

国家自然科学基金 (51505202) 资助

江苏省基础研究计划项目 (BK20140238) 资助

江苏省高校自然科学研究面上项目 (14KJB460014) 资助

# 风力发电机组 振动监测与故障诊断技术

■ 刘文艺 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

# 风力发电机组振动监测与故障诊断技术

刘文艺 著

中国矿业大学出版社

## 内 容 简 介

本书介绍了大型风力发电机组相关部件的振动监测与故障诊断技术。本书在第1章综述了近年来风电机组故障诊断领域的相关方法和理论;第2章分析了风电机组传动系统叶轮、齿轮箱、发电机等机构及其常见振动故障特点,确定了风电机组传动系统监测点的位置。第3章在风电机组振动信号预处理方面,介绍了一种交叉验证优化 Morlet 小波参数的消噪方法。第4章、第5章和第6章针对风电机组振动信号的周期非平稳性、非高斯非线性特性,介绍了基于自项窗抑制魏格纳分布交叉项的故障诊断方法、模糊高阶谱故障诊断方法和基于 ILMD 与 SVM 的故障诊断方法。第7章研究了风电机组振动监测及故障诊断系统及其软件的设计与实现,采用面向对象的编程技术进行该监测系统的软件开发。本书可作为普通高等院校相关专业本科生和研究生的教材,适合于风力发电机组相关方向科研工作者参考,也适合风力发电技术领域的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

风力发电机组振动监测与故障诊断技术/刘文艺著

. — 徐州:中国矿业大学出版社,2016.1

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2967 - 0

I. ①风… II. ①刘… III. ①风力发电机—发电机组  
—监测②风力发电机—发电机组—故障诊断 IV.

①TM315

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 298623 号

书 名 风力发电机组振动监测与故障诊断技术  
著 者 刘文艺  
责任编辑 周 红  
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司  
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)  
营销热线 (0516)83885307 83884995  
出版服务 (0516)83885767 83884920  
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com  
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司  
开 本 787×960 1/16 印张 11.25 字数 202 千字  
版次印次 2016 年 1 月第 1 版 2016 年 1 月第 1 次印刷  
定 价 38.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

## 前 言

风力发电是世界上公认的清洁能源技术之一。在过去的十年内,我国风力发电已成为增长速度最快的可再生能源,逐渐在电网中占据了较大的比重,在世界风电行业也占据着重要的地位。

尽管风力发电机组(下文简称“风电机组”)也属于旋转机械,但相对于其他类型的旋转机械,大容量、高质量、超尺寸的风机在运行过程中又有其特殊性。大部分风力发电机组一般安装在风力资源丰富的偏远空旷地带,直接暴露在野外,工作环境恶劣,直接受高温、严寒、暴风、雨雪、雷电等极端天气状况的影响。风电机组的输入动力是自然界的风,风速的特点是复杂多变。无规律的变方向、变载荷风力作用以及强阵风冲击造成了风电机组内部工作的变工况特点。国内风电机组的设计标准、生产条件、测试标准、运行环境均和国外不同,部分直接引用国外生产线的产品或部件更是缺乏严格测试和认证,这就容易引起风电场的风机故障问题。这些风机故障问题不仅影响机组的安全稳定运行,还直接影响电网的安全和风电企业的利益,对风机厂商的信誉和市场营销也是极大的考验。另一方面,风电机组的维护操作相对其他旋转机械来说比较困难。大型风机容纳主要部件的机舱距离地面有几十米甚至上百米的距离,使得进入机舱维护十分不便。并且有的风机维修和护理需要起重机、升降机等设备,这使得风机的操作和维修费用相对较高。

因而,研究风电机组的故障诊断与智能维护技术,不仅可以维护风电机组的安全稳定运行、保障风电场的正常运作、维持电网供电系统的稳定,

更可以降低风机故障维修时间、提升风机厂家的信誉、降低风机设计维护成本,这在整个风机行业都有着重要的理论意义和实践价值。

本书在研究风电机组典型故障机理的基础上,分析了以振动监测为代表的故障诊断方法,研究了风电机组振动信号的特点,探讨了针对性的振动信号微弱特征提取方法,介绍了几种风电机组典型故障诊断方法和智能维护技术。本书主要内容如下:

第1章,介绍了风电机组振动监测和故障诊断的研究目的及意义,综述了国内外风电机组振动监测与故障诊断技术的发展现状。

第2章,分析了风电机组的主要结构及其传动系统各部件振动故障特点。确定了进行风电机组振动监测的对象,为后续的振动监测提供了理论基础和指导。

第3章,在风电机组振动信号的预处理方面,采用基于小波变换的消噪方法对风电机组状态振动信号进行消噪处理。首先根据小波消噪提出了一种自适应阈值消噪方法,进而提出了一种基于交叉验证法优化 Morlet 小波参数的消噪方法。这两种方法都可以很好地降低信号中的噪声干扰,具有良好的消噪效果及瞬态信息的提取能力,为后续的各种故障特征提取及故障诊断提供了有力的保障。

第4章,针对风电机组振动信号的周期非平稳性特点,采用时频分辨率及能量聚集性较高的 WVD 方法对消噪后的振动信号进行特征提取及故障诊断的研究。在分析 WVD 自项和交叉项关系的基础上,提出了一种基于自项窗抑制 WVD 交叉项的故障诊断方法,可以有效地消除 WVD 交叉项的干扰,在风电机组振动信号特征提取及故障诊断中发挥了有效的作用。

第5章,针对风电机组振动信号的非高斯非线性特点,提出了一种模糊高阶谱故障诊断方法。该方法利用双谱对同故障分析结果的类似性和不同故障分析结果的不同类别性,结合了模糊聚类方法,对不同故障进行有效地分类。通过实验分析,验证了该方法可以较好地对不同故障类型进行有效地区分。

第6章,针对风电机组振动信号的调制非平稳信号特点,提出了一种基于ILMD和SVM的故障诊断方法。该方法对LMD的端点效应问题进行研究,提出了基于内部积分运算的ILMD方法,并融合SVM对风电机组故障诊断特性进行识别。

第7章,初步研究了风电机组振动监测与故障诊断系统及其软件的设计与实现应用。采用面向对象的编程技术进行该监测系统的开发,初步开发了一套用于风电机组振动监测与故障诊断的分析系统,为故障特征的提取提供了有效的帮助。

本书是作者近年来研究风电机组故障诊断的成果积累,前期研究工作得到了国家高技术研究发展计划“风力发电机组故障诊断与智能维护关键技术研究”(项目编号:863计划2009AA04Z411)资助,主要是重庆大学攻读博士期间的科研成果,在此我要感谢我的博士生导师汤宝平教授。

本书的出版受到国家自然科学基金(项目编号:51505202)、江苏省基础研究计划项目(项目编号:BK20140238)、江苏省高校自然科学研究面上项目(项目编号:14KJB460014)和徐州市科技计划项目(项目编号:KC15SH054)资助。

因作者科研水平有限,本书难免存在学术争议之处,甚至科研学术观点不当之处,还请各位专家、学者不吝赐教,不胜感激!



2016年1月于江苏徐州

# 目 录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 1 绪论 .....               | 1  |
| 1.1 风电机组故障诊断基础 .....     | 1  |
| 1.1.1 风电机组故障诊断的重要性 ..... | 1  |
| 1.1.2 风电机组常见故障 .....     | 2  |
| 1.1.3 风电机组振动监测方法 .....   | 4  |
| 1.2 风电机组故障诊断技术的发展 .....  | 6  |
| 1.2.1 干扰噪声的消除 .....      | 7  |
| 1.2.2 特征提取技术 .....       | 7  |
| 1.2.3 故障诊断技术 .....       | 9  |
| 1.2.4 振动监测与故障诊断系统 .....  | 11 |
| 2 风电机组传动系统常见故障 .....     | 12 |
| 2.1 传动系统主要结构 .....       | 12 |
| 2.1.1 风轮 .....           | 13 |
| 2.1.2 齿轮箱 .....          | 14 |
| 2.1.3 发电机 .....          | 15 |
| 2.1.4 机械刹车系统 .....       | 15 |
| 2.1.5 风电机组轴承 .....       | 16 |
| 2.2 齿轮箱特征频率计算 .....      | 16 |
| 2.2.1 第一级行星轮系 .....      | 17 |
| 2.2.2 第二级行星轮系 .....      | 19 |
| 2.2.3 第三级定轴传动 .....      | 19 |

|       |                          |    |
|-------|--------------------------|----|
| 2.3   | 齿轮典型故障分析                 | 20 |
| 2.3.1 | 齿形误差                     | 21 |
| 2.3.2 | 齿面磨损                     | 21 |
| 2.3.3 | 断齿故障                     | 22 |
| 2.3.4 | 齿面点蚀                     | 22 |
| 2.3.5 | 齿面胶合                     | 22 |
| 2.4   | 轴承常见故障分析                 | 23 |
| 2.5   | 低速和高速轴故障分析               | 25 |
| 2.5.1 | 轴不平衡                     | 25 |
| 2.5.2 | 轴不对中                     | 25 |
| 2.5.3 | 轴弯曲                      | 26 |
| 2.6   | 监测测点的选取                  | 26 |
| 2.6.1 | 监测点选取原则                  | 26 |
| 2.6.2 | 监测点选取位置                  | 28 |
| 2.7   | 小结                       | 29 |
| 3     | 风电机组振动信号的消噪方法            | 30 |
| 3.1   | 小波消噪基础理论                 | 30 |
| 3.1.1 | 小波理论基础                   | 30 |
| 3.1.2 | 小波消噪基本原理                 | 34 |
| 3.1.3 | 传统小波消噪方法的不足              | 37 |
| 3.2   | 自适应阈值小波消噪方法              | 38 |
| 3.2.1 | 自适应阈值的确定                 | 38 |
| 3.2.2 | 算法的实现流程                  | 39 |
| 3.2.3 | 实验验证                     | 40 |
| 3.3   | 基于交叉验证法优化 Morlet 参数的消噪方法 | 45 |
| 3.3.1 | Morlet 小波及其改进            | 45 |
| 3.3.2 | 交叉验证法优化参数                | 47 |
| 3.3.3 | 实验验证                     | 51 |
| 3.4   | 小结                       | 55 |



|       |                       |    |
|-------|-----------------------|----|
| 4     | 风电机组振动故障的自项窗 WVD 故障诊断 | 56 |
| 4.1   | WVD 及其交叉项问题           | 56 |
| 4.1.1 | WVD 基础知识              | 56 |
| 4.1.2 | 交叉项的抑制问题              | 60 |
| 4.2   | 基于阈值 ASTFT-WVD 的故障诊断  | 62 |
| 4.2.1 | 阈值 ASTFT-WVD 的提出      | 62 |
| 4.2.2 | 实验验证                  | 64 |
| 4.3   | SPWVD 谱抑制交叉项的故障诊断     | 67 |
| 4.3.1 | SPWVD 谱方法的提出          | 67 |
| 4.3.2 | 实验验证                  | 68 |
| 4.4   | 基于自项窗 WVD 的故障诊断       | 72 |
| 4.4.1 | 自项窗 WVD 方法            | 72 |
| 4.4.2 | 实验验证                  | 73 |
| 4.5   | 三种方法的对比               | 77 |
| 4.6   | 小结                    | 79 |
| 5     | 风电机组振动故障的模糊高阶谱故障诊断    | 80 |
| 5.1   | 高阶谱基本理论               | 80 |
| 5.1.1 | 高阶矩及高阶累积量的定义          | 80 |
| 5.1.2 | 高阶矩谱和高阶累积谱的定义         | 82 |
| 5.1.3 | 双谱直接估计算法              | 84 |
| 5.2   | 阈值化双谱特征提取             | 85 |
| 5.2.1 | 双谱特征分析                | 85 |
| 5.2.2 | 阈值化处理过程               | 89 |
| 5.3   | 基于双谱特征的模糊故障诊断方法       | 90 |
| 5.3.1 | 模式识别基本理论              | 90 |
| 5.3.2 | 目标模板的构造               | 92 |
| 5.3.3 | 最近邻模板分类器构造            | 93 |
| 5.4   | 实例分析                  | 94 |
| 5.5   | 小结                    | 99 |

|       |                         |     |
|-------|-------------------------|-----|
| 6     | 基于 ILMD 和 SVM 的风电机组故障诊断 | 100 |
| 6.1   | LMD 及其端点效应问题            | 100 |
| 6.1.1 | LMD 基本算法流程              | 100 |
| 6.1.2 | LMD 端点效应                | 102 |
| 6.2   | ILMD 方法的提出              | 104 |
| 6.2.1 | ILMD 算法基本原理             | 104 |
| 6.2.2 | 仿真信号分析                  | 107 |
| 6.2.3 | 轴承故障特征提取                | 115 |
| 6.3   | 基于 ILMD 和 SVM 的故障诊断     | 120 |
| 6.3.1 | SVM 输入参数获取              | 120 |
| 6.3.2 | 算法流程                    | 120 |
| 6.3.3 | 轴承故障分类                  | 121 |
| 6.4   | 小结                      | 124 |
| 7     | 风电机组振动监测与故障诊断系统设计       | 126 |
| 7.1   | 系统总体设计                  | 126 |
| 7.1.1 | 需求分析                    | 126 |
| 7.1.2 | 总体设计                    | 128 |
| 7.2   | 传感器的选择及安装               | 130 |
| 7.2.1 | 传感器的选择                  | 130 |
| 7.2.2 | 传感器的安装                  | 131 |
| 7.3   | 采集系统的确定                 | 134 |
| 7.4   | 系统软件设计                  | 136 |
| 7.4.1 | 辅助功能模块                  | 138 |
| 7.4.2 | 信号预处理模块                 | 139 |
| 7.4.3 | 特征提取模块                  | 141 |
| 7.4.4 | 故障诊断模块                  | 142 |
| 7.5   | 应用实例                    | 145 |
| 7.6   | 小结                      | 149 |
|       | 参考文献                    | 150 |

# 1 绪 论

## 1.1 风电机组故障诊断基础

风能属于一种可再生的洁净能源,储存量丰富,是人类最早利用的能源之一。随着风能技术的快速发展和日趋完善,风力发电机组(以下简称风电机组、风机)的可靠性越来越高,单机容量不断增大,装机量也逐年增加。世界范围的风机能源装机量已经达到 369 GW,2014 年新增装机量超过了 51 GW。近几年世界很多国家都在制定大规模发展风电的计划,风机的设计制造技术已日臻完善。随着投产的风机数量不断增加,发展相关的第三产业即风机运行维护、监测、故障诊断等将成为行业新的增长点。

### 1.1.1 风电机组故障诊断的重要性

风电机组通常具有很高的实用性,但这并不是因为其质量稳定,而是因为经常进行维护。实际上,风机的工作环境恶劣,风速有很高的不稳定性,而暴雨、闪电、冰雪等恶劣天气又严重考验着风机的运行质量。在交变负载的作用下,风机叶片等更容易出现疲劳损伤,塔架系统更容易损坏。实际上所有的机械部件都受到损伤的影响,大多数风电机组的子系统都可能在操作时失效,包括转子和叶片、开关控制系统、齿轮箱和轴承、偏航系统、发电机、电力控制系统和刹车片等,再加上风机的独特电能转换系统,其损坏较其他旋转机械更为严重。但是风电机组是一种相对不太容易接近的结构,因为它安装在较偏远的区域,并且机舱本身离地面也有几十米、

甚至上百米的高度,上到机舱很困难。另外,风机的维修和护理需要额外的起重机、升降机等设备,国外甚至有通过直升机进入到机舱的方式,这又产生了多余的费用。这些因素使得风机的操作、维修费用相对较高,对于一个设计寿命 20 年的风机而言,操作、维修和部件费用会占到风机总收入的 10%~15%。根据通用电气能源的报告,一项 5 000 美元的轴承更换费用可以轻易地变成 25 000 美元的工程,这项工程就包括了起重机、服务人员、齿轮箱更换、发电机重新绕组,更不用说停机所带来的能量损失。还有不少在海上的恶劣环境中的风电机组,其操作和维修费用更占到风机总收入的 20%~25%。因此,这些因素使得风机的叶片、齿轮箱、发电机等主要部件的维护和保养显得更加重要。风电机组的状态监测和故障诊断在这种情况下具有重要的意义。

状态监测是降低风电机组维修和操作成本的最有效方式,可以监测极端工作环境下的风机状况,比如结冰并粘到叶片上引起的叶片旋转不平衡振荡。通过监测进而采取合适的控制措施可以防止灾害的发生,进而可以有效地降低维修费用和停机时间,避免不确知的突然故障,降低维修成本。并且通过在线监测技术,可以改进对部件的监测,基于部件状况的维修也会得到发展。

### 1.1.2 风电机组常见故障

国内外不少研究者得出,风电机组中的重要故障是由机械部件的振动引起的故障,例如不平衡、磨损、疲劳损伤、断裂等。如在德国 250 MW 风电场一项科学测量和评估计划(Scientific Measurement and Evaluation Program, SMEP)中,通过对 1992 年到 1993 年间总共 5500 个(占风机总数约 25%)维修风机数据进行分析,结果表明风机的故障主要在于构件松动、失效和疲劳损伤。瑞士风能机构经测试发现,多数的构件失效都和机械部件的问题有关,同时伴随着传感器的问题、叶片机组的问题等。图 1-1 是通过 2000 年至 2004 年的统计数据得出的结果,表明风电机组机械部件引起的故障占据着很大的比例。

另一项由丹麦和德国的研究机构得出的结论表明了类似的趋势,导致高故障率的是电气控制部分和系统组件部分,比如偏航系统、电气系统、机

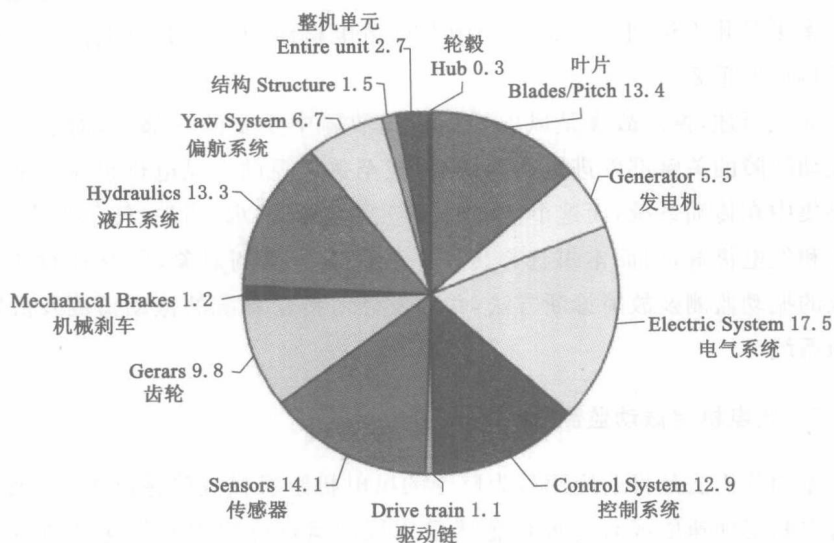


图 1-1 瑞士某风场部件损坏百分比示意图

械系统、开关控制系统等,还包括机械的子系统,比如齿轮箱系统。研究者还使用统计可靠性分析技术对报告的风机故障和论证得出,主要的故障来源在于传动系统,这包括主轴和轴承、齿轮箱、转子刹车片、叶片和发电机。如果风机设置在海上,环境将比陆地上更恶劣,风机的故障更明显。这些故障同时会导致平均维修时间和组件维修费用增加,在状态监测中传动系统是值得主要关注的部分。对于风电机组而言,传动系统的故障主要在于齿轮箱和叶片,并且故障率占据很大的比例。对于变速单元,传动链的故障率大幅度下降,但同时控制和电子单元的故障率增加了,比如开关机构、传感器、电子和电气组件。在所有的行星齿轮箱轴承中,行星轮轴承、中间的轴定位轴承、高速定位轴承都倾向于以较高的故障率损坏,而行星子轴承、空轴的轴承、非定位轴承是最不太容易损坏的。而对于齿轮箱的故障机理和负载分布的影响等问题,需要进一步深入研究。

而在我国,由于国内缺乏大型风电机组的研发能力,大型风电机组的生产主要依靠国外相关技术或者完全依靠进口,而国外风电机组生产标准和国内相关条件不一致,这就造成了风电机组对本地环境的不适应,风场

中的风电机组齿轮箱损坏率更是高达 40%~50%，极个别品牌机组齿轮箱更换率更是几乎达到 100%，在国内开展风电机组的运行状态监测技术更是显得愈发重要。

综上所述，振动故障是风电机组常见故障中重要的一部分，对引起这些振动故障的关键部件进行状态监测，是至关重要的。风电机组振动故障主要集中在传动系统，而这个传动系统包括主轴、轴承、齿轮、转子刹车片、叶片和发电机等，因而本书选择传动系统为重点监测对象，研究针对传动系统的振动监测及故障诊断方法，并开发针对传动系统的振动监测及故障诊断系统。

### 1.1.3 风电机组振动监测方法

振动分析法是目前应用最为广泛的风电机组机械故障诊断方法，该方法首先利用加速度或者速度传感器采集机械运行过程中的加速度或者速度振动信号，然后利用合适的信号处理方法将故障特征提取出来，最后进行故障的模式识别，从而达到故障诊断的目的。

但是由于风电机组复杂的内部结构及各部件运行环境的差异，采集到的信号往往都是非平稳信号且复杂程度各异，因此针对这种信号目前主要采用的是时频分析法，主要包括有：经验模式分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)、聚类经验模式分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)、Wigner-Ville 分布、小波及小波包分析、ANSYS 动态分析法和基于振动分析的故障诊断方法等。

目前风电机组一般自带有 SCADA(Supervisor Control And Data Acquisition, 监测控制和数据获取)系统，该系统为提高风电场运行的稳定性和可靠性提供了强有力的技术平台和支撑。图 1-2 是某风电场 SCADA 系统结构示意图。

该 SCADA 系统通过一个远程接口单元(RIU)，与现场的每台风电机组、气象站和变电站相连，RIU 将直接和风电机组控制器通讯，为网络设备和中央计算机提供通用接口。SCADA 系统可以对风电机组的运行实现基本的监测，具有报警及报告等功能，可以生成风电场事件报告。但是对于 SCADA 系统而言，每一个品牌的风电机组自带的 SCADA 系统功能是不

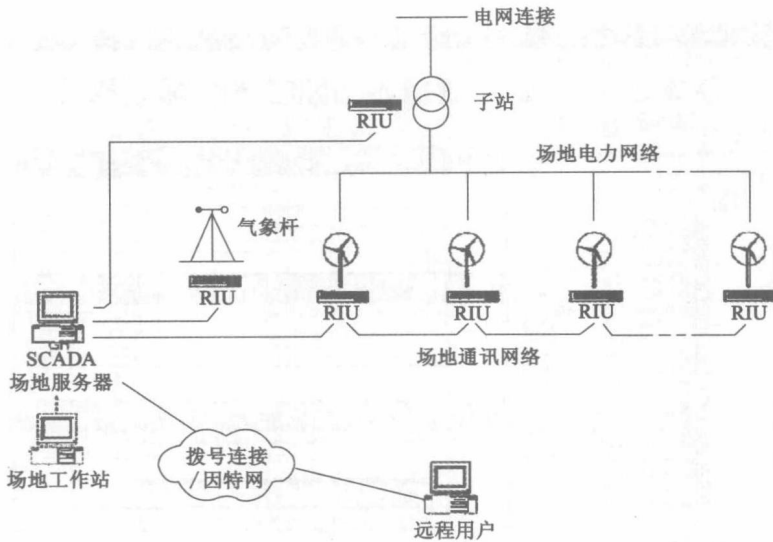


图 1-2 某风电场 SCADA 系统结构示意图

同的,有的公司受条件的限制,系统数据处理速度慢,存储量小,自动化程度较低。并且 SCADA 系统监测的量是有限的,多以电流、电压、功率等信号为主,对关键部位的振动监测则涉及甚少,缺乏振动监测与故障诊断部分。这使得风电机组自带的 SCADA 系统很难保证完全对风电机组的关键部件进行有效的状态监测和维护,在这个背景下,有公司开始开发独立的针对风电机组特定故障的监测系统。

目前关于风电机组的振动监测较成熟的产品有 SKF 公司的 WindCon 系统,该系统以风电机组传动系统为监测对象,可以监测低速轴、高速轴等部件的运行,并具有趋势预测、报警、振动监测信号的基本分析等功能。图 1-3 是该系统主界面示意图。

该系统可以实现振动信号的分析及趋势预测,并具有一定的预警和报警功能,但是在精确地确定故障类型方面却存在一定困难,缺乏精确故障诊断功能。同时,该系统对振动信号的分析功能相对较弱,仅包括时域分析、频域分析,对于分析风电机组非平稳振动信号比较有效的时频分析方法,则仅有一个谱图分析方法,这使得对故障的诊断实现起来有所困难,特别是精密诊断功能显得较弱。

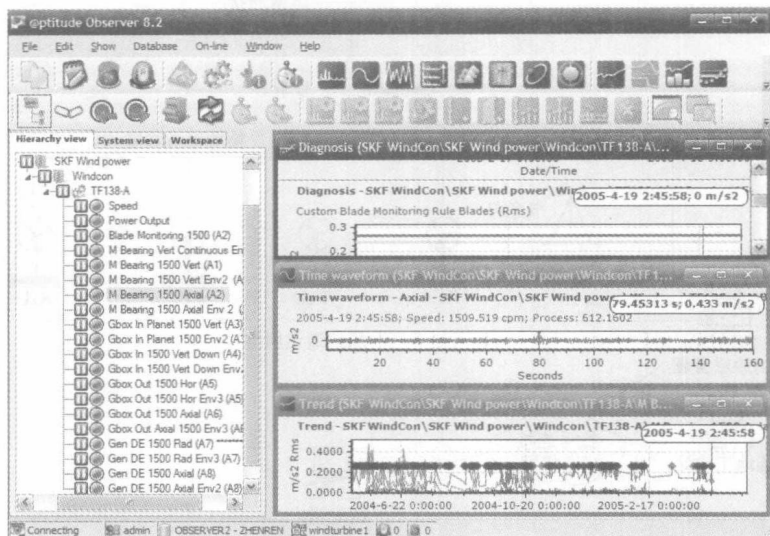


图 1-3 WindCon 系统主界面

鉴于以上分析,本书以风电机组叶片、齿轮箱、发电机传动系统为关键监测对象,并针对风电机组振动信号的特点引入时频分析方法对其进行振动监测与故障诊断研究。

## 1.2 风电机组故障诊断技术的发展

近年来关于风电机组振动监测与故障诊断技术的研究逐渐深入,越来越多的监测和故障诊断技术、算法已经应用到了风电机组的监测中。而振动监测是最常见的监测方式,也是很有效和直接便利的监测方式,特别是对于旋转机械。一般的旋转设备使用简单的信号分析就可以进行状态监测,但对于动力学分析更复杂的风电机组来说,相关的研究经验相对不多。但在其他领域的相关技术,比如电气能源生产、海运推动、航空领域或其他工业领域应用的技术都可以推广到风机的状态监测中来。

风机振动监测主要针对齿轮箱为代表的传动系统,但是风机机舱的自然紧凑的结构意味着传感器的安装是受限制的。因此在振动信号的采集



中,要采用多种有效的手段来获取和传输振动信号,常常根据测点的对象不同而选择不同的传感器,比如在低速轴位置选择低速加速度传感器,在高速轴部分选择普通的加速度传感器。也有研究者在风机传动链的故障检测中使用扭矩测量方法。对于小型风机的叶片,也有研究者使用压电效应传感器,通过应变片测试应力应变等信息。

### 1.2.1 干扰噪声的消除

在风电机组振动信号的消噪方法方面,查询到的相关外文文献较少。其原因主要是因为关于风电机组的振动监测消噪方法研究相对较少,风电机组振动信号多是在实验室等噪声较小的环境下获得的,因而没有必要进行专门的消噪处理。而国内的相关风电机组振动监测研究则多是跟踪国外相关技术,刚刚起步。鉴于风电机组振动信号的特殊性,特别是实际的风机工作环境较为恶劣,噪声等干扰较为严重,这些严重干扰了对风机有用信号的提取和分析。并且在故障发生的早期,故障信号特征成分能量较小,干扰信息的时域幅值高于有用的信号特征成分时域幅值,且干扰信息的频谱与特征信号的频谱相互重叠。在这种情况下,传统的时频分析方法在时频域都难以将噪声干扰和特征成分区分开,显得效果不足,因而需要对含噪信号进行有效的去噪处理。而普通的低通、带通等滤波消噪方法仅仅是滤除一部分频率信息,对于噪声和有用信号特征混叠的信号,则很难进行有效的噪声滤除。

多数研究者将较为成熟的小波消噪等方法引入到风电机组的振动信号消噪中。小波变换将信号分解到尺度域,且具有良好的时频局部化能力,广泛应用于信号消噪处理中。但是,传统的小波消噪方法存在小波基和分解层数选取和确定、阈值方法确定等技术难点,许多研究者都是通过大量的实验对比来确定最佳的小波基和分解层数,这样浪费了大量的计算时间和精力。针对这种情况,本书研究基于小波变换的消噪方法,并针对小波消噪的自身不足进行改进,以适应风电机组振动信号的消噪过程。

### 1.2.2 特征提取技术

国内外关于风电机组特征提取技术的相关文献相对较多,对风电机组