

# 风力发电机组故障诊断与预测技术研究综述\*

金晓航<sup>1,2</sup>, 孙毅<sup>1,3</sup>, 单继宏<sup>1,2</sup>, 吴根勇<sup>2,4,5</sup>

- (1. 浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室 杭州 310014;  
2. 浙江工业大学机械工程学院 杭州 310014; 3. 浙江工业大学海洋研究院 杭州 310014;  
4. 浙江运达风电股份有限公司 杭州 310012; 5. 风力发电系统国家重点实验室 杭州 310012)

**摘要:**随着风力发电机组装机容量的快速发展,累计运行时间的持续增长,风电机组的维护问题日益突出,迫切需要研发有效的风电机组故障诊断与预测系统。从故障诊断和故障预测两个方面,归纳风力发电机组的主要故障特点;针对故障诊断难点问题,分析和总结基于振动、电气信号分析和模式识别算法的故障诊断方法的研究现状,指出各种方法的技术特点、局限性和今后的发展趋势;针对风电机组中机械结构和电子系统性能退化的各自特点,归纳当前的研究进展,提出物理失效模型和数据驱动模型融合的故障预测方法;最后,归纳了利用风力发电机组数据采集与监控系统(SCADA)数据进行故障诊断与预测的最新进展及需要进一步研究的问题。

**关键词:**风力发电机组;故障诊断;故障预测;数据采集与监控系统

**中图分类号:** TH17      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 460

## Fault diagnosis and prognosis for wind turbines: An overview

Jin Xiaohang<sup>1,2</sup>, Sun Yi<sup>1,3</sup>, Shan Jihong<sup>1,2</sup>, Wu Genyong<sup>2,4,5</sup>

- (1. Key Laboratory of E & M, MOE, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 3. Institute of Ocean Research, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 4. Zhejiang Windey Co., LTD., Hangzhou 310012, China; 5. State Key Laboratory of Wind Power System, Hangzhou 310012, China)

**Abstract:** As the installed capacity of wind turbines grows rapidly and cumulative operation time continues extending, the maintenance issue of the wind turbines becomes increasingly prominent, it is necessary to develop effective wind turbine fault diagnosis and prognosis systems urgently. In this paper, the main fault characteristics of wind turbines are summarized from two aspects of fault diagnosis and fault prognosis. Aiming at the difficult problems in fault diagnosis, the research status of the fault diagnosis approaches based on vibration, electric signal analysis and pattern recognition algorithms for wind turbine fault diagnosis are analyzed and summarized. The technical characteristics, limitations and future development trends of different approaches are pointed out. Aiming at various characteristics of mechanical structure and electronic system degradation in wind turbines, current research development of the fault prognostic approaches for wind turbines are summarized. The fault prognostic approach fusing the physics-of-failure model and data-driven model is proposed. Finally, the new development and the problems requiring further study for the fault diagnosis and prognosis of wind turbines using supervisory control and data acquisition (SCADA) data are summarized.

**Keywords:** wind turbine; fault diagnosis; fault prognosis; supervisory control and data acquisition (SCADA)

## 1 引言

随着环境污染问题的日益突出,同时为了克服能源

危机,风能作为一种绿色可再生能源越来越受到世界各国的重视,风力发电机组(简称风电机组)作为将风能转化为电能的关键装备得到了迅猛的发展。风电机组通常坐落于偏僻的、交通不便的、环境恶劣的远郊地区以及沿

海或近海区域,且机舱一般安装在离地面几十米甚至上百米的高空,因此风电机组日常运行状态检测困难,维护成本昂贵。有统计资料表明,陆上和海上风电机组的维护费用占到各自风场收入的10%~15%和20%~35%左右<sup>[1]</sup>,因此风电机组在恶劣环境下的运行可靠性问题特别受到关注。

风电机组在工作过程中,转子叶片的转速随风速的变化而变化,当阵风来袭或风作用在不同叶片上的力不平衡时,叶片会受到复杂交变的冲击载荷,这些载荷通过主轴传递到风电机组的其他关键零部件,如轴承、齿轮箱、发电机等,会对风电机组的运行可靠性造成极大的影响<sup>[1]</sup>。由于制造和安装误差、老化、恶劣环境、变工况运行等原因,导致每台风电机组每年发生失效停机需要维护的时间达52~237 h<sup>[1]</sup>;当价值为1 500美元的轴承发生失效时,如没有及时被修复或替换掉,会导致价值为10万美元的齿轮箱失效和其他零部件受损<sup>[2]</sup>;另外,特别是海上风力发电机组的维护会受到恶劣天气(如台风、暴雨、波浪等)的严重影响<sup>[1,2,3,5]</sup>。为了尽可能地避免故障失效引起的停机,减少故障导致的巨大经济损失,提升风电产业的竞争力,迫切 need 提高风电机组的运行可靠性,减少风电机组的维护成本<sup>[6-13]</sup>。

本文在总结风电机组故障特点的基础上,对其故障诊断与预测技术分别进行了归纳分析,指出当前的难点问题和今后需要作进一步研究的方向,供国内相关领域的研究人员参考。

## 2 风力发电机组发展现状

据有关统计资料表明,全球风电机组的装机容量从2001年的24 GW增长到了2015年的433 GW<sup>[14]</sup>,其中中国风电机组的装机容量从2001年的400 MW快速增长到了2015年的145 GW,如图1所示。根据当前的增长趋势,预计到2020年全球风电机组的装机容量将达到800 GW<sup>[14]</sup>,如图2所示。为了进一步解决能源和环境问题,国家发展和改革委员会能源研究所设定了到2020年中国风电机组的装机容量达到200 GW,2030年达到400 GW,2050年达到1 000 GW的发展目标<sup>[15]</sup>。

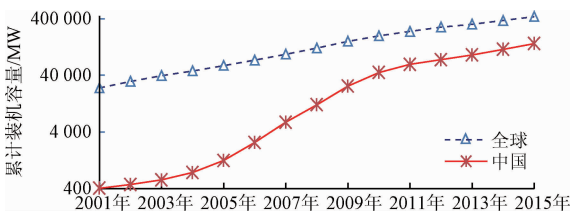


图1 2001~2015年风电机组的累计装机容量  
Fig. 1 Cumulative installed wind turbine capacity in 2001~2015

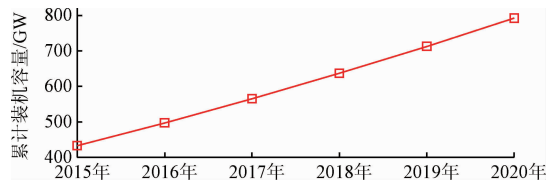


图2 2016~2020年全球风电机组的预计累计装机容量  
Fig. 2 Global cumulative installed wind turbine capacity forecast in 2016~2020

风电机组一般可分为水平轴风电机组和垂直轴风电机组两类。由于水平轴风电机组占据着市场的主流,本文也是针对该类风电机组的故障诊断与故障预测技术加以讨论和展开的。水平轴风电机组按照叶轮转速是否保持恒定以及变流器的功率大小可进一步分为:1)定速型风力发电机组,其代表机型是定桨失速风力发电机;2)采用部分功率变流器的变速风力发电机组,其代表机型是双馈式异步风力发电机,其总体结构如图3所示;3)采用全功率变流器的变速风力发电机组,其代表机型是直驱式永磁同步风力发电机,其总体结构如图4所示。定速型风力发电机组由于结构简单,工作可靠,在早期发展的小型风电机组中得到了普遍的应用。近十年来,随着单机容量的不断提高,兆瓦级的大型风力发电机得到了迅速的发展。目前无论是陆上风力发电机还是海上风力发电机,多数都采用了双馈式异步风力发电机。近些年来,随着电力电子技术的提高、永磁材料的发展和电子器件价格的下降,直驱式永磁同步风力发电机得到了进一步的发展,有可能成为未来的主流机型<sup>[3]</sup>。

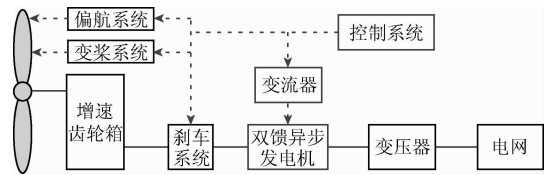


图3 双馈式异步风力发电机结构  
Fig. 3 Schematic of wind turbine with double fed induction generator

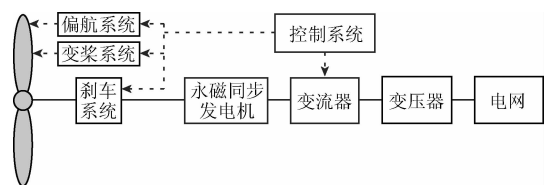


图4 直驱式永磁同步风力发电机结构  
Fig. 4 Schematic of wind turbine with permanent-magnet synchronous generator

### 3 风电机组的故障特点

虽然风电机组的故障率随着风电机组技术的发展而逐渐降低,但是对比于传统的发电系统,如蒸汽轮机、燃气轮机、水轮机等,风电机组的故障率还是相对较高的,其运行可靠性还有待进一步的增强和提高<sup>[1]</sup>。总的来说,由于工作环境恶劣、载荷复杂多变,风电机组较易发生故障;海上风电机组由于会受到风暴、波浪的影响以及盐雾的腐蚀,比陆上风电机组更加容易发生故障;另外风电机组的故障频率也随着风电机组尺寸的增大而相应有所提高<sup>[13]</sup>。据统计,风电机组中故障率较高的部件有电气系统、转子叶片、变桨系统、液压系统、控制系统和齿轮箱等,各个部件的故障分布<sup>[16]</sup>如图5所示。虽然风电机组中发生电气和控制系统的故障较为频繁,但是维修该类故障所导致的风电机组停机时间是比较短的;传动系统上的主轴、齿轮箱、发电机等故障率较低的故障,维修时间往往比较长,其中齿轮箱故障导致的风电机组停机时间最长,不同部件(子系统)故障引起的停机维修时间如图6<sup>[16]</sup>所示。

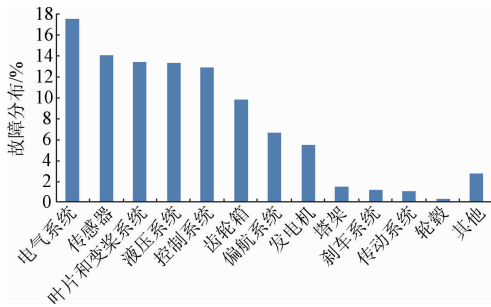


图5 风力发电机组中各零部件引起的故障分布  
Fig. 5 Fault distribution caused by different parts and subassemblies in wind turbine

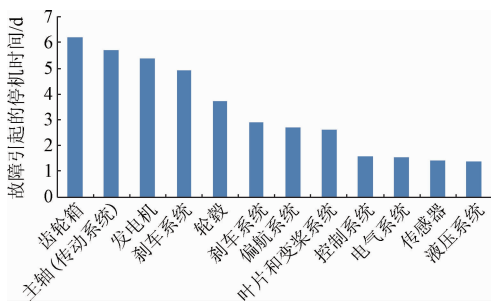


图6 风力发电机组中各零部件故障引起的停机时间  
Fig. 6 Downtime caused by different parts and subassemblies in wind turbine

#### 3.1 叶片

叶片(桨叶)是风电机组捕捉风能的核心部件,其工作环境恶劣,即便在风电机组正常工作时,叶片上往往承

受着较高的应力,容易发生如下一些故障<sup>[2]</sup>:由于污染、剥落等原因引起叶片表面粗糙度的增加;由于结构松动导致的叶片内部材料的移动、雨水通过裂纹进入叶片内部等原因导致叶片不平衡;叶片变形、桨距控制失效等原因引起叶片空气动力学的不平衡;疲劳、雷击等原因导致的叶片表面或内部结构出现裂纹等故障。

叶片受力产生裂纹或发生变形时,会释放出高频(一般在1 kHz~1 MHz)的、时变的、非平稳的、瞬态的声发射信号。因此声发射检测已经被成功地应用于叶片损伤的探测与评估<sup>[6]</sup>。由于叶片故障导致转子叶片受力不均,这些应力通过主轴传递会最终作用在机舱上,容易引起机舱的晃动,Caselit P等人<sup>[4]</sup>通过在主轴上安装多个振动传感器,采集低频(0.1~10 Hz)的振动信号,应用算法成功地分析了叶片转动不平衡等故障。

#### 3.2 齿轮箱

齿轮箱是连接风电机组主轴和发电机的传动部件,其功能是将主轴上较低的转速提高到相对较高的转速,以满足发电机工作所需的转速要求。齿轮箱一般由一级行星齿轮和两级平行齿轮传动构成,其工作条件恶劣、工况复杂、传递功率大。齿轮箱中的行星齿轮、高速轴侧轴承、中间轴轴承、行星齿轮传动侧轴承以及其润滑系统较容易发生故障<sup>[17]</sup>。风电机组运行过程中,受交变应力、冲击载荷等作用的影响,齿轮容易发生齿面磨损、齿面擦伤、点蚀、断齿等故障;轴承容易发生磨损、滚道滑伤、滚子打滑、外圈跑圈等故障<sup>[18]</sup>。虽然齿轮箱不是风电机组中发生故障最频繁的部件,但是由齿轮箱故障引起的停机维修时间却是最长的,而且维修费用很高。因此齿轮箱的故障诊断与预测得到了广泛的关注。Huang Q等人<sup>[17]</sup>通过对齿轮箱的振动信号分析,利用小波神经网络的方法成功地诊断了齿轮箱故障;另外基于轴承温度、润滑油温度和油液磨粒等信息的分析方法也相继被提出用于齿轮箱故障的检测<sup>[4,7]</sup>。

#### 3.3 电机(发电机或电动机)

双馈发电机和永磁同步发电机在目前的风力发电机组技术中广泛被使用。其中双馈式风力发电机组的转速较高,其额定转速为1 500 r/min,因此机组中需要齿轮箱用于增速,这样使得机组重量较重,另外发电机的高速运转存在着一定的噪声污染;电机为异步发电机,变流器连接转子,变流器功率可以双向流动,通过转子交流励磁调节实现变速恒频运行,机组的运行范围很宽,在额定转速60%~110%的范围内都可以获得良好的功率输出<sup>[4,12]</sup>。直驱式风力发电机组由风轮直接耦合电机转子工作,电机转速较低,一般为每分钟几十转。直驱式风力发电机组一般采用永磁同步电机,电机启动转矩较大,定子绕组经全功率变流器接入电网,机组运行范围较宽,但发电机

结构复杂、直径较大、成本较高<sup>[3]</sup>。除了发电机以外,电动机也广泛地应用于风电机组的偏航、变桨等系统中。

电机的故障通常分为电气故障和机械故障。电气方面故障有绕组短路、断路、过热、三相不平衡等<sup>[7]</sup>。机械故障有轴承过热、损坏,定、转子间的气隙异常,转轴磨损变形等。通过对振动、电流、温度等信号的分析,可实现对电机故障的检测<sup>[9]</sup>。

### 3.4 偏航、变桨和刹车系统

偏航系统主要有两个功能:1)使风力发电机组跟踪风向;2)由于跟踪风向容易使得从机舱内引出的电缆发生缠绕,当缠绕过多时,偏航系统可用于解除电缆缠绕的问题<sup>[1,4]</sup>。变桨系统的作用是当风速改变时,通过控制叶片的角度来改变风电机组获得空气动力的转矩,实现功率控制;当风速过高或风电机组故障时,调整叶片到顺桨状态,实现制动。偏航和变桨系统工作较为频繁,偏航和变桨轴承承受的扭矩较大,偏航轴承部分裸露在环境中,容易受到沙尘侵害,盐(水)雾腐蚀等影响而发生故障<sup>[18]</sup>。变桨轴承由于其不完全旋转的工作特点,容易发生润滑不良的问题,导致轴承磨损等故障。

刹车系统用于防止转子叶片旋转过快,以及当风电机组其他部件发生故障时,实现风电机组的停机。由于摩擦片磨损、受力过大等原因,刹车系统也较容易发生故障。

液压系统由于具有单位体积小、动态响应好、传动力大、扭矩大等优良特点,在风电机组的偏航、变桨和刹车系统中都发挥着重要的作用。液压回路相互干涉,使其故障机理复杂,失效模式多样。液压系统常见的故障有液压油污染、漏油、电磁阀、溢流阀故障、液压泵故障、油液过热、异常振动和噪声等<sup>[19-20]</sup>。

### 3.5 变流器和变压器

随着风电机组单机容量的增加,电气系统能否可靠运行变得越来越重要。据统计资料表明,电气系统是风电机组中故障发生率最高的子系统,电气系统故障在风电机组所有的故障中约占比20%。虽然由电气故障引起的风电机组停机时间不长,但电气系统频繁发生故障,同样会导致高昂维修成本。随着风电机组容量的进一步提高,电气系统的故障频率也会随着增加<sup>[13]</sup>。

电气系统的故障通常指由于过压、过流、过热、振动、湿度过大等原因所导致的电容、印刷电路板或功率半导体器件(如MOSFET和IGBT)等电子元器件的失效<sup>[21-22]</sup>。它们的失效分别占了电气系统零部件故障中的30%、26%和21%。

### 3.6 控制系统和传感器

风力发电机组的控制系统在偏航、桨距调节、电缆解绕、保护等方面发挥着重要的作用。控制系统中通常包含了各类传感器、控制器和执行机构,经由传感器将各类

信号采集并传送至控制器,进行分析处理和逻辑运算,通过执行机构控制和保护风电机组的各个子系统,保障风电机组在安全、可靠、优化的状态下工作。

风力发电机组中安装了各式各样的传感器,如风速仪、风向标、速度解码器、位置编码器、温度传感器、压力传感器、振动传感器、偏航传感器等。由于工作环境恶劣,传感器的故障率较高。有统计资料表明,在风力发电机组中,14%以上和40%以上的风电机组故障分别是由传感器本身和传感器相关系统的故障引起的<sup>[23]</sup>。

除了传感器外,控制系统的其他故障可分为硬件故障和软件故障。硬件故障包括控制板电路故障、伺服机构故障等。软件故障表现为系统出现偶发性的死机、不动作等问题,通常由于设计不合理、内存溢出等原因所导致的,通过重新启动控制系统等动作可消除该类故障<sup>[1]</sup>。

## 4 风力发电机组的故障诊断技术

风力发电机组中的信号(如振动、声发射、应力、扭矩、温度、润滑油参数和电气参数)在一定程度上反映了风电机组的健康情况,均可被用于风电机组的故障诊断和预测<sup>[8,13-14]</sup>。目前已投入商业应用的风电机组健康状态监测系统大都是在振动信号分析的基础上开发的<sup>[13]</sup>。基于振动信号的状态监测系统,往往需要在风电机组的关键部件,如齿轮箱、主轴轴承、发电机等多个位置上安装多个振动传感器<sup>[18]</sup>,并配置相应的数据采集系统,这对机舱远离地面的风电机组来说,信号的获取通常是困难的,且成本较高。此外,传感器和数据采集系统本身也会发生故障,导致不能可靠地采集风电机组的振动数据,误报风电机组故障,而且还会带来额外的运行和维护成本。因此,有必要开发一种成本较低、非介入式、可靠且有效的技术用于风电机组健康状况的监测。基于电流信号的故障诊断方法较好地满足了这些要求,有潜力成为辅助的、甚至替代基于振动信号的风电机组故障诊断方法。另外,信息领域中的模式识别方法也广泛地被研究用于风电机组的故障诊断。

### 4.1 基于振动信号的故障诊断方法

基于振动信号的分析是目前技术最为成熟、讨论最为广泛的一种故障诊断方法,已经成功地被应用于风力发电机组中齿轮箱、轴承、叶片等关键部件的健康监测和故障诊断。近年来,较多科研人员利用振动信号对风电机组的故障诊断进行了研究。如Huang Q等人<sup>[17]</sup>根据风电机组的故障特点,提出了一种小波神经网络的方法,研究探讨了对风电机组齿轮箱的故障诊断;针对风电机组微弱故障信号的非平稳、瞬态等特点,严如强等人<sup>[24]</sup>提出了一种集平稳子空间分析的信号分析和连续小波变

化的方法,有效地提取了风电机组齿轮箱故障的特征;Barszcz T 等人<sup>[25]</sup>利用对冲击信号敏感的特征-谱峭度,成功地诊断了行星齿轮箱的故障;冯志鹏等人<sup>[26]</sup>提出了基于经验模式分解的频率解调方法,对行星齿轮箱的故障情况进行了成功的识别;Tang B. P. 等人<sup>[27]</sup>针对风电机组振动信号非线性强噪声的特点,提出了降噪方法,并基于降噪后的信息构建有效特征,利用流行学习算法实现了对风电机组早期微弱故障的诊断;Ghoshal A 等人<sup>[28]</sup>通过对压电陶瓷传感器监测到的振动信号分析,实现了对风电机组叶片故障的诊断。

当前大多数风电机组故障诊断方法是通过离线分析稳态情况下的振动信号实现的,然而现实中风电机组工作条件是动态多变的,因此还有待进一步讨论变工况下振动信号的特点,并开发出相应的在线风电机组健康监测系统。

#### 4.2 基于电气信号的故障诊断方法

目前,国内学者对基于电气信号的风电机组故障诊断方法的研究涉及较少。国外学者已经在这方面做了大量的探索研究,特别是针对电动机的故障诊断。相对于振动信号,电气信号(如电流信号)中所包含的与故障相关的信号往往是比较微弱的,并通常被电机固有的电气信号和随机噪声掩盖,信噪比较低,提取故障特征比较困难。因此,有必要利用先进的信号分析方法从电气信号中提取出与故障相关的特征,并结合电机模型和转子动力学模型等分析,探讨实现风电机组的故障诊断。如Yacamini R 等人<sup>[29]</sup>通过电机的动力学模型揭示了电流信号与电机系统中扭矩波动之间的耦合关系,对电机故障进行了成功的诊断;Kia S. H. 等人<sup>[30]</sup>利用模型研究了含齿轮箱的电机传动系统的故障问题,仿真分析了电流信号与齿轮箱故障之间的关联特性,并用实验验证了数值分析的结果。美国佐治亚理工学院的 Habetler 教授和 Harley 教授利用电流信号对电机及其关键部件(如轴承、转子等)的故障诊断进行了广泛而深入的研究;Zhou W 等人<sup>[31]</sup>利用维纳滤波滤去电流信号的噪音后,通过统计过程控制图的方法实现了对电机轴承早期故障的诊断;Stack J. R. 等人<sup>[32]</sup>利用电机轴承故障特点,如点缺陷故障引起的特征频率的凸显和轴承粗糙度故障会造成一定宽频范围内能量变化,对轴承的不同故障实现了可靠的分类;Rajagopalan S 等人<sup>[33]</sup>利用加窗 Fourier 变换和 Wigner-Ville 分布分析动态的电流信号,对直流无刷电机的转子故障进行了成功的诊断;Gong X 等人<sup>[34]</sup>利用电流信号对直驱式风力发电机组上的叶片转动不平衡故障、轴承故障等开展了有效的研究;Jin X. H. 等人<sup>[35]</sup>利用同步采样方法(见图7),从变工况的电流信号中提取出故障特征,进而利用关联维数分析对风电机组不同的故障进行了定量分析。

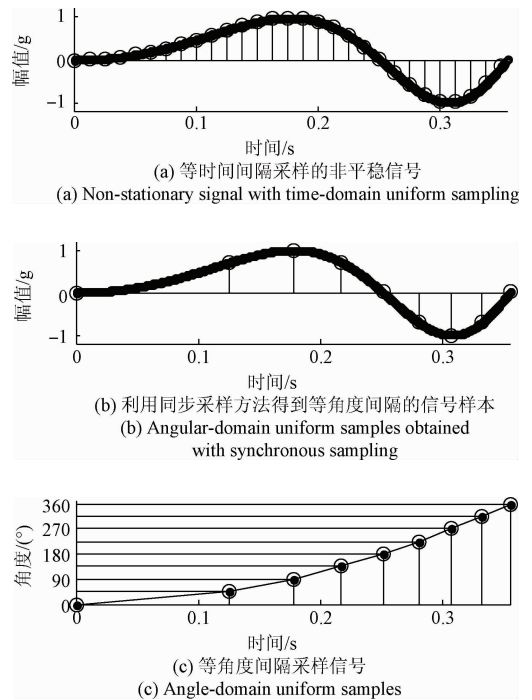


图7 信号同步采样方法示意图

Fig. 7 Schematic of synchronous sampling method

国内也有少数学者利用电流信号对电动机进行了故障诊断:如陈峙等人<sup>[36]</sup>对电机电流信号应用调制信号双谱分析方法,实现了与齿轮相关的故障诊断;刘振兴等人<sup>[37]</sup>采用 Hilbert-Huang 变换和广义 Fourier 变换对变频调速电机故障诊断进行了探讨;马宏忠等人<sup>[38]</sup>提出 Hilbert 模量频谱分析方法对转子断条电机和偏心故障电机进行了仿真和实验的研究,取得了较高的诊断精度;胡为等人<sup>[39]</sup>通过合理选取隐马尔可夫模型(hidden Markov model, HMM)的阶次,建立 HMM 故障诊断模型,实现了对电机定子匝间短路故障的诊断;杭俊等人<sup>[40]</sup>利用派克变换和傅里叶变换对电流信号进行分析,根据特征频率幅值变化的特点成功地诊断了电机的故障情况;赵妍等人<sup>[41]</sup>以谱峭度法为基础,结合 Hilbert 包络解调分析方法,通过分析变工况下电机故障数据,对单一的、混合式的电机故障进行了快速而有效的识别。

风力发电机组的电气信号已经被用于风电机组本身的控制和保护等作用,但还未被用于风电机组的故障诊断。通过对电气信号的分析来进行风电机组的故障诊断研究无需增加额外的传感器,且成本较低、信号可靠,因此有必要对风电机组电气信号做进一步分析,获取不同健康状态下的特征,并基于此实现风电机组的故障诊断。另外,国内外学者较多地聚焦于仅利用单一信号(振动或电流信号)来讨论风电机组的故障诊断,较少综合分析振动和电流的信号,因此,探讨融合机、电两类信号的各自特点开展故障诊断的研究工作有待加强。

### 4.3 基于模式识别方法的故障诊断方法

该类故障诊断方法的研究思路为分析风电机组的一类或多类信号,在时域、频域、时频域上构建一组高维的统计特征,用机器学习的方法进行特征的融合、降维、分类和可视化分析,进而实现对装备的故障诊断。如黎敏等人<sup>[42]</sup>对重构的高维流行拓扑结构通过无监督分类分析,成功地提取出了轴承的故障特征;蒋全胜等人<sup>[43]</sup>提出了一种基于拉普拉斯特征映射算法的故障诊断方法,该方法提取出了数据内在的流形特征,极大地保留了故障信号中内含的整体几何结构信息,并成功应用于装备的故障诊断;栗茂林等人<sup>[44]</sup>在局部切空间优化和学习的基础上,提出了一种基于非线性流形学习的故障诊断方法,实现了滚动轴承的故障诊断;Lei Y. G. 等人<sup>[45]</sup>在特征选取和特征加权分析的基础上,提出了一个新的聚类算法应用于轴承的故障诊断;Jin X. H. 等人<sup>[46]</sup>利用线性判别分析方法分别对电机轴承的粗糙度故障和点故障进行了成功的诊断。

现有的故障诊断方法主要采用了无监督和监督的模式识别方法,但是模式识别方法包含了太多的算法,因此有必要继续加强利用无监督和监督的模式识别算法对风电机组进行故障诊断的研究。另外考虑到现实中获取风电机组各种状态下的完整数据(包括健康工作(稳态和动态的工况)、或发生故障(单一故障、多类故障混合)时的数据)耗时较长且成本昂贵;因此,也迫切希望利用现有的有限风电机组健康和故障时的数据对模型进行有效训练和学习<sup>[47]</sup>,并基于此开展对风电机组的已知故障和未知故障的诊断研究,即开展基于半监督模式识别技术的风电机组故障诊断的研究。

## 5 风力发电机组的故障预测技术

风力发电机组,无论设计得多么可靠,制造得多么精良,随着运行时间的增加,其性能必然发生衰退。对比故障诊断,关于风电机组性能的退化与故障预测方面的研究工作历时较短,文献也相对较少,但是随着对生产安全和经济效益的重视,确保装备持续稳定地工作,避免突发事件带来的巨大经济损失和人员伤亡,故障预测已经引起了人们的高度关注<sup>[48-55]</sup>。有统计资料表明,大部分机电装备的故障具有较强的时间依赖性和较好的趋势性指标,因而采取科学有效的故障预测方法往往能够揭示装备性能的退化过程,实现对装备的故障预测。就风电机组而言,大部分风电机组的失效通常不是突然发生的,而是经历了一个变化的、动态的、非线性的过程,即从早期故障的发生、发展、恶化直至失效的过程。早期故障的诊断,支持了对风电机组整个寿命周期两阶段的划分,即正常工作阶段和性能衰退阶段,有力地支持了剩余寿命的预测工作。

目前,主要有以下几种方法可用于故障预测:基于失效物理模型、数据驱动模型和同时利用这两类模型的特点进行融合分析的故障预测方法<sup>[22]</sup>,如图8所示。基于失效物理模型的故障预测方法是指在深入理解风力发电机组的材料特性、失效机理、失效路径以及工作环境的基础上,构建关键物理参量与工作条件、环境、时间等之间的关系,根据当前设备的状况以及预期的使用情况,估计设备的剩余有效寿命。基于数据驱动模型的故障预测方法是指分析产品的历史资料和寿命数据,利用各类数据分析方法提取出有用信息并建立退化模型,基于该模型和当前监测到的信号来判断当前或预测未来某一时刻的健康情况,如图9所示。

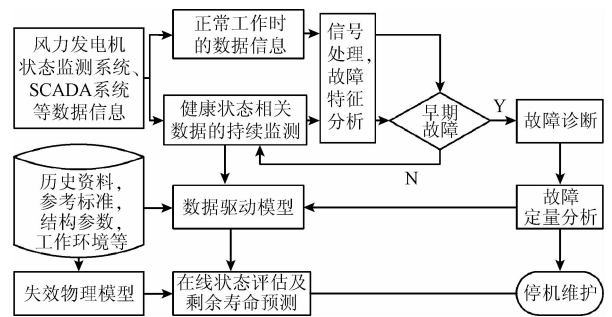


图8 基于失效物理模型和数据驱动模型融合分析的风电机组预测方法

Fig. 8 Physics-of-failure model and data-driven model based fault prognosis approach for wind turbine

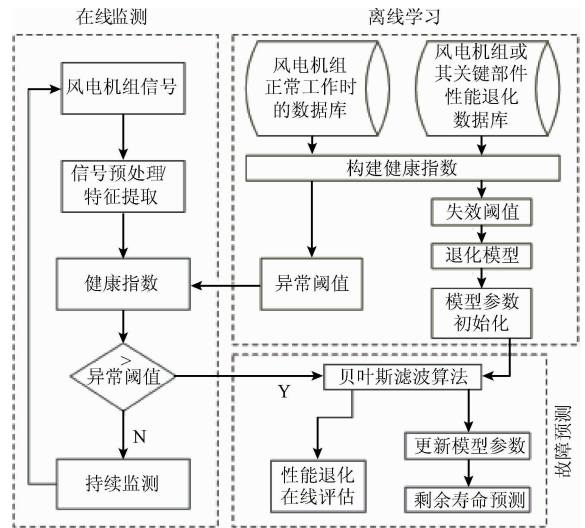


图9 基于数据驱动的故障预测方法

Fig. 9 Data-driven based fault prognosis approach for wind turbine

### 5.1 风电机组中机械结构系统的故障预测方法

风电机组中的机械结构系统,如轴承(包括主轴轴

承、齿轮箱轴承、偏航轴承、变桨轴承等)、齿轮箱、叶片等,因工作环境恶劣、工况复杂多变、承受载荷较重等原因,容易发生失效,由此引发较长的停机时间和高额的维修成本。因此在成功探测到风电机组的早期故障,并基于此进行剩余寿命的预测,对提高风电机组的运行可靠性、优化维护策略、降低维修费用等非常有帮助。

近年来,已有一些学者对风电机组中一些典型的机械构件进行了故障预测的研究:如 Yan J 等人<sup>[56]</sup>利用逻辑回归模型拟合分析装备的性能退化过程,用当前测得的信号评估装备的健康状态,并用自回归滑动平均模型(auto-regressive and moving average model, ARMA)预测了装备的剩余寿命;Wang W 等人<sup>[57]</sup>提出了一个基于 Gamma 过程的方法,对观测到的数据进行分析,用于预测装备的剩余寿命的概率密度分布;HMM 和隐半马尔可夫模型也被用于分析观测到的装备数据,通过状态推理,对轴承的退化过程进行了状态识别和预测<sup>[58-60]</sup>;Batzel T. D. 等人<sup>[61]</sup>运用卡尔曼滤波算法,利用观测到的最新实验数据更新模型参数并预测装备的剩余寿命;Jin X. H. 等人<sup>[62-63]</sup>通过对轴承全寿命周期上的振动信号分析,分别利用扩展卡尔曼滤波技术和无迹卡尔曼滤波技术对轴承的剩余寿命进行了预测研究;Huang R. Q. 等人<sup>[64]</sup>利用自组织映射和反向传播神经网络的方法,对轴承的剩余寿命进行了有效的预测;申中杰等人<sup>[65]</sup>利用相对方均根值来反映轴承性能变化的情况,对包含了此性能指标和其它相对时域特征的特征空间进行敏感特征选取,在此基础上构造多变量支持向量机模型用于预测剩余寿命;Soylemezoglu A 等人<sup>[66]</sup>则采用了马氏田口系统方法,对轴承故障进行了分类和寿命预测的研究;从飞云等人<sup>[67]</sup>利用 Kolmogorov-Smirnov 检验算法对 AR 模型滤波后的噪声信号进行了统计分析,识别出轴承发生异常时的状况,并预测了轴承退化的过程;Wang Y 等人<sup>[68]</sup>基于数据驱动方法,分两步实现了对轴承剩余寿命的预测。总的来说,当前大部分故障预测的工作主要是在单一载荷或稳定工况下对装备性能退化数据分析的基础上展开的。然而风力发电机组工作状态随机性较强、载荷变化频繁、受力情况复杂,风电机组的性能退化过程存在着非线性、动态等特征,采用传统方法进行故障预测分析的难度较大、精确度较低,因此,需要对风电机组动态的性能退化过程构建非线性状态空间模型,采用非线性贝叶斯滤波等算法,来实现风电机组健康状态的在线评估和剩余寿命的预测。

## 5.2 风电机组中电子系统的故障预测方法

电子系统是指包括电气系统、控制系统、传感器、发电机等电类方面的子系统,电子系统是风电机组中故障率最高的子系统,占到风电机组故障的 50% 左右<sup>[1,16]</sup>。随着风电机组单机容量的不断增大以及直驱式风电机组

市场占有率的逐渐提高,电子系统的故障率较高的问题更加引人关注。虽然相对主轴轴承、叶片、齿轮箱等机械结构故障引起的较长停机时间,电子系统的故障引起风电机组的停机时间较短、且更加容易维修,但是电子系统频繁地发生故障,同样导致了昂贵的维修成本。一般来说,机械结构系统的失效往往是由于负载过大、疲劳磨损、润滑不良等原因导致的,而电子系统故障通常是由于电压过高、电流过大、散热不好、老化等原因引起的。另外电子系统从早期故障的发生到失效所经历的时间通常也比较短,其性能衰退过程不像机械结构系统那么明显,且失效模式多样,因而进行电子系统的故障预测往往比较困难。针对电子系统的故障预测,有关学者提出了以下 4 种方法<sup>[21]</sup>:1) 在产品的设计时植入相关的硬件电路和软件功能用于提供自我检测功能,包括发现故障、隔离故障、修复软件故障等的自我测试系统;2) 内建类似于保险丝的保护功能模块;3) 监测关键的参数表征电子器件或系统内部状态的变化;4) 构建不同环境下(温度、振动、辐射等)的应力或疲劳模型,估计故障的程度。

近些年来,一些学者对风电机组中的关键电子零部件进行了故障预测的研究:如 Celaya J 等人<sup>[69]</sup>通过对场效应晶体管(MOSFET)的加速寿命实验研究,识别出可用于表征该功率器件不同健康状况且可被用于开发故障预测算法的关键参量;Patil N 等人<sup>[70]</sup>分析绝缘栅双极型晶体管(IGBT)在热应力实验数据,提出了一个用于表征其性能退化的,且可被用于剩余寿命预测的健康指数;Kulkarni C 等人<sup>[71]</sup>搭建了一个集成的故障诊断与预测的实验平台用于采集电解电容的寿命数据,基于实验数据的分析发现,随着电容性能的衰退,电容的等效串联电阻阻值不断增大并且电容容量逐渐减小。对比于机械结构系统,电子系统的故障预测研究工作历时较短、文献也较少,因此有必要加强对电子系统及其关键元器件的故障预测的研究工作,特别是针对风力发电机组中特有的工作条件、环境下电子系统的故障预测研究。

## 6 基于 SCADA 的风力发电机组故障诊断与预测方法的研究

SCADA 数据采集与监控系统是集成在风电机组中用于记录机组各个子系统和关键部件的运行状态。该系统监测参数众多:即包括电机保护、偏航动作开关等离散参量,又包括温度、风速、振动、电压、电流等连续参量<sup>[72]</sup>。虽然该系统的数据采样频率较低,大部分参数每隔 10 min 采集一次,但是随着风电机组装机容量的快速增长以及运行时间的增加,SCADA 系统采集到非常庞大的,反映不同运行状况的风电机组数据。由于无需在机组中安装额外的数据采集系统,风电机组厂商和风电场

业主等都希望通过分析 SCADA 系统采集到的数据,提取出与风电机组故障相关的信息,进而评估风电机组的健康状态。

由于风电机组工作条件多变、受力情况复杂,即便正常工作时,其运行参数也容易超过 SCADA 系统中预设的安全阈值,从而引发错误的故障警报。国内外风电场运行的经验表明,SCADA 系统发生错误报警的次数较多,且较为频繁,给风电机组的运行维护造成了极大的困难<sup>[73]</sup>。另外由于 SCADA 数据采样频率较低,无法应用传统的状态监测系统中已开发的有效信号处理方法提取到风电机组关键部件的故障特征频率等信息,从而较难实现对风电机组运行状态的在线评估。

近年来,有关学者通过分析风电机组正常运行、故障发生时收集到的 SCADA 数据,构建模型进行风电机组的故障诊断与预测的研究。如 Kusiak W 等人<sup>[74-75]</sup>通过分析 SCADA 数据,挖掘出了与风电机组轴承、电机等关键零部件故障相关的信息:构建数据模型用于揭示主轴和塔架的振动与风电机组运行参量间的关联特性<sup>[74]</sup>;利用神经网络算法,成功诊断出风电机组轴承故障且故障诊断精度高达 96%,并提早 1.5 h 预测到轴承失效<sup>[75]</sup>; Verma A 等人<sup>[76]</sup>利用提升决策树算法,在故障发生 12 h 前,成功地预测到了发电机的电刷故障。Feng Y 等人<sup>[77]</sup>通过建立与齿轮箱相关的物理模型,分析齿轮箱中润滑油温度与齿轮箱转速、发电机功率等之间的关系,利用 SCADA 数据中齿轮箱润滑油温升的信息成功地预测了齿轮箱的失效;Schlechtingen M 等人<sup>[78-79]</sup>对 18 台 2 MW 风电机组的 SCADA 数据进行了长达 35 个月的连续监测学习,提出了一个基于自适应神经网络-模糊推理模型的异常检测系统,成功地检测出了液压系统漏油,冷却系统过滤网堵塞,风速计工作异常等故障。

目前,虽然在利用 SCADA 数据进行风电机组故障诊断与预测方面取得了一些研究进展<sup>[80-81]</sup>,但是 SCADA 数据中隐含的风电机组健康状态的信息,还有待结合其结构、运行工况、工作环境等信息做进一步的挖掘,特别是开发出合理有效的算法用于 SCADA 数据的分析。另外,在利用(监督的,半监督的和无监督的)模式识别算法和时间序列模型对 SCADA 数据进行分析提取出与风电机组健康状况相关的信息方面也有待突破。

## 7 结 论

随着我国陆上风力发电机组装机容量的持续增长和现有风电机组运行时间的增加,以及海上风力发电装备制造进入 2013 年由国家发改委颁布的《产业结构调整指导目录》和国家能源局加快推进我国海上风电开发意见的出台,风电机组的运行可靠性问题将日益突出,对风电

机组的故障诊断与预测技术的需求极大,需推进开发出有效的风电机组在线监测系统。

虽然我国的风电机组装机容量位居世界前列,但是风电机组技术是落后于欧美等发达国家的,特别是在大容量的风电机组和海上风电机组上,我国还处于开发的初期阶段。通过学习和借鉴国外风电机组设计和运行上的经验和教训,可帮助我国提高风电机组工作的可靠性。

进一步加强利用先进的信号处理方法有效提取风电机组早期微弱的故障特征,以及探讨分析风电机组中的电气信号(如发电机、变桨电机的电流信号)对风电机组关键部件进行故障诊断与预测的研究工作。当前大多数风电机组的故障诊断是通过离线分析稳态情况下的信号实现的,考虑到风电机组动态的工作情况,有必要开发在线的且适应于风电机组动态工况下的健康监测系统。

进一步加强基于监督和无监督模式识别技术的风电机组故障诊断方法研究,同时开展半监督的风电机组故障诊断方法的研究:通过对现有的有限风电机组健康和故障数据学习和建模分析,并基于此开展对风电机组的已知、或未知故障的诊断研究。

进一步探讨不同信号对风电机组不同故障的检出效果,研究分析信号的不同特征对风电机组故障有效被检测的贡献程度,综合分析振动、电气等信号,融合分析不同信号之间的耦合特性,同时结合风电机组中机械结构系统和电子系统各自不同的性能退化特点,开发基于失效物理模型和数据驱动模型融合分析的故障预测方法。

基于 SCADA 数据开展风电机组故障诊断与预测方法的研究有待进一步加强,如利用信号处理方法、时间序列模型、模式识别算法、神经网络算法等不同方法分析 SCADA 数据,结合风电机组结构、运行工况、工作环境等信息,进行与风电机组健康状况相关信息的分析挖掘工作。

## 参考文献

- [1] TAVNER P. Offshore wind turbines: Reliability, availability and maintenance [M]. London: The Institution of Engineering and Technology, 2012.
- [2] WALFORD C A. Wind turbine reliability: Understanding and minimizing wind turbine operation and maintenance costs [R]. USA: Sandia National Laboratories, 2006.
- [3] HANSEN A D, HANSEN L H. Wind turbine concept market penetration over 10 years (1995-2004) [J]. Wind Energy, 2007, 10(1):81-97.
- [4] CASELITZ P, GIEBHARDT J. Rotor condition monitoring for improved operational safety of offshore wind energy converters [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2005, 127(2):253-261.



- [5] 申新贺, 叶杭冶, 潘东浩, 等. 风力发电机组的台风适应性设计方法研究[J]. 中国工程科学, 2014, 16(3):70-75.  
SHEN X H, YE H Y, PAN D H, et al. Adaptive design method of wind turbine to typhoon conditions [J]. Engineering Science, 2014, 16(3):70-75.
- [6] 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.  
CHEN X F, LI J M, CHENG H, et al. Research and application of condition monitoring and fault diagnosis technology in wind turbines [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(9):45-52.
- [7] FAULSTICH S, HAHN B, TAVNER P J. Wind turbine downtime and its importance for offshore deployment [J]. Wind Energy, 2011, 14(3):327-337.
- [8] 林鹤云, 郭玉敬, 孙蓓蓓, 等. 海上风电的若干关键技术综述[J]. 东南大学学报, 2011, 41(4):882-888.  
LIN H Y, GUO Y J, SUN B B, et al. Overview of offshore wind power key technologies [J]. Journal of Southeast University, 2011, 41(4):882-888.
- [9] QIAO W, LU D G. A survey on wind turbine condition monitoring and fault diagnosis-Part I: Components and subsystems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(10):6536-6545.
- [10] HAMEED Z, HONG Y S, CHO Y M, et al. Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(1):1-39.
- [11] AMIRAT Y, BENBOUZID M E H, AL-AHMAR E, et al. A brief status on condition monitoring and fault diagnosis in wind energy conversion systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(9):2629-2636.
- [12] HAU E. Wind turbines: Fundamentals, technologies, application, economics [M]. 3rd edition, London: Springer, 2013.
- [13] YANG W X, TAVNER P J, CRABTREE C J, et al. Wind turbine condition monitoring: Technical and commercial challenges [J]. Wind Energy, 2014, 17(5):673-693.
- [14] Global Wind Report 2015: Annual Market Update [R]. Global Wind Energy Council, 2016.
- [15] Energy Research Institute. China wind energy development roadmap 2050 [R]. China: National Development and Reform Commission of P. R. China, 2011.
- [16] RIBRANT J, BERTLING L M. Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997-2005 [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1):167-173.
- [17] HUANG Q, JIANG D X, HONG L Y, et al. Application of wavelet neural networks on vibration fault diagnosis for wind turbine gearbox [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2008, 5264:313-320.
- [18] 苏连成, 李兴林, 李小康, 等. 风电机组轴承的状态监测和故障诊断与运行维护[J]. 轴承, 2012(1):47-53.  
SU L CH, LI X L, LI X L, et al. Condition monitoring and fault diagnosis and operating maintenance systems for wind turbine bearings [J]. Bearing, 2012(1):47-53.
- [19] 朱成党, 涂乐, 林勇刚, 等. 风电机组的机械液压混合传动技术[J]. 浙江大学学报:工学版, 2014, 48(10):1767-774.  
ZHU CH D, TU L, LIN Y G, et al. Hydro-mechanical hybrid power transmission technology in wind turbines [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2014, 48(10):1767-774.
- [20] 周汝胜, 焦宗夏, 王少萍. 液压系统故障诊断技术的研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2006, 42(9):6-14.  
ZHOU R SH, JIAO Z X, WANG SH P. Current research and developing trends on fault diagnosis of hydraulic systems [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(9):6-14.
- [21] VICHARE N M, PECHT M G. Prognostics and health management of electronics [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2006, 29(1):222-229.
- [22] PECHT M G. Prognostics and health management of electronics [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.
- [23] 李辉, 赵猛, 赵斌, 等. 双馈风电机组关键传感器的故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6):73-78.  
LI H, ZHAO M, ZHAO B, et al. Fault diagnosis methods for key sensors of doubly fed wind turbine [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6):73-78.
- [24] 严如强, 钱宇宁, 胡世杰, 等. 基于小波域平稳子空间分析的风力发电机齿轮箱故障诊断[J]. 机械工程学报, 2014, 50(11):9-16.  
YAN R Q, QIAN Y N, HU SH J, et al. Wind turbine gearbox fault diagnosis based on wavelet domain stationary subspace analysis [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(11):9-16.
- [25] BARSZCZ T, ROBERT B. Application of spectral kurtosis for detection of a tooth crack in the planetary gear

- of a wind turbine [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, 23(4):1352-1365.
- [26] 冯志鹏, 褚福磊. 行星齿轮箱故障诊断的频率解调分析方法[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(11):112-117.
- FENG ZH P, CHU F L. Frequency demodulation analysis method for fault diagnosis of planetary gearboxes [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(11):112-117.
- [27] TANG B P, SONG T, LI F. Fault diagnosis for a wind turbine transmission system based on manifold learning and Shannon wavelet support vector machine [J]. *Renewable Energy*, 2014, 62(3):1-9.
- [28] GHOSHAL A, SUNDARESAN M J, SCHULZ M J, et al. Structural health monitoring techniques for wind turbine blades [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2000, 85(3):309-324.
- [29] YACAMINI R, SMITH K S, RAN L. Monitoring torsional vibrations of electro-mechanical systems using stator currents [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 1998, 120(1):72-79.
- [30] KIA S H, HENAL H, CAPOLINO G A. Mechanical transmission and torsional vibration effects on induction machine stator current and torque in railway traction systems [C]. *Proceeding of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2009:3182-3187.
- [31] ZHOU W, LU B, HABETLER T G, et al. Incipient bearing fault detection via motor stator current noise cancellation using Wiener filter [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2009, 45(4):1309-1317.
- [32] STACK J R, HABETLER T G, HARLEY R G. Fault classification and fault signature production for rolling element bearings in electric machines [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2004, 40(3):735-739.
- [33] RAJAGOPALAN S, ALLER J M, RESTREPO J A, et al. Detection of rotor faults in brushless dc motors operating under nonstationary conditions [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2006, 42(6):1464-1477.
- [34] GONG X. Online nonintrusive condition monitoring and fault detection for wind turbines[D]. USA: University of Nebraska-Lincoln, 2012.
- [35] JIN X H, QIAO W, PENG Y Y, et al. Quantitative evaluation of wind turbine faults under variable operational conditions [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2016, 52(3):2061-2069.
- [36] 陈峙, 王铁, 谷丰收, 等. 基于电动机电流信号双谱分析的齿轮传动故障诊断[J]. *机械工程学报*, 2011, 48(21):84-90.
- CHEN ZH, WANG T, GU F SH, et al. Gear transmission fault diagnosis based on the bispectrum analysis of induction motor current signatures [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 48(21):84-90.
- [37] 刘振兴, 李月棠, 张文蓉, 等. 基于HHT和广义Fourier变换变频调速异步电动机故障诊断[J]. *同济大学学报*, 2010, 38(12):1832-1835.
- LIU ZH X, LI Y T, ZHANG W R, et al. Fault diagnosis way based on HHT and generalized Fourier transform in induction motor fed with variable frequency power [J]. *Journal of Tongji University*, 2010, 38(12):1832-1835.
- [38] 马宏忠, 姚华阳, 黎华敏. 基于Hilbert模量频谱分析的异步电机转子断条故障研究[J]. *电机与控制学报*, 2009, 13(3):371-376.
- MA H ZH, YAO H Y, LI H M. Study on rotor broken-bar fault in induction motors based on spectrum analysis of Hilbert modulus [J]. *Electric Machines and Control*, 2009, 13(3):371-376.
- [39] 胡为, 高雷, 傅莉. 基于最优阶次HMM的电机故障诊断方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(3):524-530.
- HU W, GAO L, FU L. Research on motor fault detection method based on optimal order hidden Markov model [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(3):524-530.
- [40] 杭俊, 张建忠, 程明, 等. 直驱永磁同步风电机组叶轮不平衡和绕组不对称的故障诊断[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(9):1384-1391.
- HANG J, ZHANG J ZH, CHENG M, et al. Fault diagnosis of blade imbalance and winding asymmetry of direct-driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(9):1384-1391.
- [41] 赵妍, 李志民, 李天云. 一种基于谱峭度的异步电机故障诊断方法[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(5):189-196.
- ZHAO Y, LI Z M, LI T Y. A method for fault diagnosis of induction motors based on spectral kurtosis [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(5):189-196.
- [42] 黎敏, 徐金梧, 阳建宏, 等. 一种基于流形拓扑结构的轴承故障分类方法[J]. *控制工程*, 2009, 16(3):358-362.
- LI M, XU J W, YANG J H, et al. Classification method of bearing faults based on topological structure of

- manifold [J]. *Control Engineering of China*, 2009, 16(3):358-362.
- [43] 蒋全胜, 贾民平, 胡建中, 等. 基于拉普拉斯特征映射的故障模式识别方法[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(20):5710-5715.  
JIANG Q SH, JIA M P, HU J ZH, et al. Method of fault pattern recognition based on Laplacian Eigenmaps [J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20 ( 20 ): 5710-5715.
- [44] 栗茂林, 王孙安, 梁霖梁. 基于非线性流形学习的轴承早期故障特征提取方法[J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(5):45-49.  
LI M L, WANG S AN, LIANG L L. Feature extraction for incipient fault diagnosis of rolling bearings based on nonlinear manifold learning [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44(5):45-49.
- [45] LEI Y G, HE Z J, ZI Y Y, et al. New clustering algorithm based fault diagnosis using compensation distance evaluation technique [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2008, 22(2):419-435.
- [46] JIN X H, ZHAO M B, CHOW T W S, et al. Motor bearing fault diagnosis using trace ratio linear discriminant analysis [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(5):2441-2451.
- [47] JIANG W M, ZHANG Z, LI F, et al. Joint label consistent dictionary learning and adaptive label prediction for semi-supervised machine fault classification [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, 12(1):248-256.
- [48] 徐东, 徐永成, 陈循, 等. 基于临界曲面的改进 Paris 定律球轴承疲劳寿命预测方法[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(2):51-57.  
XU D, XU Y CH, CHEN X, et al. Fatigue life prediction of ball bearings by modified Paris law based on critical curved surface [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(2):51-57.
- [49] 刘大同, 周建宝, 郭力萌, 等. 锂离子电池健康评估和寿命预测综述[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(1):1-16.  
LIU D T, ZHOU J B, GUO L M, et al. Survey on lithium-ion battery health assessment and cycle life estimation [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(1):1-16.
- [50] 彭宇, 刘大同. 数据驱动故障预测和健康管理综述[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(3):481-495.  
PENG Y, LIU D T. Data-driven prognostics and health management: A review of recent advances [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35 ( 3 ): 481-495.
- [51] 张慧源, 许力, 鲁二峰, 等. 基于混合粒子滤波的电力设备载流故障预测 [J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(6):1421-1427.  
ZHANG H Y, XU L, LU E F, et al. Current-carrying fault prediction of electric equipment based on hybrid particle filtering [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(6):1421-1427.
- [52] 刘月峰, 赵光权, 彭喜元. 锂离子电池循环寿命的融合预测方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(7):1462-1469.  
LIU Y F, ZHAO G Q, PENG X Y. A fusion prediction method of lithium-ion battery cycle-life, *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(7):1462-1469.
- [53] 刘浩然, 吕晓贺, 李轩, 等. 基于 Bayesian 改进算法的回转窑故障诊断模型研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(7):1554-1561.  
LIU H R, LV X T, LI X, et al. A study on the fault diagnosis model of rotary kiln based on an improved algorithm of Bayesian [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(7):1554-1561.
- [54] JARDINE A K S, LIN D, BANJEVIC D. A review on machinery diagnostics and prognostics implements condition-based maintenance [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, 20(7):1483-1510.
- [55] AN D, KIM N H, CHOI J H. Practical options for selecting data-driven or physics-based prognostics algorithms with reviews [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, 133(1):223-236.
- [56] YAN J, KOC M, LEE J. A prognostic algorithm for machine performance assessment and its application [J]. *Production Planning & Control: The Management of Operations*, 2004, 15(8):796-801.
- [57] WANG W, SCARF P A, SMITH M A J. On the application of a model of condition-based maintenance [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2000, 51(11):1218-1227.
- [58] 冯辅周, 司爱威, 江鹏程. 小波相关排列熵和 HMM 在故障预测中的应用 [J]. *振动工程学报*, 2013, 26(2):269-276.  
FENG F ZH, SI AI W, JIANG P CH. Application of wavelet correlation permutation entropy and hidden Markov model to fault prognostic [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2013, 26(2):269-276.
- [59] 曾庆虎, 邱静, 刘冠军, 等. 基于 KPCA-HSMM 设备退化状态识别与故障预测方法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(7):1341-1346.  
ZENG Q H, QIU J, LIU G J, et al. Research on

- equipment degradation state recognition and fault prognostics method based on KPCA-hidden semi-Markov model [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(7):1341-1346.
- [60] 胡海峰, 安茂春, 秦国军, 等. 基于隐半 Markov 模型的故障诊断和故障预测方法研究[J]. *兵工学报*, 2009, 30(1):69-75.  
HU H F, AN M CH, QIN G J, et al. Study on fault diagnosis and prognosis methods based on hidden semi-Markov model [J]. *ACTA Armamentarii*, 2009, 30(1):69-75.
- [61] BATZEL T D, SWANSON D C. Prognostic health management of aircraft power generators [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(2):473-483.
- [62] JIN X H, SUN Y, QUE Z J, et al. Anomaly detection and fault prognosis for bearings [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, 65(9):2046-2054.
- [63] 阙子俊, 金晓航, 孙毅. 基于 UKF 的轴承剩余寿命预测方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(9):2036-2043.  
QUE Z J, JIN X H, SUN Y. Remaining useful life prediction for bearings with the unscented Kalman filter-based approach [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(9):2036-2043.
- [64] HUANG R Q, XI L F, LI X L, et al. Residual life predictions for ball bearings based on self-organizing map and back propagation neural network methods [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, 21(1):193-207.
- [65] 申中杰, 陈雪峰, 何正嘉, 等. 基于相对特征和多变量支持向量机的滚动轴承剩余寿命预测[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(2):183-189.  
SHEN ZH J, CHEN X F, HE ZH J, et al. Remaining life predictions of rolling bearing based on relative features and multivariable support vector machine [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(2):183-189.
- [66] SOYLEMEZOGLUE A, JAGANNATHAN S, SAYGIN C. Mahalanobis-Taguchi system as a multi-sensor based decision making prognostics tool for centrifugal pump failures [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2011, 60(4):864-878.
- [67] 从飞云, 陈进, 董广明. 基于 AR 模型的 Kolmogorov-Smirnov 检验性能退化及预测研究[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(10):79-82.  
CONG F Y, CHEN J, DONG G M. Kolmogorov-Smirnov test performance degradation assessment and prognosis based on AR model [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(10):79-82.
- [68] WANG Y, PENG Y Z, ZI Y Y, et al. A two-stage data-driven based prognostic approach for bearing degradation problem [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, 12(3):924-932.
- [69] CELAYA J, SAXENA A, WYSOCKI P, et al. Towards prognostics of power MOSFETs: Accelerated aging and precursors of failure [C]. *Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, 2010:1-10.
- [70] PATIL N, CELAYA J, DAS D, et al. Precursor parameter identification for insulated gate bipolar transistor (IGBT) prognostics [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2009, 58(2):271-276.
- [71] KULKANI C, BISWAS G, KOUTSOUKOS X, et al. Integrated diagnostic/prognostic experimental setup for capacitor degradation and health monitoring [C]. *Institute of Electrical and Electronics Engineering*, 2010:1-7.
- [72] 梁颖, 方瑞明. 基于 SCADA 和支持向量回归的风电机组状态在线评估方法[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(14):7-12.  
LIANG Y, FANG R M. An online wind turbine condition assessment method based on SCADA and support vector regression [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(14):7-12.
- [73] ZAHER A, MCARTHUR S D J, INFELD D G. Online wind turbine fault detection through automated SCADA data analysis [J]. *Wind Energy*, 2009, 12(6):574-593.
- [74] KUSIAK W, ZHANG Z. Analysis of wind turbine vibrations based on SCADA data [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2010, 132(3):031008-1-031008-12.
- [75] KUSIAK W, VERMA A. Analyzing bearing faults in wind turbines: A data-mining approach [J]. *Renewable Energy*, 2012, 48(6):110-116.
- [76] VERMA A, KUSIAK W. Fault monitoring of wind turbine generator brushes: A data-mining approach [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2012, 134(2):021001-1-021001-9.
- [77] FENG Y, QIU Y, CRABTREE C J, et al. Monitoring wind turbine gearboxes [J]. *Wind Energy*, 2013, 16(5):728-740.
- [78] SCHLECHTINGEN M, SANTOS I F, ACHICHE S. Wind turbine condition monitoring based on SCADA data using normal behavior models. Part 1: System

- description [J]. *Applied Soft Computing*, 2013, 13(1):259-270.
- [79] SCHLECHTINGEN M, SANTOS I F. Wind turbine condition monitoring based on SCADA data using normal behavior models. Part 2: Application examples [J]. *Applied Soft Computing*, 2014, 14(C):447-460.
- [80] RODRIGUEZ-LOPEZ M A, LOPEZ-GONZALEZ L M, LOPEZ-OCHOA L M, et al. Development of indicators for the detection of equipment malfunctions and degradation estimation based on digital signals (alarms and events) from operation SCADA [J]. *Renewable Energy*, 2016, 99(12):224-236.
- [81] SUN P, LI J, WANG C. et al. A generalized model for wind turbine anomaly identification based on SCADA data [J]. *Applied Energy*, 2016, 168(4):550-567.

### 作者简介



**金晓航** (通讯作者), 2003年于浙江工业大学获得学士学位, 2006年于上海交通大学获得硕士学位, 2014年于香港城市大学获得博士学位, 现为浙江工业大学机械工程学院副教授, 主要研究方向为机电装备的可靠

性分析、健康监测、故障诊断、寿命预测和智能维护。

E-mail: xhjin@zjut.edu.cn

**Jin Xiaohang** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Zhejiang University of Technology in 2003, M. Sc. degree from Shanghai Jiao Tong University in 2006 and Ph. D. degree from City University of Hong Kong in 2014. Now, he is an associate professor in College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology. His main research interest includes reliability evaluation, health monitoring and fault diagnosis and prognosis.



**吴根勇**, 分别在2005年和2011年于西北工业大学获得学士学位和博士学位, 现为浙江运达风电股份有限公司高级机械设计工程师, 主要研究方向为风电机组整机动力学。

E-mail: wugy@chinawindecy.com

**Wu Genyong** received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Northwestern Polytechnical University in 2005 and 2011, respectively. Now, he is a senior mechanical engineer in Zhejiang Windecy Co., LTD. His main research interest includes wind turbines and their mechanical dynamics.