DOI：10.3901/JME.2011.09.045

风力发电机状态监测和故障诊断技术的研究与进展*

陈雪峰 李继猛 程 航 李 兵 何正嘉
(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 西安 710049)

摘要：针对目前迅猛发展的风电装备缺乏有效监测诊断方法开展综述，指出其研究现状和值得研究的问题。综述风力发电机的发展现状、故障特点和诊断难点，风力发电机的装机容量和规模都在逐年扩大，目前基于振动监测的风力发电机在线诊断系统尚属空白，其运行维护费用增加以及频繁事故发生所造成的巨大损失严重影响了风电的经济效益。针对风力发电机中的主要故障部件，如齿轮箱、发电机、叶片等，介绍现有状态监测和故障诊断方法的研究现状。结合风力发电机工作在变转速、不稳定载荷等工况下的特点，指出研究重点是需要针对这一新型装备研究其故障机理和特定的诊断方法，研发适合于风力发电机特点的在线状态监测和故障诊断系统。

关键词：风力发电机 状态检测 故障诊断 齿轮箱 发电机 叶片
中图分类号：TH12

Research and Application of Condition Monitoring and Fault Diagnosis Technology in Wind Turbines

CHEN Xuefeng LI Jimeng CHENG Hang LI Bing HE Zhengjia
(State Key Laboratory for Manufacturing System, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract: In view of the wind power equipment developing rapidly but lacking effective monitoring and diagnosis methods, the research status and problems worth studying are pointed out. The current situation, fault features and diagnostic difficulties of wind turbines are summarized. The installed capacity and scale of wind turbines are enlarging year by year, but currently on-line diagnosis system of wind turbine based on vibration monitoring is still a blank. The economic benefits of wind power are seriously affected by operation and maintenance costs as well as huge losses caused by frequent accidents of wind turbine. The research situation of the existing condition monitoring and fault diagnosis methods for the main failure components of wind turbines are introduced, such as gear boxes, generators and blades. According to the characteristics of wind turbines working in the condition of variable speed, unstable loads, etc., the research emphasis should be the failure mechanism, specific diagnostic methods of the new-type equipment, online condition monitoring and fault diagnosis systems suitable for the characteristics of wind turbines.

Key words: Wind turbines Condition monitoring Fault diagnosis Gearbox Generator Blade

0 前言

随着能源危机和环境污染问题的日益严重，作为绿色能源的风能已受到世界各国的高度关注和重视，我国中长期规划明确支持“重点研究开发大型风力发电设备”，风电装备由此得到了迅猛发展。2009 年，全球风力发电机(简称风力机)装机容量已达到 159 213 MW，新增装机容量 38 312 MW，增长率为 31.7%。根据目前的增长趋势，世界风能协会预测到 2020 年底，全球装机容量至少为 1.9×10^6 MW。中国则继续在世界风能发展中发挥领军作用，2009 年中国新增装机容量为 1.38×10^4 MW，第 4 次实现超过 1 倍的增长。与此同时，全球海上风电也实现了持续增长，海上风电总的装机容量占全球风电装机容量的 1.2%。截止 2009 年底，全球风力发

* 国家自然科学基金重点(51035007)和全国优秀博士论文专项资金(2007B33)资助项目。20100720 收到初稿，20110311 收到修改稿

电量达到每年 3.4×10^8 MW•h，占全球电力供应总量的 2%[1]。

在风电迅猛发展的同时，风力机高额的运行维护成本影响了风场的经济效益。风场一般地处偏远、环境恶劣，并且机舱位于 50～80 m 以上的高空，给机组的维护维修工作造成了困难，增加了机组的运行维护成本。对于工作寿命为 20 年的机组，运行维护成本估计占到风场收入的 10%～15%；对于海上风场，用于风力机运行维护的成本高达风场收入的 20%～25%[2]。高额的运行维护费用增加了风场的运营成本，降低了风电的经济效益。因此，无论是从降低风力机的运行风险，还是减少运作成本的角度考虑，都需要大力发展风力机状态监测和故障诊断技术。

针对风力发电这一新型装备制造业，目前尚缺乏有效的监测诊断方法，其有效的在线振动监测诊断系统可以说还是空白。风力机容量的增加，使得风力机体积变大，发生事故的概率增大。面对风力机事故发生频繁以及造成的巨额损失，风力机的状态监测技术引起了国内外相关人员的极大关注。但鉴于现代风力机的运行特点，传统的状态监测方法虽然可以实现故障的有效诊断，但存在一定的局限性，尤其是在线状态监测方面，问题尤为突出。选择合适的状态监测方法，实现风力机故障的有效诊断是现在风力机状态监测面临的主要问题。本文在简要介绍风电发展趋势的基础上，主要介绍了风力机的主要故障部件和现有的状态监测方法，以及有待研究的一些问题。

1 研究背景

风能作为一种清洁的可再生能源，越来越受到世界各国的重视。全球的风能约为 2.74×10^9 MW，其中可利用的风能为 2×10^7 MW，比地球上可开发利用的水能总量还要大 10 倍[3]。我国幅员辽阔，海岸线长，风能资源丰富，开发利用的前景广阔。据气象部门统计，中国陆上离地 10 m 高度风能资源总储量约 4.35×10^6 MW，其中技术可开发量为 2.97×10^5 MW，海上 10 m 高度可开发和利用的风能储量约为 7.5×10^5 MW[4]。中国气象局公布我国首次风能资源详查和评价取得的新进展和阶段性成果[5]：我国陆上离地面 50 m 高度达到 3 级以上风能资源的潜在开发量约 2.38×10^6 MW；我国 5～25 m 水深线之间近海区域、海平面以上 50 m 高度可装机容量约 2×10^5 MW。巨大的风能储量为风电事业的发展提供了先决条件。

2009 年，全球风电装机容量又创新高，即使有全球经济危机的影响，风电整机的新增投资依然超过历年。表 1 是全球 2006～2009 年装机容量统计值[1]。依据目前的增长态势和相关支持政策的出台，世界风能协会预测 2020 年全球的整机装机容量将达到 1.9×10^{-6} MW。

表 1 2006～2009 年全球装机容量统计

年份	装机容量 *P*/MW
2005	59 012
2006	74 123
2007	93 930
2008	120 903
2009	159 213

我国的风力发电是于 20 世纪 50 年代后期开始进行研究和试点工作的。根据中国风能协会的统计数据，截止到 2009 年，我国(不含台湾省)新增装机容量达到 13 803.2 MW，年同比增长 124%，累计装机容量达到 2.58×10^4 MW，年同比增长了 114%，增长率连续 4 年超过百分之百[6]，居世界第 1，累计装机容量超越德国，位列全球第 2，成为增长速度最快的国家。据我国新能源产业振兴规划草案，明确到 2020 年，风电装机容量将达到 1.5×10^5 MW，这意味着 2009 年到 2020 年 12 年间，全国风电装机将净加 1.38×10^5 MW，年均新增装机约 1.2×10^4 MW[7]。风力发电已经成为解决能源问题的不可缺少的重要力量。

风电的快速发展给风电设备制造业带来了巨大的市场机会。世界风电设备制造业主要集中在欧洲的丹麦、德国、西班牙和亚洲的印度，北美洲的美国。其中欧洲地区的风电设备制造业生产能力占世界的 50%以上，是重要的风电设备生产地，也是最大的风电设备出口地区。在国家规划的指引和风电设备国产化等相关政策的扶持下，我国风电产业取得长足的进步。目前已涌现出 80 多家风电设备整机制造企业，以及一大批与整机配套的零部件制造企业，包括兆瓦级机组在内的国产风电设备陆续下线并投入运行。随着国内风电整机制造业的逐步发展壮大，产品投运量和市场占有率也在快速增加，从 2005 年的 29%，到 2006 年的 41%，2007 年首次超过了 50%[8]。

风电的快速发展给风电设备制造业也带来了巨大挑战。单机容量的增大，使得风力机规模增大；风力机规模的增大，又对风力机性能、质量的安全性、可靠性提出了更高的要求。风力机机组的优良质量和高可靠性是风力发电的根本要求。风电机组在非常恶劣的气候条件和交变载荷工况下全天候运

行，如果风电机组质量不高、可靠性差，导致实际可利用率低，维修维护费用较高，运营成本增加，严重损害风力发电的经济效益。表 2 是某风场风力机事故数据(数据统计日期截止到 2010 年 3 月 31 日)[9]。

表 2　风力机事故统计

年份	数量	年份	数量
1980	8	2004	52
1981～1994	17	2005	56
1995～1999	71	2006	57
2000	29	2007	83
2001	12	2008	112
2002	63	2009	106
2003	51	2010	13

我国的风电制造业通过运用中外合资、技术引进、自主开发、外商独资等不同发展模式取得了一定的成果，但也面临着一系列严重问题。尤其是兆瓦级机组的质量和运行可靠性问题尤为突出。陆地上一台 1.5 MW 的大型风力机，塔架高达 70 m 左右，齿轮箱质量 15 t 左右，如果齿轮箱发生故障，仅拆装费用就可高达 70 万元以上，如果再加上运输和维修费用，则至少高达 100 万元，这相当于风力机生产总成本的 10%，而且还会导致风力机停机数月之久，给风场的生产带来巨大的损失。海上风力机由于拆装的困难，维护需要出动大型轮船和坦克吊车，甚至调动直升机，其维护成本至少是陆地的 2 倍以上。面对风力机运行过程中出现的各种故障问题，如何有效降低故障带来的损失，避免重大故障发生是风力机安全可靠、高效运行的重要保证。状态监测技术可以实现对风力机各个部件的实时观测，掌握运行过程中的状态信息，及时发现故障隐患，采取有效措施避免重大事故的发生，同时改定期维护和事后维护为预测维护，可以有效降低运行维护成本，提高风电的经济效益。

2　风力发电机组的故障特点

风电机组主要分为三类：① 双馈式变桨变速机型，是目前大部分企业采用的主流机型；② 直驱永磁式变桨变速机型是近几年发展起来的，是未来风电的发展方向之一；③ 失速定桨定速机型是非主流机型，运行维护方便[10]。考虑到目前风场中主要以双馈式变桨变速机型为主，故本文内容主要针对该机型的故障及状态监测方法加以讨论。

风力发电机由风轮及变桨距系统、轮毂、结构(机舱、地基和塔架)、传动装置、齿轮箱、发电机、电气系统、控制系统、传感器、刹车系统、液压系统和偏航系统等构成[11]。风电机组首先将风能通过风轮转换成机械能，再借助主轴、齿轮箱等传动系统和发电机将机械能转换成电能，从而实现风力发电。风力发电机组一般都设在 50～80 m 或以上的高空，其工作环境恶劣复杂，机组的受力情况也很复杂。风力发电机组在工作过程中，桨叶的转速是随风速的变化而变化。当阵风袭来，叶片受到短暂而频繁的冲击载荷，而这个冲击载荷也会传递到传动链上的各个部件，使得各个部件也受到复杂交变的冲击，对其工作寿命造成极大的影响，使风力机在运行过程中出现各种故障，尤其是风轮以及与其刚性连接的主轴、齿轮箱、发电机等在交变载荷的作用下很容易出现故障，造成机组停机。表 3 是西班牙纳瓦拉水电能源集团公司(EHN)对 2001～2003 年风力发电机主要部件的故障比例统计。据统计其中行星齿轮段占 54%，中间轴占 4%，高速轴占 38%，其他原因占 4%[12]。

表 3　EHN 公司风力发电机故障比例统计　　%

年份	齿轮箱	发电机	叶片
2001	48	21	31
2002	56	27	17
2003	60	29	11

近年来，在国家政策的大力支持下，我国自行研发的风力发电机组已逐步占有市场，市场份额比例也在逐年上升，但是在引进国外先进技术的同时，欠缺对我国特殊的气候环境和地理因素的考虑，致使产品质量问题越来越突出。在国家相关部门的调研中发现[8]，各整机制造企业在运行和调试过程中均出现过质量问题，问题部件及原因如表 4 所示。

表 4　风电整机及零部件部分产品质量问题与原因

问题	原因
齿轮箱齿断裂	设计缺陷
齿轮箱漏油	设计不合理
齿轮箱行星轮松动	生产工艺不合理
主轴断裂	材料中含氢量过高
叶尖液压缸漏油	缸体加工精度不高
偏航减速器变形	装配工艺缺陷
电气零件损坏	常见故障
雷电将塔顶柜和塔底柜击穿	防雷设计方案不完善
机架出现焊缝断裂	设计不合理、焊接质量不到位

风场多位于偏远的山区或近海区域，交通不便，并且机组处于高空，一旦机组的某些部件出现故障，不仅长时间停机造成发电量损失，而且整个机组的重新吊装和部件更换，都需要极大的人力和物力。长期以来，风力发电机采用的是计划维修和事后维修的方式。计划维修即机组运行 2 500 h 和 5 000 h 后的例行维护，如：检查螺栓是否松动、抽

检油样、加注润滑油等。这种维修方式无法全面、及时地了解设备的运行状况；而事后维修则由于事先准备不足，造成维修工作耗时太长，损失严重。所以，必须在风力发电机组运行过程中实时监控各关键部件的运行状态，及时了解各部件存在的故障隐患，以便及时采取措施，防止造成严重损失，提高风力发电机组运行的可靠性，延长其使用寿命。状态监测和故障诊断技术可以在机组不停机的情况下，对其进行连续监控，实时了解设备的健康状态，及时发现故障隐患，避免重大事故的发生，并且得到的机组长时间运行状态数据对零部件后续的设计改进有积极的指导作用。

通过国内外的统计数据可以发现，风力发电机组的典型故障主要集中在叶片、齿轮箱、发电机等部位。针对不同的故障部件和故障特征，采取合适的故障诊断方法是有效实施状态监测和故障诊断技术的保证。

3 风力发电机的监测诊断技术

3.1 齿轮箱

齿轮箱位于机舱内，是风力机传动链上的重要部件，是连接主轴和发电机的重要枢纽。齿轮箱一般由一级行星齿轮传动和两级平行齿轮传动构成，内部结构和受力情况较为复杂，尤其是在变工况、变载荷的情况下运行，容易发生故障。齿轮箱的常见故障包括齿轮故障和轴承故障，轴承作为齿轮箱的关键部件，其失效常常会引起齿轮箱灾难性的破坏。常见的齿轮故障有：断齿、齿面疲劳、胶合等；轴承故障有：磨损、点蚀、裂纹、表面剥落等。表5是瑞典皇家理工学院的可靠性评估管理中心对分布于瑞典的风力机齿轮箱故障类型的统计数据[11]。

表5 齿轮箱故障类型

故障部位	故障次数 n_1	平均停机时间 t_1/h	磨损故障次数 n_2
轴承	41	562	36
齿轮	3	272	2
密封	8	52	4
润滑系统	13	26	5

齿轮箱是风力机正常、高效运行的保障。风电技术的快速发展和单机容量的增加，使得风力机的规模越来越大，对其性能的要求也越来越高。随着大重型机组的投入运行，齿轮箱的故障频率也随之增加。据统计，一台风力机故障停机时间的20%是由齿轮箱故障引起的。一旦齿轮箱出现问题，除了高额的维修费用，长时间停机造成的发电量损失也是巨大的。表6是1997～2004年瑞典皇家理工学院对瑞典风力机齿轮箱故障时间统计数据[11]。

表6 瑞典1997～2004年风力机齿轮箱故障时间统计

年份	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
故障次数 n_1	21	41	52	26	30	42	13	7
总停机时间 t_2/h	4 031	2 518	5 061	6 172	5 228	12 589	3 987	2 309
平均每次停机时间 t_3/h	192	61	97	237	174	300	307	330

面对风力机齿轮箱故障的频繁发生以及造成的巨额损失，近年来，已有不少科研人员对风力机齿轮箱的故障检测进行了研究。振动测量方法是技术最成熟、最普及的一种故障检测方法。唐新安等[13]借助时域信号的统计指标实现了对齿轮箱故障的初步诊断，然后借助传统的快速傅里叶变换(Fast Fourier transform, FFT)和功率谱对诊断结果进一步加以确认。众所周知，故障特征频率是判断齿轮、轴承等健康状态的重要指标。借助故障特征频率可以实现故障的准确定位，提高诊断精度[14]。时频分析方法是结合了时域和频域的双重信息，适用于非平稳信号的处理方法。常见的时频分析方法有小波分析、短时傅里叶变换以及经验模态分解等。BARSZCZ 等[15]提出了利用谱峭度诊断行星齿轮箱故障的方法。谱峭度具有对冲击信号敏感的特性，利用谱峭度可以检测出信号中的冲击成分，从而诊断出故障原因。HUANG 等[16]研究了小波神经网络在风力机齿轮箱故障诊断中的应用。该方法借助小波变换的时频分析特性和神经网络的自学习功能，将小波函数作为神经网络的隐含层，提高了诊断精度，减少了神经网络的层数，加快了收敛速度。INALPOLAT 等[17]对行星齿轮箱的建模和动力学行为进行了研究，为阐述其复合传动引起的故障相互调制和耦合等故障机理提供了依据。

温度测量方法是基于零部件的温度变化实现异常状态识别的诊断方法。温度作为状态量，测量方便，操作简单。鉴于温度测量方法的简单易行等特点，该方法已集成在风力机的控制系统中，用于检测齿轮箱、发电机以及主轴等部件的健康状态。

3.2 发电机

发电机是风电机组的核心部件，负责将旋转的机械能转化为电能，并为电气系统供电。随着风力机容量的增大，发电机的规模也在逐渐增加，使得对发电机的密封保护受到制约。发电机长期运行于变工况和电磁环境中，容易发生故障。常见的故障模式有发电机振动过大、发电机过热、轴承过热、转子/定子线圈短路、转子断条以及绝缘损坏等。据

统计，在发电机的所有故障中，轴承的故障率为40%，定子的故障率为38%，转子的故障率为10%，其他故障占12%[18]。

根据发电机的故障特点，采用的诊断方法主要是基于转子/定子电流信号、电压信号以及输出功率信号等状态检测手段。POPA 等[18]借助定子电流和转子电流信号的时域分析得到其幅值信息，再通过FFT 得到电流信号的谐波分量，最后通过判断谐波分量的变化实现对发电机 3 种模拟故障的识别。WATSON 等[19]借助连续小波变换，对输出功率信号进行分析，识别出了发电机转子偏心故障和轴承故障。DJUROVIC 等[20]研究了稳态状况下，短时傅里叶变换方法在发电机定子开环故障中的应用。通过对比发现，虽然基于定子电流和瞬时功率的诊断方法均可识别出故障，但瞬时功率信号中包含了更多的故障信息。发电机的转子偏心现象是轴承过度磨损或其他故障隐患的表现。基于输出电流、电压、功率等信号的检测方法是识别转子偏心故障的有效手段。此外，MOHANTY 等[21]针对多级齿轮箱研究通过解调异步发电机的电流信号来诊断齿轮箱故障。

另外，BENNOUNA 等[22]在变转速下建立了基于多项式的双馈式异步发电机线性与非线性数学模型，利用故障特征分析法检测出了转子偏心故障，但是此方法也仅能判断发电机出现故障类型，而不能准确找出故障源。YANG 等[23]针对同步发电机为消除变转速的影响，提出了基于转矩和主轴转速的判断准则。模拟定子绕组线圈的短路，对发电机定子绕组电流/功率信号，先用离散小波去除噪声，再使用连续小波提取特征频率，有效地识别出了故障。

3.3 叶片

叶片是风力发电机组吸收风能的关键部件。叶片长期露天工作在恶劣的环境下，难以避免受到湿气腐蚀、阵风或雷击等因素的破坏以及长时间运行产生的疲劳裂纹等故障隐患。风力机叶片长度一般在 30～40 m，由纤维增强型复合材料组成，体积质量巨大，一旦发生故障，不仅造成叶片本身的损坏，还会对整机的安全产生致命性损伤。因此，研究风力机叶片的状态检测方法，对于降低故障损失，保证机组长时间安全运行具有重要意义。

目前，国内虽然在风力机叶片的设计制造技术方面取得了一定的研究成果，如清华大学针对风力机叶片在运行过程中出现的颤振等现象综述了叶片气动弹性稳定性问题的研究成果[24]，为风力机叶片的设计提供理论依据。但现有文献对其运行过程中的状态检测技术研究的较少，GHOSHAL 等[25]基于振动测量方法，利用压电陶瓷传感器捕捉振动信号，提出了 4 种用于叶片故障诊断的方法。传递函数和动态变形分析方法需借助多普勒激光扫描测振仪和叶片健康状态时的测量数据作为参考，虽然诊断结果较为准确，但难以在实际中应用；响应比较和波动传播分析方法只需压电陶瓷传感器和激振器，借助传感器信号之间的比较判断叶片是否存在异常。波动传播方法只对位于传感器和激振器之间的故障敏感，有一定的局限性；但响应比较分析方法算法简单、对历史数据要求低。SCHROEDER 等[26]基于安装在运行风力机叶片中的光纤光栅传感器测量系统的成功运行，介绍了用光纤光栅传感器实现风力机叶片的在线监测的可行性。根据风力机叶片在运行过程中的载荷变化，借助叶片上对称分布的光纤光栅传感器捕捉应变信号，评判叶片健康状态。SUNDARESAN 等[27]利用压电陶瓷传感器捕捉叶片中的应力应变波形，通过分析这些波形的传播特性实现对叶片的故障识别。

可见，对于叶片的故障检测，主要是根据材料在不同受力情况下的应力应变变化，从而识别出故障状态。应力应变检测方法是通过应力应变传感器(光纤光栅传感器)检测叶片在运行过程中应力应变的变化范围，从而确保叶片的安全运行，并且该方法对于预测叶片寿命也非常有效。光纤光栅传感器具有较好的抗电磁干扰、抗腐蚀、尺寸小、寿命长等优点，适合叶片结构的状态检测。但叶片损伤容限准则尚未有效建立，基于光纤光栅传感器获得的信号难以与叶片损伤模式对应，YE 等[28]针对复合材料损伤的失效容限和性能退化预测进行了相关研究工作。

此外，国外相关人员还利用现代无损检测手段对叶片的健康状态进行识别。声发射检测方法是利用物体内部因应力集中产生断裂、变形时释放的应变波来识别被检部件的异常情况。风力机叶片长期受到空气动力的交变冲击以及腐蚀等，会产生裂纹、变形等异常，可借助声发射检测[29]。红外成像检测方法是利用物体在不同温度下辐射出来的红外线成像识别异常状况。物体表面的健康状态(裂纹、剥落等)会影响热辐射的能量分布，利用该特点，红外成像检测方法可用于零部件表面裂纹的诊断识别[30]。虽然国外在风力机叶片故障诊断方面取得了一定的研究成果，但主要还是处于试验阶段，应用到实际中还需要一定的时间。

3.4 桨距控制系统、电气系统与偏航系统

采用桨距控制除可控制转速外，还可减少转子和驱动链中各部件的压力，并允许风力机在很大风力下运行，目前主流的调速方式采用变桨距结构。

其一般有两种传动机构：齿轮式与连杆式。在大型风力机中，常采用电子控制的液压机构来控制叶片的桨距，液压调节器控制齿轮或连杆推动叶片。变桨距系统转速极低、运行不连续、负载随机，对其状态监测可采用振动检测，也可采集发电机的电流信号进行分析。

风电机组的电气系统通过变频器等电气设备与电网相连，向电网输送电能，同时控制电能参数。电气系统部件较多，发生故障的概率较大，故障类型主要有：短路故障、过电压故障、过电流故障以及过温故障等。电气系统的任一部件出现故障，都有可能间接引起发电机的损坏。鉴于电气系统的特点，可以采取性能参数检测方法，如检测输出电压、电流、功率、温度等是否和正常值相一致，借此判断电气系统各个部件的健康状态。

偏航系统在风力发电机组中的作用是转动机舱，使转子随时与风向保持一致，以保证风力发电机具有最大的发电能力。偏航系统主要由偏航电机、偏航齿轮、偏航齿圈等组成，出现的问题主要包括轮齿磨损、定位不准确、偏航电机故障以及限位开关故障等。鉴于偏航系统自身的运行特点，如转速低、状态多变、负载重等，对其进行状态监测，采用的方法大致是振动检测以及针对偏航电机的电流、电压检测方法等。

4 结论

风力机的在线监测诊断系统，正在经历当年火电机组监测诊断系统从无到有的发展历程，给从事故障诊断研究的学者提供了新的研究空间。国内外针对风力机虽然提出了各种状态监测方法，但大部分还处在试验或离线阶段，且针对性不强，国内只有少数风力机开始测试安装在线振动监测系统。结合作者在多家风力机主机厂调研，以及到数十个风场完成的现场风机振动测试分析，目前存在的问题主要有以下几个方面。

(1) 故障机理和失效准则研究。针对风力机这一新型装备，需要结合风力机的工况研究其故障发生与演化机理，对于容易发生失效的接触界面，开展界面接触损伤动力学特性研究。典型如风电增速齿轮箱损伤识别方面，由于风电齿轮箱采用行星齿轮传动，复合的传递运动使得故障特征相互调制和耦合，需要深入研究行星齿轮箱建模和动力学行为；又如在风电叶片损伤识别方面，由于叶片受到风力交变载荷的作用，常会出现裂纹、纤维断裂、内部脱层等损伤，各向异性的复合材料结构使得叶片损伤诊断困难，目前复合材料损伤的失效容限和性能退化准则没有统一的标准。

(2) 风力机振动信号处理与特征提取方法研究。风力机在变转速工况下运行，故障特征频率计算困难，使得故障的准确定位有一定难度，需要研究适合风力机诊断的信号分析方法。如阶次分析是处理变速运行旋转机械振动信号的一种有效方法，该方法将时域等时间间隔的采样信号转换为角域等角度采样，避免时域内采样时由于频率的变化造成一些特征信息的丢失。此外，声发射检测、油样检测以及红外成像检测方法等，可以避免因转速变化等因素对检测结果的影响，实现故障的准确识别。

(3) 风力机振动标准的建立。针对风力机的在线状态监测，现在还没有一套合适的方法很好地实现故障的预警报警。时域指标分析方法简单、快捷，是实现在线报警的良好选择，但目前还没有一套合适的理论来指导时域报警阈值的选择问题，在何种风速工况下正常运行风力机振动量值的大小缺乏参照标准，需要基于大量的测试分析，从而合理确定报警阈值。

(4) 机电耦合系统的监控研究。风力机是集机械、电子、电气于一体的复杂机电系统，研究机械能、电能等能量流的传递和转换规律，如欠电压穿越造成的损伤机理，考虑能量流对风电机组运行工况的影响，获取满足诊断需要的特征信息。国内外大多风电机组通过风场中央监控系统(典型如SCADA系统)对风场成十、上百台机组的运行进行集中远程监控，对机组部分运行参数(如温度，风速、输出功率、单点或双点振动等)进行较长时间间隔的采集存储，可以充分利用这些信息，通过电流信号等参数变化实现风力机这一机电系统的故障诊断，并对整机的运行可靠性进行评估。

(5) 研发可行的软硬件系统。目前风力机尚没有成熟的振动监测系统，主机厂由于市场价格竞争激烈而无暇顾及，风场虽渴望诊断系统也因上百台风力机监测诊断系统投入过大望而止步。德国Pruftechnik、瑞典SKF以及国内几家公司均在研发风力机诊断系统，进一步研发新的状态监测方法，降低软硬件的开发成本，借用风场光纤系统或开发无线传输系统，是全面实现风力机在线监测的关键。

参 考 文 献

[1] EWEA. World wind energy report 2009[R]. Bonn: World Wind Energy Association, 2010.

[2] LU Bin, LI Yaoyu, WU Xin, et al. A review of recent advances in wind turbine condition monitoring and fault

diagnosis[J]. PEMWA 2009，IEEE，2009，6：1-7.

[3] 郭太英，黎发贵. 从国外风电发展探讨我国风电发展思路[J]. 水电勘测设计，2006，58(2)：20-24.
GUO Taiying，LI Fagui. Discussion of ideas of China's wind power developments referring foreign conutries' wind power development[J]. Hydropower Survey and Design，2006，58(2)：20-24.

[4] 邱罡，龚炯，孙晓菲. 中国新能源经济的快速发展[R]. 中国三星经济研究院，2010.
QIU Gang，GONG Jiong，SUN Xiaofei. Rapid development of China's new energy economy[R]. SERI China，2010.

[5] 贺娇. 风能资源详查将推动产业发展[N]. 中国能源报，2010-02-01(15).
HE Jiao. Detailed investigation of wind energy resources promoting the industrial development[N]. China Energy News，2010-02-01(15).

[6] 中国风能协会. 2009 年中国风电装机容量统计[R]. 北京：CWEA，2010.
China Wind Energy Association. Installed capacity statistics of China's wind power 2009[R]. Beijing：CWEA，2010.

[7] 国际新能源网. 财政支持新能源的政策体系趋于完善和多样化[EB/OL]. (2009-7-14)[2010-04-1]. http://www.in-en.com/newenergy/html/newenergy-141514-1564403796.html.
International Newenergy. Policy system of the finance supporting the new energy tending to perfection and diversfication.[EB/OL]. (2009-7-14)[2010-04-1]. http：//www.in-en.com/newenergy/html/newenergy-14151-41564403796.html.

[8] 李俊峰，高虎，王仲颖，等. 2008 年中国风电发展报告[R]. 北京：中国环境科学出版社，2008.
LI Junfeng，GAO Hu，WANG Zhongying，et al. China wind energy report 2008[R]. Beijing：China Environmental Science Press，2008.

[9] Caithness Windfarms Information Forum. Summary of wind turbine accident data to 31st March 2010 [EB/OL]. (2010-03-31)[2010-04-15]. http：//www.caithnesswind-farms.co.uk/page4.htm.

[10] 祁和生. 我国风力发电机组总装企业现状[J]. 中国科技投资，2008(1)：61-64.
QI Hesheng. Status of assemblers of wind turbine in China[J]. China Venture Capital，2008(1)：61-64.

[11] RIBRANT J. Reliability performance and maintenance—a survey of failures in wind power systems[D]. Sweden：Royal Institute of Technology，2006.

[12] 西班牙 EHN 公司风电项目开发、运行、维护的经验[EB/OL]. (2010-03-31)[2010-04-15]. http：//www.windpower-china.cn/node/428.
Experence of development, operation and maintenance of Spanish EHN wind power[EB/OL]. (2010-03-31)[2010-04-15]. http：//www.windpower-china.cn/node/428.

[13] 唐新安，谢志明，吴金强，等. 风力机齿轮箱故障诊断[J]. 噪声与振动控制，2007(1)：120-124.
TANG Xinan，XIE Zhiming，WU Jinqiang. Fault diagnosis of gearbox for wind turbine[J]. Journal of Noise and Vibration Control，2007(1)：120-124.

[14] 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)：1-39.

[15] 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)：1352-1365.

[16] HUANG Qian，JIANG Dongxiang，HONG Liangyou，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.

[17] INALPOLAT M，KAHRAMAN A. A theoretical and experimental investigation of modulation sidebands of planetary gear sets[J]. Journal of Sound and Vibration，2009，323：677-696.

[18] POPA L M，JENSEN B B，RITCHIE E，et al. Condition monitoring of wind generators[J]. Industry Applications Conference，2003，3：1839-1846.

[19] WATSON S J，XIANG B J，YANG W X，et al. Condition monitoring of the power output of wind turbine generators using wavelets[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion，2010，25(3)：715-721.

[20] DJUROVIC S，WILLIAMSON S，YANG W，et al. Condition monitoring artefacts for detecting winding faults in wind turbine DFIGs[C]//Proc. EWEC 2009，March 16-19，2009，Prac Chanot，Marseille. France：European Wind Energy Association，2009：1-8.

[21] MOHANTY A R，ChINMAYA KAR. Fault detection in a multistage gearbox by demodulation of motor current waveform[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics，2006，53(4)：1285-1297.

[22] BENNOUNA O，HÉRAUD N，CAMBLONG H，et al. Diagnosis and fault signature analysis of a wind turbine

at a variable speed[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2009, 223(1): 41-50.

[23] YANG W, TAVNER P J, WILKINSON M R. Condition monitoring and fault diagnosis of a wind turbine synchronous generator drive train[J]. Renewable Power Generation, IET, 2009, 3(1): 1-11.

[24] 于桦南，褚福磊，刘莹. 风力机气动弹性稳定性问题综述[J]. 机械设计，2008，25(6)：1-3.
YU Huanan, CHU Fulei, LIU Ying. A summary on the stability problems of pneumatic-elasticity of wind turbine[J]. Journal of Machine Design, 2008, 25(6): 1-3.

[25] 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(3): 309-324.

[26] SCHROEDER K, ECKE W, APITZ J, et al. A fibre Bragg grating sensor system monitors operational load in a wind turbine rotor blade[J]. Meas. Sci. Technol, 2006(17): 1167-1172.

[27] SUNDARESAN M J, SCHULZ M J, GHOSHAL A, et al. An intelligent blade for wind turbines[DB/OL]. (2001-01)[2010-05-19]. http://www.aiaa.org/content.cfm?pageid=298.

[28] YE Junjie, CHEN Xuefeng, ZHAI Zhi, et al. Predicting elastic and plastic response of fiber-reinforced metal matrix composites[J]. Mechanics of Composite Materials, 2010, 4: 405-416.

[29] JOOSE P A, BLANCH M J, DUTTON A G, et al. Acoustic emission monitoring of small wind turbine blades[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2002, 124(4): 446-454.

[30] RUMSEY M A, MUSIAL W. Application of infrared thermography nondestructive testing during wind turbine blade tests[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2001, 123(4): 271.

作者简介：陈雪峰(通信作者)，男，1975年出生，教授，博士研究生导师。主要研究方向为机械动态分析与监测诊断。发表论文40余篇。
E-mail：chenxf@mail.xjtu.edu.cn
李继猛，男，1984年出生，博士研究生。主要从事风力发电机组的故障诊断研究。