



大型风力发电机叶片的 疲劳损伤识别与健康监测

周 勃 赵新光 孙鲜明 陈长征/著



科学出版社

大型风力发电机叶片的 疲劳损伤识别与健康监测

周 勃 赵新光 孙鲜明 陈长征 著



科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书分析了风力发电机叶片的气动性能和流固耦合特性,采用声发射信号和振动信号对叶片疲劳损伤进行状态识别;应用优化小波重分配尺度谱、多分辨率奇异值分解、盲解卷等信号处理技术,对初始裂纹、扩展裂纹以及多裂纹的声发射信号进行了特征提取;结合有限元模拟和裂纹扩展试验,分析风力发电机叶片动态裂纹扩展机理,探讨疲劳损伤的模糊评价和多裂纹动态扩展的损伤容限定量计算方法。通过提前对叶片疲劳损伤状态预警,避免疲劳断裂引发重大事故,降低后期维修成本,从而保障风力发电机高效安全地运行,也为风力发电机叶片的设计制造提供理论依据。

本书可供从事机械设备状态监测和故障诊断的科研人员,风电企业技术人员,高等院校相关专业的教师、本科生和研究生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

大型风力发电机叶片的疲劳损伤识别与健康监测/周勃等著. —北京:科学出版社, 2016.3

ISBN 978-7-03-047637-1

I. ①大… II. ①周… III. ①风力发电机—叶片—疲劳磨损—研究 IV. ①TM315.35

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第049137号

责任编辑:张震姜红 / 责任校对:邹慧卿

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年3月第一版 开本:720×1000 1/16

2016年3月第一次印刷 印张:12 1/4

字数:240 000

定价:75.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

20 世纪 70 年代能源危机后,核能、太阳能、风能等新能源技术随之迅速发展。与其他绿色能源相比,风能的利用不受时间、季节、气候、地域等客观因素制约,具有储能大、无污染、可持续、可再生等优点,因此被认为是未来最具潜力的可再生能源而备受各国重视。近年来,我国风电产业进入一个高速发展期,及时准确预测风力机运行状态,保证机组可靠高效运转已成为风力发电具有市场竞争力的最重要因素。叶片是风力发电机获取风能的关键部件,在严酷的自然环境中极易产生疲劳失效,导致健康状态恶化。因此,有必要对风力发电机叶片的裂纹进行实时监测,分析裂纹产生、生长、扩展的规律,研究叶片动态载荷与风力发电机叶片疲劳损伤的关联机制,根据对风力发电机叶片裂纹扩展的特征参数定量判定疲劳损伤程度,从而提高风力机叶片的可靠性,避免出现重大恶性事故后的高昂维修费用。

全书共分 6 章。第 1 章介绍风力发电机技术的国内外现状,以及风力发电机叶片健康监测的重要性和所面临的主要难题;第 2 章在空气动力学理论和 ANSYS 有限元数值计算的基础上,分析了风力发电机叶片的气动性能和流固耦合特性;第 3 章采用声发射信号和振动信号,分别基于小波分析和模糊神经网络技术针对叶片的常见故障进行了状态识别;第 4 章分别采用了优化小波重分配尺度谱、多分辨率奇异值分解和盲解卷信号处理方法,针对初始裂纹和扩展裂纹的声发射信号提取了特征参数,并基于盲信号处理技术对多裂纹损伤状况进行了声发射信号的特征提取;第 5 章在复合材料断裂理论基础上,结合有限元模拟和裂纹扩展试验,分析了风力发电机叶片动态裂纹扩展机理,并研究了疲劳裂纹微观图像的分形特征;第 6 章介绍了经典疲劳理论,研究了疲劳损伤的模糊评价方法,初步探讨了多裂纹动态扩展的损伤容限定量计算方法。

目前,国内还没有针对风力发电机叶片健康监测方面的专著,与已出版的同类书籍比较,本书总结了作者近十年的研究成果,学术思想新颖,结构体系完整,学术价值较高。本书适用于大型风电企业的设备管理人员和从事诊断技术相关行业的技术人员作为参考,也可作为全国工科院校的机械工程、力学、动力工程、工程热物理、复合材料、信号处理等学科的研究生和本科生的教材和参考书。

本书由周勃主笔,第 2、6 章由周勃执笔,第 4、5 章由周勃、赵新光共同执

笔，第3章由孙鲜明执笔，第1章由陈长征执笔。本书的部分内容参考了相关的著作和论文，在此谨向这些国内外的专家和学者致以深深的谢意。同时也感谢科研团队全体成员的大力支持，感谢陈维涛硕士在流体动力学数值计算方面的贡献、王仲博士现场监测所付出的辛劳、周昊博士在神经网络算法编程方面给予的帮助。

特别感谢辽宁省风力发电技术工程研究中心和辽宁省振动噪声控制工程研究中心，他们提供了试验设备，保证了疲劳试验和裂纹扩展试验的顺利进行。感谢沈阳华创风能有限公司为我们提供风力发电机叶片的生产车间，使得叶片试件加工和预制裂纹工作顺利完成。感谢内蒙古北方龙源朱日河风电场、黑龙江集贤县太阳山风电场、山东蓬莱虎山风电场的鼎力支持，课题组获得了大量的监测信号，并在现场对监测系统加以完善和应用。

由于作者水平有限，对书中不足之处恳请广大读者批评指正。

作者

2015年7月于沈阳

目 录

前言

第 1 章 风力发电机发展现状及健康监测的意义	1
1.1 风力发电机技术发展现状	1
1.2 风力发电机叶片健康监测的意义	5
1.3 裂纹检测技术发展现状	7
1.4 风力发电机健康监测发展现状和面临的主要问题	8
参考文献	10
第 2 章 风力发电机叶片的气动性能分析与数值计算	14
2.1 空气动力学理论	14
2.1.1 流体动力学控制方程	14
2.1.2 叶素理论	17
2.1.3 贝茨理论	19
2.1.4 涡流理论	21
2.1.5 威尔逊理论	23
2.2 风力发电机叶片的三维有限元模型	24
2.3 叶片的三维实体建模	28
2.4 风力发电机叶片的气动特性分析	30
2.4.1 湍流模型	30
2.4.2 叶片流场有限元	31
2.4.3 叶片外流场网格的划分	32
2.4.4 数值模拟结果与分析	33
2.5 风力发电机叶片流固耦合计算与分析	42
2.5.1 流固耦合方程	42
2.5.2 叶片的颤振模型	43

2.5.3 叶片铺层设计的计算机模拟	46
2.5.4 叶片的应力应变数值计算	48
2.5.5 叶片的模态分析	52
参考文献	56
第3章 基于振声信号的风力发电机叶片状态识别	57
3.1 信号处理概述	57
3.1.1 信号的时域分析	57
3.1.2 信号的幅值分析	59
3.1.3 信号的频谱分析	60
3.2 风力发电机叶片的声发射监测方法	62
3.2.1 声发射无损检测技术的应用	62
3.2.2 声发射的基本原理	64
3.2.3 声发射信号的常用参数	66
3.2.4 叶片损伤声发射信号的小波分析	67
3.3 风力发电机叶片的振动信号检测	74
3.3.1 风力发电机叶片的常见故障	74
3.3.2 模糊神经网络概述	75
3.3.3 叶片的振动信号采集和处理	80
3.3.4 叶片振动信号的频谱分析	82
3.3.5 基于模糊神经网络的风力发电机叶片状态识别	83
参考文献	85
第4章 疲劳裂纹声发射信号的特征提取	87
4.1 基于小波重分配尺度谱的疲劳裂纹特征提取	87
4.1.1 小波变换	87
4.1.2 优化小波重分配尺度谱	89
4.1.3 试验装置	91
4.1.4 信号处理结果分析	92
4.2 基于多分辨率的叶片裂纹特征提取	95
4.2.1 奇异值分解	95
4.2.2 裂纹扩展 AE 信号的多分辨 SVD	96
4.3 叶片蒙皮初始裂纹的盲提取	102
4.3.1 卷积混合信号的盲提取	102

4.3.2	代价函数的改进	103
4.3.3	非线性滤波器的选取	104
4.3.4	计算机仿真	104
4.3.5	裂纹扩展试验研究	107
4.4	多裂纹扩展的声发射信号特征提取	111
4.4.1	主裂纹扩展时 AE 信号特性分析	111
4.4.2	多模态混叠 AE 信号的盲解卷算法	112
4.4.3	风力发电机叶片的裂纹扩展试验	114
	参考文献	120
第 5 章	疲劳裂纹的动态扩展机理	123
5.1	复合材料断裂理论	123
5.1.1	复合材料强度失效准则	123
5.1.2	叶片强度失效分析	125
5.2	叶片裂纹的有限元建模	126
5.3	裂纹扩展的数值模拟	128
5.4	风力发电机叶片疲劳试验	133
5.4.1	声发射信号的采集	133
5.4.2	疲劳试验	137
5.5	基于分形理论的疲劳裂纹微观图像分析	141
5.5.1	叶片疲劳裂纹特征分析	141
5.5.2	分形与分形维数	143
5.5.3	裂纹微观图像的分形特征	147
5.5.4	裂纹演化微观图像分析	149
5.5.5	裂纹扩展的分形维数计算	151
	参考文献	154
第 6 章	风力发电机叶片的疲劳损伤评价	156
6.1	疲劳理论	156
6.1.1	玻璃钢材料的 S-N 曲线	156
6.1.2	载荷等效谱	157
6.2	疲劳损伤评价	158
6.2.1	疲劳的评估方法	158
6.2.2	疲劳累积理论	160

6.3 疲劳损伤的模糊评价..... 164

6.3.1 AE 信号的关联维数计算..... 164

6.3.2 疲劳损伤的模糊评价方法..... 165

6.3.3 风力发电机叶片裂纹扩展试验..... 166

6.4 多裂纹动态扩展的损伤容限研究..... 172

6.4.1 裂纹尖端塑性区的应力分析..... 172

6.4.2 风力发电机叶片的裂纹动态扩展试验..... 174

6.4.3 相互干扰多裂纹的随机扩展模型..... 178

6.4.4 最大熵的随机梯度下降法..... 180

6.4.5 多裂纹随机扩展试验..... 181

6.4.6 风力机叶片损伤容限分析..... 185

参考文献..... 187

第 1 章 风力发电机发展现状及健康监测的意义

1.1 风力发电机技术发展现状

人类利用风能的历史由来已久，风车、帆船等都是古代人类对风能成功的开发和利用，最早的风车出现在约 3000 年前，主要用于碾米、提水等农业生产活动。直至 19 世纪末，世界上第一座风力发电站在丹麦落成，标志着人类现代开发利用风能的开始。但受制于当时的技术条件，风力发电机的发电效率较低，而人们也还没有认识到发展清洁能源的重要意义，导致风力发电技术发展缓慢。直至 20 世纪 70 年代，在第一次能源危机过后，人们开始认识到发展清洁能源的重要意义，风能也开始受到了欧美各国的重视，丹麦、德国、美国等发达国家开始致力于大型风力发电机设备的研发。经过 30 多年的发展，截至 2013 年年底，全球风电装机总容量已达 318100MW，如图 1.1 所示。据统计，全球的风能总储量约为 2.74×10^9 MW，其中可被利用的风能约为 2×10^7 MW，比地球上可开发利用的水能总量还要大 10 倍。与水能、核能、太阳能等可持续能源相比，风能利用不受时间、季节、气候、地域等客观因素制约，风能开发对自然生态环境影响小，风能自身具有储能大、无污染、可持续、可再生等优点，未来数年，风电行业仍将保持年均 20% 的增长速度。目前，在风力发电行业较为发达的地区，风电已能够提供近 20% 的电力需求，并已提出 2050 年的风电计划，届时，依靠风力发电将能满足这些地区 50% 的电力需求^[1]。

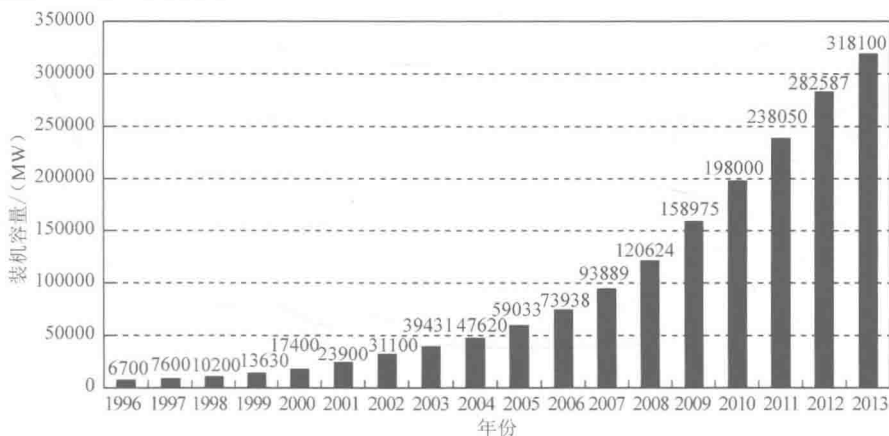


图 1.1 1996~2013 年历年全球风电累计装机容量统计

近年来, 风力发电装备已成为风能利用的主要形式, 随着风力发电装备单机容量不断加大, 制造成本不断降低, 商业性的风力发电场已经具备了相当的规模。目前正在服役的风力发电机组中, 以双馈型 1.5MW、2MW 为主, 新型的 10MW、20MW 等更大容量的风力发电机组也正在研发中, 我国也已经成功研制了 6MW 风力发电机组。2014 年 1 月 28 日, 世界上第一台 8MW 风力发电机组——维斯塔斯 V164-8.0 风电机组成功生产出了第一千瓦时的电能, 标志着全球最大的风力发电机组已经正式投入测试使用^[2]。现代风力发电机正日益趋于轻型、高效、高可靠性, 由定桨距向变桨距、由定速向变速、由齿轮箱式向直驱式、由陆地向海上、由兆瓦级向多兆瓦级的大型化方向发展。

风力发电机由叶片、传动系统、发电机、支承装置、迎风机构、安全装置、控制系统、电气系统等组成, 国内外对于风电技术的研究也从这些机构和部件展开。国外在风电技术的研究领域, 积累了很多的经验和成果。近几年来, 在风力机动力学方面主要研究集中在叶片、塔架、传动系统、偏航系统、轮毂等部分, 涉及不同工况下风力发电机的动力学特性、疲劳损伤、可靠性、优化设计等多个学科领域。风是驱动风力发电机工作的能量来源, 也是影响风力发电机振动的主要环境力因素, 在风速模型方面也有很多研究进展, 其中 Dotzek 建立一种新的风速模型, 风速的比例因子充分考虑了质量、风压、风能强度的影响, 在适合的气候条件下, 这种模型可以用于计算风环境的影响^[3]; Rauh 在 2004 年研究了风力发电机动力学响应对能量输出的影响, 在建立模型时充分考虑了风速的波动, 动态特性的变化, 空气涡流的密度, 在 Rosen 和 Sheinman 的研究基础考虑了动态特性的影响因素^[4]; Larsen 等在 2007 年研究了叶片的空气动力学升力模型, 这个模型经过了风力发电机两种试验工况的验证, 并且与 Leishma 模型和 ONERA 模型进行对比, 在考虑动态响应的基础上, 得到了比其他复杂模型更满意的结果^[5]; 在叶片动力学设计方面, Maheri 提出一种空气动力学和结构的解耦方法来设计弯扭组合的自适应叶片, 在设计中将空气动力学与结构参数进行考虑, 此方法减少了有限元分析的时间, 为叶片的动力学设计提供了一个新的思路^[6]; 在风力发电机塔架方面的动力学研究进展将在后面进行详细介绍, 风力发电机偏航系统对整体结构的动态影响在很多研究中都有提及, 其中 Ekelund 提出通过对偏航系统的控制来减少风力发电机的动力载荷, 研究结果表明, 偏航系统的刚度对塔架弯曲的贡献非常大, 适当控制偏航系统可以有效降低风力发电机的动力载荷^[7]; Maalawi 建立了一个偏航系统动力特性优化模型, 主要控制在偏航系统运动时产生较大的动力响应, 从而避免引起风力发电机的剧烈振动和疲劳失效, 将不同的控制方程统一为 Bessel 方程, 可以得到更为准确的固有频率和模态振型^[8]; 在风力机动力学的其他方面, El-Sattar 等研究了瞬间短路故障对风力发电机动态特性的影响, 利用 MATLAB 软件对其进行仿真, 并提出了有益的解决方法^[9]; 另外,

在动力学分析中一些试验和数值仿真的方法值得我们借鉴,赵学勇提出一种新的多体动力学模型用于风力发电机的分析,基于铁木辛柯梁理论的刚柔混合建模方法,新模型可以将风力发电机系统用显式方程表示出来,从而得到风力机整体的动态特性^[10]。

我国风力发电产业起步较晚,但厚积薄发,经过近 20 年的发展,在风电应用、风电装备制造等方面已成为世界领先的国家。20 世纪 50 年代后期,为解决海岛和偏远地区的用电问题,一些小型的民用风力发电机组开始投入使用。70 年代末,我国开始进行并网风电的示范研究,并引进国外风机建设示范风电场,1986 年,我国第一座风电场——马兰风力发电场在山东荣成建成,成为我国风电史上的里程碑。通过近 20 年的探索、实践及科技攻关,21 世纪初,我国风电行业进入了产业化发展阶段。在可持续发展战略思想指导下,通过施行《可再生能源法》及其细则,建立了风力发电行业稳定的费用分摊制度,从而迅速提高了风电能源开发的规模和本土设备制造能力,并逐步实现了风电设备关键部件的自主生产。从 2008 年起,随着“十一五”规划的实施,在国家政策的大力扶持下,我国风力发电行业进入了一个飞速增长期,风电装机容量年增长率长期处于世界第一的位置,并于 2010 年一跃成为世界上装机总容量最高的国家,而我国生产的风力发电机组也已出口至多个国家和地区。目前,风电在我国已成为除煤电、水电外的第三大主力电源。截至 2013 年年底,我国风电装机总容量已达到 91413MW,占全国并网总量的 5.3%,发电量占到全部发电量的 2%。图 1.2 为 2001~2013 年我国历年累计风电装机容量。目前,我国风电行业仍以年均 20% 的速度高速增长,预计到 2020 年,风电装机容量将达到 150000 MW^[11]。

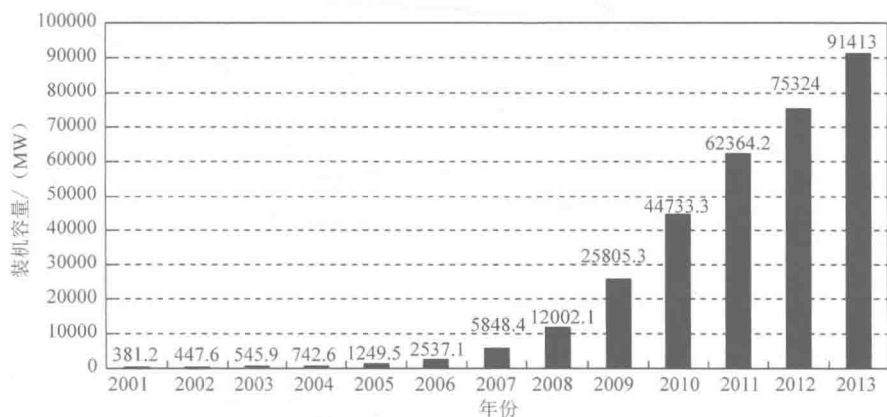


图 1.2 2001~2013 年历年我国风电累计装机容量统计

风电技术研究开发方面,经过 20 多年的技术攻关,通过借鉴、消化、吸收、创新,积累了很多成功经验,国内在风力发电机各个系统的研究领域取得了很大

的突破和进展。风力发电机长期在野外运行,环境力对机组的运行有着很大的影响,西华大学的张礼达等详细分析了恶劣气候对风电机组的影响,其中包括低温与结冰、台风与雷击对风电机组结构的影响以及国内外的研究情况,并且提出了相应的应对措施^[12];在风力发电机结构动力特性研究方面,信伟平自行开发叶片结构分析模块,建立叶片分析模型进行旋转叶片动力特性及响应分析^[13]。常明飞研究了基于叶片动力学的特性,建立了水平轴桨叶在升力和扭转气动力耦合作用下的颤振方程,并讨论了耦合运动的稳定性^[14]。在叶片的稳定性方面,清华大学的王介龙等分析了重力载荷、桨叶预锥角、转速等因素变化对稳定性的影响,在力学建模中考虑桨叶挥舞、摆振、扭转、轴向运动及根部铰的挥舞、摆振、变距等刚体运动,并根据 Floquet 理论判断运动稳定性,得出桨叶预锥角是影响桨叶运动稳定性的重要因素^[15]。汕头大学的曹人靖等提出基于压力表示法的风轮气动弹性稳定性模型,通过气动弹性稳定性的机理风险建立了叶片气动弹性稳定性分析的数学模型,得到风力发电机气动弹性稳定性裕度和工作范围^[16];关于风力发电机气动性能的分析,汕头大学的刘雄等基于片条理论建立了风力发电机气动性能的计算模型,考虑叶尖损失、轮毂损失、风剪切、偏航等多个参数,并且将计算程序应用于实际风力发电机气动性能计算,得到了合理结果^[17];另外,考虑到叶片的空间旋转运动,同是汕头大学的李德源等利用刚柔混合多体动力学理论,结合大型叶片几何构形特点,导出叶片空间梁单元动力矩阵形式,并且以 1.5MW 风力发电机叶片为例,考虑旋转叶片的动力刚化效应,准确反映叶片的动力学特性^[18];为了对风力发电机叶片在环境力下的振动有更好的理解和分析,近几年来在动力特性方面的研究也是非常多,其中有很多学者采用了数值方法和试验方法来确定风力发电机的固有振动特性,还有一些利用理论推导和计算进行风力发电机的固有动态特性研究。其中内蒙古工业大学的吴春梅等利用振动与噪声测试系统,对叶片进行试验模态分析,并通过软件分析获得叶片的模态特性参数^[19];利用数值方法对叶片动态特性分析的学者很多,大多数应用有限元方法来进行叶片的动态特性分析,并且将数值方法计算的结果与试验结果进行对比,得到一种有效可靠的方法来确定叶片的动态特性,从而为后续的振动分析、结构参数优化、疲劳等提供可靠的分析依据和手段^[20-23]。风力发电机整体的动态特性分析,可以比叶片动态特性分析得到更为准确的分析结果,其中重庆大学的何婧等采用叶素动量理论进行风力发电机气动力的分析计算,动态分析时考虑了风轮和塔架,并且利用商业软件 ADAMS 建立了多体动力学仿真模型,实现了对风力发电机系统振动性能的联合仿真,并且和 GH Bladed 软件计算数据进行了比较,得到了一种风力发电机整体动力特性的分析方法^[24];浙江运达风电股份有限公司的黄立松等应用机械能守恒原理,对风力发电机结构进行合理简化,推导出能满足工程精度要求的风力机整体动态特性方程,得到了基于能量法的风力发电机动力特性分析

方法^[25]；华北电力大学的尹景勋对风力发电机电耦合系统的动态特性进行分析，通过用 FORTRAN 语言编制仿真程序，简化了叶片、塔架模型，采用动量-叶素理论和广义坐标系下的多自由度拉格朗日方程，利用模态分析方法建立风轮、机舱、塔架耦合系统的运动方程对模型进行计算，并且与试验数据进行了对比^[26]。为了在风力发电机运行过程中得到较优的性能、较低的成本，结构的合理性显得尤为重要。在风力机结构优化设计方面有很多研究成果，其中汕头大学的刘雄利用复合形法进行风力发电机叶片的总体优化设计，通过南澳风电场风速分布函数设计风力发电机，分析了设计结果的合理性，并且对比了 Wilson 方法的设计结果，后来将年能量输出最大为设计目标，通过加速搜索寻优保证全局最优解，通过扩展紧凑遗传算法（extended compact genetic algorithm, ECGA）得到比传统遗传算法更快更准确的结果，并开发了优化设计程序设计了 1.3MW 失速型风力发电机的叶片^[27,28]。总体来说，我国在风力发电方面的研究与发达国家相比，起步较晚，在设计技术方面还不够成熟，有一些差距。随着技术创新的推进，今后一定会有更多的进步。

1.2 风力发电机叶片健康监测的意义

风电作为一项新技术要取得长期稳定的发展，不断地降低维护成本和提高机组的可靠性已成为越来越迫切需要解决的问题。值得注意的是，风电在我国大规模发展的时间不长，各种故障隐患将在随后几年大量显露。叶片是风力发电机获取风能的关键部件，在严酷的自然环境中运行时不仅承受离心力、弯曲应力、空气动力、热应力、介质应力等的综合作用，还受到冰霜雨雪的冲蚀和雷击闪电的破坏。风力发电机叶片架设在高空所受来流和输入力都异常复杂，在急剧变化的重载荷下连续运行时极易造成主梁、表面蒙皮、黏结材料的开裂、变形、脱落和断裂。风力发电机叶片制造费用占总成本的 15%~20%，在外界环境和阵风、湍流、启动刹车等长时间综合作用下产生裂纹或完全断裂，由于这种疲劳破坏前没有明显的变形，所以经常酿成重大恶性事故。据调查，叶片事故约占风力发电机事故的 30%，由于疲劳裂纹造成突然断裂而失效的现象时有发生，一些新建的风电场中 70% 以上的风力发电机出现了叶片裂纹。叶片疲劳损伤故障成为大规模风电场中普遍存在的安全隐患，能否快速准确地监测叶片的健康状态和判定疲劳损伤程度对于保证风力发电机叶片的安全性和高效性、延长使用寿命减少维护成本具有重要意义。

一般认为，风力发电机叶片疲劳损伤由极小裂纹的生长开始产生，当局部集中应力作用在叶片表面极小区域时将导致极微裂痕形成，这些裂痕会进一步延伸

至黏胶层内部和叶片蒙皮的交界处，最终导致叶片的开裂和蒙皮断裂。由于风力发电机叶片经常在变矩、偏航、停机、启动等工况下长期运转，复杂的随机载荷分布和严峻的野外气象条件增加了局部应力计算的难度，也容易造成叶片由于交变载荷产生的疲劳失效，导致叶片健康状态恶化。因此有必要对风力发电机叶片的裂纹进行实时监测，分析裂纹产生、生长、扩展的规律，研究叶片动态载荷与风力发电机叶片疲劳损伤的关联机制，根据对风力发电机叶片裂纹的定位、定量的诊断结果来判定疲劳损伤程度并辨识叶片故障类型，从而提高风力发电机叶片的可靠性，避免出现重大恶性事故后的高昂维修费用。一些风力发电机叶片故障及运行状况见图 1.3 和图 1.4。因此，对风力发电机实施健康监测不但能有效避免事故发生，做到防微杜渐，防患于未然，还能有效避免由于叶片坏损引起的停机，减少直接和间接经济损失，对于风电行业的健康持续发展有着重要的意义。



图 1.3 风力发电机叶片损伤



图 1.4 某风场风力发电机叶片运行状况

1.3 裂纹检测技术发展现状

裂纹检测技术广泛应用的方法有振动测量、热成像、激光多普勒监测、电磁测量、动态压力测量等^[29-31],但是由于系统复杂、可靠性差、成本高等因素,这些方法都不适用于风力机叶片裂纹的现场监测。由于叶片裂纹在扩展过程中会释放弹性应力波,叶片旋转时弹性应力波在传播过程中会产生多普勒频率,用声发射传感器非接触测量应力波的波前压力信号,就可获得叶片裂纹的扩展信息。Joosse 等应用声发射信号监测小型风力机叶片,不但能定位故障,还能监测故障发生的过程^[32]。国外有学者提出将声发射信号的回归系数作为故障的特征参量^[33],但由于风力机的旋转频率大多在 10Hz 以下,这时的声发射传感器得不到响应。文献[34]以声发射波为测试信号,采用神经网络系统检测大型结构的微小裂纹,取得了一定的成果。因为普通振动传感器采集的信号往往无法包含微细的故障信号,采用应力波作为故障监测诊断特征参数,可解决振动信号在低速情况下的局限性,不仅是机械故障诊断技术的发展和完善,同时也极大地丰富了应力波理论,因此本书拟将声发射信号作为监测参数来预测风力机叶片的裂纹萌生。

在叶片裂纹的扩展过程中,由于风力机是一个复杂的气弹耦合系统,风力发电机叶片不可避免地受到风沙、冰雪等环境介质的腐蚀和应力集中作用,加之叶片本身就是柔性的,风速变化时叶片本身的形态随之变化,因此有必要更精确地了解叶片裂纹的衍化与其动态载荷的关联机制。国外一些学者用 CFD 软件预测风场的湍流模型,发现特别是在紊流度大的情况下风力机的载荷与形变之间的关系更为复杂^[35,36]。鉴于国内风场环境多为湍流、切变流,国内也有人提出应用广义动态尾流 (generalized dynamic wake, GDW) 理论准确描述重载条件下的压力分布^[37,38],并针对玻璃钢叶片计算了叶片在气动载荷和重力、惯性力等周期载荷下的动力响应,预测了玻璃钢叶片的疲劳寿命,这些诊断技术都是忽略启停、刹车、变矩等瞬态载荷的分析,与风力机的工作状况差异较大。因此,若能够掌握随机动态气动载荷的产生及传递机理,明确低速轴承应力随载荷变化的规律,可为检测风力机的早期故障微细特征提供充分条件。因此,研究适合我国风力状况在动态载荷条件下叶片的疲劳寿命计算,发现裂纹生存过程的关联机制,有助于提高我国叶片的设计和制造工艺,可避免盲目增加强度的设计,提供技术支撑。

综上所述,由于野外环境的复杂性,风力发电机叶片长期承受其瞬态载荷会带来巨大的冲击,探索在征兆还不完全的情况下得出正确的诊断结果,最终形成具有自主知识产权的低速轴承早期故障诊断技术,改变国产风电机组没有轴承监测系统的现状,提高风力发电机组的运行效率和使用寿命,降低高昂的维修费用和风力发电机存在的安全隐患,减少直接和间接经济损失。研究有关载荷产生故

障应力的规律有助于提高轴承的设计和制造工艺，可避免盲目增加轴承强度来改善安全性能的情况，为风力机轴承的制造提供有力的技术支撑。

1.4 风力发电机健康监测发展现状和面临的主要问题

风力发电机的状态监测技术是综合利用对风电设备振动、温度、压力、噪声等状态信号进行检测分析结果，结合诊断对象的工作环境，来定量识别风力发电机各个部件的运行状态，以此来判断风力发电机机械系统的运行状态，定位故障位置，为可能发生损坏的零件进行预警。风力发电监测技术的最终目的是提高设备的运行效率、可靠性，分析故障形成的原因以防患于未然，以达到降低风力机运行成本的目的。

在欧美，由于风机技术发展和应用较早，与之配套的风机监测技术发展比较成熟，已经研发和应用了专门用于风力发电机的监测设备，例如，德国的 PRÜFTECHNIK 公司、丹麦 PCH 工程公司生产的振动监测仪，其中丹麦 PCH 公司的 PCH1026 低频结构振动监测仪是一台装在密封坚固机箱内的独立完整的监测仪，只需连接直流电源和所需的输出通道即可工作，在检测低频振动方面具有很大优势，是专门为捕捉风机的塔体振动信号、叶片边沿振动信号而设计的，占全球风机振动监测设备市场份额的 60%^[39]。在风力机远程监测服务方面，国外已经根据市场需要形成专门的风力发电机监测服务行业，例如，德国的 FLENDER 公司等^[40]。我国风力发电机行业本身起步较晚，与之配套的专用风电监测设备与监测系统发展也处于相对落后阶段。我国研制的典型风电振动监测设备有京航公司研制的 HG 系列风力发电机故障诊断仪。该设备可以对该风力发电机进行振动数据采集及根据采集数据信息做故障诊断。在振动数据采集前需要将发电机齿轮箱、轴承及实际运行转速等相关参数信息输入诊断仪。然后进行数据采集，将采集的数据与先前传入的数据进行比较来分析风力发电机的运行状态。随着网络和信号处理分析技术的发展，由传感器、接口装置及远程计算机组成具有实时监视和自动诊断功能的计算机辅助监视和诊断系统成为现在风力发电机监测的趋势。它能够满足当代风电行业对故障监测实时性、准确性、高效性的要求。

风力机运行环境恶劣，许多环境因素如风沙、雨雪、雷击等都有着很不确定性，由此产生的环境力也是不确定的，另外，风力机结构自身也具有很多不确定因素，如材料、表面粗糙度、装配等，所以对风力机进行可靠性研究有着很高的实用价值。其中挪威学者 Ronold 在 2000 年就提出提高风力机叶片疲劳寿命的可靠性设计，通过分析模型的最大承载工况，利用一阶可靠性方法计算叶片弯曲抖动的失效概率，最后利用可靠性分析结果修正了载荷的部分安全因子^[41]；加拿大学者 Wangdee 对风力机电力系统进行了可靠性分析，针对能量转换过程中电力部