

核电设备状态监测 与故障诊断系统的研究

刘永阔^{1,2}, 夏虹¹, 谢春丽^{1,2}, 沈季¹

(1. 哈尔滨工程大学核科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 东北林业大学交通运输工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:故障诊断系统可作为先进核电站仪表控制系统的重要辅助工具。本文介绍1种用于核电设备的状态监测及故障诊断系统,该系统的系统程序用 Visual Basic 6.0 开发,并集数据采集、状态监测、故障诊断于一体,功能完善,操作使用方便。为了验证该系统的有效性,在核动力装置模拟器上进行了仿真实验研究。实验结果表明,系统完全可对核电设备的典型故障进行准确识别。

关键词:核电设备;状态监测;神经网络;故障诊断

中图分类号:TL361 文献标志码:A 文章编号:1000-6931(2008)03-0200-06

Research on State Monitoring and Fault Diagnosis System of Nuclear Power Equipment

LIU Yong-kuo¹, XIA Hong¹, XIE Chun-li^{1,2}, SHEN Ji¹

(1. College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University,
Harbin 150001, China; 2. College of Traffic and Transportation Engineering,
Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: The fault diagnosis system can serve as an important auxiliary tool of advanced instrument and control system of nuclear power plant. This paper introduces a kind of state monitoring and fault diagnosis system for nuclear power equipment. The system whose system program was coded with Visual Basic 6.0 was integrated with functions of data acquisition, state monitoring and fault diagnosis and was robust and easy to operate. In order to confirm the validity of this system, the simulation experiment was carried out on a nuclear power plant simulator. The experimental results show that the system can completely and accurately identify the typical faults of nuclear power equipment.

Key words: nuclear power equipment; state monitoring; neural network; fault diagnosis

在美国三哩岛事故和前苏联切尔诺贝利事故后,人们对核安全更加重视:1) 加强对操作

人员的培训,提高运行人员的素质;2) 致力于开发各种核动力装置运行支持系统,以帮助操作人员更好地操纵反应堆,特别是更准确及时地识别并处理各种故障,保证反应堆安全运行。在各种支持系统中,状态监测与故障诊断系统是比较重要的一个。

状态监测与故障诊断系统是根据系统状态和参数信息,充分利用计算机的高速数据处理能力,提供在线的状态分析和故障诊断功能,可及时有效地向操作人员提供系统状态及可能的故障信息,帮助操作人员进行决策,采取恰当措施保证反应堆安全。因此,研究核电设备状态监测及故障诊断系统对于保证其安全可靠运行,减少事故的发生,具有十分重要的意义。

1 系统总体结构设计

核电设备状态监测与故障诊断系统由人机接口、神经网络故障诊断子系统、规则推理诊断子系统、数据采集子系统、状态监测子系统、诊断结果处理子系统和数据库等部分组成,系统结构示于图 1。按照任务侧重点的不同,数据采集、状态监测和故障诊断 3 个子系统是最重要的子系统,它们既相互独立,又可通过数据接口相互联系。而每个子系统又可再分解为一系列任务模块,它们共同合作,完成整个核电设备的状态监测与诊断任务。

2 软件系统及其功能

2.1 数据采集子系统

数据采集作为整个系统的第一级子系统,负责实时采集核电设备的重要工况信号和运行数据,并作必要的处理后将压力、温度、流量、水位等信号从核电设备采集到客户机上。

本系统的开发以核动力装置模拟器作为仿真实验研究对象,通过编写通讯程序实现了 UNIX 下 ASCA 应用程序和 WINDOWS 下应用程序之间的通讯^[1]。利用通讯程序,数据采集子系统可直接从核动力装置模拟器上采集所需的参数,在采集的同时将这些参数存入数据库中,诊断故障时既可以实时在线进行读取数据,也可以从数据库中读取数据,这样既可使诊断系统进行在线诊断,也可离线诊断分析。当客户机与核动力装置模拟器相连进行实时通讯时,实时通讯监测界面^[2]上的主要参数实时变化,当监测的参数在正常范围时,参数值呈黑色显示;当监测的参数值在正常范围之外时,参数值呈红色显示。

2.2 状态监测子系统

状态监测作为整个系统的第二级子系统,其主要任务是对数据采集子系统所采集到的温度、压力、流量、水位等信号进行处理、分析、判断,向现场运行人员提供核电设备当前的运行状态及发展变化趋势的信息,实现异常工况自

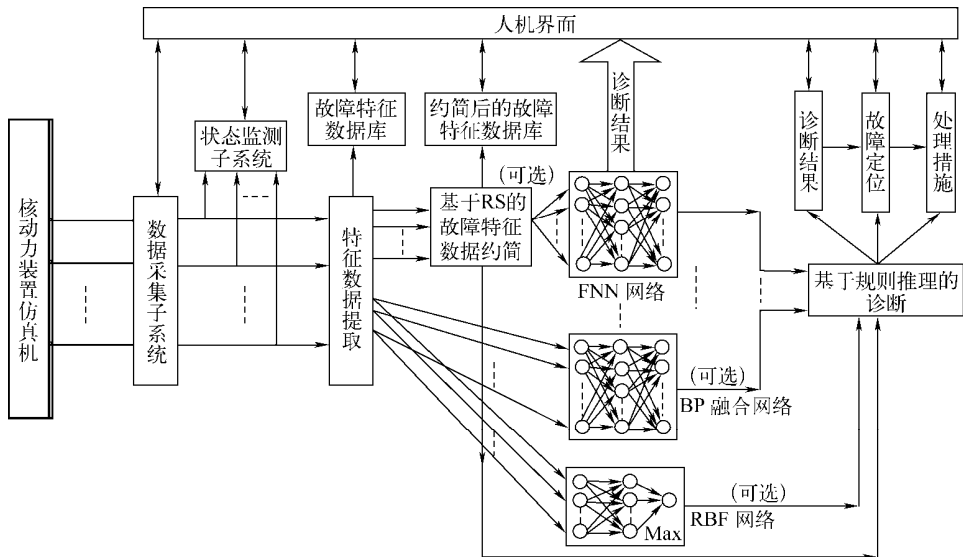


图 1 核电设备状态监测与故障诊断系统结构

Fig. 1 State monitoring and fault diagnosis system structure of nuclear power equipment

动报警。子系统还能以各种方法对核电设备的运行工况进行分析,使操作人员对机组的运行状态及发展趋势有全面的了解。该子系统主要运用了仿真演示界面进行实时状态监测以及对各状态监测参量的运行及变化趋势进行分析,通过分析为准确地诊断故障提供了依据。另外,由数据管理程序负责对机组各种数据进行存贮与维护,以实现数据的查询、打印与事故追忆功能。

2.3 故障诊断子系统

在故障诊断子系统中,包括神经网络诊断子系统和规则推理诊断子系统,其主要任务是对前两级子系统所采集与监测到的核电设备运行信息作进一步的分析与处理,诊断核电设备运行异常的原因与故障部位,给出决策咨询建议。该子系统首先将来自状态监测子系统数据进行特征提取,添加到特征数据库中,以用于故障诊断或诊断系统的自学习。

神经网络诊断子系统使用了3种类型的神经网络:模糊神经网络^[3](FNN)、BP网融合诊断神经网络^[4-5]和径向基函数^[6](RBF)神经网络。诊断时神经网络诊断子系统获取经过特征提取的数据,利用FNN网络和BP网融合诊断神经网络的快速诊断能力进行系统的预诊,以实现诊断的快速性,对预诊结果允许有一定的误诊,但要求避免漏诊。如果FNN网络和BP网融合诊断神经网络所给出的诊断结果可信度不高,则启动规则推理诊断子系统对FNN网络和BP网融合诊断神经网络的预诊结果进行验证,以减小或消除误诊,系统的最终诊断结果通过诊断结果显示系统显示。

在神经网络诊断子系统中RBF神经网络主要用来识别FNN网络和BP网融合诊断神经网络未经学习过的故障模式,该类网络只能对单一故障进行识别,网络不需要进行训练,且计算速度比较快,诊断实时性较好。但当诊断过程中出现的多个故障都是FNN网络和BP网融合诊断神经网络未经学习过的故障模式时,就要构建多个RBF神经网络,这样就可能造成网络结构过大;这时,如果构建的RBF神经网络个数等于或大于FNN网络和BP网融合诊断神经网络输出层的节点数时,即构建的RBF网络识别的故障数目等于BP网络输出层

所识别的故障数目时,则需再构建相应的FNN网络和BP网融合诊断神经网络,这样既解决了网络的可扩充性问题,也解决了网络结构过于庞大的问题。

规则推理诊断子系统利用反向推理验证神经网络诊断子系统的诊断结果。由于规则是根据事故情况下各种参数的异常情况设计的,因此,根据这些异常情况确定事故是否发生虽然不一定充分,但肯定必要,因此,利用规则可验证某种事故是否发生。规则采用“IF...THEN...”的形式。规则推理诊断子系统知识(规则)库中知识的获取,一方面采用领域专家给出的知识,另一方面可采用粗糙集理论进行规则提取来获取知识^[7]。

总之,在该系统中,如果训练好的FNN网络、BP网融合诊断能够较好地对待故障进行识别,诊断的可信度较高,可不采用基于规则推理的诊断子系统进行结果验证,直接由神经网络诊断子系统给出故障识别结果。当训练后的神经网络子系统不能对故障进行识别,就采用系统运行的特征参量构建相应的RBF神经网络进行在线识别,给出识别结果。

经该子系统诊断后,系统将给出一诊断结论。根据诊断结论,系统会对所出现的故障提出处理对策及维修指导建议。系统软件基于Windows操作系统,以Visual Basic 6.0作为主要开发工具进行开发设计。本系统采用多窗口、多任务运行模式,具有人机对话功能及多样化的结果显示、输出与报警功能,不仅界面友好,且操作方便。开发的主系统示于图2。

3 实验与诊断实例

为验证核电设备状态与故障诊断系统的准确性,在核动力装置模拟器上系统进行测试实验,以此来检验故障诊断系统的最终实际效果。在设计好规则推理诊断子系统后,将它与神经网络诊断子系统集成为一体,由神经网络子系统进行预诊,规则推理诊断子系统对预诊结果进行验证测试,通过测试确定整个系统的综合诊断效果。

测试主要以核动力装置模拟器在工况3情况下主泵高速运行为主,插入的故障有1#蒸

汽发生器 U 形管破裂、2# 蒸汽发生器 U 形管破裂、主蒸汽管道破损、稳压器波动管破裂、燃料包壳破损和给水管道破裂,并对正常运行数据进行了测试验证。从仿真机上采集的数据共 1 852 组,其中,正常运行数据 515 组,其它为插入的故障数据 1 337 组。现以 U 形管破裂故障为例对该诊断系统的测试进行阐述。

在模拟器上插入 2# 蒸汽发生器 U 形管发生大破口事故。图 3、4 为状态监测子系统给出的 2# 蒸汽发生器 U 形管破裂时各辐射剂量参量及水位的变化趋势。

从辐射剂量参数可看出,一次侧主冷却剂的泄漏导致二次侧的辐射剂量迅速增加,2# 环

路二次侧的剂量也迅速增加,1# 环路二次侧的剂量基本保持不变。二回路的剂量开始时基本不变,而在故障发生 40 s 后才开始增大,这是因为发生故障后二回路的反应有延迟。这组辐射剂量参数的趋势与理论的安全分析基本一致。

从图 4 水位图可看出,2# 蒸发器水位在故障发生后很快上升达到仪表量程的最大值,而稳压器水位则以很快的速度下降。实际的变化趋势与理论安全分析基本一致。其它参量不再做具体分析。

从神经网络诊断子系统对 2# 蒸汽发生器 U 形管破裂故障的诊断过程可看出,不同的诊

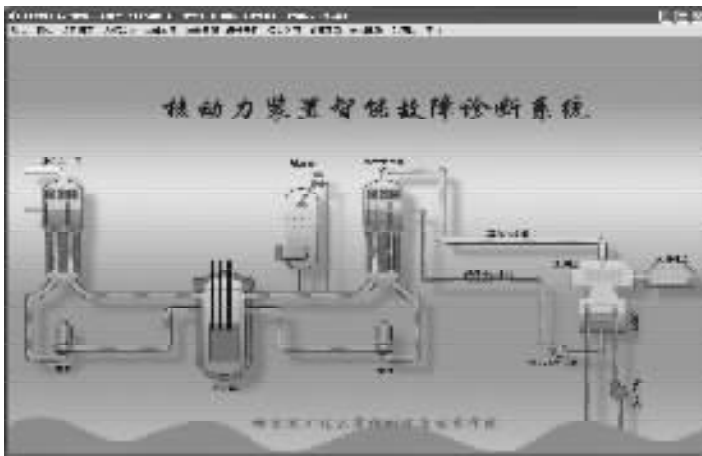


图 2 核电设备故障诊断系统主操作界面

Fig. 2 Main interface of nuclear power equipment fault diagnosis system

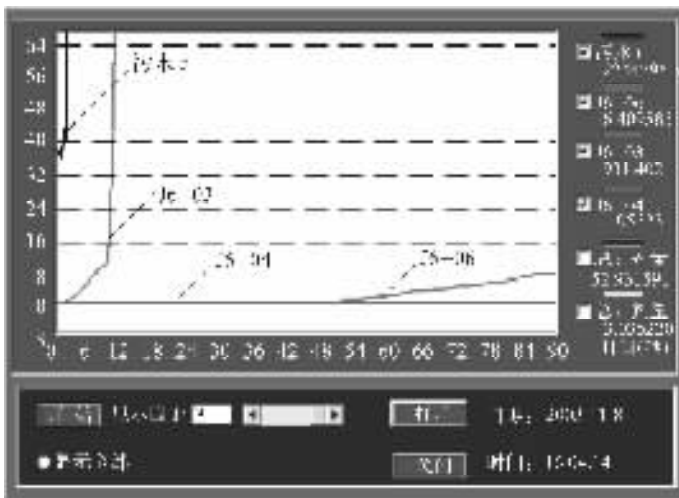


图 3 辐射剂量参量

Fig. 3 Radiation dose parameter

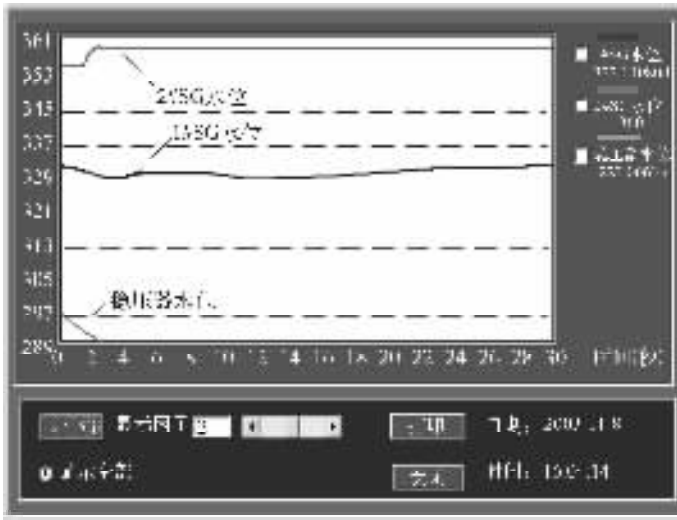


图4 水位参量

Fig.4 Water level parameter

断单元在故障初期的诊断错误率较大,这是因为故障刚插入,系统中的主要故障特征参量变化尚不明显;此外,所用神经网络根据故障实际参数情况进行诊断,而各种故障在刚开始时参数情况相差不多,因此,有较大的错误率,但随着时间的推移,在比较短的时间内就会给出正确的诊断结果。各神经网络诊断单元诊断出2#蒸汽发生器U形管破裂的时间列于表1。

对于神经网络诊断子系统的诊断结果,利用规则推理进行验证,验证结果如下。

由于故障开始时参数变化还不大,规则诊断系统对此结果验证后确定可信度不高,因此,将神经网络的诊断结果全部否定。

故障发生10s后,规则系统开始诊断出故障“2#蒸汽发生器U形管破裂”发生,规则可信度为0.562,但神经网络诊断的可信度为0.75,因此,最终的诊断结果为0.75,没有出现误诊。故障发生30s后,诊断该故障发生的可

信度达到1.0并保持。

图5为规则推理诊断子系统给出的诊断结果。诊断系统的响应速度和准确性都很高,可认为系统基本满足要求。诊断过程中,故障诊断信息在较早时就可由神经网络给出预警,使操作人员较早有心理准备,随着故障可信度逐渐增加,操作人员可进一步确认故障的发生,与传统方法只有在可信度为1时才显示诊断结果相比,响应速度快,且使操作人员更易接受诊断结果,减轻心理负担。

4 结论

本文在对核电设备智能故障诊断技术的原理和方法进行了深入细致研究的基础上,建立了一集数据采集、状态监测、规则推理、故障诊断和仿真演示等功能于一体的综合诊断系统。系统功能完善,既能对核电设备运行数据作多种方法的分析,又能实现故障的诊断咨询。在

表1 神经网络各诊断子系统的诊断时间及结果

Table 1 Diagnosis time and result of neural network each diagnosis module

神经网络类型	插入故障时间(s)下的各网络诊断结果			
	<3	3~10	10~30	>30
FNN	正常运行	正常运行	诊断不成功,波动管破裂	2#U形管破裂
BP 网融合	正常运行诊断不成功	2#U形管破裂	2#U形管破裂	2#U形管破裂
RBF	正常运行诊断不成功	2#U形管破裂	2#U形管破裂	2#U形管破裂



图5 规则推理诊断子系统显示的诊断结果

Fig. 5 Diagnosis result from rule inference diagnosis subsystem

软件的设计上,采用了下拉菜单形式,多以图形与图表的形式进行显示、打印,具有友好的用户界面,方便的人机交互能力,易于操作使用。通过编写实时通讯程序,在核动力装置模拟器上对状态监测与故障诊断系统实现的有关技术及其基本结构进行了研究和测试实验。实验验证了该诊断系统工作可靠,具有很高的性能。

由于系统的测试实验只在核动力装置模拟器上进行,对核动力装置故障的了解和作为参考的依据仅限于核动力装置模拟器上插入的故障,因此,目前本系统中所建立的诊断知识还不够完整或准确,在系统进入使用前或在初步投入使用后,有必要进行修改和完善。

参考文献:

[1] 周松,戴景明,张志俭. 核电站模拟器就地系统的实现[J]. 核动力工程,2002,23(4):87-90.
 ZHOU Song, DAI Jingming, ZHANG Zhijian. The realization of remove function system in nuclear-power equipment simulator[J]. Nuclear Power Engineering, 2002, 23(4): 87-90(in Chinese).
 [2] 刘永阔. 基于模糊神经网络的船用核动力装置故障诊断方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学核科学与技术学院,2004.
 [3] 刘永阔,夏虹,谢春丽,等. 基于模糊神经网络的核动力装置设备故障诊断系统研究[J]. 核动力

工程,2004,25(4): 328-331.
 LIU Yongkuo, XIA Hong, XIE Chunli, et al. Research on fault diagnostic system of nuclear power plant based on fuzzy neural network[J]. Nuclear Power Engineering, 2004, 25(4): 328-331(in Chinese).
 [4] XIE Chunli, XIA Hong, LIU Yongkuo. Data fusion method application to fault diagnosis of nuclear power plant[J]. Journal of Marine Science and Application, 2005, 1(4): 30-33.
 [5] 刘永阔,谢春丽,夏虹,等. 核电厂两种实时故障诊断系统的对比[J]. 核动力工程,2006,27(5): 74-78.
 LIU Yongkuo, XIE Chunli, XIA Hong, et al. Contrastive research on two kinds of real-time fault diagnosis systems of nuclear power plants [J]. Nuclear Power Engineering, 2006, 27(5): 74-78(in Chinese).
 [6] 喻海滔,张良驹. 应用神经网络技术进行核电站故障诊断方法综述[J]. 核电工程与技术,2000, 13(1): 28-34.
 YU Haitao, ZHANG Liangju. Survey of techniques of fault diagnosis using artificial neural networks in nuclear power plant [J]. Nuclear Power Engineering and Technology, 2000, 13(1):28-34(in Chinese).
 [7] 陈志辉. 船用核动力故障诊断专家系统[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学核科学与技术学院,2004.