

风力发电机组振动监测与智能诊断系统开发

蒋东翔, 黄 乾, 洪良友, 丁勇山

(清华大学热能工程系, 北京 100084)

摘要: 为了保证风力发电机组安全可靠运行, 减少故障的发生, 提高风力发电机组的运行可靠性, 在实验室条件下开发了一套风力发电机组振动监测与智能诊断原型系统。本文首先介绍了系统的硬件结构及原理; 其次给出了系统的软件流程和主要构成; 第三, 描述了系统实现的主要功能, 如振动数据采集与存储、状态监测、振动信号分析和智能故障诊断; 最后, 给出了一个系统运行的仿真实例和分析结果。进一步完善后该系统可用于风力发电机组实际运行。

关键词: 风力发电机组, 振动监测, 诊断系统, 人工智能

中图分类号: TH165 **文献标识码:** A

DEVELOPMENT OF VIBRATION MONITORING AND INTELLIGENT DIAGNOSTIC SYSTEM FOR WIND TURBINE

Jiang Dongxiang, Huang Qian, Hong Liangyou, Ding Yongshan

(Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: In order to ensure safety of wind turbine operation and to reduce the occurrence of faults as well as to improve the reliability of wind turbine operation, a vibration monitoring and intelligent diagnostic prototype system for wind turbine is developed in the laboratory conditions. In this paper, First, the hardware principle of this system is introduced. Second, the software processes and major components of this system are presented. Third, the main function of this system is described, such as vibration data acquisition and storage, condition monitoring, vibration signal analysis and intelligent fault diagnosis. Finally, the simulation and results analysis of the system operation are provided. The system can be used for the actual operation of the wind turbine after further improving.

Key words: Wind turbine, Vibration monitoring, Diagnostic system, Artificial intelligent

近年来随着风力发电的快速发展, 我国风电技术的成熟度远远跟不上风力发电的发展速度, 风力发电机组在实际运行中出现了大量关于风力发电机齿轮箱、主轴、叶片的损坏, 甚至有风力发电机组倒塌的现象。因此, 为了保证风力发电机组的安全可靠运行, 开发风力发电机组的状态监测与故障诊断系统至关重要。

本文构建了风力发电机组振动监测与智能诊断原型系统, 来监测风力机关键部件主轴、齿轮箱、发电机的运行状况, 分析设备的振动信号, 对当前工况状态及其发展趋势做出确切的判断, 并针对异常工况, 查明故障部位、性质、程度, 将故障消除在萌芽状态, 即便发生故障, 能分析故障原因, 缩短维修时间和损失; 最后通过仿真实例验证系统的有效性。

1 风力发电机组振动监测系统硬件构成

风力发电机组振动监测系统由振动传感器、数据采集器、计算机等组成, 其结构如图 1 所示。其中, 振动传感器将机械振动量转变为适宜的电参量; 数据采集器则将模拟信号转换成数字信号, 其主要功能包括信号放大、模数转换等; 信号存储的功能

是存储所测振动信号。

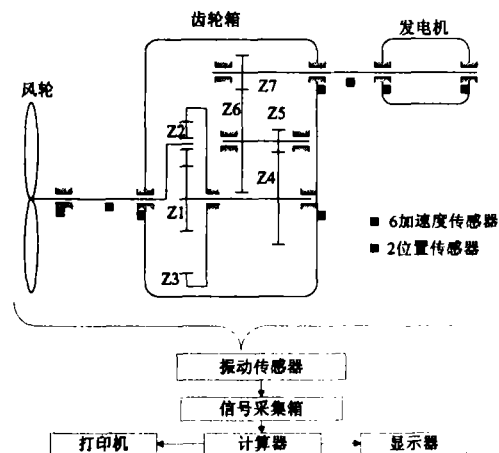


图 1 振动监测系统硬件结构框图

根据风力发电机组的结构特点、性能参数和工作原理, 同时根据积累的现场测试经验, 按照表 1 选择基本的几处振动测试点。这里选择了六个位置设置加速度传感器: 风轮主轴承水平向, 齿轮箱处埋设 3 个传感器, 发电机内外轴承 2 个, 此外辅助转速测量通道 2 个 (低速轴和高速轴)。数据采集器采用的是美国 NI 公司生产的 scxi1120/d 信号调理配件配

基金项目: 国家 973 计划资助课题 (No.2007CB210304)

第一作者: 蒋东翔 男, 博士生, 教授, 1963 年生

以 16 通道的高速数字设备 PCIe-6536。所有采集到的数据都均传输至计算机进行数据分析。计算机连接着一个打印机用于打印各种报告。

振动监测系统数据采集和分析的软件模块主要是利用 NI 公司的 LabVIEW 语言开发设计。

表 1 振动监测内容

测点部件	传感器	测量	测量范围
	数量	方向	(Hz)
风轮主轴承	1	径向	0.1~10 000
齿轮箱	3	径向	0.1~10 000
发电机轴承	2	径向	0.1~10 000

2 系统的主要功能和软件流程

风力发电机组振动监测与智能诊断系统主要实现以下几个方面功能：

(1) 信号的采集、显示和储存

振动信号通过硬件系统采集，并可以显示在计算机屏幕上。同时可以

人工保存各种工作状态下的振动原始信号。

(2) 信号处理和分析

对风力发电机组参数进行预处理、滤波、降噪和剔除奇异点；监测风力发电机组各测点处的振动总量；对稳态振动信号能进行频谱分析；对振动信号参数进行趋势分析，判断振动的变化趋势；对暂态振动信号能进行小波分析，可以判断或预测故障发生的时间。

(3) 自动报警

当发现运行状态异常时，自动报警模块会通过计算机发出听觉和视觉的警告，并显示相应的振动信号特征（例如幅值域趋势变化图），并自动转入诊断模块。

(4) 智能故障诊断

当发现运行状态异常时，系统自动转入智能诊断模块，判断故障类型和故障原因。

(5) 故障仿真

系统对常见振动故障可以仿真，包括轴不对中，齿轮均匀磨损和周节误差等。

(6) 数据文件管理

系统软件流程如图 2 所示。

利用数据库管理振动监测结果和历时记录，方便管理分析风力发电机组振动特性。

3 风力发电机组智能诊断方法

智能诊断系统嵌入有基于 RBF 神经网络和基于规则的诊断专家系统模块，不同诊断方法得到的诊断结果经过诊断融合模块进行决策融合，最后

给出诊断结果。

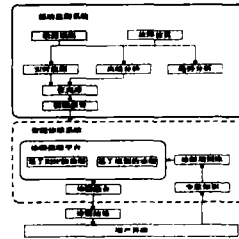
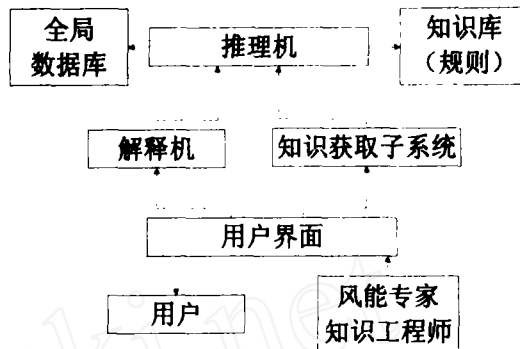


图 2 风力发电机组振动监测与智能诊断系统

3.1 人工神经网络方法



神经网络是由大量简单的处理单元（称为神经元）广泛地互相连接而形成的复杂网络，它是对人脑神经网络的某种程度上的简化、抽象和模拟，而不是真实写照。

1988 年，Broomhead 和 Lowe 首次将 RBF 应用于神经网络设计，构成了 RBF 神经网络。从结构上看，RBF 神经网络是一种三层前向网络，输入层由信号源节点组成；第二层为隐含层，其节点的多少视具体问题而定；第三层为输出层。RBF 人工神经网络的结构如图 3 所示。输入层实现从 $x_i \rightarrow \phi_i$ 的非线性映射，输出层实现从 $\phi_i \rightarrow y_i$ 的线性映射。隐层节点(RBF 节点)由像高斯核函数那样的辐射状作用函数组成。

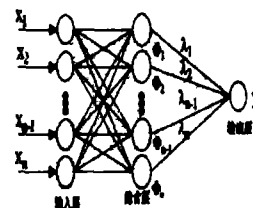


图 3 RBF 人工神经网络结构

对来自机组不同状态的振动信号，通过特征选择，找出对于故障反映最敏感的特征信号作为神经网络的输入向量，建立故障模式训练样本集，对网络进行训练。当网络训练完毕，对于每一个新输入的状态信息，网络将迅速给出分类结果。

3.2 基于规则的专家系统

故障诊断专家系统是人工智能在设备故障诊断中的实际应用之一，它是一种模拟专家决策能力的计算机系统。风力发电机组故障诊断专家系统的构成如图 4 所示。系统包括用户界面、知识获取子系统、解释机、推理机、知识库和全局数据库等几个部分。专家系统的基本工作流程是，用户通过用户界面回答系统的提问，推理机将用户输入的信息与知识库中各个规则的条件进行匹配，并把被匹配规则的结论存放到全局数据库中。最后，专家系统将得出最终结论呈现给用户。同时专家系统还可以通过解释机，向用户解释系统的行为。

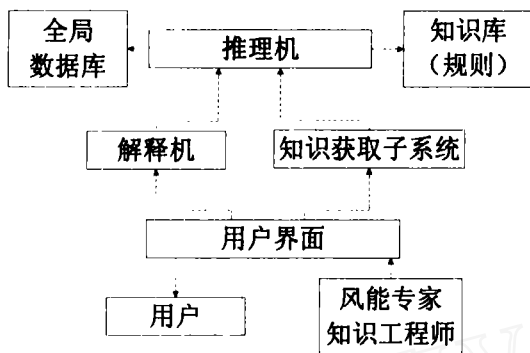


图 4 风力发电机组智能诊断专家系统结构

作为专家系统开发工具的一种，CLIPS (C Language Integrated Production System) 的应用非常广泛，它是一种多范例编程语言，支持基于规则的、面向对象的和面向过程的编程。对专家经验知识进行处理可以得到产生式规则知识，利用 CLIPS 语言可以开发出风力发电机组振动故障诊断专家系统。

4 仿真实例和分析结果

根据风力发电机组的常见振动故障和征兆关系建立故障诊断模型。为说明问题，本文只研究传动链中齿轮箱的 15 种典型故障，并选取 17 个频率处的能量作为特征参数。表 2 示出了部分征兆参数和故障模式的对应关系。并仿真出故障样本，样本被随机分割成训练集和测试集。

表 2 齿轮箱典型故障和征兆参数关系矩阵 (部分)

征兆参数 故障模式	$f_{r1}(s1)$	f_{m1} 及其 倍频(s2)	f_{r1} 被 f_{m1} 调 制(s3)
太阳轮偏心 (F1)	0.5	0	1
太阳轮均匀磨 损(F2)	1	1	0
太阳轮周节误 差(F3)	0.2	1	1

其中 f_{r1} 为太阳轮旋转频率， f_{m1} 为第一级齿轮对啮合频率。

根据特征参数和状态模式 (包括正常状态和故

障状态) 的个数，在此我们建立一个 $17 \times 16 \times 16$ 的 RBF 神经网络，将训练样本输入训练网络，用测试网络检验训练结果。表 3 为检验样本的网络输出，

表 3 RBF 神经网络输出

ID	F0	F1	F2	F3	F4
T1	0	1.047	0.011	0.011	-0.011
T2	0	-0.002	1.109	0.039	-0.019
T3	0	-0.071	-0.020	1.005	0.009

利用 CLIPS 语言开发风力发电机组振动故障诊断专家系统，其流程如图 5 所示。

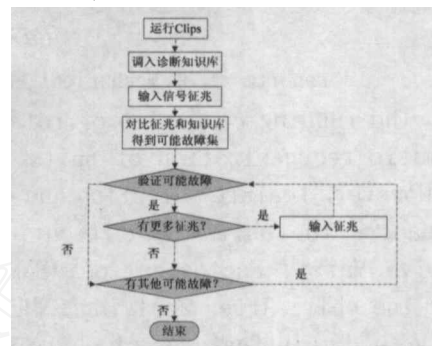


图 5 风力发电机组专家系统振动流程图

两种诊断方法都能很好的将待诊断样本准确的诊断出来。

5 结论与总结

本文开发了风力发电机组振动监测与智能诊断原型系统。基于虚拟仪器的振动监测系统缩短了开发周期，并方便升级。振动数据采集模块可以采集风力发电机组的振动信号，并实现实时监测、离线分析、趋势分析和故障仿真。当故障发生时，基于人工智能 (人工神经网络和专家系统) 的诊断系统可以诊断出故障类型。仿真实例和结果验证了系统的实用性。

参考文献

- [1] 时轶, 崔新维, 李春兰. 在线监测系统在风力发电机上的应用. 风机技术, 2007.4: 74-76
- [2] 周梅. 虚拟仪器技术在齿轮箱振动分析中的应用研究.
- [3] 盛兆顺, 尹琦岭. 设备状态监测与故障诊断技术. 北京: 化学工业出版社, 2005, 3
- [4] 吴今培, 肖健华. 智能故障诊断与专家系统. 北京: 科学出版社, 1997. 161~163
- [5] Z. Hameed, Y.S. Hong, Y.M. Cho, S.H.Ahn, C.K.Song. Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: A review. RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS. 2007.5