征兆信息进行归类分析, 把具有某种特性的征兆归类, 作为一个对象来处理, 运用面向对象的方法来进行分析^[1,4], 对于每个对象运用一个神经网络来进行诊断, 那么每个 ANN 的规模就比较小。这样, 不但学习训练变得相对容易, 而且可以根据需要随时调整 ANN 结构, 使应用的系统规模

不受限制, 有利于大型复杂机电系统的故障诊断。本文选择的机组振动诊断的故障征兆对象如表 1 所示。这里主要选择了 4 个比较典型有效的征兆, 包括最常用最有效的振动频谱征兆和转速跟踪特性, 还有比较特殊的轴心轨迹图形特征和机组负荷特征。

表 1 故障征兆对象及其成员

对 象 成 员	
振动频谱征兆	$(0.01 \sim 0.39)f$, $(0.40 \sim 0.49)f$, $0.5f$, $(0.51 \sim 0.99)f$, $1f$, $2f$, $(3 \sim 5)f$, 奇数 f , 高频
轴心轨迹征兆	椭圆, 发散螺旋线, 外 8 字, 内 8 字, 紊乱
转速跟踪征兆	不明显, 明显, 很明显, 升高转速振动不变
负荷征兆	无影响, 再现性强, 再现性不强, 随负荷增加

3.3 机组振动故障诊断 BP 神经网络

机组故障的因素不是单一的, 往往是多种故障因素耦合的结果。因此, 对机组进行故障诊断, 必须进行全面的综合分析研究。首先, 通过监测系统, 获取机组的大量信息, 然后, 基于机组故障的机理, 从中提取故障特征, 进行周密的分析。在此过程中, 要获取机组的动态数据、过程参数和运行状态参数等信息。通过信号分析和数据处理, 提取机组特有的故障征兆及敏感参数等, 经过综合分析判断, 才能确定故障原因, 做出符合实际的诊断结论, 提出处理措施。机组故障种类繁多, 故障对象庞大而复杂, 因此我们采用上述面向对象的方法来构建机组振动故障诊断 BP 网络。

按照面向对象的故障诊断方法, 根据表 1 所选择的 4 个征兆群, 构建机组振动故障诊断神经网络系统结构如图 2 所示, 包括频谱征兆诊断神经网络、轴心轨迹征兆诊断神经网络、振动转速跟踪征兆诊断神经网络、负荷征兆诊断神经网络和综合诊断网络。综合诊断网络输出层每个节点对应一种故障, 所以只要根据输出节点值就可以给出诊断结果。本文选择机组常见的 12 种故障(见表 5), 因此综合诊断网络输出层节点数为 12。

表 2 机组故障诊断神经网络参数

	输入层 节点	隐层 节点	输出层 节点	学习率	动量 因子
频谱征兆网络	9	10	1	0.9	0.5
轴心轨迹征兆网络	5	6	1	2.0	0.2
转速跟踪征兆网络	4	5	1	0.9	0.5
负荷征兆网络	4	5	1	0.9	0.5
综合诊断网络	4	10	12	1.0	0.2

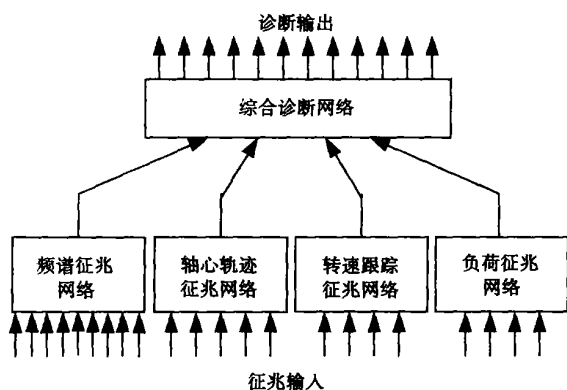


图2 机组振动故障诊断神经网络系统结构

3.4 网络输入与训练

各个网络的参数根据经验公式和试验确定,如表2所示。现仅以频谱征兆网络为例进行说明。首先,根据表1确定所关心的频率或频段,将 $(0.01 \sim 0.39)f$, $(0.40 \sim 0.49)f$, $0.5f$, $(0.51 \sim 0.99)f$, $1f$, $2f$, $(3 \sim 5)f$, 奇数 f , 高频等作为特征频率或特征频率段,对应的谱值作为故障征兆,然后按振动总能量作归一化处理,即令 $\bar{x}_i = x_i / \sum x_j$ (其中: x_i —每个对应频段的谱值; $\sum x_j$ —所有频段谱值之和)。这样,所有的网络输入都在 $[0, 1]$ 之间。然后将归一化后的频谱特征值输入到频谱诊断神经网络。用标准故障样本对频谱征兆网络进行训练,样本数9,训练误差0.000 01。经过4 193次训练,网络很快收敛到给定的精度。

4 机组振动远程智能故障诊断系统

将互连网技术与故障诊断技术相结合,构造一种全新的故障诊断系统,即基于互连网的远程故障诊断系统。本文基于上述智能诊断方法,采用B/S模式和Java技术开发机组远程智能故障诊断系统。

4.1 B/S模式

网络系统模式主要有客户机/服务器模式(Client Server, C/S模式)和浏览器/服务器模式(Browser/Server, B/S模式)。B/S模式具有许多优点,越来越得到广泛应用。与早期应用较多的C/S模式不同,客户端用浏览器即可浏览无需其它任何软件,便于维护,安全可靠。采用B/S模式,将电厂内部企业网接入到Internet,在远程诊断中心直接通过浏览器就可以访问。B/S模式跨平台性好^[5~6],在页面中使用Java组件,在Windows、Linux和Unix等OS上都可以运行,服务器端送出标准HTML代码,用户可跨浏览

器浏览页面,使用方便。B/S模式是一种瘦客户端模式,具有较好的实时性,通过WEB页面发布已经开发好的Java组件,用户通过浏览器浏览机组运行情况,不用配置客户端,就可以完成所有的在线监测和故障诊断功能。因此,本文采用B/S模式开发机组振动远程智能故障诊断系统。

4.2 服务器和客户端设计

现代企业网一般是以WEB为中心,采用TCP/IP技术和HTTP传输协议,客户端通过浏览器访问WEB以及与WEB相连的后台数据库。服务器端需要安装WEB服务器软件,如IIS5.0等。基于B/S模式的机组远程智能故障诊断系统,服务器端网页发布采用Dreamweaver开发。服务器端应用程序采用Java语言开发。服务器端应用程序主要功能包括振动监测、信号分析、故障诊断、神经网络学习训练以及系统管理和维护等。

客户端页面采用Java Applet开发。Java Applet程序下载到客户端通过浏览器运行。Java Applet嵌入到WEB页面上,所以客户端就是一个网页。客户端通过Java Applet发布监测、分析和诊断的数据、图形等。

4.3 系统结构与功能模块

机组振动远程智能故障诊断系统结构如图3所示。系统主要功能模块包括神经网络训练、故障征兆自动提取、故障征兆人机交互获取、故障诊断、诊断结果发布、诊断帮助和系统管理与维护等几个部分。

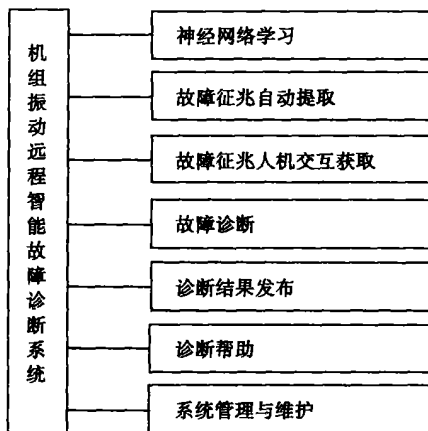


图3 机组振动远程智能故障诊断系统功能

神经网络训练位于服务器端,客户端设有用户管理权限,权限高的管理员可向服务器端发送请求,服务器端接到请求后对网络进行训练,然后将

训练完成后的神经网络结构信息传到客户端。根据现场实际监测的不同信号分类提取征兆信息, 将征兆信息经过处理后, 送入各个诊断子网络进行单一征兆的故障诊断, 最后将各个子网络诊断结果送入综合神经网络进行综合故障诊断, 从而得到最终诊断结果。在此过程中, 如果现场数据不能提供全部征兆信息, 属于不完全征兆的诊断问题, 在诊断时将未知征兆信息的输入值置为-1, 再送入综合诊断网络。综合诊断网络能够处理这种不完全征兆的诊断问题, 并给出较合理的诊断结果。

诊断程序在客户端运行, 诊断结果用 Java Applet 在客户端发布, 用户可以向浏览网页一样, 通过浏览器浏览运行结果, 及早确定故障原因, 进行及时处理。另外, 客户端还提供了详细的诊断帮助功能, 列出了机组转子系统各种常见故障的故障机理、故障特征识别、类似故障及判别处理方法以及相应故障对策和防治措施等, 给现场工作人员提供了细致的帮助。

5 应用实例

以频谱征兆的自动提取和征兆不完全综合诊断为例, 如表 3 所示, 其它征兆网络输出置为-1。综合诊断网络进行不完全征兆故障诊断, 并将诊断结果以网页的形式在客户端发布。

表 3 现场实测振动频谱征兆

频率征兆	不平衡	油膜振荡
$(0.01 \sim 0.39)f$	0.000	0.000
$(0.40 \sim 0.49)f$	0.000	0.979
$0.5f$	0.000	0.000
$(0.51 \sim 0.99f)$	0.000	0.000
$1f$	0.940	0.000
$2f$	0.000	0.021
$(3 \sim 5)f$	0.060	0.000
奇数 f	0.000	0.000
高频	0.000	0.000

将表 3 中的两组机组故障实测数据, 输入到系统中进行诊断。诊断结果如表 4 所示。表 3 中频谱构成数据按前述方法进行归一化, 第一组为不平衡数据, 第二组为油膜振荡数据。由表 4 的诊断结果可以看出, 对第一组数据可能存在初始不平衡、临时热弯曲或永久弯曲等不平衡类故障; 同样, 对于第二组数据可能存在油膜涡动或油膜振荡。如果提供更多的故障征兆对象或根据现场某些运行情况, 可以

做出更进一步的诊断。出现此现象是因为故障征兆信息不全。事实上, 初始不平衡、临时热弯曲和永久弯曲 3 种故障的频谱征兆特征几乎是相同的。同样, 油膜涡动与油膜振荡这 2 种故障的频谱征兆特征也几乎是相同的。所以, 在这种情况下如果不补充其它信息, 是不能区分到底是哪种故障。由此可见, 对于故障诊断来说, 获取全面的故障信息是十分重要的。

表 4 现场实测振动频谱诊断结果

	综合诊断网络输出	
	不平衡	油膜振荡
初始不平衡	0.998	0.000
临时热弯曲	0.996	0.000
永久弯曲	0.989	0.000
碰磨	0.015	0.000
不对中	0.000	0.000
轴承与轴颈偏心	0.000	0.000
转子裂纹	0.000	0.000
联轴器故障	0.000	0.000
结构共振	0.000	0.014
油膜振荡	0.000	0.981
油膜涡动	0.000	0.978
松动	0.000	0.013

6 结 论

将人工神经网络技术与面向对象技术相结合, 构建了具有 4 个征兆群和 5 个 BP 网络组成的机组振动智能故障诊断神经网络系统, 采用 BS 模式开发了机组智能故障诊断系统, 实现了机组振动故障的远程诊断, 为进一步构建远程机组振动诊断中心奠定了基础。现场应用表明, 该系统运行稳定, 监测分析配置合理, 诊断结果可靠, 深受现场运行监控和技术管理人员的欢迎。

参考文献:

[1] 王道平, 张义忠. 故障智能诊断系统的理论与方法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.

[2] 张立明. 人工神经网络的模型及其应用[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1993.

[3] 钟秉林, 黄 仁. 机械故障诊断学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.

[4] 何 青. 机电系统智能故障诊断技术研究与实现[D]. 保定: 华北电力大学, 1999.

[5] 胡竞峰. 基于 WEB 的多机组远程监诊系统的设计与开发[J]. 汽轮机技术, 2003, 45(1): 8—13.

[6] 朱介南. 大型汽轮发电机组振动状态远程监测与故障诊断系统的实现[J]. 汽轮机技术, 2003, 45(1): 5—7.

Key words: sludge, pyrolysis, mechanism function

汽轮发电机组远程智能故障诊断系统= **An Intelligent Remote Fault-diagnosis System for a Turbogenerator Set** [刊, 汉] HE Qing, DU Dong-mei, LI Hong (Education Ministry Key Laboratory on Condition Monitoring and Control of Power Plant Equipment Affiliated to Energy and Power Engineering College under the North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(5). — 532 ~ 535

Analyzed and studied are the techniques of intelligent fault diagnosis of vibration for turbogenerator sets. By combining artificial neural network technology with object-oriented one, a four symptom neural network has been established. The four symptoms are vibration frequency spectrum, axial-center trajectory, speeding-up-and-down characteristics and load characteristics. Meanwhile, constructed was an intelligent fault-diagnosis neural network for sensing vibrations of steam turbogenerator sets with incomplete symptom inputs. With the frequency spectrum symptoms of turbogenerator set vibrations serving as an example, a method for the automatic acquisition of frequency spectrum symptoms was studied and a specific case was given of comprehensive fault diagnosis with an incomplete symptom based on the frequency spectrum symptom. On this basis, by using a Browser Server mode and Java technology, an intelligent remote fault-diagnosis system for turbogenerator sets was developed along with a description of the structure composition of the system, functional modules, servers and client-terminal program design and implementation method. **Key words:** turbogenerator set, vibration, neural network, intelligent fault diagnosis, remote diagnosis

类热机结构优化特征及其论证= **Structure Optimization Features of Quasi-heat Engines and Their Demonstration Justification** [刊, 汉] ZHANG Xiao-hui (Thermal Energy Department of the Soochow University, Suzhou, China, Post Code: 215006) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(5). — 536 ~ 538

Based on the analysis of the configuration optimization characteristics of an existing heat engine and a quasi-heat engine device, the model of a quasi-heat engine has been extended to a general transmission-process model. Through a variational method, the configuration optimization criterion for general transmission processes was derived, proving that with respect to a linear transmission model and under the condition of a finite-dimension constraint, with the entropy production in the transmission process (or device) being at its minimum, an equipartition of the configuration will be its basic characteristics. In the meanwhile, also described is the application of the configuration optimization of transmission processes in the analysis of quasi-heat engines and in the study of generalized thermodynamics optimization theory. Moreover, the configuration optimization feature under discussion has been preliminarily verified along with a brief exposition of the development trend of its applications. **Key words:** engineering thermodynamics, quasi-heat engine, transmission process, configuration optimization

彼尔姆发动机制造联合体的燃气轮机技术= **Gas Turbine Technology of Perm Engine Manufacturing Complex** [刊, 汉] ALEXANDER Yinojamchef, DANIYL Sulimof ("Perm Engine Manufacturing Complex Stock Corp". Managine Company, Perm, Russia, Post Code: 614000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(5). — 539 ~ 540

Key words: gas turbine; performance; power plant