风能
WIND ENERGY

传播专业知识　　启迪成长智慧

2011年
10
总第20期

国际标准刊号：ISSN 1674—9219
国内统一刊号：CN 11—5942/TK

中国可再生能源学会风能专业委员会

三四类风区开发：蔚然成风 > P24

针对三、四类风区风电机组的出现，使得过去难以开发的风能资源重新具备了开发价值，也让中国风电发展多了一种路径。

> P40 从现行风电建设项目的财务指标说开去
> P56 风电叶片的五年之忧
> P66 风电场远程运行维护系统建设初探

ISSN 1674-9219
9 771674 921113 10
人民币 25 元

通过细分市场深化我国风电开发

文 / 秦海岩

历经五年的快速发展，我国风电的市场规模已经跃居世界首位。与欧洲等国风电产业的分散式开发形式不同，我国风电的绝大部分装机容量采取的是集中建设、规模化发展的模式，这种模式培育和推动了我国完整的风电产业体系，为我国风电的长足发展积累了宝贵的经验。在坚定不移地推进风电基地建设的同时，充分开发利用地域分布广泛的相对丰富的风能资源，既是对原有开发经验的推广，也是将我国风电开发引向深入的一种选择。

本期封面文章对目前大家关心的三、四类风区的开发情况作了回应，从资源、设备技术、开发进展、成本效益等方面，在客观数据和大量采访的基础上，进行了梳理和分析，以期为读者提供一个整体的情况。

“十二五”开局之年，顺应市场需求，国家适时提出风电的集中开发与分散开发相结合的思路，因势利导地将高海拔、低风速、地形复杂等开发条件相对较差的风电新增市场区域纳入到规范化管理的轨道，这是一件富于远见的行为。如本期文章中所述，三、四类风区的风电开发，具有突出的地缘优势，大多数地区风电的电网接入和市场消纳条件都好于“三北”地区。作为一个崭新的市场空间，它必然会带给我们许多新的收获。

我们看到，三、四类风区的风电细分市场，为风电设备制造企业提供了一个新的竞争领域，这个领域更加注重针对性，对细节和整体都提出了更高的要求，从而推动了已有风电技术向更深的层次发展，如风电机组总体设计技术、加长叶片优化设计技术、表面融冰技术，以及一系列适应高海拔、低风速的技术调整、改进和创新。更加细化、更加个性化的市场需求，对实力较弱的企业来说是门槛，对实力强大的企业而言则是机遇，对新进入风电市场的企业更是一个“避重就轻”好渠道。

三、四类风区风电市场也是开发商的新领地。不管最优质的风能资源是否已经“名花有主”，各大开发商都有余力顾及到这块“新出炉的蛋糕”。但较之以往对于大基地项目的“势在必得”的心态相比，开发商们在此类资源开发时表现出了更多的理性，更加注重成本效益的评价和分析。这对于综合平衡产业上下游利益，整体提高我国风电产业的健康程度，是有好处的。

此外，我们注意到，在三、四类风区风电市场上，各层级之间、各利益主体之间的互动更加积极、主动和频繁。具体而言，政府、企业、地方利益团体之间在发展目标、技术创新、利益分配等关键问题上表现出更多的良性互动。分散的资源和相对较小的开发规模，也在一定程度上平抑了大企业的垄断效应。这些积极因素都对培育我国风电产业的市场属性，大有裨益。

诚然，在此类风区开发过程中，并非将“一帆风顺”，事实也表明确实会遇到许多新的挑战，例如在人烟相对稠密的内陆地区，在如何实现风电与当地自然环境和社会环境和谐发展的问题上，我们肩负着更多的责任，面临着更多的难题。但是，将我国风电开发引向纵深的意义，却不会因此而抵消，我们高兴地看到，在向“让风电为更多人造福”的理想之路上，又前进了一步。

24 封面 Cover Article

三四类风区开发：蔚然成风

三、四类风区风电机组的出现，使得过去难以开发的风能资源重新具备了开发价值，也让中国风电发展多了一条途径。

卷首语/ From The Editor

01 通过细分市场深化我国风电开发　秦海岩

06 风向/ Direction

观察/ Observation

14 可再生能源投资创新高　丽莎·伍德（美）

人物/ Figure

18 陈涛：福建风电探路人　陈小慧

封面/ Cover Article

24 三四类风区开发：蔚然成风　苏晓　赵靓

32 低风速地区风电开发成本探讨　申新贺　叶杭冶

产业/ Industry

40 从现行风电建设项目的财务指标说开去　杨建设　张佳丽

46 对大规模风电并网“难”问题的探讨　汪宁渤等

52 2011年上半年欧洲海上风电产业统计　EWEA

调研/ Survey

56 风电叶片的五年之忧　刘世明　程尧

公司/ Company

62 恩德：从容不迫、扎实前行　赵靓

风电场/ Wind Farm

66 风电场远程运行维护系统建设初探　黄永民　禹华军

技术/ Technology

70 北方海域海上测风塔设计与施工　李海波等

76 东北大范围区域风流场外推的实例研究　寇伟等

82 风电增速箱设计载荷确定的新方法　赵玉良等

86 S4WT软件在双馈式风电齿轮箱分析中的应用　张旗利等

干式水冷变压器，优化海上风电系统。

上海ABB变压器有限公司是国内干式变压器技术领域的领先厂商。公司为优化海上风电技术而开发了带水冷装置的干式变压器，它能将变压器产生的热量通过循环系统传送到冷却装置并将冷却后的空气送回变压器中。这项技术可以达到有效控制风机塔筒内温度的目的，使整个风电系统运行安全、可靠。同时，干式水冷变压器还具备出色的防腐蚀及抗振等特点，特别适用于海洋、船舶等其他的恶劣工作条件，能够在-50°C的极端低温和+55°C的极端高温下运行。此外，产品结构紧凑，便于风机塔内狭小空间的安装和维护。欲了解更多，请登录 www.abb.com.cn/transformers

上海ABB变压器有限公司
上海市浦东新区申江路2300号
电话: +86-21-5899-6488
传真: +86-21-5031-4387
电邮: marketing.cntds@cn.abb.com

Power and productivity
for a better world™

ABB

主管： 工业和信息化部　**主办：** 中国电子信息产业发展研究院

风能
WIND ENERGY

中国可再生能源学会风能专业委员会

顾问 **Consultant**

石定寰　史立山　杜祥琬　黄其励　Shi Dinghuan　Shi Lishan　Du Xiangwan　Huang Qili
徐建中　倪维斗　胡文瑞　杨裕生　Xu Jianzhong　Ni Weidou　Hu Wenrui　Yang Yusheng
李宝山　韩文科　朱俊生　贺德馨　Li Baoshan　Han Wenke　Zhu Junsheng　He Dexin
王承煦　朱瑞兆　戴慧珠　马学禄　Wang Chengxu　Zhu Ruizhao　Dai Huizhu　Ma Xuelu
王斯永　吴运东　齐同庆　于午铭　Wang Siyong　Wu Yundong　Qi Tongqing　Yu Wuming
宫靖远　Gong Jingyuan

社长： 张向宏　**President:**Zhang Xianghong
主编： 施鹏飞　**Editor-in-Chief:**Shi Pengfei
执行主编： 秦海岩　**Executive Editor-in-Chief:**Qin Haiyan
副主编： 王仲颖　夏丽华　**Associate Editor-in-Chief:** Wang Zhongying Xia Lihua

编辑部主任： 秦海岩（兼）　**Editorial Director:** Qin Haiyan
编辑部副主任： 薛　辰　蔡丰波　**Deputy Editorial Director:** Xue Chen　Cai Fengbo
本期责编： 赵　靓　**Duty Editor:** Zhao Liang
编　辑： 于贵勇　陈小慧　赵　靓　苏　晓　**Editor:** Yu Guiyong　Chen Xiaohui　Zhao Liang　Su Xiao
美术编辑： 姜坤鹏　**Art Editor:** Jiang Kunpeng
广告及发行： 王　艳　徐晓英　**Advertising & Distribution:** Wang Yan　Xu Xiaoying

编辑制作： 《风能》杂志社　**Produced by:** *Wind Energy* Magazine
地址： 北京市北三环东路28号易亨大厦1108　**Address:** Room 1108，Yiheng Building，No.28，the 3rd Ring Road East，Beijing，P. R. China
邮编： 100013　**Zip Code:** 100013
电话： 010-59796665（编辑部）　**Tel:** 010-59796665（Editorial Office）
010-64405232（广告部）　010-64405232（Advertising Office）
传真： 010-64228215　**Fax:** 010-64228215
投稿邮箱： gaojian@cwea.org.cn　**E-mail:** gaojian@cwea.org.cn

国际标准刊号： ISSN 1674-9219
国内统一刊号： CN 11-5942/TK
广告经营许可证： 京海工商广字第8006号
印刷： 北京博海升彩色印刷有限公司
出版日期： 每月6日出版
国内定价： 人民币25元

广告索引

封二	敏泰	版权对页	天源科创	P65	奥特科技
扉页 1	南车	P23	GL	P69	岳能
扉页 2	科孚德	P31	NORDEX	P75	铁姆肯
扉页 3	台达电子	P37	穆格	P81	壳牌
扉页 4	毕孚	P38	鉴衡	P85	Repower
扉页 5	诺迈士	P39	歌美飒	P91	贝奇尔
扉页 6	华仪	P43	天山	P93	嘉实多
扉页 7	科诺伟业	P45	重齿	P94	尚能
扉页 8	贺德克	P48	电科院	P95	菲尼克斯
扉页 9	无锡阳通	P49	西西延森	后彩一	合肥阳光
扉页 10	中能电力	P51	派克汉尼汾	封三	ABB 高压
扉页 11	亨通	P55	Imo	封底	上纬
卷首语对页	艾尔姆	P61	菲尼克斯	内 19 加厚页	斯维奇
目录对页	ABB	P64	PCH	内 20 加厚页	CWP2012

版权声明

在本刊发表的文章、图片等版权归本刊所有，未经本刊书面许可，不得转载、翻印及传播。
向本刊投稿文责自负（含图片），由作者原稿产生的版权纠纷或其他法律纠纷，本刊概不承担连带责任。

让天源科创的专业化服务
成为风电业主的首选

北京天源科创风电技术有限责任公司是一家为风电投资商提供系统解决方案的专业技术服务公司。天源科创依托深厚的风机制造背景和多年的风电场技术服务实践，目前已经形成能够为风电场提供系统解决方案的业务体系架构，业务范围覆盖风电项目的整个生命周期，包括由风电场选址、测风咨询等业务类别组成的前期项目咨询业务；由工程总承包、工程管理咨询等业务类别组成中期工程建设业务；由风电场运行维护、部件维修、信息技术产品供给等业务类别组成的后期技术服务业务。

展望未来，天源科创以“让天源科创的专业化服务成为风电业主的优选。”为主导目标，致力于通过稳步提升系统服务品质为客户的风电投资创造更高价值；我们真诚希望，伴随着我国风电行业的持续发展，能够与众多合作伙伴携手共进、合作共赢、再创佳绩、共享辉煌。

项目咨询	项目可研	测风咨询	微观选址	风资源分析	……	
工程建设	工程咨询	工程管理	工程承包	……		
技术服务	风电场运营	备件保障	振动检测	部件维修	油品检测	……
信息技术	中央监控	能量管理	箱变监测	功率预测	在线监测	……

公司地址：北京大兴区亦庄经济技术开发区荣昌东街甲5号隆盛大厦A座七层（邮编：100176）
公司电话：010-87859009　公司传真：010-87859000　公司网址：http://www.bj-wind.com

政 策

1 地方风电项目须能源局批复

国家能源局 8 月底正式印发《风电开发建设管理暂行办法》(以下简称《办法》),规定各省核准风电项目前须先向国家能源局上报核准计划,由国家能源局批复同意之后才可享受国家可再生能源发展基金的电价补贴。

《办法》明确,省级政府投资主管部门核准的风电场工程项目,要按照报国家能源局备案后的风电场工程建设规划和年度开发计划进行。风电场未按规定程序和条件获得核准擅自开工建设的,不能享受国家可再生能源发展基金的电价补贴,电网企业不接受其并网运行,违规擅自开工建设的项目一经发现,省级以上能源主管部门将责令其停止建设,并依法追求有关责任人责任。

《办法》还特别加强了风电信息保密和事故信息上报的要求。具体为,未经批准项目运行实施数据不得向境外传送,项目控制系统不得与公共互联网直接联接。如发生火灾、风电机组严重损毁以及其他停产 7 天以上的事故,或风电机组部件发生批量质量问题,应在第一时间内向国家能源局报告,否则将追究有关责任人责任。

项 目

2 大唐携澳洲能源公司收购当地100兆瓦风电项目

近日,中国大唐集团新能源股份有限公司与保定天威保变电气股份有限公司与其澳大利亚合作伙伴收购了英国 RES 集团在新南威尔士州 100 兆瓦的风力发电项目。

该澳大利亚合作伙伴为澳大利亚 CBD 能源公司。此次收购是通过大唐新能源、天威保变和 CBD 能源公司的合资公司 AusChina 能源集团达成的。AusChina 能源集团于今年 4 月 18 日成立,根据协议,大唐新能源将控股合资公司 63.75% 的股份,CBD Energy 持有 23.75% 股权,天威保变持有 12.5% 股份。

CBD 能源公司 21 日表示,Taralga 风力发电场的 61 个风机已经获得政府批准,风电场的建设今年开始,预计 2013 年完成。根据协议,中方两家公司将提供项目所需的装备及资金支持。

大唐新能源董事长陈进行此前曾透露,大唐新能源已在澳大利亚、美国、加拿大、巴西、欧洲等国开展前期工作,并取得了一定的成果,预计今年即将有项目实

项 目

3 华电宁夏海原风场六个风电项目获核准

近日，中国华电集团公司宁夏海原风电场南华山大咀、杆杆梁等6个风场共计30万千瓦级风电项目一次性获取宁夏回族自治区发改委核准。至此，宁夏海原风电场区域核准装机容量为40万千瓦。

据了解，计划到2013年，海原风电基地建成投产规模将达到100万千瓦。

4 玉门风光互补发电项目开工建设

9月6日下午，国内最大的风光互补发电项目——玉门中节能9兆瓦并网光伏风光互补发电项目奠基开工。

据相关专家介绍，玉门市9兆瓦并网光伏风光互补发电项目位于酒泉千万千瓦级风电基地启动项目——中节能玉门昌马20万千瓦特许权风电场，项目总投资2亿元，计划10月底前完成全部土建工程，11月20日完成设备安装调试，12月9日正式并网发电。

该项目将风力发电与太阳能光伏发电两种新能源有机结合、优势互补，项目的开发建设将积累风光互补光伏发电项目建设和管理经验，为大规模推广光伏并网发电项目提供借鉴，对于建设大型风光互补并网光伏发电项目、提高资源综合利用率具有重要的示范带动作用。

据了解，玉门风电装机已达170万千瓦，水电装机达12万千瓦，光伏发电项目的建设将使玉门步入新能源发展的快车道。

整 机

5

6

5 东海风电项目5兆瓦样机成功安装

9 月 6 日，东海风电项目 5 兆瓦样机与承台基座塔筒实现精确对接，这标志着三航局承建的东海风电大容量 3.6 兆瓦和 5 兆瓦两台样机安装任务圆满结束。

东海风电项目 5 兆瓦风电机组总重约 1040 吨，高 100 多米，是目前我国自主研发的最先进、最大容量风力发电机组，也是“三航风范”号起重船第一次使用四钩联动作业方法。

东海风电项目大容量样机工程是上海市科委科研计划项目课题，该课题对于研究和掌握海上大容量风电机组系统集成技术、机组基础设计和机组安装关键技术，以及探索我国大容量海上机组基础施工解决方案具有重要意义。

6 国电联合动力3兆瓦风电机组并网成功

8 月 29 日，位于国电山东潍坊滨海开发区风场的国电联合动力 1 号风电机组各项技术参数达到规定要求，顺利并网。该风场是国电联合动力技术有限公司首个批量化 3 兆瓦双馈式风电项目，计划安装 16 台风力发电机组，总装机容量约 48 兆瓦。首台风电机组的成功并网，为该项目工程顺利竣工奠定了坚实基础。

该项目每年可发电 1.1 亿千瓦时，年节约标煤 3.36 万吨，减少二氧化碳排放量 2.08 万吨，减少二氧化硫排放量 0.05 万吨，减少粉尘排放量 0.028 万吨，减少氮氧化物 0.028 万吨，节水 31.77 万吨，节能环保意义十分突出。国电联合动力将以此为契机，进一步推进大型风电机组的研发及产业化。

7 华锐签下中国风电巴西第一单

华锐风电宣布，日前同巴西新能源开发商 Desenvix 公司签署合作协议。根据协议，华锐风电将为 Desenvix 公司在巴西东北部塞尔希培州的 34.5 兆瓦风电场提供 23 台型号为 SL1500/82 的风电机组。

据了解，这是华锐风电签下的首单巴西风电，也是南美开发商首次购买中国风电机组。上月，开发商同意以 99.58 雷亚尔 / 兆瓦时的平均价出售巴西 44 个风电场生产的电力，使其达到全国范围内最低风能价格。巴西方相关人士表示：“一些开发商被迫购买中国技术以减少其成本。”风电机组在风电场成本占 75% 的比例，而我国风电机组比全球平均价格低 14%。

整 机

8 维斯塔斯49米叶片在天津成功下线

日前，维斯塔斯风力技术（中国）有限公司的第一批 49 米叶片在天津下线，正式拉开了维斯塔斯 V100 的 2 兆瓦平台风电机组在中国量产的序幕。

V100 风电机组拥有 49 米长的叶片和 100 米的风轮直径，在低风速条件下能捕捉到更多风，自面市以来获得了欧美等国的众多订单，为维斯塔斯 2010 年和 2011 年第一季度的业绩交出不错的成绩单。为了满足中国越来越多的低风速风场开发的需求并支持中国的“分散式”接入风电开发，维斯塔斯于 2011 年初正式宣布向中国市场推出 V100 的 2 兆瓦平台风电机组，并把天津纳入到 V100 全球三大生产基地之一。迄今为止，只有维斯塔斯位于丹麦、美国和中国天津的一体化生产基地能生产 49 米叶片。此举既肯定了维斯塔斯对中国市场的信心，又奠定了维斯塔斯天津一体化生产基地的全球战略地位。

9 开行业先河 金风首创企业大学

9 月 28 日，由国内风电设备制造商金风科技创办的首家企业大学——“金风大学”正式挂牌成立。金风科技董事长、首席执行官武钢兼任金风大学首位校长。他指出，“创建金风大学，就是要形成一个倡导学习、推动学习、激励创新的企业文化氛围。”金风科技希望通过成立大学，培养优秀的新能源价值创造者，实现社会责任。

金风大学的师资力量主要来自两个渠道：一是金风科技内部各领域的资深专家；二是通过战略合作关系的建立，引入包括来自全球风电行业的知名专家学者以及知名院校的教授和学术导师。课程主要分为管理类、技术类、制度流程类、业务类、安全类、语言类、文体类，共计 7 个门类 68 门，同时还拥有先进远程教育网络。大学的各个教室还被别具匠心地命名为“仁”“义”“礼”“智”“信”，寓意其办学宗旨将兼容并蓄中西方文化核心价值。

中国可再生能源学会风能专业委员会主任贺德馨表示，金风科技组织成立大学，不但为企业自身培养人才，也为行业培养人才，充分体现了社会责任，同时也是对我国现有教育体系培养人才的一种有效补充。

会 议

10 变频器行业企业家论坛在北京召开

2011 年 9 月 16 日至 18 日，由《变频器世界》联合业界权威组织主办的第八届变频器行业企业家论坛在北京成功举办，第九届电力电子论坛也同期召开。科技部高新司能源处处长郑方能、工信部电子信息司副司长关白玉、中国电器工业协会电力电子分会秘书长肖向锋等领导出席论坛并作讲话，来自西门子、三菱电机、深圳必事达、莱姆电子等有关单位的代表也参加了本次论坛。

与会代表就我国“十二五”能源科技重点任务，战略性新兴产业与电力电子产业发展，变频器技术发展趋势与企业面对战略性新兴产业该如何转型等展开讨论。郑方能处长指出，电力电子技术是“十二五”能源科技发展的重点任务之一。变频器技术的发展与电力电子技术是我国新能源等七大战略性新兴产业的基础。《变频器世界》刘强总编介绍了变频器整体市场情况并预测了未来走向。

此外，代表们还讨论了节能环保、新能源汽车、高端装备制造等话题。

11 中美第二届可再生能源产业论坛在美召开

2011 年 9 月 19 至 20 日，第二届中美可再生能源产业论坛在美国首都华盛顿召开。国家能源局和美国能源部共同主办了这次会议，由国家能源局新能源与可再生能源司梁志鹏副司长率领的中国可再生能源代表团参加了此次会议。

2009 年 11 月，中美两国政府确定建立了可再生能源的伙伴关系，中国国家能源局与美国能源部签署了《中美建立可再生能源伙伴关系的合作备忘录》。2010 年 5 月，在中国北京举办了第一届中美可再生能源产业论坛。自两国建立可再生能源伙伴关系以来，双方企业增强了在对方市场发展的信心，并且在可再生能源领域开展了全面而深入的合作与交流。

两国可再生能源发展存在很多重要商业机遇。中国具有成熟低成本的太阳能光伏电池、风电设备制造能力。美国积极推动智能电网建设、发展分布式能源。两国政府都在开展推动可再生能源发展的示范项目。美国能源部实施了 25 个太阳能城市的项目。中国在“十二五”期间将开展新能源城市、绿色能源县建设。两国在新型能源体系建设、创造新的能源市场机制方面开展合作。这些都将为两国企业创造更多新的商业发展机遇。

会 议

12 第十六次中国科协论坛在京举行

2011 年 9 月 7 日至 8 日，第十六次中国科协论坛——中国可再生能源发展战略地位探讨在北京举行。本次论坛由中国科协主办，中国可再生能源学会承办，分别对可再生能源发展政策及规划、太阳能光伏发电、风电发展若干问题及趋势、生物质能源、海洋能与氢能、太阳能热利用等专题进行了探讨。国内近 30 名可再生能源相关领域专家、学者出席的高层论坛。

2011 年是国家第十二个五年计划的开局之年，此次论坛根据“十二五”期间新的可再生能源发展形势，对我国各类可再生能源技术发展的现状和趋势进行了分析，对政府有关可再生能源支持政策与发展规划进行了探讨，力求科学制定中国可再生能源发展规划与路线图，以促进中国可再生能源产业快速健康发展。

此次论坛集合我国可再生能源领域的知名专家学者、国家能源主管部门领导以及有关国际组织共同探讨中国可再生能源战略地位问题，为我国可再生能源产业快速健康发展建言献策。

13 我国风电涂料国产化势在必行

9 月 28 日，2011 中国风电涂料自主化战略发展研讨会在京召开，来自国家能源局、国家发改委能源研究所、中国石化工业联合会、中国风能协会、清华大学的领导和专家以及风电涂料生产、原材料供应、叶片制造企业和检测认证机构代表参加了会议。

与会代表深入探讨了我国风电涂料行业现状和前景，为推动风电涂料国产化提出战略性和技术性解决方案。

“十二五”期间，我国风电市场将持续较快增长，必将带动风电涂料行业的迅速发展。国家能源局新能源和可再生能源司新能源处处长董秀芬说：“风电涂料虽是配套产业，但是对风电产业的影响却很大。2010 年，按风电机组的产量计算，风电涂料的产值超过 10 亿元。根据风能发展目标，风电装机容量 2015 年将达到 1 亿千瓦，2020 年达到 2 亿千瓦。“十二五”末，风电涂料产值将达到 30 亿至 40 亿元，这仅仅是新增装机施工用涂料，如果包括叶片的修补、维护，以及整个生命周期所用涂料，其产值将更高。”

据了解，因我国风电涂料起步较晚，目前存在着一些问题，主要是风电涂料市场被国外涂料企业所垄断，尤其是叶片涂料，几乎全部依赖进口；同时，缺乏风电涂料行业标准，企业在研发叶片涂料时缺乏明确的技术参照。

对此，中国石油和化学工业联合会副会长周竹叶提出，要加大科研开发资金投入力度，掌握核心技术，全面提升技术水平，逐步改变受制于人的局面。同时，制定风电涂料行业技术规范及标准，建立并推行中国的风电涂料认证制度，提高准入门槛，确保我国风电涂料产业的健康可持续发展。

与会代表一致认为，与绿色风电相适应，风电涂料应逐步提高环保性能，对涂料重金属含量要进行严格控制，加大对自清洁风电涂料以及水性风电涂料的研发

电 网

14 科环签国电首个风电侧储能项目

8 月 26 日，国电和风锦州塘坊储能型风电场 5MW×2h 储能系统示范项目合同签字仪式在国电科环科研大楼举行。签约双方分别是国电科环集团所属企业北京华电天仁电力控制技术有限公司与国电电力发展股份有限公司所属企业国电和风风电开发有限公司。

这是国电集团公司大力发展新能源和相关产业，加快企业转型步伐的具体体现。

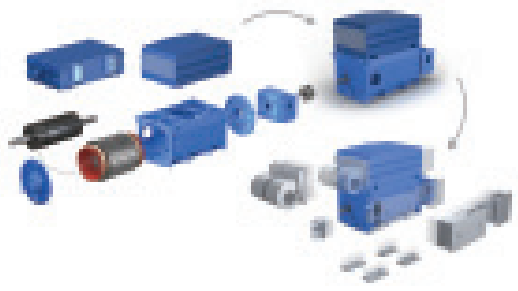
15 我国第一个完全智能风电调度系统建成

9 月 8 日，西北电网风电调度自动化系统通过了国家电网公司组织的试点工程验收，标志着西北风电进入了精细化调度运行新阶段。

该系统由国网电科院、中国电科院、西安交通大学等多家科研机构共同研制开发，在金风、华锐、东汽等国内一线风电机组制造商和酒泉 11 家风电业主的配合下，攻克了风电单机信息采集、风电功率自动控制等诸多难题，于 2011 年 6 月完成建设并投入试运行。

据了解，该自动化系统目前是国内第一个完全基于智能调度技术支持系统 D5000 平台的风电调度系统，作为国网公司智能电网大规模风电功率预测及运行控制试点项目工程之一，系统包括了风电短期及超短期功率预测、风电运行监视、风电功率自动控制、风电接纳能力评估、风电辅助服务统计及风电运行数据分析六大模块，项目获得了 6 项专利，多项技术在国内处于领先地位。

零部件



16 ABB转子发电机功率扩至5兆瓦以上

继去年推出新的增强型转子设计的滑环式发电机后，ABB 该系列双馈风力发电机的功率范围在 2011 年已扩大到 5 兆瓦甚至更大。作为业内知名的风电机组和风电场电力解决方案供应商，ABB 推出的该系列双馈风力发电机属于标准设计，采用空冷或水冷，以及模块化组件结构，可广泛应用于 1.5 兆瓦至 2.0 兆瓦的风电机组。该风力发电机突出的特点是采用了获得多项专利保护的转子，具有新型绕组端部支持环、更高的绝缘电压等级、极低的总谐波畸变率和改进的冷却系统，以及可靠性较好的滑环单元和轴承绝缘。

17 重齿新获批量齿轮箱订单

近期，重庆重齿风力发电有限责任公司（以下简称重齿）2 兆瓦风电齿轮箱再获大单，与国内某知名风电整机制造商一次性签订 500 台订单。同时，重齿公司近几年大力实施新产品领先战略，全面推进海上风电机组齿轮箱研制工作，其中 2.5 兆瓦～ 3.6 兆瓦齿轮箱已小批量生产，5 兆瓦齿轮箱预计今年 10 月份下线。

重齿公司作为国内一家生产风电齿轮箱的大型国有企业，拥有国家级技术中心，具备强大技术研发能力，产品涵盖 600 千瓦～ 5 兆瓦风力发电齿轮箱所有类型，目前累计装机运行 7000 余台。其中 2 兆瓦风电齿轮箱作为当前市场主力机型，自 2008 年量产以来，已投入运行 600 余台，运行稳定可靠，得到各整机厂及风场业主的一致好评。

国 外

18

18 美国政府投资海上风电发展项目

美国政府表示，未来5年计划投入4300万美元用于加速技术创新、降低成本和缩短海上风力发电系统的部署时间。获得资助的41个项目将致力于开发先进风力发电机组的设计工具和硬件，补充关于美国海上风能资源的信息，并通过降低市场壁垒，加速海上风电的部署。

美国能源部部长朱棣文认为，这些投资主要是为了促进技术进步和设施发展，增强风电机组市场竞争力，完善潜在投资者的信息。

据美国风能协会（AWEA）统计，美国海上风电的潜力达到4吉瓦以上。

19

19 福岛近海将建“漂浮式”风力发电站

日本政府决定在遭遇大地震和核电站事故双重洗礼的福岛近海建设第一座“漂浮式”海上风力发电站。包括三菱重工、富士重工、三井造船、IHI、清水建设在内的企业及东京大学和风力发电商将参与这一项目。海上风力发电站项目将带动当地就业和零件产业发展，有利于拉动经济复苏。

计划每架风车的发电能力约为5000千瓦，到2020年将有60至80架大型发电风车漂浮于福岛县近海，发电能力将达30万至40万千瓦，相当于一座核电站的三分之一。

20 美科学家制成碳纳米管风电叶片

美国科学家日前首次制造出碳纳米管增强聚氨酯风电叶片。与传统材料相比，该材料重量轻、强度大、耐久性好，有望成为制造下一代风电机叶片的理想材料。

为扩大风力发电规模，更有效地利用风电资源，通常只要增大叶片面积就能捕获更多的风能，但如果叶片过重，推动转子转动就需要更大的风力，这意味着更多的风力被浪费在了推动转子上而非发电。因此，更轻、更大、更结实耐用的叶片才是最佳选择。

机械性能测试表明，这种碳纳米管增强聚氨酯材料优于目前在风电叶片制造中所采用的树脂材料。对比发现，新材料每单位体积的重量要轻于碳纤维材料和铝，而在抗张强度上是碳纤维材料的5倍和铝的60倍。同时，这种增强聚氨酯复合材料叶片在抗疲劳测试中寿命比玻璃纤维增强环氧树脂材料长8倍，其断裂韧性也要优于玻璃纤维增强环氧树脂。

研究人员称，该项目现仍处于测试阶段，目前一切运作正常。下一步，他们的团队将进一步对该复合材料中碳纳米管的分散性作测试，以使该材料达到最佳性能。这种碳纳米管增强聚氨酯风叶将会被首先安装在一台400瓦的风力涡轮发电机上进行测试。

可再生能源投资创新高

■文 | 丽莎·伍德（美）

据彭博新能源财经报道，联合国环境规划署（UNEP）的技术、工业和经济司（DTIE）发布的分析报告显示，2010年全球可再生能源相关投资额创历史新高。去年的投资额为2110亿美元，比上年的1600亿美元有所进步，涨幅为32%，而这一数字是2004年投资额的5.5倍。

《2011年全球可再生能源投资趋势》是一份关于可再生能源的融资趋势和相关事项的分析报告。该报告称，这项记录本身并非2010年唯一引人注目的事件。因为除此以外，有充分证据显示，可再生能源相关活动正向发展中经济体转移。2010年新增金融投资（financial new investment）额达到1430亿美元，其中发达国家仅投入700多亿美元，而发展中国家则注入了720亿美元的资金。

从新增金融投资的角度来讲，这是发展中国家第一次超越发达国家，与此形成鲜明对比的是，2004年前者的投资额仅为后者的1/4。然而需要指出的是，有两个领域是新增金融投资没有涵盖的，即小型项目和研发，在这两个领域发达国家仍然处于领先地位。

近年来，可再生能源的力量对比正在向发展中国家倾斜，最主要的原因是中国加大了投资力度。2010年中国的新增金融投资额为489亿美元，较2009年增长28%，其中大规模风电场的资产融资居于主导地位。其他发展中国家的可再生能源领域投资也增长迅速。2010年，中东和非洲地区可再生能源领域投资额为50亿美元，涨幅高达104%。中美洲和南美洲的投资额增至131亿美元，涨幅为39%。

除了少数有实力的经济体外，发展中国家无力负担与欧洲和北美同等水平的清洁能源技术补贴。但是，这些国家亟需电力能源，而且很多地区拥有优越的风能和太阳能等自然资源。另外，发展中国家正组织研究一系列新型可再生能源技术以满足当地的具体需求，从稻壳发电到太阳能通讯塔，技术水平不断提高，并非柴油或其他化石燃料的拙劣替代品。

投资额创纪录

2010年，可再生能源总投资额为由2009年的1600亿美元增加至2110亿美元，2008年这一数字为1590亿美元。其中，新增金融投资，包括投入到可再生能源公司、大规模可再生能源发电项目和生物燃料项目中的资金，由2009年的1220亿美元跃至1430亿美

元，2008 年该项记录为 1320 亿美元。

另外，总投资额的其他组成部分，即小型分布式发电项目以及政府和企业研发投资，也有明显的增长。这部分投资额由 2008 年的 260 亿美元和 2009 年的 370 亿美元增至 2010 年的 680 亿美元。这不仅反映了屋顶光伏发电的繁荣，也反映了政府加大了研发投入。

近几年来，清洁能源领域的投资势头强劲，但一路走来仍有很多坎坷。其中包括 2006–2007 年度的生物燃料繁荣及后来的萧条，导致该领域的新金融投资额由 2006 年的 204 亿美元狂跌至 2010 年的 55 亿美元，此外还有金融危机和经济衰退对欧洲和北美的影响。尽管中国和其他新兴经济体增加了投资，发达国家在小型光伏发电项目方面也有所发展，充分抵消了此次挫折的负面影响，但是 2010 年欧洲和北美在可再生能源领域的新金融投资额仍然非常低。

近年来发达国家和发展中国家在可再生能源投资领域的地位变化说明，前者 2010 年在小型项目方面保持了巨大优势，但在新增金融投资方面，情况并非如此。2010 年，发展中国家在新金融投资领域首次以微弱优势领先发达国家。2007 年，发达经济体的该项投资额是发展中国家的两倍还多（以美元计），然而七国集团的衰退和中国、印度、巴西及其他重要新兴经济体的活力已经改变了世界范围内的可再生能源领域的力量对比。可再生能源企业的上市地点和制造厂投资地也因此发生了巨大变化。

2010 年，风电是新金融投资的主要领域（除小型项目），投资额增加至 950 亿美元，增幅为 30%。照此投资标准，其他领域已远远落后。尽管与 2009 年相比，2010 年投产的风电装机容量较低，但投入的资金反而增加了。这反映了从中国到美国和南美洲国家投资大型项目的决心，以及北海的近海风电基础设施投资的增长。

大规模项目的资产融资在新增金融投资中占主要地位。中国大型风电基地继续吸收数亿美元的资金，同时欧洲的大型项目也从国际发展银行获得重要支持，例如为比利时海岸的 Thornton Bank 海上风电场项目提供资金的欧洲投资银行。美国的风电场投资很大一部分来自财政拨款项目，该项目于 2009 年开始实行，2011 年底到期。

2011年投资形势

报告显示，由于多个大宗投资交易已在 2010 年的最后几周内争相完成，有的是为赶上优惠政策的末班车，2011 年第一季度的增长平缓也不足为奇了。2011 年第一季度新增金融投资总数为 290 亿美元，与去年最后一季度的 440 亿美元相比有大幅滑落，也低于去年第一季度的 320 亿美元。

资产投资方面，美国风能和欧洲太阳能的绝对美元数字跌幅最大。2011 年 1 月到 3 月最大的亮点是中国风能和巴西风能，前者比去年同期增长 25%，后者比去年翻了一番。

正在建设中的重要项目，包括巴西的装机容量为 211 兆瓦的 IMPSA Ceara 风电项目和装机容量为 195 兆瓦的巴伊亚 Renova 风电项目。此外，还有中国河北省围场御道口风电场，装机容量为 200 兆瓦。欧洲有好几个大型近海风电基础设施项目，包括德国海域的 Dan Tysk 项目，丹麦海域的 Skagerrak 4 项目和荷兰海域的 Randstad 项目。

公开市场投资方面，中国的华锐风电完成了价值 14 亿美元的股票出售交易，另一家中国太阳能设备制造商山东金晶科技募集

了 2.2 亿美元资金。

在风险投资和私募股权投资领域，第一季度最大的交易是一轮价值 1.43 亿美元的扩展资金，是由美国的生物质能和垃圾发电领域的专业公司 Plasma Energy 完成。

2011 年 3 月发生了一起对能源行业产生深远影响的悲剧。日本地震及后来的东京电力福岛第一核电站事故，使日本及德国等其他国家对核能的未来产生了怀疑。起初，可再生能源相关企业的股价急剧上升。但是，核泄漏问题的短期的主要受益者是燃气发电行业，而非可再生能源行业。

前途光明，道路曲折

尽管 2010 年可再生能源投资额创历史新高，但也并非一帆风顺。新的挑战开始出现，现存的难题更加棘手。首先，西班牙和捷克共和国对已有的光伏发电项目降低固定电价水平，此举严重打击了投资者的信心。德国和意大利等国政府也宣布将降低新建项目的固定电价，这是技术成本下降的必然结果。令人担忧的是，面对经济困境，各国政府可能会背弃先前承诺的项目交易，致使股权投资人和银行的利益受损。

第二个挑战源自天然气的价格。2010 年一年间，美国天然气价格（Henry Hub）基准都保持在每百万热值单位 3–5 美元，远低于 2008 年的峰值 13 美元，同样低于近 10 年来的中间几年的普遍价格水平。这刺激了美国、欧洲及其他地区的生产者建立了更多的燃气发电站，也对可再生能源项目的电力购买协议条款产生了消极影响。

可再生能源的第三个挑战来自外界的怀疑。这一点既体现在股市中，也体现在国际政治上。股市对清洁能源未来收益表现出悲观情绪。哥本哈根气候大会和气候门事件之后，国际政治界的情绪比前几年相比更为低落。事实上，各国在减排方面的进步，已经大大超过了 2010 年 12 月坎昆会议上的预期，气候学家们去年在“人类活动导致全球变暖”这个问题上进一步达成了共识。然而，清洁能源问题仍未变成各国政府工作的首要议题。

尽管如此，还是可以感觉到，在 2010 年下半年和 2011 年初，可再生能源行业正以各国社会舆论和决策者所没有预见到的速度迅速发展。这种进步体现在投资水平上，更体现在与传统能源的成本竞争上。

报告推断，一些投资者、媒体评论员和政府官员仍把可再生能源视作规模有限的细分市场。此种观点认为，主要投资行为仍然集中在传统能源如石油、天然气、煤炭以及日本福岛核泄漏危机发生前的核能领域，可再生能源投资只是一种昂贵的消遣而已。

这种观点好多年前就已经过时了，在 2010 年尤其如此。可再生能源的总投资额达到 2110 亿美元，比 2009 年增加了 32%，几乎是 2004 年的 7 倍。与可再生能源并行的智能科技领域，包括智能电网、电动汽车、节能装置的投资也欣欣向荣。

联合国副秘书长、环境规划署执行主任阿希姆·施泰纳（Achim Steiner）说：“作为绿色经济的核心，新能源的持续增长决非偶然。政府目标的设定、政策支持和鼓励基金的结合，支撑了可再生能源产业的崛起，使全球范围内的能源系统变革成为可能。”“可再生能源在投资、项目和地理上的扩展和延伸，必将为应对气候变化、克服能源短缺以及增进能源安全作出更大的贡献。”他补充道。

（本文原载于美国《可再生能源世界》杂志，翻译：钟晶）

定价：98.00元

《投资美国风电市场》

第一本针对中国风电企业
进入北美市场的指南书籍出版

由中国可再生能源学会风能专业委员会和美国美复能源公司合作编译的《投资美国风电市场》（英文书名《Overview of U.S. Wind Energy Industry and Market》）于2011年8月30日经中央文献出版社正式出版，并在日前于美国华盛顿召开的中美可再生能源产业论坛上全球首发。

本书是第一本服务于中国风电产业国际化，为协助中国风电企业开拓北美市场而编写的专业书籍。全书300余页，共分14个章节，以中英文形式全面而系统地介绍了美国风电的发展历程、市场战略、政策法律环境、项目财务、风电跨国公司的运作经验、企业并购、风电场开发、项目许可，以及劳工和培训等方面的内容。

本书的出版，是中美两国可再生能源领域合作研究的又一重大成果，对于不断协调两国风电投资商业模式，促进全球风电应用的规模化和规范化有着深远意义。

如需购买，请联系中国可再生能源学会风能专业委员会
联系人：徐晓英
联系电话：010-59796665-3501
联系邮箱：xuxy@cwea.org.cn

陈涛：福建风电探路人

■本刊记者 | 陈小慧

作为早期研究风电的几个省份之一，福建省在 20 世纪七八十年代进行的 55 千瓦、200 千瓦风电机组研制，与浙江运达、上玻院、北重等企业进行的风电技术研究，共同构成了那段时期我国风电机组技术的研究过程。而平潭莲花山试验风电场的建成，与荣成、八达岭这几个早期的风电试验场（站），成为当时我国研究风电技术的主要试验场所。

陈涛作为当时福建省电力局科技处负责人，一直负责执行福建省早期风电的研究和建设工作，直到退休。谈起当初组织风电科研攻关和莲花山试验风电场的建设过程，陈涛感慨万千。“说实话，那是一段曲折的经历。”陈涛说，“过程虽然艰辛，但这毕竟是我国早期风电的一个探索过程，正因有了这些过程，才为我国风电后来的发展道路提供了有益的借鉴。因此，我们当初的艰辛是值得的！”

55千瓦的探索

自 1977 年浙江运达将雄鹅峰的 30 千瓦风电机组迁装嵊泗岛之后，便正式拉开了我国现代风电机组研制的序幕。许多部门的研究机构和科研院所都满腔热情地加入到风电技术的研究工作中来。

“1977 年福建省科委也启动了 FD21-55 千瓦风电机组的攻关工作。具体组织工作由福建省电力局科技处主管。后来福建省的风电科研和建设等工作，也是由科技处主管。”

FD21-55 千瓦机组科研启动之初，陈涛还没在科技处工作，该科研项目由时任科技处总工陈枝楠负责。1986 年陈涛调任科技处副处长，正好赶上 FD21-55 千瓦机组的鉴定。

陈涛这样描述当年 FD21-55 千瓦机组的研究情况：“当时大家干科研的热情很高，但却把这个风电看得太简单，对风电特性并没有很好的理解，甚至认为风电机组的设计制造比起飞机制造等要容易得多，所以不用多长时间就可以攻克。等到做进去后，才发现不是那么回事。我国研发风电机组的很多条件都不具备，资金缺乏，技术空白，材料短缺，工艺落后，同时，对风电机组这样一种机械的认识和理解也很欠缺。”

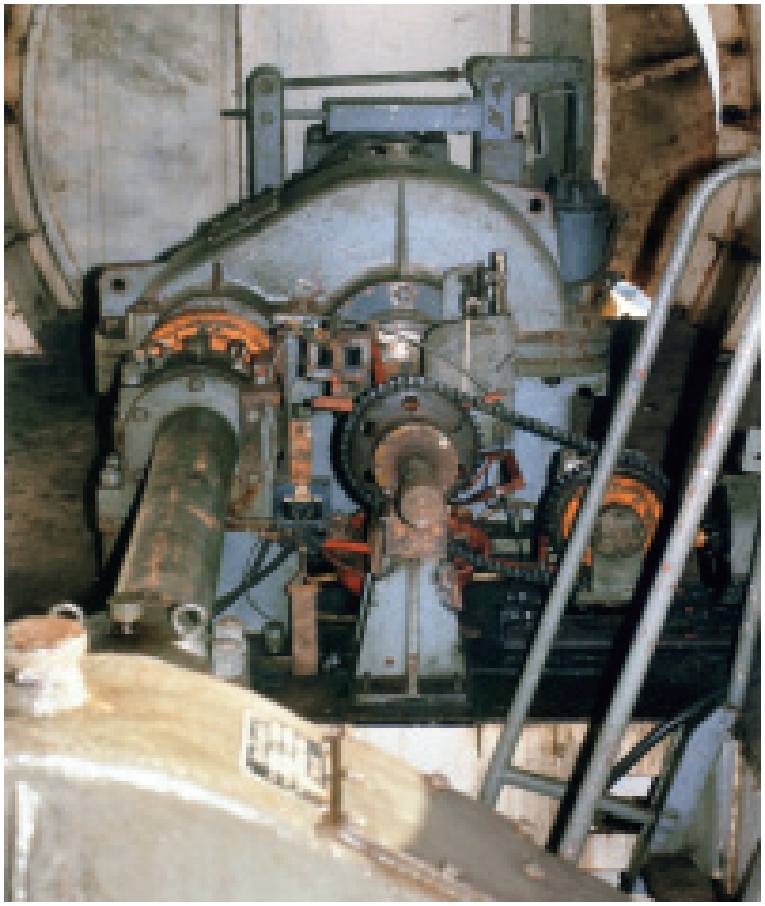
这台 FD21-55 千瓦机组在 1982 年试制成功后，安装在平潭风电试验站，与一台柴油机组成互补系统并网运行。机组叶片采用直升飞机退役桨叶，塔架高 16.2 米，为空心圆柱形混凝土结构。

由于对风电机组的认识不够，这台机组采用的是同步发电机，导致后期出现了诸多问题。“同步发电机的转速低了的话，到不了与电网同步的点，就很难并上网。”科研组想了很多办法，但因周波由电网决定而无法改变，也就是发电机的转速不能变，调节励磁电流的结果相当于调节了电机的功率因数和无功功率，“有功波动，无功也波动。造成与之互补的柴油机很强的波动。打个比方，就像开车时一会踩油门一会踩刹车一样，机器哪能受得了。”但也正是通过这台机组的试验，研究人员意识到风电并网问题的重要性。

通过这台机组的试验，研究人员意识到风电并网问题的重要性。

FD21-55 千瓦风电机组作为科研上的探索，研究人员在研制过程中针对遇到的各种问

↓吊装完成的FD21–55千瓦风电机组



↑FD21-55千瓦风电机组机舱内部

题进行了很多尝试。

针对风电出力的变化，科研人员用水池制做了一个水阻抗，当风电出力过大时，多余的电力就通过水阻抗消耗掉，机组对外的出力表现就是平稳的了。“当然这只是一个试验，是不能并网正式运行的，如果正式运行的话，水会都被烧开，烧没的。”陈涛说。除了有功的控制，科研人员对无功跟踪也进行了试验，研究了一套无功跟踪系统，以保证发电机电压与电网相同。“这个系统跟柴油机并起来也能运行，但是离真正的商业运行还差很远。但是，通过这些试验，我们了解到，如果将来风电规模逐步扩大，有功跟踪和无功跟踪这两个系统是必须具备的，否则，并网是个大问题。”

200千瓦的改进

走过 FD21-55 千瓦机组的一段“弯路”，1984 年，科技处进行 FD32-200 千瓦风电机组研制时，采用了异步发电机，“这是风电机组商业化运行的一个重要前提。因为异步发电机是利用滑差来解决风电机组出力脉动和电网稳定运行之间的矛盾，比同步发电机更容易控制，实施起来也更方便”。陈涛说。

机组的另一项改进，是采用了变桨距技术。“之前研究的定桨距技术，风轮推力很大，因此塔架要做得很粗，叶片、主轴也都特别结实，而变桨距除了效率高之外，风轮推力小很多，机组自然也就‘苗条’很多。”另外，该机组采用了玻璃钢叶片，由上玻所（今上玻院）设计制造，这在我国大型风电机组研制上属首次。

FD32-200 千瓦风电机组由水电部杭州机械设计研究所、福建动力机厂、上玻所、福建电力局、平潭风电试验站等单位于 1988 年研制成功，这是我国研制的首台大型风电机组。机组吊装在平潭风电场，1993 年通过能源部鉴定。从开始研制到通过鉴定，前后历经 10 年。

但由于控制系统原因，机组鉴定之后，基本不能正常运行。“机组控制系统是用很多独立元件焊出来的，性能不稳定，科研人员在的时候敢开机，人一走，谁都不敢让它动了。”

机组后来的运行中，出了两次大的事故。一次是设计原因致使机组飞车。在设计时，桨叶电磁阀被设定为有电顺桨，无电开桨，用一个蓄电池为电磁阀供电。由于电网故障，造成机组脱网，没有了负荷，机组便停机顺桨。“结果蓄电池的电压不够，桨顺不过来了。整个风轮飞速旋转，塔架剧烈晃动。就在众人惊慌失措的时候，有一个小伙子冒着危险爬上了机舱，手动将阀压下去，机组最终才停下来。”陈涛讲起当时的情形，至今觉得心有余悸。

另一次是由于一支桨叶固定螺栓松动，造成机组半夜在停机状态下转动，将机组电缆全部绞断。事故发生在晚上，半夜刮风时，两支叶片顺桨，但另一支叶片的固定螺栓掉了，呈打开状态，风轮开始旋转。但这支桨叶的转动使整个风轮并不成正常旋转，风轮水平轴旋转，机舱偏航却一直向一个方向旋转，最终将机组电缆全部绞断。

←1992年4月，陈涛（左一）陪同时任能源部总工程师秦钟一（左三）视察平潭风电试验站时参观FD32-200千瓦风电机组

“科技处派人维修，将螺丝锁好，加上保险之后，换电缆时却没钱了。那时正好水电部水利电力在分家，找谁谁不管。”陈涛看着机组坏在那里，心里着急。最后，经过各方努力，终于争取到水利部科技司 5 万块拨款，可是这时距离机组故障已经过去了一年。陈涛感叹到：“这一年里，机组就坏在那里，等拿到这笔钱时，什么东西都生锈了。”

虽然机组的研制过程和后来的运行并不十分顺利，但通过机组的研制工作，使我国对风电的认识更进一步，为风电机组的设计和运行中容易出现的问题提供了方向性的借鉴。

平潭试验风电场

1985 年 5 月，国家科委与欧共体签署了一份科技合作协议，由福建省科委组织在平潭建设一个风电场，安装 4 台由比利时赠送的风电机组。平潭风电试验站站长王铭德向福建省电力厅寻求技术支持，于是，福建省水利电力厅组织相关单位进行了机组安装、调试等工作。

“项目的建设得到国家科委和比利时政府的极大重视和大力支持。1986 年 11 月项目建

←1988年1月，FD32-200千瓦风电机组吊装完成

成时，比利时首相和时任科委主任宋健为风电场剪彩。”但是，这 4 台机组是样机，存在着这样那样的问题，叶片刚装上没多久就开裂了。风电场初期运行情况良好，年发电小时数能达到 1000 多小时，但之后的发电量却越来越少。

陈涛解释了导致风电场发电量降低的原因：首先是因为风电机组仅高 20 余米，而莲花山地处我国南方，树木生长高大繁茂，逐渐对风形成阻挡，通过风电机组的风越来越小。其次是备件供应问题。机组零部件出现故障后，需要向比利时方面申请新的配件，由于路途遥远，风电场收到新的零部件通常需要几个月时间。在此期间，风电机组只能停机。再次就是电网系统问题。平潭实验风电场所发出的电并在一条农电线路网上。由于农电线路在当时被认为是最不重要的线路，在电网电力不够的时候，首先被切掉的就是农电线。因此，机组经常连不上电网，又损失一部分电量。

谈起风电场的运营状况，陈涛用“昔日辉煌已成一梦遥”来形容 1993 年某部门领导视察该风电场时，看到风电场衰败的情景。1993 年时，我国建有风电场的省份还没几个，福建平潭莲花山是其中之一。风电场建成之初的运行情况良好，但随着时间推移，受各种因素影响，逐渐失去了刚开始的“亮丽景象”。机组周围出现了杂草丛生，树木参天的情况。陈涛说：“当年那位领导听到我的话之后，说了一句：‘老陈，那让我们再创辉煌吧！’，现在回想起来，那位领导的话是对的。今天，我国风电已成为全球第一，全国各地建设了几百个风电场，设备制造业也蓬勃发展起来。”

“眼下风电并网难等问题，在我国风电开发初期已经遇到并认识到了。如果及早开展研究并且列入电力发展规划，今天也许不会这样被动。风电作为可再生能源发电的先锋，在总发电量中占有率逐步提高的过程将是电力模式改革的过程，现在仅仅是开始罢了。”陈涛在采访结尾时这样说。

↑风电场全景

←机组吊装

Renewable energy consultants

GL Garrad Hassan

经验很重要

数十年致力于帮助客户实施其项目

尽职调查
施工监测
资源评估
电气连接
检查和审查

项目开发合作伙伴
选址可行性
测量服务
布局设计
环境和许可

风机咨询
资产管理和优化
短期预测
培训课程
软件产品

北京市朝阳区朝阳北路237号楼复星国际中心26层2608、2609房间，邮编100020

电话：86 10 6588 7055　　传真：86 10 6588 2909

位于大白山山区的风电机组

三四类风区开发：蔚然成风

三、四类风区风电机组的出现，使得过去难以开发的风能资源重新具备了开发价值，也让中国风电发展多了一条途径。

本刊记者　苏晓　赵靓

2011 年，在连续经历几年爆发式增长后，我国风电慢慢进入一个平缓的发展期。一方面，大基地的风电开发依然在严格有序地进行；另一方面，随着三、四类风区风电机组的不断研发和改进，三、四类风能资源的开发也初具规模，成为风电领域的另外一道闪亮的风景。各大发电企业和整机制造商开始聚焦于华中、华东和华南等内陆的一些山地、河谷、湖泊区域，上演着新一轮的圈风运动。根据中国可再生能源学会风能专业委员会统计的数据，截至 2010 年底，我国在三类风区的总装机容量累计达到 5340 兆瓦，主要分布在甘肃、黑龙江、吉林、宁夏和新疆等 5 个省份；在四类风区的总装机容量累计达到 15436 兆瓦，覆盖范围达 27 个省市。

追索风资源

曾经，三、四类风区的风能资源在风电人的眼中并不耀眼。2009 年 7 月 20 日，为规范风电价格管理，促进风力发电产业健康持续发展，国家发改委印发了《关于完善风力发电上网电价政策的通知》。《通知》规定，按风能资源状况和工程建设条件，将全国分为四类风能资源区，相应制定风电

标杆上网电价。四类资源区风电标杆电价水平分别为每千瓦时 0.51 元、0.54 元、0.58 元和 0.61 元，其中标杆电价水平为 0.58 元和 0.61 元的风能资源区就对应三类和四类风区。

有业内人士习惯于把三、四类风区称为低风速风区，实际上混淆了两个不同的概念。对于低风速这个概念，中国可再生能源学会风能专业委员会副理事长施鹏飞的解释是：风能资源评估标准中的 3 级，以风功率密度每平方米 300 瓦（风速频率分布属于瑞利分布时对应于年平均风速每秒 7 米）作为可开发的正常值，达不到的那部分便是“低风速”，另外如风力分级标准中规定的 IV 级基本参数中轮毂高度年平均风速为每秒 6 米，相当于低风速。

权衡风电机组、建设工程和并网等多方面的成本，三、四类风区风能资源的经济开发效益并非全无优势，有时甚至较一、二类风区更胜一筹。

实际上，低风速概念与三、四类风区并不完全等同。中国气象局风能太阳能资源评估中心首席专家朱蓉解释，三、四类风区如云贵高原某些地方的风速并不低，风能资源甚至和“三北”等大基地一样好，只是条件复杂造成经济效益较低，不宜开发，所以才划分到四类风区。

从国家发改委的风能资源区分类来看，三类风区主要集中在宁夏，以及吉林、黑龙江、甘肃、新疆等省的部分地区，四类风区则几乎遍布全国各省，其中陕西、山西、宁夏、浙江、福建、广东等都是三、四类风区分布明显的省市。朱蓉解释，三、四类风区分布的区域主要是内陆的一些山地、高原和丘陵地区，也包括沿海省份的一些平原地带，其中以云贵高原最为突出，零零散散的，适宜分散开发。

如果就我国风电发展刚起步时而言，三、四类风区风能资源是不具备开发价值的。但是，随着最近几年风电机组技术的不断进步，不管是从机组性能还是工程建设条件而言，三、四类风区的风能资源都有了一定的开发价值。国电风电设备技术研究所工程师董礼认为，权衡风电机组、建设工程和并网等多方面的成本，三、四类风区风能资源的经济开发效益并非全无优势，有时甚至较一、二类风区更胜一筹。

当然，三、四类风区也有其明显的劣势。单从风能资源而言，三、四类风区的风功率密度一般低于国家规定的 3 级（风功率密度每平方米 300 瓦），有的完全达不到开发级别。而且，这些地区的风能资源不同于大基地的“一年一场风，从春刮到冬”，风向和风速都复杂多变，极不稳定。除了风能资源本身，三、四类风区的地形和气候等因素也会造成开发上的困难。朱蓉举例说，我国的云贵高原，还有南方的很多山区，如湖南的南山牧场，安徽滁州等地，这些地区本身不错的资源却被山区、丘陵割得零零散散，无法成片，开发过程中还要考虑高海拔、雷暴、挂冰等各种情况，开发成本过高。

不过，三、四类风区也有一、二类风区无法比拟的一些优势。这些风能资源区和“三北”等大基地不同，大部分接近电力负荷区，靠近人口密集区，经济条件较好（云贵高原除外），不存在大规模远距离输送电力的问题，可以就地消纳，较适用于电力缺口较大的东中部和华南地区，而且可以直接接入现有配电系统变电站，不需额外送变电设施的资金投入。另外，

风电作为与其他发电方式结合的重要形式，已经催生了风光互补、风柴互补、风电与抽水蓄能互补等多种互补发电的能源利用方式。在国电联合动力技术有限公司副总经理孙黎翔看来，三、四类风区风能资源开发在某些方面反而会较大地减少像跑项目等工作成本，经济效益并不差。

依托大叶片

近几年，随着国内外风电整机技术的不断进步，大叶片风电机组的面世和不断改进使三、四类风区风能资源的有效利用成为可能。在开拓大基地市场的同时，众多制造商纷纷将触角伸向三、四类风区。

单从风能资源角度而言，三、四类风区的风速普遍比大基地低，为了增大扫风面积，获得更多风能资源，相应的机组也需要加大风轮尺寸，从源头上增加能量。就此而言，大叶片是多数风电设备制造商的一致选择。2011年，维斯塔斯在中国市场推出V100-1.8兆瓦风电机组，并称其100米长的叶轮直径设计能够从可利用的风能中挤出更多能量。金风科技1500千瓦、87米叶轮直径的低风速机组已经进入量产，据称年均可利用率达到98%以上，发电量比同等额定功率的82米叶轮直径机组高出5%以上。三一电气推出的SE10020机型，也是针对三、四类风区的大叶片机组。国电联合动力甚至表示要在山东、江苏等省将叶轮直径加长到96米。

叶片的加长加大并非简单的嫁接，而是需要周密考虑风电机组的各个系统和零部件。简单地加长加大叶片，将对机组载荷产生重大影响，这成为国内许多整机厂商难以参与针对三、四类风区的风电机组市场的一个技术难题。“相对于传统机组，新型机组在一些方面的设计会有所调整。首先随着风轮的增大，载荷也会增加。所以在叶片的设计上，不管是气动还是控

制上，都要考虑到载荷。”董礼谈到，“其次，叶片加长后，在原来的基础上可能要对偏航的轴承、变桨的轴承等很多部件重新设计。因为，三、四类风区很多时候的风速较低，对实际存在的一些高风速就不需设计。比方说在四类风区，正常机组在风速每秒 25 米时才切出，但三、四类风区高风速的小时数量比较少，可能切出风速在 20 米、甚至 18 米就足够，从而在设计上这个地方的载荷也可以不考虑。”而国内厂商在新机型上多半是依托原有机型，对叶片没有进行重新设计，因此目前国内整机企业遇到的技术难题主要是载荷问题。

不过，大叶片还只是开发三、四类风区的一个重要途径，而非充分条件。三、四类风区风能资源分布区域广泛，其资源、气候和地形都呈现出明显的地方特征。为满足特殊环境的使用需要，针对三、四类风区的风电机组的适应性要求较高。例如，为满足我国西南及长江流域的多雷暴天气，需要风电机组具有较强的防雷能力；为满足空气湿度高的中南部地区使用，风电机组应具有防冰冻能力；以及为满足我国西南高原环境要求，应具有高海拔适应性，诸如此类。这些复杂环境因素对机组提出的技术难题并非每个厂商都有实力应对，因此领跑三、四类风区多元化细分市场的是综合实力较强的少数几家。这些厂商主要是结合自身的优势，技术路线各异却殊途同归，旨在降低成本，以最大程度地从三、四类风区获利。

↓尚义风电场

老牌的风电整机企业主要倚靠其坚实的基础和多年的技术积累，有些企业在针对三、四类风区的风电机组的设计上早已取得丰富的经验。金风科技相关负责人表示，早在公司创业之初，就有分布式风电机组开发的经历，其近 15 年的技术研发和细分市场开拓方面积累的经验，使金风科技更快更准地掌握并满足市场需求，有足够经验专项开发出多元化定制的产品，如低风速、高海拔、低温、高温、近海机组等。对于已进入风力发电领域 30 余年的维斯塔斯来说，技术研发方面的投入一直是核心的任务。该公司每年都在技术研发方面投入巨资，仅 2010 年注册的专利就达 227 项。其针对多冰冻地区的解决方案，可通过在机舱上加装挂冰检测装置避免挂冰对设备带来的损害。

像三一电气这类新进入市场的风电整机制造商，则发挥集团优势，在针对三、四类风区的风电机组的研发上投入大量的资金和精力，并充分利用其重型机械生产方面的优势，形成一个完整的产业链。三一电气叶片子公司研究院院长于清在介绍公司推出的移动工厂概念时说：“海拔高最大的一个问题就是运输的问题，也就是移动工厂的问题。首先把模具做成分段式的，解决了运输的困境。最重要的是工艺的一个转变，山上和山下的工艺不同，我们在这方面通过实验比较好地解决了这个问题。还有一个二代移动工厂，提高回收利用率。”

↑青海锡铁山适用于高海拔环境下的风电机组

至于与电力企业关系密切的国电联合动力，孙黎翔表示，公司电力行业的身份使其对如何去更好地开发三、四类风区机组更有经验，也更有优势。公司2009年便开始从事三、四类风区的相关研究，很多行动都比别人超前，在机型设计上起点也更高。在接受采访时，孙黎翔很兴奋地告诉记者，公司2010年在江苏装机的叶轮直径为86米、1.5兆瓦的机型客户反馈良好，经济效益不错。

另外一项令一些整机厂商难以参与针对三、四类风区的风电机组市场的因素是，对于风速较低的地区，低风速所占时间较长，需要风电机组能够在较低的风速下就可以并网发电。但单纯地加长叶片，造成叶片的重量增加，令风轮的转动惯量加大，便更需要大的风电机组启动力矩。解决此问题的方法除了实现风电机组在低风速段控制的最优化，并尽可能追踪理论功率曲线外，直驱永磁风电机组也是一种选择。

“直驱机组在三、四类风区竞争优势将更加明显，因变流器容量决定了风速调速范围，直驱机组采用的是全功率变流器，其风速可调范围为50%-100%，而其他机组的风速可调范围一般只能做到70%-100%，另外直驱机组在少维护、耗材少、并网性能好、发电效率高上也有明显优势。”金风科技一位工程师如是说。

总之，叶片的增长，以及对风电机组适应性要求的增加，都会带来成本的大幅度提升。大多数整机厂商在考虑载荷与机动效率以及经济效益三者间平衡的情况下，会选择折中方案。例如1.65兆瓦的风电机组使用叶轮直径86米或89米的叶片，而非使用叶轮直径100米的叶片。同时整机厂商也很难将所有零部件进行更换，而会选择性地更换偏航、变桨等系统。因此，董礼认为在载荷的主动控制方面，也需要进行改进，避免传动、塔架、叶片的震动，从而达到综合降低载荷的目的。

凭借低风舞

借力针对三、四类风区的大叶片风电机组，有实力的发电企业也纷纷进军三、四类风区，以期分得一杯羹。中广核风电公司投资发展部经理刘亚非这样表示，伴随着风速较高的优良

风电资源的日渐匮乏和风电机组价格及项目造价的进一步下降，中广核在大量协议资源的基础上，适时地进入三、四类风区开发风电项目。

从发电企业的角度而言，进入三、四类风区的风能资源开发并非是一种盲目的跟风。刘亚非坦言，虽然三、四类风区风能资源较差，对投资收益率造成较大压力，但这类资源初期关注度较低，获取资源的难度要小一些。另外，不管是从电价还是并网而言，三、四类风区都是有优势的。属于低风速覆盖区的三、四类风区享有电价优惠，而且通常电网方面限制较少，政府的支持力度较大，有利于项目的快速推进。

对于三、四类风区的开发，龙源电力集团股份有限公司总工程师杨校生认为，开发风力资源主要需解决两个问题，一个是造价，另一个是电价。在总结安徽来安的低风速风电场开发经验时，他表示来安风电场从投入使用到现在，运行状况良好。实践证明,在风能资源利用低效地区，采用改进的低风速区样机，仍然可以达到年等效满负荷小时数 1900 左右，具有一定的开发价值。另外，由于工程造价和电价都有优势，设备也很好，所以获得一定的经济效益没有问题。

随着上游风电机组制造商针对三、四类风区不断开发出一系列风能捕获能力更强、价格也相对低廉的机组，电力企业的风电开发也获得了有力的设备支持。

对于三、四类风区开发中所遇到的问题，杨校生总结为三点：第一，由于三、四类风区的风场尾流影响比高风速风场大，所以各机组之间的距离肯定要比高风速风区的大，且计算结果都证明如此。第二,三、四类风区风场的风向稳定性差，机组偏航的动作多。第三，风速的微小变化可能会影响上网电量的变化。对于这些问题，不仅仅是简单加长叶片就可以解决的，而是要解决因叶片单位扫风面积增加所带来的一系列问题，例如叶片的系统性能和结构强度、风速变化引起的机组疲劳、整机结构强度和稳定性等问题。此外，更有效的机组控制策略、机组性能、材料消耗和经济型方面还需要反复进行规划。杨校生强调，安徽来安的案例对南方很多类似省份在三、四类风区的开发规划方面都有很好的借鉴作用。

但是，对于三、四类风区开发所呈现出来的“风光”之势，有专家强调也要深入思考其中的深层次问题，比方说三、四类风区开发所带的成本、规划和技术方面的问题。

三、四类风区开发的过程中，不管是开发商还是整机制造商，都会考虑机组的成本问题，但整机制造商考虑的会更多些。针对三、四类风区的风能资源特征，整机制造商要对机组结构设计或是某个方面进行改进和优化，这需要增加一定的成本。尽管单从机组的改造而言，大部分整机商表示成本不会有数量级的增加，但由于这些风区分布区域的地形和气候的复杂性，机组在运输、安装和后期的维护上有很多已知或未知的挑战，这都是成本。对此，董礼就表示，对于三类风区，联合动力开发的范围要广泛些，但要衡量各种成本，而对于四类风区，目前公司的市场定位主要在电力负荷区。

对于各省三、四类风区的规划，当地政府需要严格把关。近几年，有开发商为了抢占资源，在缺乏经验和规划的情况下，匆忙投产，形成非理性竞争。目前，有很多已经批下来的项目因为经济效益的问题而搁置、荒废或流产。另外,由于三、四类风区主要分布在华南、西南、东南等人口相对密集的区域，在风电场的建设和运营上，容易出现土地纠纷，或是占用耕地和林地等，或是因风电机组的安装带来的一系列生态问题。这都需要提前筹划和应对。

对于三、四类风区风电机组的研发，有些公司为了节省成本和缩短研发周期，不再对叶片以及与其相关环节进行重新设计，仅仅是对原有机型结构稍作改进便作为针对三、四类风区的风电机组投放市场。而且，针对三、四类风区的风电机组在我国投入运行的周期还较短，很多技术方面的难题需要公司花大气力踏踏实实地去攻克。

诚然，三、四类风区风能资源的开发为风电发展打开了一扇窗。但业内的一致共识是，期望看到风电技术和商业模式的创新。

（赵锦卓对本文亦有贡献）

御风之道 积厚行远
26年丰富经验
16载驰骋中国
我们为您提供高效的绿色能源
我们中国和其他亚洲国家市场提供1.5MW和2.5MW风机
详情请访问官方网站
www.nordex-online.com
NORDEX
We've got the power.

低风速地区风电开发成本探讨

■浙江运达风电股份有限公司 | 申新贺　叶杭冶

根据对地理和气象资料的分析，我国的低风速风能资源更丰富且分布区域广大，约占全国总面积的 68%。据广东省的初步测算，达到可开发标准的低风速风电场资源储量约为 4 级以上风资源的 3 倍；在东部沿海、湖等地区的低风速风资源储量同样也很可观。由于临近用电负荷中心，电网、路网条件好，电价承受力强，开发利用这些区域的风能将是我国风电发展的重要方向。因此，低风速地区风能资源的开发利用，对实现我国 2020 年可再生能源目标具有重要的意义。

现在市场上使用的风电机组一般是针对 4 级以上风速地区优化设计的，随着风能市场的发展，具有这样风速条件的地方越来越少，因此有必要研究应用在 3 级风速地区的风能开发技术。

相比欧洲，美国、日本和我国的风资源都具有年平均风速较低的特点。美国于 2002 年就已经开始低风速风电开发技术的系统性研究，并计划到 2012 年把陆上风电的度电成本降到 3 美分 /kWh。目前，我国对低风速地区风能资源的开发已经成为行业的共识，对风电机组的改进设计主要是通过加大风轮直径来降低度电成本。

低风速风电开发关键技术

低风速风电技术的关键是提高风电机组低风速环境下的风能利用率、降低度电成本。高效、低成本的低风速风电机组是低风速地区风能资源开发利用成败的关键。根据风能转换原理，要实现上述目的，需要从以下几个方面实现技术突破：

第一是更大的风轮直径。对于低风速大型风电机组而言，由于其额定风速低，要达到同样的功率输出，比普通风电机组叶片设计得更大以便捕获更多的风能。需要研究更加长的叶片带来的柔性、叶尖高速等带来的影响；采用低实度、高叶尖速比的设计，开发新翼型，提高低风速下机组的出力性能。对新翼型的研究，如何降低风轮的启动风速，提高风轮低风速下的能量转换效率，并能在低风速下实现功率输出的稳定性。

考虑成本及机组受力情况，低风速大型风电机组叶片采用轻质、高强度的碳纤维与玻璃纤维混合的材料，能充分发挥碳纤维材料高弹轻质的优点，并可规避完全使用碳纤维材料而带来的高成本问题。

第二是塔架结构与制造技术。通过增加塔架的高度，获得更高的风速，是提高机组发电量的有效途径。由于轮毂高度的提高将显著增加塔架成本，需要研究应用新型结构的塔架，减少钢材的使用，降低成本。

实际计算表明，当轮毂高度大于 80 米后，使用钢结构塔架将大大增加风电场开发成本。通常低风速地区风电机组轮毂高度应不低于 80 米，目前已经有较多的塔架结构可以把轮毂高度提高到 100 米及以上，同时成本增幅较小。这种技术通常是采用混凝土结构或钢与混凝土的混合结构，如 ATS 塔架，可以用较小的制

造成本获得轮毂高度的增加，从而提高发电量。

第三是传动链结构创新。风轮重量的增大会导致传统传动链结构部件尺寸和重量的增加，通过减轻电机重量和成本，提高传动链效率，采用低风速或中速发电机组，获得低额定转速。

第四是提高长时间低功率输出状态下电力控制系统效率的技术。

第五是研究降低运输安装成本的新技术。

低风速地区风电开发成本计算

应用于低风速地区的风电机组重量和尺寸更大，部件之间的相互影响也更复杂，如果不能充分评估机组总体设计参数的变化对成本的影响，也许会导致与期望相反的结果。风轮直径增加将会导致风轮成本和重量增加，同时亦会增大作用在风轮面积上的推力，使得传动链尺寸和重量增加；塔架高度的增大亦使得塔架和基础建造成本增加。风电机组部件尺寸和重量的增大也将增加风电后期的运维成本。

本文分别设计了 4 款低风速风电机组设计方案，分别用 A、B、C、D 表示，具体参数如表 1 所示。

发电量按 5% 的折减系数，根据《风电机组设计成本和尺度模型》（Fingersh，2006）所建立的风电开发成本模型，编制成本计算分析程序，对上述 4 种技术方案的成本计算结果如表 2 所示。

分别以 A、B 方案为基准，比较分析不同设计方案的成本，得到表 3 的结果。

表1 机组设计参数

参数	A	B	C	D
风轮直径	77	82	82	88
叶尖速度	70m/s	74m/s	74m/s	75m/s
轮毂高度	65	65	80	80
年平均风速（10m 高度）	4.8m/s			
风剪切指数	0.2			

成本计算结果分析与总结

从表 3 的计算结果，我们可以得出如下分析结论：

轮毂高度不变，风轮直径从 77 米增大到 82 米的情况下（B/A），初始投资成本增加了 7%，发电量增加了 10%；

风轮直径不变，轮毂高度从 65 米增加到 80 米的情况下（C/B），初始投资成本增加了

表2 4种低风速风电机组技术方案成本

名称	单位	A	B	C	D
风轮	$	301182	353644	353644	424396
传动链、机舱	$	599349	622040	622040	652597
控制系统	$	35000			
塔架	$	178262	202448	249657	287850
机组成本	$/kW	742.53	808.75	840.23	933.23
风电场其他建设成本	$	381984	387869	405240	413684
初始投资成本	$	1495777	1601001	1665581	1813527
风电场平准化运营成本	$/kW	0.0117	0.0113	0.0111	0.0109
年平均净发电量	kWh	4477424	4933123	5271475	5607579
平准化度电成本	$/kWh	0.051	0.050	0.049	0.049

注：表中成本参考 2010 年的风电机组成本数据统计。

表3 不同设计方案之间的比较

名称	B/A	C/A	D/A	C/B
塔架	1.14	1.40	1.61	1.23
风轮	1.17	1.17	1.41	1.00
机组单位成本	1.09	1.13	1.35	1.04
初始投资成本	1.07	1.11	1.21	1.04
年均净发电量	1.10	1.18	1.25	1.07
平准化度电成本	0.98	0.96	0.96	0.98

4%，发电量增加了 7%；

风轮直径从 77 米增大到 88 米，轮毂高度从 65 米提高到 70 米的情况下（D/A），初始投资成本增加了 21%，发电量增加了 25%；

相对于只增加轮毂高度的设计方案，增大风轮直径将获得更大的收益；

在度电成本更低的情况下，发电量最多的方案 D 是最佳的技术方案，但机组单位制造成本也增加最多；这一结果和目前低风速风场应用的主流机组参数相吻合；

降低塔架、叶片的成本将会显著降低整机成本，是低风速风电开发技术的重点。

从上述分析结论可以看出，适用于低风速地区的风电机组制造成本必然高于目前用于中高风速地区的风电机组。

价格战已经对我国目前风电市场的整机制造商和供应链造成了极大伤害。同一功率的风电机组，风轮直径各异但价格不变的现状将在未来低风速地区风电开发中更加摊薄整机制造商的利润。

要保证合理的行业利润，整机制造商必须对当前风电机组的设计进行创新，以降低整机制造成本，新型高效的叶片、更高轮毂高度的低成本塔架等技术应得到充分的重视和应用。如果不能保证合理的利润，势必会产生严重的质量问题，使投资收益无法保证。

·链接·

2010各省市新增装机和累计装机容量（单位：兆瓦）

省	市	新增装机	累计装机
内蒙古	阿拉善	57	99
	巴彦淖尔	173	1454
	包头	411	1075
	赤峰	665	1980
	鄂尔多斯	0	152
	呼和浩特	186	335
	呼伦贝尔	164	332
	通辽	1575	3078
	乌兰察布	646	2608
	锡林郭勒	426	2087
	兴安盟	361	659
汇总		4662	13858
甘肃	白银	39	129
	嘉峪关		45
	酒泉	3668	4720
	武威	50	50
汇总		3756	4944
河北	沧州		149
	承德	519	1246
	唐山		50
	张家口	1487	3350
汇总		2006	4794
辽宁	本溪		25
	朝阳	134	188
	大连	234	354
	丹东		21
	阜新	605	1447

省	市	新增装机	累计装机
	葫芦岛		81
	锦州	65	310
	盘锦	50	50
	沈阳	374	950
	铁岭	179	595
	营口	3	46
	（空白）		2
汇总		1642	4067
吉林	白城	576	2114
	辽源		50
	四平	112	288
	松原	189	489
汇总		877	2941
	朔州	171	246
	忻州	272	357
	运城	39	49
汇总		627	948
广东	江门	129	137
	茂名		9
	汕头	76	476
	汕尾		85
	深圳		2
	阳江	65	65
	湛江		50
	珠海	50	65
汇总		319	889
福建	福州	96	366

省	市	新增装机	累计装机
	宁德	42	42
	莆田	80	191
	漳州		187
	泉州	48	48
汇总		266	834
云南	大理	203	282
	曲靖	57	99
	红河哈尼族彝族自治州	50	50
汇总		310	431
浙江	金华	15	15
	宁波		50
	台州		98
	温州	16	62
	舟山	33	74
汇总		64	298
上海	上海	127	269
汇总		127	269
海南	儋州		99
	东方	61	106
	文昌		52
汇总		61	257
陕西	榆林	177	177
汇总		177	177
北京	北京		153
汇总			153
安徽	滁州	149	149
汇总		149	149
河南	南阳		23
	三门峡	64	89
	信阳	9	9
汇总		72	121
天津	天津	103	103
汇总		103	103
湖南	郴州	56	60
	邵阳	36	36
	永州		2
汇总		92	97
江西	九江		84
汇总			84
湖北	恩施	25	25
	荆门	2	2
	咸宁		14
	孝感	17	30
汇总		43	70
重庆	重庆	33	47
汇总		33	47
贵州	毕节	42	42
汇总		42	42
青海	海南州	8	8
	西宁	3	3
汇总		11	11
广西	北海		3
汇总			3
香港	香港		1
汇总			1
总计		18928	44733

注：表格中的省包括自治区和直辖市，台湾省的数据暂缺。数据来源：CWEA

CHINA WINDPOWER 2011 19-21,October Beijing,China

欢迎莅临穆格展台
W2–WD19

20000套变桨控制系统遍布世界各地

数量仍在持续增长!

穆格公司致力于在全球范围内为风电应用提供可靠的解决方案!

如今在使用的安全高效的风机都有一个共同点：应用了世界领先的穆格变桨控制技术。
您可以在全球超过20000套的陆上及海上风机里发现穆格的解决方案。

下载我们关于 不断变化的风场需求 白皮书
请至 http://info.moog.com/wind/cn/wp2

电动变桨系统 | 变桨控制部件 | 滑环解决方案 | 桨叶监测系统 | 支持与服务

YOUR PARTNER IN PITCH CONTROL

MOOG

鉴衡认证 CHINA GENERAL CERTIFICATION

使认证创造价值

风力发电项目实现赢利的关键，是要有准确的风能资源数据、可靠的风力发电设备、合理的风电场址规划和精良的建设施工质量。鉴衡认证中心基于多方面的技术要求，建立了全面的风能认证体系，为风电产业链各个环节提供权威的质量认证服务，并使认证为客户创造更多的价值。

- 部件认证
- 整机认证
- 项目认证
- 尽职调查
- 标准研究
- 技术培训

选择鉴衡认证

您收获的不仅仅是一张证书

CGC, MORE THAN A CERTIFICATE

地址：北京市北三环东路28号易亨大厦1108
邮编：100013
电话：010-59799665 传真：010-64228215
网址：http://www.cgc.org.cn
邮箱：cgc@cgc.org.cn

全球的技术 永恒的能源

跨时代意义的歌美飒G10X-4.5兆瓦风机:
超群的可利用率、 高效性和可靠性。

Gamesa G10X-4.5 MW

- 单位造价成本降低。安装及运输与2.0 兆瓦的机型一样便捷。
- 适用于IEC II类风场的128米风轮直径和120米高的水泥、钢铁混合塔架。
- 大大降低发电成本，高可靠性，适应各种电网规定;并符合任何环境保护准则。
- Gamesa WindNet® - 用于风场监控的先进技术。
- 该机型融合了众多的先进技术，例如: InnoBlade®, MultiSmart®, CompacTrain®, ConcreTower®, FlexiFit®,GridMate®。

歌美飒公司的业务范围已经覆盖到全球超过50个国家和地区。
www.gamesacorp.com

Gamesa

从现行风电建设项目的财务指标说开去

■中国水电顾问集团北京勘测设计研究院 | 杨建设　张佳丽

在国民经济持续高速发展、可再生能源战略强力推动的大背景下，我国的风能开发利用取得了跨越式的发展和进步。其中有 3 个特点值得重点关注：一是国家的可再生能源发展战略获得了社会的广泛理解和支持，风电投资开发的管理体系逐渐成熟和完善；二是风电投资总量增长迅猛，地方政府招商和企业投资的热情持续不减，但电网消纳的技术与能力有待提高；三是风电设备市场竞争加剧，价格持续走低，风电企业或许面临行业整合的转折点。

以上 3 个特点同样也体现或反映在现行风电建设项目的财务状况上。反之，认识风电建设项目的财务指标，也可以对宏观管理政策、行业发展前景、项目建设思路等多方面产生影响。本文拟通过分析国内现行风电建设项目财务指标，对有关现状和发展提出一些观点和建议。

一、现行国内风电项目财务指标的综合评价

本文以国家发改委和建设部 2006 年 7 月联合发布的《建设项目经济评价方法与参数（第三版）》，以及国家新近颁发的有关财税规定等为主要依据，针对当前国内常规风电建设项目的典型数据参数，展开财务分析与评价。测算时间基准取 2011 年 7 月，计算软件采用“CFD 风电工程经济评价软件 V2.0”，部分计算条件参见表 1。

在相同的计算模型下，风能资源条件、发电条件、投资建设条件的不同均会引起项目财务状况的变化。上述条件可以通过一些财务指标体现，如发电收益指标——年等效满负荷利用小时数，项目投资指标——单位千瓦静态投资，以及赢利能力指标——财务内部收益率等。

如果取国内现行风电开发常见的 50 兆瓦规模为计算样本（其他规模建设项目的财务指标变化可体现在单位千瓦投资指标的变化上，一般规模越大相对投资会略有降低），则可计算得出数据表 2。

有关计算范围：项目单位静态投资取 7000 元 / 千瓦～ 10000 元 / 千瓦，间隔 500 元 / 千瓦；年等效满负荷利用小时数取 1800 ～ 2400，间隔 100 小时，但 0.51 元 / 千瓦时的电价栏中，因 1800 小时栏的整体收益率很低，0.61 元 / 千瓦时电价栏中，2400 小时栏收益率整体很高，两行不再列出。

容易看出，各类资源区不同电价

表1 计算条件表

资金筹措（贷款）	费用计算	发电收益
资本金、银行贷款比例：20%、80%； 银行贷款利率 7.05%， 偿还期 15 年。	折旧费以综合折旧率 8% 计算； 修理费按固定资产价值 1.5% ～ 2.0% 计算； 员工人均年工资 5 万元（20 ～ 30 人 /50MW ～ 100MW）； 保险费率按固定资产价值 0.25% 计算； 材料费和其他费用按 5+30 元 /kW 计算； 增值税税率 17%（即征即退 50%），所得税税率 25%（三免三减半）。	参照“发改价格 [2009]1906 号”文件，不同资源区的标杆含税上网电价 0.51 元 /kwh、0.54 元 /kwh、0.58 元 /kwh、0.61 元 /kWh。

表2 风电建设项目财务指标典型数据表

财务内部收益率单位：%

标杆含税上网电价（元/kWh）	单位投资收益率小时数（h）	7000元/kW		7500元/kW		8000元/kW		8500元/kW		9000元/kW		9500元/kW		10000元/kW	
		全部	资本金	全部	资本金	全部	资本金	全部	资本金	全部	资本金	全部	资本金	全部	资本金
0.51	1900	7.01	7.68	6.11	4.73	5.29	1.65	4.55	−1.68						
	2000	7.74	10.16	6.82	7.08	5.99	4.32	5.23	1.37	4.52	−1.79				
	2100	8.47	12.74	7.52	9.39	6.66	6.56	5.88	3.94	5.17	1.11	4.5	−1.9		
	2200	9.17	15.37	8.2	11.77	7.32	8.73	6.52	6.09	5.79	3.59	5.11	0.89	4.48	−1.99
	2300	9.86	17.93	8.86	14.2	7.96	10.93	7.15	8.14	6.4	5.67	5.7	3.28	5.06	0.68
	2400	10.54	20.55	9.51	16.66	8.59	13.2	7.75	10.19	6.99	7.62	6.28	5.3	5.63	2.99
0.54	1800	7.05	7.82	6.15	4.87	5.33	1.82	4.59	−1.49						
	1900	7.83	10.45	6.91	7.35	6.07	4.6	5.3	1.69	4.6	−1.44				
	2000	8.59	13.2	7.64	9.8	6.78	6.94	6	4.34	5.28	1.58	4.61	−1.39		
	2100	9.33	15.99	8.36	12.33	7.47	9.23	6.67	6.57	5.93	4.11	5.25	1.47	4.62	−1.34
	2200	10.06	18.68	9.05	14.92	8.15	11.59	7.32	8.73	6.57	6.25	5.87	3.91	5.23	1.38
	2300	10.77	21.49	9.74	17.48	8.81	14	7.96	10.93	7.19	8.29	6.48	5.95	5.82	3.72
	2400	11.47	24.45	10.41	20.05	9.46	16.44	8.59	13.19	7.8	10.34	7.07	7.9	6.4	5.69
0.58	1800	8.09	11.37	7.15	8.16	6.31	5.39	5.54	2.64	4.83	−0.38				
	1900	8.9	14.33	7.93	10.82	7.07	7.87	6.27	5.27	5.55	2.68	4.87	−0.17	4.22	−3.15
	2000	9.69	17.29	8.69	13.58	7.8	10.35	6.99	7.62	6.24	5.17	5.55	2.71	4.92	0.02
	2100	10.46	20.24	9.44	16.38	8.52	12.92	7.68	9.94	6.92	7.39	6.21	5.08	5.56	2.74
	2200	11.21	23.34	10.16	19.07	9.22	15.54	8.36	12.34	7.58	9.58	6.86	7.18	6.19	4.99
	2300	11.95	26.62	10.87	21.9	9.9	18.08	9.02	14.8	8.22	11.84	7.48	9.26	6.8	7
	2400	12.68	30.02	11.57	24.9	10.58	20.7	9.67	17.23	8.85	14.15	8.09	11.39	7.4	8.97
0.61	1800	8.84	14.13	7.88	10.64	7.02	7.71	6.22	5.12	5.5	2.5	4.83	−0.37		
	1900	9.67	17.25	8.68	13.54	7.79	10.31	6.98	7.58	6.23	5.14	5.54	2.67	4.91	−0.02
	2000	10.49	20.35	9.46	16.48	8.54	13.02	7.71	10.02	6.94	7.47	6.24	5.16	5.58	2.83
	2100	11.28	23.62	10.23	19.32	9.28	15.77	8.42	12.56	7.63	9.77	6.91	7.37	6.24	5.17
	2200	12.05	27.09	10.97	22.31	10	18.43	9.12	15.15	8.31	12.16	7.57	9.55	6.88	7.28
	2300	12.82	30.68	11.7	25.5	10.7	21.21	9.8	17.68	8.97	14.59	8.21	11.8	7.51	9.35

注：表中空置部分表示财务内部收益率已经低于零的数据不再显示。

表3 容量变化时单位投资8000元/kW的财务内部收益率比较表

标杆含税上网电价（元/kWh）	年等效满负荷利用小时数（h）	50MW指标 / 100MW指标（单位静态投资8000元/kW）	
		全部投资财务内部收益率（%）	资本金财务内部收益率（%）
0.51	2300	7.96 / 8.06	10.93 / 11.27
0.54	2200	8.15 / 8.24	11.59 / 11.92
0.58	2100	8.52 / 8.61	12.92 / 13.27
0.61	2000	8.54 / 8.64	13.02 / 13.36

对应的计算结果栏内，左下方区域（发电收益高、单位投资低）对应着较高的财务内部收益率，如以某值为界划分财务内部收益率，则能够呈现明显的规律分界线。本文暂以全部投资财务内部收益率 8.0% 为界线（参见红色阴影区域）。

利用表 2 可以检验或对比国内不同风资源区域，不同相对投资强度和发电量收益的风电建设项目的财务盈利指标。例如，以一单位投资 8000 元 / 千瓦的项目为例，若使全部投资的财务内部收益率不低于 8.0%，属于 0.51 元 / 千瓦时上网电价的资源区域，则其年等效满负荷利用小时数不应低于 2300，而相应 0.54 元 / 千瓦时、0.58 元 / 千瓦时、0.61 元 / 千瓦时上网电价的资源区域，其年等效满负荷利用小时数分别不应低于 2200、2100 和 2000。

对风电投资企业而言，一个可喜的事实是，目前全国范围内开发建设的多数项目均能取得与上述相当，甚至更好的开发指标。

计算过程还表明，上述计算条件下，若某单一条件变化幅度较小时，表内计算结果变化亦不大，即敏感性分析显现的收益率指标分布规律依然存在且数据变动幅度不大。表 3 反映的是单位投资 8000 元 / 千瓦而不同发电收益的情形下，从 50 兆瓦到 100 兆瓦项目装机容量的财务内部收益率稍有增加的情况。

二、风电建设项目财务指标转好的意义

（一）如何看待现行风电建设项目的财务指标

在经历了一个短期但意义重大的历史阶段后，风能的开发利用在我国取得了跨越式的发展和进步。我国的风力发电装机规模从近乎为零发展到世界第一；风电设备制造从简单图纸和片段技术的引进发展到自主知识产权的广泛积累和产能规模的极大扩张；风电项目的开发建设从艰难试水和负重经营，走到今天的电源项目赢利“唯我独秀”；风电产业被业内普遍看好，这是全社会共同努力的结果。

促使风电建设项目财务状况转强的关键因素有两个：一是国家有关风电项目的固定电价政策，二是风电设备制造业的迅猛发展和激烈竞争使风电设备的采购价格快速走低。

在国家能源战略的导引下，特别是随着化石能源短缺且温室气体排放压力加大，以煤电为主的电力生产成本和销售价格的增长成为必然趋势。在风电等可再生能源发电竞争力不断增强的大背景下，面对国家和社会提供的巨大财力支持，风电等可再生能源未来应该回馈社会更多，需要承担的责任更重，风能等可再生能源的发电价格可能会面临“低廉”的发展要求。

当前国内风电机组整机制造企业中，已有 4 家进入了全球前 10，但近几年来机组销售价格呈快速下滑趋势。主流机组单位千瓦价格 2008 年底约 6000 元 / 千瓦，2009 年底约 5000 元 / 千瓦，现已跌至 3600 ～ 3700 元 / 千瓦。业内分析，目前整机制造企业的利润空间已经很小，其经营压力也会将这种影响传递到上游产业链去。面对不能承受之重，风电设备制造产业可能在激烈竞争中重新洗牌，而洗牌后的发展则可能是产能集中和产业升级，之后设备价格得以稳定或回升。

或许可以这样认为，从国家层面而言，目前风电发展处于一个决定未来能否持续走好的关键时期；但对设备制造行业却是一个困难和决定性的发展节点，对风电建设项目投资商则是一个如何利用多方利好条件进而稳健发展的历史机遇。

（二）当前我们可以做些什么

在影响风电发展的重要时期，在风电建设项目具备较好赢利能力的时间节点，我们应努力做好以下几件事。

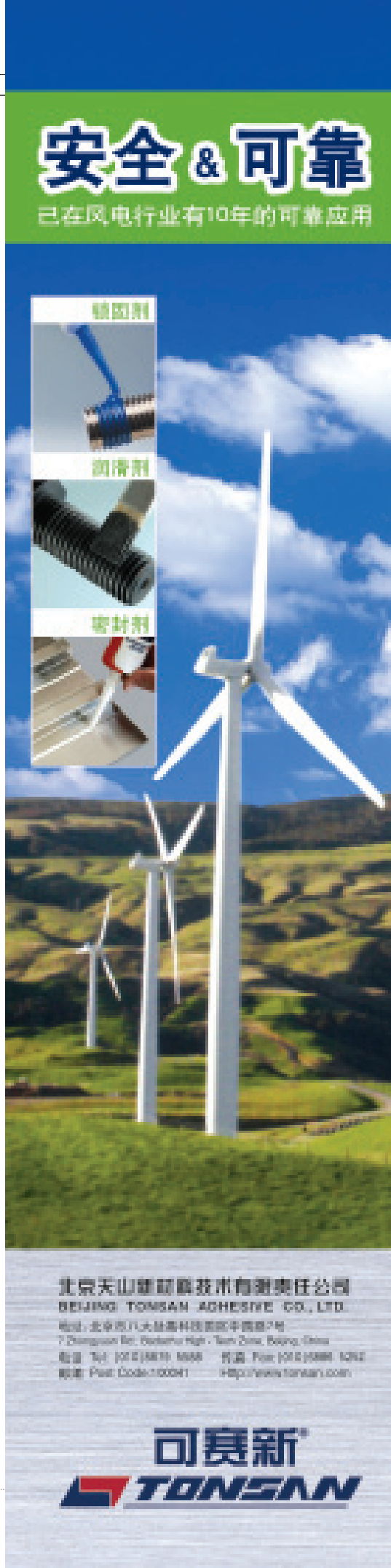
一是检讨问题和总结经验。

这些年在取得发展成绩的同时，也暴露出一些问题和不足。例如，一些地方风电项目开发无序，资源开发规划与电网接入规划衔接不好，电网配套发展能力滞后，风电设备技术与质量尚难满足要求，工程设计和施工水平还有欠缺，风电场运营与管理水平有待提高等。

出现这些问题和不足的原因是多方面的，与发展理念、管理体系、经营方式、人力资源、技术积累等都有关联。而解决这些问题和不足，一方面仍然需要在建立科学发展观，完善成熟的管理机制和体系，加强行业发展指导等宏观层面作出努力，另一方面也需要管理机构，尤其是地方政府机构，克服条块分割、片面失衡的不利影响。相关经营企业也应有长远发展的眼光和高度负责的社会态度，苦练内功，克己自律，追求企业与社会利益的长远协调发展。

二是注重技术升级和提高质量水平。

风电设备制造厂商目前面临着较大的市场竞争压力。也正因为如此，企业应该更注重开发自主创新技术，增强核心竞争力。企业应该有这样的胆识和勇气：市场竞争越激烈，对自主知识产权的积累越重视，以核心竞



争力赢得市场的发展思路要越强化。

目前我国风电设备产业自主创新过程还主要集中在技术引进和消化吸收阶段，基础创新少，集成创新低，特别是在原始技术的开发和风电机组总体设计方面更是如此。企业通过自身努力，再加上必要的国家政策引导和扶持，有希望通过自主创新这条路，取得市场和发展的双赢。

对于工程设计和施工企业来说，面对“突如其来”的市场机会，在努力争取市场份额和产值增长的同时，也要不失时机地打好技术牌，以高质量的产品与服务打造出自己的品牌，实现企业的长远发展。

在风电建设快速发展、市场收益稳步增长的时期，工程设计和施工企业练好内功和提高产品质量在客观上亦有了难得的条件保证，这对企业既是机遇又是挑战。

对风电项目开发商来说，从项目投资财务指标来看，目前应该是促进发展的绝好时期；而从风电建设发展的全局来看，其又不能忘记自身一直是影响设备制造行业以及设计和施工企业的重要带动者。

在当前投资财务指标较好、成本压力减小的状态下，开发商们要明智且不失时机地调整建设思路，应该以提高设备和工程的技术水平、促进工程质量、掌握运行维护经验作为首要任务。应该从注重采购符合本地工程条件和接网等各项严格技术要求的高质量风电机组及其附属设备，从重视勘测设计、要求一流且符合技术规范的设计产品，从强调科学施工、保证必要的工程工期和工程质量，从关注技术掌握、提高运营管理水平等多方面入手，实现项目建设和运营的科学技术目标。

电网公司地位特殊，在可再生能源开发利用的进程中，既是产业链中的重要一环，又担负有更重的社会责任和压力。处于风电电网消纳技术与能力相对滞后的当前背景下，电网公司应该以更积极的行动，在新技术升级，尤其在适应可再生能源发电运用方式上，改造电网，为国家推进可再生能源发展战略作出更大贡献。

三是做好应对困难的准备。

常言道，防患于未然。我们应该利用好眼前机遇多做一些事情，同时也应该对将来可能出现的困难局面早做准备。

或许经过一段时间，由于国家产业政策调整、设备和应用技术标准提高、新的市场变化因素等，给风电项目建设带来新的问题和要求。这需要我们在发展思路、企业实力、人力资源等各方面做出充分而不懈的努力。

只要上下齐心，群策群力，我们一定能够从当前的风电大国，走向未来的风电强国。

CSIC

重庆重齿风力发电齿轮箱有限责任公司

GPOWER WIND POWER GEARBOX CO.,LTD

传递风的力量 奉献绿色能源

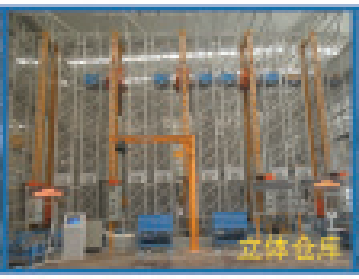
重庆重齿风力发电齿轮箱有限责任公司隶属于中船重工重庆齿轮箱有限责任公司，率先在国内从事风力发电齿轮箱研制工作的企业，公司位于重庆市江津区境内，现有职工1000余人，总资产近20亿元。

公司技术中心为国家认定企业技术中心，自主研发生产的"重齿牌"风力发电齿轮箱多次被认定为高新技术产品，多个产品列入国家重点新产品、国家科技支撑及国家级火炬计划，获得国家发明专有技术1项、实用新型专有技术12项。公司产品型号齐全，涵盖国内600kW～3MW风力发电齿轮箱所有类型，3MW产品已进行小批量生产，5MW产品即将试制成功，6MW产品已进入研发阶段。

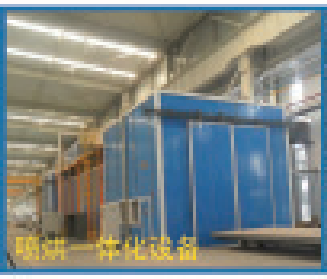
公司拥有6万余平方米的现代标准化厂房，拥有一大批世界一流、型号不同、功能齐全的大型高精度硬齿面齿轮的冷热加工、检测、装配、试验设备，具备年产出风力发电齿轮箱1000万千瓦以上的生产能力。公司通过了质量/环境/职业健康安全三大管理体系认证，产品广泛用于风力发电行业，现拥有国内外稳定客户30余家，与国内重点客户均建立了良好的合作关系。

公司始终坚持"质量第一、质量兴企"的理念，以"立足风电行业，奉献绿色能源，服务国民经济建设"为企业宗旨，竭诚为客户创造价值，推行"执行迅捷、踏实高效"的工作作风，实施精品工程，以一流的产品、一流的质量、一流的服务开拓市场，努力将公司建设成为国际一流风力发电齿轮箱供应商。

生产现场


立体仓库

3MW产品型式试验


喷砂一体化设备

型式试验现场

· 1.5MW风电齿轮箱

· 2MW风电齿轮箱

· 2.5MW风电齿轮箱

地　　址：中国 重庆　传真：023-47231590
联系方式：023-47231566　47231563
网　　址：www.chongchi.com

对大规模风电并网“难”问题的探讨*

■甘肃省电力公司风电技术中心 | 汪宁渤　王建东　马彦宏　刘光途　王定美

* 重大专项：“甘肃省科技计划资助:1002GKDA009”；工程技术研究中心：“甘肃省科技计划资助:1009GTGA024”。

截至2010年底，中国风电装机总容量达到4473.3万千瓦，超过美国成为全世界风电装机总容量第一的国家。在风电连续五年高速发展的大好形势下，部分新建风电场的并网问题逐步显现。2010年底全国并网投产的风电机组仅3107万千瓦；同时已经核准的部分风电项目由于暂时不具备并网条件被迫放慢建设进度，已经开工建设的风电场也面临着风电送出工程进度跟不上的问题。风电装机容量比重较大的内

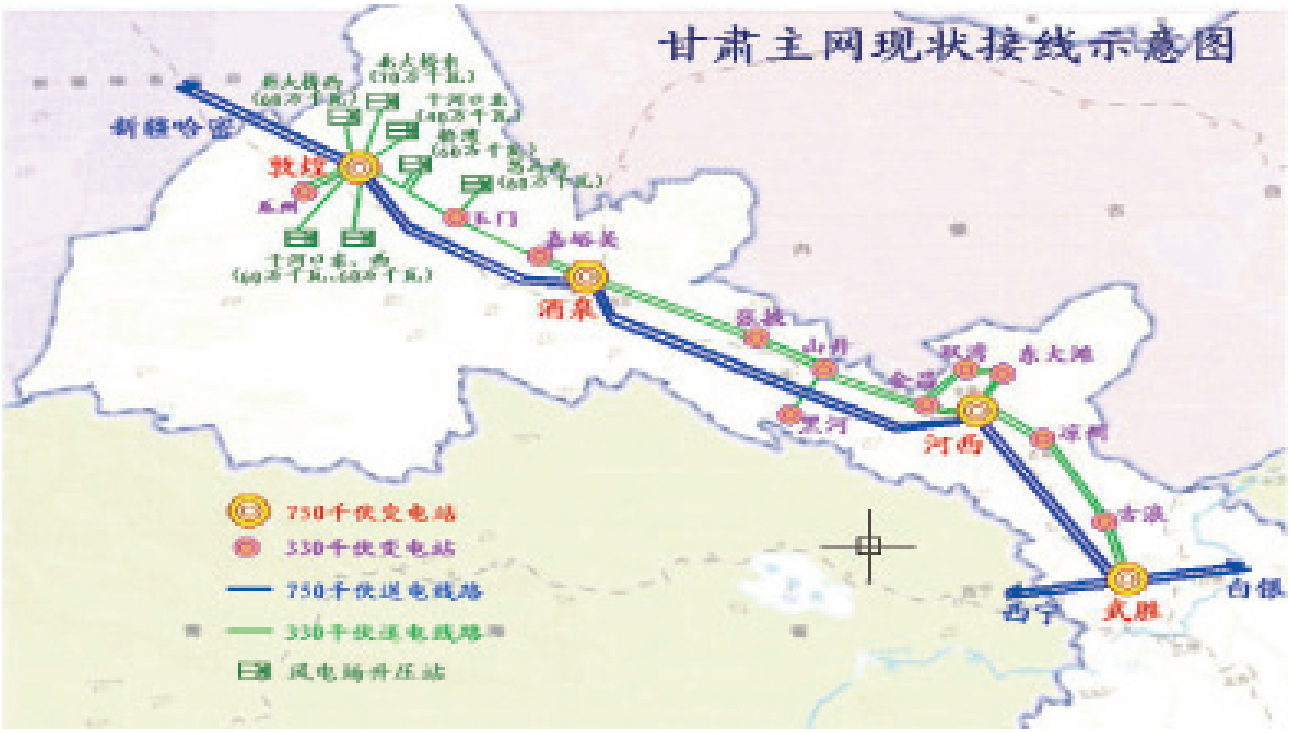


图1 酒泉风电基地一期风电接入及送出工程示意图

蒙古、吉林、黑龙江和甘肃等省（区）普遍存在风电并网难的问题，风电并网难成为业内关注的焦点。

本文以酒泉千万千瓦级风电基地为例，对大规模风电并网难的问题进行探讨。

一、大规模风电并网难问题

（一）资源逆向分布带来的并网问题

中国风能资源丰富的地区主要集中在内蒙古、新疆、甘肃、吉林和黑龙江等三北地区，2010 年年底三北地区的风电装机容量达到 3764.6 万千瓦，约占全国风电总装机容量的 84.1%。国家规划的七个千万千瓦级风电基地除了江苏以外也全部集中在三北地区，根据初步规划，到 2020 年三北地区的六个千万千瓦级风电基地的总装机容量约为 1.3 亿千瓦，加上六大风电基地以外的其他风电场，三北地区占全国风电规划总装机容量的 80% 以上。但是，中国用电负荷主要集中在华东、华南等东南地区，三北以外的地区用电量约占全国总用电量的 80%左右，中国风电规划建设与用电市场需求逆向分布的趋势非常明显。不同于国外分散式发展模式，风能资源与用电市场的逆向分布特点，以及大规模集中建设的风电发展模式，决定了中国风电发展必须同时解决汇集、送出和消纳等方面的并网问题，不可避免地要面对风电并网难的问题。

（二）酒泉风电基地的并网问题

酒泉风电基地是国家批准开工建设的第一个千万千瓦级风电基地。酒泉市位于甘肃省的最西端，风电基地主要集中在玉门、瓜州、马鬃山三个区域内，这些地区能消纳的风电极少，绝大部分发电量需要依靠全省尤其是兰州负荷中心消纳，但是这些基地距离兰州市的平均距离约为 1000 公里，因此酒泉风电基地并网包括风电汇集、送出和消纳等方面的问题。这种资源导向型的发展模式决定了不仅要解决风电的并网问题，同时要统筹解决风电的远距离送出问题。

为了使 2010 年底酒泉风电基地已经完成吊装容量 550 万千瓦的风电成功送出，除了建设风电场升压站至公用变电所 330 千伏（110 千伏）送出线路工程，还需要建设 750 千伏武胜—河西—酒泉—敦煌输变电工程，建设 750 千伏双回输电线路 2×848 公里，750 千伏变电站 4 座、变电总容量 8400 万千伏安，整个工程不仅是西北地区规模最大的电力建设项目，也是全世界规模最大的输变电工程之一。河西 750 千伏工程穿过整个河西走廊，沿途经过人口稠密的城市、人烟稀少的山区、自然保护区、长城和军事区等多个区域，仅办理环境保护评价、水土保持评估、地质灾害评估、土地评审、文物保护和军事区许可等前期核准手续就花费了一年时间，工程建设过程中同样遇到了许多难以预料的困难。与风电场集中建设相比，大规模风电基地送出工程点多面广、前期手续复杂、建设难度大，而且建设周期有较多难以控制的因素，难度的确很大。

（三）酒泉风电跨省消纳的并网问题

2015 年达到 1400 万千瓦与 2020 年增加到 2000 万千瓦以上装机容量的风电项目，不仅甘肃电网无法消纳，预计西北电网也难以消纳，这些风电发电量必须依靠全国电力市场消纳，所以必须建设线路长度超过 2500 千米、跨越六省的酒泉至株洲的 ±800 千伏特高压直流输电工程。该工程线路不仅经过人口稠密的城市、人烟稀少的山区、自然保护区，而且需要跨越长江、黄河、祁连山脉和秦岭山脉等地区，工程投资巨大，建设难度大，周期长。因此，解决大规模风电远距离输送与消纳的风电并网难

度更大。

二、大规模风电并网难的原因分析

（一）统一规划功能减弱

电源与电网统一规划是中国电力工业几十年发展的主要成功经验，在风电连续五年超常规发展的背景下，统一规划减弱造成风电、电源与电网发展速度不同步的矛盾逐步显现。国家制定的全国风电 2020 年风电发展规划已经提前 10 年实现，风电发展速度远远快于原有规划的速度，电网建设速度难以适应风电超常规发展的需要，风电并网问题矛盾更加突出。由于国家规定装机容量 5 万千瓦以下风电场可由省（区）发改委直接核准，5 万千瓦以上须由国家发改委核准，为了规避国家核准审批门槛，全国不同程度出现了同一区域连续核准多个 4.95 万千瓦风电项目的情况，导致风电开发规模不断增加、难以控制。因此，包括风电在内的电力统一规划职能的减弱，直接导致了风电发展并网难的问题。

（二）统计口径不统一

欧美国家绝大部分风电采用分散式的发展模式，风电机组安装与并网几乎可以同步完成，因此国际上以风电机组安装完成时间作为统计风电装机容量的节点，目前我国对外公布的风电装机容量也以此为标准。中国风电采取大规模集中开发、远距离输送的发展模式，通常需要建设复杂的接入系统及送出配套工程，导致风电机组完成吊装与整个风电场并网时间节点不一致，因此中国风电机组安装容量与并网容量可能存在较大的差异。

酒泉风电基地一期工程在 2009 年国家已经全部核准，但 750 千伏配套送出工程到 2010 年 3 月才核准，并且送出工程的建设工期远远长于风电场，因此存在配套送出工程无法与风电场建设进度同步的问题。酒泉 2010 年年底已经完成的吊装风电容量达到 550 万千瓦，750 千伏配套送出工程 2010 年年底投运以后，风电场陆续开始安装、调试、测试和启动验收，但实际并网发电的风电机组仅为 145 万千瓦；目前并网发电的风电容量达到 410 万千瓦，仍然有 140 万千瓦风电机组处于调试阶段。因此可以看出两种统计方法在去年年底的时间节点存在巨大的差距。

（三）并网风电场的限电问题

根据酒泉陆上“三峡”风电基地的建设需要，新建的河西 750 千伏电网的西电东送能力仅为 180 万千瓦左右，根本无法满足已经完成吊装的 550 万千瓦的风电送出需求。因此采用了世界首创的 750 千伏可控高抗、与新疆联网提高系统稳定水平、增加安全稳定控制系统等多项技术措施，将河西 750 千伏电网西电东送的能力提高到 330 万千瓦左右。考虑到风电机组发电的同时性，加上可以就地消纳部分用电负荷，勉强能够满足 94% 以上概率条件

超过五万台
CJC™精滤器已经被安装在以下品牌的风机上：
Vestas, Gamesa, Siemens, Nordex, Dewind, Mitsubishi,
Acciena, Clipper Wind, 东方汽轮机，
重庆海装，上海电气。

“如何为您的客户提供高性能的风力发电机？”

给您的风机装配一套CJC™离线精滤系统，意味着用很小的投入就可以大幅度提高风力发电机的性能、寿命和运行的经济性。

除了我们的OEM客户，
我们也为运营商和
风机业主提供老
旧风机的过滤
系统升级服务。

Clean Oil - Bright Ideas
西西延森过滤器(天津)有限公司
ccjensen.cn@cjc.dk
www.ccjensen.cn

图 2 酒泉风电基地二期风电接入及送出工程示意图

下的 550 万千瓦风电送出，仍然有 6% 左右的时间需要限发弃风。

目前酒泉投产的风电在酒泉及河西地区已经无法消纳，几乎全部需要送到兰州负荷中心消纳；预计到今年全省统调范围内最大负荷 1210 万千瓦，省公司售电量 750 亿千瓦时。全省用电最大负荷仅为 1210 万千瓦，要消纳 550 万千瓦风电，从电力平衡的角度考虑根本不可能；省公司售电量 750 亿千瓦时中要消纳 100 亿千瓦时的风电上网电量，从电量平衡看似乎可能，但考虑到面临着水电、火电建设项目大批投产，如果 550 万千瓦的风电发电量全部在甘肃省内消纳，火电机组的利用小时数将下降到 4000 小时以下。因此无论从电力平衡还是电量平衡方面考虑，今年酒泉风电基地都可能存在限电的可能。

三、小结

风电资源的逆向分布和大规模集中开发的发展模式，决定了中国风电发展不得不面对大规模集中开发、远距离送出所带来的一系列技术问题。大规模风电发展存在着汇集、送出和消纳等方面的并网难问题。

电力统一规划功能缺失使得风电并网难的矛盾更加突出；由于风电场与送出工程建设难度存在巨大差异，配套送出工程的建设进度通常无法赶上风电场的建设进度，必须统筹协调风电、电网的建设进度，否则风电难免遇到并网难的问题。酒泉风电基地建设的实践证明，解决风电并网难问题加强电源电网统一规划是关键。

参考文献

[1] 李俊峰等 风光无限—中国风电发展报告 2011[M]. 中国环境科学出版社 . 北京 ,2011.6

[2] 中国电力企业联合会 . 全国电力工业统计快报 .2011.2.

[3] 国家发展与改革委员会 . 中国可再生能源中长期发展规划 . 发改能源（〔2007〕2174）.2007.9.4

[4] 甘肃省电力公司 . 中国电力科学研究院《甘肃电网接纳风电能力研究报告》,2009.9

[5] 甘肃省发展与改革委员会 . 加快河西新能源基地和陇东煤电基地建设 , 打造西部能源大省 . 2009,6.

[6] 国家发展与改革委员会 .《关于甘肃酒泉千瓦千万级风电基地“十一五”380 万千瓦风电场项目核准的批复》和《关于开展甘肃酒泉千瓦千万级风电基地第二期项目规划工作的通知》.2009,4

[7] 汪宁渤 , 马彦宏 , 夏懿 . 甘肃酒泉 10GW 风电基地面临的巨大挑战 [J]. 电力建设 .2010,1:101-104.

[8] 国家电网公司北京经济技术研究院、中国电力科学院、西北电力设计院等 . 酒泉风电基地输电系统规划设计报告 .2010.6.

[9] 肖创英 . 欧美风电发展的经验与启示 . 中国电力出版社 ,2010.

[10] 甘肃省电力公司 .2010 年甘肃电网新能源运行分析报告 [R]. 兰州 : 甘肃省电力公司调度通信中心 , 2011.1.

[11] 甘肃省电力公司 . 甘肃电网 2011 年度运行方式报告 [R]. 兰州 : 甘肃省电力公司调度通信中心 , 2011.1.

[12] 甘肃省电力公司 .“2.24”桥西升压站事故调

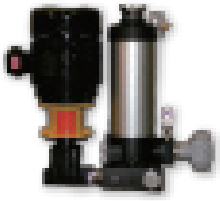
欢迎莅临

派克汉尼汾展台EB11

2011北京国际风能大会暨展览会

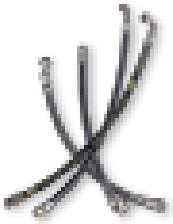
10月19-21日，中国国际展览中心(新馆)·北京

刹车系统



智能实时监控的
齿轮箱过滤系统

动力站



Parker的软管

液压管接头

派克汉尼汾的风力发电机工程技术可为您节约数月时间，显著加快产品上市速度。不管是高灵敏变桨与制动系统、变速箱过滤与监控、密封连结系统，还是精密冷却超紧凑型并网逆变器，派克汉尼汾都能让您遥遥领先。

航空航天
环境控制
机电
过滤
流体与气体处理
液压
气动
过程控制
密封与屏蔽

Parker

ENGINEERING YOUR SUCCESS.

www.parker.com/china
chinabranding@parker.com

2011年上半年欧洲海上风电产业统计

■文｜欧洲风能协会（EWEA）

根据欧洲风能协会（EWEA）的统计数据，2011 年上半年，欧洲海上风电呈现稳定增长趋势，装机容量同比增长 4.5%。

2011 年上半年，欧洲共有 101 台海上风电机组实现并网，总装机容量为 348.1 兆瓦。另外，目前在建的海上风电场共有 11 个，一旦竣工，总装机容量将达到 284.4 万千瓦。截止到 2011 年 6 月 30 日，欧洲共有 49 个海上风电场分别分布在 9 个国家，拥有 1247 台完成并网的风电机组，总装机容量为 329.4 万千瓦。下面是 2011 年上半年这些风电机组的运行情况统计：

（一）容量为 348.1 兆瓦的 101 台风电机组全部并网（同比增长 4.5%），这些装机所分布的 5 个海上风电场分别是：英国的 Greater Gabbard 风电场和 Walney 1 风电场，德国的 Baltic 1 风电场和海上 BARD 1 风电场，以及挪威 Bergen 的漂浮式风电机组风电场。

（二）共有 7 个海上风电场建起了 129 个塔基，这些风电场分别是：比利时的 Thornton Bank 2，英国的 Walney 2，Lincs，London Array 和 Sheringham Shoal，德国的 BARD 1，以及挪威的漂浮式样机风电场。

（三）共有 6 个风电场安装了 108 台样机，这些风电场分别是：英国的 Greater Gabbard 风电场、Walney 1 风电场、Walney 2 风电场和 Ormonde 风电场，德国的 BARD

表1 2011-01-01至2011-06-30的海上风电场统计

	比利时	英国	德国	挪威	总计
风电场	1	7	2	1	11
安装地基数	4	108	16	1	129
安装风电机组数	0	101	6	1	108
并网风电机组数	0	68	32	1	101
并网容量（兆瓦）	0	244.8	103.3	0.015	348.1
工程总容量（兆瓦，已竣工）	148	2238	448.3	10	2844.3

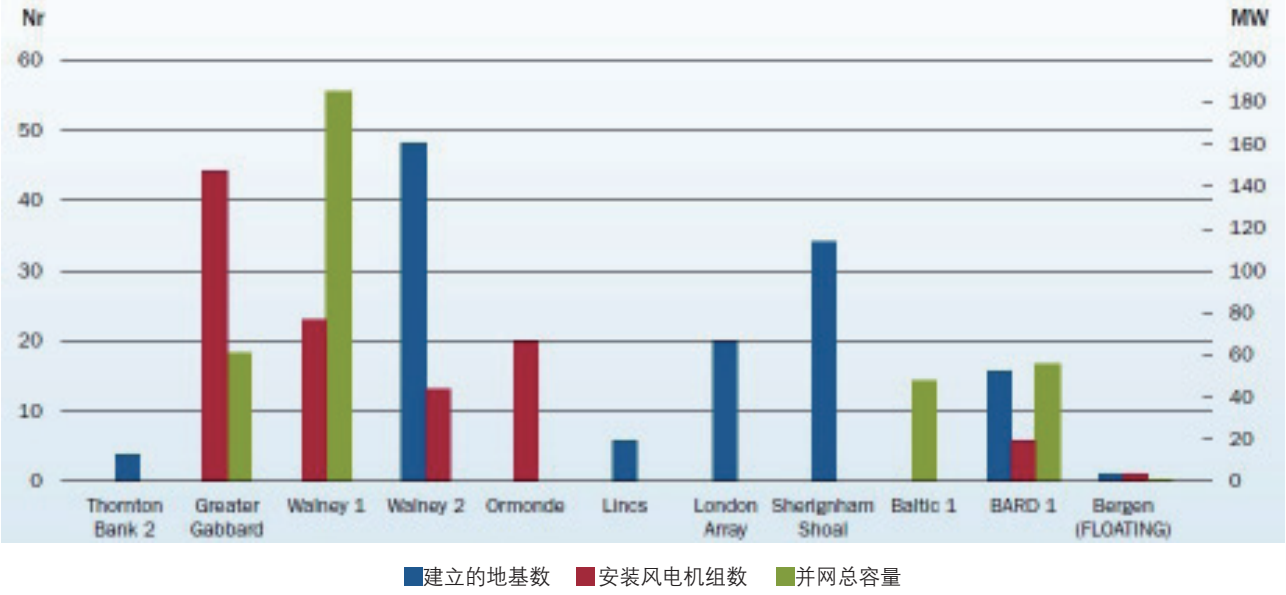


图1 2011-01-01至2011-06-30的海上风电机组安装和并网统计

1 风电场，以及挪威 Bergen 的漂浮式样机风电场。

（四）已完成初步工作的海上风电场分别是：英国的 Gwynt y Môr and Teeside，芬兰的 Raahe 和比利时的 Thornton Bank 3，目前这些场地的塔基还未建立起来。

开发商

2011 年上半年，共有 11 个风电场开始投入使用，其中 5 个风电场的风电机组总共实现并网 348.1 兆瓦。大部分风电场（3/5）正在由企业联合开发（总容量 299.8 兆瓦）。根据每个公司在项目中的份额，并且考虑到并网总容量，图 2 显示了上半年各开发商的并网容量份额。

制造商

2010 年同期，风电机组平均装机容量 2.9 兆瓦。2011 年上半年，平均装机容量增加到 3.4 兆瓦。风电机组的并网总容量比 2010 年同期增长 4.5%，而风电机组数量相比去年同期却增加不多（不超过 7 台），这是因为海上风电项目倾向于使用大容量的风电机组。考虑到近几个月新的风电机组已下线，这一趋势还将继续保持。

2011 年第一季度，有三大风电制造商的海上风电机组实现并网。西门子以占有市场份额 84% 的极大优势位

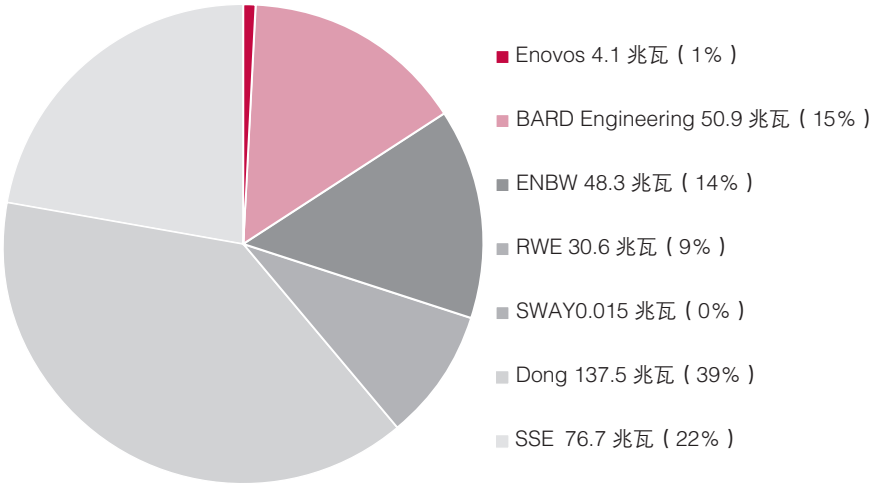


图2 2011-01-01至2011-06-30海上风电场开发商并网容量的份额统计

居榜首，紧随其后的是 BARD（16%）。SWAY 则在挪威卑尔根安装了漂浮式样机，目标是最终制造出 10 兆瓦的漂浮式风电机组。另外，瑞能也已安装风电机组，但今年上半年并未完全并网。

2011年上半年融资重点与发展瞭望

继 2010 年底所签署的主要交易后，欧洲海上风电场领域的融资形势有所好转，其中包括对 C Power 公司（比利时，325 兆瓦）和 Borkum West 2 公司（德国，200 兆瓦）的基于无追索权原则的债务融资，以及 Walney 公司（英国，367 兆瓦的 25%）的少数股权销售。

虽然 2011 年上半年还未有商定的债务交易，但期间已有几个项目正式进入银行业市场，应该很快就会商定下来。在 2011 年有望融资的主要包括德国和英国的几家风电场，例如德国的 Globaltech 1(400 兆瓦)，Meerwind（288 兆瓦）和 Baltic 1（48.3 兆瓦，建后等待重新融资），英国的 Lincs(270 兆瓦)，和 Masdar 在 London Array (126 兆瓦)20% 的股权。早期的交易主要发生在比利时、荷兰、卢森堡经济联盟国家，现在，债务市场正开始转移到海上风电发展更活跃的国家。

关于这些交易和整体市场情况，主要呈现以下几个乐观的趋势：

有意向跻身海上风电的银行数目稳步增长——已有超过 20 家的银行机构获得公司信贷委员会的批准，投资海上风电。

6 月初德国复兴信贷银行宣布，银行将为德国海上风电的 10 个项目提供高达 50 亿欧元的款项，这将是确保该国无追索权融资发展的重大一步。预计短期内商定的两项交易（Globaltech 1 和 Meerwind）已被纳入这一计划，届时将显示其为该领域提供大量且更便宜的基金的能力。

丹麦出口信贷代理机构 EKF 和欧洲投资银行（EIB）将继续支持他们之前所支持的交易；新银行和德国复兴信贷银行的介入使丹麦出口信贷代理机构和欧洲投资银行开始减少赞助额，但很多投资者和商业借贷方还是特别积极地寻求这些融资上的支持。

英国绿色投资银行 5 月宣布将为建立和运营起来的风电产业提供额外融资。

2011 年预计将有 3 到 5 宗交易可以商定下来，银行提供的基金数额将创下超过 30 亿欧元的纪录。与为该领域所提供的相对较小的资金来源相比（最近刚好低于总量的 20%，包括再融资），无追索权借贷正渐渐成为一个大的贡献者，截止到年底将提供接近在建项目 50% 份额的资金。虽然没有两个项目是相似的，但从今年的经验来看，那些准备充分的项目如果想要寻求债务融资，可以尝试着这样去做，以满足银行越来越一致的需求。

就股权而言，DONG 已经成为了最活跃的参与者，对现有资产继续实行少数股权再利用的政策，以使新投资得到融资。它最近卖掉了 Gunfleet Sands（英国，172 兆瓦）49% 的股权，三月份把 Anholt 项目（丹麦，400 兆瓦）50% 的股权卖给了丹麦养老金和 DKA。最后一项交易的独特之处在于其发生在风电场完成建设前。尽管投资者们不要承担建设风险，DONG 也

IMO ENERGY

IMO INSIDE

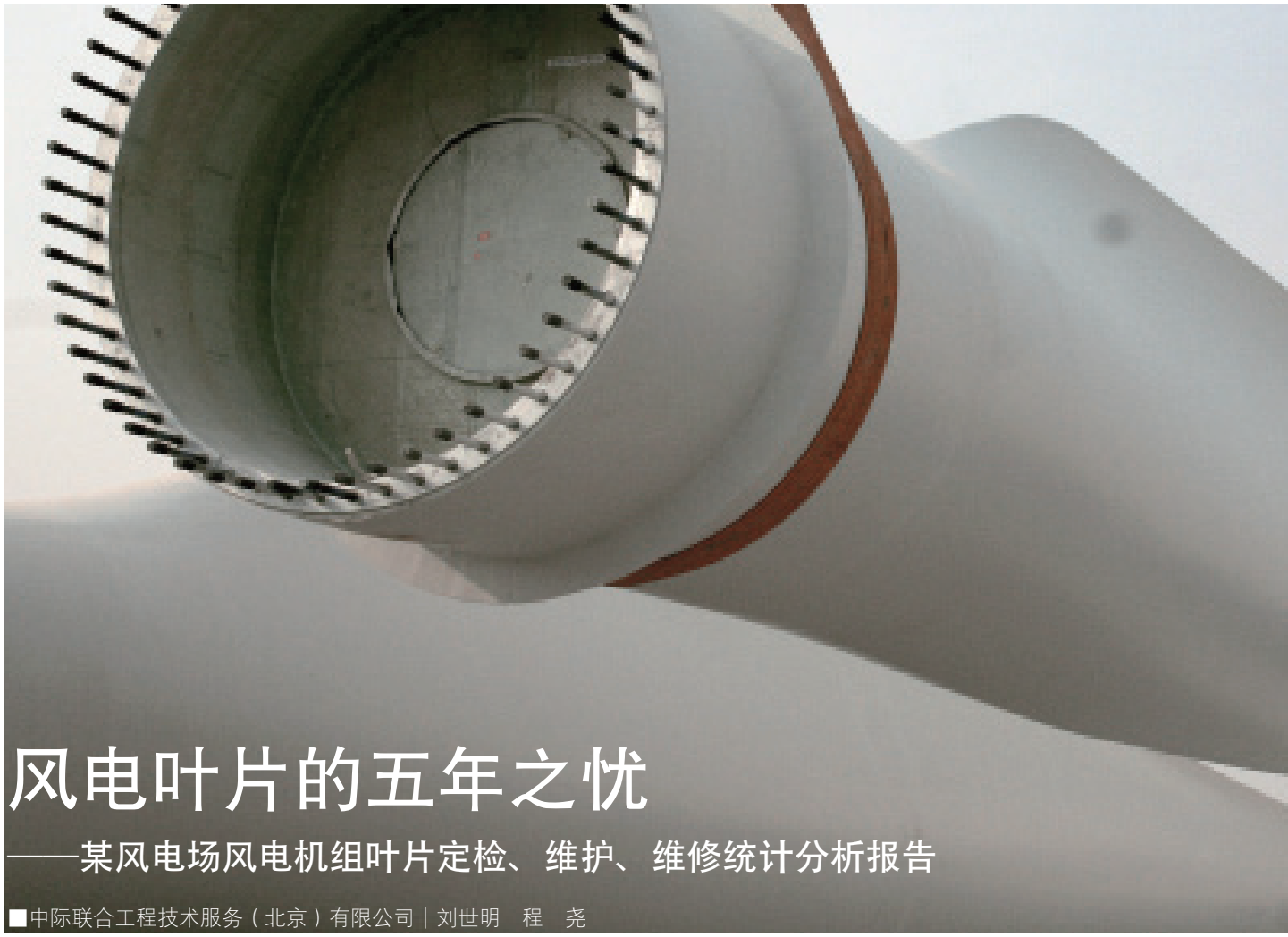
成功为中国客户供货
八百八十八主轴承

IMO集团：世界领先的回转支撑制造商

IMO集团公司秉承创新理念，致力于研发、设计、制造和供应大型回转支承，广泛应用于风电、太阳能、重工以及医疗等领域。**IMO**严格执行质量保证体系，顺利通过了ISO 9001:2000、ISO 14001:2005、OHSAS 18001等认证，为广大客户提供高技术含量、安全可靠的轴承，特别是针对于直驱风机设计而配套的单向三排圆柱滚子主轴轴承，现已成功为中国客户供应 888个主轴轴承。纵观国际市场，**IMO**已经成为世界知名风机制造商的轴承优先供应商，享誉中外！

- 产品系列为风机的偏航轴承、变桨轴承、主轴承以及齿轮圈
- 应用于太阳能设备制导系统的回转驱动
- 重工业：盾构机、重型挖掘机、大型起重机以及港口大型吊机

联系方式：
北京市朝阳区朝外大街22号
泛利大厦12A16室
邮编：100020
Tel.: +86 10 8529 6463
Fax: +86 10 8529 8441
E-Mail: china@imo.de



风电叶片的五年之忧

——某风电场风电机组叶片定检、维护、维修统计分析报告

■中际联合工程技术服务（北京）有限公司 | 刘世明　程　尧

自2006年6月第一台国产1.5MW风电机组成功下线，拉开我国大风电时代的帷幕伊始，大功率叶片已风风光光地走过5载有余。在这辉煌的历程中，风电机组在使用、维护方面也曾出现过一些波折，如叶片服役初期折断，击毁机舱、毁坏塔筒导致风电机组倒塌的事件；横向裂纹、前后缘开裂等隐患。

针对采取什么样的措施、投入多少费用，才能保证叶片在20年的设计寿命中，保持良好的功率产出状态这一难题，业内各界始终存在着各种声音和观点，一时间还难以形成一致的答案。但有一点业界已达成共识，那就是运行一定年限以上或者已渡过保修期的叶片，必须进行详细定检，以便工作人员随时了解风电场中叶片的运行情况，为风电机组下一步的维护、保养工作收集有益的参考数据。

综合叶片厂、整机厂、风电场等各方面的信息，结合自身作为第三方叶片服务机构为业界服务4年以上的经验，笔者得出一项结论：叶片使用的第5年，是其使用周期的一个关键节点。以下是某风电场中，外国产叶片运行5

表1 定检风电场基本信息

定检叶片数量	定检方式	定检施工时间	叶片年限
3 台机组、33#、34#、37#，9 支叶片	全方位叶片检修平台接近式检查	2011 年 6 月 24 日—2011 年 6 月 28 日	2005 年吊装

年后定期检查的案例报告，以资共享。

一、基本信息

本次定检采用抽检方式，对在 58 台风电机组中，所选取的 3 种类型的代表进行定期检测：

A、风电场认为不会出现问题的风电机组；

B、风电场自行观察认为有问题的风电机组；

C、叶片有过修补历史的风电机组。

采用此方法的目的，是为了让风电场在得到定检结果后，与此前的印象进行对比：此前认为不会出现问题的风电机组会不会出现问题？认为可能会出现问题的风电机组，问题实际上已发展到何种程度？以前修复过的叶片如今的状态如何？

另外，也可使风电场对运行 5 年以上的风电机组是否需要定检维护，有一个直观的认识。

二、定检期间发生的问题

表2 定检发现问题种类及数目

	砂眼	胶衣损伤	横向裂纹	叶根部位横向裂纹	竖向裂纹	放射状裂纹	前缘保护层损伤	合计
33#-1	1	3	2	0	0	0	0	6
33#-2	0	2	1	1	3	0	2	9
33#-3	0	0	1	1	2	1	0	5
34#-1	0	6	2	1	3	1	0	13
34#-2	0	1	0	0	2	0	0	3
34#-3	0	1	5	1	2	1	0	10
37#-1	0	2	1	0	0	0	0	3
37#-2	0	0	0	2	1	0	0	3
37#-3	0	0	0	1	0	0	0	1
合计	1	15	12	7	13	3	2	53

从表 2 中的数据可以看出，全部 9 支叶片全部存在损坏问题。除胶衣老化破损率占 30% 外，横向裂纹、纵向裂纹占比也接近 50%，且裂纹一般长度在 1 米以上。对于无时无刻不经历振动、交变载荷的叶片来说，这无疑是重大的隐患。近年来被各大集团所关注的叶片异响、哨声等现象即发源于此。此前风电场认为不会出现问题的叶片也出现了或大或小的问题。曾被观察认为可能会有问题的叶片，通过定检发现问题的数量及严重程度高于现场人员的预测。修复过的叶片在其他位置仍出现了横向裂纹、纵向裂纹、腐蚀等问题。综上所述，5 年以上的风电机组叶片，无论此前运行情况如何，都会有破损可能及安全隐患。

三、叶片受损程度分析

数据显示，3 台风电机组的 9 支叶片不但 1 百分之百存在问题，而且其中 89% 的叶片受损严重，需尽快修复。只有 11% 的叶片受损较轻，可在半年内进行修复。因为横向裂纹、竖向裂纹、严重的砂眼腐蚀至玻璃钢基材等腐蚀级别较严重的问题，恶化发展速度非常快，早期的维护能避免日后产生更多的修复费用以及

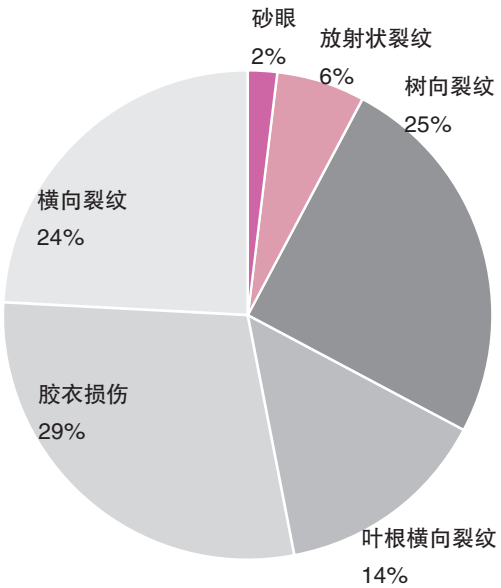


图1 定检叶片发现问题比例

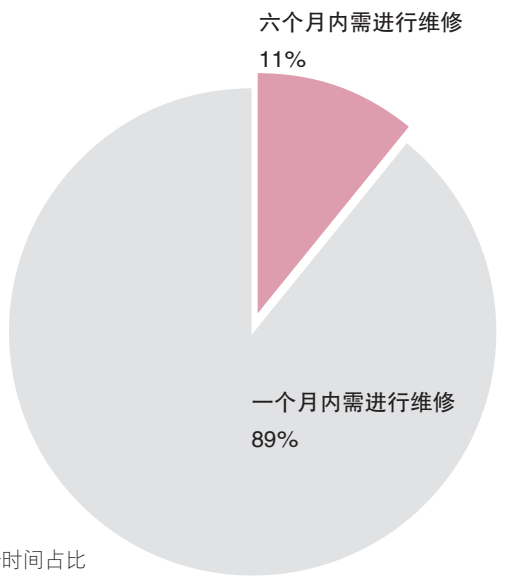


图2 定检叶片最短建议维修时间占比

表3 叶片损伤危害等级

损伤名称	危害等级
叶根部横向裂纹	1 级
横向裂纹	2 级
竖向裂纹	2 级
较严重的胶衣损伤	2 级
较严重的砂眼	2 级
放射状裂纹	2 级
一般胶衣损伤	3 级
保护层损伤	3 级
一般砂眼	3 级

表4 定检叶片最短建议维修时间

叶片编号	最短建议维修时间
33#–1	1 个月内
33#–2	1 个月内
33#–3	1 个月内
34#–1	1 个月内
34#–2	6 个月内
34#–3	1 个月内
37#–1	1 个月内
37#–2	1 个月内
37#–3	1 个月内

四、风电场整体预测

经过 6 年左右的运行后，每支叶片都存在不同程度的损伤。当叶片存在较严重的胶衣破损、或出现横向裂纹，都属受损严重并需尽快进行修复。以百分比换算，此风电场中的 58 台风电机组中的 52 台、155 支叶片有较严重损伤；另外 6 台、19 支叶片有较轻损伤。

五、结语

经实际检验，业界人士关于服役 5 年以上叶片定检维护的经验是正确的。即使国外质量优异的叶片，在运行 5 年以后也全部出现了损伤、腐蚀等问题。风电场认为不会出现问题的叶片已发现问题，观察认为问题较轻的叶片在损伤程度上也更严重，修复过的叶片在其他位置上仍有损伤现象发生。此结果证明，及时的定检维护可以及时发现问题。积极掌握叶片发展动态，可为日后的维护工作提供可靠的一手信息。

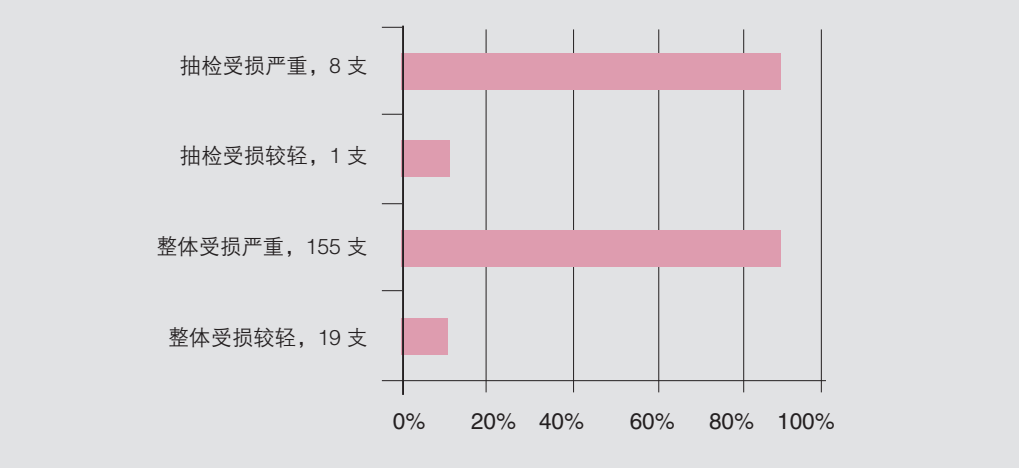
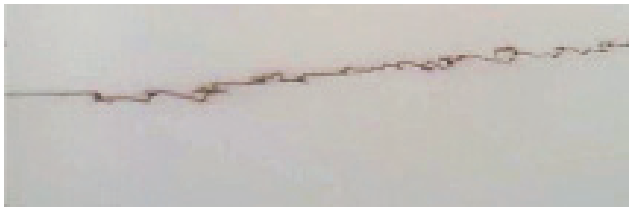
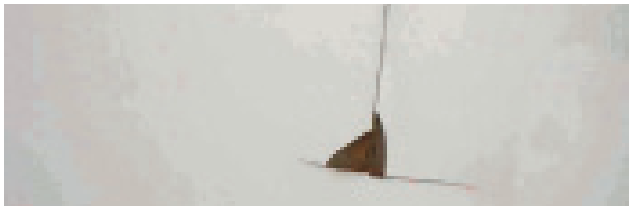
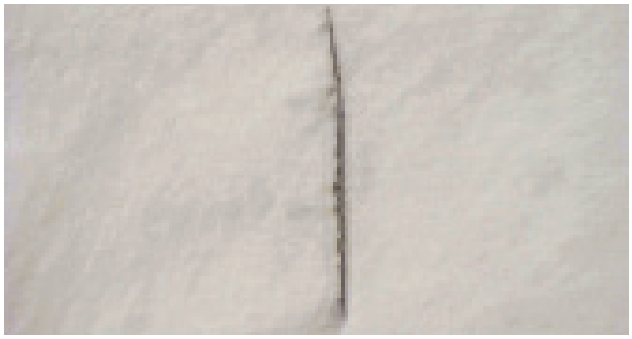


图3 58台风电机组、174支叶片预计出现问题比率换算

附录 叶片常见损害及分析





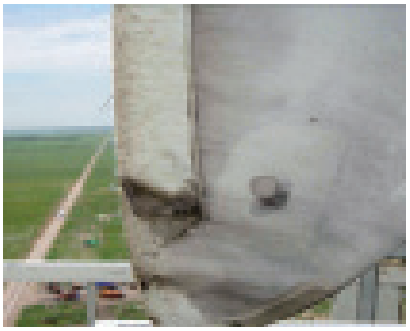


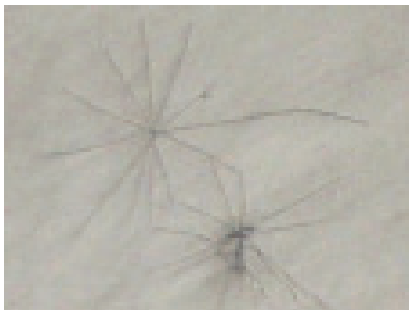
叶根部位横向裂纹：

是叶片的终极杀手，叶根部位是叶片受力最大的部位，横向裂纹不断地扩展最终会导致叶片折断，轻则叶片损坏，产生叶片更换的巨额费用，重则叶片运转不平衡导致结构失稳，塔筒倾倒。

竖向裂纹：

也是叶片早期损坏中比较严重的问题，任由纵向裂纹产生会伤及蒙皮、芯材以及有可能伤害到叶片大梁。





胶衣损伤及砂眼：

演变的速度非常快，不到一年即发展成通腔砂眼和大面积砂眼。砂眼内或胶衣损伤部位存水，麻面处湿度增加，风电机组避雷指数就会降低，叶片基材暴露于空气和水分中，会加速叶片的损坏。

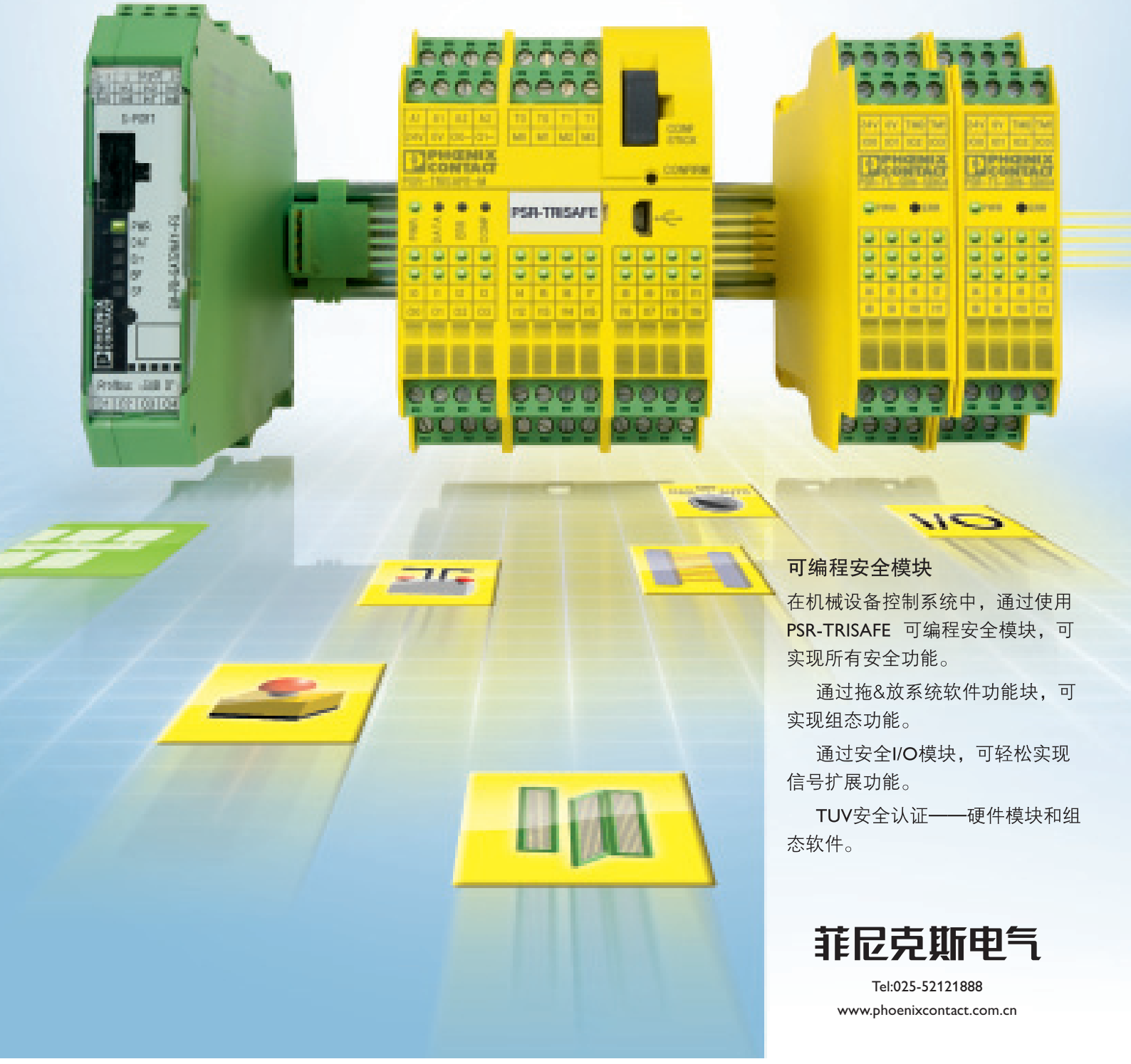
放射状裂纹：

通常由撞击形成，四散裂开，生长范围很广，容易造成大面积的腐蚀空洞，损伤叶片主体结构。

保护层损伤及一般胶衣损伤：

是叶片受损的初期阶段，也是存在安全隐患，需要保持对其关注，防止其肆意生长，有计划性的进行修复。

系统安全解决方案
PSR-TRISAFE 可编程安全模块



可编程安全模块

在机械设备控制系统中，通过使用PSR-TRISAFE 可编程安全模块，可实现所有安全功能。

通过拖&放系统软件功能块，可实现组态功能。

通过安全I/O模块，可轻松实现信号扩展功能。

TUV安全认证——硬件模块和组态软件。

菲尼克斯电气

Tel:025-52121888

www.phoenixcontact.com.cn

PHOENIX CONTACT
INSPIRING INNOVATIONS

© PHOENIX CONTACT 2011 AD-IF-1105

恩德：从容不迫、扎实前行

■本刊记者｜赵靓

正在现场安装的恩德风电机组

中国文化讲究做事应从容不迫、有条不紊。越来越多的外国企业来到中国后，开始会意并借鉴这一点。稳扎稳打的前行似乎正是外国企业采取本土策略的硬道理。诞生于丹麦，成长于德国的恩德（NORDEX）公司，就是这种策略的践行者。

自 1985 年成立以来，恩德已在全球建立了 19 个分支机构，员工达 2200 人。“恩德的核心业务一直是致力于研制稳定、可靠、能够为客户创造最大经济价值的风机，是最早将精湛的德国工艺和国际化服务带入中国的国外制造商之一。”恩德中国首席执行官 Jens Olsen 先生说。自恩德中国成立以来，已为 35 个项目提供了风电机组，总装机量超过了 650 兆瓦。

然而，随着中国风电市场近些年纷繁的变化，同其他国际整机商一样，恩德在中国的业务发展也遇到了难题：整机市场竞争激烈，大小风机厂商及各类风机产品“层出不穷”，风机价格一降再降，整机厂商的利润空间被无情地压缩。有些厂商已经感觉增长乏力，甚至生存艰难。

业绩的下滑并没有促使恩德参与恶性竞争，恰恰相反，它采用了稳步向前的战略：坚持将运行稳定、技术成熟的产品拿到中国，而不像一些厂商那样将中国市场作为“试验场”。这不仅说明恩德在产品方面具有技术和实际运行优势，更重要的是，它说明了恩德在看待中国风机市场的发展问题上，有自己独特的眼光。这种眼光来自于这个国际风机企业所具有的

恩德风电机组的低电压穿越测试成果发布会

丰富市场经验以及由此而来的敏锐的市场判断力。正因如此，恩德才能够在不断变化的市场中从容不迫，扎实前行。

在目前的条件下，并网运行的大型风电场应具有良好的有功功率变化率控制、无功功率调节、低电压穿越、频率调节和抗干扰能力。针对中国对风机电网适应性提出的最新要求，恩德自 2010 年起就已经展开了相关工作。2011 年 3 月 25 日，恩德与艾默生网络能源有限公司进行合作，在电科院张北风电试验基地完成了 LVRT 首例风场测试工作。这表示恩德所生产的风电机组具有较强的电网适应能力。“每个国家的电网对风电机的要求是不同的，在中国我们的 1.5 兆瓦产品已经获得了 LVRT 的认证。另外我们也会携 2.5 兆瓦的产品和电科院合作，做 LVRT 测试。”Jens Olsen 先生告诉记者。

另外，稳步前行的策略也体现在恩德对海上整机市场的把握上。

当中国海上风电在两年前正热闹非凡的时候，恩德并没有急于不顾一切地闯入市场，而是采取了谨慎观察的态度。“对技术的更高要求、项目建设的复杂性及安全性、对环境的影响，以及更重要的投资回报等一系列问题的逐渐显现，会有助于我们认清情况。”Jens Olsen 先生提到。在研发 6 兆瓦海上风机的同时，恩德对中国的海上风电市场的发展，正在进行认真的评估，以寻找一个好的进入时机。“总的来说海上风电未来是很有发展的，但是

↑恩德公司的生产基地

需要时间，我们会持续关注这个市场，选择正确的时机进入，”Jens Olsen 先生坦言，“海上风电的复杂程度远远超过了陆上风电，经验、技术以及相关政策是保证投资回报的关键。因此，我们也希望中国海上风电的上网电价以及相关的扶持政策尽早出台。”

2010 年后，一些厂商的风电机组产品在使用过程中出现的问题令各界开始深刻反思，中国政府随即出台一系列的控制措施。风电机组的电网适应性以及耐用性已明显成为下一轮整机厂商竞争的着力点。正是这种情况的出现，为恩德这样注重产品品质和可靠性的厂商，提供了利好的机遇。

“对电网的适应性和提供高质量的电能是我们风电机组最主要的特点。这是由质量来保证的。我们更看重客户在整个运营期内的收益，我们能保证自己的风电机组符合国家电网标准，在 20 年的使用期内，为客户提供持续

稳定的电量产出。”在谈到国内市场发展趋势时，Jens Olsen 先生说，“中国市场已经开始从只注重风机的装机容量，到现在真正的并网电量的转变。市场也必将从千瓦造价向一个更为成熟科学的千瓦时的能源造价发展。”Jens Olsen 先生表白，“在这个过程中，恩德将是一个好的角色，起到重要的作用。”

目前，恩德在中国拥有 400 多名员工，两个生产基地，并准备对这两个生产基地进行有计划的扩建。恩德在北京建立了研发中心，专注开发适应中国风况的机型，并已将中国确定为其整个亚洲的研发中心和生产基地，为亚洲各国市场供货。

另外，恩德也在努力扩大产业链，将其在全球的质量控制流程成功引进中国市场，对关键零部件供应商进行认真筛选和资格认证，积极追踪监控供应链的情况，保证高质量标准，以解决产品质量全球化和成本控制本地化这两个看似相悖的难题。“我们已经把零部件的供应链建在中国，做到当地采购，真正的本土化。”

现在，恩德正在不断甄选中国本地的零部件供应商，目的不仅仅是在中国或亚洲市场做到当地采购，更重要的是面对其涉猎的整个国际市场提供零部件，使中国成为恩德向全球供

AUTOL 奥特科技

集中润滑系统专家

奥特润滑 行业新标杆

AUTOL Leading international

郑州奥特科技有限公司

上海奥勒汽车科技有限公司

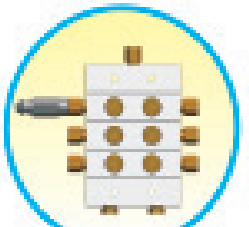
Autol Technology Co.,Ltd

奥特科技长期致力于发展具有自主知识产权和核心竞争力的集中润滑技术，为国内外客户等提供有竞争力的设备润滑综合解决方案和服务。

奥特科技以技术创新和持续改进为客户提供价值最大化的产品及服务，已申请多项国内外技术发明专利，是国家相关行业标准的主编单位之一。

AR330系列

AR8100系列



分配器

废油收集装置、小齿轮

- 全国免费客服热线 4006-836-882 8008-836-882
- 传真：0371-6568 2390
- 网址：www.autol.net
- 邮箱：sales@autol.net

风电场
远程运行维护系统建设初探

■上海电气风电设备有限公司 | 黄永民　禹华军

风电市场在如火如荼的发展过程中，逐步暴露出一个比较棘手的问题，即风电场的运行维护问题。无论对风电场运营商而言还是对风电机组制造商而言，运行维护的主要问题是如何在公司总部对分布在全国各地的风电场进行管理，以及依靠数量不多的总部技术人员满足风电场的现场技术支持，从而实现风电场运行维护效率的最大化。针对这个问题的解决方案就是远程运维系统建设。远程运维系统是为远程运行维护提供数据采集、统计和分析的一种最快捷的手段，同时利用成熟和先进的运维处理流程来提高风电场处理故障的效率。远程运维系统的核心是通信网络、中央数据库、运维流程以及监测系统。借助远程运维系统，公司总部的管理人员足不出户即可掌握所有风电场的运行状况，公司技术人员在总部即可为现场故障提供解决方案和制定各种预防性维护策略，一方面减少了公司运行维护的资金和人力投入，另一方面也极大地提高了管理的效率和人力资源的最大化利用。

1 远程运维系统的组成

远程运维系统应是一个开放的总系统，它可以容纳不同的子系统来不断地完善自身的功能，从而实现风电场运营者对风电场的系统化、网络化和智能化管理。笔者认为整个系统建设主要包括以下几个子系统：

（1）实时在线监控系统：基于公

司总部的核心数据库系统和 Internet 网络通信系统，建立大屏幕实时展现系统，可对管辖的所有风电场运行情况进行多画面、多角度地实时展现。

（2）远程诊断系统：利用采集到的振动监测运行数据，实时诊断分析风电机组的运行状况，并提早建立各种维护策略，以提高维护的目的性和高效性。

（3）故障处理系统：利用总部技术人员的智慧，建立故障处理系统，当故障发生时，可提示现场维护人员如何快速解决故障；同时，现场维护人员可对故障处理系统进行实时更新，以确保故障处理系统的完整性和有效性。

（4）故障分析系统：利用采集得到的各个风电场的故障数据，统计分析各类故障占总故障的百分比，同时提供故障趋势图，为故障高发期提前预警。

（5）维护人员管理系统：管理现场维护人员的日常工作，并对其业绩

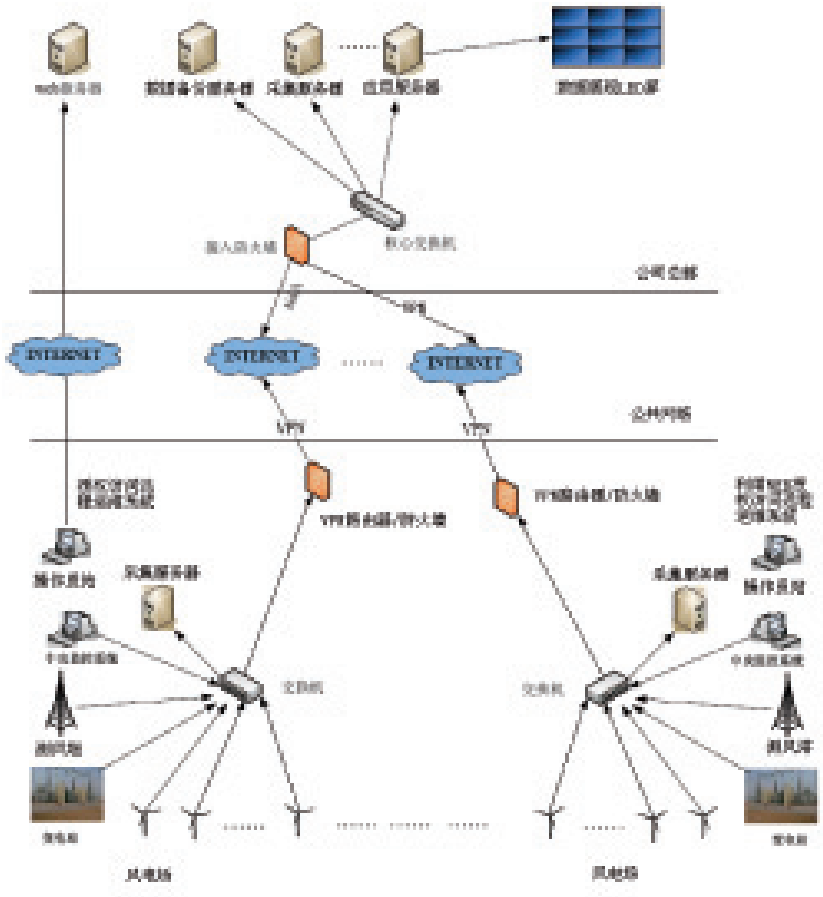


图1 远程运维系统总体架构图

进行考核，以提高工作积极性。

（6）备品备件管理系统：管理风电场备品备件的使用情况，同时对风电场缺少的备件进行预警，以提高机组的可利用率，减少等待备件的时间。

（7）报表生成系统：针对单个风电场和所有风电场，该系统可自动生成日报、月报和年报等，以实现风电场的数据统计分析。

2 远程运维系统的整体架构

远程运维系统的整体架构如图 1 所示，各部分功能简单描述如下：

（1）风电场部分

在每一个风电场设置采集服务器，采集程序安装在服务器上，负责采集风力发电机、变电站和测风塔等的数据，然后采集服务器通过硬件防火墙联入 Internet 网将数据传到公司总部。风场采集服务器具有数据缓存功能，若通信中断可对数据进行缓存，等到通信恢复后可实现数据断点续传功能，保证风电场数据的完整性。

（2）Internet公共网

通过 VPN 方式实现采集数据的网络安全传输。

（3）公司总部

在公司总部同样设有采集服务器，负责采集全国各个风电场的数据并存入数据库；应用服务器上安装远程运维系统，负责对数据进行统计、分析，

图2 上海电气远程运维系统

并在 LED 大显示屏上实现风电场数据的实时展现；WEB 服务器实现风电场人员通过 Internet 网访问远程运维系统，从而达到实现各种维护策略的目的；数据备份服务器实现数据的热备用，防止数据服务器出现故障而导致系统中断。

3 远程运维系统建设的难点

远程运维系统建设要面临以下两个方面的难点：

（1）数据采集

目前，风电机组整机制造厂商众多，为了实现将各个风电场的不同整机厂家的数据采集到公司总部，必须制定统一的数据采集接口。采集的数据有两类：一类是实时数据，建议通过 OPC 接口来采集；另一类是历史数据，建议通过历史数据库来进行采集。数据采集接口规范化以后，还存在实时数据的采集速率问题，若采集速率过低，就会造成公司总部的实时数据在线展现更新较慢、画面长时间不更新的问题；若采集速率过高，就要考虑服务器的承受能力和网络的承受能力。针对这个问题，应该依据风电场的数量、采集数据的数量和网络能力来进行综合平衡，从而得到一个满意的采集数据速率。

（2）网络安全

各个风电场采集的数据要经过 Internet 网络到达公司总部，这就要考虑网络安全问题，防止黑客攻击、病毒侵害、人员非法操作等。不同的网络安全解决措施，付出的成本代价也不相同，笔者拟采用 VPN（虚拟专用网络）加硬件防火墙的策略来解决这个问题；同时，当风电场用户访问 WEB 服务器时，对不同的用户级别分别授予不同的操作权限来控制非法操作。

4 结语

虽然远程运维系统在其他行业的应用已经较为成熟，但在风电行业才刚刚起步，如何将其他行业的经验借鉴到风电这个新兴的行业，还有一段很长的路要走，风电企业应在这方面做积极而有效的尝试。

作者简介

黄永民，1978 年出生，硕士，现就职于上海电气风电设备有限公司，主攻方向为风电场 SCADA 系统。

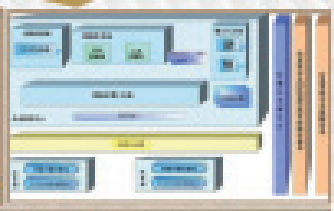
禹华军，1977 年出生，博士，现就职于上海电气风电设备有限公司，职务为技术部副部长。

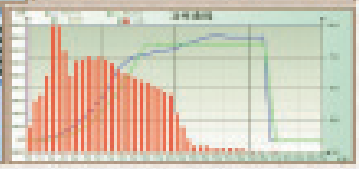
YUE CAN SCIENCE AND TECHNOLOGY

岳能科技

北京国际风能大会暨展览会
2011年10月19日-21日

中国国际展览中心
新馆EC31





针对风电企业所面临的挑战，我们一直致力于提供风电场群管控一体化解决方案。对风电运营企业所辖风电场进行整合，将各个风电场所有相关设备进行集中的全生命周期的管理和控制，以实现风电场“少人值守，无人值班”，“区域统筹维护”，并对各风场的运行维护情况进行统计分析，使风电企业运营更优化。

同时针对工业企业的设备我们提供精确定位和稳定调节品质的自动化控制产品和最优解决方案，保证设备安全稳定运行。我们所有的产品都经过认真的设计，全方位测试和现场运行实践，并按照ISO9001质量管理体系严格执行，满足您最产品可靠性要求。

岳能科技

北京岳能科技有限公司
地址:北京大兴工业开发区金苑路36号仙岛大厦四层
电话:（8610）63430001/63430002
邮箱:bjyn@vip.163.com　网址：www.bjyn.com

北方海域海上测风塔设计与施工

■河北建投新能源有限公司 | 李海波　周卫　郭俊玲

1 引言

我国海上风能资源丰富，海上风电具有大规模开发的潜力，特别是水深小于 25m 的近海，是今后一段时期内风电发展的方向。

开发海上风电首先需要摸清海上风能资源的变化规律及特征。由于受到地面粗糙度、大气稳定度等因素的影响，陆地气象站的测风数据并不能代表海上风能资源的特性。例如对于陆地来说，夜间地面温度低，近地面大气层稳定，地面风速较小；而白天，地面的辐射加热使近地面大气层结不稳定，有利于空气动量下传，因而风速比夜间要大。因此，获取海上风能资源数据的最直接方法就是在海上建立测风塔。

虽然目前我国沿海海域已陆续建设一些海上测风塔，但在北方海冰灾害严重区域却缺乏相应的工程经验，本文主要对渤海海域河北建投新能源有限公司的两座海上测风塔的设计与施工情况进行介绍，为类似工程提供参考。

2 工程海域自然条件

2.1 海洋水文条件

工程所在海域海底地形为海底平原，坡度很小；平均海底高程 -19.0m ～ -27.0m，水深 18.0m ～ 26.0m。具体海洋水文情况参见表 1。

2.2 工程地质条件

根据本工程实际勘探情况，各地基土层工程地质条件及评价如下：

①层：淤泥质粉质粘土层，厚度 3.5m。②层：粉质粘土层，土质不均，厚度 10.5m。工程性质一般。③层：粉砂层，厚度 4.5m。④层：粉质粘土层，厚度 2m。⑤层：粉砂层，厚度 10.5m。该层标贯击数 N=49，工程性能较好。该层为本工程基桩持力层。

2.3 海冰情况分析

渤海海域地处温带，常受寒潮的侵袭，每年都有程度不一的结冰现象，在冰情严重的年份，甚至还会出现整个

表1 海洋水文工况表

项目	详细情况
波浪	海域以风浪为主，涌浪为辅。其中风浪出现频率为 80% 以上。常浪向 S 向，出现频率为 10.87%，次常浪向 SW 向，出现频率为 7.48%。
潮汐	平均潮位：1.77m；最高潮位：3.38m；最低潮位：0.14m；潮汐型态系数为 0.77，潮汐强度中等。
海流	潮流性质为不规则半日潮流，运动形式基本呈往复流。

表2 地基土物理力学参数建议值表

地层名称及层号	层深（m）	混凝土预制桩、钢管桩		地基土比例系数m
		极限侧阻力标准值qsik（kPa）	极限端阻力标准值qpk（kPa）	MN/m4
①淤泥质粉质粘土	0~3.5	20~26	/	/
②粉质粘土	3.5~14	50~65	/	6.0~10
③粉砂	14~18.5	60~80	2600~3400	6.0~10
④粉质粘土	18.5~20.5	60~80	2500~3200	6.0~10
⑤粉砂	20.5~31	65~85	2800~3800	6.0~10

海域结冰的现象。渤海海域冰灾情况见表3。

工程所在海域初冰日一般为12月中、下旬，终冰日一般为次年的2月中旬至下旬。严重冰期出现于1月中旬至2月中。一般年份固定冰宽度500m～1500m，最大可达5000m；固定冰厚度15cm～30cm，最大可达45cm左右。流冰厚度一般为10cm～20cm，重叠并厚度30cm～40cm，漂流速度一般为0.3m/s～0.5m/s，最大

表3 渤海冰情及其灾害不完全统计表

年份	冰情	灾害情况
1957	重冰年	冰情严重，船舶无法航行。
1966	返冻	莱州湾西部沿海在短时间内封冻，约400艘渔船和1500名渔民被冻在海上。
1968	偏重冰年	龙口港封冻，3000吨的货轮才能出海。
1969	特大冰封（重冰年）	渤海石油“海二井”（重550吨）生活平台、设备平台和钻井平台被海冰推倒，“海一井”（重500吨）平台支座拉筋被海冰割断。一月内进出塘沽港的123艘客货轮有58艘受到不同程度的破坏，船体被严重挤裂变形，船舱进水。
1971	局部封冻	滦河口至曹妃甸海面封冻。
1974	局部封冻	辽东湾冰情比常年偏重，两艘货轮相撞。
1977	偏重冰年	渤海石油“海四井”烽火台被海冰推倒，秦皇岛港有多艘船只被冰夹住。
1980	常年冰（局部封冻）	龙口港封冻，万吨级“津海”105号轮被海冰所困，由破冰船破冰引航方脱险。
1986	常年冰（局部封冻）	3艘万吨级货轮在大同江口受困，由破冰船破冰引航。
1990	常年冰（局部封冻）	辽东湾封冻，2艘5000吨货轮受阻，走锚37起。
1997	偏轻冰年	海上石油平台受海冰撞击，需破冰船不间断保护作业。辽东湾沉船一起。
2001	偏重冰年	秦皇岛港航标被破坏，40余起走锚。
2010	特大冰封（重冰年）	海域结冰面积达3.6万km^2，渤海多处灯塔、航标灯损坏，数百艘渔船受损。

可达 1.2m/s。

3 测风塔设计

3.1 结构形式

常见的测风塔结构形式有自立式、拉线式、复合形式和悬浮式等 4 种。自立式测风塔塔体下部较宽，塔架材料用量相对较大，对基础要求也较高。拉线式测风塔受力较为合理，可靠性高，塔体截面小，塔架材料用量小，但拉线基础数量多，施工工艺复杂。当有通航要求时，需考虑测风塔对过往船舶的影响，船舶在行驶过程中不易辨别拉线，影响船舶航行安全。复合形式为自力式和拉线式结合形式的结构。悬浮式为将测风塔架和设备放置于悬浮在水上的漂浮物中的一种形式。本工程综合考虑海事安全、海冰撞击影响之后，决定采用自立式结构。

3.2 塔架形式

测风塔塔架形式包括圆筒形和桁架形式 2 种。圆筒形由单根钢管组成；桁架形式包括三角形桁架和四边形桁架 2 种结构形式。桁架形式结构一般由圆钢或角钢焊接而成。桁架式塔架便于海上安装、维护，且施工经验丰富，本工程选择桁架式测风塔。

3.3 搭配设备

考虑到海上测风环境恶劣、维护困难的特点，同时考虑到尽量降低成本，该测风塔设计阶段采用了同塔安装两套设备的思路。海上测风工程推荐采用德国 AMMONIT 测风设备及美国 NRG 测风设备各一套，记录仪分别采用独立供电系统，共用一套卫星传输系统。此方案不仅可以提高数据的可靠性和对比性能，还实现了数据真实意义的双备份功能。同时，考虑到海上风电场设计、施工需具备实测数据，主要包括对海水的波、浪、流、温度、压力等海洋水文观测数据，本工程在距离塔基 50m 远海底放置超声波多普勒测流仪（简称 ADP）一台。

考虑到工程成本和设备安全因素，本次海洋水文参数测量采用定投方案，即将 ADP 投放到海水中，沉入海底，通过海底电缆与测风塔的记录仪连接，自动将所测数据通过卫星系统传输。同时，每隔一段时间将派遣潜水员将其打捞上来，进行数据读取及设备检查，这样对设备的安全性有所提高（防止被渔民破坏），同时又提高了所测数据的准确性。

3.4 下部基础设计

海上测风塔为高耸结构建筑物，基础形式一般采用桩基础、重力式基础或二者结合形式 3 种，其中以桩基础形式最为常见。适用于测风塔的桩基础有钻孔灌注桩、预制钢筋混凝土桩和钢管桩，以钢管桩形式最为常见，而预制钢筋混凝土桩中基本采用管桩。海上测风塔基础采用桩基础形式时，可采用单桩、三桩、四桩或多桩形式。相比而言，钢管桩的造价高，海上防腐要求较高，维修保养费用昂贵，但存在如下优势：

（1）钢管桩的性能较好，材料强度高，制作较为简便，质量容易保证；

（2）在施工过程中，钢管桩抗击打能力强，不易发生桩身开裂和桩顶破坏；

（3）钢管桩在海洋工程中的应用较多，设计与施工经验也较多。

因此，本工程设计采用了钢管桩设计思路，为降低海冰撞击影响，本工程采用四桩海上固定式正锥体方式设置。该设计方案既能使海冰产生弯曲破坏，又不致使波浪力增加很多；既减小了平台腿柱上的冰力，又不使平台内部形成严重的堆积冰；既使冰产生弯曲破坏，又使已破碎冰及时得到清除，以便减小冰力，降低平台振动加速度。

同时，为保障海洋水文数据测量电缆不被海冰破坏，本次基础设计过程中在一号桩基外侧焊接了一根立管，将电缆线套入立管送入海底，这种设计既保护了缆线不被作业渔船螺旋桨打断，又确保了在海冰撞击、切割情况下电缆的完好。

4 载荷计算

本工程为远离岸线的海洋工程，建设及运行期间测风塔长期处在复杂的海况之中，设计时必须考虑多种荷载组合作用的情况。

由于尚无专门的测风塔设计标准，故参照相关风电机组标准和高耸结构标准来确定设计安全等级。根据《风电机组地基基础设计规定》（FD003-2007）考虑到测风塔仅受风荷载，无机组动力荷载这一特点，结合地基类型，取测风塔设计等级为 2 级。

4.1 风荷载

风荷载标准值应按下式计算：

$W_k=\mu_s\mu_z W_0$

式中 W_k—风荷载标准值（kPa）；

μ_s—风荷载体型系数；

μ_z—风压高度变化系数；

W_0—基本风压（kPa）。

基本风压 W_0 可按下式确定：

$$W_0 = \frac{1}{1600}V^2$$

式中 V—空旷海面，离地 10m 高，30 年一遇 10min 平均最大风速。测风塔承台之上 95m 高，粗糙度取值按 A 类，μ_z 取 2.40。

4.2 波浪力

依据《海上风电场基础设计规定（试行版）》，可以用 Morison 方程计算波浪荷载，作用于距离海底 z 处的微段 dz 上的波浪力表达式为：

$$dP = dP_D + dP_I = C_D \rho \frac{D}{2} v|v| dz + C_M \rho A \frac{\partial u}{\partial t} dz$$

式中：dP_D—波浪荷载的拖曳力（kN/m）；

dP_I—波浪荷载的惯性力（kN/m）；

C_D—拖曳力系数；

C_M—惯性力系数；

D—桩的直径（m）；

A—桩断面面积（m^2）；

ρ—海水的密度（t/m^3），取 $1.025t/m^3$；

u—波浪运动产生的水质点沿水平方向的速度（m/s）；

$\frac{\partial u}{\partial t}$—波浪运动产生的水质点沿水平方向的加速度（$m/m^2$）。

一般认为，拖曳力系数 C_D、惯性力系数 C_M 与雷诺数、KC 数、结构物表面的相对粗糙度有关。其中雷诺数 $Re = u_{max} D / v$；$KC = u_{max} T / D$。

式中：u_{max}—静水面处波浪运动产生的水质点最大水平速度（m/s）；

V—海水的运动粘滞系数（m^2/s）；

T—波浪周期（s）。

4.3 水流力

作用在基础构件上的水流力标准值，按下式计算：

$$F_W = C_W \frac{\rho}{2} V^2 A$$

式中 F_W—水流力标准值（kN）；

V—水流设计流速（m/s）；

C_W—水流阻力系数；

ρ—水的密度（t/m^3），海水一般取 1.025；

A—计算构件在与流向垂直面上的投影面积（m^2）。参考当地资料，水流设计流速取 1.08 m/s。

4.4 冰荷载

目前国内规范对于冰荷载主要以静力计算为主。考虑冰荷载时一般不需要考虑风、浪、流等荷载。

冰场对钢管桩产生的极限冰压力标准值按下式计算：

$$F_I = mAbhR_y$$

式中：F_I—极限冰压力标准值（kN）；

m—桩或墩迎冰面形状系数；

A—冰温系数；

b—桩或墩迎冰面投影宽度；

h—计算冰厚（m）；

R_y—冰的抗压强度标准值（kPa）；

参考当地实测海洋水文数据，A 取 1.17；由于无现场实测资料，按规范 $R_y = 750kPa$。

4.5 撞击荷载

当基础承受船只的撞击力可按下式计算：

$$F = \gamma V \sin\alpha \sqrt{\frac{W}{C_1 + C_2}}$$

式中 F—撞击力（kN）；

γ—动能折减系数 $s/m^{\frac{1}{2}}$，当船只斜向撞击墩台时可采用 0.2 $s/m^{\frac{1}{2}}$，正向撞击时可采用 0.3 $s/m^{\frac{1}{2}}$。

V—船只撞击墩台时的速度（m/s）。

α—船只驶近方向与墩台撞击点处切线所成的夹角，

表4 基础结构设计计算成果表

		单位	作用效应值	允许值
承载力计算	抗压承载力	kN	2921	3057
	抗拔承载力	kN	701	2706
变形计算	竖向沉降	mm	17.3	100
	泥面处最大水平变形	mm	28.1	30
	最大转角	弧度	4.4/1000	5/1000
桩身强度	抗剪	MPa	0.4	170
	抗压	MPa	252.9	295
	抗拉	MPa	151.0	295
桩的稳定性	抗弯	MPa	115.9	295

采用 20 度；

W—船只重（kN）；

C1、C2—船只的弹性变形系数和墩台圬工的弹性变形系数，假定 C1+C2=0.0005m/kN。

此次只考虑当地渔船意外撞击，船只重取 100KN，撞击力的作用高度参考乐亭当地主要渔船舷高。

4.6 载荷计算结果

基础设计对承载力、变形和桩身强度及稳定性进行计算，结果如下表，作用效应值均满足设计要求，且都较充分的发挥了结构的抗力性能。因此，该结构设计是安全经济合理的。

5 施工方法及流程

5.1钢管桩制作及运输

确定钢管桩的设计方案后，即开始采购钢板进行钢管桩的制作，通过下料、预弯、卷板、单管拼对、涂刷防腐涂料等环节，完成钢桩制作，制作好的钢桩通过方驳运输船运至施工现场。

5.2 海上沉桩

沉桩采用 GPS 测量定位系统定位。打桩船上设两台 GPS 流动站、五台倾角传感器和三台激光测距仪，实时监测船体的位置、方向和状态，同时利用两台漫反射激光测距仪实时校正基桩的位置，通过软件系统处理后给出打桩船的移动方向和移动量，据以调整船位。直至满足要求后，则可沉桩。沉桩贯入度和桩顶标高的监测由高程监测系统来完成。

5.3 桩芯吸泥工艺

本次桩芯吸泥采用的原理为利用离心泵抽取海水通过冲水管引入桩内形成高压射流，破坏土质，同时可以补充桩内海水，保持水位差。空压机供气通过软管连接高压钢管进入排泥管（高压管）下口附近，为防泥浆堵管，采用活盖板将入口密封，在管内和管外形成强大气压差，泥浆顺管被“举”出桩身外。吸泥结束后，冲刷钢管桩管壁，再将潜水泵置入桩内抽取剩余水量。

5.4 水上现浇桩芯砼施工

钢管桩内需浇筑 C25 微膨胀砼。桩芯混凝土设计标号为 C25，浇注时，混凝土自高处落下，利用混凝土下落时产生的动能达到振实的目的，在自由下落高度不足 4m 时，要借助于振捣器将上层混凝土振捣密实。本次浇注为水上拌和船浇注。

5.5 上部塔架施工

待承台混凝土强度达到设计要求后，开始进行上部塔架安装施工。安装流程为：测风塔底节吊节→测风塔主体安装→测风塔垂直度调整→顶节安装→避雷针安装→测风塔垂直度调整→避雷线安装。

6 结语

测风塔结构设计充分考虑了施工海域海上构筑物的特点，计算分析选择了合理的设计荷载，经过两年的实践，特别是 2010 年遭受了近 30 年来最大的海冰灾害考验，证明测风塔设计适合该海域，基础及塔架设计方案可行。

由于受海上恶劣环境影响，测风塔施工工期长、难度大，特别是北方海域，受冬天大风寒潮及海冰灾害影响严重。在设计时根据地质情况和工期特点，合理选择海上施工工艺，提出了合理的施工组织方案，在最有利于施工的季节完成了海上测风塔的建设，为今后类似的海上工程提供了丰富的施工经验。

海洋水文观测设备放置方案充分考虑了海冰撞击及切割风险，在桩基外侧背向通过焊接立管，将电缆从立管深入海底泥面的方式有效的保证了海洋水文观测设备电缆的安全性，为今后海上测风塔及海上风电机组电缆铺设方案进行了成功的试验。

通过海上测风塔工程，我们充分认识了海冰灾害对工程带来的各种问题。面对 2010 年的海冰灾害，测风塔连接承台的爬梯以及基础的护舷被海冰撞毁不见踪影。建议今后设计爬梯安装高度、护舷连接方式时应结合一年一遇或多年一遇海冰高度、海冰撞击方式等海冰灾害影响，确保爬梯、护舷等部件的安全。

作者简介

李海波（1983 年 –），男，助理工程师，主要从事风能资源测算工作。

参考文献

[1] 陆钦年 . 我国渤海海域的海冰灾害及其防御对策 . 自然灾害学报 ,1993(10).
[2] 马毓倩等 . 浅谈渤海自然灾害对海洋石油安全生产的影响及对策 . 海洋预报 ,2005(11).
[3] 张新玲等 . 渤海海上测风与沿岸实测风的对比分析 . 海洋预报 ,1998(11).
[4] 郝俊涛等 . 海上测风塔上部结构设计 . 武汉大学学报（工学版）,2010(8).
[5] 邢占清等 . 响水风电场海上测风塔设计与施工 . 水利水电技术 ,2009(9).
[6] Kristin Sopkin. Modeling air/sea flux parameters in a coastal area: A comparative study of results from the TOGA COARE model and the NOAA Buoy model.
[7] 海上风电机组基础设计规定（试行）.

敬请莅临2011北京国际风能大会暨展览会
• 时间：2011年10月19日至21日
• 地点：北京中国国际展览中心（新馆）
铁姆肯公司展位号：
东展区EC12号

信赖的时刻

当微风拂面，心神温暖，你或许会想起远方的戈壁或海上，有我们支承着庞大的风电机组在百米高空运转不息。

这就是信赖的时刻

在铁姆肯公司，我们的工程师与全球客户密切合作，致力于开发利用风能这一替代性可再生能源，无论陆上还是海上，风电机组的可靠运转是提高风能利用率的关键保障。铁姆肯公司的纯净钢、超大尺寸轴承、润滑、及状态监测系统等诸多产品和服务能满足风电机组严苛的应用需求，确保风电机组的可靠性，并提高风电场的投资收益。

TIMKEN
Where You Turn
轴承 · 特种钢 · 工业技术服务

www.timken.com.cn

上海：86-21-61138000 北京：86-10-64100490 成都：86-28-86202271 沈阳：86-24-23241585 天津：86-510-85523888 广州：86-20-38320049 西安：86-29-88337198
武汉：86-27-83580302 南京：86-25-88633501 重庆：86-23-67705280 长沙：86-731-85052990 青岛：86-532-82827931 香港：852-28091849 台北：886-2-27160642

东北大范围区域风流场外推的实例研究

■黑龙江林业设计研究院 | 寇　伟　崔建生

摘　要：目前，中国开发的众多项目中，存在测风塔数量不多，需要开发的区域范围却很大的问题。因此通过一个塔进行风流外推，其代表性如何，其误差如何，都将关系到未来项目开发的质量。本文利用法国美迪 WT 软件检验了东北大范围区域内测风塔外推计算的效果，目的是确认美迪 WT 软件技术在大范围区域内风流外推技术的可靠性，研究结果将对在东北大范围区域内进行的风电项目开发具有重要的指导意义。

关键词：风速；湍流；美迪 WT 软件

1 引言

目前，中国开发的众多项目中，存在测风塔数量不多，需要开发的区域范围却很大的问题。因此通过一个塔进行风流外推，其代表性如何，其误差如何，都将关系到未来项目开发的质量。本项目采用法国美迪 WT 软件，进行风流外推及计算。该软件是基于计算流体力学技术，通过对整个空间的 NS 方程求解，得到风流场的相关信息。

该研究项目位于东北林甸地区，该地区共有 6 个测风塔，从北向南依次命名为 1 号至 6 号（字母表示为 LD1，LD2　LD6），两塔最远距离为 49.61km（1 号塔与 6 号塔之间），两塔最近距离为 7.87km（5 号塔与 6 号塔之间）。此区域地势北高南低，1 号塔所在海拔位置为 170m，6 号塔所在海拔位置为 150m，可以认为该地区较为平坦，但该区域的东部为逐渐升高的地势。

2 研究内容与结果

2.1 WT软件计算参数设置

本研究采用的地形数据来源于 SRTM 数据库，分辨率为 90m。粗糙度根据现场实际考察图片设定为 0.06。由于区域地表属性单一，所以在该研究项目中计算区域的粗糙度均采用 0.06。计算中心点由 WT 软件根据计算范围以及测风塔相对位置自行指定，计算半径为 55383m，如图 1 所示。计算半径之所以如此大，不仅是考虑到了测风塔之

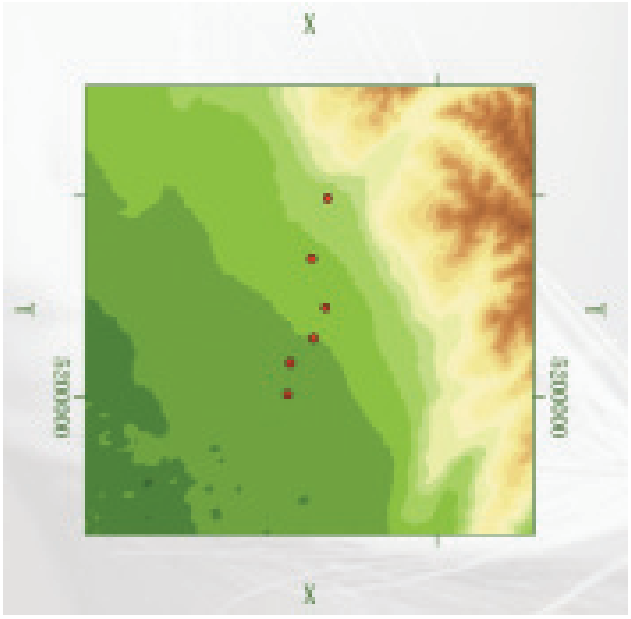


图1 测风塔相对位置及区域地形图

表1 扇区参数表

定向模拟计算扇区	热稳定度	网格数量	收敛率
30	2	3575040	100%
60	2	3572380	100%
90	2	3608150	100%
120	2	3575040	100%
150	2	3572380	100%
180	2	3608150	100%
210	2	3575040	100%
240	2	3572380	100%
270	2	3608150	100%
300	2	3575040	100%
330	2	3572380	100%
360	2	3608150	100%

间的距离跨度较大，同时也是由于在测风塔区域的东部区域，地势逐渐升高，为将其地形影响纳入其中，需要选择较大的计算半径。

该研究项目由于计算区域面积较大，设定的最小水平分辨率为 250m，垂直分辨率为 4m，按照每 30° 一个方向扇区进行定向模拟计算。

在该项目中，由于测风塔之间距离较远，为了避免近地表因素对测风塔低层高度测风数据的影响，研究中均根据每个测风塔最高层测风时间序列的数据进行综合计算。本研究共进行 6 次综合计算，以比较不同测风塔外推的效果。

在美迪 WT 软件中，综合计算时采用了湍流校正，即根据实际风流数据的测量情况对计算外推湍流进行校正，校正原理及方法如下所示。

$$DELTA\_I(dir) = Imes(dir) - Icalcm(dir)$$

$$Icorp(dir) = Icalcp(dir) + DELTA\_I(dir) * Cm(dir) / Cp(dir)$$

在结果点处定向湍流强度的校正结果 Icorp(dir) 是根据下式计算得到的：

Imes(dir)—测风塔处实际测量的定向湍流强度；

Icalcm(dir)—测风塔处计算得到的定向湍流强度；

Icalcp(dir)—结果点处计算得到的定向湍流强度；

Cm(dir)—测风塔处计算得到的定向风加速因数；

Cp(dir)—结果点处计算得到的定向风加速因数。

表2 测风塔间距

	LD1	LD2	LD3	LD4	LD5
LD1	0 km				
LD2	15.27km	0 km			
LD3	26.99km	12.62km	0 km		
LD4	34.87km	19.88km	8.11km	0 km	
LD5	41.53km	26.38km	16.11km	8.29km	0 km
LD6	49.61km	34.25km	23.39km	15.23km	7.87km

2.2 研究结果

表3 模拟计算值与实测值对比表

应用LD1测风塔处（90m）风流数据外推其他测风塔综合计算比较						
	LD1外推风速计算值	实际风速测量值	风速差值（m/s）	外推湍流计算值	实际湍流测量值	湍流差值
LD2（90m）	6.83	6.876	–0.046	0.056	0.054	0.002
LD3（70m）	6.57	6.563	0.007	0.059	0.055	0.004
LD4（70m）	6.58	6.751	–0.171	0.059	0.055	0.004
LD5（70m）	6.59	6.698	–0.108	0.059	0.055	0.004
LD6（90m）	6.87	7.119	–0.249	0.056	0.052	0.004
应用LD2测风塔处（90m）风流数据外推其他测风塔综合计算比较						
	LD2外推风速计算值	实际风速测量值	风速差值（m/s）	外推湍流计算值	实际湍流测量值	湍流差值
LD1（90m）	6.83	6.899	–0.069	0.053	0.056	–0.003
LD3（70m）	6.58	6.563	0.017	0.056	0.055	0.001
LD4（70m）	6.59	6.751	–0.161	0.057	0.055	0.002
LD5（70m）	6.61	6.698	–0.088	0.057	0.055	0.002
LD6（90m）	6.88	7.119	0.239	0.054	0.052	0.002
应用LD3测风塔处（70m）风流数据外推其他测风塔综合计算比较						
	LD3外推风速计算值	实际风速测量值	风速差值（m/s）	外推湍流计算值	实际湍流测量值	湍流差值
LD1（90m）	6.79	6.899	–0.109	0.052	0.056	–0.004
LD2（90m）	6.78	6.876	–0.096	0.053	0.054	–0.001
LD4（70m）	6.52	6.751	–0.231	0.055	0.055	0
LD5（70m）	6.54	6.698	–0.158	0.056	0.055	0.001
LD6（90m）	6.81	7.119	–0.309	0.053	0.052	0.001
应用LD4测风塔处（70m）风流数据外推其他测风塔综合计算比较						
	LD4外推风速计算值	实际风速测量值	风速差值（m/s）	外推湍流计算值	实际湍流测量值	湍流差值
LD1（90m）	7.01	6.899	0.111	0.053	0.056	–0.003
LD2（90m）	6.98	6.876	0.104	0.053	0.054	–0.001
LD3（70m）	6.7	6.563	0.137	0.056	0.055	0.001
LD5（70m）	6.71	6.698	0.012	0.056	0.055	0.001
LD6（90m）	6.98	7.119	–0.139	0.053	0.052	0.001
应用LD5测风塔处（70m）风流数据外推其他测风塔综合计算比较						
	LD5外推风速计算值	实际风速测量值	风速差值（m/s）	外推湍流计算值	实际湍流测量值	湍流差值
LD1（90m）	6.88	6.899	–0.019	0.053	0.056	–0.003
LD2（90m）	6.88	6.876	0.004	0.053	0.054	–0.001
LD3（70m）	6.62	6.563	0.057	0.056	0.055	0.001
LD4（70m）	6.63	6.751	–0.121	0.056	0.055	0.001
LD6（90m）	6.92	7.119	–0.199	0.054	0.052	0.002
应用LD6测风塔处（90m）风流数据外推其他测风塔综合计算比较						
	LD6外推风速计算值	实际风速测量值	风速差值（m/s）	外推湍流计算值	实际湍流测量值	湍流差值
LD1（90m）	7.07	6.899	0.171	0.052	0.056	–0.004
LD2（90m）	7.05	6.876	0.174	0.053	0.054	–0.001
LD3（70m）	6.77	6.563	0.207	0.055	0.055	0
LD4（70m）	6.78	6.751	0.029	0.055	0.055	0
LD5（70m）	6.79	6.698	0.092	0.055	0.055	0

表4 风速误差表

参考塔 / 目标塔	LD1	LD2	LD3	LD4	LD5	LD6
LD1		1.00%	1.58%	1.61%	0.28%	2.48%
LD2	0.67%		1.40%	1.51%	0.06%	2.53%
LD3	0.11%	0.26%		2.09%	0.87%	3.15%
LD4	2.53%	2.38%	3.42%		1.79%	0.43%
LD5	1.61%	1.31%	2.36%	0.18%		1.37%
LD6	3.50%	3.36%	4.34%	1.95%	2.80%	

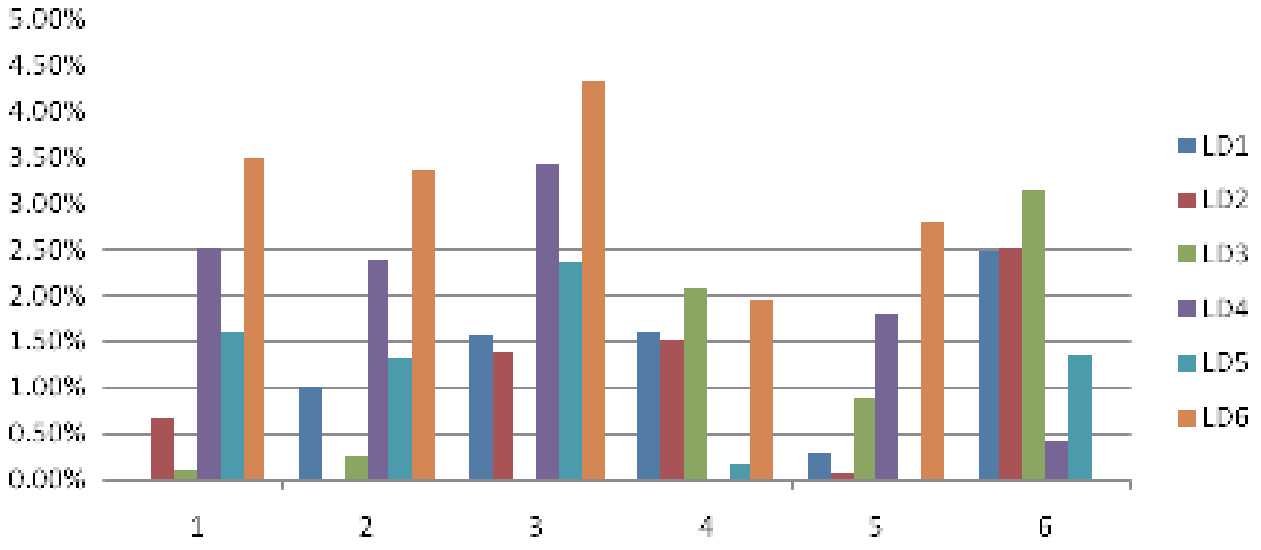


图2 风速误差

综上可知，此项目的风流外推结果是可靠的，风速外推最大误差为 4.34%，即从 LD3 塔的风流数据外推到 LD6 塔的

表5 湍流误差表

参考塔 / 目标塔	LD1	LD2	LD3	LD4	LD5	LD6
LD1		5.36%	7.14%	5.36%	5.36%	7.14%
LD2	3.70%		1.85%	1.85%	1.85%	1.85%
LD3	7.27%	1.82%		1.82%	1.82%	0%
LD4	7.27%	3.64%	0%		1.82%	0%
LD5	7.27%	3.64%	1.82%	1.82%		0%
LD6	7.69%	3.85%	1.92%	1.92%	3.85%	

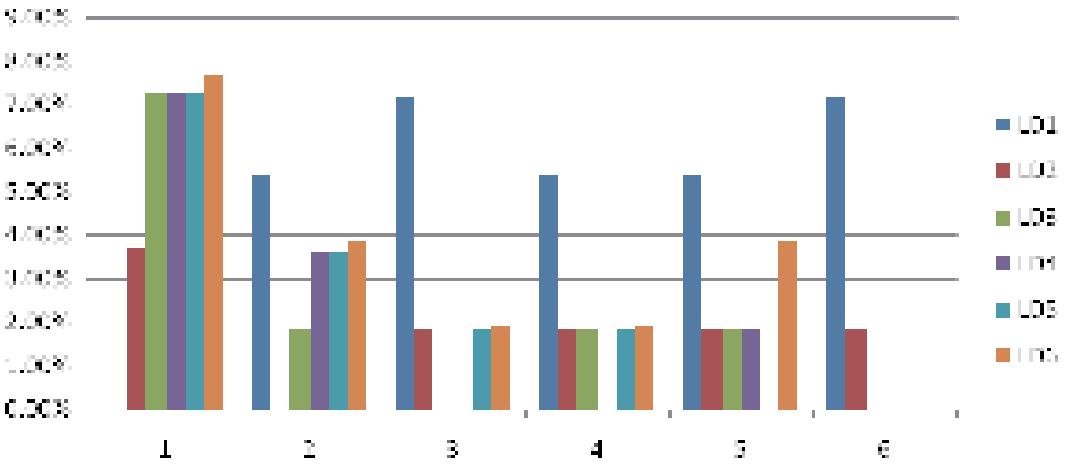


图3 湍流误差

上述计算结果表明，由于整个区域实际湍流强度较低，最大误差仅为 7.69%（即计算值与实际测量湍流强度差 0.004，见表 3），即从 LD1 塔的湍流强度外推到 LD6 的湍流强度，两塔之间的距离约为 50km，整个项目的湍流外推结果是可靠的。

3 结论

该项目位于东北地区，地势相对平坦，测风塔测风数据质量较好，均有同期完整年数据可供比较分析。本文通过 Meteodyn_WT 软件的模拟计算，得到较好的风流外推结果，对美迪 WT 软件在大范围内进行风流外推的适用性进行了很好地确认，为今后在该地区或同等地形条件下的风能资源项目评估奠定了技术基础，并具有工程应用意义。在未来工程的开发与实施中，本研究将会结合具体实际情况对项目进行更加完整而详尽的分析。

作者简介

寇伟（1982 年 –），男，风资源工程师。

崔建生（1965 年 –），男，注册电气师、总工程师。

壳牌如影相伴

壳牌致力于坚持并进一步扩大与中国风电行业的紧密技术合作，并始终努力将国际领先、环保优质的润滑科技与研发经验与业内分享，并积极推动行业润滑标准的制定与发展。

绿色风电，畅享无忧运行

GREEN WIND POWER RUNS
SMOOTHLY WITH SHELL LUBRICANT

风电增速箱设计载荷确定的新方法

■中国重型机械研究院有限公司 | 赵玉良　王宇航

摘　要：风电增速箱设计载荷确定的准确性直接决定着风电增速箱设计的经济性和安全性，因而其合理的确定方法至关重要。本文结合风电增速箱的载荷分析，采用概率统计的方法，探讨一种风电增速箱设计载荷确定的新方法，以供在进行风电增速箱设计时参考。

关键词：风电；增速箱；载荷分析

1 风电增速箱的载荷分析

由于风电机组工作状况的复杂性和载荷变化的多样性与随机性，风电增速箱所受的载荷也具有随机变化的波动性特征。不同的机组类型、不同的应用地域和不同的控制策略所导致的风电增速箱所受的载荷也各不相同。不同地域的不同风速分布导致增速箱作用载荷的变化呈现多样化的特征。因此，具有普遍意义上的风电增速箱设计载荷的确定方法应当采用概率统计的方法，概括与其相关联的规律性的特征，如此将更为合理和易于实现。

根据风电增速箱所受载荷的种类及变化情况，可将其概括为下述几种主要类别：

1.1 常规性工作载荷

常规性工作载荷指在切入与切出风速间正常工作时增速箱所受的载荷，它会随着风速的变化而变化，并呈现较为典型的统计学特征。随着风电机组控制方式的不同，如失速控制、集中变桨距控制或单独变桨距控制等，其载荷会有一定的变化。一般讲，采用后两种控制方式的载荷峰值或波动将会小于前者，对外界载荷变化的敏感性也要小于前者，这也是后者应用较为普遍的原因之一。

1.2 非常规性工作载荷

非常规性工作载荷是指一些由于外部扰动因素引起的瞬时载荷，如发电机切入与切出，快速变桨距调节，叶尖展开及正常制动等，一般此时都会引起载荷的较大波动，甚至出现瞬时反向载荷。这些载荷一般也要求在进行齿轮箱的疲劳强度设计时对其影响予以考虑。但令人遗憾的是，尽管与此相关的探索已进行了多年，但目前尚未找到一种适宜的并得到普遍认可的方法。

1.3 极端载荷

极端载荷可能来自多个方面，如极端风况、发电机短路、紧急停机或台风等。一般讲，极端载荷已严重超过齿轮箱的正常设计载荷，齿轮箱设计人员应会同风电机组设计人员一并商议，从机组整体设计中寻求应对此类载荷的有效方法，如机组的多重过载保护装置的合理设计等。但无论怎样，这都是一个不易解决但必须认真对待的问题。

除去上述载荷，众所周知，包括齿轮箱在内的整个风电机组的工作环境是一个处于内外部激励因素较多的多体柔性动力学系统，因而其工作载荷的动态特征将不可避免地异常复杂，并会表现出较强的波动性。有关动态载荷的变化特征应通过详细的动力学建模及分析获取，并应在齿

表1 2100kW风电机组的工作风速与对应的输出功率

V(m/s)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Pv(kW)	14	138	312	546	840	1180	1535	1856	2037	2088	2100
V(m/s)	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Pv(kW)	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100

轮箱的相关疲劳和强度的评估中予以体现。有关这一方面的研究工作十分活跃且仍在进展中，并将逐步在包括增速箱在内的机组部件的设计中得以应用。

2 现行增速箱设计载荷的确定方法

多样化及多变的载荷特征决定了增速箱设计载荷确定的难度和复杂性，最为理想和合理的设计载荷的确定方法，应是依据增速箱实际工作过程中的载荷谱来进行。但遗憾的是，长达 20 年的增速箱工作历程载荷谱也会随着应用条件的不同而不同，况且在进行产品设计时，该齿轮箱的载荷谱也无法获取。考虑了上述各种困难后，IEC61400-1 及 AGMA6006-A03《风力发电齿轮箱设计规范》中亦允许用一些商业化的软件来根据风速分布模拟分析出其对应的载荷谱。国内目前设计中也有直接将发电机功率取为设计载荷，但设计结果明显趋于保守，致使产品也显得较为笨重。

由此可知，关于风电增速齿轮箱设计载荷的确定可以说是一个尚未很好解决的问题，上述各种方法不同程度上表现出了各自的不足。基于现有文献及实测资料，采用概率统计的方法，本文将探讨增速箱设计载荷确定的一种新方法，以供工程设计使用。

3 基于概率统计的设计载荷确定方法

3.1 风场的风速分布及描述

大量实测及分析均已得出一个普遍的认知，即风场的风速分布一般可用威布尔或瑞利分布来描述，其中瑞利分布应用的更普遍些，其分布密度可由式（1）表示：

$$\varphi_v = \frac{\pi}{2}\left(\frac{v}{v_m^2}\right)e^{-\frac{\pi}{4}\left(\frac{v}{v_m}\right)^2} \quad (1)$$

其中：v_m 为平均风速，m/s。

风场风速大小决定着风电机组发电量的大小，也决定着作用于叶轮及齿轮箱上的载荷的大小，因而对风速的准确描述决定着齿轮箱作用载荷评估的准确性和适应性。但由于风速变化的随机性特征，只能按照概率统计的办法来寻求其最适合的分布表示方法，瑞利分布即是应用最为普遍，也最接近实际状况的一种描述方法。当然，由于地域与季节的不同，风速分布可能还会采取其他的形式，但其随后的处理原理及方法都是一样的，本文仅以瑞利分布为例来进行讨论和分析。

3.2 风电机组的工作风速与对应的输出功率

在切入及切出风速分布区内，发电机输出功率随风速变化的曲线称之为风力发电机的功率曲线。对任何一个风电机组，风电设备制造商均提供了这样一个曲线或表格，用以确定机组的输出特性和最大工作能力。国内一个典型的风电机组工作风速与对应的输出功率如表 1 示。

由表 1 可知，机组输出功率会随着工作风速的变化而变化，风速大则输出功率也大，反之亦然。

3.3 设计载荷的确定方法

发电机的输出功率是增速箱驱动发电机做功输出的结果，因而其输出功率也即为增速箱的工作负载，只不过这一负载来自增速箱的高速端。

一般讲，齿轮箱各零部件上所受的载荷不仅来自高速端，考虑到动力学效应，来自低速端的影响也不容忽视。但从平均载荷的意义上，无论是采用来自哪一端的数据都将是作用于齿轮箱上的负载。常规载荷谱确定的力矩一般是低速轴上的转矩。

本方法将依据风速分布和风电机组输出功率来计算齿轮增速箱平均意义上的设计载荷。

设风速 V 的分布密度为φ_v，输出功率 Pv 的数学期望，亦即功率的平均值可由式（2）计算，即

$$EP_v = \int_0^\infty P_v \varphi_v dv \quad (2)$$

由于数学表述及计算上的复杂性，上式的直接积分计算将过于复杂而难以实现。为此可采用一种简化方法进行计算，而仍然具有足够的工程精度。即对风速 V 及对应的输出功率 Pv 进行离散化处理，可在切入风速及切出风速间选取多个点，并求得对应值，如表 2 所示。

表2 离散化的风速分布及功率

V	V_1	V_2	V_3	V_4	……	V_k
P_v	P_{v1}	P_{v2}	P_{v3}	P_{v4}	……	P_{vk}
φ_v	φ_{v1}	φ_{v2}	φ_{v3}	φ_{v4}	……	φ_{vk}

表3 计算实例表

V(m/s)	4	5	6	8	10	12	13	14	16	18	20	22	24	25
Pv(kW)	14	138	312	840	1535	2037	2088	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100
φ_v	0.047	0.055	0.062	0.069	0.068	0.061	0.056	0.051	0.039	0.029	0.019	0.012	0.007	0.006

依据上述处理原则，则 Pv 的数学期望为：

$$EP_v = \sum_{m=1}^{k} P_{vm} \times \varphi_{vm} \times \Delta V \quad (3)$$

此即离散状态下风电机组输出功率数学期望的计算公式，据此可计算输出功率的平均值，亦即增速箱设计的名义功率。

按此名义功率设计时，由于各种复杂的瞬时载荷的影响并未考虑在内，也无法采用一种精确的数学方法予以描述，因此建议仍然需考虑一个适当的安全系数。同样地依据此载荷条件，还可进行传动副的齿轮胶合及轴承与轴系的设计计算。

4 计算实例

以某风电机组为例，其额定功率为 2100kW，切入风速为 4m/s，切出风速为 25m/s，运行温度范围为 –30℃～ 40℃，功率调节方式为变速变桨距，按其给定的功率曲线并查取风速分布密度可得到下表。

上述计算中的平均风速 Vm 取 11m/s，这也是国内多数风场统计平均风速的典型值。

据上表并按式（3）就可求得设计所需的平均功率为：

$$EP_v = \sum_{n=1}^{n} P_{vn} \times \varphi_{vn} \times \Delta V$$

$$= 1281.96\text{kW}$$

由计算结果可见，平均载荷远小于名义载荷，平均载荷大约只有名义载荷的 0.6 倍，这和文献 [2] 中按 AGMA6006 等效载荷确定方法给出的 1500kW 的等效载荷占名义载荷的比例大体一致。说明按名义载荷设计风电增速箱会导致体积过于庞大，重量过大，也解释了以往国内用传统方法核算国外设计的风电增速箱的齿轮强度及轴承寿命往往难以通过的真正原因。

参考文献

[1] 刘万琨，李银凤，赵萍 . 风能与风力发电技术 [M]. 北京 : 化学工业出版社，2006.

[2] 刘忠明，尚珍，董进朝等 . 风电增速箱齿轮设计计算若干问题探讨 [J]. 机械传动，2008,32（6）.

[3] Tony Burton, et, al. 武鑫等译 . 风能技术 [M]. 北京 : 科学出版社，2009.

作者简介

赵玉良（1963 年 –），男，工学硕士，教授级高工。从事机械传动技术研究及新产品开发，发表论文三十余篇。

REpower
North (China)

MM系列产品精湛入微的设计、卓越可靠的品质、专业便利的服务和稳定优越的电网功能，使我们为您提供的风场综合解决方案更加安全、高效、经济、持久。

瑞能北方风电设备有限公司 * 中国内蒙古包头市青山区厂前路 邮编014033
电话: +86 472 3 38 45 27 * 传真: +86 472 3 38 45 26 * E-Mail: info@repowernorth.com

瑞能风电设备贸易（北京）有限公司 * 中国北京市朝阳区朝外大街乙6号朝外SOHO C座1038
电话: +86 10 58 69 94 32 * 传真: +86 10 58 69 94 33 * E-mail: infocn@repower.de

10 years

S4WT软件在双馈式风电齿轮箱分析中的应用

■比利时Samtech公司 | 张旗利　柳佳　叶泊沅

1 引言

风电机组是承受瞬变空气动力激励的大型柔性结构，齿轮箱作为双馈式风电机组最核心的部件，受复杂动态载荷的作用，常面临齿轮、轴承的失效及相关疲劳破坏问题，是双馈式风电机组故障率最高的部件，齿轮箱的可靠性设计成为双馈式机组设计的关键技术之一。

要设计可靠性高的风电齿轮箱，最重要的是精确计算作用在齿轮箱上的动态载荷，而齿轮箱是风电机组系统的一部分，会与其他部件和控制系统之间相互作用，动态载荷的计算除了建立详细的齿轮箱模型外，还必须考虑整个机电系统（包含机械系统及其控制系统），因而需要建立整机模型，同时考虑整机动态特性及齿轮箱内部动态特性对齿轮箱动态载荷的影响。

S4WT（SAMCEF for Wind Turbines）是提供齿轮箱分析的一整套解决方案，采用空气动力学，基于有限元的多体动力学和控制耦合的方法来构建包含齿轮箱详细信息的整机高精度模型，从而精确计算齿轮箱的动态载荷。同时还可进行齿轮箱部件级分析，考察齿轮箱本身的静态载荷分布、模态特性及接触应力等，从而全面满足双馈式风电齿轮箱分析的需要。

2 S4WT非线性柔性多体动力学的齿轮箱建模

齿轮箱在其寿命期内会经受多种动态载荷谱多次循环作用，容易产生疲劳破坏，因而疲劳成为齿轮箱设计时需要考虑的至关重要的因素。传统多体动力学的齿轮箱建模和分析方法由于不能充分考虑齿轮箱的柔性和非线性，导致分析结果中阻尼和高阶频率的衰减，疲劳载荷大小和循环次数都有被低估的风险。

为精确模拟齿轮箱动态行为并计算动态载荷，S4WT中采用柔性结构与多体动力学混合的方式，包含非线性梁

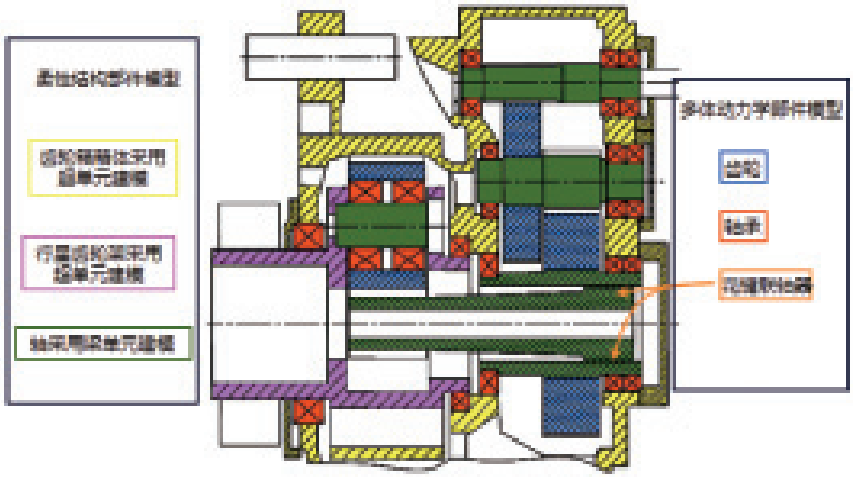


图1 S4WT非线性柔性多体动力学的齿轮箱建模

单元、超单元、多体动力学运动副、专门的齿单元和轴承单元等来构建包含柔性和间隙等重要特性的复杂齿轮箱的精确模型，充分考虑齿轮箱部件的柔性和非线性因素，以及齿轮箱振动产生的轴向、径向和弯曲载荷的耦合效应等，故而能够覆盖更高的频率范畴以及更多的雨流计数循环，得到更加精确的疲劳载荷谱，大大提高齿轮箱设计的可靠性。

2.1 S4WT齿单元

S4WT 采用独特的两节点齿单元来模拟齿轮啮合，并通过齿轮箱完整的几何信息和齿轮特性参数信息来计算节点之间的啮合力，同时还可以考虑沿啮合线的非线性刚度、齿轮传动误差、接触阻尼和啮合间隙等重要特性，相对于传统的仅考虑传动比、质量和惯性矩的简单齿轮箱模型，分析精度大大提高；同时，由于不用建立详细的齿轮啮合有限元模型，计算效率也大大提高，是考虑到齿轮箱分析精度和效率的最佳平衡。

2.2 S4WT轴承单元

同时 S4WT 中还有专门的轴承单元，能同时考虑线性轴承刚度和阻尼、包含间隙的非线性轴承刚度和阻尼、轴向、径向和弯曲刚度和阻尼的耦合效应、以及包含间隙和偏心的径向和弯曲刚度的耦合效应等，从而准确表达轴承对齿轮箱旋转轴的承力作用。

2.3 S4WT超单元

对于齿轮箱箱体、行星齿轮架等柔性部件 S4WT 中采用超单元的方式建模，利用保留节点和缩减的质量和刚度矩阵来代替有限元模型，以缩减模型规模度，同时保证计算准确性。

3 S4WT齿轮箱整机分析方案

风电齿轮箱的动态载荷与作用于叶片的空气动力学载荷、发电机电磁扭矩以及整个机电系统的动态特性紧密相

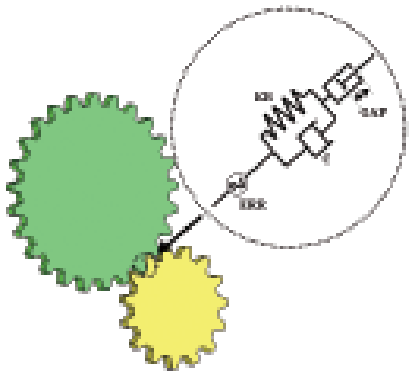


图2 独特的S4WT齿单元

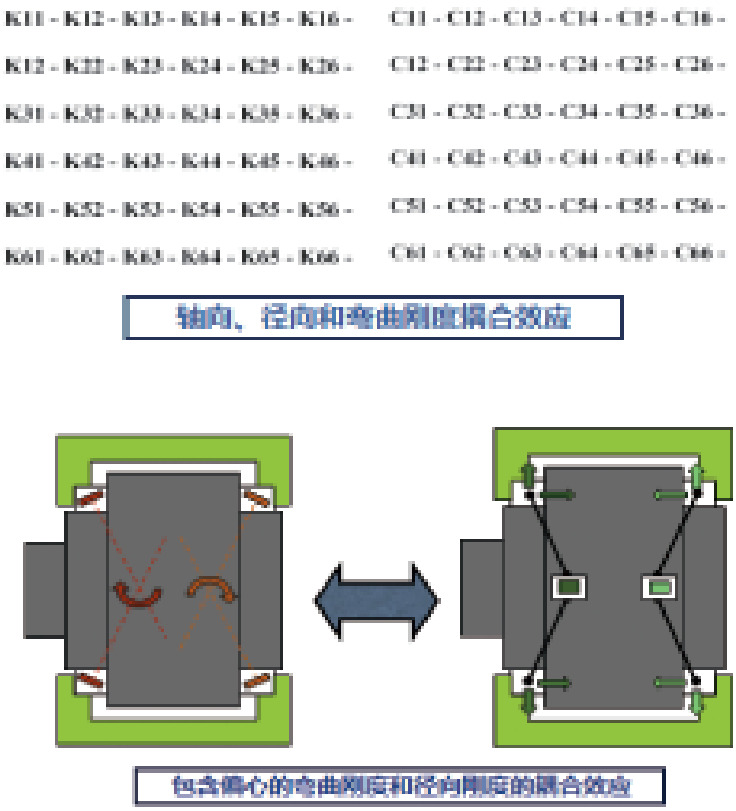


图3 S4WT轴承单元

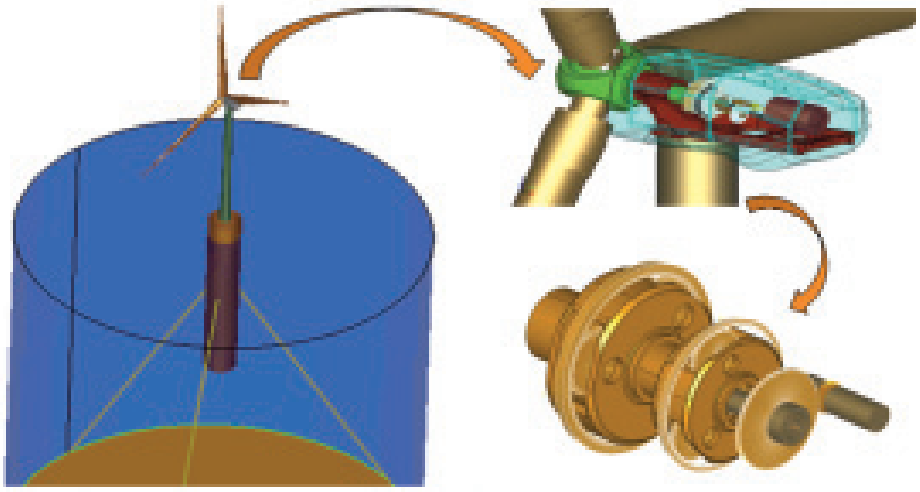


图4 包含齿轮箱详细信息的整机高精度模型

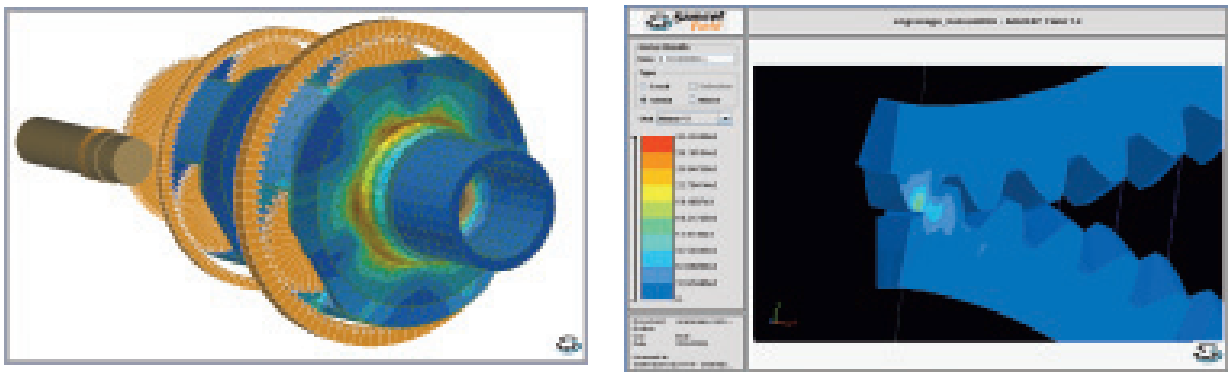


图5 齿轮箱部件级分析（静态分析和接触分析）

关，因而在 S4WT 中采用空气动力学、机械与控制系统耦合的方法建立整机高精度模型来精确计算齿轮箱动态载荷。

S4WT 采用基于非线性有限元理论模拟柔性多体动力学系统和基于动量 – 叶素理论来表征空气动力学、并与控制系统相联的全耦合、一体化方法，来构建包含部件柔性、非线性及部件之间（包含机电系统之间）相互作用的高精度整机模型，从而准确模拟机组动态行为，精确计算动态载荷。

S4WT 独特的求解器算法能将有限元方法延伸到能考虑自由度之间的关系以使其能产生目标运动，并联合 Newmark 法和 HHT 时间积分法，能为包含有限元和多体动力学的复杂模型建模和求解，这正适合于风电机组这样的包含了部件柔性和复杂运动的大型柔性机电系统。

4 S4WT齿轮箱部件级分析方案

除了在整机中分析齿轮箱的动态行为，精确计算齿轮箱动态载荷外，在 S4WT 中还可以建立齿轮箱的有限元模型进行齿轮箱部件级详细分析，包括部件级静态分析、模态分析和接触分析等。

5 S4WT齿轮箱分析应用案例

5.1 欧盟Upwind项目

下面是欧盟 Upwind 项目仿真与试验相关性对比案例，Samtech 作为项目成员与 GE 及 Rexroth 合作，在 S4WT 中

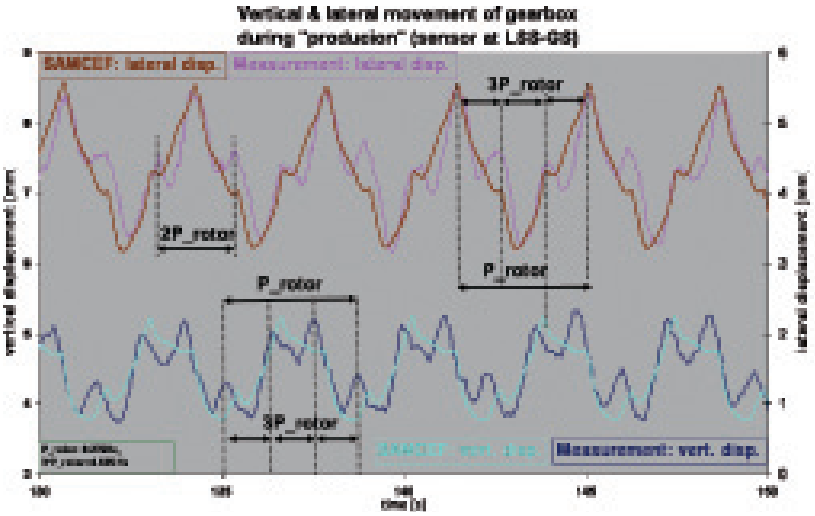


图6 急停仿真数据与试验数据对比（齿轮箱运动）

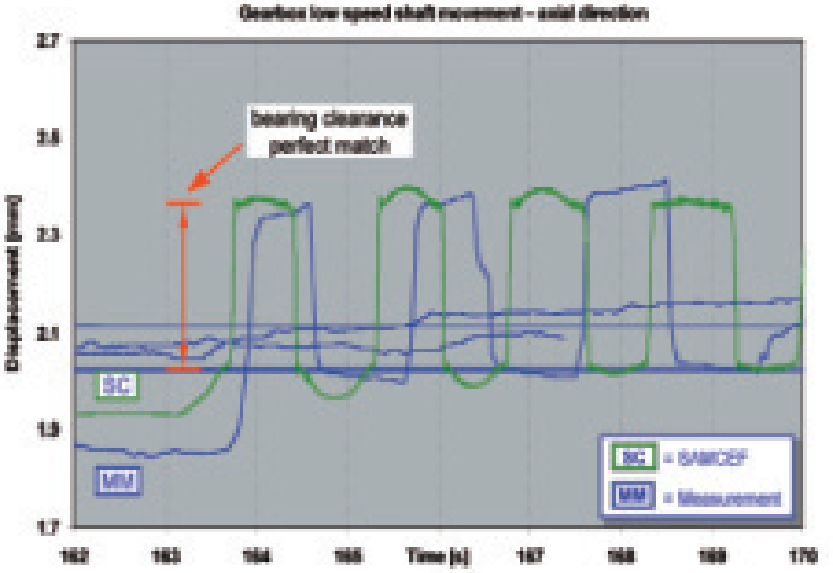


图7 急停仿真数据与试验数据对比（齿轮箱低速轴轴向摆动）

构建 GE1.5MW 风电机组高精度整机模型并进行急停分析，将分析结果与试验结果进行相关性对比，显示了良好的吻合度，充分证明了 S4WT 整机高精度模型在齿轮箱分析方面的优势。

图 6 显示了在扭臂衬套所测的齿轮箱运动，可以看出无论是幅值还是频率上分析结果与试验结果都高度吻合。3p 频率的塔影效应、风剪切效应、主轴和行星齿轮架安装偏差以及单个叶片螺距的不重合产生的 1p 频率激励等，都在齿轮箱的运动中体现出来。仿真与试验结果均显现由于作用于叶片上的不平衡空气动力，主轴承受弯曲扭矩并在 1p 转速下旋转，并最终导致齿轮箱偏离，并在旋转弯矩的作用下产生轨道运动。

图 7 显示一级行星齿轮架太阳齿轮轴的轴向摆动，可以看出数值模拟很好的表现了太阳齿轮轴的轴向摆动。这种轴向运动在行星齿轴向力反向导致其转矩反向时发生，在这种情况下，轴通过轴向轴承间隙从左侧端点移到了右侧端点位置。这种分析有助于设计师找到合适的部件设计方案。

5.2 NREL合作项目

下面是 Samtech 与 NREL（美国可再生能源实验室）合作进行的齿轮箱分析项目，在此项目中采用 S4WT 对齿轮箱进行静力学分析，以考察其载荷分布状况；进行模态分析，以计算齿轮箱特征频率、考察齿轮箱潜在共振情况；分析结果同时与试验结果进行相关性对比。

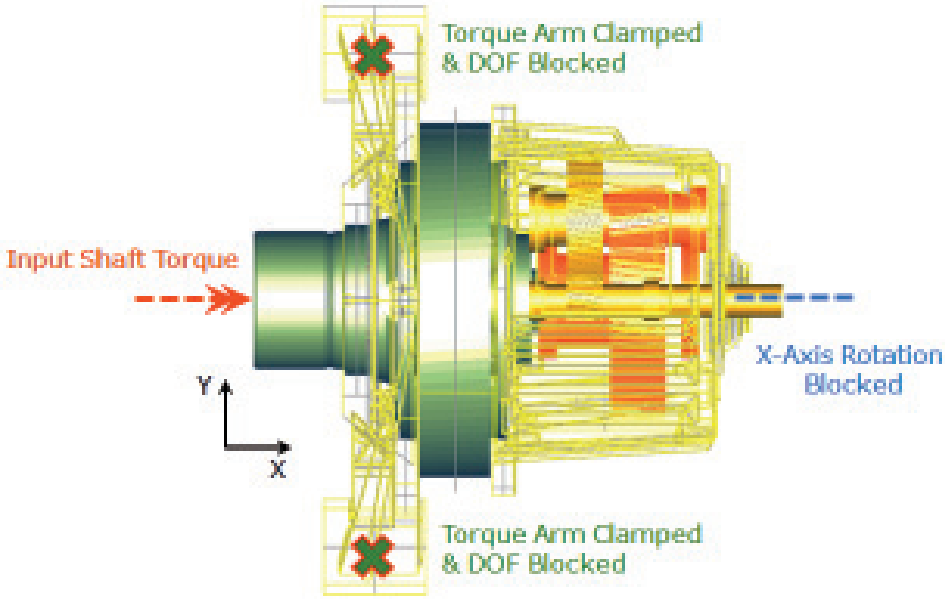


图8　齿轮箱分析工况

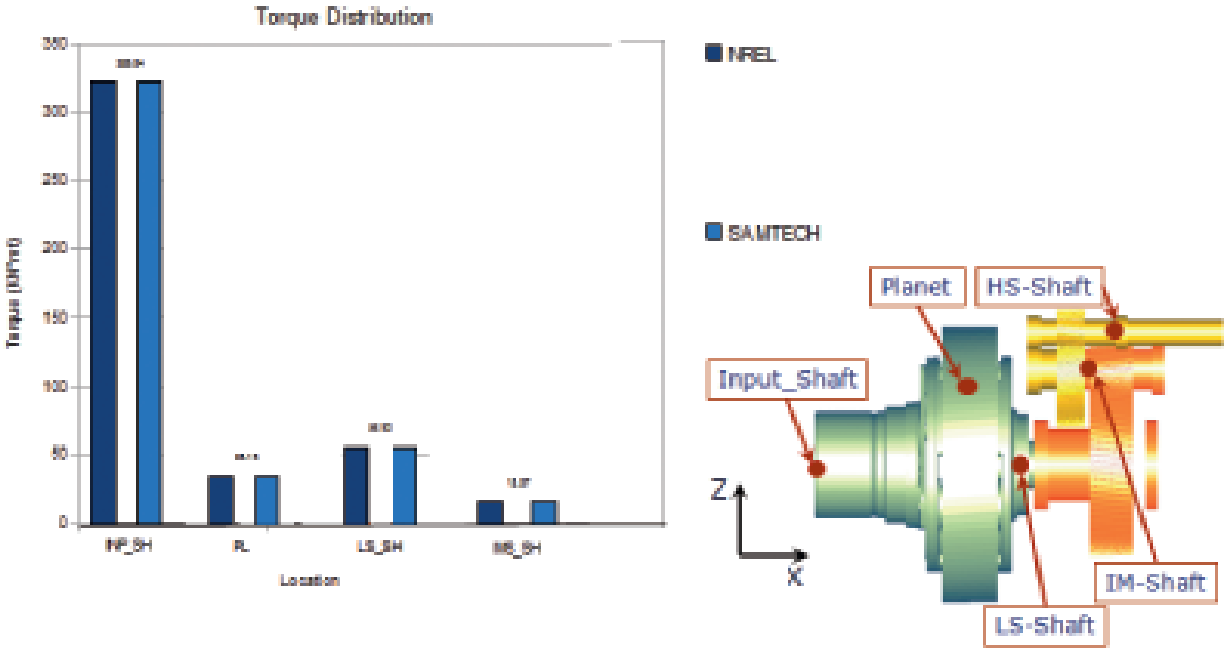


图9　齿轮箱扭矩仿真与试验数据对比

以下是静力学分析齿轮箱扭矩与试验的相关性对比结果，可以看出采用 S4WT 的分析结果与 NREL 试验结果高度一致，同时项目还对比了各齿轮架轮齿受力情况，采用 S4WT 柔性有限元与多体动力学混合方式，可以大大缩短计算时间，同时保证足够的计算精度。

模态分析可以得到齿轮箱特征频率及模态振型，以及齿轮箱各部件在特定频率下的应变能分布，分析齿轮箱潜在的共振情况。

BIJUR DELIMON
INTERNATIONAL

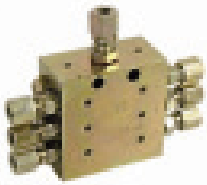
供油精确，状态监控，维护便捷，高效环保

——风机持久运行的保障

130年专注润滑行业的持续创新，10年根植中国市场的不断开拓，使我们成为在风电领域有全套集中润滑解决方案的供应商。

变桨系统集中润滑系统
偏航系统集中润滑系统
主轴集中润滑系统
发电机集中润滑系统
升速齿轮箱润滑站系统

WLP


MVB

集油盒

CXL

CSP

FS

TB-L

DYNAMIS

南京贝奇尔机械有限公司
NANJING BIJUR MACHINERY PRODUCTS,LTD.

地址：南京经济技术开发区（新港）恒通大道9号　邮编：210038
传真：025-85802288 85802299　电话：025-85801188
网址：www.bijurdelimon.cn　服务热线：800-8286000

Parts	Freq [Hz]:	0,66	2,89	3,40	3,56	53,32	61,71	78,12	137,55	159,50	164,48	231,47	239,00	243,56	266,55	271,21	281,68	285,25	298,84	304,25	309,62
	Mode:	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17	#18	#19	#20
Gearbox housing SE		6,55	3,00	0,55	1,22	7,65	59,07	9,71	11,36	11,05	85,19	4,00	25,84	2,24	31,25	25,63	15,01	49,30	33,50	13,31	1,36
Planet Carrier SE		19,53	28,79	10,12	11,28	1,77	14,45	1,97	36,18	1,32	2,83	22,94	2,31	8,87	15,67	8,57	4,05	4,63	7,36	22,34	8,14
ST1 PLC Bearings		28,30	2,29	1,37	3,73	0,04	8,07	1,11	8,63	0,12	0,54	0,89	0,17	0,24	0,55	0,26	0,09	0,05	0,13	0,84	0,17
ST1 Planet Beams		0,98	0,80	1,31	0,08	0,07	0,12	0,01	0,05	0,04	0,04	1,02	0,08	0,17	0,30	0,14	0,06	0,07	0,09	0,71	0,95
ST1 Planet Pins		22,50	9,37	13,31	15,22	1,73	4,37	0,64	23,40	0,97	1,75	33,36	4,50	59,50	8,06	5,17	3,13	2,07	3,76	23,65	64,67
ST1 Planet Bearings		0,00	0,00	37,02	31,01	1,08	2,65	0,19	14,71	0,70	0,98	30,52	2,66	24,85	6,95	4,58	3,78	1,26	3,73	35,47	23,39
ST1 Gears		19,54	64,22	36,36	33,16	0,63	0,17	0,05	0,89	0,17	0,11	2,76	0,20	0,52	1,36	0,85	0,36	0,61	0,94	1,24	0,68
ST1 Sun Shaft		1,07	0,83	0,19	1,69	0,35	0,12	0,01	0,70	0,16	0,03	1,03	0,27	0,80	0,27	0,19	0,08	0,02	0,05	0,32	0,02
ST1-2 Spline Shaft		0,90	0,81	0,11	0,71	0,22	0,38	2,14	0,79	7,67	0,23	0,13	3,99	0,26	1,71	0,27	0,97	1,45	4,35	0,83	0,02
ST2 Hollow Beams & Bearings		1,20	0,84	0,25	1,77	88,21	0,59	0,40	1,60	3,93	4,21	0,58	4,19	0,18	1,28	0,36	0,08	0,23	7,66	0,26	0,05
ST2 Gears		0,00	0,00	0,00	0,05	0,01	0,00	0,13	0,09	4,70	0,01	0,11	3,61	0,19	0,85	0,02	0,66	0,63	1,67	0,00	0,00
ST2-3 IMS Beams & Bearings		0,01	0,00	0,01	0,11	0,18	9,90	60,53	0,17	8,34	1,01	0,21	4,53	0,29	3,00	1,13	4,01	2,20	14,59	0,87	0,01
ST3 Gears		0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,07	5,61	0,00	0,00	1,20	0,12	0,62	0,03	0,07	0,26	0,84	0,00	0,00
ST3 HSS Beams & Bearings		0,01	0,00	0,01	0,11	0,06	0,14	0,03	0,66	65,23	2,48	1,74	46,95	3,16	29,31	52,48	66,15	30,52	20,60	1,21	0,17
Trunion System		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

图10　齿轮箱各部件应变能分布表

6 结论

S4WT 针对双馈式风电机组齿轮箱分析提供一整套独特的建模及分析方案：基于超单元、多体动力学运动副、独特的齿单元和轴承单元构建详细齿轮箱模型，可充分考虑齿轮箱部件的柔性和非线性，达到分析精度和效率的最佳平衡；采用空气动力学、基于有限元的多体动力学和控制全耦合的方法来构建的整机高精度模型，可以充分考虑整机对齿轮箱的影响，从而精确模拟齿轮箱动态行为，计算齿轮箱动态载荷；基于齿轮箱部件进行部件级静力学分析、模态分析、接触分析，以详细分析齿轮箱的受力及模态振动情况。总之，采用 S4WT 进行齿轮箱分析，可以全面掌握齿轮箱的动态特性，减少齿轮箱潜在故障问题，提高双馈式风电齿轮箱设计的可靠性。

为保护您的风机投资，特别是在其超过保修期后，你需要世界上一流的润滑油。
嘉实多 OPTIGEAR SYNTHETIC X 320专为风机研发以提供更持久的保护。

嘉实多是世界公认的润滑油专家。我们的成功归功于 Charles Cheers Wakefield 。是他在1899年建立了专业的润滑油公司–嘉实多，并确立以技术先锋、获胜、热诚与激情、卓越表现为公司的核心价值。直到今天，这些价值仍能代表嘉实多，而且是使我们成功的核心力量。

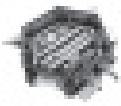
询问详情，请拨嘉实多全国热线: 400 820 4889
网址: www.castrol.com/industrial

欢迎莅临2011北京国际风能大会暨展览会 (CWP)
展厅：E2
展位：EC08

Castrol Industrial
不仅是润滑油，更是流动的科技™

风机电气部件一体化解决方案提供商
满足2011版《风电场接入电力系统技术规定》国家标准
科技创造能源未来 Innovation For Energy

Wind Turbine Converter
风电变流器


Pitch System
变桨系统

Pitch Servo Drive
变桨伺服驱动器

Service
服务

公司地址：中国大连市经济技术开发区双D港双D5街10号　邮编：116600
网址：www.ce-tech.com.cn　电话：+86-411-89018001

Shinergy 尚能

北京国际风能大会暨展览会(CWP2011)　2011年10月19日—21日　地点：北京 - 国际展览中心(新馆)　展位号：W816

行动，在系统故障发生前

雷电在线监测系统**LM-S**

POWERTRAB PWT
雷电电涌保护器

智能产品优化您的维护方案

简化您系统的检修和维护方案

雷电在线监测系统**LM-S**

- 探测雷电闪击
- 评估电涌载荷
- 通过网络接口进行通信

1类电涌保护器**PWT**

- 带有自检保护回路
- 带有遥信触点的多级功能监控

菲尼克斯电气

Tel:025-52121888

www.phoenixcontact.com.cn

PHOENIX CONTACT

INSPIRING INNOVATIONS

SUNGROW 阳光电源

Wind Plus+ 风能变流器

Wind Power Converter

▸全功率风能变流器

规格：850KW 、1.5MW、2MW、2.5MW、3MW

▸双馈风能变流器

规格：1.5MW 、2MW、3MW

- 额定功率时能量转换效率>97%；
- 支持低电压穿越，满足国标及Eon06；
- 独立温控单元，强迫风冷，冷启动加热逻辑，适应较宽温度范围；
- 丰富的对外接口，多种通讯方案；
- 热流仿真设计，确保系统热稳定；
- 三维模块化设计，易于安装维护；
- 长期风场运行考验，适应严酷的工作环境；
- 采用德国品牌机柜，和最新一代智能功率模块，高可靠、长寿命，尺寸兼容性好；
- 国内率先通过CE认证；
- 风能变流器国家标准制定单位。

……为可再生能源发电提供完美接入方案

致力于清洁高效 Green and Effective

阳光电源股份有限公司 SUNGROW POWER SUPPLY CO.,LTD.

ISO9001
ISO14001
OHSAS18001

地址：安徽省合肥市高新区天源路2号 (230088)　传真：0551-5327873
E-mail: windysale@sungrowpower.com　网址：www.sungrowpower.com

销售热线
0551- 532 7801 /7828