

# 大型风力机组远程智能监测与诊断系统的研究与开发

杨文广, 蒋东翔

(清华大学热能工程系, 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084)

**[摘要]** 该文研究了大型风力机组的远程智能监测与诊断系统的关键技术问题, 介绍了系统的开发情况。整个系统采用分布式架构, 由数据采集与处理、实时数据存储、智能监测与诊断和人机交互4个子系统组成。智能监测与诊断子系统采用了知识库/推理机架构, 推理机是一个自主开发的基于模糊Rete算法的模糊专家系统, 知识库中存储了来源于风力机故障实验研究的常见振动故障的诊断知识。通过故障仿真, 验证了整套系统的有效性。

**[关键词]** 风力机; 故障诊断系统; 模糊专家系统

**[中图分类号]** TK83 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2015)03-0024-06

## 1 前言

风电产业近年来发展迅速, 截止到2014年上半年, 风电总装机容量突破了336 GW<sup>[1]</sup>。风电市场快速发展的同时, 风电事故也在逐年增加。风力发电机组一般运行在环境条件比较恶劣的偏远地区, 一旦发生故障, 不仅维修费用高, 而且较长的维修周期造成非常大的停机损失。此外, 轻微的故障如果不能及早的发现, 不仅影响运行效率, 甚至可能使部件发生不可恢复性损害, 导致风力发电机组停机维修, 甚至风力机倒塌, 整台机组毁坏, 造成严重的经济损失。

风力机故障诊断技术是针对风力发电机组的安全可靠运行问题的一种非常有效的解决方案<sup>[2]</sup>。故障诊断技术主要包括故障机理研究、征兆获取技术、传感器技术与信号分析技术、诊断策略、数据挖掘技术和故障诊断系统的开发等5个方面。风力机

故障诊断系统是集成了风力机故障诊断技术与知识的软硬件系统, 一方面, 它通过对达到阈值的监测参数进行报警, 判断机组发生故障的部位及程度, 协助运行人员进行处理, 防止故障的恶化, 帮助提前进行维修的准备工作, 减少停机损失, 达到降低风力发电机组运行维修成本的目的; 另一方面, 它收集存储的数据为风力机故障诊断技术的深入研究提供了不可替代的数据支撑, 促进自身的不断升级。因此风力机故障诊断系统是风力机故障诊断技术的集中体现, 是产学研结合的核心平台。

然而, 在风电领域, 目前国内风力机上安装的central monitoring system (CMS)中心监测系统, 都主要侧重于监测, 而诊断功能大都较为薄弱<sup>[3]</sup>。因此, 开发一套应用于大型风力发电机组的远程状态监测与诊断系统, 实现对风力机常见振动故障的诊断, 具有十分重要的意义。

在结合众多专家系统优点的基础上, 笔者开发

**[收稿日期]** 2014-12-09

**[基金项目]** 国家自然科学基金风电场设备状态监测与预警(51174273)

**[作者简介]** 蒋东翔, 1963年出生, 男, 黑龙江哈尔滨市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为动力系统设备故障诊断技术研究与应用;  
E-mail: jiangdx@mail.tsinghua.edu.cn

了一套自主的支持大量模糊规则链式推理的专家系统,并在此基础上进一步开发了故障诊断专家系统开发平台,可以用于各类设备诊断专家系统的开发<sup>[3]</sup>。

在对风力机振动故障技术深入研究的基础上,基于故障诊断专家系统开发平台开发了一套应用于大型风力发电机组的状态监测与故障诊断系统。该系统的主要功能是通过网络,从现场的数据采集系统中获取实时的振动数据,对实时数据进行高效的存储和管理,利用风力机故障诊断的相关领域知识对这些实时数据进行状态监测、故障诊断等分析,实现对传动链常见振动故障的诊断,对处理得到的结果进行存储和管理,最终实现对风力机进行远程状态监测和故障诊断的功能。用户可以通过网络远程获取系统的各种功能,包括实时监测、故障诊断、历史数据查询、知识库管理和系统管理等功能。

## 2 风力机组远程智能监测与诊断系统结构与功能

### 2.1 系统的整体架构图

系统的整体架构图如图1所示。风力机的主控系统和CMS已经在风力机上安装有大量的传感器,智能监测与诊断系统需要的且尚未采集的信号可以通过安装附加的传感器和采集设备得到。智能监测与诊断系统从supervisory control and data acquisition (SCADA)和附加的采集设备得到数据后,进行汇总、存储和分析处理,并将结果写入数据库。用户在远程通过浏览器或客户端软件接入系统,就可以获得系统提供的风力机监测与诊断服务。

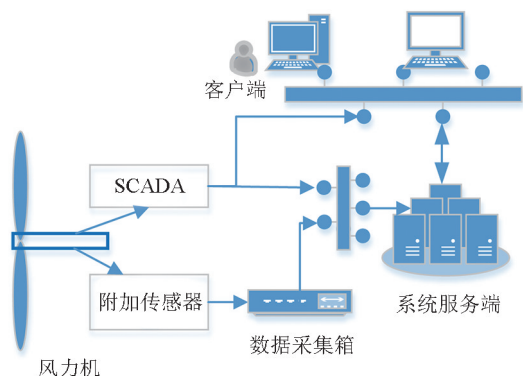


图1 系统整体架构

Fig. 1 Hardware architecture

### 2.2 智能故障诊断系统服务端

振动故障诊断服务端采用了分布式架构,主要包括数据采集模块、实时数据管理系统、诊断推理机与服务控制器和诊断结果数据库等几个子系统,诊断推理机和服务控制器可以集成在一个服务中。其架构如图2所示。

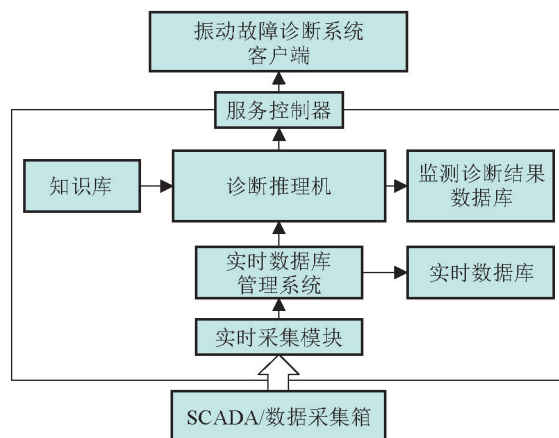


图2 专家诊断服务架构图

Fig. 2 Software architecture

数据采集模块定时获取一条数据,对数据进行处理,包括特征提取等,然后将数据送入实时数据库管理系统。

实时数据库管理系统得到输入后,会进行数据存储,并送入诊断推理机进行后续分析。它还提供了历史数据库查询的功能。

为了对风力机齿轮箱的状态进行监测,风力机振动数据的采样率非常高,达到20 K以上,因此振动数据量非常巨大,振动数据的高效存储和管理是风力机故障诊断系统面临的一个关键技术问题。在实时数据的存储方案上,目前主流的两种方案是关系型数据库和实时数据库。兼顾性能和价格,笔者开发了一种轻量级的实时数据库进行实时数据的存储。该实时数据库既可以存储特征数据,也可以存储振动数据。一个机组的振动测点可以任意分组,一组测点的所有数据存储在一个文件夹中的多个数据文件中。当一个数据文件超过设定大小后,实时数据库会自动新建一个新的文件,从而避免出现类似关系型数据的单个文件过大的问题。数据库中的每个文件都可以被单独解释,从而使得数据备份直接拷贝即可,非常方便。

知识库中存放着异常监测、故障诊断需要的所有知识,包括机组结构信息、测点信息、特征参数信息、故障信息、限值参数、诊断规则等。知识库中的诊断规则是按模块组织的,用户可以建立多个不同用途的知识库,并指定任意一个作为实时自动分析的知识库。用户可以通过振动故障诊断系统客户端软件对知识库中的知识进行管理。

诊断推理机读取知识库中的知识并进行解析,监测是否发生了异常和对异常进行自动诊断,最后将分析结果写入数据库。诊断推理机中用于故障诊断推理的内核决定了整个系统的性能,对此,我们采用自主开发的模糊专家系统作为推理内核。该模糊专家系统支持多种规则表达方式,包括产生式规则、推理树、故障树等。所有的这些规则中都可以都使用不确定性和模糊术语。此外,考虑到特征和规则会随着数据和经验的积累不断增加,因此,采用模糊 Rete 算法<sup>[4]</sup>进行特征数据和规则的匹配,它使得模糊专家系统可以进行基于海量模糊特征和海量模糊规则的链式推理过程。

服务控制器提供了客户端软件与服务器上的振动故障诊断服务进行交互的接口,这些接口包括历史实时数据查询、知识库管理、交互式诊断、查询监测诊断结果等。

### 2.3 智能故障诊断系统客户端

振动故障诊断系统客户端软件是直接和终端用户打交道的软件,它通过各种图形界面向用户提供振动故障诊断服务。它的主要功能包括状态监测、交互式故障诊断、历史异常故障查询、知识库管理、系统管理等功能,如图3所示。

状态监测功能。为设备的主要参数提供画面监测,对所有参数进行列表监测,为振动参数提供频域分析,为运行人员对风力机组的维护提供有价值的实时信息。通过对风力机的主要特征参数进行限值监测,及时发现设备可能存在的异常,对监测到的异常,调用知识库中默认的规则模块进行自动诊断,给出诊断结果,辅助运行人员进行有效处理,避免严重事故。

交互式故障诊断功能。用户可以对风力机存在报警的历史时刻,选用指定的知识库进行交互式诊断分析,对推理的过程和结果提供解释,生成分析报告。所谓交互式推理,是指在推理的过程中,如果触发的规则依赖的特征数据不存在,系统会要求用户输入相关数据,从而继续推理。通过这种交

互式的分析,可以辅助运行人员进行数据分析和故障排查。

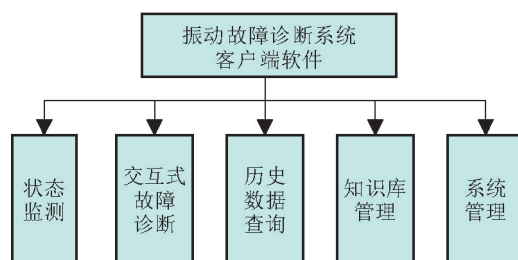


图3 振动故障诊断系统客户端软件的功能框图  
Fig. 3 Functions of the client software

历史数据查询。系统对近期的运行数据进行存储,对系统中发生的异常、故障数据进行了记录。用户通过对这些数据进行查询,可为设备的检修、可靠性评估提供参考。

知识库管理。本系统的诊断知识和推理机是相互独立的,系统向用户提供知识管理的功能,用户通过该功能可以查看、维护和扩展知识库中的知识,达到提高监测诊断准确率的目的。用户可以管理的知识包括异常报警的限值参数、故障信息和诊断规则等。

系统管理。提供对服务器端的数据采集、数据存储、数据处理服务等进行远程配置的功能。

## 3 基于模糊 Rete 算法的大规模模糊专家系统的研究与开发

专家系统是在故障诊断系统领域应用非常广泛的一种方法。Wu 等<sup>[5]</sup>研究了一种基于神经网络的故障诊断专家系统。Isermann Rolf<sup>[6]</sup>研究了模糊规则在自动控制、故障诊断中的应用。Dou 等<sup>[7]</sup>研究了基于 C language integrated production system (CLIPS)和数据挖掘算法的旋转机械故障诊断专家系统。这些诊断专家系统在具有各自优点的同时,都存在一些缺陷。基于神经网络的专家系统,其知识隐含在网络结构中,不能解释,也难以被复用。基于模糊规则的系统,规则可以被单独管理,但是其推理机不支持链式推理。CLIPS 采用 Rete 匹配算法,可以高效的支持大量规则的链式推理,但是其不能处理模糊变量,也不能进行反向推理。FuzzyShell<sup>[4]</sup>改进了 CLIPS,它支持模糊和不确定性推理,但是源代码没有公布和继续维护,难以用于

商业开发。因此,开发一套自主的支持大量模糊规则链式推理的专家系统,用于风力机智能化监测和诊断非常重要。

图4是笔者设计的大规模模糊专家系统的结构图。整个系统由工作内存、模糊符号管理、规则库、推理机、输入输出、编译器等几个部分组成。

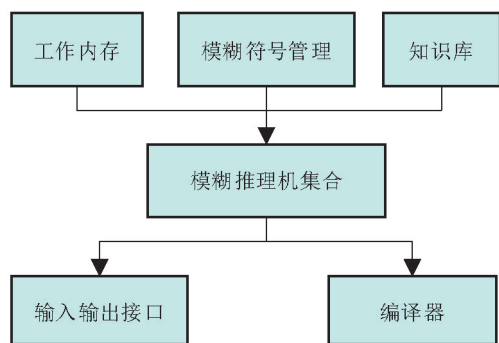


图4 大规模模糊专家系统结构图  
Fig. 4 Architecture of Fuzzy Expert System

与CLIPS类似,笔者为该专家系统设计了独立的推理语言,从而其可以独立的被使用,编译器就是负责对该语言进行解析和处理。工作内存中存放当前所有的特征数据,用于规则匹配。模糊符号管理着所有的模糊术语,并提供模糊匹配的功能。规则库中存储着所有的模糊规则,模糊专家系统除支持经典的“if-then”产生式规则外,还支持“switch-case”前向树推理等多种规则表示形式。模糊推理机集合由多种推理机组成,分别处理不同类型的规则表达形式。

推理的运行过程可以归纳为“选择-执行-模式匹配与议程更新”循环。系统启动后,知识库中的规则和工作内存中的特征数据将进行匹配,得到匹配的规则被放入推理机的议程当中,推理机按照一定的算法从议程中取得一条匹配的规则并执行,之后更新工作内存和议程中匹配的规则,然后进入下一条规则的选择和执行。这样循环进行,直到议程为空。外界通过推理过程中输出的状态信息和推理结束后工作内存中的数据,获得推理过程和推理结果。

在推理机的执行过程中,规则匹配环节的效率决定了推理机的效率,对此采用了模糊 Rete 算法<sup>[4]</sup>来进行优化。图5为模糊 Rete 网的结构图。它可以进行基于海量模糊特征和海量模糊规则的链式推理过程。关于该模糊专家系统的详细介绍可以参

考文献[4]和笔者的软件著作权<sup>[3]</sup>。

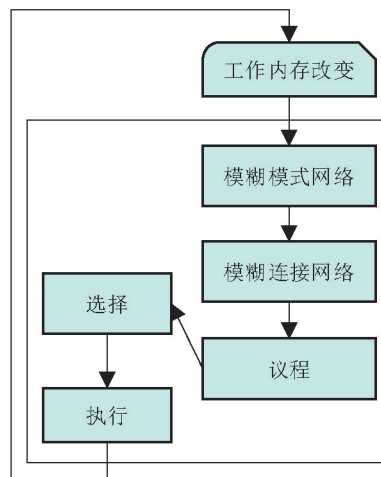


图5 模糊 Rete 网的结构图  
Fig. 5 Architecture of Fuzzy Rete Network

#### 4 风力机振动故障研究与知识获取

按照故障发生位置的不同,风力机的故障可以分为叶片故障、传动链故障、电机故障等。由瑞典、芬兰和德国1 000多台风力机连续数年的故障统计数据表明<sup>[8]</sup>,叶片、齿轮箱等机械结构的故障占用的比例较高,同时这些部件尺寸大,维修成本高,造成的停机时间长、经济损失大。这些机械结构的故障一般可以通过振动信号来进行监测和分析。

笔者在实验室条件下,开展了直驱型风力机的典型故障研究,这些故障包括风轮质量不平衡、风轮气动不对称、风轮翼型改变、偏航故障、主轴竖直不对中、前轴承座松动、主轴承外圈故障、主轴承内圈故障。研究了在各种故障条件下,风力机主轴的水平 and 垂直位移及前后轴承座垂直加速度信号的典型特征,从而获得可以用于模糊专家系统进行风力机振动故障诊断的模糊规则知识。笔者采用的信号分析方法包括幅值域分析、频率分析和包络谱分析<sup>[8]</sup>。部分研究结果如表1所示。将这些结果通过系统提供的知识库管理功能导入到系统的知识库中,用于风力机的故障诊断。

#### 5 界面展示和案例分析

图6到图9展示了系统的部分界面。其中图6为实时的振动监测画面,图7为实时的报警和自动诊断页面,图8为历史振动数据的查询页面,图9为

基于Web的知识库管理的页面。前3个界面来自桌面版的客户端软件,而图9来自Web版客户端界面,这也体现了笔者的系统既可以使用C/S(client/server)方式也可以使用(browser/server)的方式进行远程访问。

表1 风力机故障实验研究结果

Table 1 Results of wind turbine fault experiment research

故障名称	故障征兆
风轮不平衡	主轴水平位移的峭度、波形因子、峰值因子、脉冲因子、风轮旋转频率的1倍频幅值有所增加
气动不平衡故障	前轴承座加速度信号的3倍频幅值变大
翼型改变故障	输出功率显著下降
偏航故障	主轴水平和垂直方向位移的峭度、波形因子、峰值因子、脉冲因子都有所增加
竖直不对中	主轴垂直位移的峭度、波形因子、峰值因子、脉冲因子增加、同时2倍频幅值变大
前轴承座松动	主轴位移信号的1/2倍频幅值变大
主轴承外圈故障	在加速度信号的包络谱中,外圈故障特征频率处的幅值变大
主轴承内圈故障	在加速度信号的包络谱中,内圈故障特征频率处的幅值变大

系统中的振动数据来自某风机的实际数据,笔者采用修改特征限值的方式来仿真故障,进而测试系统的故障诊断功能。测试的结果可以通过图7的实时报警和自动诊断页面来进行查看,该页面的左侧显示了当前报警的机组,右侧上部显示当前报警的参数和报警持续的时间等相关信息,该页面右侧下面显示了利用模糊专家系统对当前报警进行推理得到的结果。进行仿真测试的时候,通过修改振动参数有效值幅值的限值来仿真不平衡故障,系统自动诊断出了仿真的故障,如图7所示,从而验证了系统诊断功能的有效性。

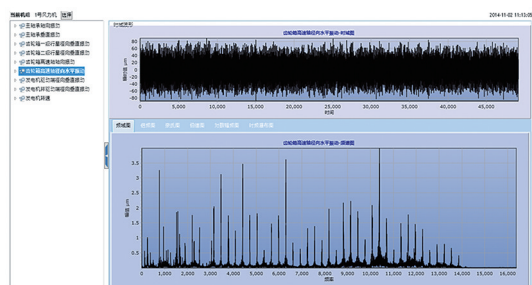


图6 实时监测页面-实时振动

Fig. 6 Real time vibration monitoring interface



图7 实时报警和自动诊断页面

Fig. 7 Real time alarms and diagnosis interface

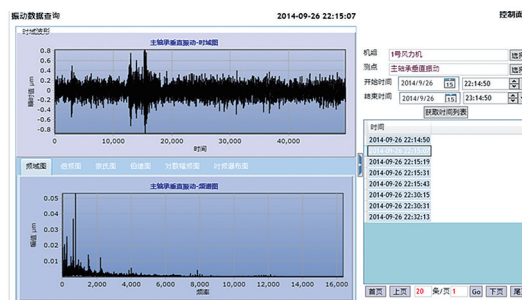


图8 历史数据查询-振动数据查询

Fig. 8 Query of historical vibration data

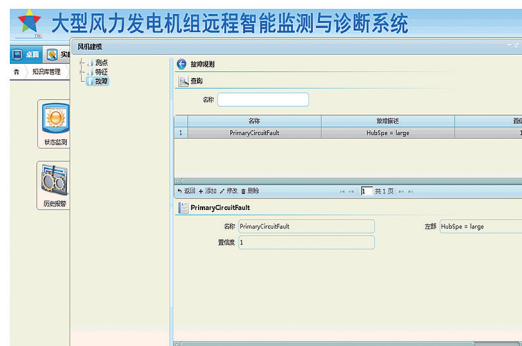


图9 基于Web的知识库管理页面

Fig. 9 Web based knowledge base management interface

系统将来用于实际风力机的监测诊断,仅需利用大量现场的实际数据,挖掘出了各个特征参数的实际限值,然后通过知识库管理功能导入到系统即可。

## 6 结语

相对于风电市场的迅速发展,风电状态监测与故障诊断系统的发展稍显滞后,目前真正投入产业化应用的基于振动监测的风力发电机在线诊断系

统尚属空白。本文针对风力机智能故障诊断系统的关键技术问题进行了研究,主要包括大规模的模糊诊断专家系统和风力机振动故障特征,并进一步开发了一套用于大型风力机的远程智能监测与诊断系统。该系统采用分布式架构,使用高效的实时数据存储系统对实时数据进行存储,使用一种大规模模糊专家系统作为推理内核,进行顶层的推理控制,系统智能化程度高。通过系统知识库管理功能可以对规则库进行扩展,从而在实际应用中不断提高系统的智能化程度。

未来的主要工作将从风力机振动故障机理研究、实验研究和现场数据挖掘三方面入手,获取有效的风力机振动故障诊断知识,实现实际风力机故障的精确诊断,为系统的实际应用做好技术铺垫。

#### 参考文献

[1] Association World Wide Energy. WWEA half year report 2014 [R]. 2014.

- [2] 陈雪峰,李继猛,程航,等. 风力发电机状态监测和故障诊断技术的研究与进展[J]. 机械工程学报, 2011, 47(9): 45-52.
- [3] 清华大学. 故障诊断专家系统辅助开发软件 V1.0. 2013年12月10日.
- [4] Pan Juiyao, Guilherme N, Desouza Avinash. FuzzyShell: A large-scale expert system shell using fuzzy logic for uncertainty reasoning[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1998, 6(4): 563-581.
- [5] Wu Jianda, Liu Chuihong. An expert system for fault diagnosis in internal combustion engines using wavelet packet transform and neural network[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(3, Part 1): 4278-4286.
- [6] Isermann Rolf. On fuzzy logic applications for automatic control, supervision, and fault diagnosis[C]// Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on, 1998, 28(2): 221-235.
- [7] Dou Dongyang, Zhao Yingkai. Fault diagnosis of rotating machinery using data mining and CLIPS-based expert system[C]// 2008 ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management, Proceedings, 2008, 2: 127-130.
- [8] 李少华. 风力机故障特征提取与识别方法研究[D]. 北京:清华大学, 2011.

# The design and implementation of remote intelligent condition monitoring and diagnostic system for wind turbines

Yang Wenguang, Jiang Dongxiang

(State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments, Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**[Abstract]** This paper researched the key technology of remote intelligent condition monitoring and diagnostic system for wind turbines, and described the development details of a system. The system, adopted the distributed architecture, consisted of four subsystems, which were the data acquisition subsystem, the real time data storage subsystem, the intelligent monitoring and diagnosis subsystem and the user interface subsystem. The intelligent monitoring and diagnosis subsystem used the knowledge base/inference engine structure. An advanced fuzzy expert system is developed for inference engine, and the vibration fault diagnosis rules for wind turbine is stored in the knowledge base. The effectiveness of the system is verified by diagnosing simulated wind turbine faults.

**[Key words]** wind turbine; diagnostic system; fuzzy expert system