

风电运行数据 评估技术

李媛 赵丽军 邢作霞 等著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

风电运行数据 评估技术

李媛 赵丽军 邢作霞 等著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书立足于风电机组运行评估和故障诊断，主要内容包括概述、风电机组概述、基于功率曲线的风电机组运行评估、偏航系统状态评估与异常感知、变桨距系统故障变量识别与诊断、风轮不平衡运行性能分析。

本书可作为从事风力发电工作的各类技术人员的学习、培训教材，也可作为高等院校师生和相关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目（C I P）数据

风电运行数据评估技术 / 李媛等著. — 北京：中国水利水电出版社，2020.9
ISBN 978-7-5170-8888-2

I. ①风… II. ①李… III. ①风力发电机—发电机组—运行—数据—评估 IV. ①TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第180397号

| | |
|------|--|
| 书 名 | 风电运行数据评估技术 FENGDIAN YUNXING SHUJU PINGGU JISHU |
| 作 者 | 李媛 赵丽军 邢作霞 等著 |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心) |
| 经 售 | 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点 |
| 排 版 | 中国水利水电出版社微机排版中心 |
| 印 刷 | 清淤永业(天津)印刷有限公司 |
| 规 格 | 184mm×260mm 16开本 10.75印张 223千字 |
| 版 次 | 2020年9月第1版 2020年9月第1次印刷 |
| 印 数 | 0001—2500册 |
| 定 价 | 58.00元 |

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

《风电运行数据评估技术》 编 委 会

主 编 李 媛 赵丽军 邢作霞

副主编 刘 洋 陈 雷 郑 伟 井艳军

参 编 郭洪涛 蒋 靖 郭 涛 梁 国 杨 轶
陈明阳 张 璠 杨天玥 徐 健 付启彤
张鹏飞 姜宏业 张 磊 李进友

前言

FOREWORD

随着风电机组大型化和海上风电场的发展，实施智能运维、故障预警、优化机组全寿命周期运行管理已成为发展趋势。国内外学者逐渐将研究热点集中于风电机组运行评估与故障诊断等，以适应风电机组运行高度智能化的未来发展需求。现代化的智能管理与数据信息平台已积累大量风电机组运行数据，单机运行在线状态检测系统和风电场运行数据监控平台都为实施运行评估和故障诊断提供了基础条件。风电机组运行评估和故障诊断的研究可方便实施预测性维护，节约运维成本，有效提升发电量，具有前瞻性和潜在科学价值。

本书立足于风电机组运行评估和故障诊断，以提高风电机组的可靠性、确保风电机组安全稳定运行、降低风电场运行维护成本、提高风电场的现场管理水平为目的，为风电机组的降载优化运行、提升发电量、自适应调节、容错控制、预测性运维等奠定理论基础，为新能源开发者、电网运行者、从事风电技术研究的广大科技工作者提供理论依据和工程建设帮助。

本书内容主要分为6章，从风电机组运行特性、工作原理、功率曲线评估、偏航系统运行评估、变桨距系统故障以及风轮不平衡等方面进行撰写，大致介绍如下：

第1章 概述。本章介绍了风电机组运行评估和故障诊断技术的研究现状、现有的运行评估和故障诊断方法及其未来发展趋势。

第2章 风电机组概述。本章介绍了风电机组的分类、基本组成、空气动力学原理；以及风电机组SCADA系统，包括SCADA系统的功能、监控变量以及监控性能；分析了风电机组的运行特性与工作原理。

第3章 基于功率曲线的风电机组运行评估。本章阐述了风速、空气密度、地理条件、叶片污垢和冰载对功率曲线的影响。通过功率曲线的采集与处理，介绍功率曲线的建模过程；通过状态监测与评估，进行转矩增益性能优化评估，判断风电机组控制性能的好坏。

第4章 偏航系统状态评估与异常感知。本章介绍了偏航误差的产生原因，及其对风电机组气动特性和运行特性的影响。阐述了偏航系统的异常感知方

法，给出了偏航系统运行状态评估和异常检测的案例。

第5章 变桨距系统故障变量识别与诊断。本章以风电机组变桨距系统故障诊断最优特征变量集为基础，进行了变桨距系统故障检测与辨识，实现了变桨距系统的故障诊断。应用风电机组 SCADA 系统记录的机组运行数据和故障信息开展了仿真研究，验证了风电机组变桨距系统故障诊断方法的有效性。

第6章 风轮不平衡运行性能分析。本章阐述了风轮不平衡特性，针对风轮不平衡状态下风电机组的气动模型，建立风电机组仿真模型，并仿真分析了质量不平衡和气动不平衡对风电机组运行性能的影响。

本书在编写过程中，得到沈阳兰昊新能源科技有限公司、国家电投新能源有限公司等的大力支持，向他们表示感谢。书中参考了众多文献，向其作者一并表示感谢。

限于作者能力和经验有限，书中难免有不足和待改进之处，恳请读者批评指正。

作者

2020.5

目 录

CONTENTS

前言

| | |
|------------------------------------|----|
| 第 1 章 概述 | 1 |
| 1.1 风电运行评估的意义 | 1 |
| 1.2 风电运行评估发展综述 | 3 |
| 1.3 故障诊断发展综述 | 5 |
| 1.4 小结 | 12 |
| 第 2 章 风电机组概述 | 13 |
| 2.1 风电机组的分类 | 13 |
| 2.2 风电机组的工作原理 | 15 |
| 2.3 风电机组数据采集与监控 | 21 |
| 2.4 小结 | 23 |
| 第 3 章 基于功率曲线的风电机组运行评估 | 24 |
| 3.1 风速对功率曲线的影响 | 24 |
| 3.2 功率曲线的其他影响因素 | 26 |
| 3.3 功率曲线数据的采集与处理 | 31 |
| 3.4 功率曲线的建立 | 45 |
| 3.5 状态监测与评估 | 50 |
| 3.6 转矩增益性能优化运行评估 | 62 |
| 3.7 小结 | 72 |
| 第 4 章 偏航系统状态评估与异常感知 | 73 |
| 4.1 偏航参数的测量 | 73 |
| 4.2 偏航异常因素分析 | 75 |
| 4.3 偏航误差对风电机组的影响分析 | 77 |
| 4.4 偏航系统运行状态评估 | 83 |
| 4.5 偏航系统的异常感知方法 | 86 |
| 4.6 案例分析 | 90 |
| 4.7 小结 | 93 |

| | |
|-----------------------------------|-----|
| 第 5 章 变桨距系统故障变量识别与诊断 | 95 |
| 5.1 变桨距系统基本组成 | 95 |
| 5.2 变桨距系统的工作原理 | 96 |
| 5.3 变桨距系统的故障分类 | 97 |
| 5.4 变桨距系统的故障特征变量 | 99 |
| 5.5 变桨距系统故障诊断 | 106 |
| 5.6 案例分析 | 118 |
| 5.7 小结 | 126 |
| 第 6 章 风轮不平衡运行性能分析 | 127 |
| 6.1 风轮不平衡特性 | 128 |
| 6.2 风轮不平衡状态下风电机组的气动模型 | 131 |
| 6.3 基于 Bladed 的风电机组模型仿真参数设置 | 139 |
| 6.4 案例分析 | 145 |
| 6.5 小结 | 161 |
| 参考文献 | 162 |

第 1 章

概 述

1.1 风电运行评估的意义

全球能源日益紧缺，风力发电作为一种清洁能源在国内外得到了快速的发展。目前，国内在建、已投入运行的风电场近 30 个，国家制定的 2020 年风力发电装机容量规划目标是 2000 万~3000 万 kW。我国近期大量装备的以兆瓦级风电机组为主，目前广泛运行的风电机组单机容量多为 1.5~3MW。海上风电的发展方向是单机容量 3~10MW 的风电机组，以满足我国海上风力发电的需要。但是对兆瓦级风电机组的故障分析和诊断目前才刚刚起步。随着我国风电事业的发展，对兆瓦级风电机组的故障分析和诊断将会有很大的市场需求。

随着风电机组大型化和海上风电的发展，实施智能运维、故障预警、优化机组全寿命周期运行管理已成为发展趋势。国内外学者逐渐将研究热点集中于风电机组运行评估与故障诊断等，以适应风电机组运行高度智能化的未来发展需求。现代化的智能管理与数据信息平台已积累大量风电机组运行数据，单机运行在线状态检测系统和风电场运行数据监控平台都为实施故障诊断和运行评估提供了基础条件。风电机组运行评估和故障诊断，可方便实施预测性维护，节约运维成本，有效提升发电量。

风力发电系统在实际安装和运行中已出现了大量的故障，影响了风电机组的运行。据统计，国内某电力公司的 300 多台风电机组，由于各种故障实际能够运行的只有 1/3，并且国外很多风电公司在风电场的风电机组安装运行初期，也出现了大量的故障，严重影响了设备的运行效率。如何对设备的运行状态进行评估并及时发现故障，保证设备安全、高效、可靠地运转，成为亟须解决的重要问题。故障诊断和风电运行健康评估技术为提高设备运行的安全性和可靠性提供了一条有效的途径。该研究方向符合国家关于加强清洁能源研究开发的中长期规划，也是风电领域影响电网安全

运行的关键技术之一。

风力发电行业的快速增长导致了风电机组的运行维护费用持续增长。对于陆地上型风电机组，运行维护成本占每千瓦时电价格的 10%~15%；对于海上风电机组，其比例接近 25%~30%。如丹麦 Horns Rev 海上风电场完工于 2002 年，试运行不到两年，80 台风电机组的机舱不得不运到岸上做大修。统计表明，在其不到两年的运行期中，总计出勤维护约 75000 次，即每台风电机组每天维护 2 次。降低风电机组的运行维护成本有两种途径：①提高风电机组的质量；②采用有效的在线状态监控系统和合理的故障诊断方法。影响风电机组质量的因素包括设计、制造、安装等多个方面，需要不断地反馈和改进。而风电机组的正常使用寿命为 20 年。因此，只有通过风电机组漫长的运行使用期内实时监测运行状态，及时分析运行状态参数，准确判断故障隐患，合理安排维修方案，才能保证风电机组长期稳定、可靠运行。

目前全世界风电机组中双馈风电机组占 85% 以上。根据国内外不同研究机构的统计数据表明，双馈风电机组故障主要集中在齿轮箱、叶片、发电机、电气系统、偏航系统、传动链、控制系统等关键部件。这些关键部件占整个风电机组总成本的 80%~90%。它们发生故障以后，造成风电机组停机维修时间为 1~8 天。对于电气系统、控制系统、偏航系统等部分，其故障多为电气或软件方面的故障，可以通过远程控制、现场人工维修、更换零件等方式迅速处理，不会造成长时间的停机。而叶片由于裸露在空中，其故障难以监测、诊断和预测，一旦产生故障，往往只有通过重新吊装更换叶片来排除。双馈风电机组中的主轴、主轴轴承、齿轮箱、高速轴和发电机组成了传动链系统。它们通过旋转运动，把风轮吸收的风能进行传递并转化为电能。由于风速的不断变化，上述旋转部件不断受到变化的冲击载荷作用，容易导致风电机组停机，产生高额的维修费用，造成巨大的经济损失。

风电机组的外部工作环境恶劣多变，风作为风电机组的动力源，风速和风向的变化具有很强的不确定性，造成风电机组常在不同的动静载荷之间频繁切换。除风况外，其他气候条件如雨雪冰雹等极端恶劣天气都会严重影响风电机组的安全性和可靠性。风电场运行和维护费用居高不下从而削弱风电场经济效益已成为风电行业发展的瓶颈。利用风电运行数据开展风电机组状态评估，预知风电机组劣化趋势，提高风电机组的可靠性被越来越多的学者关注和研究。

借鉴其他行业机电设备故障诊断的经验，风电行业研究工作者普遍认为风电机组的运行状态是可监测的、故障是可诊断的、隐患是可预测的，尤其对当前主流的双馈风电机组旋转部件的故障分析和诊断，在风电机组的运行和维护中显得尤为重要，是维持风电机组 20 年稳定可靠运行的技术保证和有效手段。

1.2 风电运行评估发展综述

风电机组作为多自由度、多体动力学复杂非线性系统，运行状态通常在不同工况之间协调切换，各轴系运动机构成为故障的主要来源。其中机械类（如风轮不平衡、主轴传动链系统振动、偏航运动机构等）故障，涉及风轮、偏航系统、齿轮箱、发电机、主轴传动链系统等，一旦发生会造成长时间停机检修，或长期亚健康运行，严重影响发电效率，需要提前预警，方便实施预测性维护。因此需要首先对风电机组的整机运行状态进行合理的评估，以发现其健康与否，是否存在重大运行隐患，可以把此环节简称为“健康态评估”，比喻为风电机组的“体检”过程。

准确评估风力发电潜力不仅需要详细了解当地的风力资源，还需要对当地风电场具有良好效果的等效功率曲线。风电机组的实际功率曲线作为衡量风电机组经济技术水平的尺度标准，不仅能够反映风电机组的性能是否符合设计要求，而且也是考核风电机组性能优劣、检测风电机组运行状况是否正常和评估风电机组发电能力的一项重要性能指标。在实际发电中，由于风向、能量损失、局部地形、涡轮布置等复杂原因，风速与功率输出之间的输入输出关系往往与风电机组给定的功率曲线不一致。这使得准确评估电力潜力和提供未来电力输出的精确估计变得困难。因此，对风电机组的运行状态进行评估，提高风电机组的可靠性，确保风电机组安全稳定运行，降低风电场运行维护成本，提高风电场的现场管理水平，已成为我国发展风电技术需迫切解决的关键问题。

风电场配备了数据采集与监视控制（Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA）系统，从风电机组的关键部件收集数据，以了解风电机组的运行情况，并在必要时实施远程控制。监测内容主要包括转速、温度、风速风向、振动加速度、机舱位置、主轴制动系统、齿轮箱系统、发电机系统、偏航系统、变桨快慢及位置等模块。完整、可靠的风电机组在线监测信息为风电机组的性能分析和健康状态的评估提供了数据支撑和可行性。近年来，风电场 SCADA 数据的附加价值在风电机组状态监测领域得到了进一步的探索。可以利用 SCADA 系统来评估风电机组关键部件或子系统的运行状况，如功率曲线、偏航系统、变桨系统、齿轮箱和轴承等。针对风电机组重要部件运行状态的监测研究较多并趋于成熟，但是利用 SCADA 系统对风电机组运行状态和健康程度评估的研究还处于起步阶段。

风电机组健康状态评估过程的方法和渠道有：①通过机组运行效率关键参数和指标进行评估，如风电机组可利用率、数据异常程度等；②通过风电机组运行特征曲线进行健康状态评估等。

在风电机组运行评估方面, 基于灰色理论和变权模糊综合评判的风电机组性能评估方法, 建立基于灰色理论和模糊综合评判的改进评估模型。基于幂律过程及相关分布来建立风电机组的可靠性评估模型, 进而对各计算环节进行模块化, 提高评估效率。利用相关性分析对风电机组出力情况进行分析, 由风电机组历史监测数据得出风电机组出力相关性的统计规律, 对风电机组进行健康状态评估。为了准确评估风电机组实时运行状态, 采用层次分析法和均衡函数得到了各评估指标的综合权重, 结合可拓集合中的关联函数, 提出了基于物元分析理论的风电机组运行状态评估方法。为满足大数据环境下风电机组状态评估的实时性要求, 江顺辉等引入正态云模型取代传统隶属函数, 并将正态云模型与模糊综合评价法相结合, 提出了一种基于动态劣化度的实时状态评估方法。梁颖等建立了基于支持向量回归算法的回归预测模型, 提出了一种基于回归预测模型和 SCADA 系统相配合的鲁棒性更强的在线评估方案。王红君等提出一种基于灰云模型聚类分析和云重心偏移度理论相结合的评估方法, 对风电齿轮箱建立相对全面完整的评估体系, 能够有效提高评估结果的准确性。黄必清等建立了海上直驱风电机组运行状态的评估指标体系和多层次模糊综合评估模型, 避免了多层次模糊推理掩盖了风机劣化的现象。Yang 等提出了一种处理 SCADA 原始数据的有效方法, 实现了对不同运行工况下风电机组健康状况的定量评估, 该方法不仅具有潜在的检测风电机组叶片和传动系故障的能力, 而且具有跟踪其进一步恶化的能力。Qiu 等通过将时间序列和基于概率的分析方法集成到风电场的 SCADA 系统中, 以提高风电机组评估的可靠性。张鑫淼采用隶属云模型代替精确的隶属度函数, 通过 3 个特征值建立泛正态分布, 以实现风电机组健康状态更科学、合理的评估。Peng Sun 等利用神经网络建立了小波变换条件参数的预测模型, 提出了一种基于 SCADA 系统数据的通用的风电机组异常识别模型。Edzel Lapira 等提出了一种考虑风电机组动态工况的多状态建模方法, 并使用 SCADA 数据对它们进行了评估。Dai 等提出了一种基于可靠信息融合的风电机组老化评估方法, 并利用实际风电场 SCADA 数据进行了验证。万书亭等应用灰色理论和模糊综合评估的变权法, 运用层次分析法构建了风电机组重要特性性能的项目及子项目层次框架, 建立了风电机组性能评估模型。

在功率曲线评估方面, 张鑫淼采用云模型对输出功率的波动范围和离散程度进行建模分析, 并计算不同风电机组风速和功率的相关系数, 分析风电机组响应的灵敏度, 期望实现对风电机组的性能更全面、更准确的分析。杨帆等采用偏最小二乘回归的方法为风电机组的发电功率进行分段线性建模, 对真实输出和模型输出进行比较, 对发电功率提升的有效性进行评估。陈华忠等通过研究风电机组运行可靠性的关键指标, 建立了风电机组可靠性模糊化评估模型, 风电机组运行数据验证结果表明, 该方法能够准确反映风电机组的可靠水平。柳青秀等提出了一种基于长短时记

忆——自编码神经网络的风电机组性能评估及异常检测方法，能够有效解决以往评估模型较少考虑性能监测数据时序性以及传统固定阈值识别精确率较低的问题，并根据评估结果最终定位至与性能异常密切相关的功能模块。杜勉等结合神经网络技术和随机过程理论分析风电机组 SCADA 数据，提出了一种数据驱动的风电机组性能评估方法。

通过上述的数据统计分析方法，可实现对风电机组运行状态的评估，进而评估风电机组退化情况和预期寿命。各种方法的技术路线分析如图 1.1 所示。

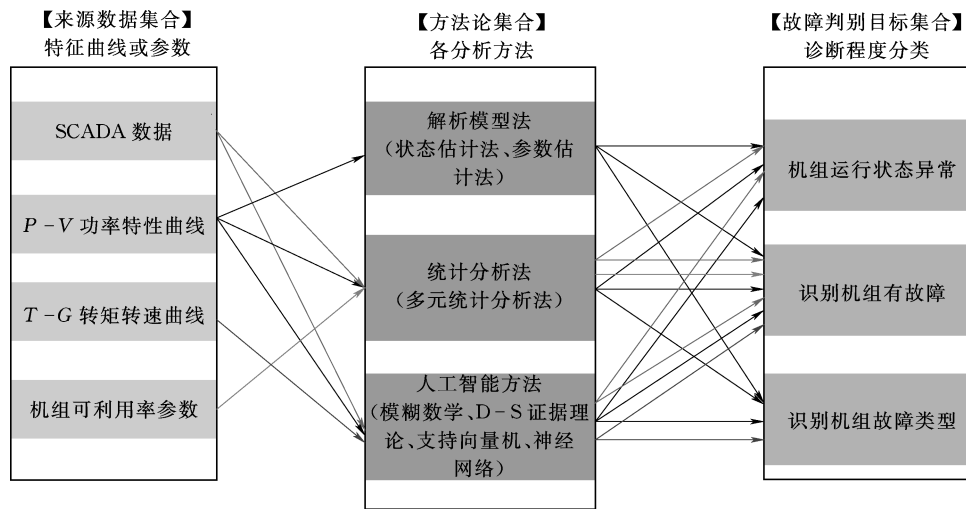


图 1.1 风电机组运行状态评估技术路线图

1.3 故障诊断发展综述

风电机组偏航系统和风轮变桨距系统通常在硬件设计上装有冗余传感器来判断故障，如变桨距角度、转速、风速、风向都在不同位置装设相同传感器进行测量和一致性检验。但是有些故障通过冗余传感器检测仍然不易识别，如偏航机械式传感器长期未校准导致测量出现偏差、偏航齿圈齿面磨损引起的偏航对风误差，叶片结冰、变桨距初始安装角度不一致等引起的风轮质量、气动不平衡等。这些隐性故障如果不能及时判别出来，仍继续运行，将造成风电机组停机检修，甚至损坏，严重影响风电机组寿命。因此针对此类隐性故障的诊断更具重要性。

在发现风电机组存在亚健康状态的情况下，进行故障诊断是必要步骤。依据常见的故障诊断分类情况，如图 1.2 所示，在诊断程度方面可以分为定性和定量故障诊断

两种。实施难度较大的定量诊断方法，又可分为数据驱动和解析模型方法两种，基于数据的统计分析、人工智能、信号处理方法又进行了具体方法种类的延伸，在数据的分析手段方面体现了多样性和智能性。

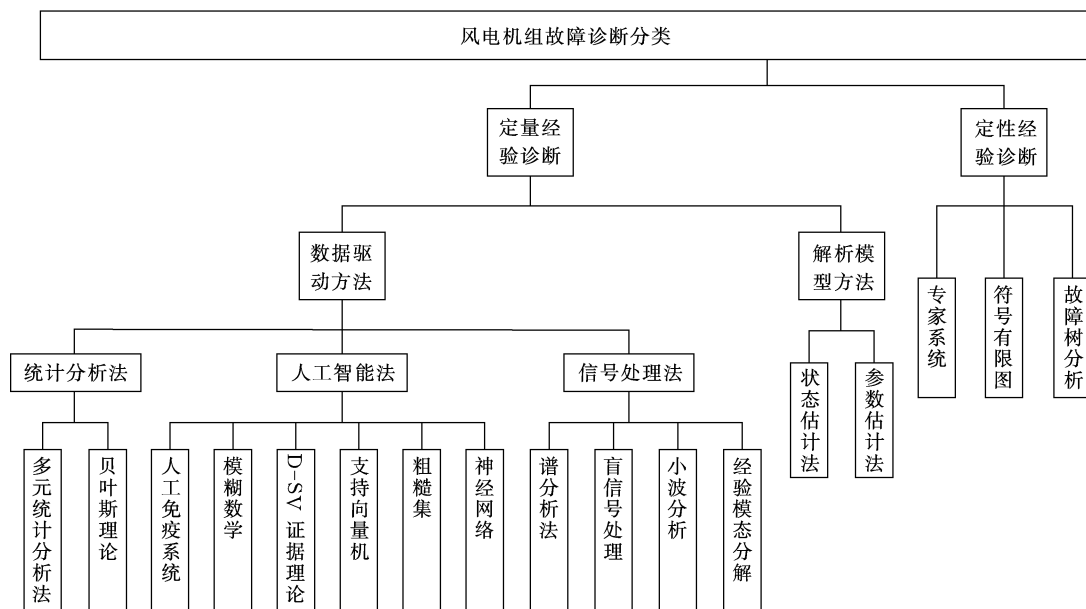


图 1.2 风电机组故障诊断分类

风电机组的故障诊断过程可大致划分故障感知（异常识别）、故障隔离（故障分类）、故障定位（故障识别）三个步骤。第一步，通过表征现象分析或检测，发现存在的故障现象；第二步，通过信号处理或数据挖掘与分析，甄别故障类型，进行故障分类；第三步，准确定位故障发生位置，定位发生故障的部件位置，如定位叶片角度偏差量或某叶片重量偏差位置。

目前国产风电机组运行时间尚短，缺乏专业知识和经验，基于经验知识的方法进行故障判断不太适用。因此，本书利用基于分析模型和数据驱动的方法在风电机组故障诊断方面进行探讨、研究。

基于分析模型的方法，针对风电机组易于建模的部件进行故障诊断时应用较多，如发电机、齿轮箱、轴承、传动链系统等部件。例如：V. Fernao Pires、Manjeevan-Seera、A. B. Borchersen、马宏忠等基于发电机模型，通过提取特征值信号、设计估计器来预测早期故障；LeB 提出了一种海上风电机组部件性能退化、检查及维修的评估模型，用以预测风电机组部件的未来状况及评估指定的维护策略。但目前该方法在整机气动及传动链上很少应用。

基于数据驱动的方法多利用 SCADA 数据对风电机组的振动、发电机、齿轮箱、

轴承、传动链系统等进行故障诊断。目前的故障预测方法有支持向量机、ARMA 方法、多元线性回归方法、人工神经网络等。大多数学者的基本思路是通过残差趋势分布来实现故障预测。目前，统计分析方法是基于数据驱动的主流方法。因为单变量统计分析已无法适应当今复杂的工业生产过程，所以基于多变量统计分析的故障诊断方法得到了广泛的发展和应用。

现代化工业生产对机电设备，乃至一个零件的工作可靠性，都提出了极高的要求。世界各国也都普遍开展了对大型重要设备的状态监测和故障诊断工作，取得了明显的经济效益。英国 CEGB 公司下属的 550MW 和 660MW 发电厂因发电机组故障每年损失 750 万英镑。采用故障诊断技术后，对发电机组振动故障原因的 5 次正确分析，就取得直接经济效益 293 万英镑。目前，国内外对基于信息融合技术的兆瓦级风电机组故障诊断研究得较少。为确保风力发电设备的安全运行，提高其可靠性和安全运转率，必须加强设备的运行管理，进行在线工况监测，及时发现异常情况，加强对故障的早期诊断和预防。故障诊断技术自 20 世纪 70 年代开展以来，已经历了从简单信号测量到人工智能，再到人机协作的发展过程，快速发展的传统故障诊断技术已在工程应用中发挥了重要作用。虽然传统故障诊断技术对于比较简单的设备和单一故障常能够发挥其独特作用，但是对于大型复杂设备的多故障交互工况环境却显得力不从心，而此时若采用智能故障诊断理论或方法便是一种合理而有效的选择。本书将以旋转机械系统故障诊断为例，对传统和智能故障诊断中的主要方法予以分析和归纳。

1. 传统方法

用于旋转机械系统故障诊断的传统方法以信号处理为基础，而其中的频域方法，就是利用频谱中微弱的特征信号来定位和识别故障。频域方法的研究目前已日趋成熟，并已成为实际诊断系统的主要方法之一。具有代表性的时域方法就是基于数学模型的诊断方法，该方法以建立目标系统完好条件下的精确模型即参考模型为基础，再将实际系统的估计或者监测状态输出和参考模型输出作为依据进行故障诊断。这种方法的准确性和实用性虽然依赖于传感器数据和模型精确性的不利因素，但与频域方法相比却有较小的计算负荷。若时域方法与频域中时间的尺度变换相结合，就能在特定的时间窗下提高频率分辨率，从而有效地增强故障特征的识别性能，该方面的研究主要使用小波分析。

传统诊断方法多是基于单参数、单特征的，而面对日趋复杂的设备或多重故障的情况，使用这些方法常难以给出较为准确的诊断结果。比如现在研究较多的电流特征分析（MCSA）方法，其依据是发电机的一些故障如转子断条、轴承故障等能够在定子电流中产生特殊的频率分量，诊断的方法就是确认定子电流频谱中是否存在故障特

征频率分量。然而某些频率可以表示不同故障，或者不同的故障会在某频段上产生相互抵消的效果，或者频段的幅值大小难以被检测到，这就会导致不准确甚至错误的诊断结果。当用其他单参数方法，如振动和温度等情况时也存在同样的问题，所以单参数的诊断方法存在固有的局限性。

由于设备运行状态的多变性与随机性，各故障状态间的界限往往不清晰，而且对某些特征信号的描述也存在不确定性，故障与特征的关系往往也是模糊的，因此模糊理论被引入故障诊断领域。目前用于智能故障诊断的模糊技术主要有两种：一种技术是基于模糊关系及逻辑运算的诊断方法，其基本思想是首先建立故障特征与故障类型之间的因果关系矩阵 R ，再建立故障与特征的模糊关系方程，即 $F=S \cdot R$ ， F 为模糊故障矢量， S 为模糊特征矢量，“ \cdot ”为模糊合成算子；另一种技术是基于模糊理论的知识处理诊断方法，是将模糊集划分成不同水平的子集，以此来诊断故障可能属于哪个子集。

另外，可能性理论是 Zadeh 在其模糊理论的基础上提出的一种不确定性推理方法，它借助可能性测度和必要性测度两个模糊度量来处理信息的不完全性。由于其具有较好的理论基础，计算复杂性也比较适中，因而有望在不确定性信息处理中得到广泛应用。

模糊语言变量接近自然语言，知识的表示可读性强，模糊推理逻辑严密，类似人类思维过程，易于解释。但是，由于模糊语言变量利用模糊隶属度表示，而如何实现语言变量与隶属度之间的转化，是目前理论和应用上的一个难点。该方法只能对具有模糊性的特征信号进行分析，也仅是一种基于单一故障特征的诊断方法，诊断中的不确定性依然存在。尽管如此，将模糊理论引入故障诊断领域已是一种符合事物本质的必然趋势。

2. 专家系统的方法

基于专家系统的诊断方法是根据被诊断系统的专家以往的经验，将其归纳成规则，并通过经验规则推理来进行故障诊断，在宏观功能上模拟人的知识推理能力。它是以逻辑推理为基础，通过知识获取、知识表示、推理机设计等来解决实际问题，其知识处理所模拟的是人的逻辑思维机制。基于专家系统的诊断方法具有诊断过程简单和快速等优点。但由于该方法主要应用反演推理，因而不是一种能确保唯一性的推理方法，存在如何有效获取知识的瓶颈。并且复杂系统所观测到的症状与所对应故障之间的联系相当复杂，所以由专家经验归纳成的规则往往也不是唯一的，这将会影响推理的准确性。另外，基于规则的方法无法对推理结果做出进一步解释，并且只能利用专家提供的“规则”形式的信息进行故障诊断，通常仅能诊断单个故障，难以诊断多重故障。

在许多专家系统（比如 MYCIN 医疗诊断系统）的知识库中，大都采用产生式系统这种典型结构，用产生式规则表达知识。产生式系统的优点不仅自然、通用和灵活，而且也易于实现模块化和结构化设计。但是，产生式系统也存在不足，如计算机在执行规则时会形成死循环，即由数个规则的前提和结论形成一个循环链，最后由末尾规则的结果子句推出起始规则的前提部分。近年来出现的条件事件代数，是在确保规则概率与条件概率相容的情况下，把布尔代数上的逻辑运算推广到条件事件（规则）集合中的逻辑代数系统。运用它可以对循环规则进行简化，克服传统逻辑在推理过程中的局限性。

3. 神经网络的方法

与专家系统的方法相比，神经网络在微观结构上有效地模拟了人的认知能力，它是以连接结构为基础，通过模拟人类大脑结构的形象思维来解决实际问题，知识处理所模拟的是人的经验思维机制，决策时它依据的是经验，而不是规则。神经网络用于设备故障诊断是近几十年来迅速发展起来的一个新的研究领域，由于神经网络具有并行分布式处理、联想记忆、自组织和自学习能力和极强的非线性映射等特性，能对复杂的信息进行识别处理并给予有效分类，因此可以用来对系统设备由于故障而引起的状态变化进行识别和判断，从而为故障诊断与状态监控提供新的技术和手段。采用反馈神经网络对电机设备进行故障诊断，其基本思想是采用传感器获取表征电机设备故障的特征信号，如转子电流或者电机噪声，进行电机电气或机械故障的诊断。

基于神经网络的故障诊断方法也存在不足之处，如问题的解决要依赖于神经网络结构的选择，而训练过度或不足、较慢的收敛速度等原因都可能影响诊断的效果；定性的或是语言化的信息不仅无法在神经网络中直接使用或嵌入，而且难以用训练好的神经网络的输入输出映射关系来解释实际意义的故障诊断规则。

4. 基于粗糙集理论的方法

对于具有不精确、不一致和不完全性的多源信息，利用粗糙集理论不仅能对其进行有效的分析和推理，还能从中发现隐含的知识，揭示对象内部潜在的规律。通常是将其作为一种知识约简的工具而引入故障诊断中。通过对大量含有冗余的诊断特征进行压缩或精简，再与传统的方法和人工智能的方法结合，用精简过的特征信息进行诊断，就能大大降低计算复杂性和统计工作量，从而有效地提高诊断效率。将粗糙集理论和专家系统相结合，针对机电设备故障诊断中存在的知识冗余和不确定性，从原始信息出发，利用决策表简约算法进行属性和属性值的简约，建立故障诊断的规则库，给出基于粗糙集的故障诊断和知识获取模型的一般性结构。粗糙集和模糊集相结合可