

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.05.020

# 风电场机组远程监测系统\*

刘秀丽 徐小力

(北京信息科技大学 现代测控技术教育部重点实验室 北京 100192)

**摘要:**大型机电设备日趋得到广泛应用。这些大型机电设备不仅自身造价昂贵,其维修成本也是相当惊人。设备损坏、精度劣化以及效率降低都可能造成巨大的损失,为有效保证设备的正常工作、加工质量和故障的预报,开展构建远程在线检测及智能故障诊断预测系统平台研究。远程监测系统集成传感器技术、动态测控技术、信号处理技术、故障模式识别技术和人工智能技术,风机现场的应用表明,该系统可有效监测风机的运行状况,实现对风机故障部位的实时报警和风机运行趋势的有效预测。

**关键词:**风电机组;监测系统;故障检测;趋势预测

**中图分类号:** TH17      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:**

## Remote monitoring system for wind turbine

Liu Xiuli Xu Xiaoli

(Key Laboratory of Modern Measurement & Control Technology of Ministry of Education, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

**Abstract:** Large mechanical and electrical equipment has become increasingly widely use. This large mechanical and electrical equipment itself is not only expensive, its maintenance cost is also quite striking. Equipment damage, deterioration of accuracy and reduction of efficiency may cause huge losses. To effectively guarantee the normal work of the equipment, the processing quality and fault forecast, remote on-line detection and intelligent fault diagnosis system platform is built. The remote monitoring system integrates sensor technology, dynamic measurement and control technology, signal processing technology, fault pattern recognition and artificial intelligence technology. The field application shows that the system can effectively monitor the running status of the fan, achieve the real time alarm and running trend prediction effectively.

**Keywords:** wind turbines; monitoring system; fault detection; trend prediction

## 1 引言

近年来,大型机电设备日趋得到广泛应用。这些大型机电设备不仅自身造价昂贵,其维修成本也是相当惊人。设备损坏、精度劣化以及效率降低都可能造成巨大的损失,为有效保证设备的正常工作、加工质量和故障的预报,开展构建远程在线检测及智能故障诊断系统平台研究<sup>[1]</sup>。

远程监测系统集成传感器技术、动态测控技术、信号处理技术、故障模式识别技术和人工智能技术,是以人工智能为技术支撑,以知识为基础、以知识分类与处理为核

心内容<sup>[2]</sup>。其中,设备状态信息的检测与数据处理是智能诊断的重要前提和关键内容,从状态信息检测到故障特征提取,从状态识别到故障分析都呈现了知识化的过程,是以专家知识库为主导的智能故障诊断,实现信号检测、数据处理与知识获取的统一。

在工业4.0、互联网+等相关技术发展的驱动下,面向以风电机组为代表的现代、高端、关键的新能源机电设备,针对风电机组群非平稳、非线性、变工况、长历程运行状态及其早期故障预报特点,基于现代信息化技术研究提出早期故障微弱趋势信息获取方法并建立网络化远程故障预报智能监测系统,为实现设备运行状态监控、健康

诊断、故障预警以及科学维护提供技术支持。

## 2 风电机组远程监测理论与方法

风电机组的远程运行监测涉及众多理论及方法,归纳起来有如下几个方面。

### 1) 获取和分析实测大数据样本

通过远程在线样本获取及故障预报实验平台系统,进行获取和分析实测大数据样本的工作,主要利用实验平台系统中的现场传感器系统采集反映设备运行发展状态的实测大数据,利用实验平台系统中的实验室远程在线故障诊断中心进一步分析实测大数据样本。

### 2) 动特性劣化发展趋势弱信息信号处理及预处理

采用基于数学形态学的形态滤波和形态小波信号分析方法,将多尺度广义形态变换算法用于劣化趋势弱信号的降噪处理和趋势特征成分提取,通过在不同尺度上的形态变换,达到既去除不同噪声成分,同时又保留和突出所有尺度上的故障趋势特征的目的。如:分别用微粒群算法和人工免疫算法优化趋势特征选择和支持向量机参数,减少趋势特征和趋势参数选择的盲目性,减少趋势预测中人为因素的干扰,在有噪声存在的情况下,达到提高多类分类器的识别率和收敛速度的目的。

### 3) 揭示稳定性劣化的机械动态特性发展演变趋势特征及早期故障发展机理及模式

以机械动态特性检测分析为重要手段,研究典型新能源装备机电系统转子动力系统(风机主轴、轴承等运动部件)动特性劣化的发生、发展的原因及机理;揭示从劣化趋势征兆、早期性能衰变、损伤积累到完全失效的机械动特性发展演变趋势特征和规律;分析转子行为与劣化发展特征的关系、劣化发展趋势与状态异常之间的关联;建立劣化原因与机械动特性发展趋势特征的映射关系(主要包括:轻微损伤和磨损等微弱劣化趋势特征、传动系统调制信号趋势特征、运行参数和负载变化等非线性趋势特征、复合劣化趋势特征等)<sup>[3-7]</sup>。

### 4) 长历程变负载机电系统动特性劣化发展趋势特征分析

研究长历程变负载机电系统运行状态动特性劣化发展趋势特征,针对转子振动在起停机和升降速过程中的频率调制特点,利用自适应 Chirplet 分解在匹配调频信号方面的优势,以及自适应 Chirplet 谱图时频分辨率高、没有交叉项干扰的优点,分析机电设备在启动和停机等过渡发展过程中主轴摆度的现场测试信号,选择搭配分析参数子集,实现发展趋势特征分析。

### 5) 长历程变负载状态动特性劣化趋势特征的提取

为实现故障特征发展变化与非故障变化(正常工况变化引起的能量信号变化等)的解耦,采用故障趋势特征

与变工况状态非劣化趋势特征的解耦和分离的算法,利用具有动态非线性拓扑结构的能量解耦趋势特征提取系统,设计该系统的新型时变非线性动特性趋势特征提取分类器,在较大程度上消除工况变化引起的非劣化能量变化冗余信息。

### 6) 实测大数据趋势预测与机械动特性趋势预示相融合的趋势预示模型及系统的构建

研究构建实测大数据趋势预测与机械动特性趋势预示的信息融合趋势预示模型及系统,设计面向智能维护的能够实现这两种模型信息融合的智能互联融合模块;该新型信息融合趋势预示模型及系统能够融合故障预测的数值规律信息与机械系统的物理信息,既能体现劣化数值规律和劣化发展趋势,又能体现机械系统的物理本质和劣化发展机理,通过多信息融合使构建的新型趋势预示模型具有较理想信息熵。风电机组监测系统的实现路线如图1所示。

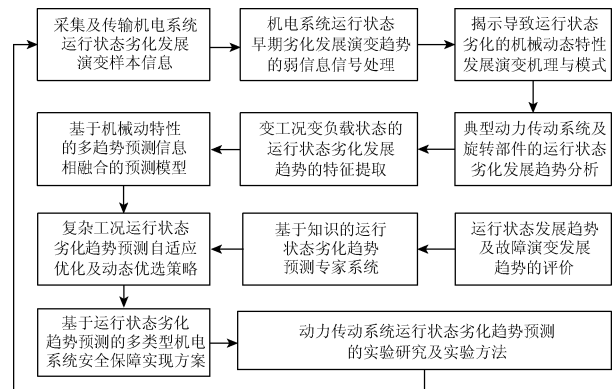


图1 风电机组监测系统实现路线

Fig. 1 Implementation route of wind turbine monitoring system

故障发展趋势特征信息往往是一种早期故障征兆信息<sup>[8]</sup>,其具有的明显弱信息特征表现在信噪比很低,采用弱信息信号处理方法,包括传感器系统检测及相关信息融合、故障征兆量和损伤征兆量信号处理、噪声规律(幅度、频率、相位等)及信号特点(频谱、相干性等)分析、噪声背景下小位移及微振动等弱信息分析等;围绕信息处理的有效性、实时性和稳定性进行方法优化;采用相关的随机不确定性、模糊不确定性、不完备性、不完全可靠性等信号处理方法,动态自适应特征提取方法,实现时变状态(工况、环境等变化)微弱特征提取。

大型复杂机电设备长历程运行中工况、负载及环境变化等非故障因素会造成信号能量变化<sup>[9-12]</sup>,故障趋势信息往往被非故障变化信息所淹没,传统基于能量的振动级值及功率谱变化不一定对应设备健康状态变化,因此传统方式具有不确定性。为解决复杂机电系统故障趋势特征与变工况非故障状态特征的分离难题,采用基于

能量解耦<sup>[13-14]</sup>的故障趋势特征提取算法。在特征提取方法研究中,采用时变非线性故障特征提取方法解决早期故障预测不确定性问题。

为实现故障预报工程应用,构建基于实测数据的趋势预测模型及系统,确定预测模型适用范围及适合度,以实现对其历史、现状及随后发展的在线综合分析及比较判断,在此采用的模型包括:多层递阶自适应预测模型、灰色预测模型、神经网络预测模型、时间序列模型、差分自回归移动平均模型等。其中灰色预测模型对数据及其分布没有什么特殊的要求和限制,即使只有少量的历史数据,任意随机分布,也能得到较好的预测精度;神经网络新息加权预测模型<sup>[15]</sup>可充分利用最新获得的:在对网络的权值赋初值时,对于输入层与隐含层各节点之间权值,根据时间序列数据新旧的程度,对随机赋予的权值再乘以一个新息加权矩阵,以此来强调时间的信息,并强调数据序列之间相对时间的关系。这种新息加权预测模型是对 BP 网络模型的一种新改进,其输入层的时间序列测量数据采用新陈代谢新息方式输入;时间序列模型的建立基础是基于时间序列的,它的前提是假定事物的过去会同样延续到未来。正是因为时间序列分析预测法突出了时间因素在预测中的作用,暂不考虑外界具体因素的影响,所以本方法针对状态恶化为一个缓慢过程的设备是适用的。

自适应阈值报警,目的在于对设备历史状态数据(振动位移、速度、加速度、压力、温度、流量等等)进行分析,针对每台设备每个测点提出有针对性的、能够反映设备运行状态的、动态变化的阈值;针对单一状态数据(如振动幅值),或者针对一个主要状态数据和几个辅助的状态数据,进行自适应报警;提出最能反映设备运行状态的特征参数,连续跟踪,自适应报警,故障预报。

### 3 系统总体架构

建立风电机组群远程监测系统是为实现技术支持中心与用户方通过远程互联网技术进行实时在线故障早期预报和数据库共享。该系统设计由三大部分组成,分为多传感器分布式检测系统、海量数据融合系统和远程在线智能故障诊断及预测中心。多传感器分布式检测系统主要由设备实时在线检测部分,多数据采集部分和测试设备本身故障诊断系统等部分组成,主要是完成风电机组运行的状态信息检测和基本信号处理。当故障在信息融合系统中无法得到准确结果时,则将诊断需要的原始样本数据以标准文本格式传输给在线诊断及预测中心,在线诊断预测中心将会依据专家系统知识库进行智能分析诊断。根据当今两大主流软件开发模式技术 C/S (client/server) 和 B/S (browser/server) 系统的体系结构特

点,以及两大软件架构的优势和劣势分析,在这里选用 B/S 架构进行平台搭建。首先,该系统能够提供多种常用的数据库供选择(如 sql Server, oracle)。用户可以使用浏览器上网,向服务器发送请求,查询数据库,执行相应的应用程序,并将结果信息以超文本标记语言页面反馈给用户。这种模式克服了 C/S 二层结构负荷不均匀的弊端,用户界面具备一致性和友好性、操作方便、易于维护和升级等优点,是开发远程服务系统的最佳模式。图 2 所示为构建的基于 B/S 架构的风电机组群远程监测系统总体框架图。其中主要包括面向变工况机械动特性及工况检测的固定式现场多传感器信息获取系统(振动、噪声、转速、载荷、电量、温度、压力、风速、风向、应变等)、智能信息处理系统(数据分析、计算与存储、信息挖掘及信息融合等)、故障预警软件系统(设备故障图谱分析、设备故障识别诊断、设备故障趋势预测、设备维修决策建议、客户终端管理、数据安全控制、数据存储控制、设备信息管理)、客户端系统等(PC、手机、短信报警等)。

### 4 系统的硬件系统设计与实现

针对风力发电机组信息繁多、数据库规模庞大等特点,构建一种远程分布式可重构检测诊断平台,采用可重构的单元模块化嵌入式检测体系结构,通过软硬件资源配置,实现风力发电机组关键功能部件的远程在线检测与诊断,使其与整机形成一体化系统,适应风力发电机组各种复杂多样的实时性数据通信,实现机组智能故障诊断。整个分布式体系结构设计如图 3 所示。

#### 1) 嵌入式检测模块—声发射

在风机部件受损过程中,会产生强烈的声发射信号,通过对声发射信号的实时采集和处理,可以实现对风机部件的实时监控。声发射嵌入式检测模块选用 50 ~ 400 kHz 的信号频带、16 位 A/D 转换、150 MHz TMS320F2812 / 隔离 RS-485 总线进行设计。此嵌入式模块具有灵敏度高,响应时间小于 1 ms,抗干扰能力增强,有良好的信噪比等特点,可方便地实现与检测诊断平台连接。其技术指标为如下:

(1) 信号频带: 50 ~ 400 kHz;

(2) 可选择频段: 50 ~ 180 K, 160 ~ 290 K, 270 ~ 400 K, 380 ~ 510 K;

(3) 增益调节: 5, 8, 10, 20, 30, 40, 50;

(4) 16 位 A/D 转换;

(5) 150 MHz 的 DSP (TMS320F2812), 有很强的数据处理能力。

声发射嵌入式模块系统如图 4 所示。

#### 2) 嵌入式检测模块—振动

振动嵌入式检测模块由 DSP 采集监测模块、传感器

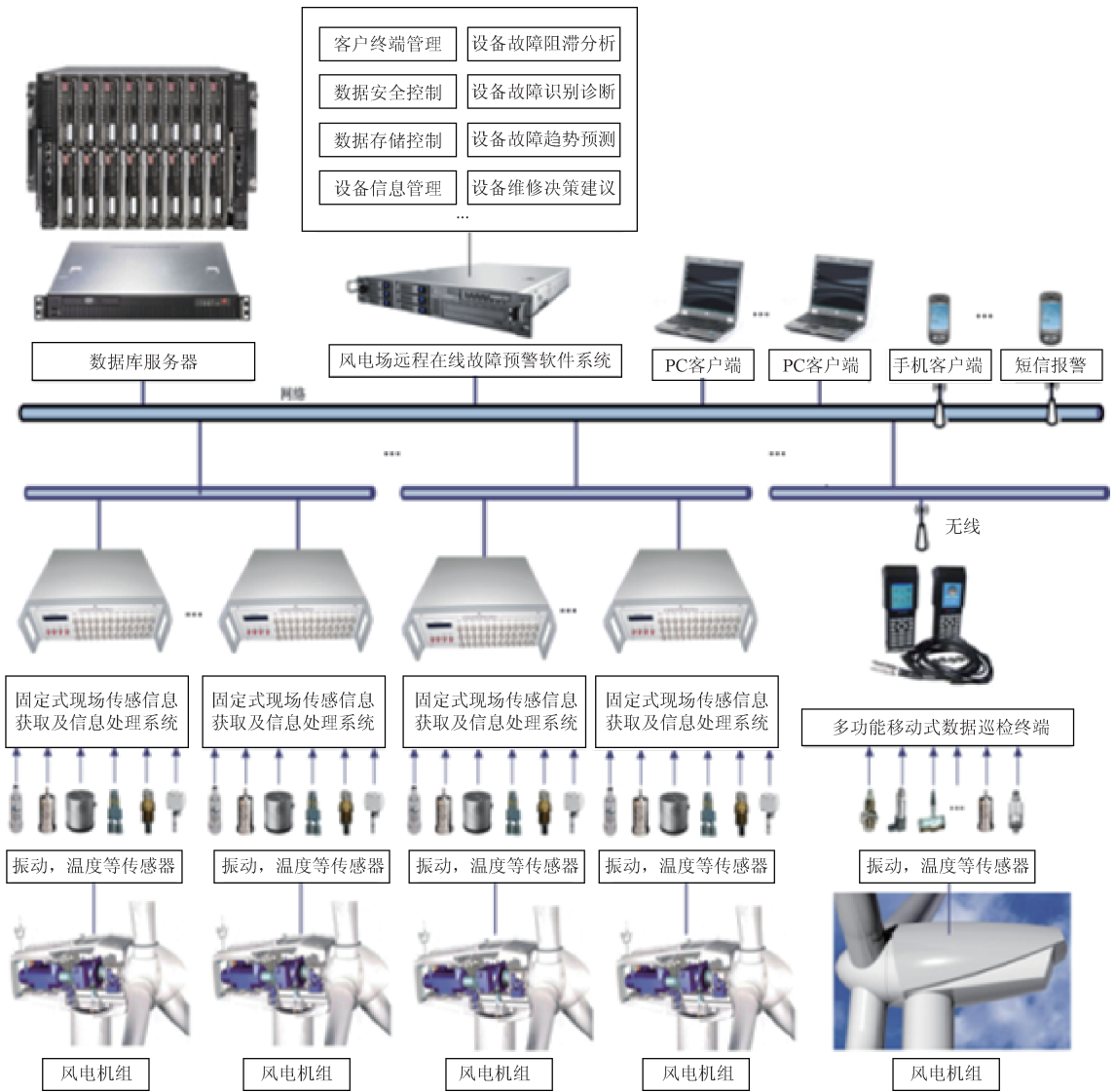


图2 基于B/S架构的远程在线检测与诊断系统

Fig. 2 Remote online detection and diagnosis system based on B/S architecture

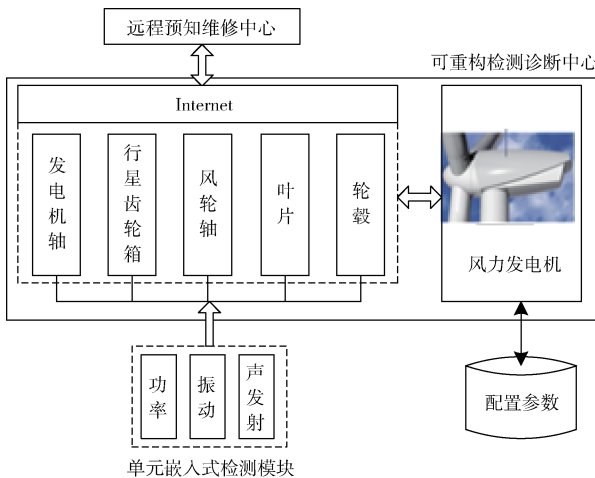


图3 单元模块化嵌入式检测系统

Fig. 3 Modular embedded detection system

调理模块、信号调理模块、电源模块、背板、机箱等部分组成,如图4所示。DSP采集监测模块采用高性能DSP + FPGA的体系结构,可以满足对振动信号实时采集和处理的要求。传感器调理模块设计针对电涡流位移、ICP加速度等传感器专用的板载变换器,可方便地实现连接功能。信号调理模块可支持电涡流传感器、ICP加速度传感器等信号类型,采用信号隔离放大器,减少与DSP采集监测模块间的干扰。电源模块的设计是采用隔离电源的形式,其输入220 V交流电源,输出+5 V/±15 V直流电源。其主要技术指标如下:

- (1) 6通道并行采样,250 Ksps;
- (2) A/D分辨率:16 Bit;
- (3) 输入电压范围:±5 V;
- (4) 采样长度最大:64 MByte;

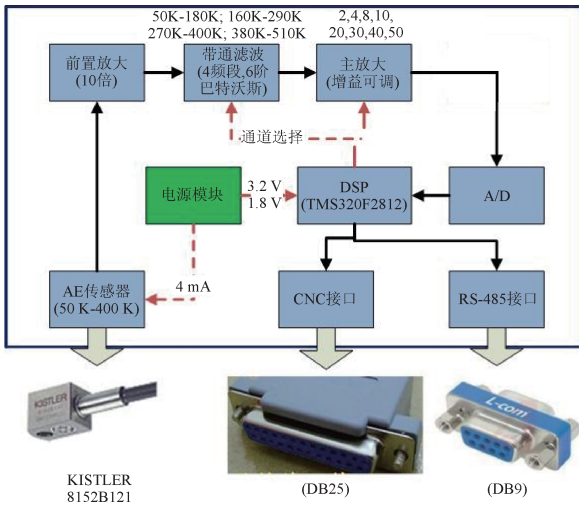


图 4 声发射模块系统

Fig. 4 Block diagram of acoustic emission module

(5) 1 个以太网接口;支持 DSP 程序的在线下载、启动和数据通讯;

(6) 1 个 RS485 通信接口。

3) 嵌入式检测模块—功率

电机的有功功率代表了电机做功的多少。通过实时采集电机的三相电压、三相电流信号,可以获得精确的电机瞬时功率,实现对风机工作过程的实时监控。设计功率嵌入式模块所需的成本低且通用性高。其主要技术指标如下:

(1) 霍尔传感器检测三相电流,响应时间 < 1 ms;

(2) 6 通道并行采集电压、电流信号;

(3) 16 位 A/D, 4 Ksps/通道;

(4) 采样长度最大:64 MByte;

(5) 采用 150 MHz 的 DSP (TMS320F2812), 具有强大的实时数据处理能力;

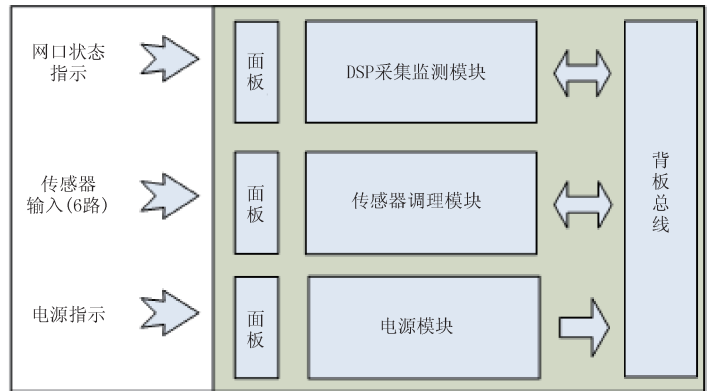
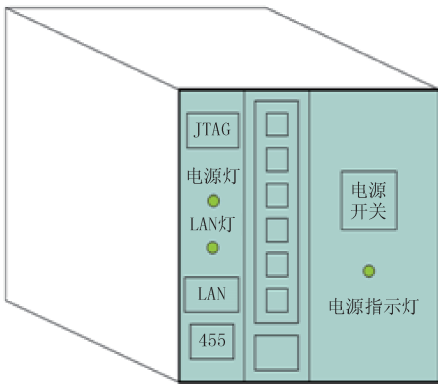


图 5 振动检测模块框图

Fig. 5 Block diagram of vibration detection module

(6) 隔离 RS-485 总线,可方便地实现与远程检测故障诊断平台连接。

构建基于风力发电机组的嵌入式状态检测系统可以方便地实现风机运行状态与控制信息通讯的无缝连接,采用开放的互联网协议,实现远程信息访问的标准化,为开发基于风力发电机组的远程多信息数据库平台提供关键技术。

### 5 系统的软件系统设计与实现

远程多信息数据库平台由基本信息数据库、设备运行状态的原始样本数据库、故障知识库等三部分构成。多信息数据库的实现与管理关系到系统中数据共享的程度,因而数据库系统应具有良好的安全性,操作性,和开放性。数据库的信息主要来自于客户方、设备生产部门、技术诊断中心等。其中设备运行状态的原始样本数据库用来存储各种风力发电机组不同工作状

态时的参数和采样数据。远程故障诊断中心通过远程交互界面设置参数,分析这些采样数据与设备状态的历史数据库中的标准数据进行对比,判断出风机故障的原因,为提出解决方案找准方向。故障知识库是风机远程故障诊断数据库开发的重要技术支柱之一,其内容复杂,主要由具体的故障现象、对该现象的分析、可能原因、解决方案等构成。通过分析对故障原因进行解释,针对不同的原因给出了排除故障的方法,对故障排除工程中可能遇到的疑难进行解答。软件服务结构如图 6 所示。

数据库平台的软件开发主要采用 Microsoft Visual Studio 2013 作为开发环境,基于 Framework3.0、IIS6.0 采用 WebForm 的方式进行开发,其中应用到的开发语言及技术有 C#、ASP.NET、Javascript、HTML、CSS。数据库采用 SQL2013 进行设计,数据库之间的关系如图 7 所示。

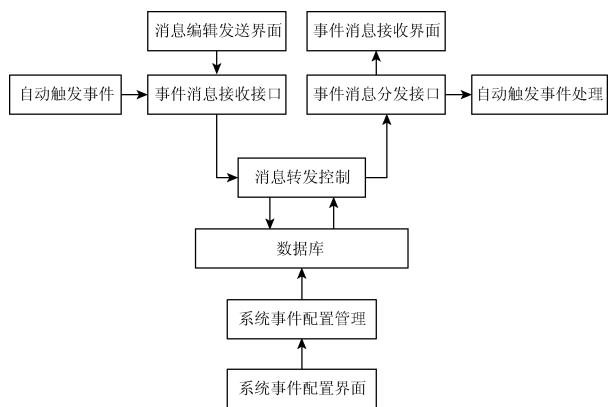


图6 事件消息服务框架

Fig. 6 Frame of event message service

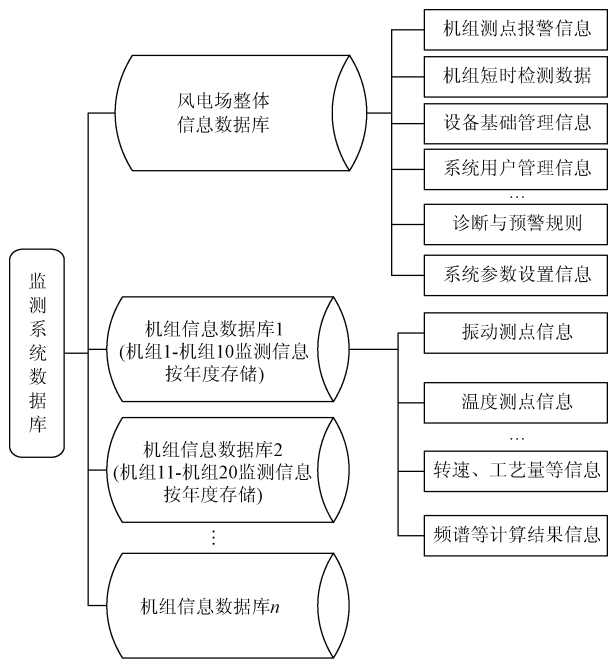


图7 数据库关系

Fig. 7 The relationship of database

### 6 现场应用

根据风电场机组群分布较广的特点,建立基于互联网的风电场机组群远程监测系统,将机组故障预报系统整合在远程网络预知维修中心;同时根据风电机组故障维修困难及故障维修成本高的实际情况,根据早期故障征兆及故障趋势,采用现代预知维修的设备科学维护与设备动态管理的模式,提前采取维护措施以消除故障隐患,减少恶性事故及续发性事故的发生。

风电场机组群远程监测系统为风电场机组群运行状态的动态测试、信号分析、故障分析、安全预警、决策控

制、科学维护及动态管理提供了技术手段。风机机舱内工作现场及监测集成系统如图8所示。



图8 风电场远程监测系统

Fig. 8 Wind turbine remote monitoring system

将风电机组1传动系统的各个状态下的特征值点融合成状态劣化特征向量,将这些劣化特征向量输入已训练好的隐马尔可夫模型(hidden Markov model, HMM)中,利用HMM模型对其劣化类型进行诊断,具体见文献[16]。分别计算9个模型对各个状态的输出对数似然概率,其中输出对数似然概率最大的模型即代表风电机组传动系统该状态的最可能的故障模式,诊断结果如图9所示。

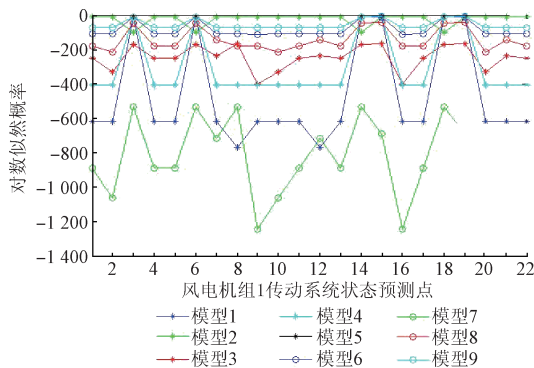


图9 风电机组1运行状态诊断结果

Fig. 9 Running state diagnosis result of wind turbine 1

风电机组1的实际运行状态为高速轴存在动平衡不良故障,实际情况验证了特征提取方法以及运行状态劣化诊断模型的有效性。

同理将风电机组2、风电机组3的各22组运行状态输入HMM的运行状态劣化诊断模型中进行诊断分析,给出这9个模型对其状态的输出对数似然概率,结果分别如图10、11所示。

同风电机组1的诊断方法,风电机组2可以判断其传动系统处于正常运行状态。由图11可知,风电机组3以判断其传动系统处于正常运行状态。个别状态偏离正常运行状态的原因可能是风力和风向的随机性导致传动系统产生了波动。风电机组2、3的实际工况验证了诊断结果的正确性。

在确定了风电机组1传动系统处于不平衡运行状态

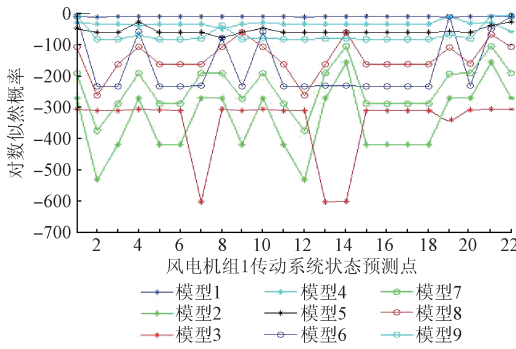


图 10 风电机组 2 运行状态诊断结果

Fig. 10 Running state diagnosis result of wind turbine 2

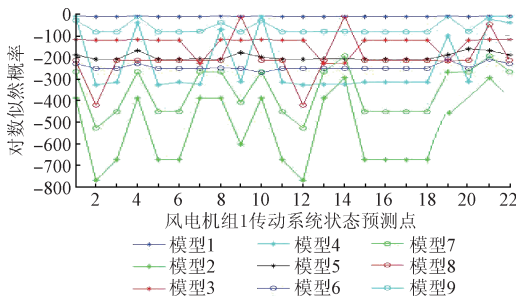


图 11 风电机组 3 运行状态诊断结果

Fig. 11 Running state diagnosis result of wind turbine 3

后,进一步对其不平衡运行状态的劣化趋势进行预测研究。

应用劣化敏感希尔伯特-黄变换 (Hilbert-Huang transform, HHT) 特征提取方法对现场采集的风电机组 1 传动系统的 22 组状态信号进行了特征提取处理,获得了特征谱图,在此基础上计算 22 组状态的 hilbert 劣化特征熵。依据转子系统不平衡劣化的劣化程度量化区间对 22 组状态所处的劣化状态进行分类,见文献[16],由此得到风电机组 1 传动系统的状态序列为(2 2 2 2 2 2 2 1 3 2 5 2 2 2 2 2 2 5 2 2 2)。

将风电机组 1 传动系统的状态序列分为两部分,以前 15 个状态序列数据作为训练数据,以后 7 个状态序列数据作为预测结果的验证数据。利用马尔可夫链对其运行状态劣化状态进行趋势预测,结果如图 12 所示。

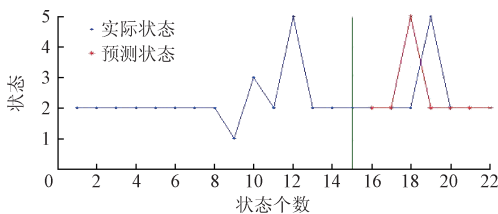


图 12 风电机组传动系统运行状态劣化状态趋势预测结果

Fig. 12 Prediction results of wind turbine drive system operating state deterioration state trend

由图 12 可知,风电机组传动系统大部分状态处于劣化状态 2,即轻度不平衡运行状态;各个劣化状态之间的转移具有跳跃性,如从状态 1 转移到劣化状态 3,从劣化状态 2 转移到劣化状态 5 等;运行状态劣化趋势预测结果可以给出劣化状态的发展趋势,与实际运行状态比较一致。系统运行报警界面如图 13 所示。

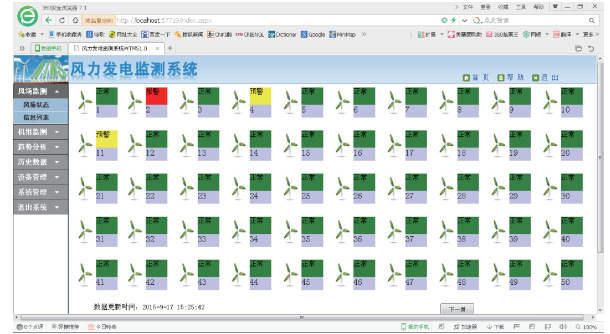


图 13 系统运行报警界面

Fig. 13 System running alarm interface

### 7 结论

构建以风力发电机组群为核心的远程智能检测与诊断平台,详细阐述系统框架设计、数据库设计和人机交互界面设计,结合多种故障检测方法一并构建在风力发电机组群远程监测系统中,实现了风电机组远程智能多信息监测融合与故障预测,现场应用表明,该系统可有效预示风机传动系统的早期故障。

### 参考文献

[ 1 ] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械工程学科发展战略报告(2011 ~ 2020) [ R ]. 北京:科学出版社,2010: 24-47, 107-135.  
National Natural Science Foundation of Engineering and Materials Science Department. Mechanical engineering discipline development strategy report ( 2011 ~ 2020) [ R ]. Beijing: Science Press, 2010: 24-47, 107-135.

[ 2 ] 王国彪,何正嘉,陈雪峰,等. 机械故障诊断基础研究“何去何从” [ J ]. 机械工程学报, 2013, 49 ( 1 ): 63-72.  
WANG G B, HE ZH J, CHEN X F, et al. Basic research on machinery fault diagnosis-what is the prescription [ J ]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49 ( 1 ): 63-72.

[ 3 ] CONG G P, GAO J J, YANG G F, et al. Risk assessment based on fault tree analysis for damaged pipe repair during operation in petrochemical plant [ J ]. Transactions of Tianjin University, 2013, 19 ( 1 ): 70-78.

- [ 4 ] 孙海亮, 訾艳阳, 袁静, 等. 非抽样多小波和 Hilbert-Huang 时频分析在行星减速器早期故障诊断中的应用[J]. 机械工程学报, 2013, 49(3): 56-62.  
SUN H L, ZI Y Y, YUAN J, et al. Undecimated multi wavelet and Hilbert-Huang time-frequency analysis and its application in the incipient fault diagnosis of planetary gearboxes [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(3): 56-62.
- [ 5 ] 王宏超, 陈进, 董广明. 基于最小熵解卷积与稀疏分解的滚动轴承微弱故障特征提取[J]. 机械工程学报, 2013, 49(1): 88-94.  
WANG H C, CHEN J, DONG G M. Fault diagnosis method for rolling bearing's weak fault based On minimum entropy deconvolution and sparse decomposition [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(1): 88-94.
- [ 6 ] 郝研, 王太勇, 万剑, 等. 分形盒维数抗噪研究及其在故障诊断中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(3): 540-545.  
HAO Y, WANG T Y, WAN J, et al. Research on fractal box dimension anti-noise performance and its application in fault diagnosis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(3): 540-545.
- [ 7 ] 褚福磊, 彭志科. 机械故障诊断中的现代信号处理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.  
CHU F L, PENG ZH K. Mechanical Fault Diagnosis of Modern Signal Processing Methods [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [ 8 ] 徐小力, 刘秀丽, 蒋章雷, 等. 基于主观贝叶斯推理的多传感器分布式故障检测融合方法[J]. 机械工程学报, 2015, 51(7): 91-98.  
XU X L, LIU X L, JIANG Z L, et al. Multi-sensor distributed fault detection method based on subjective bayesian reasoning [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(7): 91-98.
- [ 9 ] 徐小力, 蒋章雷, 任彬, 等. 基于 Birgé-Massart 阈值的烟气发电机组状态特征弱信息提取方法[J]. 机械工程学报, 2012, 48(12): 7-12.  
XU X L, JIANG Z L, REN B. Extract method of flue gas generator set state feature weak information based on Birgé-Massart threshold [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(12): 7-12.
- [ 10 ] 徐小力, 王红军. 大型旋转机械运行状态趋势预测[M]. 北京: 科学出版社, 2011.  
XU X L, WANG H J. Large Rotating Machinery Running Trend Forecasting [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [ 11 ] XU X L, JIANG Z L, WANG H J, et al. Application of the state deterioration evolution based on Bi-spectrum in wind turbine [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2014, 228(11): 1958-1967.
- [ 12 ] XU X L, CHEN T, MINAMI M. Intelligent fault prediction system based on internet of things [J]. Computers and Mathematics with Applications, 2012, 64(5): 833-839.
- [ 13 ] 成林俞, 戴瑜兴, 熊书华, 等. 直流系统在线绝缘监测的研究及其实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(6): 860-865.  
CHENG L Y, DAI Y X, XIONG SH H, et al. Online insulation supervising for DC system and its realization[J]. Journal of Electronic Measurement And Instrumentation, 2015, 29(6): 860-865.
- [ 14 ] 纳杰斯. 被动声呐监测系统中目标跟踪算法的研究[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(1): 32-35.  
NA J S. Research of continuous target tracking algorithm in passive sonar monitoring system [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(1): 32-35.
- [ 15 ] 赵宏, 苏鑫, 黄函宇. 基于虚拟仪器的清管器内检地图标记测试系统[J]. 电子测量技术, 2015, 38(1): 69-73.  
ZHAO H, SU X, HUANG H Y. Nlap markers test system hosed on virtual instrument for picking operation [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(1): 69-73.
- [ 16 ] 刘秀丽. 风电机组传动系统运行状态趋势预测方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.  
LIU X L. Research on trend prediction method of running state for wind turbine transmission system[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.

### 作者简介



刘秀丽, 北京信息科技大学机电测控教育部重点实验室助理研究员、博士, 主要研究方向为机电系统测控技术。  
E-mail: liuxiulilw@163.com

Liu Xiuli, Ph. D., research assistant of Key Laboratory of Modern Measurement & Control Technology of Ministry of Education, Beijing Information Science and Technology University. The main research direction is mechanical and electrical system measurement and control technology.



徐小力(通讯作者), 北京信息科技大学教授、工学博士、博士生导师, 主要研究方向为机电系统测控技术。  
E-mail: xuxiaoli@bistu.edu.cn

Xu Xiaoli (Corresponding author), Ph. D., professor and Ph. D. supervisor in Beijing Information and Science Technology University. His research area includes measurement & control technology of mechanical and electrical system.