

# 风能

WIND ENERGY

传播专业知识 启迪成长智慧

中国可再生能源学会风能专业委员会

《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊 中国知网收录期刊

国际标准刊号: ISSN 1674-9219  
国内统一刊号: CN11-5942/TK

07



2019年 总第113期 冀迪出版社

## P12. 专栏

电力市场如何体现消费者永远是对的

## P42. 调研

2018年欧洲风电行业投融资情况概览

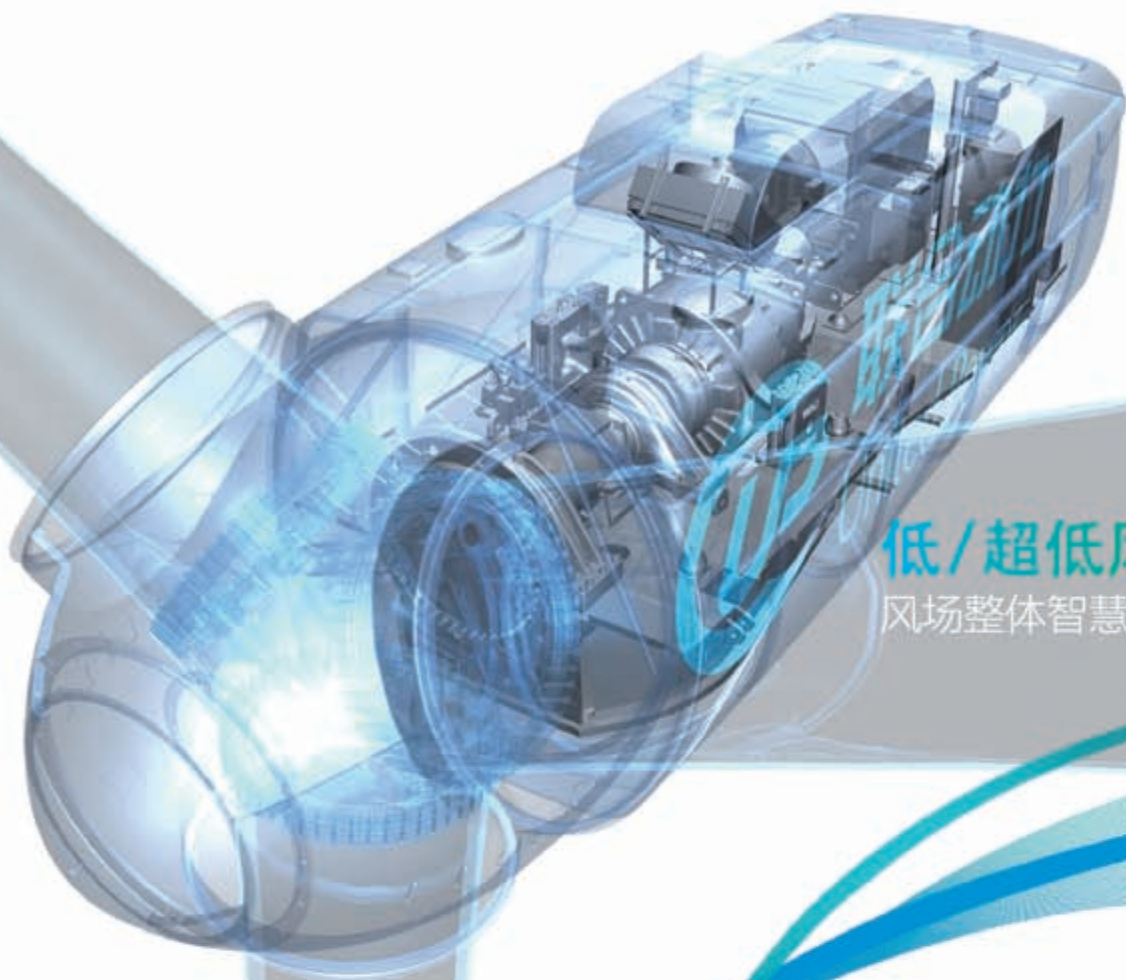
## 明阳智能 预见海上风电 P30

如同多数产业那样,开拓海上风电业务,眼光长远与战略坚定,二者缺一不可。



ISSN 1674-9219

人民币 25 元



## 低/超低风速 风场整体智慧解决方案



联合动力官方微信公众账号



联合动力官方微博

### UP2000-130

全球单位千瓦扫风面积超大的2MW机型，双馈、双轴承两点支撑技术路线，更高效、更高可靠性

### UP3000-146

全球单位千瓦扫风面积超大的3MW机型，在年平均风速5m/s的风电场，年等效可利用小时可以达到2000小时以上

高发电量技术、柔塔技术、电网友好，超强的电压适用能力、频率适用能力和电网不平衡适用能力

### UP3000-136

高发电量技术、先进的智能控制策略，外部条件的变化进行自寻优调整，确保机组始终运行在最佳效率点

### 超轻柔塔技术

显著提升发电量和提高投资收益，新低风速利器

【 传承高铁荣耀  
和聚风能智慧

热烈庆祝中车株洲所成立60周年



中车株洲所 1959-2019  
60<sup>th</sup> Anniversary of CRRC Zhuzhou Institute

辉煌六十年  
奋进新时代

中国中车  
CRRC

中车株洲电力机车研究所有限公司  
CRRC ZHUZHOU INSTITUTE CO., LTD.

中国中车  
CRRC

# SSB变桨系统 经验助您成功

拥有27年风电领域的经验，全球范围内有超过32000\*台风机、  
中国累计超过7000\*台风机上安装了SSB的变桨控制系统

- 在全球有包括100余位开发人员（其中在德国50余名，中国50余名）在内近600名员工
- 从未有一台风机因为SSB的变桨系统而倒塌
- 2013 SLIP 超长寿命电池与集成变桨系统 --Super Long Battery Life & Integrated Pitch
- 2014 BPMM风电变桨系统电池组健康状况监测模块开始应用于风场
- 2015
- 在中国开始大范围安装大兆瓦海上风机变桨控制系统
- 在北京国际风能展上正式推出第二代BPMM 比第一代更加智能 数据监控更加便捷
- 成立了风电后市场专业业务单元—配备专业的研发、生产和技术改造团队。为客户提供定制化的后市场产品、技术改造方案及服务
- 2017 桨叶风模型测量系统Blade Vision正式投放市场；全新研发的集成式变桨系统EPD开始大批量安装
- 2018  
18年海上风机变桨系统安全运行经验  
最大兆瓦级风机双驱动方案安全运行经验



## 埃斯倍风电科技（青岛）有限公司

地址：中国青岛市崂山区株洲路91号 邮编：266101 客服热线：400 622 1136  
电话：+86 532 8870 2788 传真：+86 532 8870 5788  
北京办事处：北京市朝阳区雅宝路10号凯威大厦15层 邮编：100020  
电话：+86 10 8563 1122  
上海办事处：上海宜山路1009号创新大楼2202室 邮编：200233  
电话：+86 21 3418 3888



## LEROY-SOMER

### 异步和永磁低压电机，适用于变桨，偏航和冷却系统应用

- 全球服务
- 设计灵活性
- 结构紧凑和可靠的解决方案
- 0.37 – 55 kW
- 防护等级可达IP65
- 200-400V/50Hz



## 利莱森玛电机科技(福州)有限公司

上海办事处：徐汇区宜山路1009号创新大楼2202室 | 200233 | 上海 | 中国  
电话：+86 (21)3418 3888



# 绿色清洁能源的倡导者

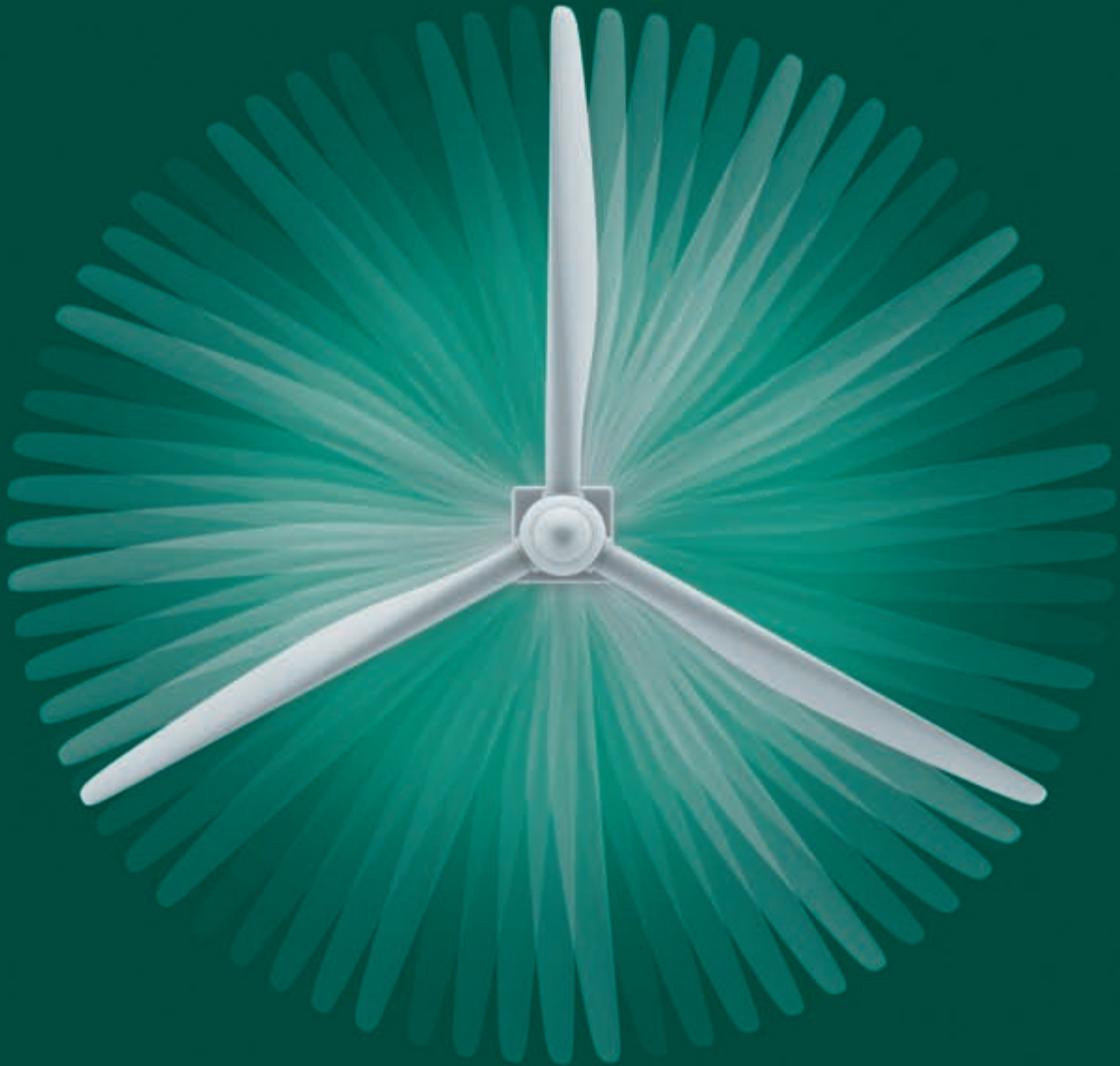
截止至2017年12月

湘电风能累积安装运行风机超过4500台套

年均发电量超200亿度

年均减少二氧化碳排放2500万吨





**Eco-MEGA**  
**the coating solution**

麦加让生活更环保

Tel: +86-21-59100888 Fax: +86-21-59150001 Mail: zhanghuayong@megacoatings.com

[www.megacoatings.com](http://www.megacoatings.com)

“技”源于“制造”，是NSK人百年制作经验和技能的累积；  
“技”升华于“智造”，NSK人挥洒才智，充分运营NSK特有的核心技术和工艺，是科技向产品的转化。  
每一个NSK产品都是“技”的体现和结晶，此为NSK的“技”之所在。



保障风力发电机组稳定可靠运行，将风能转化为电能，年复一年风雨无阻


► 无外圈轴承 - 风力发电增速机用

齿轮内径面直接作为轴承的滚道使用，从而省略了外圈的设计。该设计能够彻底解决外圈打滑的问题，同时通过轴承特殊配列的设定，还可实现更高的承载能力。提高该部位的运转可靠性。



NSK微信公众号





# 让美好能源， 走进生活

Bring beautiful energy  
closer to you





DRIVING OUR RENEWABLE FUTURE

创 · 领未来能源



[www.goldwind.com.cn](http://www.goldwind.com.cn)

# 平稳有序， 2019年上半年风电保持高质量发展

文 | 秦海岩

2019年上半年，我国风电开发保持“稳中有进”的态势。产业规模稳步扩大，技术水平持续进步，分散式风电与海上风电开发有效拓宽了风电的利用空间，弃风状况继续好转，风电的市场竞争力进一步增强。

产业全面平稳发展。1-6月，全国风电新增并网容量为909万千瓦，累计并网容量达到1.93亿千瓦；全国风电发电量为2145亿千瓦时，同比增长11.5%。预计2019年全年风电新增装机规模与上一年基本持平。从“十二五”到“十三五”，风电年新增规模都保持在2000万千瓦左右。市场规模平稳发展是新兴产业持续健康发展的基石，忽高忽低是大忌，可以说，中国风电成绩的取得、技术的进步，最大的基础和推动力就是平稳的市场规模。此外，产业结构调整成效显著。在2019年上半年新增并网容量中，中东南部占58.7%，“三北”地区仅占41.3%。在累计装机方面，中东南部占35.2%，同比提高近3%。

技术研发稳中求进。一是在大容量机组研发，长叶片、高塔架应用等方面引领全球风电发展。目前，国内已经推出3兆瓦系列陆上机型和8兆瓦系列海上机型；国内制造的最长叶片达到90米，风轮直径则在过去十年增长了一倍以上；国内最高轮毂高度超过了150米，160米高的机组即将进入市场。二是新技术应用不断涌现。以激光雷达为代表的新型传感技术在主流新机型研发中的广泛应用，可以减少阵风冲击，优化机组发电效率；叶片涡流发生器、叶尖小翼等增强气动技术的应用，能够显著提高发电性能；高塔架（柔塔和混塔）技术的应用，大幅拓宽机组在低风速地区的应用前景；集中监控、故障预测和寿命分析技术使得风电整体管理更加智能高效。

新增补贴稳定下降。依托技术创新，我国风电成本稳步下降，所需补贴强度大幅降低。目前，在一些资源和开发条件较好的地区，如果不存在弃风限电，陆上风电已经不需要补贴。近两年，国家逐步调整电价，并加快核准风电平价上网项目，2019年第一批风电平价上网项目的总装机超过450万千瓦，有望进一步推动补贴需求快速下降。到2021年，我国陆上风电将全面平价，市场竞争力显著提升。同时，海上风电所需的新增补贴规模也保持在较低水平，并且随着竞争配置政策的实施，补贴需求会逐步缩小，有望在2025年左右实现平价。

海上风电稳妥推进。2019年1-6月，我国海上风电新增并网容量为40万千瓦，预计可以实现到2020年累计并网容量达到500万千瓦的规划目标。与此同时，大功率风电机组已成为海上风电未来的发展方向，目前国内发布的单机容量最大的海上风电机组功率为8兆瓦，并将很快进入10兆瓦时代。运输、吊装、运维设备和船舶进一步专业化，提高了建设效率，相应降低成本。

分散式风电稳中突破。2019年上半年，湖北、天津、黑龙江、宁夏、内蒙古等地陆续公布各自的分散式风电项目开发建设方案，明确了开发原则、建设标准以及规划目标等。项目开发有序推进，多地都有新项目投产，已并网项目运行表现抢眼，在提高风能利用效率、降低社会用能成本等方面的价值显现。为了进一步加快分散式风电发展，业界还需要做好以下工作：加大简化管理流程力度；完善技术标准体系；优化电网接入程序；建立更广泛的利益共同体，调动更多利益主体的积极性。

弃风现象稳步缓解。2019年1-6月，全国弃风电量为105亿千瓦时，同比减少77亿千瓦时；平均弃风率为4.7%，同比下降4个百分点，实现弃风电量和弃风率的“双降”。尤其是内蒙古、吉林、甘肃、新疆四省区，弃风率同比显著下降。

上述成果的取得，离不开各方的共同努力。首先，得益于政策体系的与时俱进。在已有政策的基础上，进入2019年，《关于建立健全可再生能源电力消纳保障机制的通知》下发，旨在通过对各省级行政区域设定可再生能源电力消纳责任权重，建立健全可再生能源电力消纳保障机制。《关于积极推进风电、光伏发电无补贴平价上网有关工作的通知》《关于完善风电上网电价政策的通知》充分考虑了技术成本下降趋势、项目的合理收益水平，科学制定补贴的退坡节奏和幅度，为实现2021年陆上风电全面进入平价时代指明路径。其次，是企业的努力创新。开发企业调整开发与运维管理方式，推动各个环节朝着更加智能化和专业化的方向发展，并以全生命周期为视角不断降低度电成本。整机企业则以创新为抓手，以数字化技术为切入点，持续提高机组的发电效率和可靠性，提供定制化的设备产品和综合服务。再次，是全体风能人的艰苦奋斗。作为新兴产业，风电发展势必面临诸多压力与障碍，而风能人怀着对绿色未来的美好憧憬和坚定信念，一路披荆斩棘，实现一次次的突破和跨越。

目前，我国风电发展进入到迈向平价上网的关键过渡期。业界应当继续稳扎稳打，围绕提质增效，做好技术与管理创新，推动风电产业高质量发展，使之早日成为支撑社会可持续发展的主体能源。■

**30** 封面故事 Cover Story

## 明阳智能 预见海上风电

如同多数产业那样，开拓海上风电业务，眼光长远与战略坚定，二者缺一不可。



**12** 专栏 Column

### 电力市场如何体现消费者永远是对的

在电力批发市场中，“消费者永远是对的”理念得到非常彻底的贯彻，并且不存在模糊性问题，这根源于电力市场的产品对消费者高度均一的特点。

**26** 对话 Dialogue

### 中际联合马东升： 唯有专注才够专业

中际联合为全球超过10万台风电机组提供服务，产品应用于40多个国家和地区。“这一切都源于我们的专注。”中际联合董事、副总裁马东升道破其中的原委。

**52** 国际 International

### 堪萨斯州风电发展 启示

此前，风电在堪萨斯州取得了一定发展，然而近期却突遭当地部分居民的抵制，反对者和支持者各执一词，这或许能为其他地区风电发展提供参考。



## 历史回眸

2012年7月，国务院印发《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划的通知》，提出加快发展技术成熟、市场竞争力强的核电、风电、太阳能光伏和热利用等新能源，到2015年，新能源占能源消费总量的比例提高到4.5%，减少二氧化碳年排放量4亿吨以上。通知要求，加强风电装备研发，增强大型风电机组整机和控制系统设计能力，提高发电机、齿轮箱、叶片

以及轴承、变流器等关键零部件开发能力；在风电运行控制、大规模并网、储能技术方面取得重大突破；建设东北、西北、华北北部和沿海地区的八大千万千瓦级风电基地；在内陆山地、河谷、湖泊等风能资源相对丰富的地区，发挥距离电力负荷中心近、电网接入条件好的优势，因地制宜开发中小型风电项目；积极推动海上风电项目建设。



# 40余年的坚守 只为绿色能源点亮生活

绿色创想，驱动未来

矢志不渝，永在追风路上

风电拓荒者

深谙中国风电资源，始终坚持创新驱动



浙江运达风电股份有限公司  
地址：浙江省杭州市文二路391号  
西湖国际科技大厦A座18F  
电话：0571-87397666  
网址：[www.chinawindey.com](http://www.chinawindey.com)





《风能》杂志在线阅读网站  
www.cwea.org.cn

## 卷首语/ From The Editor

- 01 平稳有序，2019年上半年风电保持高质量发展 / 秦海岩

## 08 风向/ Direction

### 专栏/ Column

- 12 电力市场如何体现消费者永远是对的 / 张树伟

### 书评/ Review

- 16 为能源转型鼓与呼  
——一位编辑的新能源图书出版手记 / 王斌

### 忆昔风/ Memory

- 20 绿色能源走进“革命老区”  
——回顾龙源贵州威宁风电开发历程 / 谢长军

### 现场/ Presence

- 24 海上巨无霸的守望者  
——海上风电钢结构防腐蚀纪实 / 黄佳欢

### 对话/ Dialogue

- 26 中际联合马东升：唯有专注才够专业

### 封面故事/ Cover Story

- 30 明阳智能预见海上风电 / 孙一琳

### 公司/ Company

- 38 量云：智慧让风电场“能动”起来 / 孙一琳

### 调研/ Survey

- 42 2018年欧洲风电行业投融资情况概览 / 夏云峰

### 海上风电/ Offshore Wind Power

- 48 2018年全球海上风电安全事故显著减少 / 张雪伟

### 国际/ International

- 52 堪萨斯州风电发展启示 / 孙一琳

## 产业/ Industry

- 56 海上风电工程质量验收项目划分探讨 / 申岳进，王忠锋

## 风电场/ Wind Farm

- 62 再分析资料在风速数据插补延长中的应用方法研究 / 高洁，胡己坤，刘雨佳，袁红亮，刘玮

## 技术/ Technology

- 70 双馈风电机组转速控制与失控分析 / 唐中伟，王明军  
74 柔塔二阶涡激振动阻尼值分析 / 李鹏，符鹏程，杨洪源，张宇  
78 定桨距风电机组叶根加长改造评估 / 杨劲，谢伟，张伟，王寿福，杨松圣  
84 三桩基础海上风电机组结构波浪载荷实验研究 / 施勇，姜贞强，任年鑫，王滨

### 广告索引

封二	联合动力
扉页 1	中国中车
扉页 2	埃斯倍
扉页 3	湘电风能
扉页 4	麦加涂料
扉页 5	恩斯克
扉页 6	赛米控
扉页 7	远景能源
卷首语对页	金风科技
目录对页 1	运达风电
目录对页 2	中国海装
版权对页	南高齿
P15	华仪风能
P29	岳能科技
P41	华电天仁
P51	奥特科技
P69	CWP Offshore
P83	CWP2019
后彩一	《风能》杂志
封三	重齿
封底	罗特艾德

CSIC 中国海装

CATCH THE WIND  
EQUIP THE WORLD

海纳百川  
装备天下

CSIC 中国海装

## ABOUT

中国船舶重工集团海装风电股份有限公司(简称中国海装)成立于2004年,隶属于中国船舶重工集团有限公司(CSIC,以下简称中船重工),是中船重工“四大板块、十大产业”的支柱产业之一,集团一类企业,在风电整机制造企业中排名全球前列。

### “国家海上风力发电工程技术研究中心”

作为“国家海上风力发电工程技术研究中心”依托单位,中国海装持续促进海上风电发展,2017年,中国海装成为5MW及以上级别海上风电全球前列整机供应商。

### 风电场开发全生命周期一站式整体解决方案

产品研发、整机装备制造、工程技术服务、风场资源开发、EPC总包及全流程金融服务。



中国可再生能源学会风能专业委员会  
2019年第07期

	顾问	Consultant					
石定寰	史立山	杜祥瑞	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：夏丽华	President: Xia Lihua					
	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 于贵勇	Associate Editor-in-Chief: Wang Zhongying Yu Guiyong					
	编辑部主任：秦海岩（兼）	Editorial Director: Qin Haiyan					
	编辑部副主任：薛辰 夏云峰	Deputy Editorial Director: Xue Chen Xia Yunfeng					
	主笔：王芳	Editor in Chief: Wang Fang					
	编辑：时春景 张雪伟 孙一琳	Editor: Shi Chunjing Zhang Xuewei Sun Yilin					
	本期责编：张雪伟	Duty Editor: Zhang Xuewei					
	视觉设计：荆莹 刘湛	Visual design: Jing Ying Liu Zhan					
	广告部经理：张烨	Advertising Manager: Zhang Ye					
	发行部经理：张烨	Distribution Manager: Zhang Ye					

编辑制作：《风能》杂志社	Produced by: Wind Energy Magazine
地址：北京市东城区和平里北街6号	Address: 3 Floors, Building 26, Far East Cultural Park
远东文化园26楼3层	No. 6 Hepingli North Street Dongcheng District, Beijing, PRC
邮编：100013	Zip Code: 100013
电话：010-59796665-3615（编辑部）	Tel: 010-59796665-3615（Editorial）
010-59796665-3501（广告部）	010-59796665-3501（Advertising）
010-59796665-3501（发行部）	010-59796665-3501（Distribution）
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  
广告发布登记号：京海工商广登字20170178号  
印刷：北京久佳印刷有限责任公司  
出版日期：每月6日出版  
发行范围：全国发行  
国内定价：人民币25元

#### 声明

- ◆本刊图文版权所有，如需转载，请与本刊编辑部联系。
- ◆向本刊投稿（图片）文责自负，由作者原稿产生的版权或其他法律责任，本刊概不承担连带责任。
- ◆为适应我国信息化建设，扩大本刊及作者知识信息交流渠道，本刊已被《中文科技期刊数据库》（维普网）、龙源期刊网、《中国核心期刊（遴选）数据库》、中国知网等多个数据库收录，并在相关网站提供在线阅读和下载服务。如作者不同意文章被收录或数字出版，请在来稿时向本刊书面声明，本刊将做适当处理。



NGC  
GearSight



# 南高齿 齿轮箱与动力传动系统解决方案专家

南高齿风电信息化齿轮箱全生命周期管理系统包含多个智能信息化可扩展模块，在推动互联网技术与用户需求对接的基础上，实现大数据采集应用以及产品的信息化，为客户带来优化生产水平、管理效率、安全性能和盈利水平的一体化智能解决方案。





### 上海启动全国首个竞争配置海上风电项目

6月21日，上海市发展改革委公布了2019年海上风电建设方案，正式启动奉贤海上风电项目开发工作。上海市制订了《奉贤海上风电项目竞争配置工作方案》，该市电力公司也出具了项目并网消纳的有关意见。项目拟于近期正式开展竞争配置工作。

奉贤是上海市继东海大桥和临港之外规划的第三个海上风电基地，也是上海能源发展“十三五”规划重点工程，已列入上海市海洋功能区划。项目位于杭州湾北

部海域，总规划装机容量40万千瓦。场址中心距岸线约12千米，自西向东分为1—4号四块场址。此次竞争配置项目为东部1号、2号场址，合计开发容量20万千瓦。

前期已委托上海投资咨询公司、上海勘测设计研究院等单位完成了测风和预可研工作。根据测风结果，场址区代表年95m高度年平均风速约为7.2m/s，年平均风功率密度约为349.16W/m<sup>2</sup>。风功率密度等级为3级。

参与竞标的业主须拥有

该项目同等容量（20万千瓦）及以上的海上风电项目建设运营业绩（联合体内企业建设运营业绩可累计）。

参与优选的投资主体申报上网电价不得高于国家价格主管部门公布的海上风电指导价。项目的最终上网电价原则上按照项目单位申报电价执行，如国家对竞争配置项目电价有最新要求，按最新要求实施调整。国家海上风电价格政策变动风险和地方奖励政策调整风险由项目单位自行承担。

### 北京发布2022年冬奥会和冬残奥会低碳管理工作方案

6月23日，北京冬奥组委举办“奔向2022、绿色起跑、全民开动”2019国际奥林匹克日冬奥主题活动暨公益跑活动。在活动现场，北京冬奥组委发布了《北京2022年冬奥会和冬残奥会低碳管理工作方案》。

北京冬奥会和冬残奥会将使用低碳能源，建设张北柔性直流电网等低碳能源示范项目，建立适用于北京冬奥会的跨区域绿电交易机制，综合实现100%可再生能源满足场馆常规电力消费需求。

打造低碳场馆，建设超低能耗场馆示范工程，努力实现所有场馆达到低碳节能节水标准。

建设低碳交通体系，利用低碳工程技术开展交通设施建设，应用智能交通系统，大力发展绿色低碳出行模式，冬奥会举办期间赛区内交通服务保障基本实现清洁能源车辆保障。

推动建立北京冬奥会低碳管理核算标准，推动林业固碳工程，鼓励涉奥企业捐赠排放配额，推广碳普惠制项目，吸引社会各界多元化参加低碳冬奥会行动。

### 第二季度新能源电力评估分析报告发布

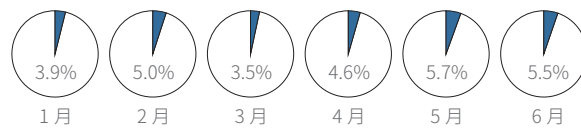
近日，全国新能源消纳监测预警中心发布第二季度新能源电力评估分析报告。报告显示，新能源弃电量和弃电率实现“双降”，消纳形势整体向好。

1—6月，全国弃风电量104.6亿千瓦时，同比大幅减少77.2亿千瓦时，弃风率4.7%，同比下降4个百分点，消纳情况持续好转。第二季度，受风能资源

条件影响，全国风电平均利用小时数比第一季度提高21小时，比去年同期提高27小时。

此外，第三季度，预计全社会用电量仍将保持平稳增长势头，同时随着可再

生能源电力消纳权重指标正式下发，北方部分地区大风期结束，全国新能源消纳整体有望持续保持良好形势。河北、青海、湖南存在新能源弃电加重的潜在风险，需要重点关注。



1—6月全国弃风率变化情况



## 国家全面放开经营性电力用户发用电计划

6月22日，国家发展改革委发布了《关于全面放开经营性电力用户发用电计划的通知》。

《通知》一方面明确全面放开经营性电力用户发用电计划的范围、原则和保障措施。除城乡居民生活用电、公共服务及管理组织、农林牧渔等行业电力用户以及电力生产所必需的厂用电和线损之外，其他大工业和一般工商业电力用户原则上均属于经营性电力用户范畴，均应

全面放开。另一方面，继续完善优先发电优先购电制度。要求加强分类施策，统筹做好优先发电优先购电计划规范管理工作。

支持中小用户参与市场化交易。经营性电力用户全面放开参与市场化交易主要形式可以包括直接参与、由售电公司代理参与、其他各地根据实际情况研究明确的市场化方式等，支持中小用户由售电公司代理参加市场化交易。

要求健全全面放开经

营性发用电计划后的价格形成机制。鼓励电力用户和发电企业自主协商签订合同时，以灵活可浮动的形式确定具体价格，价格浮动方式由双方事先约定。

文件提出做好规划内清洁能源的发电保障工作。重点考虑核电、水电、风电、太阳能发电等清洁能源的保障性收购；积极推进风电、光伏发电无补贴平价上网工作，将平价上网和低价上网项目全部电量纳入优先发电计划予以保障。

## 四川落实风电上网电价政策

6月24日，《四川省发展和改革委员会关于落实风电上网电价政策的通知》发布，自2019年7月1日起执行。《通知》规定将陆上风电标杆上网电价改为指导价。新核准的集中式陆上风电项目上网电价全部通过竞争方式确定，不得高于项目所在资源区指导价。

四川为陆上风电Ⅳ类

资源区，2019年Ⅳ类资源区符合规划、纳入财政补贴年度规模管理的新核准陆上风电指导价调整为每千瓦时0.52元（含税、下同）；2020年指导价调整为每千瓦时0.47元。

《通知》明确参与分布式市场化交易的分散式风电上网电价由发电企业与电力用户直接协商形成，不享受国家补贴。不参与

分布式市场化交易的分散式风电项目，执行指导价。风电上网电价在当地燃煤机组标杆上网电价（含脱硫、脱硝、除尘电价）以内的部分，由电网企业按照国家及四川电力市场化及电价形成机制改革有关规定标准结算安排；高出燃煤机组标杆上网电价部分，由国家可再生能源发展基金予以补贴。

## 粤港澳大湾区发布三年建设行动计划

7月5日，《广东省推进粤港澳大湾区建设三年行动计划（2018—2020年）》正式发布。

《计划》提出优化大湾区能源结构。加快天然气和可再生能源利用，有序开发风能资源，因地制宜发展太阳能光伏发电、生物质能，安全高效发展核电，大力推进煤炭清洁高效利用或减量替代，严格控制煤炭消费总量，新建耗煤项目实施等量或减量替代。推进广州、深圳、珠海等建设世界一流配电网。加快建设珠海桂山、金湾，惠州惠东港口等海上风电场。研究完善大湾区内地对香港、澳门输电网络、供气管道，确保港澳能源供应安全和稳定。

《计划》要求培育壮大战略性新兴产业。重点支持新一代信息技术、高端装备制造、绿色低碳、生物医药、数字经济、新材料、海洋经济等战略性新兴产业发展。围绕海洋工程装备、电子专用设备、高技术服务业、高性能集成电路等重点领域及其关键环节，实施一批战略性新兴产业重大工程。



## GE将在揭阳设立海上风电机组总装基地

7月12日，广东揭阳市政府、广州开发区管委会分别与GE签署海上风电项目投资协议。

根据协议，GE将在揭阳市临港产业园设立海上风电机组总装基地，并在广州开发区投资建设GE海上风电运营和开发中心。前者将生产GE可再生能源集团所研发的海上风电机组Haliade-X 12MW，计划在今年年底动工、2021年建成并于下半年开始组装生产；后者则为总装基地提供运营、技术和服

务支持。GE相关负责人表示，广东是该公司在中国南部以及粤港澳大湾区的战略发展基地，此次合作是GE推进“全面本土化、全球合作伙伴、全速数字化”三大中国发展战略的里程碑。总装基地及运营和开发中心将集先进制造、运营开发、服务+数字应用以及配套供应体系于一体，形成拥有完整海上风电产业链的生态系统，更高效地满足亚洲的市场需求，并推动海上风电这一清洁能源在中国的发展。



## 龙源完成海上风电场无人机叶片智能巡检试飞

近日，龙源电力中能科技开发公司顺利完成福建一座海上风电场无人机叶片智能巡检试飞工作，无人机叶片巡检技术开始进入海上风电场运维。

该巡检技术利用无人机的高机动性，结合计算机视觉和激光雷达技术，实现了叶片表面巡检的自动化和全面覆盖。使用无人机飞行平台作为载体，搭载高分辨率可见光相机，巡检作业人员将无人机部署到船舶或塔底平台起

飞。点位后，通过“一键巡检”功能即可进行风电机组叶片表面状态的图像采集，解决了海上风电机组叶片巡检难题。

该项技术能填补海上运维中叶片巡检的短板。无人机起飞后，完成63.5米长的整支叶片表面巡检，仅需10分钟，对比传统作业，工作效率将有数量级的提升。无人机巡检所实现的巡检数字化，以及叶片运维数据累积，也是实现海上风电场运维数字化的基础。

## 数据

297.6 万千瓦

《“一带一路”后中国企业风电、光伏海外股权投资趋势分析》报告显示，2013年“一带一路”倡议提出以来，中国企业在沿线国家的可再生能源投资达到近1260万千瓦，其中风电项目297.6万千瓦。

35.32 亿千瓦时

湖北省发展改革委发布的全省电力运行数据显示，上半年，该省累计发电1350.71亿千瓦时，不含三峡，累计发电944.61亿千瓦时，增长8.61%，其中，风电35.32亿千瓦时，太阳能发电24.69亿千瓦时。

800 万千瓦

国网江苏电力表示，截至5月底，江苏电网已基本完成省内8000万千瓦燃煤机组深度调峰试验工作。试验表明，机组调峰下限可下调至40%~35%，意味着江苏电网可再消纳至少800万千瓦清洁能源。



## 国际热点



## 英国

Vattenfall 公司和英国政府及英国国家海上可再生能源推进中心共同启动一项 150 万英镑（约合人民币 1274.63 万元）的技术支持计划。新计划为英国创新者提供了在欧洲海上风电部署中心进行测试和展示的机会。

## 日本

日本风能协会发布的《日本风电市场白皮书》显示，2018 年日本没有新的海上风电项目投入使用。该协会计划到 2030 年将风电总装机容量增加到 3700 万千瓦，包括陆上风电 2700 万千瓦，海上风电 1000 万千瓦，其中漂浮式风电 400 万千瓦。



## 美国

日前，纽约州 170 万千瓦海上风电项目由 Equinor 和 Sunrise Wind 两家公司中标。这次竞标是纽约州在 2035 年完成 900 万千瓦海上风电规划的第一步，也是在 2030 年前实现 70% 可再生能源目标的重要一步。

## 白俄罗斯

白通社 7 月 16 日消息，以出售建设风电场的投资前资产电子交易为基础，土耳其公司将建设白俄罗斯最大的风电场。该风电场位于维捷布斯克州利奥兹诺地区，建设总装机容量为 2.5 万千瓦，预计年发电量约为 7200 万千瓦时。

## 200 万千瓦

据悉，科威特合作项目管理局将在 2019—2020 财年启动 Shagaya 第三期 200 万千瓦项目的招标，其中包括光伏、光热及风电项目。Shagaya 第一期工程已投入使用，第二期工程将在 2021 年发电。

## 215 万千瓦

此前，埃及政府设立了到 2022 年完成清洁能源消纳占比达 20% 的目标。由于该国东海岸具备较好的风能资源条件，目前，来自德国、中国、沙特阿拉伯和美国的部分开发企业提议在该国开发建设约 215 万千瓦的风电项目。

## 9.09 亿美元

印度政府正计划批准约 9.09 亿美元的补贴资金，以支持该国首个海上风电项目开发。该项目预计装机 100 万千瓦。配电公司同意以 3.50 卢比 / 千瓦时（约合人民币 0.348 元 / 千瓦时）的价格购买发电厂生产的电力。



# 电力市场如何体现消费者永远是对的

文 | 本刊特约评论员 张树伟



张树伟  
卓尔德环境研究  
(北京) 中心主任  
兼德国能源转型  
智库高级顾问

## 引子

“顾客是上帝，顾客总是对的 (The customer is always right)”是服务业与营销领域一句脍炙人口的名言。它的版权似乎应该归于哈里·戈登·塞尔弗里奇 (Harry Gordon Selfridge)。他创建了英国塞尔弗里奇百货，将零售业当时所奉行的顾客自慎 (caveat emptor)，即商品一旦出售概不负责的原则，改为无条件退货，并改善百货商店的购物步骤，以使购物环境更加友好，甚至设置了休息区等<sup>1</sup>。

“顾客总是对的”思维是一种

很有吸引力的营销思路。当然，对于这一理念，很多人与企业并不赞同。因为显然消费者并不是完美的，企业的市场份额与有限的资源（人力、时间、精力）也不允许它服务所有的消费者。放弃部分消费者，对消费者进行甄选，对消费者进行更好的价格歧视更是新的营销与数字化时代的热门课题。

相较于这种争议，电力批发市场中贯彻“消费者永远是对的”理念，却是非常彻底的，这根源于电力市场的产品对消费者高度均一的特点。如3期专栏提到的，电力市场可以说是最早的人造人工智能市场，它的设计更多的是基于算法，而不（仅）是人在不同情境下的自由选择与意志。从算法上，“消费者永远是对的”理念得到了非常充分的贯彻。并且，这其中不存在人类社会广泛存在的模糊性问题，比如有些商家“为消费者服务”的说法缺乏界定，口惠而实不至。市场的价格算法不存在任何模糊的空间。

本期专栏中，我们结合这一理念，以及我国仍旧存在的“调度是系统的指挥官，调度永远是对的”进行讨论。

## 背景

电力市场往往是分阶段的，这来源于系统中存在的各种不确定性与风险，系统平衡必须有提前量。美国竞争性市场往往是“日前（自愿性质）—实时”两阶段市场；欧洲主要同步市场往往是“日前—日内—平衡市场”连续性市场。定价方式基本是确定性 (deterministic) 规划定价 (图1，价格生成示意图，需求曲线与供应曲

1: <http://news.163.com/special/reviews/customer0223.html>

线的交点)。理论上, 消费者的真实需求 (demand) 与各种机组 (特别是具有不确定性的风、光发电设备) 实际生产 (supply) 对应的系统价格才是有效率的。但是这个真实需求是无法准确预知的, 导致了各个市场价格的不完美与差异。如何考虑这种不确定性来确定系统出清价格, 人们越来越偏向用随机 (stochastic) 规划的方式来确定市场价格, 改善其效率表现<sup>2</sup>。

电力市场似乎永远存在垄断问题。大部分的电力消费者, 目前仍旧被隔绝在波动性巨大的现货市场之外。一方面, 有售电公司去对冲风险; 另一方面, 电价中包含的巨大的税费、输电成本、公共目的补贴等往往是主体, 而波动性的批发电价反而成了一小部分。这种情况下, 无论市场价格涨 10 倍、100 倍, 消费者是不会脱网的, 电力需求弹性非常低。因此, 在负荷高峰时刻, 大部分机组已经达到了最大出力, 那么剩余部分操控市场的能力就大大增强。这么看来, 电力市场似乎永远存在市场力与垄断问题, 需要政府监管部门的介入。这也是现实中相当部分市场 (特别是存在容量市场的国家) 都存在最高限价 (法国大约为 3 欧元 / 千瓦时, 美国为 8~10 美元 / 千瓦时, 甚至更低) 的理论逻辑。

## 过去的故事

我国的“有序用电”序列表明对消费者的优待程度。我国的《有序用电管理办法》规定<sup>3</sup>, 优先确保重点单位与居民用电, 按照“先错峰、后避峰、再限电、最后拉闸”的顺序, 组织工业企业错峰。这不是一个经济原则, 因为往往工业限电的损失要大

于居民, 特别是无计划的限电措施。更进一步讲, 是否限与如何限, 消费者往往是没有发言权的, 而成为了调度的自由权衡。笔者在农村长大, 小时候最兴奋的事情就是跟着父母晚上浇地, 往往不知道什么时候回到家里炕上, 也不知道什么时候睡着的。当时全国电力紧张, 农村地区往往只有后半夜才有电可供农田灌溉。

在美国部分市场, 比如德州, 市场参与者可以进行任意买进或者卖出, 即使没有实际需求或者发电机组。也就是说, 这些地区的电力市场已经完全金融化了, 可以允许电力虚拟交易。这对于提高市场流动性, 发现并及时纠正市场错误有好处。套利的可能性存在, 但是不会太大。当然, 有些市场操纵者跨越了几个市场, 对整个系统的稳定性就很有威胁。比如网络监管部门披露的一个典型案例——在能量市场买多电力需求, 制造更多的网络阻塞信号, 从而在金融输电权市场挣更多的钱。无疑, 这里的消费者正确到了“任性”的程度, 可以肆意下单, 只要其承担后果。如何认

电力市场似乎永远存在垄断问题。大部分电力消费者, 目前仍旧被隔绝在波动性巨大的现货市场之外。

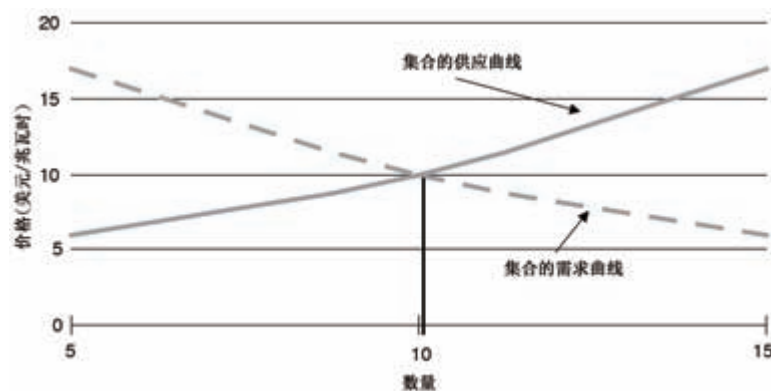


图1 供给曲线与需求曲线的交点决定市场价格

来源: [web.mit.edu/esd.126/www/MktsAuctions/EEI.pdf](http://web.mit.edu/esd.126/www/MktsAuctions/EEI.pdf)

2: Daraeepour, A., Patino-Echeverri, D., Conejo, A.J., 2019. Economic and environmental implications of different approaches to hedge against wind production uncertainty in two-settlement electricity markets: A PJM case study. Energy Economics. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.01.015>

3: <http://www.ndrc.gov.cn/fzgggz/jjyx/zhd/201104/W020110428531836398224.pdf>



定存在操纵市场行为，无疑需要更高的监管能力。

在我国，调度往往责任重大，从而权力也巨大。尽管有所谓“公平、公正、公开”调度的说法，但是在操作层面似乎它的操作完全不需要对任何人负责，系统是如何运行的，小时级的出力数据往往不公开。这方面的社会认识“水位”，亟需提高。

在我国，似乎调度仍旧永远是“对”的。它凌驾于整个体系运行之上，而不是像开放竞争市场那样，只是整个市场的一个参与者与系统剩余负荷（需求与各种出力误差、突发情况）平衡的负责人。的确，这种方式的系统是很安全的，因为它可以不计任何代价地慷别人之慨保证系统安全。当然，最终成本的承担者往往是消费者。这的确涉及安全是系统的目标还是约束的问题。经济学讲的范式，往往安全是约束，而经济福利是目标。反过来，安全是目标，经济福利是约束也可以，这两者在理论上属于标准的对偶关系，存在等价的可能。但是，在国内，人们一旦提及“电力系统安全”目标，往往从一个带约束的优化问题，似乎“隐舍地”变成无约束的优化问题，这就有些跑题了。问题的关键是：为了保证这种绝对的安全，付出的其他维度的代价有多大？是否值得？是否有更好保证这种安全的其他更经济的方式？

可再生能源似乎有的时候是对的。比如所谓“省间壁垒”在我国的公共认识问题。如果那边输送的是清洁能源，似乎就有了无穷价值。于是东部地区接受外来电成为一种道义责任，只要来的是“清洁电”（事实上，所有的电对于消费者都是一样清洁的），就完全没有输送电价是否有效降低了用电成本的讨论。这种割裂市场的外送方式，送出端压低电价，接收端制造

消费者永远是对的，意味着消费者需求高的时候，电价应该高；其需求低的时候，电价应该低。


系统的不灵活（基荷外送），降低生产者（灵活并入本地电网）与消费者的选择权利。这种完全无意义的“忽悠”仍旧存在一个小市场，也蛊惑了相当部分从业者与社会大众。

稳定输出的化石能源在我国似乎有的时候仍是对的。比如东北地区将各种电源的市场份额问题界定为调峰辅助服务。煤电出力一旦低于 50%，似乎就为系统做了贡献，需要那些还高于 50% 的出钱补偿。比如远距离大容量输送电，到了东部地区做基荷，然后用本地不需要输配成本的电源做备用，成为特权线路，晚上需求低谷时期还一条直线输送，往往成为系统平衡困难的重要因素。再比如光伏电站加装储能设备，目标不是去捕捉那些高峰电力需求，而是想法子整成一条直线输出。这方面，亟需电力系统价值方面的更多公开讨论。

## 总结

消费者，而不是调度，不是可再生能源，也不是稳定输出的化石能源，（应该）是对的！

消费者永远是对的，意味着消费者需求高的时候，电价应该高；消费者需求低的时候，电价应该低；消费者缺乏需求的时候，电价应该是零或者负的——多用电反而指向系统总成本减少的方向，比如避免机组频繁爬坡，“一条线”的稳定输出并不具有消费者价值。而机组爬坡产生了巨大的成本，或者根本爬不上去，或者爬不下来，那是这些“不灵活”机组的烦恼与成本。它们并不是对的！

在数字化时代，让我们共同努力把上述的“谁对谁错”——也就是电力系统交易与运行的正常财务结算关系变成现实！



# 开拓新能源 创造新生活

为适应地形复杂、风资源多变的低风速市场，华仪针对性开发出新一代超低风速机组，单机容量达2.2/2.3/2.5MW，叶轮直径达131m-147m，能够捕获更低的切入风速，在年平均风速4.7m/s低风速区域，实现年满发小时数2000小时以上，追求优质的发电表现，是华仪风能不懈的追求目标。

华仪风能3.XMW平台系列化机组，叶轮直径达140-155m大容量机组，现已惊艳登场！



**HEAG** 华仪风能

🏠 [www.hewind.com](http://www.hewind.com)

📍 浙江省乐清市经济技术开发区中心大道228号





# 为能源转型鼓与呼

## ——一位编辑的新能源图书出版手记

文 | 湖南科学技术出版社策划编辑 王斌

### 选择新能源图书出版的初心

在传统能源日益枯竭的当下，跨越式的能源革命如何实现？以往西式的高化石能源消费模式，在有限的资源供给和巨大的环境约束条件下，已然走向穷途末路。这注定只是一条少数人能够发达和实现现代化的路，对于大多数人来说，这是一条显而易见的死路。中国要想完成现代化，必须另辟蹊径。中国需要自己的能源革命与发展方式创新。

中国梦的目标是要在 21 世纪中叶实现中华民族的伟大复兴，而能源的消费水平是一个重要的参考量。西方发达国家在现代化过程中有一个基本的共同特征，那就是消费大量的化石能源（不可再生的石油、煤炭、天然气等）。例如，美国 1990 年人均消费 11 吨标准煤，日本同年的水平为 5 吨，经合组织（OECD）国家的平均水平为 6 吨。如以美国的标准计算，到 21 世纪中叶，我国的能源年消费总量将达 165 亿吨标准煤（以 15 亿人口计），这比 2000 年全球能源消费总量 130 亿吨标准煤还要多出近 27%；如以日



太阳的胜利（2000—2020）  
——太阳能征服世界

本的标准计算，我国在 21 世纪中叶的年均能源消费总量将达到 75 亿吨标准煤，相当于 130 亿吨的 60%。

这将对全球气候产生什么影响？1995 年，全球二氧化碳排放量为 60 亿吨，以日本的标准为衡量，到 21 世纪中叶，仅中国实现现代化这一项因素，届时就会使全球二氧化碳排放量达到近 100 亿吨的水平。就算我们能够解决好化石能源燃烧所产生的环境污染问题，但是作为《巴黎协定》中关键的碳排放指标肯定是达不到了，所以，西方发达国家曾经走过的路，中国很难再重走一遍。中国作为世界上人口最多的发展中大国，注定只能走上另外一条具有自身特色的现代化之路，即发展方式的创新之路。从能源的角度来说，就是一条利用可再生能源的清洁发展之路。

解决中国的能源问题只能开源和节流并重，坚持两条腿走路。节流相对比较解决，就是提高能源的利用效率，从商业上来说，只要提高能源的价格，节约能源之路就会自然而然地走通。当然能源作为一种基本生活和生产物质，其价格不能脱离实际的

生产和消费水平而定得太高，如果定得太高，也容易引起一系列的问题。

开源也很好理解，就是用新的可再生能源代替传统的化石能源。虽然新能源替代化石能源已是大势所趋，但是这并不代表新能源代替传统能源的路径就会水到渠成，一帆风顺。新事物的产生，旧事物的消亡从来都不是一蹴而就的。更何况旧能源还在我们的生活中发挥着决定性的作用。但是作为编辑，我们不能因此而放弃对新能源的关注和关心。无论从中国的资源优势还是国家能源的安全角度出发，我们都不应当放弃对于能源转型的追求。促进新能源的快速发展可以为我们带来诸多的优势，更清洁的环境，更稳定、更安全的能源供应，以及由此带来的新的产业发展机会。所有这些汇聚在一起，就可以形成一股悄然改变当今世界政治、经济格局的巨大潮流。它会给我们每个人创造平等获取能源的机会。在能源转型上，只要我们坚持技术和商业模式的创新，新能源就会更快地从“旧时王谢堂前燕，飞入寻常百姓家”。这样普通百姓就都能分享新能源发展和能源转型带来的成果。征途漫漫，任重道远。能源作为社会发展水平的主要标志，在整个社会中起着牵一发而动全身的关键作用。我们在推动包括中国在内的全世界清洁能源转型的同时，其实也为世界经济的发展提供了新的动力。能源转型的每一步都需要我们大家一起努力，只有扎扎实实把能源革命的全球共识转化为全球的一致行动，这场革命才有可能走向成功。作为一名鼓呼能源革命的出版工作者，我希望能够为能源革命的早日到来发一份自

己的光，尽一份自己的力。这也是我6年来坚守新能源领域出版的初心之所在！

## 新能源图书出版历程回顾

从2013年开始策划新能源的第一本图书《重塑能源》，到现在推出《太阳的胜利》，我们和鉴衡认证中心已经进行了6年的合作。这6年中，我们双方密切合作，打造了三本新能源领域的图书，取得了较好的社会影响。借此机会，我想对已经出版的三本图书进行简单的回顾。

### 一、《重塑能源》

《重塑能源》于2014年6月由湖南科学技术出版社和鉴衡认证中心共同推出，这也是我们双方的第一次合作。该书的作者卢安武（Amory Lovins）是美国一名物理学家，也是世界著名的能源问题专家。卢安武毕业于哈佛大学和牛津大学，曾任教于牛津大学。他同时是洛基山研究所联合创始人之一、董事长、首席科学家。在过去40年里，担任过50多个国家的政府和企业顾问。

该书的主要观点是：石油和煤炭已经帮助我们建造了人类文明，为我们创造了财富并充实了数十亿人的生活。然而，它给我们带来的安全、经济、卫生和环境成本却超过它给我们带来的益处。因此，如何找到一种商业上可行的新能源解决方案并付诸实施便成为各国政府决策者及商业、学术研究者关注的重点。图书聚焦于美国企业如何能在2050年传统能源枯竭之前，实现向新能源时代的全面转型。

作者在书中明确指出：立足于现





有技术，不需要强制执行公共政策，在企业持久利润的引导下，就可以实现更可靠、更安全并且所有人都能够负担得起的新能源世界，从而解决能源危机这一人类共同面临的重大挑战。作者以全新的视角，分别从交通、建筑、工业和电力四个领域，详细绘制了一幅重振新能源产业的商业模式路线图，同传统商业模式相比，可创造出 5 万亿美元的巨大商机。

我认为这本书最大的意义是：卢安武为读者绘制了一幅全新的新能源商业开发全景路线图，为即将迎来化石能源枯竭期的经济指明了航向。同时，图书凝聚了美国落基山研究所数十位科学家、工程师、建筑师、经济学家、商业专家和其他从业人员历经数年的工作成果，为我国的能源转型研究提供了一套可以复制的方法论。

## 二、《光伏的世界》

2015 年 10 月，《光伏的世界》是我们双方推出的第二本有关新能源的图书。该书作者沃尔夫冈·帕尔茨 (Wolfgang Palz) 博士是世界可再生能源委员会 (WCRE) 主席、全球生物能源伙伴关系委员会成员、国际太阳能学会理事会名誉成员、欧盟委员会顾问。帕尔茨博士一直投身于全球光伏发展的研究工作，在该领域积累了 50 年的丰富经验。作为目前推动全球光伏发展的先驱代表，他致力于全世界的民众提供成本更加低廉的电力。这也是一本全面系统地介绍光伏发展的过去、现在以及未来的文集。书中既包括帕尔茨博士本人在 50 多年的新能源事业中，对光伏发展的深入了解和系统总结，也包括全球范围内从事新能源行业的专业人士对光伏艰难发展



历程的回顾、对未来发展趋势的预测，以及个人在光伏建设等工作参与中点点滴滴的记录。

我们可以用这样一句话来概括《光伏的世界》一书的主题：全球光伏行业的领军人物为您讲述光伏的前世、今生与未来！

## 三、《能源和交通的清洁革命》

2018 年 5 月，我们又合作推出了《能源和交通的清洁革命》一书。该书的作者托尼·西巴 (Tony Seba) 任教于著名的斯坦福大学，目前在该大学教授创业、创新和清洁能源课程。他的课程包括“了解和领导市场的创新”“清洁能源和清洁运输的市场和投资机会”“创业企业家融资”。他拥有 20 多年的快速成长型、创新型科技企业经验，也是硅谷知名企业家、高管，互联网巨头思科系统和网络安全的标准制定者 RSA 数据安全公司的早期员工。他的整个职业生涯都和硅谷有着密切的关联。所以，这本书的风格和观点具有极其鲜明的硅谷范：他在书中展现了作为 IT 及互联网技术的创新龙头——硅谷怎样促使石油、核能、天然气、煤炭、常规电力设施及传统汽车在 2030 年走向穷途末路的场景。

革命是他书中的核心词汇，他在书中大胆预言：利用比特技术和电子技术的结合，硅谷将颠覆传统的能源和交通运输业，而太阳能正在颠覆所有形式的常规能源。出版这本书的意义在于，以一个硅谷人的视角来看待能源和交通领域发生的革命。托尼在书中旗帜鲜明地指出：能源与交通的工业时代正在让位于以信息技术和知识为基础的时代。信息技术与电子技术的结合，将终结传统的基于原子的





能源和交通运输产业。

## 为什么选择出版《太阳的胜利》

伴随着投资的增长，中国新能源发电量在全社会发电量中的占比取得了巨大的进步，早已完成了从 0 到 1 的突破。2000 年，我国光伏发电和风电占全社会发电量的比值接近于零，到 2018 年年底，占比已经接近 8%。光伏发电和风电突破 10% 的比例，从而进入主流能源行列的日子已经指日可待。为了促进新能源更好发展，我们有必要对本世纪前 20 年新能源发展所走过的历程进行一番梳理，总结其成败得失和经验教训，为新能源未来的发展指明前进的方向。

基于这一目的，我便开始留意这方面的选题资源，恰好鉴衡认证中心的于贵勇向我推荐了帕尔茨的一部最新力作，主旨内容刚好和我要策划的图书相符。收到初稿后，马上开始阅读，我被深深地吸引了。图书的标题是《太阳的胜利（2000—2020）——太阳能征服世界》，从标题就可以大致判断出书稿的整体内容。图书对光伏、风能、生物质能为代表的新能源在 21 世纪前 20 年的技术、产业及其发展历程进行了细致入微的分析、梳理和总结。总之，这是一部完全符合我选题思路的书稿。

## 《太阳的胜利》特色

本书另一个吸引我的地方是图书的阅读体验。新能源的图书，因为专业性强，容易写得乏味而无趣，这样就会把许多想了解这方面知识的读者拒之门外，从而造成图书的读者群体范围狭窄。为了避免这种情况发生，帕尔茨在写作上做出了诸多

的创新。首先，他凭借自己渊博的知识、优美的文笔，把专业性极强的技术产业史讲得既深刻又易懂。与此同时，他还特别注重全书的科普性。比如，为了让读者明白太阳能的来源，他特意在第一章讲述宇宙、太阳、地球的形成，为读者讲述了一段简洁完整的宇宙演化历程故事。这样处理，就让读者能够明白：地球的能源来自于太阳的馈赠。读完第一章后，我不由得为帕尔茨的这一处理手法拍手叫好。

在讲到光伏电池的发电原理——光伏效应时，帕尔茨为了让读者更好地理解，又花了相当长的篇幅结合量子物理学的发展历程来进行阐释。在讲述这些原理的时候，他穿插了许多物理学史上为光伏效应作出贡献的物理学家故事，这种处理方式极大地增强了本书的可读性，让人感觉不是在读一部乏味的技术读物，而是在读一本引人入胜的历史故事书。这样的写作方式，大大提升了读者的阅读体验，让人感觉原来读产业技术类的图书也可以生动有趣。

作者的字里行间充满着人文关怀，又在写作形式上进行了卓有成效的创新，尽最大可能摒弃了公式和图表，这样做大大降低了图书的阅读门槛，扩大了读者的覆盖面。

## 结语

回顾这 6 年的新能源图书编辑历程，特别要感谢鉴衡认证中心的秦海岩和于贵勇，没有他们的支持，这几本新能源图书很难取得应有的反响。接下来的时间，我们将通力协作，完成好《太阳的胜利》图书的装帧设计和印制工作，为读者奉献一本精品之作。✎

### 《太阳的胜利》作者介绍

沃尔夫冈·帕尔茨 (Wolfgang Palz) 博士是德国物理学家。半个多世纪以来，他一直是全球太阳能和其他可再生能源发展的领导者。作为欧盟委员会官员，他负责欧盟光伏发展超过 20 年。从 2000 年到 2002 年，他担任德国议会能源委员会成员，负责德国 2050 年能源战略规划的制定。后来，他担任欧盟委员会为拉丁美洲贫困人口制定光伏项目的顾问。帕尔茨博士获得过一系列荣誉，包括国际太阳能学会 (ISES) 推进太阳能政策全球领导奖 (2011 年) 以及德意志联邦共和国功勋章。





(M) 谢长军

1957年出生，1975年7月参加工作，东北电力学院热能动力专业本科毕业，教授级高级工程师，曾任龙源电力集团股份有限公司总经理，中国国电集团公司党组成员、副总经理。在英国《世界风电之窗》月刊评选出的2012年世界风电行业30位最具影响力人物中，位列第三。

谢长军风电场建设回忆录之七

## 绿色能源走进“革命老区”

### ——回顾龙源贵州威宁风电开发历程

文 | 谢长军

毕节威宁草海，贵州最大的天然淡水湖，国家级自然保护区，每年有成千上万只珍禽异鸟飞来这里越冬，被誉为“观鸟天堂”“摄影家的乐园”。2009年以来，随着龙源进驻威宁，并迅速推进风电项目建设，草海的风景线变得更有层次感——远山上的白色风车与清澈的碧波、翻飞的水鸟、觅食的羊群相互映衬，勾勒出一幅绝美的“水上草原”画卷。

伟人毛泽东在《七律·长征》中曾描写过红军远征中的场景和革命豪情：“五岭逶迤腾细浪，乌蒙磅礴走泥丸”，而当时，龙源在贵州风电项目建设的主战场威宁就坐落在乌蒙山区。在这里，龙源贵州公司耕耘十载，建成了一座座高海拔风电场，为革命老区人民提供着源源不断的清洁绿色能源。

#### 战略转型，进军云贵高原

龙源早期规划建设全国六大风电基地，只有东南沿海基地在南方，其他五个基地全部在“三北”地区。随着“三北”地区风电的快速开发和当地消纳送出的矛盾凸显，龙源人已经预测到未来2~3年内“三北”地区弃风限电会十分严重。经过慎重考虑和全面深入的市场调研，龙源在全国首次提出“上山、下海、低风速”的新概念，并以此制定战略转型目标。即从北方走向南方，探索开发高海拔地区风电场，试验开发海上风电场，稳步开发低风速风电场。其目的是平衡全国风电布局，避免在“三北”地区投入过多，由于弃风限电造成大的投资损失。在此背景下，龙源加快了云贵地区风电

龙源贵州威宁风电场之一



开发速度。笔者记得是在 2010 年 3 月，龙源贵州风电项目筹建处成立。第一任主任是黄力伟（兼云南筹建处主任），第二任主任是王俊平（曾任龙源黑龙江公司工程部主任），后改任龙源贵州公司总经理；国电贵阳电厂商调副厂长刘军任副总经理（后任党委书记），云南筹建处副主任刘建民也参与过贵州的许多前期工作。2008 年 12 月 28 日，龙源与贵州威宁县人民政府签订《西凉山、团菁梁、马摆大山等地区 17 万千瓦风能开发投资协议书》（当时公司本部夏晖的杨姓亲属帮助做了许多协调工作），开启了龙源在贵州风电的前期测风和资源评估等工作。

贵州地处高原，属于喀斯特地貌，海拔高，风速相对较低，建设条件恶劣，开发难度大；建设成本高、植被恢复困难。这两点成了贵州大规模开发风电的“拦路虎”。

2010 年以前，有很多家企业早于龙源进入贵州占有风能资源，但对贵州风电开发大多望而却步，一直争取贵州省政府在国家补贴之外再增加补贴，两年时间一直在与政府进行协调。此时，龙源贵州公司在总部的支持下，认真研究、论证威宁风电项目建设难度和收益情况，率先向政府提出执行国家风电标杆电价政策，并希望尽快开工建设马摆大山、西凉山和贵家营三个项目，总计 14.85 万千瓦。龙源此举也成了贵州新能源开发史上的一个重要“转折点”，其他发电企业迅速跟上，风电开发在贵州各地全面铺开。

## 建设艰难，技术创新是关键

威宁地区风电建设存在三大难题：一是大件运输困难；二是海拔高，植被恢复保护要求高，对道路和基础施工带来很大困难；三是气候变化异常，雨雾天多，施工期短。威宁地区平均海拔 2200 米以上，龙源建设的风电场一般海拔在 2600 ~ 2900 米之间，加之高原草场和凝冻气候，给施工带来很多困难，一年施



上图：2011年4月，笔者拜会贵州省能源局、南网贵州公司及有关部门领导

下图：2014年9月16日，笔者赴龙源贵州公司调研

工期不到 250 天。龙源贵州公司在总经理王俊平和副总经理刘军的带领下，克服重重困难，与设计、施工、运输各方紧密合作，创新了许多施工和运输技术。

在进场和场内道路施工中，注重与乡村现有道路相协调。少占地，少开挖，与村民合作达成共赢。

在场内线路和送出线路施工中，注重与环境景观相协调。场内线路全部采取直埋方式，送出线路采用同塔双回或多回布线，减少线路占地面积。

在基础施工中，注重与原生态相协调。保护植被土层，加快植被恢复速度。

在叶片等大件运输中，龙源贵州公司有关人员与运输承包商共同研发了专门运输风电机组叶片的“定向转向车”，不仅极大降低了运输成本，



还获得国家实用新型专利，解决了困扰云、贵、川等道路条件恶劣地区风电开发的风电设备运输难题。后期又被推广至广西、广东地区使用。

项目建设的同时，还引进塔筒厂在当地生产塔筒，以减少运输紧张的压力。

2011年年底，投产马摆大山（4.95万千瓦）、西凉山（4.95万千瓦）两个风电场；2012年8月，投产贵家营（4.95万千瓦）风电场；2013年年底，投产麻窝山（4.95万千瓦）、龙河（4.95万千瓦）两个风电场，龙源贵州公司的风电装机容量达到24.75万千瓦。到2015年年底，共投产12个风电场，公司的风电装机容量达到59.2万千瓦，实现了预期效益目标。目前，公司在建一个项目（5万千瓦），已核准待建一个项目（5万千瓦），资源储备5个项目（23万千瓦）。

2014年9月16日，  
笔者赴龙源贵州公司  
调研

## 妥善解决多种问题，顺利发展

2011年，龙源威宁大海子区域25万千瓦项目与华能开发布局严重重叠，双方争持不下，后来龙源抢先拿到电网接入审查意见，最终成功获得项目开发权，该项目早已投产发电。

威宁是彝族回族苗族自治县，当地居住着19个少数民族。在施工和运输过程中时常出现纠纷。龙源贵州公司组织专门人员，依靠地方政府，经常深入当地长老、阿訇家里进行宣传疏导，并组织召开族长会议全面讲解政策法规，多次化解矛盾和风险，保证了项目建设顺利进行，也建立了与当地少数民族群众的友好关系。

随着威宁风电场陆续投产，电网送出线路出现较严重的弃风限电等“卡脖子”现象。公司主动协调，积极推动省电网公司加快增容改造，经过近两年各方的努力，问题得到妥善解决。

## 未来，机遇与挑战并存

2015年，进入贵州开发风电的企业多达18家，贵州省风能资源有限，资源争夺进入白热化，省内资源基本瓜分完毕。

2016年，贵州省以各新能源企业生态修复治理工作不利为由，将当年已列入国家核准计划的210万千瓦项目全部取消核准，并暂停路条审批工作，风电发展处于“搁浅”状态。

2017年，贵州省仍谨慎发展风电产业，直到年底才核准75.68万千瓦项目。

贵州省作为国家生态文明试验区，实行生态红线控制，环保要求愈加严苛，使得水土保持治理投入大增，风电造价将进一步攀升，后期开发的项目收益不容乐观。

龙源贵州公司现任总经理刘军认为，目前风电发展中存在很大障碍，主要是生态环境保护与风电开发之间出现矛盾，但还有一定的发展机会。公司当前的任务是，经营好现有资产，谨慎开发储备项目，在确保赢利的条件下开发建设新的项目。🔋



# 海上巨无霸的守望者

## ——海上风电钢结构防腐蚀纪实

文 | 江苏海上龙源风力发电有限公司 黄佳欢



十年前，谁能想到在中国的东部沿海会有一批人带领着风电人进军海洋，将一根根巨无霸楔入海床、安上风轮，将海风化为电能输送到千家万户。十年后，谁又能想到有一批人默默地守护着这些海上巨无霸，在寒冬中为它们体检，在酷暑中为它们消除伤痕，年复一年地关注着它们的健康状况，希望它们远离危险——这些人就像森林护林人、灯塔守护人一样。当大家都在关注机组的可利用率是否提高、利用小时数能否增加时，这些人甘做后盾，选择成为海上巨无霸默默无闻的守望者。

当清晨的第一缕阳光照射到海面的时候，守护者们已经开启了征程，他们检查钢桩表面每一处涂层，确认漆面是否因为交通船的莽撞行事遭到破坏，钢桩是否因为海水的渗入发生锈蚀……他们需要在潮水没过钢桩之前，把这些极易扩大的隐患一一消除。

当海浪第一次拍击到海岸、潮水涌起的时候，守护者们又开始了新的任务——去触摸他们熟悉得不能再熟悉的冰凉钢桩。虽然他们清楚巨无霸的每一寸“肌肤”，但又生怕遗漏了它新的裂纹。因为海上风电机组在捕获风能过程中会不可避免地出现振动，任何细微的裂纹都可能是致命的伤痕，因此，需要仔细检查每一道焊缝。

当潮水追赶着天际线而去的时候，守护者们穿上及膝的雨靴，跟着熟悉大海的老渔民在泥泞的滩涂上踩出深一行浅一行的脚印，来到巨无霸楔入大海的地方，检查、取样，抑或是拿着颇有些老旧的仪器认真测量着，年复一年地关注着这些伸向天际的巨无霸的腐蚀情况，就像呵护自己的孩子一样。

夜幕降临，守护者们陆续回到了岸上的“小窝”，有人提笔慢慢记下这一天的所见所闻，有人打开笔记本电脑录入这一天的检查数据，有人思考着如何开展维护方案、制定合理预算等。但当启明星给破晓前的夜色以最后一抹星光，他们的思绪也穿过黑夜，开启了新一天与海上巨无霸的相伴。

许多同仁来了又走，但是他们却一直坚守着这些巨无霸，正因如此，这些大家伙们诉说着的呢喃细语也只有守望者们才能听懂。怀抱热忱，肩负责任，守

护者们从不后悔把自己的青春留在这里。

大海是慈爱的，也是冷酷的，她为人类提供了无数食物和能源，也无情地摧毁着人类楔入到她身体里的钢桩。因此，海上风电每年因腐蚀发生的安全问题不在少数。一本笔记，一顶安全帽，数十载人来人往，我们不仅仅希望这些海上巨无霸能够成为不倒的丰碑，更期待某一天当人们享受清洁能源带来的便利时，闲暇之余，去看看那些拂过海面的巨大叶片，去听听那些海鸟对守望者往事的诉说。最后能够发现，我们并不是向大自然无节制地索取，静静地享受她的洗礼，与之共同呼吸才是我们的心之所向。📍



## 中际联合马东升： 唯有专注才够专业

本刊 | 王芳，张雪伟



马东升

中际联合（北京）科技  
股份有限公司董事、  
副总裁

在风电庞大复杂的产业链中，一些找准市场方向，拥有核心技术，走“专而精”道路的企业，往往能够迅速占领市场空白，打开海外市场，塑造风电行业可信赖的品牌。

中际联合（北京）科技股份有限公司（以下简称“中际联合”）的 3S Lift（中际联合的品牌）免爬器，自 2013 年正式推向市场以来，很快坐稳了国内市场份额的头把交椅。今年，在竞争激烈、技术日新月异的国际风电市场中，中际联合产品的海外收入已经占到该公司总产值的 25%~30%。目前，中际联合在全球范围为超过 10 万台风电机组提供服务，产品应用于 40 多个国家和地区。

“这一切都源于我们的专注。”中际联合董事、副总裁马东升道破其中的原委。

非专则不能以精，非精则不能以明，非明则不能以诚，故曰“惟精惟一”。正是靠着这股精益求精、至精至诚的信念，这家民营企业在市场的大潮中乘风破浪，一路向前。

《风能》：2019 年，中际联合的产品和业务有哪些新的进展？销售业绩如何？

马东升：3S Lift 拥有 100 多人的技术研发团队，经验丰富，能根据不同客户、不同阶段的各类需求，提供产品优化组合定制服务，包括三个方面：第一，在风电机组整机设计阶段，我们就能够根据项目需求提供设计开发定制服务，如塔筒升降机、免爬器、海上平台吊机、铝合金平台、铝合金爬梯、逃生包、防坠落系统、塔筒结构件等产品的设计开发等。第二，在项目应用中期，比如在整机吊装及运行阶段，提供产品安装及运行过程中的技术支持，处理好与其他设备安装进度之间的衔接关系，严格按照项目进度实施计划，按部就班执行产品的安装与运行，快速、高效地推进项目的实施进程。第三，在项目应用后期，比如在质保期内提供技术支持。在质保期外也可以提供设备维护、维修方案或技术措施，提供产品升级及技术改进等持续性技术服务。

截至目前，中际联合已在全球范围内提供了近 4 万台智能助爬器、3 万多台免爬器和 1.4 万多台塔筒升降机，累积服务 10 万多台风电机组、2 千多个风电场，产品应用于 40 多个国家和地区、20 多家主流风电整机厂商。从日前统计的数据来

看，3S Lift 免爬器、塔筒升降机的中国市场份额超过 60%，继续保持领先地位，这让 3S Lift 人也不禁倍感自豪。

**《风能》：海外市场取得了哪些拓展？您认为成功的因素有哪些？**

马东升：3S Lift 的愿景是“成为全球同行中富于创新和竞争力的卓越企业”。为了这个目标，3S Lift 一直把产品的持续改进及不断开发满足市场需求的新产品，作为公司产品战略的两个重要方向。不只是在国内市场要做到最好，在国际市场我们也要力争做到最好。

正是因为做得专而精，中际联合的产品得到了市场的积极反馈。中际联合的安全升降设备海外市场收入占公司总产值的 25%~30%，在免爬器市场居第一，在塔筒升降机市场跻身全球前三。我们的目标是到 2020 年，这个比值要达到 50% 以上，并且已经卓见成效，3S Lift 成为了维斯塔斯、西门子歌美飒、GE、苏司兰（Suzlon）、Nordex-Acciona、Senvion 等海外企业的供应商，且需求量稳步攀升。相信实现海外市场收入超过总产值一半的目标，指日可待。

多年的专注带来的不仅仅是市场上一时的成功，还有公司持续发展所需要的沉淀与经验。作为一个创新型企业，技术创新是我们最核心的优势。目前，3S Lift 每年用于研究开发的经费基本不低于销售收入的 10%。我们建立了全球专用高空安全设备领域规模最大的高水准研发中心，以此保证不断推陈出新，保障技术在全球范围内持续领先。中际联合还是国内最早将欧盟标准及北美标准应用到专用高空安全升降设备的企业，风电产品及服务已经在全球 30 多个国家和地区获得了市场应用的准入资格。

此外，中际联合是一个用心做产品的公司，对待客户有很强的服务意识。经过多年积极的市场开拓，我们在美国、德国成立子公司，在印度设立办事处，积累了丰富的客户资源和渠道资源，拥有大批优质的合作伙伴，凭借过硬的产品和服务

赢得客户认可。同时，我们每年投入资金引入先进的管理工具，进行信息化建设。在制造方面采用国际顶级制造的精益生产思想和方法，使制造回归本质：质量、成本、效率。经过多年耕耘取得了一定积累，从而满足企业高速发展的管理需求。因此，我认为 3S Lift 能实现这样的发展，是企业多方面努力的综合成效。

**《风能》：中际联合进军海外市场的目标是什么？在国际化征程中，国外市场与国内市场存在哪些不同？为此，中际联合在产品研发、设计制造、标准和质量安全等方面做了哪些改变？**

马东升：进军海外市场，让“中国的”变成“世界的”，并不是 3S Lift 一时的念头，而是多年来的梦想，是我们在发展过程中的必然趋势和选择，也是在国内市场上做大做强之后顺势而为的结果。

近几年，3S Lift 的海外市场年收入占比虽然较小，但在高空安全设备行业的发展前景和市场空间巨大，因此，我们一直积极地探索“走出去”。其间，3S Lift 不仅提炼了独具魅力的文化标签，还开启国际化发展之路，在海外掀起一股“中国热”。我们进军国际市场的目的，不仅仅是出口创汇，而是要成为国际化的 3S Lift，创出中国的世界名牌。海外市场开拓被赋予了全新的战略决策：在中国文化自信的引领下，对外，聚焦海外主流目标地区，强势开拓；对内，引进国际化、专业化团队，探索扁平化、深度化的营销模式，传扬中国民族品牌。

相比国内，国外市场对产品的要求更加严格，工艺上的审核、质量体系、管控要求都非常严。所以，在海外市场开拓方面，3S Lift 也是下足了功夫，明确以高质量的产品赢得客户信任的宗旨。

公司负责研发的副总裁王喜军曾在海外从事专业设备设计 13 年。归国后，他以先进的产品设计理念引领研发团队，保证了设计理念的先进性。同时，公司从设计、制造、安装到售后，每一个环节都把安全性放在第一位；注重设计本身降本增效；通过批量化生产，在保证高质量的前提下大大降低产品成本；通过实施精细化管理，既严

格控制了产品质量，又可以提高生产效率，降低生产成本，从而不断提升产品的性价比。

目前，3S Lift 已经通过国际整机商销售了很多的优质产品，也积累了一定的业界口碑。此外，我们也将通过美国、德国风能展等国际盛会推广自己的产品，进一步打开国际市场。

**《风能》：在科技研发上，中际联合有哪些新的突破？解决了哪些行业痛点？**

**马东升：**中际联合成立至今十多年来，始终将知识产权视为产品整个生命周期中不容忽视的重要环节，已经形成了以保持有效强大的专利储备为研发业务的核心模式。通过研发智能模块和精细零部件，从根本上减少了产品研发升级所需要的时间，保持知识产权优势领先。

3S Lift 持续研发升级免爬器的相关核心技术，已在操作模块、遥控手柄、载重提升与智能平台盖板的搭载构建上取得新进展。与主流整机厂商在应用环境开发、材料理性设计、智能制造、售后维护服务方面开展了优化设计合作，为持续开发具有核心技术的免爬器奠定基础。

免爬器由“单人升降平台”不断地选型和改进而来，将爬梯运输机的理念应用其中。存量市场的风电场普遍需要技术和设备升级，免爬器的问世恰好彻底解决了原有塔筒爬梯空间有限等一系列应用问题，也更好地提高了风电机组运维人员的工作效率和质量。

在专利和认证方面，中际联合自创立之初就特别重视产品的知识产权和国际权威认证。截至目前，专利申请已累积递交 427 项，获得专利授权 300 多项，知识产权整体实力逐年提升。主营产品塔筒升降机获得了欧盟专业认证机构 SGS 签发的 CE 质量认证、环境保护方面的 RoHS 认证、美国权威机构 UL 颁发的 UL 认证、加拿大的 CSA 认证以及澳大利亚和俄罗斯的标准认证证书；除欧盟 CE 认证、船级社标准认证外，免爬器也已获得北美的 ETL 认证证书；智能助爬器、逃生包、防坠落、爬梯等产品取得欧盟 CE 认证和北美标准认证，产品质量和

技术指标均已达到国际水平。

**《风能》：您认为随着后服务市场的逐渐扩大，未来机组安全升降设备的技改市场状况如何？企业面临哪些机遇和挑战？**

**马东升：**风电后服务市场规模虽然很大，但 3S Lift 主要提供辅助运维人员工作的塔筒升降机、免爬器、智能助爬器等安全升降设备的维护、升级、改造服务，以及叶片检查、维修、补漆等维护服务，并供应混塔、叶片检修平台设备。3S Lift 也清楚要想把细分市场做好，就必须始终坚持以质量取胜，只专注于这点，变得更加专业，这就是我们的想法。

根据技改所涉及的业务情况，3S Lift 安全升降设备目前大致有三种选择：免爬器、塔筒升降机、智能助爬器。其中，免爬器以其空间需求小、不用对风电机组塔筒的内部进行改造、智能自动升降、省时省力等优势占据了很大市场，甚至还应用到了海外 6 个国家和地区的 2000 多台风电机组中，是风电机组技改项目名副其实的首选安全升降设备。

3S Lift 也针对特殊机型提供升级改造服务。比如，一些机型的爬梯固定扶持与塔筒壁之间的间距尺寸太小，需将原有爬梯的固定扶持拆除，使用 3S Lift 重新设计的爬梯固定扶持替换安装来解决问题；一些老机型，由于爬梯与塔筒平台上方法兰处的距离较小，人员使用免爬器时无法通过，3S Lift 通过缩小免爬器的脚踏板空间解决了这个问题。针对以上两种情况，3S Lift 研发设计团队都创造了足够的通道空间，使 3S Lift 免爬器能够正常运行使用。

目前，出质保风电机组已经有了相当可观的规模，其中需要技改的风电机组数量庞大。据公司统计，今年机组安全升降设备技改数量将达到历史最高水平。未来 3 年，随着风电存量市场扩大，以及目前风电机组越做越大，塔筒越来越高，这些趋势都将对 3S Lift 非常有利，3S Lift 免爬器、塔筒升降机等产品的应用，将迎来较大的发展空间，我们的战略部署也一定能够实现。

“Life is a promise, fulfill it.” 这是每个 3S Lift 人的信念，我们将使世界变得更美好。✈

更智慧的风能、太阳能  
来自岳能

新业态

新感知

新技术

• 岳镇渊渟 踔绝之能



扫描二维码关注岳能科技  
回复关键字“产品手册”查看详情



# 明阳智能 预见海上风电

如同多数产业那样，开拓海上风电业务，眼光长远与战略坚定，二者缺一不可。

---

本刊 | 孙一琳



经过十余年的探索，中国海上风电正迎来属于自己的时代。关键技术屡获突破，机组型谱不断丰富，产业链体系持续完善，产业价值日益凸显，专属海上风电的发展模式逐步建立。2018年，我国海上风电新增装机容量跃居世界第一。2019年，成绩还在延续。随着海上风电开发节奏逐渐加快，很多企业也兼程前行，寻求更进一步。回首过往，风电企业凭技术立足，用信念坚守，实现了中国海上风电从无到有的转变。这其中，明阳智慧能源集团股份有限公司（以下简称“明阳智能”）起到了至关重要的作用。

今年以来，这家总部位于广东中山的风电企业斩获颇丰，拿到多个海上风电大订单，包括珠海金湾30万千瓦海上风电项目、华能汕头勒门（二）40万千瓦海上风电项目、中广核汕尾140万千瓦海上风电项目等，在手订单量已超400万千瓦。一份份订单的获得，源于市场对该公司海上风电机组运行表现的认可。据悉，在福建福清兴化湾海上风电场，明阳智能的机组已运行超过一年。在截至2019年6月8日的一个自然年内，其机组累计发电2408万千瓦时，年利用小时数达到4378小时，可利用率保持在99%以上，发电表现领跑全场。明阳智能用多年的战略坚守和不断的钻研求索，携手行业共同推动了我国海上风电“春天”的到来。

## 独具慧眼 瞄准海上风电

我国海岸线长，海上风能资源丰富；海上风电用地和送出限制少；沿海地区用电需求大，海上风电不存在消纳问题……说起发展海上风电的优势，业内早已达成共识，不过知易行难。中国海域地质和气象环境复杂、对设备性能要求高、现阶段投资成本高企、运维服务体系不完善等，诸多问题不容忽视。



面对未知的领域、神秘的大海，权衡利弊之后很多企业望而却步。但总有企业敢为人先，成为“第一个吃螃蟹的人”。明阳智能执行总裁兼首席技术官张启应在接受本刊记者采访时表示：“明阳智能成立于广东，发展海洋经济的思维深深根植于公司的基因之中。公司在新能源领域起步时，对整个行业就有一个基本的判断，站在全球市场的视角来看，海上风电肯定是今后的发展重点。因此，我们在进入风电行业之初就瞄准这一市场。”

基于这样的认识，2006年，明阳智能启动了对海上风电技术的研究，开始为下一步的全面布局做准备。彼时，国内对海上风电的认知还非常浅显，很多工作都必须从头做起。明阳智能的研发团队经过调研，初步确定了发展海上风电业务需要具备的条件：一是海上工况条件复杂、窗口期短，对机组可靠性的要求更加严苛；二是由于开发成本更高、集约用海要求严格，海上风电机组的大型化趋势明显，因此，要尽量减小设备体积、降低其重量；三是南方海域的风能资源丰富，是开发重点区域，但受台风影响较严重，机组必须有对抗台风的能力。

对中国海况和发展需求有一定了解之后，囿于国内现状，明阳智能决定将目光投向欧洲，希冀从先驱者的经验中获得启示。2008年，该公司



高层在德国考察时关注到了半直驱技术方案。当时，这一技术在国外的应用中展现出很大的优势，体积小，重量轻，加工的精度更高，能够为海上运输和安装提供诸多便利，但其在国内还鲜为人知。

明阳智能总工程师贺小兵回忆起最初技术路线的选择时，仍然难掩激动之情：“半直驱机组在国外的优秀表现让我们看到了方向。设计上，半直驱机组在确保发电量的同时，可以减小风电机组的整体尺寸，降低机组重量，最大限度减少机组实际运行时受到的载荷，在提升机组可靠性的同时降低施工成本。综合考虑安全风险、运输安装难度以及机组大型化趋势等因素，我们决定主推超级紧凑型的半直驱技术路线。”

明阳智能海上风电发展之路由此正式起航。

## 惟精惟一 “蛰伏期” 执着坚持

然而，我国海上风电开发在此后相当长的一段时间内几乎停滞不前。首先，2008—2009年，海上风电电价政策缺位，导致投资前景不明晰；其次，风电机组技术处在起步阶段，配套的产业链尚未成型；再次，运输、安装和运

维等环节缺少标准和规范。此类问题，并非一朝一夕或者仅靠几个企业振臂一呼就能解决，甚至有业内人士称海上风电有可能成为“镜中月、水中花”般的存在。这是很多企业预想不到的。

这段“蛰伏期”让一些起初踌躇满志的企业选择了放弃，但也有一批人在外界看来似乎是“不撞南墙不回头”。“一个行业的发展绝不可能一帆风顺。我们全体明阳人对行业未来发展有着坚定的信心和十足的耐心，并且做好了长期奋斗的准备。”贺小兵表示。

“政策始终有优化空间，我们虽不能左右其发展，但要有自己的预判，能看准未来发展。我们必须围绕技术和产品，提高自己的适应性，让团队更加高效，能力更强。”技术研发出身的张启应，决心带领明阳智能的海上风电团队迎难而上。

摆在他们面前的第一道难题就是，早期从国外引进的机组技术无法完全适合中国的资源条件，一些原先没有考虑到的问题逐渐暴露出来。明阳智能的研发团队甚至发现，国内没有哪家供应商能提供相应的配套设备，包括变桨、轴承等。经过一番努力，仍然没有起色，事实证明，“拿来主义”是行不通的，外来的和尚未必好念经。对此，张启应提出：“提高企业自主研发能力是首要任务。任何时候，只有通过自主创新研发适合于自己的技术，才能真正为我们带来更好的价值和效益。”

这也促使明阳智能针对原有技术不断进行创新升级，一批产品相继推出。2009年，这家企业在江苏如东海上风电场安装第一批MY1.5-82海上试验机组。随后，又向市场推出单机容量为2.5MW、6MW等的试验机型。

在前期不断试错、改进的基础上，经过长期的探索积累，明阳智能最终推出第四代、也是其目前的主力海上风电机型——MySE系列。

该系列机型采用中速永磁半直驱技术，摒弃了运用高速齿轮箱带来的一些弊端，同时保



留了半直驱机组的优势。一是发电量大。该机组的传动链效率达到 97% 以上；调速范围宽，因此，可以在更宽的风速范围内运转在最佳的效率点，实现高效发电。二是可靠性高。半直驱技术采用两级齿轮箱增速，搭配中速发电机，故障率大大降低，提高了整机的可靠性。三是体积小。以 MySE5.5-155 机组为例，机组重量只有 240 吨，宽度不到 5 米，比其他技术路线的 5MW 机组轻 20% 左右，能够有效降低运输和安装的成本。

此外，在进行机舱、叶片等承载部件的设计时，明阳智能技术团队通过模拟台风从 360 度冲击承载部件的工况条件计算得出载荷情况，从而让机组符合最严苛的要求。

值得一提的是，这些风电机组所用的叶片、齿轮箱和发电机等大件都是由明阳智能自主设计生产，或由其提出技术规范，指导供应商严格按照相关工艺要求进行制造。

技术创新不仅为企业带来价值，更重要的是推动了行业发展。“东南沿海风能资源相对



较好，但气候环境恶劣，海床条件复杂，早期难以开发。现在用最新的技术和机型，让原本不适宜开发的海域具备了开发价值，这是技术进步对海上风电最大的促进作用。” 明阳智能解决方案部总经理叶凡表示，“这也是明阳始终坚持技术创新的动力之一。”

据了解，明阳智能目前已经形成了较为丰富的海上风电机组产品系列，可以满足不同海域开发的需求，通过提供定制化机组解决方案，帮助业主实现收益最大化。其中，MySE5.5-

155、MySE6.45-180 机组主要是针对广东、浙江、海南等低风速、有台风风险的市场；MySE7.25-158 机组是为福建、台湾海峡等高风险、有台风风险的市场研发；MySE4.0-156、MySE6.45-19X 机组则能够很好地适用于江苏、河北等低风速、无台风的海上风电开发。

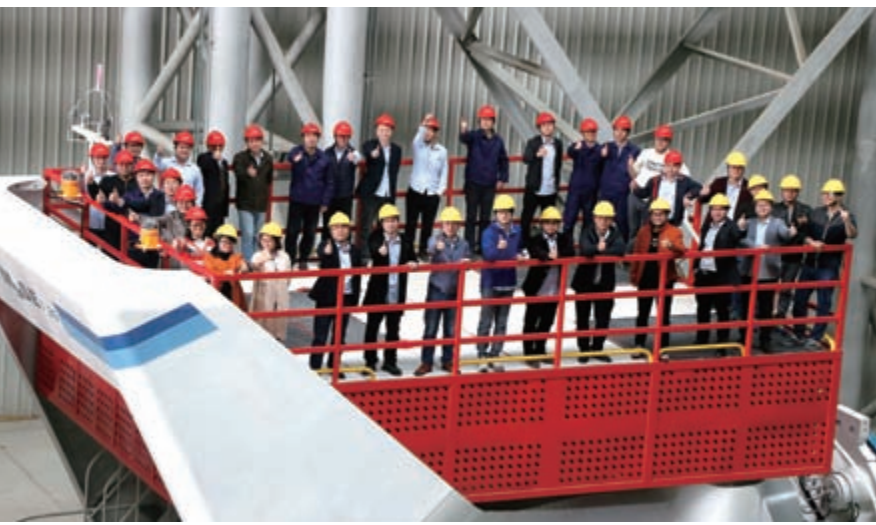
## 厚积薄发 多措并举完善业务链

经过长期的积累，明阳智能在海上风电领域已经取得了一些成绩，除了拥有高可靠性和经济性的风电机组这一核心竞争力之外，更是携手上下游企业构建了一个完整的海上风电业务链条，涵盖前期设计、机组交付、吊装施工以及运维管理等环节，能够为业主提供项目全生命周期度电成本最优的解决方案。

前期规划设计的周密、细致，可以为后期的运行奠定良好基础。机位排布更是其中的关键，对项目的建设周期以及全生命周期收益将产生举足轻重的影响。明阳智能能够通过海上机位智能优化模块精准描述尾流场分布以及全生命周期的风向变化，基于多重变量嵌套迭代遍历寻优方式、先进的尾流计算模型，结合风向的际年变化，实现在 1~2 个小时内对上万种机位排布方案快速寻优，精准锁定最优机位排布坐标，带来全生命周期发电量提升。

记者了解到，在某 30 万千瓦海上项目的原始方案基础上，借助这套海上机位智能优化模块进行调整，该风电场发电量提升了 2.1%。按海上风电 0.85 元/千瓦时的电价计算，在 25 年全生命周期内，业主可增收近 4 亿元。

与此同时，明阳智能还开展了海上风电一体化设计研究，通过提供一体化解决方案提高整体项目运行的经济性。明阳智能海上风电项目负责人吴迪告诉记者：“风电机组的大小会直接影响基础的造价，而基础的投资在海上风电项目整体成本中占到 20%~30%。因此，在风电机组和基础的迭代计算中，减少基础设



计冗余，会降低基础造价，海上风电项目的总投资将明显降低。这也是未来海上风电的发展和突破方向。”

近两年，我国海上风电发展有所提速，这对整机厂商的设备交付能力提出了更高要求。

谈到海上机组的交付能力，明阳智能副总裁王冬冬告诉记者，“我们根据不同海域选择最佳适用机型，合理布局制造基地。比如，我们目前在长江以北海域推出 4MW 机型，这部分机组可以在我们原有的九大陆上风电基地进行制造，产能充足。广东、福建、浙江等地区则比较适用 5.5MW 及以上的机型。为此，明阳智能分别在珠海、阳江、汕尾、揭阳等地设

立了基地，能够覆盖包含长江以南海域的国内、外海上风电项目。”

为了给制造环节提供良好的支撑，一方面，明阳智能不断加强自身制造部分关键大部件的能力。据王冬冬介绍，该公司目前仅为 5.5MW 机型生产配套叶片的模具就已经有 8 套，并且还在以每月新增 1 套的速度不断添加生产线，预计在 2020 年共建设投产 20 条以上海上风电大型叶片生产线。另一方面，明阳智能还强化与供应商合作，提前锁定关键零部件供应商的产能，建立动态跟踪机制，对供应链进行灵活调配，保证每一环节能按时完成供货。

“目前明阳智能都是按照计划的节奏在有序开展。”王冬冬表示，“经过前期的规划投入与积累，使我们能够在这个国内海上风电快速发展的时期，快速且稳健地实现制造能力的提升，并为各项目交付提供有力保障。”

一旦投运，运维将是决定项目运行表现的关键。

明阳智能海上工程运维部副总监李永战拥有非常丰富的风电场运维经验，他向记者介绍，与陆上风电相比，海上风电运维存在的最大问题

就是可达性差。“海上环境多变，如果我们无法及时掌握风电机组的运行情况，并提前做出响应，也就无法保障机组高效运行。因此，海上风电的运维应该向预防性转变。数字化时代的到来为海上风电场的开发与运营提供了更多解决问题的途径，特别是运维方面。”

明阳智能已经形成了一套完整的智能化运维系统，其中值得一提的是故障预警系统。该系统是整个运维调度的“大脑”，它实时采集风电场数据，每十分钟自动将新收集的数据与历史数据做比对，出现异常立即做出反应，生成包含故障预警工单在内的运维计划，并发送至一线运维人员的移动终端。运维人员会通过移动终端处理故障预警工单，并反馈相关运行数据和工作进度等，开展预防性运维工作。

2018年9月，超强台风“山竹”在广东西部沿海强势登陆，明阳智能共有8个风电场位于超强台风12级风圈之内。在与“山竹”的正面对抗中，200余台机组均展现出良好的适应性与可靠性。这既需要机组自身优秀基因作保障，也离不开合理运维调度的支撑。目前，明阳智能已形成了完善的海上运维台风防御机制，从台风季来临前的机组排查、台风预警发布、防御措施部署到台风过境恢复等各个阶段均形成了详细的应对措施，有效应对台风的袭击。

中国海上风电已进入规模化发展阶段，一时间风云际会，海上风电企业纷纷亮出自身优势，准备乘势而上。明阳智能海上机组的稳定运行向行业和市场释放了一个有力信号：中国整机企业的海上机组技术和后期运维能力，完全经得起市场检验。

## 未来可期 打造行业新格局

谈及海上风电的未来，明阳智能的高层看得更高、更远。明阳智能董事长张传卫曾公开表示，“海上风电将成为中国继高铁之后又一张亮丽名

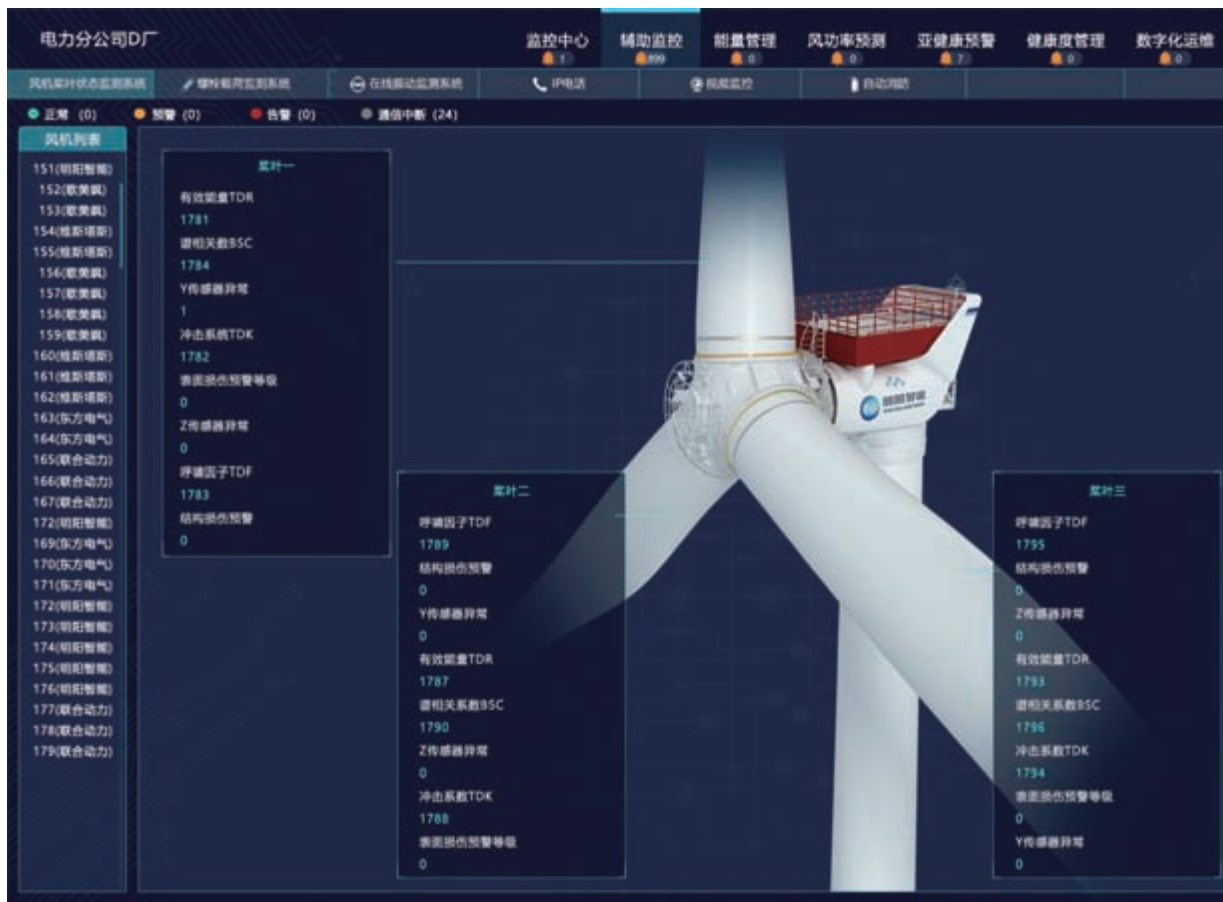
片。大规模的海上风电开发必然带动新材料、新工艺、重大装备等的发展，进而形成一个庞大的产业体系，能够为国家的经济和绿色可持续发展带来巨大的价值。”

这无疑有赖于全产业链的成熟。对此，明阳智能积极利用自己作为海上风电领域先进企业的优势，通过密切合作培育上下游企业的能力。其与湖南南方宇航高精传动有限公司（以下简称“南方宇航”）的合作为人津津乐道，双方对于严控产品的质量及追求航空级品质的理念不谋而合。如今，在明阳智能的带动下，南方宇航已经成为专业风电齿轮箱厂家，是海上风电产业链上的重要参与者。

与此同时，明阳智能还持续在一些前沿技术上投入，为未来产业发展探索可能的方向。张启应表示：“明阳智能正探索能够克服台风及适应中国独特地质水文条件的漂浮式风电机组技术，为海上风电由近海走向深远海提供解决方案。此外，技术团队还在预研单机容量为10~12MW的海上风电机组，进一步延续自身在大兆瓦机组研发上的优势，引领中国海上风电发展。”

明阳智能还联合研究院、设计院、大专院校以及安装施工单位展开合作，将各方掌握的先进技术整合起来，通过沟通交流着力破解行业面临的最棘手问题，促进海上风电更加平稳、健康地发展。2019年，明阳智能与中国空气动力研究与发展中心合作的《台风大气漩涡CFD模式的数值模拟效果检验》，对台风及强风的湍流特性进行研究，推动风电场实现更高的发电效率。

在明阳智能高层看来，这一切的努力都是为了快速降低海上风电成本，使之具有充分的市场竞争力。“我们始终认为作为新能源，海上风电价格不能高高在上。通过整个产业链的完善，大规模发展海上风电，最终目标是要使老百姓真正用得上平价的电，为他们的生活创造一个更好的条件，也为绿色发展提供更大的动力。”贺小兵指出。他的一番话展示了风电企业对自身的高标准、严要求和沉甸甸的社会责任感。✎

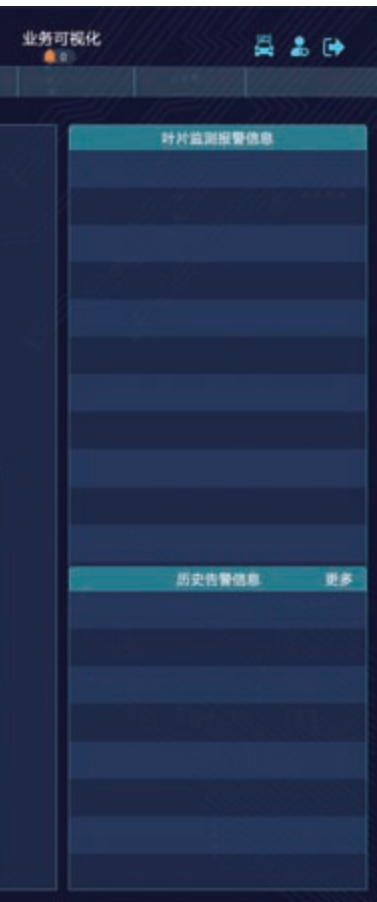


## 量云： 智慧让风电场“能动”起来

本刊 | 孙一琳

在国家政策的大力推动下，“互联网+”智慧能源理念正在为我国能源行业带来一场变革。新产品、新技术不断涌现，快速推动能源互联网新模式和新业态的兴起。

据了解，明阳智慧能源集团股份有限公司（以下简称“明阳智能”）自2010年就开始了风电软件系统的研发及应用，以实现风电场的远程数据收集、状态监视和数据分析。2015年，基于明阳智能的智慧能源战略布局，深圳量云能源网络科技有限公司（以下简称“量云”）成立。这家企业依托珠三角的大数据高科技产业技术和人才优势，以及明阳智能在风电场开发、建设、机组研发及运维方面积累的丰富经验，将大数据、物联网技术



与风电领域深度融合。量云团队经过近十年的潜心研发和创新实践，从最初实现数据采集和远程监控，到目前已经拥有包括风电场前期数字化规划平台、智慧风电场运营管理平台等覆盖风电全生命周期的数字化解决方案，让智慧体现在风电场从规划到运行的每一个环节，提高风电场的“能动性”，为技术创新和产业结构升级创造无限可能。

## 数字化带来平准化度电成本“最优解”

随着我国风电开发的重心向中东南部地区转移，粗放式的风电场设计模式逐渐被淘汰。面对更为复杂的地质、地形条件以及更加密集的城镇和人口分布，精细化设计对风电场整体建设成本和建成后的发电效益产生着至关重要的影响。

由量云团队研发的 Deep Matrix Space™ (DMS) 数字化解决方案能够帮助客户快速了解一个区域最好的风能资源数据，并做出最优的风电场规划。量云公司总经理银磊向本刊记者介绍了该系统的运行模式：“依据大数据进行经济性概算，基于各个区域风能资源情况快速评估出工程造价、投资收益率、投资回收期等经济性指标，还能预测出合理的竞价电价，从风电场的全生命周期出发，计算出度电成本最优的风电场设计方案。与由设计院制定可行性方案的传统模式相比，DMS 系统能为用户节省大量时间和人力消耗。”具体来说，系统首先会对一个地区的风能资源进行遴选，在排除村庄和保护区等区域的基础上，再根据自主设定的 6 米/秒或 5.5 米/秒以上的风速值，自动选择最匹配的风电机组型号，依据现场地形情况模拟机组排布、升压站选址、集电线路和场区道路建设。用户可以在短短几分钟内完成风电场的初步规划。在确定可行性之后，通过启动 CFD 仿真模块，几小时之后就能得到一个更精准的排布方案，包括具体的机位选址、总体配置、

全场的投资情况以及风电场运行的整体收益。

此外，该系统还能够自主实时更新数据，在风电场投运之后定期对实际运行情况进行评估，同时给出优化建议，例如根据项目实际运行环境调整机组的控制策略等，让风电场运行状态持续优化，为客户带来更大的投资收益。

## 智慧运营平台提升项目管理“主动性”

在投入运行后，风电场的运行和维护管理模式是保证其运营效益的关键。赋予风电场“智慧”，提升管理系统的“主动性”，则能为用户大幅提升效率，同时显著降低运营成本。

“主动性”主要体现在哪些方面呢？

第一是智慧风电机组，实现风电机组、风电场和后台控制系统的联动。据悉，每台风电机组都配备一台 PLC 控制器，它会和中央监控系统进行通信、交互。风电机组设置了接近 1000 个数据标签点，每 1 秒采集 1 条数据，每 1 秒就有几百万条数据存入明阳智能总部，这样一天的数据量能达到 100G。此类互动是非常高效的。首先，在海量数据积累的基础上，数据挖掘的深度和精度得到很大提升；其次，不需要过多的人为干预，后台会根据整个风电场回传的数据情况计算风向、每台机组的出力差异、尾流情况等，从而发出指令，调整各台机组的姿态，甚至额定功率，使整个风电场的发电效率达到最佳，为业主创造更多收益。

第二是智慧风电场，实现基于设备状态的预防性维护。银磊告诉本刊记者：“先要清楚机组的故障机理，利用健康和故障状态时的运行数据，建立一个状态模型。再通过监控系统获取的海量数据，采用机器学习等核心算法，实现机组健康隐患以及故障预测，建立预警机制。目前，公司已建立超过 100 个零部件及系统预警模型，实现齿轮箱、发电机、主轴承、叶片等核心大部件全覆盖，准确率超过 85%。”这为风电场运行带来的成本下降是非常可观





的。同等装机规模风电场的维护人员数量大幅下降。以一座 5 万千瓦标准规模的风电场为例，2010 年，8 人才能完成现场维护工作，而现在减少到平均 2 人。在物资备件方面，由于系统能够提前预测机组的亚健康状态，从而可以在部件半年检、全年检或小风天的时候提前进行相应的隐患消除工作，减少了备件的损耗。“2018 年，这方面有了巨大的飞跃，因为预警功能发挥出较好的效果，大部件运维成本降低了 30%。”银磊认为，预警系统的高效运行将在未来为业主带来更多的收益。

第三是智慧并网。风电存在的波动性和间歇性会影响电网的接纳，所以，主动与电网进行交互满足对电网的支撑，建立“电网友好型”风电场也是提升发电效率的途径之一。量云新能源场站快速频率响应系统已获得中国电科院、新疆电科院、陕西电科院的认证，能够按照电网要求的有功—频率特性快速输出有功功率，实现电网频率快速调整，大幅提升风电场的并网友好性，保障大电网安全稳定运行。目前，该系统已经在新疆、宁夏、内蒙古、陕西等地的多个风电场成功

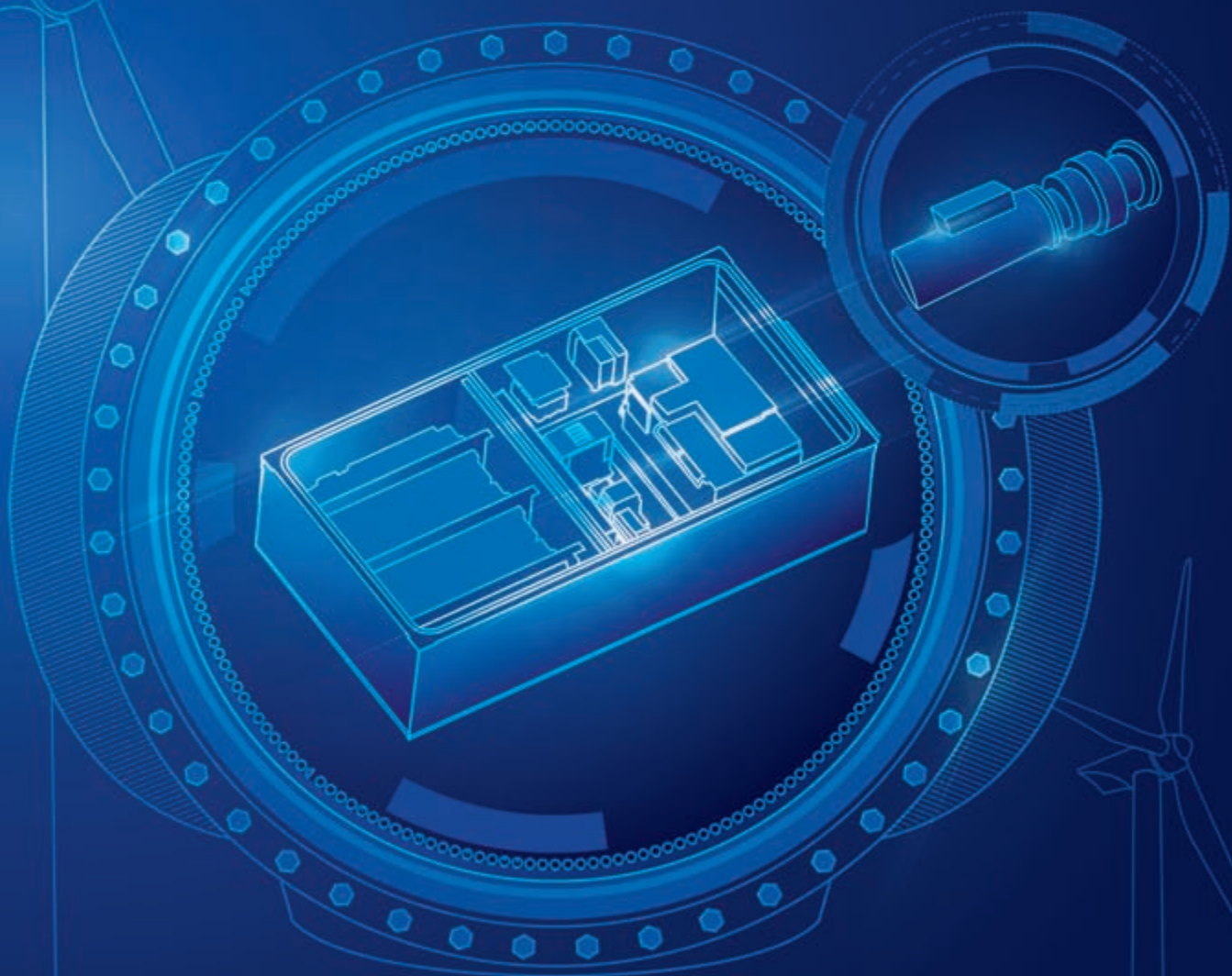
应用。该系统还可以取代传统 SVG 无功补偿装置，为用户节省包括 SVG 装置本身的造价、运行该装置所需要的电费（每年约 20 万元）以及后期维护所需投入。

除此之外，量云还在不断挖掘提升风电场联动性的可能，并取得了重大突破。该公司的海上机组偏航电机储能后备电源项目，是国内储能系统在海上风电机组“抗台”技术的首次应用。这项技术一经推出，立刻引起行业内客户及专家的广泛关注，一举斩获第三届国际储能创新大赛应用创新奖。在项目中通过为海上风电机组加装分布式储能系统，利用大数据技术对储能容量进行最优匹配，结合自主研发的风储协同控制策略技术等，保障风电机组在台风期间偏航系统的正常供电，使之即使在台风期间也能准确偏航，有效降低了 15% ~ 30% 的机组极限载荷，大大提高海上风电机组在台风期的安全性。

“当分布式能源得到普及之后，智慧微网会展现更大的调节能力。”在银磊看来，目前所做的一切都是为了提高系统的能动性，以更好地适应智慧的未来。☒

# 让电力生产更

安全、高效、智能化



CE GL

ISO 9001 质量体系认证

北京华电天仁电力控制技术有限公司

地址 / Add : 北京市海淀区西四环中路16号院1号楼

电话 / Tel : 010-57658000

网址 / Web : [www.gdtianren.com](http://www.gdtianren.com)

# 2018年欧洲风电行业投融资情况概览

编译 | 夏云峰



## 年度投资规模

### 一、整体情况

2018年，欧洲风电行业的融资规模达到650亿欧元（约合人民币5031亿元），较上一年增长26%。其中，新资产的融资规模最大，达到267亿欧元，比2017年高出20%。虽然这一规模接近于2015年和2016年的数据，但对应的装机容量却大得多，这主要得益于风电，尤其是海上风电的成本下降以及产业成熟。

项目并购是驱动欧洲风电行业投资规模整体增长的主要力量，相应的资金额达到189亿欧元，而2016年和2017年分别只有43亿欧元、91亿欧元。

全年，企业并购融资规模为52亿欧元，与2017年基本持平，延续着此前数年供应链市场集中度不断提升的

趋势。产业成熟度以及技术竞争力的持续提高，吸引了越来越多金融服务业等行业的投资者进入其中，成为项目股权持有者。这些合作伙伴对于发电商、开发商是至关重要的，后者需要回收资本来为新资产进行融资。

企业继续利用低利率环境和金融市场的流动资金，在资本市场中进行筹资。然而，2018年，欧洲风电企业仅在公共资本市场筹集到30亿欧元的资金，不足2017年的一半。

### 二、新资产融资

2018年，欧洲共有16.7GW的新增风电装机达成最终投资决定（Final Investment Decision, FID），比上一年增长45%，创造历史新高。这些装机来自于22个国家的190个陆上风电和海上风电项目。

从资金角度来看，2018年欧洲新增风电项目的投资规模同比增长20%，

达到267亿欧元。伴随产业的成熟以及竞争性拍卖的推进，风电产业的成本不断下降，使得单位欧元资本投资可以为更多新增装机融资。

全年，达成最终投资决定的新增陆上风电项目的投资规模再创历史新高，延续了自2011年以来同类投资规模持续增长的整体趋势。2015年以来，陆上风电的单位兆瓦新增装机资本支出不断下降，但慢于海上风电。2018年，获得融资的新增陆上风电装机容量也达到创纪录的水平。

海上风电方面，新项目的投资规模比2017年增长37%，达到103亿欧元。2016年，这一指标达到有史以来的最高水平，为182亿欧元，此后一年则大幅下滑。然而，与陆上风电项目相比，由于海上风电项目数量较少，并且通常装机容量更大，因为投资统计数据变动较大，呈现出的

趋势也需要审慎看待。全年达成最终投资决定的新增海上风电装机容量为4.2GW，是历史第二高水平。

164亿欧元的陆上风电新项目投资中，非欧盟国家获得了51亿欧元，涉及俄罗斯、土耳其、乌克兰、挪威以及塞尔维亚，规模是2016年的4倍，比2017年增长76%，反映出市场增长势头强劲。其中，俄罗斯以16亿欧元居首，紧随其后的乌克兰和挪威则分别获得12亿欧元、8亿欧元的投资。非欧盟国家风电单位兆瓦装机融资所需的平均资本支出为140万欧元，略高于欧盟国家的130万欧元。

在过去的数年间，欧洲新增风电项目所需的资本支出已经大幅下降。2015年，陆上风电单位兆瓦新增装机融资所需的平均资本支出为200万欧元，到2018年，该指标下降到140万欧元，降低了30%。海上风电正在走向成熟，其单位兆瓦新增装机所需的平均资本支出下降得更快，从2015年的450万欧元减少到2018年的250万欧元，4年间下降了45%。

2018年，欧洲风电行业投资在地域上表现出分布广的特点。排名前三的国家获得总投资额的43%，低于2016年73%以及2017年的64%。然而，由于各个市场的成熟度存在较大差异，近几年欧洲风电新增装机依然集中在少数国家，仍有不少国家未能吸引到投资，也没有新增装机。

全年的大部分新增投资都流向了北欧和西欧国家。英国获得的份额最大，占22%，金额达到59亿欧元。其中，超过90%的资金流向海上风电产业。瑞典获得的投资额仅次于英国，陆上风电行业吸引到37亿欧元投资，在这个细分领域引领欧洲。

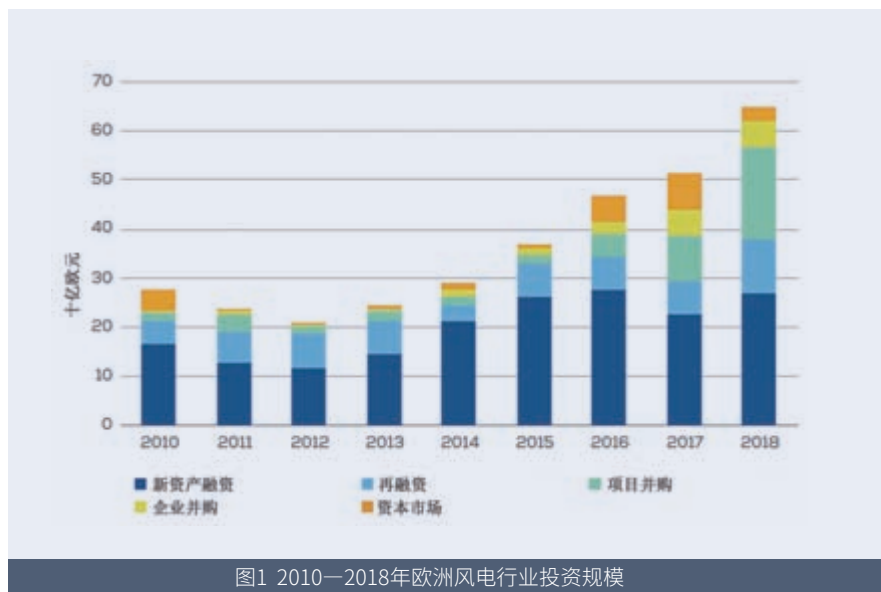


图1 2010—2018年欧洲风电行业投资规模

东南欧地区的风电新增投资规模仍然很小，仅为10亿欧元，占全欧洲的4%。受宏观经济、政治等因素的影响，投资者对在这一地区进行投资缺乏信心。

然而，其他市场也在崛起。通过此前几轮拍卖的推动，西班牙正吸引越来越多投资者的关注，2018年共有1.4GW的新增风电装机得到融资，位居欧洲地区第三。

在2018年的欧洲可再生能源新增装机投资中，风电占比超过60%，陆上风电独占38%。过去的5年，风电行业所获年度投资额以13%的年复合增长率稳定增长。

## 融资来源

### 一、债务融资 (debt financing)

2011年以来，欧洲风电行业的债务融资规模持续扩大。商业和所有权模式的创新，让更多投资者能够进入风电行业，也充分释放了银行、机构

贷款者以及出口信贷机构在提供长期融资方面的潜力。这带来了大量的可负担贷款，尤其是以无追索权形式提供的资金。

2018年，欧洲风电行业共获得269亿欧元的无追索贷款，其中的159亿欧元用于新建项目，110亿欧元用于风电场的再融资。

在海上风电市场的推动下，欧洲风电行业的年度无追索权贷款规模整体上呈现增长之势，2018年达到165亿欧元，是2016年的两倍多。目前，债务融资模式得到越来越多的应用，主要原因在于：低利率以及贷款者增多。同时，随着市场走向成熟，开发商开始利用该方式为自己的贷款进行再融资。2018年，欧洲海上风电项目的再融资规模达到85亿欧元。

自2011年开始，欧洲陆上风电项目每年获得无追索权贷款持续增加，年复合增长率为15%。

长期以来，无追索权融资在陆上风电中的应用规模要远远超过海上风

电，但 2018 年，两者几乎平分秋色。它占到全年海上风电新资本支出需求的 60%。用于海上风电新项目的无追索权贷款从 2017 年的 16 亿欧元迅速增至 2018 年的 80 亿欧元，占年度海上风电新资产融资的 77%，较上一年大幅提高。

在海上风电的推动下，欧洲风电市场中的再融资活动增多。2018 年，在欧洲风电行业通过再融资筹集到的近 110 亿欧元无追索权贷款中，85 亿欧元用于海上风电项目，24 亿欧元用于陆上风电项目。

上述趋势的出现，很大程度上归因于当前低利率的金融环境，开发商能够以更有利的利率、贷款期限等条件来重新调整已有的债务结构。此外，上述局面的出现，还部分源于项目融资方式的改变。

在欧洲陆上风电新项目融资金额中，无追索权贷款通常占到一半左右。对于海上风电而言，无追索权贷款所占的比重通常低于陆上风电。2018 年，这种趋势被彻底颠覆，在为全部达成最终投资决定的海上风电项目筹集的资金中，无追索权贷款占到 77%，这主要由一些大型海上风电场主导。

## 二、绿色债券发行

在用于风电项目融资的贷款中，债券发行已经成为重要部分。然而，2018 年发行的 189 亿欧元绿色债券中，仅有 26 亿欧元完全针对风电项目。自 2013 年以来，绿色债券发行规模增长强劲，并在 2018 年达到新高。由此筹集的资金主要用于为风电项目以及海上输电线路等提供融资。

企业债券则占到 86%，总规模为 163 亿欧元。发行债券最多的几家企业分别是 Iberdrola（55 亿欧元）、



图2 2010—2018年欧洲风电行业新资产融资走势



图3 2010—2018年欧洲陆上风电新资产融资走势



图4 2010—2018年欧洲海上风电新资产融资走势

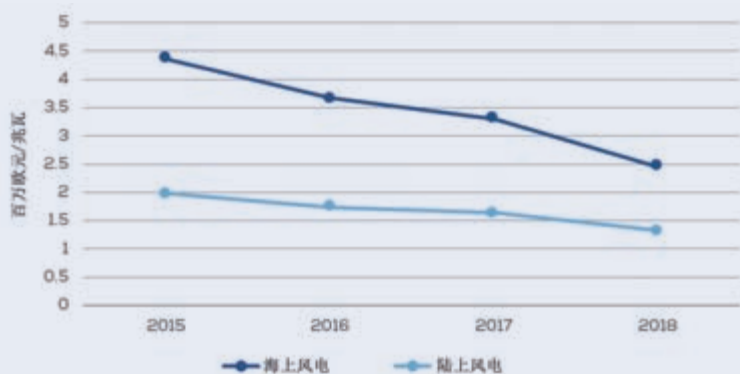


图5 2015—2018年欧洲风电单位兆瓦装机的资本支出走势

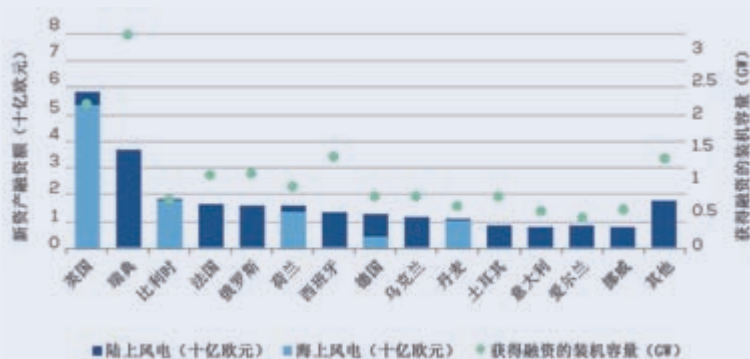


图6 2018年欧洲各国获得的风电新资产融资情况

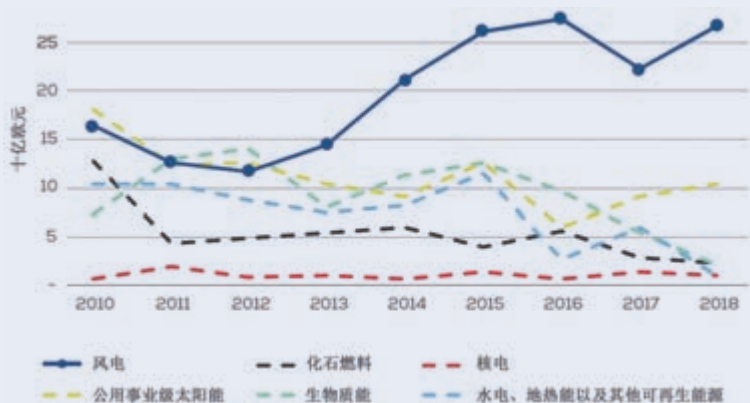


图7 2018年欧洲各类能源新增装机获得的融资额

Enel (34 亿欧元)、TenneT (15 亿欧元)、Innogy (11 亿欧元)。

虽然 2018 年的规模有所缩小，但项目债券已经成为贷款的重要替代形式。到目前为止，项目债券发行主要是针对海上风电项目以及输电线路。要增加陆上风电的项目债券发行规模，就必须将多个项目打包成更大型的投资组合。

### 三、项目并购

2018 年，欧洲风电行业的并购装机容量达到 11.1GW，比 2017 年增长 18%。其中，3.5GW 为海上风电装机，7.6GW 为陆上风电装机。英国为最大的二级市场，紧随其后的是法国和瑞典。这三个国家的合计并购装机容量占到总并购装机容量的 62%。

目前，并购活动多发生在工程准备 (pre-construction) 阶段。与此同时，对施工中的项目进行并购的活动也在持续增多，占 2018 年并购规模的 30% 以上。随着对风电产业信心的增强，机构投资者和金融服务业也更加愿意投资处于施工阶段的项目。之所以如此，是因为更早介入风电项目开发可以获得更高的回报。

2018 年，陆上风电的并购活动由发电商和机构投资者发起，企业和各类金融服务机构（银行以及保险公司）仅占 5% 的份额。由于规模和技术风险存在差异，陆上风电和海上风电吸引了不同类型的投资者。

日本的贸易公司和工业零售商（寻求将基础设施投资作为一个资产类别）都在欧洲海上风电产业中增加了存在感。2018 年，住友商事 (Sumitomo Corporation) 等大型企业收购了欧洲的海上风电项目股份。

为自有设施用电寻求清洁能源的

企业更愿意投资于陆上风电场，主要是由于这些项目在本成本、地理位置等方面更具有优势。

#### 四、企业可再生能源电力购买协议 (PPA)

2018年，欧洲地区签订的企业可再生能源（风能和太阳能）电力购买协议涵盖2.4GW的装机容量，创造历史新高。近年来，欧洲地区的企业可再生能源电力购买协议应用规模持续增长。2015年，所涉及的装机容量仅有1GW，2018年则超过6GW，增长了5倍。其中，超过85%的装机容量来自风电项目。

企业参与投资的模式多种多样，风电行业中应用最普遍的两类是：直接向项目投资，从而拥有基础资产；或者通过签订购电协议来成为买家。

就企业而言，成为买方是控制长期（有时多达20年）成本、促使能源来源多样化以及实现可持续发展目标的一种可行方式。持有资产则可能会带来一定的资本成本，这不仅是由于风电项目投资回收期长，也与风电资产所有权竞争日益激烈有关。与拥有更多经验的发电商或者其他公司相比，非风电行业的企业可能会发现很难以一个更好的价格执行可再生能源合同。

站在发电企业的角度来看，签订企业可再生能源电力购买协议同样能够带来益处。长期电价的透明以及确定的买方，对于降低债务融资成本是至关重要的。贷方通常在项目收益上要求提供下行保护（downside protection），以此确保借款能够得到偿还。从严格意义上来说，他们往往更倾向于相对较低、但可以保持长期

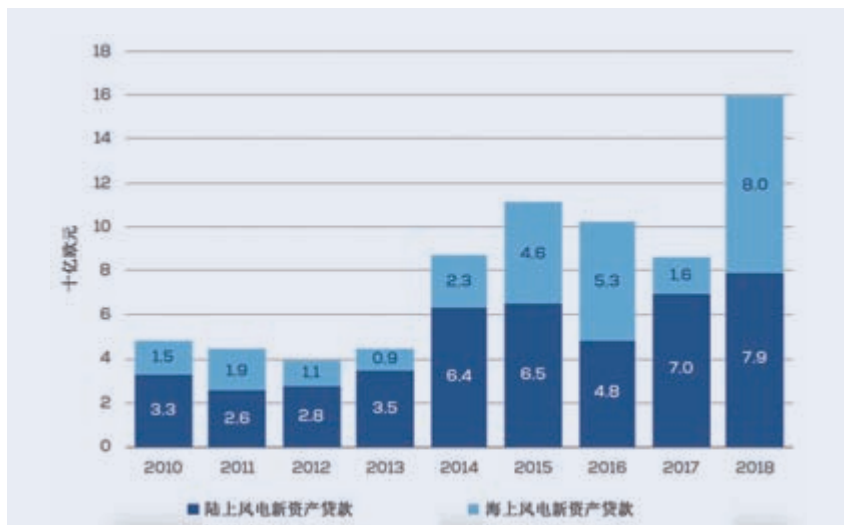


图8 2010—2018年欧洲陆上风电和海上风电新资产的无追索权贷款规模



图9 2013—2018年欧洲风电行业绿色债券发行规模

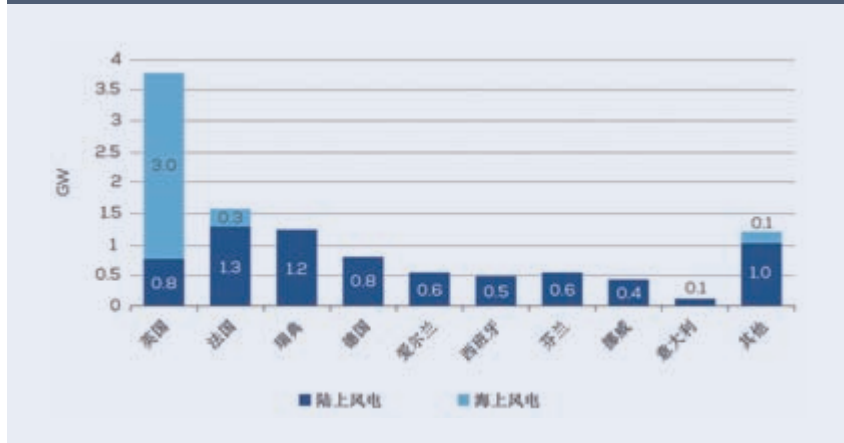


图10 2018年欧洲各国风电项目并购规模

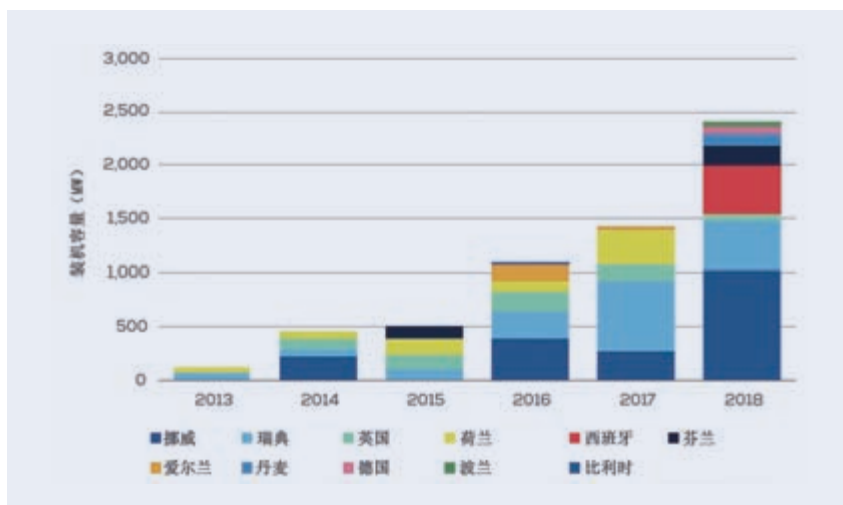


图11 2013—2018年欧洲地区签订的企业可再生能源电力购买协议的装机容量



图12 2019—2021年欧洲风电行业投资展望

稳定的收益，而不是更高、却存在风险的收益。

虽然2018年波兰、德国、丹麦和西班牙四国签订了各自的第一份企业可再生能源电力购买协议，但到目前为止，这种模式仍然主要在少数国家应用较多。北欧地区是此类交易规模最大的市场，紧随其后的是英国、荷兰。这些市场的共同特征是：可再生能源发展良好；电力市场互联；企业对绿色电力有着充足需求；更重要的是，不存在阻碍企业可再生能源电

力购买合同签订的监管。

影响企业可再生能源电力购买协议应用的一个重要因素是各国推动可再生能源发展的保障体系。以固定电价为例，在这种体系下，很难找到购电协议的价值主张（value proposition）。因此，随着固定电价制度在欧洲各国走向终结，依托市场化机制的驱动，企业可再生能源电力购买协议的应用规模很有可能在不久的将来会扩大。风电行业商业融资的增多，势必要求通过保障措施、企业可

再生能源电力购买协议以及其他对冲工具来提高收益的稳定性。

## 投资展望

此前两年，欧洲风电行业处于转型中，由实施固定电价政策转入采用拍卖制度，由此也造成了很多不确定性。然而，在欧洲此前举行的数轮拍卖中中标的项目目前正在陆续达成最终投资决定。

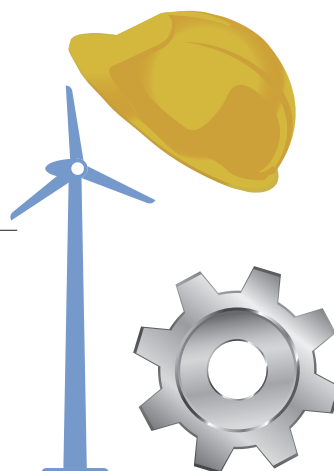
2018年，欧洲地区有超过9GW的可再生能源装机容量在拍卖中标：德国为4GW，土耳其为2.1GW，波兰为1GW，荷兰和俄罗斯均为800MW，希腊则超过300MW。其中的大部分装机来自于陆上风电，部分项目的最终投资决定已经达成。

测算显示，2019—2021年，欧洲风电行业的融资需求预计接近980亿欧元，对应的新增装机容量为53GW。

期间，欧盟成员国计划对46GW左右的陆上风电和海上风电装机容量进行拍卖。

从长远来看，风电资产所有者将不得不设法应对风电项目开发日益商业化所带来的挑战。WindEurope预计，到2030年，超过25%的欧洲风电装机容量都将实现完全商业化运营。虽然银行已经惯于处理商业融资部分，但证券机构投资者（equity institutional investor）或许会发现他们很难适应新的形势。这也凸显了融资解决方案的重要性，它能够有效防范商业风险，保持项目收益的稳定。✎（摘编自欧洲风电行业组织WindEurope发布的《2018年欧洲风能产业融资与投资趋势》报告）





# 2018年全球海上风电 安全事故显著减少

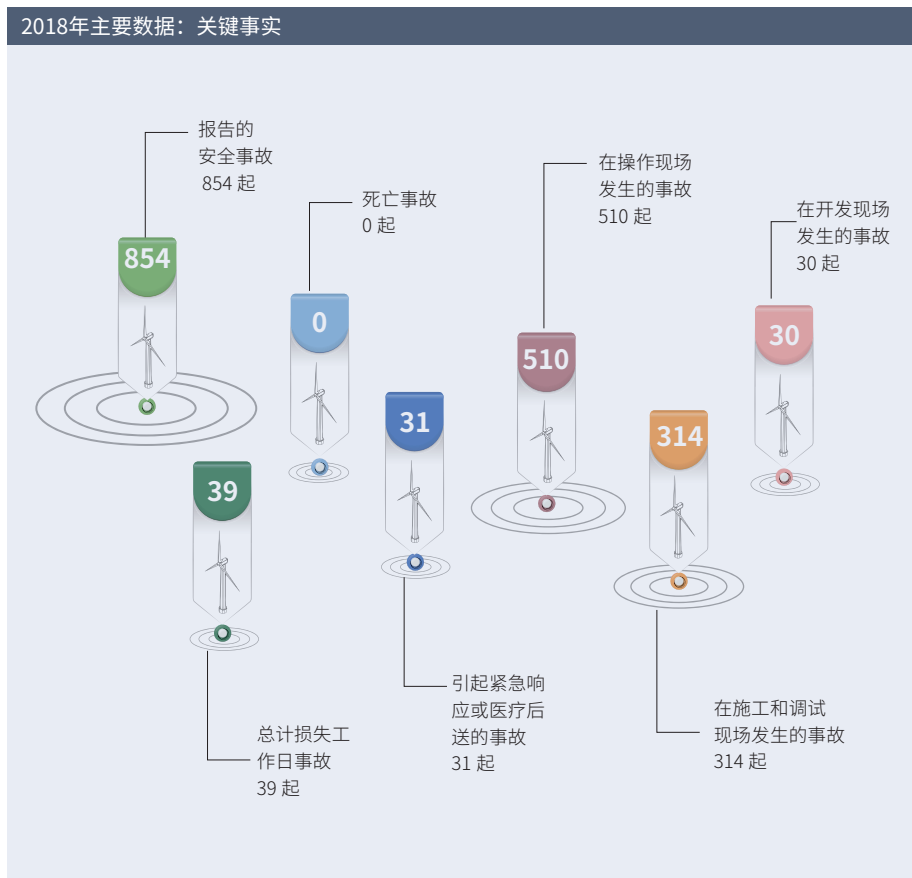
编译 | 张雪伟

2018年，全球海上风电累计装机容量达到23GW，较比2017年增长了4.5GW。欧洲国家是当之无愧的海上风电领航者，占全球海上风电累计装机容量的80%。与此同时，亚洲地区、美国也在积极推进海上风电开发。

随着发展的深入，海上风电安全也越来越受到业界的重视。日前，全球海上风电健康与安全组织G+（G+ Global Offshore Wind Health & Safety Organisation）发布了2018年全球海上风电安全事故统计数据报告（2018 incident data report），以详实的数据多方面展现了安全事故状况。

报告显示，2018年，每一百万工时可记录的总事故频率（TRIR）和每一百万工时综合损失时间事

2018年主要数据：关键事实



2018年主要数据：按事故发生的环节和按事故发生的地点

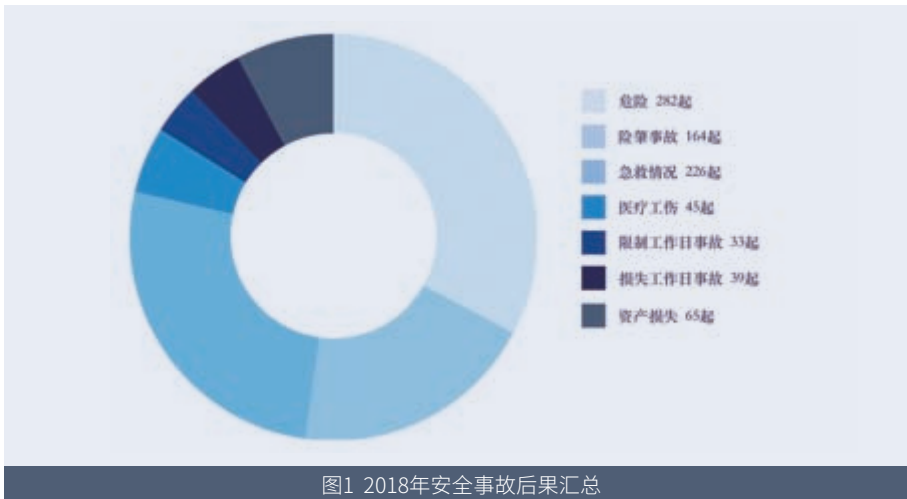
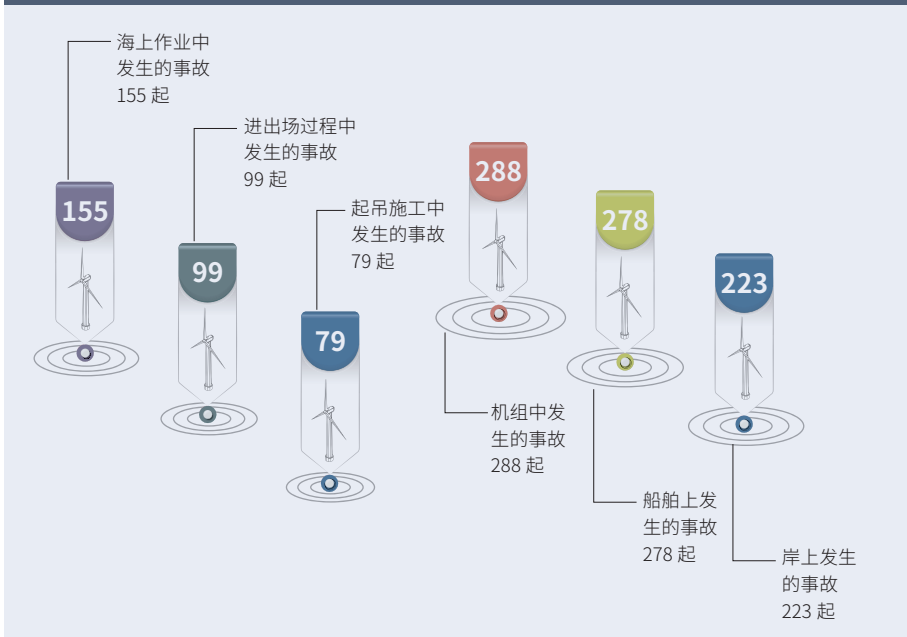


图1 2018年安全事故后果汇总

故频率 (LTIF) 都有显著的改善。本次报告还首次收集了各个国家和地区的数据, 统计的项目样本 90% 以上位于欧洲。另外, 美国和中国台湾有少量项目, 中国大陆的海上风电项目未被包括其中。

以“船舶上发生的事故”为例, 船舶能够在有限的时间内运载大批施工人员, 因此, 相关的安全事故极有可能影响一大群人, 应当引起足够重视。2018年, 共发生 278 起与船舶相关的事故及危险, 其中 34% 为高风险潜在事故。G+ 会员单位借助实践指南来提升安全性的工作、船舶技术的广泛提升, 以及船员的能力提高, 都有助于减少相关安全事故的发生。该项安全事故的发生次数已从 2017 年的 196 起降至 2018 年的 98 起。

从表 1 可见, 2018 年的安全事故数量较 2017 年有所下降, 这得益于海上风电产业的成熟。以下因素推动了海上风电产业的成熟: 业主之间的信息共享提升了整体的安全意识; 技术进步; G+ 会员单位对高风险潜在伤害的集中关注; 工作方式的持续改进。

损失工作日事故数量大幅降低, 需要医疗救治的工伤事故数

表1 2018年与2017年海上风电安全事故数据对照

	2017年	2018年	同比变化
工作时数	26815000	25709000	-4%
死亡事故	0	0	持平
损失工作日事故	49	39	-20%
限制工作日事故	30	33	10%
医疗工伤	78	45	-42%
总计	157	117	-25%
每一百万工时可记录的总事故频率 (TRIR)	585	455	-22%
每一百万工时综合损失时间事故频率 (LTIF)	183	152	-17%

表2 不同国家和地区的安全事故数据

国家和地区	项目数量	危险	险肇事故	急救情况	医疗工伤	限制工作日事故	损失工作日事故	资产损失	总计	工时 (百万)	LTIF/TRIR
丹麦	6	14	15	47	9	5	5	3	98	1.7	2.88/10.96
法国	1		2						2	0.5	无/无
德国	14	40	27	31	8	8	12	4	130	4.9	2.46/5.75
荷兰	3	2	2	6	1				11	0.1	无/9.94
瑞典	2	2	1			1			4	0.03	无/31.07
中国台湾	1	3	2						5	0.3	无/无
英国	40	216	111	137	26	18	22	58	588	14.9	1.48/4.43
美国	3	5	4	5	1	1			16	0.6	无/3.3

小  
贴  
士

TRIR: 每一百万工时可记录的总事故频率 (包括死亡事故、损失工作日事故、限制工作日事故、医疗伤害)

LTIF: 每一百万工时综合损失时间事故频率 (包括死亡事故、损失工作日事故)

量也大幅降低了。不过需要注意的是, 由于此前 G+ 会员单位对医疗工伤事故的定义不一致, 2017 年报告中该项事故的数量有所增长。该问题在 2018 年得到了解决, 这也是 2018 年的统计数据大幅下降的一个因素。

整体来说, 安全事故数量下降的背后有很多潜在驱动因素, 包括安全意识增强、G+ 会员单位对关键领域的集中关注, 尤其是船只运输以及人工操作, G+ 在这些方面投入了大量努力来不断更新实践指南。

## 高空坠物事故

2018 年, 全球海上风电领域发生了 66 起高空坠物事故, 较 2017 年降低 60%。风电机组设计的优化, 以及日益完善的工具固定装置, 降低了高空坠物事故发生的概率。61% 的高空坠物事故为险肇事故, 另外的 59% 则

为高危事故, 这意味着高空坠物是海上风电产业的一个重大安全威胁。为此, G+ 与高空坠物预防组织 DROPS 联合发布

了 2019 年版《海上风电高空坠物预防保障手册》(G+/DROPS Reliable securing booklet for offshore wind), 帮助业界降低高空坠物的风险。

按高空坠物事故发生的地点来看, 56% 发生在风电机组上, 26% 发生在船舶上, 15% 发生在岸上, 3% 发生在海上。最容易发生高空坠物事故的环节是海上作业, 其次为起吊施工。

## 地区概况

G+ 收集并核对了丹麦、法国、德国、荷兰、瑞典、中国台湾、英国和美国的海上风电安全事故数据。每个

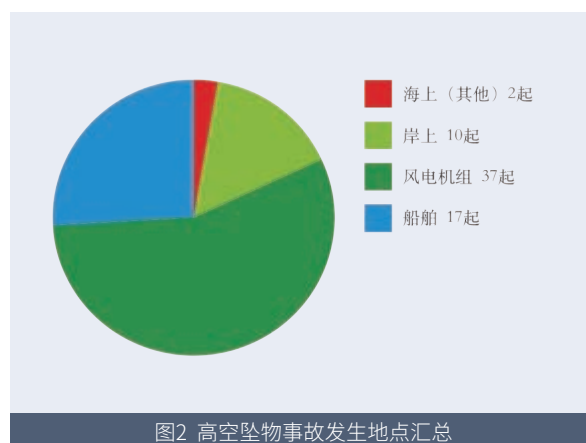


图2 高空坠物事故发生地点汇总

国家和地区的安全事故状况不尽相同, 以丹麦和荷兰为例, 急救类安全事故占比较大, 而在英国、中国台湾和瑞典, 多数报告的事故属于危险级别。这种差异意味着需要对每个国家和地区进一步探索, 以相互吸取经验。

G+ 海上风电安全事故数据的发布是确保行业信息透明和公开的关键步骤, 这种方式可以有效改善全球海上风电从业者的健康及安全风险状况。除了继续加强上述工作外, G+ 还将关注海上风电从业人员的心理健康及福祉。 (编译自 G+ Global Offshore Wind Health & Safety Organisation 的“2018 incident data report”)

**AUTOL 奥特**

不仅是集中润滑

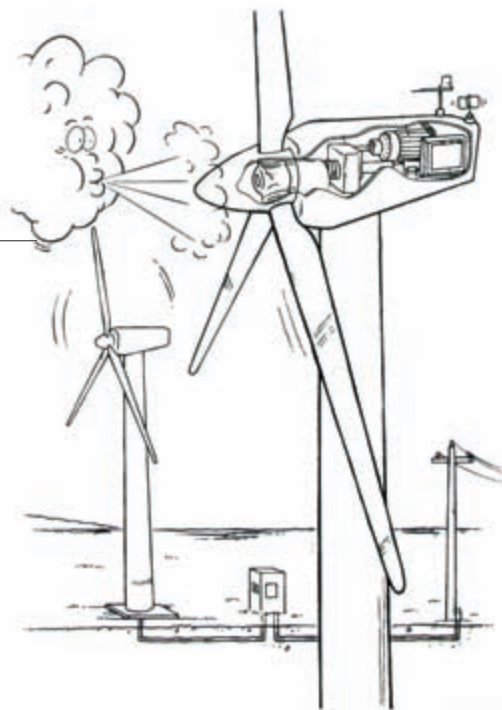
## 降低风机故障率

- 风电集中润滑系统
- 风电轴承废油收集系统



郑州奥特科技有限公司

郑州市高新技术开发区合欢街96号  
400-6836-862 www.autol.net



## 堪萨斯州风电发展启示

编译 | 孙一琳

当 Jim Warta 望向自己在埃尔斯沃斯县的牧场时，他看到了 11 台高耸的风电机组，当然还有这些设备运转所带来的经济收益。这位 77 岁的美国农民用风力发电的收益盖了一座新房子，他说：“发展风电对县、对州、对美国都有好处。”

而当 Matt Amos 望向自己家（位于里诺县）附近的土地时，映入眼帘的是乡村的宁静。他想保持这种状态：“选择在里诺县居住是为了远离城市的噪音和灯光。我要保护我们的财产权以及家庭的健康和福利，希望能为保证我们的权利而给风电场开发制定一些规则。”

过去的 20 年里，堪萨斯州凭借在西部广阔地域上建立的风电场，已经成为美国风电产业的领跑者。然而现在，当开发商试图到该州人口更密集的地区建设风电场时，阻力出现了。

堪萨斯州中部和东部的居民正在反对拟议中的风电项目，他们认为这些项目会对其所在社区产生永久性影响。但项目的停滞也会影响堪萨斯州推行可再生能源的计划。

位于中南部的里诺县是该州博览会在所在地，也是冲突的中心。在 NextEra 公司宣布计划安装 80 多台风电机组后，当地居民表示抗议。他们发起了一场持续数月的运动，向该公司管理者和县官员施压，要求将机组移到离他们土地更远的地方，或者直接取消该项目。

目前，这些抗议奏效了。尽管大多数委员支持该项目，但土地所有者签署了一份抗议请愿书，大部分人达成了一致，于是一位委员投了反对票，并在 6 月初阻止了该项目的立项。这也是十年来堪萨斯州第一次拒绝大型风电场的开发。

这一结果让风电倡导者们很意外。他们认为有必要加大力度，向堪萨斯居民宣传发展风电的意义，包括降低碳排放量、为社区提供就业机会以及增加税收。

堪萨斯州从发展风电中获益良多。据了解，风电发电量在该州总发电量中的占比达到 36%。能源公司 Evergy 的发言人 Gina Penzig 认为：“风力发电的成本有时低于其他形式的电力，节省下来的成本直接体现在电价上，为消费者带来实惠。”

目前尚不清楚 NextEra 公司是打算放弃里诺县的项目，还是通过进一步努力去说服委员会。

该公司发言人 Bryan Garner 在一份声明中表示：“我们，代表客户以及将会从项目受益的里诺县农业和商业社区，对 Pretty Prairie Wind 项目未能获得批准而感到遗憾。我们目前

正在复审该县的决议。”

## 风电机组为农民带来收益

尽管目前当地部分人对风电开发持怀疑态度，但埃尔斯沃思县居民 Warta 的经历说明了风电能在堪萨斯州实现蓬勃发展的原因，以及它们能给土地所有者带来的收益。过去 20 年里，开发商在堪萨斯州建设了至少 34 座风电场。

10 年前安装在 Warta 土地上的风电机组只是大型风电场的一小部分，当在萨利纳以西的 70 号州际公路上行驶时，一定能看到这座风电场。“我经历过开发风电给生活带来的变化，有了它们之后，我的生活轻松了很多。” Warta 坐在 2012 年靠风力发电收益建造的房子里说。

一场关于燃煤电厂建设的争论推动了风电在堪萨斯州的发展步入正轨。该州出于对污染的担忧而否决了在霍尔科姆地区建设一座燃煤电厂的提议。2009 年，立法者做出妥协，保留了建造一座较小规模燃煤电厂的可能性（尽管该电厂从未建成），但要求公用事业公司到 2020 年将可再生能源占比提高到 20% 以上。此后，开发商在 2009 年至 2013 年间建造了 15 座风电场。堪萨斯州风电的总发电量翻了一番。

根据堪萨斯公共事业委员会 (Kansas Corporation Commission) 的风能资源图，许多风电场在该州西部一些风速较高的地区拔地而起。它们坐落在开阔的地区，那里的农民和牧场主拥有大片土地，而房屋则在几英里之外。

事实证明，对于那些有幸拥有一

片风能资源较好土地的人来说，这些风电项目相当于财政福利，为他们增加很多收益。如今，这些钱正帮助农民抵消因农产品价格走低而造成的收入损失。

Warta 表示，他在最初的 10 年里获得了其自有土地上风力发电产出中 3% 的收益，最近这一比例上升到 5%，“现在的农业形势并不乐观。发展风电丰富了我的收入来源，直接增加了我的收入。”

## 居民提出反对的理由

随着堪萨斯州风电产业的持续扩张，开发商们渐渐地将目标对准人口更加密集的县。根据堪萨斯大学 (University of Kansas) 的数据，里诺县每平方英里大约有 49.7 人，相比之下，埃尔斯沃思县每平方英里只有 8.7 人。

当 NextEra 公司表示计划在风电场和未参与该项目的居民的住宅之间建造 2000 英尺（约合 609 米）的隔离带时，里诺县的一些居民迅速表示反对，并认为风电场与居民区的距离至少要有 2500 英尺（约合 762 米）。他们担心与风电机组距离过近会产生各种各样的后果，一些人认为风电机组会产生次声噪音，导致压力、耳鸣，甚至心脏问题。对此，NextEra 公司委托波士顿一家咨询公司进行了一项声学研究。该公司表示，机组产生的噪音音量会控制在 45 分贝以下，这是世界卫生组织建议控制的合理音量。2012 年，澳大利亚的一项研究表明，风电场确实会释放次声，但其程度与城市环境接近。

居民们还担心风电场会损害他们财产的价值。威奇托州立大学经济发展和商业研究中心代表哈钦森—里诺县商会 (the Hutchinson-Reno County Chamber of Commerce) 研究了堪萨斯州 23 个风电项目的房地产价值，结果表明没有足够证据证明二者之间存在关联。

但里诺县居民并不接受这样的结果，他们认为风电场会影响到自己对土地的使用和一些其他设施，比如飞机场的开发。

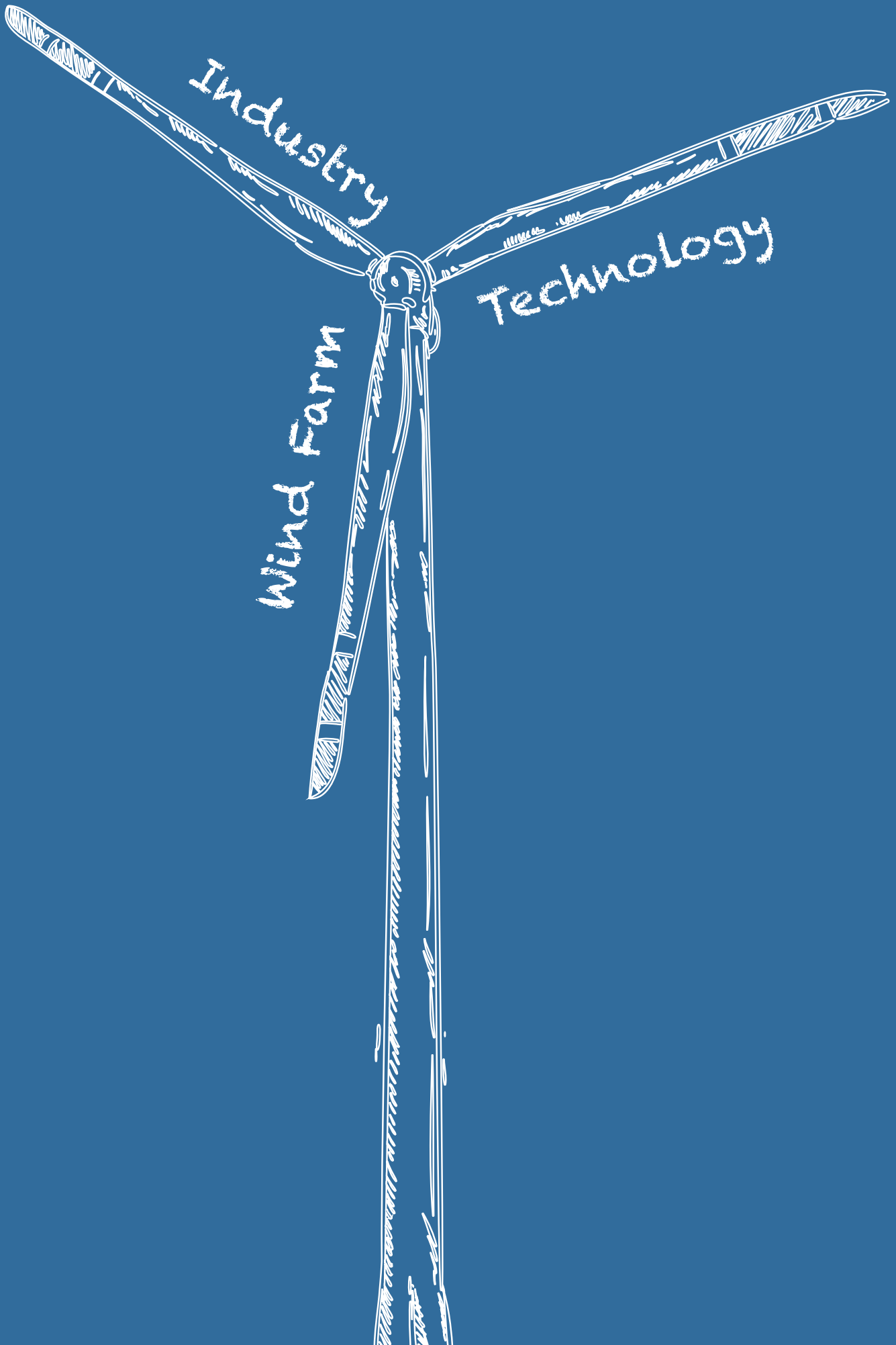
## 州法律应介入开发

2015 年，共和党控制的立法机构和州长 Sam Brownback 废除了强制性的可再生能源目标，不过风电仍然在持续增长，支持者也随之减少了对风电的宣传。

堪萨斯塞拉俱乐部 (Sierra Club, 环保组织) 成员 Zack Pistora 表示：“从那时起，我们就再也没有听到过有关发展风电对堪萨斯州有利的言论。”

四年后，Marion、Nemaha 以及 Neosho 等几个县的居民开始抵制风电开发，包括 Sedgwick 在内的其他县正在考虑暂停风电场的开发建设。虽然反对者目前在里诺县取得成功，但 Neosho 县的领导人最近推进了一个风电项目的立项。

各县的斗争使得辩论双方都呼吁立法者介入。目前，还没有关于风电机组与居民区间距的州法律规定，出台一些针对各州风电开发的指导政策是必要的。✎ (编译自 www.kansas.com)



Industry

Technology

Wind Farm

Energy

## 产业 | 56

海上风电工程质量  
验收项目划分探讨

## 风电场 | 62

再分析资料在风速  
数据插补延长中的  
应用方法研究

## 技术 | 70

双馈风电机组转速  
控制与失控分析

柔塔二阶涡激振动  
阻尼值分析

定桨距风电机组叶根  
加长改造评估

三桩基础海上风电  
机组结构波浪载荷  
实验研究



# 海上风电工程质量验收项目划分探讨

文 | 申岳进, 王忠锋

目前, 海上风电场一般指离岸 10km 以上、水深超过 10m 的近海风电场。与陆上风电场相比, 海上风电场具有不占用土地资源、基本不受地形地貌影响、风能资源丰富、年利用小时数更高、风电机组单机容量更大、适宜大规模开发等优点, 近年来得到蓬勃发展。海上风电场设计、施工技术日益成熟, 相关的标准规范逐步建立健全, 但适用于海上风电场建设的工程质量验收项目划分标准目前尚不统一, 各参建单位参照不同的行业标准编制的工程质量验收项目划分表形式多样、详略不一。特别是第一次参与海上风电场建设的单位在对工程质量验收项目进行划分时存在漏项、划分不合理等问题, 极易引发工程验收缺项, 移交生产资料不齐全, 发生质量问题时无法追溯, 项目评优时受影响等后续问题。

本文依托某在建海上风电场项目, 在全面总结借鉴以往多个类似项目的经验基础上, 通过对不同工程共性和差异的分析, 充分考虑了该项目的现场施工实际, 对其质量验收项目划分进行了详细分析, 提出海上风电工程质量验收项目划分原则和注意事项, 并给出了具体划分结果。

## 海上风电工程质量验收项目划分规范标准

《风力发电工程建设施工监理规

范》NB/T31084 - 2016 以及《风力发电工程施工与验收》第二版对风力发电工程的质量验收进行了划分, 其划分模式对陆上风电场的参考意义更大, 不太适用于海上风电场。海上风电场增加了海上升压站、220kV 海缆等设施, 与陆上风电场的基础结构形式及设计不完全一样、施工方法截然不同、质量管理要点差异较大, 所以, 对其进行质量验收项目划分时应充分考虑海上工程设计和施工特点。

目前对于海上风电场质量验收项目划分主要参照《电力建设施工质量验收及评价规程 第 1 部分: 土建工程》DL/T5210.1 - 2012 (以下简称“电力规程”) 及《电气装置安装工程的质量检验及评定规程》DL/T5161.1 ~ 5161.17 - 2002。这两个规程针对火力发电厂进行了详细的质量验收划分, 配套表格齐全。海上风电场项目的陆上集控中心土建和安装工程可直接借鉴该规范, 其他部分可参照执行。一般陆上集控中心的房屋建筑申领房产证, 需通过住建部门质监站的质量监督, 因此应参照《建筑工程施工质量验收统一标准》GB50300 - 2013 进行分部分项划分。

## 海上风电工程质量验收项目划分总体要求

质量验收项目划分应有编制说明, 其主要内容为工程概况及特点、划分

依据、验收记录表引用或参照的规范标准。划分时一定要依据本工程的设计施工图, 不能照抄照搬其他项目。对无相应划分标准的单位工程 (如海底电缆敷设、安全监测等) 应重点说明项目划分的原则和参考依据。

施工单位进场后即应按其承包的施工范围、设计内容、施工工艺及有关验收规范进行项目划分, 并上报监理单位审批。根据工程特点自行修改、编制的分项、检验批验收记录表应经参建各方确认, 并作为项目划分的附件。由监理统一汇总编制海上风电工程项目划分总表, 报业主批复后下发执行。监理单位应在划分表中明确质量控制点, 即见证点 W (witness point)、停工待检点 H (hold point)、旁站点 S (standby point)。在实施过程中如果出现设计变更、工艺调整等情况, 需要对不合理部分进行及时修订, 并在竣工阶段提交最终版划分表, 据此进行工程资料归档。

## 海上风电工程质量验收项目划分原则

无论按何种模式进行质量验收项目划分, 其基本原则是条理清晰、分类合理、不重复不漏项, 满足工程施工质量验收规范要求。无论招标分多少个标段, 都要立足于项目全局, 而不能局限于本合同标段进行项目划分。

海上风电工程应按系统分类、单

位工程（子单位工程）、分部工程（子分部工程）、分项工程、检验批对项目进行划分，其定义及划分原则如下：

(1) 系统分类是借鉴电力规程的做法，把位置相对集中、同类型的单位工程归集到一个系统里。

(2) 单位工程是具有独立生产（使用）功能或独立施工条件的建筑物及构筑物；规模较大的单位工程，可将其具有独立生产（使用）功能或独立施工条件的部分划分为一个子单位工程。

(3) 分部工程的划分应按专业性、建筑（安装）部位确定；当分部工程较大或较复杂时，可按材料、设备种类、施工特点、施工工序、专业系统及类别等划分为若干子分部工程。

(4) 分项工程按主要工种、材料、施工工艺、设备类别进行划分，由一个或若干个检验批组成。

(5) 检验批是按相同的生产条件或按规定的方式汇总起来供检验用，由一定数量样本组成，根据施工及质量控制和专业验收需要进行划分。

根据海上风电场项目特点，通常可将其分为风力发电机组、海上升压站、海底电缆、陆上集控中心等四个系统。随着海上风电场距离海岸越来越远，海上设置直流换电站势在必行，质量验收划分时可增加一个直流换电站系统。

(1) 在风力发电机组系统中应将每一台机组划分为一个单位工程。

(2) 海上升压站系统包括土建（钢结构安装）工程和电气设备安装工程，可划分为两个单位工程+N个子单位工程，也可划分为N个单位工程。

(3) 海底电缆系统包括 35kV 集电线路和 220kV 海缆工程，其下可按回路划分为单位工程或子单位工程。

(4) 陆上集控中心系统包括建筑工程和设备安装工程，可划分为两个单位工程后再细分为N个子单位工程，也可直接划分为N个单位工程。对于个别项目设置有开关站、计量站的可归集到这个系统里单独设置单位工程。

海上风电场的送出线路工程一般由电网公司负责实施，若送出线路的工程量较大也可单独设立一个系统；若只有少量架空线路，可在陆上集控中心系统单列一个单位工程。

## 海上风电工程质量验收项目划分注意事项

根据上述总体要求和原则进行质量验收项目划分时，须结合工程实际情况重点注意下面事项：

(1) 对于在工厂内加工制作的钢管桩、套笼、导管架等钢构件，一般业主委派驻厂监造进行监督管理，钢构件出厂时监造人员签发放行单，提供相关试验报告。钢结构制造厂有成熟的检查检验模式，如果要求制造厂按照工程施工表式进行资料报验实施起来很困难。建议把钢构件看作成品、半成品，取消钢结构加工制作分项。但是在基础沉桩检验批中一定要有制造厂家的原材料抽检报告、焊缝检测报告等检查内容。

(2) 陆上集控中心场地吹填工程一般作为海上风电场项目的前期工程提前招标实施，但质量划分也应纳入到主体工程中来。

(3) 对于应用于主体工程实体的试桩工程，应作为该风力发电机组单位工程的一个基础分部进行划分，质量验收资料归集到风电场主体施工单位。试桩完成后立即拆除的可不进行划分。

(4) 不同风电机组供应商对安装工艺要求不同，项目划分时应按不同风电机组分别划分。

(5) 基础防冲刷防护工程一般采用砂被、抛石或两种形式相结合，可作为风电机组基础分部工程的一个子分部工程进行划分。

(6) 220kV（110kV）海缆以一个回路为一个单位工程，若为单芯海缆，则将每根海缆划分为一个子单位工程。应套用土建工程标准将海缆登陆施工涉及的顶管作业、电缆沟施工等划分至检验批。

(7) 风电机组安全监测的划分容易被遗漏，安全监测的时间一般是风电场运行设计寿命期，其施工质量验收项目划分也很重要。考虑到安全监测单独发包，监测仪器设置在风电机组和海上升压站上，安装工序相对简单，建议单独划分为单位工程。

(8) 陆上集控中心与海上升压站海陆联调可放在海上升压站系统内单独作为一个单位工程。设备单体调试也应在分部分项中予以体现。

(9) 海上升压站基础沉桩一般由风电机组施工单位实施；海上升压站上部组块由制造厂在工厂内加工制造，然后运输到海上进行吊装；钢管桩和导管架一般由另外一家钢结构厂制造。对于这种由多家单位实施的项目，在分部分项划分时应由监理单位进行统筹划分，各家分别编制施工资料并对自己合同内容负责，最后交由一家单位收口组卷。

(10) 子单位工程在质量验收时也应按照单位工程质量验收流程执行，建议尽量少设置子单位工程。同时建议将单位工程进行连续编号，这样便于单位工程数量统计，也有利于优良率计算。

## 某海上风电工程质量验收项目划分实例

某海上风电场离岸距离 42 公里，安装有 75 台风电机组，总装机容量 300MW，风电场配套建设一座 220kV 海上升压站和一座陆上集控中心。风电机组基础分别采用高桩承台基础和钢管桩单桩基础两种形式，风电机组采用 4.0MW 和 4.2MW 两个厂家的主流机型，吊装方案既有分体吊装又有整体吊装，非常具有代表性。

本项目质量验收项目划分表主要包含 4 部分内容：工程编号、质量检验项目、验收单位、验收标准。工程编号包括工程分期号、系统号、单位（子单位）工程、分部（子分部）工程、分项工程、检验批，电气安装工程只

划分到分项工程。监理单位验收应设定监理质量控制点（W、H、S）。划分表格式范例见表 1。

按照功能和集中度，将海上风电场分为风电机组、海底电缆、海上升压站、陆上集控中心四个系统。海上部分的表式见表 2。

(1) 在风电机组系统中以每台机组为一个单位工程，它由风电机组基础、防冲刷、塔架、机舱轮毂、叶片、TUPU 组装、监控监测、风电机组电缆、防雷接地网等若干个分部工程组成。将风电机组的安全监测单列为一个单位工程。

(2) 海底电缆系统包括 220kV（110kV）海缆与风电机组间 35kV 海缆。220kV 三芯复合光电以一个回路为一个单位工程，海缆由登陆段敷设、

登陆上集控中心、登海上升压站、海上敷设、终端与中间接头、电气交接试验等分部组成。35kV 海缆以一个回路为一个单位工程，风电机组之间及登升压站每段海缆为一个分部工程。

(3) 海上升压站系统包括土建（钢结构）工程和电气设备安装调试工程。将土建工程划分为一个单位工程，包括升压站基础、钢结构平台、舾装等分部工程；安装调试工程包括主变、GIS、SVG、柴发、高压细水雾、暖通、通信、防雷接地、安全监测等单位工程。

(4) 陆上集控中心系统编号为 04，主要包括建筑工程和安装工程。建筑工程按单体建（构）筑物划分为单位工程，由基础、框架、砌体、屋面等若干个分部工程组成。将安装调试工程划分为主变、GIS、SVG、通信、

表1 质量验收分部分项划分表格式范例

工程编号								工程名称	验收单位						监理控制点	验评标准及表号
工程分期号	系统号	单位工程	子单位工程	分部工程	子分部工程	分项工程	检验批		施工单位	勘测单位	设计单位	监理单位	建设单位			
04	01							风力发电机组安装工程								
		47, 66	00					某供应商 4.0MW 风力发电机组 (高桩承台、分体安装)	√		√		√	√		
				01				风力发电机组基础	√		√		√	√		
					00			风力发电机组基础	√		√		√	√	JTS257 — 2008	
						01		钢管桩沉桩	√			√	√		JTS257 — 2008	
						01		测量放样	√		√		√	√	W JTS131 — 2012	
						02		钢管桩沉桩	√				√		S JTS257 — 2008	
						02		基础防冲刷	√				√		JTS257 — 2008	
								...								
				02				塔筒	√				√		参照厂家安装手册	
					00	01		塔筒安装	√			√	√			
						01		底塔筒安装	√				√	S		
								...								

表2 某海上风电工程质量验收项目划分表

系统及编号	单位工程及编号	子单位工程及编号	分部工程	子分部工程	分项工程
风力发电机组系统 01	风力发电机组工程 01-75	00	风力发电机组基础工程 (钢结构基础)	基础施工	钢管桩制作与沉桩；导管架制作与安装；附属设施制作与安装；灌浆施工
				防护设施制作与施工	基础防护成品制作；基础防护施工
			风力发电机组基础工程 (混凝土承台基础)	基础施工	钢管桩制作与沉桩；砼承台施工；附属设施制作与安装；灌浆施工
				防护设施采购与施工	基础防护成品制作；基础防护施工
			风力发电机组安装工程 (分体安装)	塔架安装	底塔安装；中塔安装；顶塔安装
				机组安装	TUPU 组装；机舱轮毂拼装；机舱轮毂安装；叶片安装；塔筒内附属构件安装
				电缆连接	电缆敷设；电缆接头制作
				防雷接地	避雷器安装；接地系统连接
	监控系统	塔筒内监控系统安装调试；塔筒外监控系统安装调试			
	整机调试	静态调试；带电试运			
	风力发电机组安装工程 (整体安装)	除上述五个子分部外增加：整体安装	底塔与基础安装；塔筒外附属构件安装		
风力发电机组安全监测 76	风力发电机组安全监测 01-75	安全监测	/	二向倾角计安装；二向加速计安装；腐蚀测点安装；钢筋计安装；应变计安装；应力计安装；几何水准点安装；静力水准点安装；塔筒监测仪器（如参比电极）安装；监测电缆敷设；数据采集装置安装与调试	
海缆系统 02	220kV 海缆敷设 01-02	00	登陆段海缆敷设	/	水平定向钻穿越河道施工；穿（过）堤施工；陆上海缆牵拉
			登陆上集控中心施工	/	电缆进集控中心施工；电缆上塔架施工
			上海海缆敷设	/	KP7.2 至 KP22.5 海缆敷设；KP22.5 至 KP38.7 海缆敷设；KP38.7 至海上升压站海缆敷设
			登上海升压站施工	/	海缆穿 J 型管施工；平台电缆敷设；弯曲限制器、锚固装置等附件安装
			电缆接头制作	/	KP7.2 处硬接头制作；KP22.5 处硬接头制作；KP38.7 处硬接头制作；陆上集控中心电缆终端制作；海上升压站电缆终端制作
			电缆检测及试验	/	光纤检测；耐压试验
	第 1 回至第 12 回 35kV 海缆敷设 03-14	00	1#-2# 风电机组间 35kV 海缆敷设	/	海底电缆中间段敷设；电缆穿 J 型管施工；弯曲限制器、中心夹具、锚固装置等附件安装；电缆封堵及防火阻燃；塔筒内缆线布放；电缆终端制作及安装；光纤监测；电缆试验
			2#-3#；3#-4#；4#-5#；5#-6# 分部工程划分同上		
		6# 风电机组至海上升压站段海缆敷设	/	海底电缆中间段敷设；电缆穿 J 型管施工；弯曲限制器、中心夹具、锚固装置等附件安装；电缆封堵及防火阻燃；塔筒内缆线布放；登陆海上升压站平台海缆敷设；电缆终端制作及安装；光纤监测；电缆试验	

(转下表)

(接上表)

系统 及编号	单位工程 及编号	子单位工程 及编号	分部 工程	子分部 工程	分项 工程
海 上 升 压 站 系 统 03	海上升压站 安装工程 01	00	基础工程	/	钢管桩制作与沉桩；导管架制作与安装；附属构件制作与安装；灌浆施工
			上部组块制作工程	/	零部件加工；钢结构组装及焊接；多层钢结构组装及焊接；铁舳件安装；钢结构防腐涂装；钢结构防火涂装
			舾装工程	/	防火绝缘及隔热材料敷设；甲板敷料施工；天花板安装；地板安装；门窗安装
			通风与空调	/	风管机附件安装；空调设备安装及调试
			给排水系统	/	给水系统安装；排水系统安装；给排水系统试验
			高压细水雾消防灭火系统	/	高压细水雾消防灭火系统安装；系统喷雾试验
	主变压器系 统设备安装 02	00	主变压器安装	/	主变压器本体安装；主变压器检查；主变压器附件安装；主变压器注油及密封试验；主变压器整体检查
			主变压器系统附属设备安装	/	中性点隔离开关安装；中性点电流互感器、避雷器安装；控制柜及端子箱检查安装；软母线安装
			主变压器带电试运	/	主变压器带电试运
	主控及直 流设备安 装 03	00	主控室设备安装	/	控制及保护和自动化屏安装；直流屏及充电设备安装；二次回路检查及接线
			蓄电池组安装	/	蓄电池安装；充放电及容量测定
	220 (35) kV 封闭式组 合电器安 装 04	00	封闭式组合电器检查安装	/	基础检查及设备支架安装；封闭式组合电器本体检查安装；电压互感器、避雷器安装
			配套设备安装	/	电压（流）互感器安装；避雷器安装
			就地控制设备安装	/	控制柜及就地箱安装；二次回路检查及接线
			带电试运	/	带电试运
	0.4kV 低 压配 电装置安 装 05	00	站用低压配电装置安装	/	低压变压器安装；低压盘安装；母线安装；二次回路检查接线
			带电试运	/	带电试运
	无功补 偿装 置安 装 06	00	电抗器安装	/	电抗器安装
			带电试运	/	带电试运
	全 站 电 缆 施 工 07	00	电缆管配置及敷设	/	电缆管配置及敷设
			电缆架制作及安装	/	电缆架制作及安装
			电缆敷设	/	屋内电缆敷设；屋外电缆敷设
			电力电缆终端及中间接头制作安装	/	电力电缆终端制作及安装；电力电缆中间接头制作及安装
			控制电缆终端制作及安装	/	控制电缆终端制作及安装
			35kV 电缆线路施工	/	35kV 电缆线路施工
			电缆防火与阻燃	/	电缆防火与阻燃
	全 站 防 雷 及 接 地 装 置 安 装 08	00	避雷针及引下线安装	/	避雷针及引下线安装
			接地装置安装	/	屋内接地装置安装；屋外接地装置安装
	通 信 系 统 设 备 安 装 09	00	通信系统一次设备安装	/	光纤及设备安装；程控交换机安装
			通信蓄电池安装	/	免维护蓄电池安装；通信蓄电池充放电
			通信系统接地	/	通信系统防雷接地施工

(转下表)

(接上表)

系统及编号	单位工程及编号	子单位工程及编号	分部工程	子分部工程	分项工程
海上升压站系统 03	全站电气照明装置安装 10	00	全站照明安装	/	管路敷设；管内配线及接线；照明配电箱（板）安装；照明灯具安装
			全站照明回路通电检查	/	全站照明回路通电检查
	事故保安电源设备安装 11	00	柴油发电机组安装	/	柴油发电机组安装
			柴油发电机自投试验	/	柴油发电机自投试验
			逆变电源装置安装	/	逆变电源装置安装；二次回路检查及接线
			事故保安电源带电试运	/	事故保安电源带电试运
	智能建筑 12	00	通信网络系统	/	通信系统；卫星通信；公共广播系统
			监控系统	/	空调监控系统安装、空调监控系统调试；火灾报警系统安装、火灾报警系统调试；闭路电视系统安装、闭路电视系统调试
	交接试验 13	00	变压器	/	变压器交接试验
			电抗器、消弧线圈	/	电抗器、消弧线圈交接试验
			互感器	/	互感器交接试验
			SF6 断路器	/	SF6 断路器交接试验
			电力电缆	/	电力电缆交接试验
			避雷器	/	避雷器交接试验
			接地装置	/	接地装置交接试验
			移动式电气设备接地	/	移动式电气设备接地交接试验
	上部结构海上安装调试 14	00	上部组块海上吊装	/	上部组块海上吊装
			海陆联调	/	海陆联调
			倒送电	/	倒送电
	海上升压站安全监测 15	00	安全监测	/	腐蚀测点安装；应变计安装；应力计安装；几何水准点安装；静力水准点安装；监测电缆敷设；数据采集装置安装与调试

防雷接地等单位工程。该系统的项目划分可直接采用电力规程中的表式。

## 结语

正如地球上没有完全相同的两

片树叶，考虑问题的角度不同导致项目划分方式不同，没有绝对的对与错。海上风电场若有类似电力规程的统一标准，将会大大提高工作效率、减少分歧与争执。在行业出台统一标准之前充分探讨划分形式、

理顺划分思路，能够对海上风力发电工程的质量验收、创优评比产生积极作用。📌

（作者单位：申岳进：江苏省新能源开发股份有限公司；王忠锋：中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司）



摄影：徐宁

# 再分析资料在风速数据插补延长中的应用方法研究

文 | 高洁, 胡己坤, 刘雨佳, 袁红亮, 刘玮

风电场建设前要对拟建区域的风能资源进行评估, 评估的主要依据是现场所立测风塔或测风仪器获取的实际观测资料。但由于现场一般较为偏远, 在测风期间可能出现故障或其他情况, 从而导致测风数据完整率不能满足《风电场风能资源评估方法》GB/T18710—2002 要求。为准确评估现场的风能资源, 需要对测风塔测风数据进行插补延长。在测风数据完整率不足的情况下, 可根据附近长期测站的观测数据对测风数据进行插补订正, 但在实际工程中多数情况下需要采用再分析数据作为参考, 因此采用中尺度再分析资料作为插补参考的可行性成为重要的研究方向。目前已有学者分析了采用中尺度数据进行插补延长的几种方法, 并在地形较为平坦的内蒙古地区进行了验证。但对多种地形条件进行分析讨论的研究相对不足。

本文针对不同地形条件对比研究了 7 种插补延长方法的可行性, 分析得到不同地形、不同条件下最适宜的插补延长方法, 对实现风能资源的精细化评估具有较高的工程指导意义。

## 风速数据插补延长方法

当目标地点的风速和参考点同期测量的数据之间具有较好的相关关系

时, 就可利用参考点数据插补延长目标地点风速数据的空白, 目前主要的风速插补延长方法包括以下 7 种。

### 一、线性最小二乘法 (LLS, linear least squares)

线性最小二乘法所得到的拟合线性曲线  $y = mx + b$  计算方法如下:

$$m = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad (1)$$

$$b = \bar{y} - m\bar{x} \quad (2)$$

其中,  $S_{xx}$ 、 $S_{xy}$  采用以下公式进行计算:

$$S_{xx} = \sum_i (x_i - \bar{x})^2 \quad (3)$$

$$S_{xy} = \sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (4)$$

### 二、总体最小二乘法 (TLS, total least squares)

总体最小二乘法所得到的拟合线性曲线  $y = mx + b$  计算方法如下:

$$m = \frac{S_{yy} - S_{xx} + \sqrt{(S_{yy} - S_{xx})^2 + 4S_{xy}^2}}{2S_{xy}} \quad (5)$$

$$b = \bar{y} - m\bar{x} \quad (6)$$

其中,  $S_{xx}$ 、 $S_{yy}$ 、 $S_{xy}$  分别定义如下:

$$S_{xx} = \sum_i (x_i - \bar{x})^2 \quad (7)$$

$$S_{yy} = \sum_i (y_i - \bar{y})^2 \quad (8)$$

$$S_{xy} = \sum_i (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x}) \quad (9)$$

这种方法与“线性最小二乘法”

的不同之处在于, 它最小化的误差项是每一个测量的数据点与最佳拟合直线之间垂直距离的平方和。

### 三、风速分类法 (SS, speedsort)

风速分类法同样是建立  $y = mx + b$  的线性曲线。在风速分析中, 风速排序是唯一的, 在进行线性曲线拟合前, 先对目标风速和参考风速进行排序, 然后设定拟合曲线与风速的偏差值为一个固定值或采用长期平均参考风速的一半, 最后使用正交最小二乘法进行拟合, 通过拟合的结果得到目标地点的风速。

### 四、垂直切片法 (VS, vertical slice)

垂直切片法是利用从目标风速和参考风速的散点图上得到的分段线性曲线来进行风速预测的。为了获得每一段的线性曲线, 首先将目标风速与参考风速的散点图沿着  $x$  轴分成  $n$  个大小相同的切片 (垂直切片), 分别计算每个切片里的平均目标风速值。然后, 在每个切片中指定一个点, 该点的  $x$  值是切片的  $x$  值中点,  $y$  值是切片里的平均目标风速。垂直切片法分段线性曲线就是由这些点通过直线连接得到的。

### 五、平方差比方法 (VR, variance ration)

用线性模型  $\hat{y} = mx + b$  从参考风

速来预测目标风速:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (10)$$

式中,  $\bar{x}$  为平均风速。

平方差比算法中, 假设目标风速与观测到的风速变化相同, 因此, 斜率本身就等于观测到的目标风速标准偏差与观测到的参考风速标准偏差的比值:

$$\sigma_y^2 = \sigma_x^2 = \sigma_{mx+b}^2 = m^2 \sigma_x^2 \quad (11)$$

$$m = \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \quad (12)$$

平方差比算法还假设预期目标风速的平均值等于观测目标风速的平均值, 即:

$$b = \bar{y} - \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \bar{x} \quad (13)$$

式中,  $\bar{y}$  为平均风速。

#### 六、矩阵时间序列法 (MTS, matrix time series)

该方法的基本思想是利用目标风速和参考风速的完全二维联合概率分布来生成目标风速数据。首先, 建立百分比时间序列。采用同时刻的目标风速和参考风速建立联合概率分布, 从中选择相应的参考风速列, 并构建目标风速的累积分布函数。其次, 从时间序列累积分布函数中计算出与观测到的目标风速相对应的百分比比值。结合百分比时间序列数据, 使用内置的空白填充算法, 综合考虑时间序列的季、月、日变化填补百分比时间序列的空白段。最后, 与第一步

构建百分比时间序列相反, 引用联合概率分布和累积分布函数, 通过给定的百分比时间序列计算对应的预期目标风速。

#### 七、威布尔分布法 (WF, weifull fit)

威布尔分布法建立了一种幂指数模型, 对模型中的比例参数 ( $k, C$ ) 进行频率分布调节。幂指数模型如下:

$$y = ax^\beta \quad (14)$$

式中,  $x$  表示长期测站的风速,  $y$  表示目标风速。

$\beta$  等于 Weibull 形状参数的比值:

$$\beta = \frac{k_x}{k_y} \quad (15)$$

尺度参数  $\alpha$  等于目标风速的威布尔尺度参数除以参考风速的威布尔尺度参数:

$$\alpha = \frac{C_y}{C_x^\beta} \quad (16)$$

### 风速数据插补延长结果对比

本次共收集到新疆、陕西、河南的 4 座测风时间满一年的测风塔原始数据。数据缺少、完整率高, 满足风能资源评估要求, 故本次不对数据作修正分析。为进行风速数据插补延长结果对比, 分别选取其中测风时长为三个月、六个月、九个月的实测风速数据作为原始测风数据, 采用 MERRA 数据作为再分析资料对其进行插补延长得到完整一年的数据, 然后通过平

均风速偏差、平均风速检验、均方根误差 3 项指标对得到的插补结果与实测完整年测风数据进行对比。指标中的平均风速偏差、均方根误差越小表示插补延长得到的结果精确度越高, 平均风速检验与 1 越接近, 则结果越准确。3 种检验参数的计算公式如下:

平均风速偏差:

$$m_1 = x - x' \quad (17)$$

平均风速检验:

$$m_2 = \frac{\frac{1}{N} \sum_i x'}{\frac{1}{N} \sum_i x} \quad (18)$$

均方根误差:

$$m_3 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (x - x')^2} \quad (19)$$

本次收集了各测风塔位置处的再分析资料 100m 高度的近 30 年数据, 以此为依据建立相关方程。测风塔信息见表 1, 测风时长为一年, 测风塔 100m 高度实测数据统计值见表 2。

各测风塔数据与 MERRA 数据的相关系数统计见表 3。

由于 MERRA 数据为拟合数据, 所以测风塔与 MERRA 数据相关性总体看来一般, 相关系数在 0.59 ~ 0.73 之间, 2#、3# 测风塔相关系数高于 1#、4# 测风塔。

当测风塔与中尺度 MERRA 数据相关系数越高时, 测风塔插补延长后的测风数据均方根误差越小。当相关系数达到 0.7 以上时, 测风塔插补延长

表1 各测风塔基本信息

测风塔	所处地区	地形	海拔 (m)	测风时段	塔高 (m)
1#	新疆	平坦	1016	2016.1.1 - 2017.1.1	100
2#	河南	平坦	70	2016.1.15 - 2017.1.14	100
3#	陕西	复杂	1287	2016.1.1 - 2017.1.1	100
4#	新疆	平坦	830	2016.1.1 - 2017.1.1	100



表2 各测风塔100m高度测风数据统计表 (单位: m/s)

测风塔	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年平均
1#	7.12	5.49	7.37	7.89	8.35	8.38	7.35	6.16	5.81	7.09	5.35	4.85	6.77
2#	5.21	5.97	6.11	5.59	5.52	5.48	4.66	4.93	4.55	5.11	5.71	5.45	5.36
3#	5.08	6.39	6.08	6.60	6.50	5.42	5.04	4.30	4.85	5.56	6.18	4.87	5.57
4#	5.16	4.09	6.13	8.37	8.08	8.86	7.33	5.59	5.22	7.15	4.72	3.45	6.18

表3 测风塔数据与MERRA数据的相关系数统计表

测风塔	三个月数据与 MERRA	六个月数据与 MERRA	九个月数据与 MERRA	完整一年数据与 MERRA
1#	0.57	0.58	0.59	0.59
2#	0.72	0.72	0.74	0.73
3#	0.64	0.68	0.70	0.70
4#	0.64	0.59	0.61	0.59

表4 各测风塔插补后的目标风速检验参数统计表 (三个月)

测风塔	项目	实测值	LLS	TLS	SS	VS	VR	MTS	WF
1#	年平均风速 (m/s)	6.77	6.36	6.52	6.35	6.35	6.37	6.26	6.36
	平均风速偏差 (m/s)		-0.41	-0.25	-0.42	-0.41	-0.39	-0.50	-0.41
	平均风速检验		0.94	0.96	0.94	0.94	0.94	0.93	0.94
	均方根误差		0.91	0.80	0.84	0.92	0.86	0.97	0.84
2#	年平均风速 (m/s)	5.36	5.40	5.38	5.41	5.64	5.42	5.56	5.55
	平均风速偏差 (m/s)		0.04	0.02	0.05	0.28	0.07	0.21	0.19
	平均风速检验		1.01	1.00	1.01	1.05	1.01	1.04	1.04
	均方根误差		0.14	0.15	0.14	0.38	0.15	0.27	0.26
3#	年平均风速 (m/s)	5.57	5.73	5.70	5.74	5.74	5.72	5.69	5.72
	平均风速偏差 (m/s)		0.16	0.13	0.16	0.17	0.15	0.12	0.15
	平均风速检验		1.03	1.02	1.03	1.03	1.03	1.02	1.03
	均方根误差		0.26	0.24	0.28	0.26	0.27	0.22	0.28
4#	年平均风速 (m/s)	6.18	5.76	6.08	5.65	5.76	5.73	5.62	5.79
	平均风速偏差 (m/s)		-0.42	-0.10	-0.53	-0.42	-0.45	-0.56	-0.39
	平均风速检验		0.93	0.98	0.91	0.93	0.93	0.91	0.94
	均方根误差		1.00	0.67	0.90	0.99	0.87	1.05	0.82

后的数据误差明显较低, 低于 0.3。

由此可知, 当测风塔与再分析数据相关系数大于 0.7 时, 采用再分析数据对实测数据进行插补延长可以得到较为准确的风速结果。

一、三个月数据插补结果

采用 7 种风速插补方法将测风塔

三个月的数据插补延长为一年的结果与实测值进行比较, 统计结果见表 4, 插补后逐月风速统计结果见图 1。

从插补延长后的年平均风速偏差及检验结果看, 总体最小二乘法 (TLS) 可以得到与实测值最为接近的风速值, 7 种方法的年平均风速偏差在

0.05 ~ 0.56m/s 之间, 差距较大。从插补延长后的均方根误差来看, 对于相关性较好的测风塔, 线性最小二乘法 (LLS) 和风速分类法 (SS) 插补结果较为准确; 对于相关性较差的测风塔, 威布尔分布法 (WF) 插补结果较为准确。同时通过分析得到测风塔实

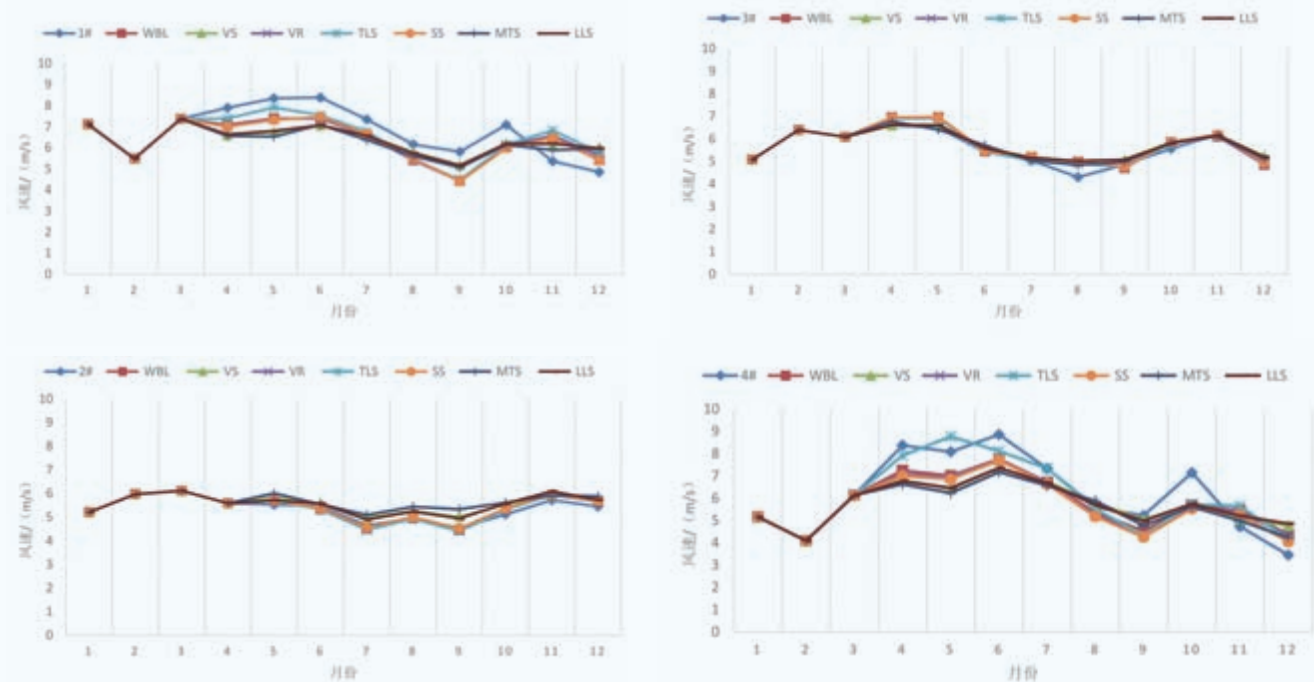


图1 各测风塔逐月风速插补延长统计变化曲线（三个月）

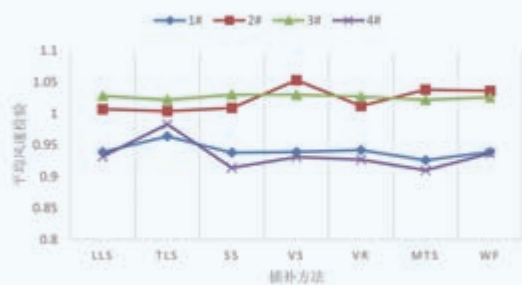


图2 三个月数据平均风速检验结果

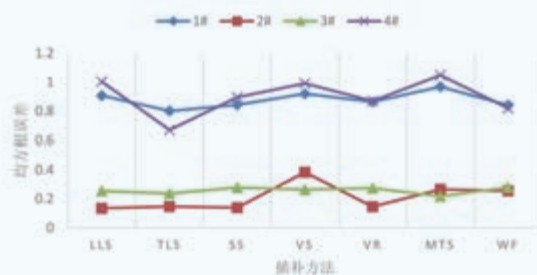


图3 三个月数据均方根检验结果

测数据与再分析数据相关系数越高，插补延长后的逐月风速与实际风速年际变化越接近。

## 二、六个月数据插补结果

采用7种风速插补方法将测风塔六个月的数据插补延长为一年的结果与实测值进行比较，统计结果见表5，插补后逐月风速统计结果见图4。

从插补延长后的年平均风速偏差

及检验结果看，总体最小二乘法（TLS）和风速分类法（SS）可以得到与实测值最为接近的风速值，各方法年平均风速的偏差在0.01~0.48m/s之间，差距较大。对于相关性较好的测风塔，线性最小二乘法（LLS）与风速分类法（SS）插补结果较为准确；对于相关性较差的测风塔，总体最小二乘法（TLS）插补结果较为准确。偏差值较大的方法

为垂直切片法（VS）。从插补延长后的均方根误差来看，风速分类法（SS）的误差值在几种方法中均为最小。同时可以得到测风塔实测数据与再分析数据相关系数越高，插补延长后的逐月风速与实际风速年际变化越接近。

## 三、九个月数据插补结果

采用7种风速插补方法将测风塔九个月的数据插补延长为一年的结果

表5 各测风塔插补后的目标风速检验参数统计表（六个月）

测风塔	项目	实测值	LLS	TLS	SS	VS	VR	MTS	WF
1#	年平均风速 (m/s)	6.77	7.08	6.89	6.82	7.08	6.88	6.85	6.91
	平均风速偏差 (m/s)		0.31	0.12	0.05	0.31	0.11	0.09	0.15
	平均风速检验		1.05	1.02	1.01	1.05	1.02	1.01	1.02
	均方根误差		0.70	0.78	0.66	0.68	0.71	0.67	0.44
2#	年平均风速 (m/s)	5.36	5.49	5.39	5.42	5.50	5.40	5.37	5.39
	平均风速偏差 (m/s)		0.13	0.03	0.06	0.15	0.05	0.01	0.04
	平均风速检验		1.01	1.00	1.01	1.05	1.01	1.04	1.04
	均方根误差		0.13	0.15	0.14	0.14	0.15	0.22	0.24
3#	年平均风速 (m/s)	5.57	5.67	5.55	5.57	5.65	5.54	5.53	5.64
	平均风速偏差 (m/s)		0.10	-0.03	0.00	0.08	-0.03	-0.04	0.07
	平均风速检验		1.03	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.02
	均方根误差		0.20	0.17	0.16	0.19	0.17	0.18	0.19
4#	年平均风速 (m/s)	6.18	6.66	6.34	6.35	6.66	6.41	6.41	6.54
	平均风速偏差 (m/s)		0.48	0.16	0.17	0.48	0.23	0.23	0.36
	平均风速检验		0.93	0.98	0.91	0.93	0.93	0.94	0.91
	均方根误差		0.86	0.68	0.58	0.86	0.66	0.65	0.65

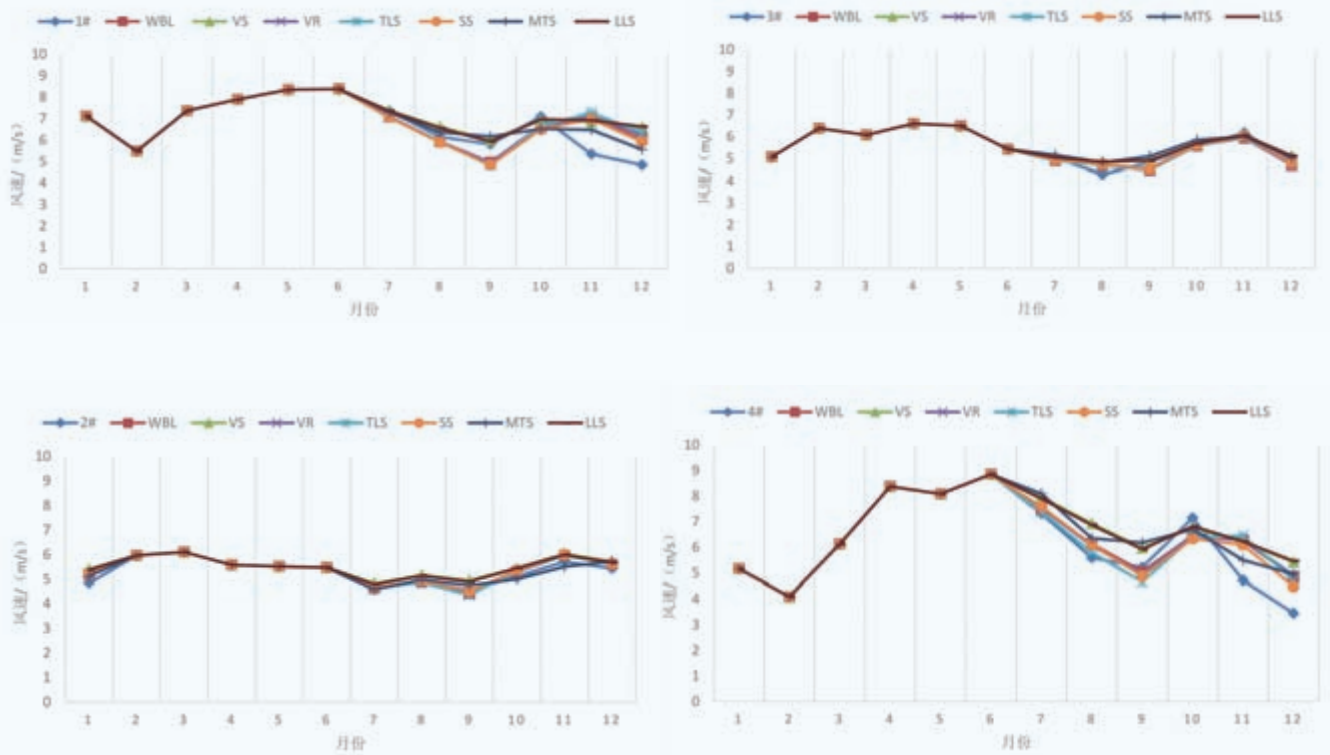


图4 各测风塔逐月风速插补延长统计变化曲线（六个月）

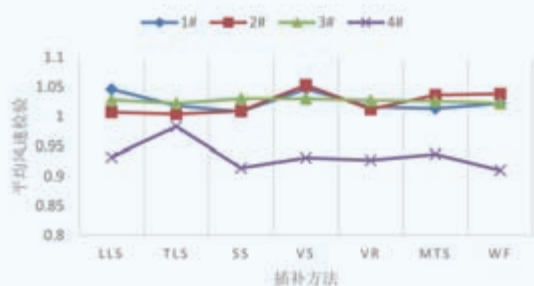


图5 六个月数据平均风速检验结果

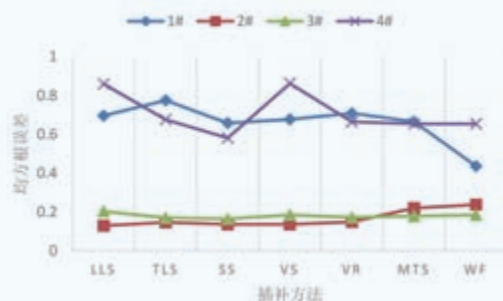


图6 六个月数据均方根误差检验结果

表6 各测风塔插补后的目标风速检验参数统计表（九个月）

测风塔	项目	实测值	LLS	TLS	SS	VS	VR	MTS	WF
1#	年平均风速 (m/s)	6.77	7.05	7.09	7.02	7.03	7.07	7.05	7.03
	平均风速偏差 (m/s)		0.28	0.32	0.25	0.26	0.30	0.28	0.26
	平均风速检验		1.04	1.05	1.04	1.04	1.05	1.04	1.04
	均方根误差		0.71	0.84	0.70	0.68	0.79	0.75	0.69
2#	年平均风速 (m/s)	5.36	5.38	5.39	5.39	5.38	5.40	5.38	5.39
	平均风速偏差 (m/s)		0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03
	平均风速检验		1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
	均方根误差		0.07	0.08	0.07	0.17	0.09	0.06	0.06
3#	年平均风速 (m/s)	5.57	5.59	5.55	5.56	5.60	5.55	5.54	5.59
	平均风速偏差 (m/s)		0.02	-0.02	-0.10	0.02	-0.02	-0.03	0.02
	平均风速检验		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	均方根误差		0.09	0.06	0.06	0.10	0.07	0.08	0.11
4#	年平均风速 (m/s)	6.18	6.44	6.45	6.37	6.42	6.43	6.43	6.41
	平均风速偏差 (m/s)		0.26	0.27	0.19	0.24	0.25	0.25	0.23
	平均风速检验		1.04	1.04	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04
	均方根误差		0.75	0.77	0.66	0.72	0.75	0.74	0.72

与实测值进行比较，统计结果见表6，插补后逐月风速统计结果见图7。

从插补延长后的年平均风速偏差及检验结果看，风速分类法（SS）可以得到与实测值最为接近的风速值，各方法年平均风速的偏差在0.02~0.32m/s之间，差距较大，但与三个月及六个月数据相比，各方法的年平均风速误差逐渐缩小，偏差值较大的方法为垂

直切片法（VS）。从插补延长后的均方根误差来看，对于相关性较好的测风塔，威布尔分布法（WF）和风速分类法（SS）插补结果较为准确；对于相关性较差的测风塔，威布尔分布法（WF）插补结果较为准确。同时通过分析得到测风塔实测数据与再分析数据相关系数越高，插补延长后的逐月风速与实际风速年际变化越接近。

## 结论

本文利用4座位于不同区域、不同地形条件下的测风塔完整一年实测数据，基于再分析数据对7种风速插补延长方法（线性最小二乘法、矩阵时间序列法、总体最小二乘法、风速分类法、平方差比法、垂直切片法、威布尔分布拟合法）进行研究，得到

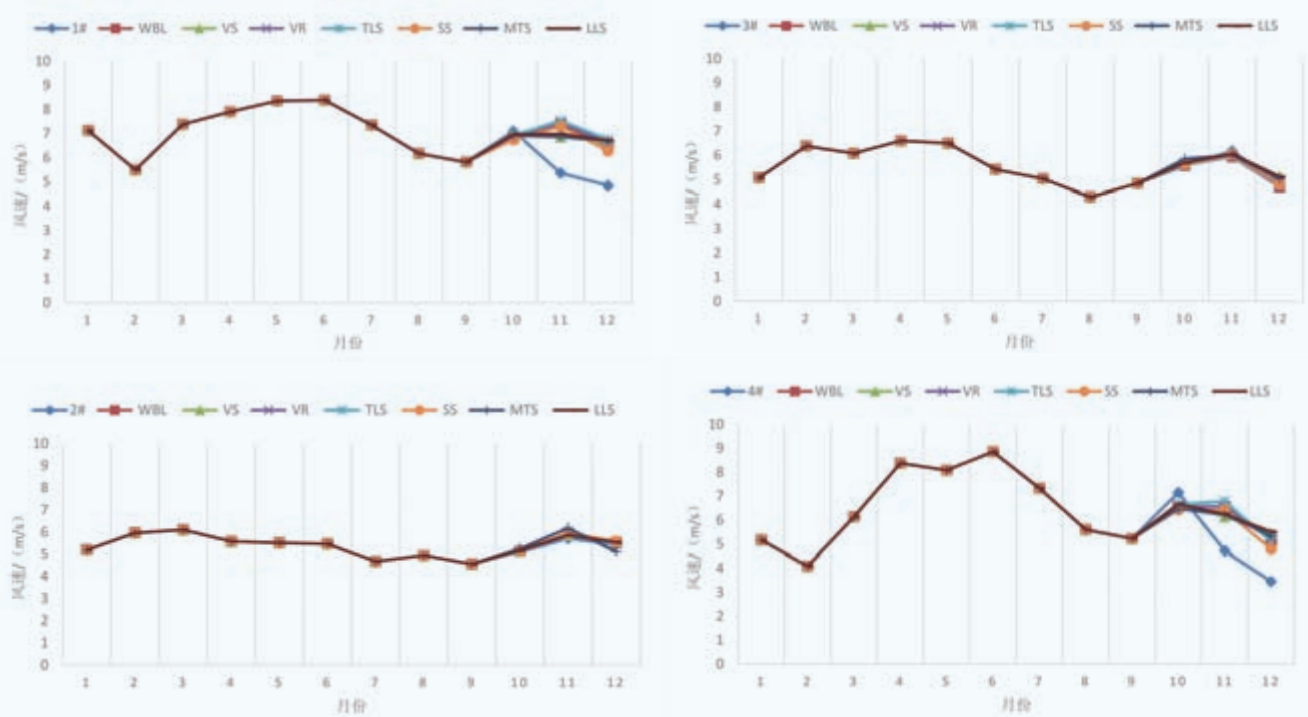


图7 各测风塔逐月风速插补延长统计变化曲线（九个月）

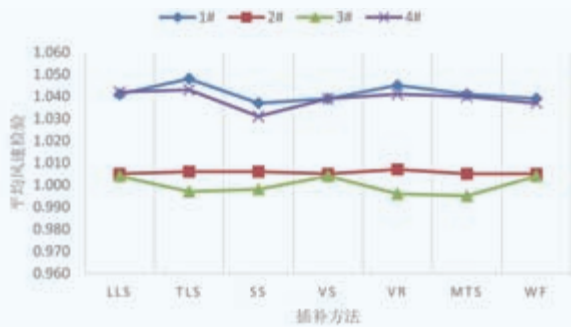


图8 九个月数据平均风速检验结果

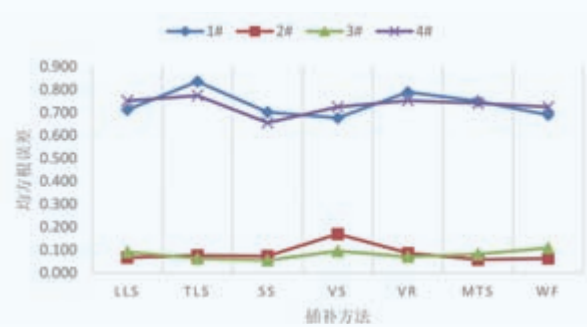


图9 九个月数据均方根误差检验结果

以下结论：

(1) 在不同的地形条件下，再分析数据与测风数据的相关性越好，插补延长得到的风速偏差越小，插补结果越准确。

(2) 对于测风塔三个月样本数据，各方法均不能得到较准确的插补延长结果；对于测风塔六个月样本数据，在与

再分析数据相关性一般的情况下，总体最小二乘法（TLS）能够得到相对准确的插补延长结果，相关性较好的情况下，线性最小二乘法（LLS）和风速分类法（SS）能够得到相对准确的插补延长结果；对于测风塔九个月样本数据，威布尔分布法（WF）和风速分类法（SS）能够得到相对准确的插补延长结果。而

垂直切片法（VS）不论数据样本长短，插补延长得到的结果均与实际结果偏差较大。

(3) 测风数据实测时间越长，插补延长得到的风速结果偏差越小。

（作者单位：高洁，胡己坤，袁红亮，刘玮：中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司；刘雨佳：西安热工研究院有限公司）

**CWP** 2019.10.22-24  
Beijing, China  
**Offshore**

智领海上风电时代

**CWP Offshore**

**2019** 中欧海上风电工程及装备展览会



2019年10月22-24日  
北京 中国国际展览中心（新馆）

# 双馈风电机组转速控制与失控分析

文 | 唐中伟, 王明军

风电机组是在无人干预条件下按主控程序设定全自动运行及自动启停。除超出机组正常运行范围或人为停机外, 在满足运行条件时, 应保证机组长期稳定运行。运行机组如频繁出现超速停机, 不仅严重影响机组发电、对机组及部件寿命极为不利, 也无法满足在设计风速段内长期稳定运行的要求。

笔者在《双馈风电机组的转速控制与超速参数设置》一文中, 对转速控制和超速参数设置进行了阐述。不同地区风电场多种机型机组的多年现场运行实践表明, 该转速控制逻辑、超速停机设置方法以及超速参数值, 对同步转速为 1500rpm、运行范围在 1000 ~ 2000rpm 的变速变桨双馈 1.5MW 风电机组具有广泛的适应性。本文将继续对其转速控制的合理性进行分析, 并结合具体的机组转速失控与飞车案例作进一步阐释。

## 转速控制逻辑与参数值设定

在制定转速控制逻辑和设定转速控制参数值时, 应从整机考虑, 使各部件相互协调, 并实现多个目标。如: 保障机组及部件安全; 保证机组长期稳定运行; 充分保证叶轮储能, 提高发电量, 减小风速变化对机组部件的不利影响, 减小功率波动对电网的冲击; 应有利于机组报故障准确, 便于分析判断机组故障, 并及时准确地表明机组的运行及故障状态等。

### 一、“极限阵风”程序的意义和作用

主控“极限阵风”程序的顺利执行, 对保证机组在复杂工况下长期稳定运行起着关键性的作用。

当风况较为稳定时, 机组通过主控程序设置的“额定转速”“额定功率”等主控参数, 把机组的并网转速相对稳定地控制在运行范围之内, 保证在通常情况下的长期稳定运行; 当出现阵风或极端风况时, 叶轮转速急剧上升, 转速超过 1960rpm 且时间超过 0.2 秒时, 机组开始顺桨限速, 通过执行主控的“极限阵风”程序, 在短时间内降低机组额定转

速, 保证极端风况下机组不会超出最高运行转速, 并保证机组最大限度地储能, 减小机组振动, 避免机组的重要部件(桨叶、齿轮箱、塔筒等)受到冲击并保证机组输出功率的稳定。在执行“极限阵风”程序时, 只报警不停机, 从而保证了机组在不稳定风况下长期稳定运行。

### 二、多重超速停机保护保障机组安全

变速变桨风电机组的变桨系统相对独立。变桨系统的变桨控制器和变桨驱动器都有各自的控制程序, 除了按主控程序命令执行外, 在适当的条件下, 变桨控制器和变桨驱动器还可以根据外界条件的变化, 按照部件程序的设定自动执行顺桨。

在即将超出或已经超出机组运行范围时, 由变桨控制器执行“变桨自主运行”程序停机, 控制机组转速, 保证机组安全。当齿轮箱高速轴测速探头测得转速超出 1950rpm 时, 机舱硬件超速模块触发, 并通过机舱到轮毂的接线和滑环把信号传递给变桨控制器。根据变桨控制器程序设定, 在延时 0.3 秒(期间, 高速轴转速始终处于大于或等于 1950rpm 的状态)后, 执行“变桨自主运行”顺桨停机, 保障机组安全。当执行顺桨停机时, 变桨控制器同时把信息传递给主控, 由主控执行降负荷停机, 并报出“变桨自主运行”故障。但是, 如果变桨控制器即将执行或正在执行主控的顺桨命令时, 则不执行“变桨自主运行”。一方面, 保证了主控“极限阵风”程序的优先执行, 也就保证了机组在极端阵风条件下不停机; 另一方面, 当变桨控制器正在执行主控的其他故障停机命令时, 不报出“变桨自主运行”。例如, 当机组高转速、高功率因报“变频器故障”, 已经执行顺桨停机时, 即便达到或超过 1950rpm、0.3 秒的执行条件, 也只报“变频器故障”, 不报“变桨自主运行”故障。这就保证了机组报故障明晰准确, 也剔除了日后进行“大数据分析”的干扰信息。

双馈机组变频器也是一个相对独立的系统, 当机组并网转速超出了变频器正常运行范围, 会自动甩负荷脱网。“变频器超速”就是通过变频器的超速保护设置实现对变频器及机组的保护。就上文提到的 1.5MW 机型而言, 当机组转速

超过 2000rpm 且时间超过 0.1 秒，或机组转速超过 2050rpm（没有延时）时，变频器脱网，并把信号传给主控，由主控执行顺桨停机，从而使双馈发电机转子的开口电压和发电功率等得到有效控制，在不超出其能力范围的情况下，实现对变频器、发电机的保护。

当机组触发“变频器超速”故障停机时，机组叶轮转速已经很高，超出了变频器的允许范围，不能执行降负荷停机来限制叶轮转速。而过高的飞升转速对桨叶、齿轮箱和发电机等运动部件都不利，需要及时减速，因此，在停机时，以最大速率执行变桨驱动器顺桨，限制叶轮最高飞升转速。

总之，在机组转速过高时，“变桨自主运行”和“变频器超速”两道停机保护指令使机组不致超出最大运行转速过多，实现机组的冗余超速保护。

### 三、“软件超速”“刹车200超速”故障表明机组超速与转速失控

上文中的转速控制与超速保护，分别通过主控、变桨以及变频器三个不同部件实现对机组的转速控制，保障机组安全。该超速控制方案还由主控程序设定了三道“软件超速”停机指令，为瞬间触发，执行没有延时的最大速率变桨驱动器顺桨。

现场实践表明，在控制参数及硬件设置正确的前提下，如果“极限阵风”“变桨自主运行”和“变频器超速”不能实现限速或顺桨，“软件超速”也难以通过顺桨保证机组安全。

但是，当机组转速失控或出现飞车时，机组转速持续上升，通过“软件超速”（低速轴超速、齿轮箱超速和发电机超速）的及时报出，能发现机组顺桨存在的问题，以便及时进行维修，消除安全隐患；当机组已经处于飞车状态时，通过“软件超速”的及时报出，能准确了解机组所处的状态，以便采取应急措施最大限度地挽救机组或及时避开事故机组，保证人身和财产安全。

另一方面，在设定“软件超速”的超速参数值时，需考虑给通常的机组故障停机（例如，在阵风条件下，具有较高负荷的变频器故障甩负荷停机）和低电压穿越过程中的甩负荷等以足够的速度裕度。在顺桨正常的情况下，机组报故障停机，不会触发“软件超速”设定值，以免发生与其他停机故障混淆的误报。

该方案设置的 4 个“刹车 200 超速”也是瞬间触发，执行没有延时的后备电源紧急顺桨，并辅助以主轴刹车器制动。该超速参数设置值要足够高，才能保证机组即便是满负荷条

件下的甩负荷停机，或特殊风况（风速高、变化快、湍流度大）以及机组桨叶结冰、结霜等条件下，也不触发“刹车 200 超速”的超速参数设定值。如果“软件超速”和“刹车 200 超速”设置值过低，首先，会影响运行稳定；其次，在报其他故障停机时，如果同时报出“软件超速”或“刹车 200 超速”故障，造成机组报故障不准确以及影响部件寿命等。

所以，“软件超速”和“刹车 200 超速”不仅是控制机组转速的冗余保护，而且，当机组出现转速失控或飞车时，通过这些超速故障的报出，还能及时准确地表明机组所处的状态，以便采取相应的措施。

FD70、FD77 以及 FD82、FD87、FD89、FD93 等多种机型 1.5MW 机组的长期现场运行实践表明，“软件超速”和“刹车 200 超速”分别设置为 2178rpm 和 2400rpm 较为合理。

### 四、降负荷停机与最高停机转速的控制

当叶轮转速及机组负载较高时，叶轮的储能很高，势能很大。当机组故障停机时，如果直接采取甩负荷脱网，势必出现较高的飞升转速，可能会影响部件寿命，也不利于发电量的提高。因此，当机组触发与变频器无关的故障或手动停机时，机组先执行降功率运行，待转速降到脱网转速，再由主控给变频器发出脱网命令。

例如，当机组报“功率过高（530）”故障停机时，执行“刹车 52”停机。机组先以较低速率的变桨驱动器顺桨，降低机组的给定扭矩和转速，并通过发电机、变频器把叶轮的动能传输给电网，机组的功率和转速不断下降，当输出功率接近零、转速达到最低脱网转速时，主控再给变频器发出脱网指令，实现变频器脱网，从而有效地控制机组的最高转速，保障机组及部件安全。另一方面，渐进、平稳地停机脱网，还有效减少了瞬间甩负荷停机对电网和机组部件带来的冲击。

但是，当出现变频器故障或运行转速过高超出变频器能力时，变频器需立即切出，执行甩负荷停机，通过执行最高速率的变桨驱动器顺桨，降低叶轮的最低飞升转速；当需要执行高级别刹车（刹车 180、刹车 190 和刹车 200）的后备电源紧急顺桨时，变频器也需立即切出，同时执行最大速率的后备电源紧急顺桨，降低叶轮的最低飞升转速。

## 机组转速失控及飞车案例分析

### 一、事故发生的经过及所报故障

某双馈 1.5MW 机组的转速控制方案及超速参数值，如



上文所述。该机组采用直流变桨系统，在超过满负荷风速并网运行过程中，三支桨叶同时不能顺桨，出现了转速失控和机组飞车事故。事故发生后，主控所报故障的顺序如下：

(1) 首先，主控报“变桨通信故障（1157）”，立即甩负荷。

执行“刹车 180”停机，在通常情况下，该直流变桨系统应切换到采用后备电池的紧急顺桨，但是，因顺桨故障不能切换到正常后备电池紧急顺桨，加之机组出现了“变桨通信故障”，变桨系统与主控之间失去联系，因此，不能按照主控程序设定执行变桨驱动器顺桨，让三支桨叶同时顺桨到 90°，从而造成三支桨叶同时不能顺桨和转速失控。

(2) 3 秒之后，1、2、3 桨叶依次报“变桨速度太慢（1919、1920、1921）”；同时触发了“极限阵风（213）”和“变频器超速（1411）”故障。

3 秒之后，三支桨叶仍然在 0°位置，因此，三支桨叶依次报“变桨速度太慢”故障。该故障执行刹车 190 停机，此时虽已不能执行变桨驱动器顺桨或后备电池紧急顺桨，但是，刹车 190 停机时主轴刹车器会参与制动，在一定程度上限制了机组转速的上升。然而，事故机组为主动式主轴刹车器，叶轮已不能顺桨限制功率，又因叶轮功率过高，主轴刹车器制动不能完全阻止叶轮转速的进一步上升，更不能使叶轮完全停止转动。

在这一秒内，还同时报出了“极限阵风”和“变频器超速”。由触发条件可知，机组先后超过了 1960rpm、0.2 秒和 2000rpm、0.1 秒。但是，只有当主控与变桨控制器能正常通信，才能执行“极限阵风”程序和“变频器超速”故障的顺桨停机，因存在“变桨通信故障”，变桨系统与主控之间早已失去了联系，造成“极限阵风”程序和“变频器超速”故障停机都不能执行。

在这一秒内，还达到和超出了“变桨自主运行”的触发条件，又因变桨控制此时没有执行顺桨（在正常情况下，则应当执行“变桨自主运行”顺桨，并报出“变桨自主运行”故障）。如能触发“变桨自主运行”，执行变桨驱动器顺桨，使三支桨叶顺桨，机组转速将会得到有效控制，机组飞车事故将不会发生。

(3) 10 秒后，触发了 3 个“软件超速”，即：“发电机软件超速（312）”“齿轮箱软件超速（310）”和“低速轴软件超速（311）”。

当高速轴转速达到 2178rpm 时触发 3 个“软件超速”，同样因“变桨通信故障”，不能执行“软件超速”顺桨停机。

就阻止叶轮转速上升来讲，3 个“软件超速”已失去了作用，但是，同时报出了 3 个“软件超速”，清楚地表明：机组已经达到和超过此转速值（2178rpm），并处于转速失控状态。

(4) 19 秒后，4 个“刹车 200 超速”故障依次报出，即：“刹车 200 的齿轮箱软件超速（328）”“刹车 200 的低速轴软件超速（317）”“WP2035 发电机硬件超速（319）”和“WP2035 低速轴硬件超速（320）”，并报出了“安全链断开（10）”故障。

有 2 个“刹车 200 软件超速”和 2 个“刹车 200 硬件超速”，其设置值均为 2400rpm，4 个“刹车 200 超速”的先后报出，表明机组转速已超过 2400rpm。后备电池紧急顺桨不能执行，主轴刹车制动已经执行，因出现了“刹车 200”故障，而报“安全链断开”故障。

从限制超速、保护机组的角度看，报出以上故障并没有实质性的作用。然而，报出 4 个“刹车 200 超速”，及时准确地知道了机组当时的转速，也进一步表明了机组已处于飞车状态。

此时超过“变桨自主运行”的触发条件已在 15 秒以上，但没有执行“变桨自主运行”，机组转速仍在不断上升。这说明在事故发生之前机组存在不能正常触发和执行“变桨自主运行”的安全隐患，该安全隐患是造成机组飞车的重要因素。

(5) 21 秒后，机组报“限位开关故障（1159）”。

“限位开关故障（1159）”的报出，清楚地表明变桨系统不能切换到正常后备电池紧急顺桨的原因。这是由于电池顺桨控制回路或旁路限位开关回路被强制提供 24V 直流。

在通常情况下，存在“限位开关故障（1159）”时，当出现高级别刹车，则按照主控程序设定，执行变桨驱动器顺桨，三支桨叶都顺桨到 90°，同时报“限位开关故障（1159）”。但是，事故机组又出现了“变桨通信故障”，导致变桨控制器不能执行主控命令，三支桨叶均不能顺桨。

事故调查进一步证实，事故机组的旁路限位开关回路被强制提供 24V 直流，也就是说，事发前事故机组存在“限位开关故障（1159）”的安全隐患。

由以上分析可知：机组在并网运行前，同时存在“限位开关故障（1159）”和不能执行“变桨自主运行”两个安全隐患；当超过满负荷风速以上并网运行时，机组又出现了“变桨通信故障”，从而造成了此次转速失控和飞车事故。

## 二、事故的应急处理措施

该事故机组采用直流变桨系统，且具备“变桨驱动器的后备电源顺桨”功能，即：当叶片处于开桨状态时，如果高级别刹车不能正常切换到后备电源紧急顺桨，变桨系统只能执行变桨驱动器变桨。这时，如果电变桨驱动器上的400V交流供电被断开（在机舱控制柜、变频器处断开400V交流供电，断开箱变的低压侧、高压侧断路器，或事故机组所在的集电线路断电等方法，均可切断变桨驱动器的400V交流供电），那么，在变桨驱动器内部将自动切换到后备电池顺桨，使三支叶片顺桨到92°限位开关位置。

因此，在事故机组的受控变桨驱动器顺桨和后备电池紧急顺桨均不能执行的情况下，及时给事故机组所在的集电线路断电，断开事故机组的变桨驱动器400V交流供电，促成了不受控的“变桨驱动器后备电源顺桨”顺利执行，三支桨叶实现顺桨，机组最终得到保护。

当机组报出“软件超速”和“刹车200超速”时，就其执行和阻止机组飞车来讲，失去了实际的意义。然而，及时报出“软件超速”和“刹车200超速”故障，让现场监控人员很容易辨识机组所处的状态，可以及时采取应急措施。

由事故分析还可知：即便是把事故机组的“软件超速”和“刹车200超速”的超速参数值设置得再低一些，因后备电池紧急顺桨和受控的变桨驱动器顺桨均不能执行，“软件超速”和“刹车200超速”也必然不能起到阻止飞车的作用。但是，如果这两个超速参数值设置过低，不仅会影响机组的运行稳定，还会造成机组报故障不准确、机组及部件寿命缩短和故障概率增加等问题。

## 三、此类飞车事故的防御措施

为避免类似飞车事故的发生，减小变桨系统的故障概率，针对直流变桨系统应做好以下几个方面工作：

首先，在变桨系统生产和采购备件时，应保证关键部件的质量，尤其是变桨电机及变桨电机刹车器后备电池供电接触器的质量。

其次，应重视机组自检。按照主控程序及参数的设定，机组会定期自检，变桨系统的安全性故障大都能通过机组自检检查出来。如本文提到的“限位开关故障（1159）”安全隐患，通过机组自检就能检查出来。

再次，每半年或一年一次的定检维护，应做好“变桨自主运行”的超速试验等。通过超速试验，检查“变桨自主运行”是否能正常触发和顺利执行，包括硬件超速模块是否

动作、接线和参数设置是否正确等。

现场实践表明，为杜绝转速失控和飞车事故的发生，应抓住事故发生的关键点，采取切实有效的预防措施，及时检查和消除该安全隐患，只有当机组的安全隐患被一一排除后，才能并网运行。

通过对飞车案例的分析可以看出，当出现“变桨通信故障”时，可能给机组安全带来影响。因此，在保证变桨系统稳定、可靠的前提下，可适当增加一些冗余保护措施，即：增加在出现“变桨通信故障”情况下的冗余顺桨设置。例如，当叶片处于开桨位置，在主控与变桨控制器之间出现“变桨通信故障”且在执行紧急顺桨后，超过一定时间而没有顺桨时，可由变桨控制器自动执行顺桨程序，使三支桨叶回到安全位置；当变桨控制器与变桨驱动器之间的通信中断时，可由变桨驱动器的内部程序自动驱动变桨电机，执行顺桨。即：当任何一支桨叶的变桨驱动器与变桨控制器的通信中断时，变桨驱动器可依照其内部的程序设定自动驱动变桨电机，分别驱动各自的桨叶执行独立顺桨。

在强调机组安全的同时，还应综合考虑机组成本、故障概率和机组发电量，避免采取无效或过度的防御措施。

从发生过的恶性事故来看，事故机组往往存在一个以上的安全隐患，才最终造成了事故的发生。因此，在预防重大事故时，不仅要注重安全防范的理论研究和机组安全的设计改进，还要切实加强现场工作的执行力度和技术力量，及时发现和消除机组的安全隐患。因为提高机组质量与完善机组的安全设计仅仅是防止恶性事故发生的一个方面，从现场机组中发现并及时消除安全隐患，则对机组改进和预防重大事故的发生起着最为重要和直接的作用。

## 结论

在进行转速控制逻辑和超速参数设置时，应在保证机组安全的前提下，增强机组的综合性能，降低机组的度电成本。不能因片面强调机组安全影响机组的运行稳定和发电量。

由以上对机组飞车案例的分析可知，要避免此类事故的发生，不仅要加强机组及部件质量，提高机组设计的安全性，还需从现场机组具体的维护、维修出发，及时发现和消除任何一台机组出现的安全隐患。☒

（作者单位：唐中伟：国家电网四川省电力公司绵竹供电分公司；王明军：东方电气风电有限公司）

# 柔塔二阶涡激振动阻尼值分析

文 | 李鹏, 符鹏程, 杨洪源, 张宇

随着国家对绿色能源发展的支持,除了风速较好的“三北”地区,中东南部低风速区域的风电机组装机也越来越多。“三北”地区多采用高度相对较低的刚塔架,一般在100m以下,而低风速区域为了更好地捕获风能会采用更高的塔架,比如柔塔,一般高度在120m以上。随着塔架高度的增加,柔塔的固有频率相对刚塔的要低,由于塔架频率和涡激振动的临界风速呈线性关系,柔塔比刚塔发生涡激振动需要的风速更低,即更易发生涡激振动。

本文以处在III类风能资源区的某风电场发生二阶涡激振动破坏、安装不到一年且处于非运行状态下的140m柔塔(以下简称“事故柔塔”)为研究对象,推断其发生涡激振动破坏的原因。由于缺少事故柔塔的详细信息,本文将频率接近的另一台140m柔塔为例对柔塔的二阶涡激振动情况进行分析。

## 涡激振动介绍

在流体场中任何非流线型物体会在其两侧交替地产生脱离表面的旋涡,旋涡会对结构产生交替的横向作用力。当塔架处在稳定风旋涡中且风旋涡的激振频率与塔架固有频率接近时,会在垂直于来风方向引起塔架的横向振动,这种规律性的横向振动反过来又会改变塔架尾流的涡流脱落形态,抑制表面旋涡的脱离。这种风和塔架之间的相互作用称为塔架的涡激振动(Vortex-Induced Vibration,简称VIV),图1为涡激振动示意图。

在圆柱体绕流问题中,圆柱体后的脱涡和尾流情况与雷诺数相关。雷诺数Re是用来表征流体所受惯性力与粘性力的比值。雷诺数由式(1)得出:

$$Re = \frac{b \times V_{crit}}{\nu} \quad (1)$$

式中,ν为空气的运动粘度系数,一般取 $1.5 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ 。

涡激振动可能以多种形式发生。如图2所示,在第一阶模态振型中,振动形式为结构顶部左右摆动;而在二阶模

态振型中,在结构顶部附近会有一个近乎不动的节点,结构的最大偏移点位于底部和该节点之间。

## 涡激振动分析方法

### 一、计算流程分析

目前通常采用风电行业公认的欧洲标准EN1991-1-4进行塔架涡激振动的计算,其计算流程如图3所示。

如图3所示,涡激振动分析中最重要的是计算塔架的惯性力,标准中直接给出了惯性力的表达式:

$$F_w(s) = m(s) \cdot (2 \cdot \pi \cdot n_{i,y})^2 \cdot \Phi_{i,y}(s) \cdot y_{F,max} \quad (2)$$

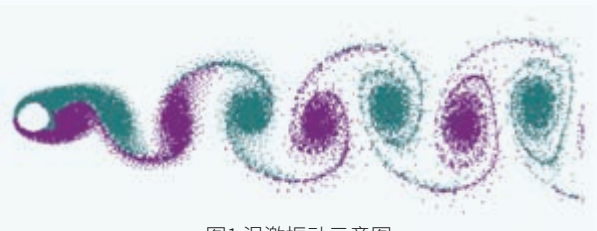


图1 涡激振动示意图

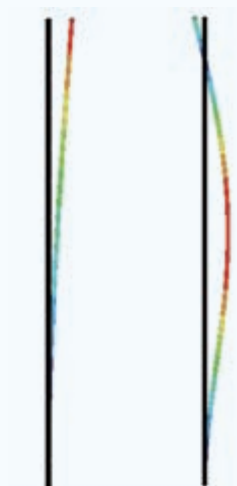


图2 塔架振型(左侧为一阶振型,右侧为二阶振型)

式中,  $F_w(s)$  是作用在单位长度塔架上与风向垂直的惯性力幅值;  $m(s)$  是单位长度塔架的振动质量;  $\phi_{i,y}(s)$  是第  $i$  段塔架位置与最大振动位移归一化后的振动模态值;  $y_{F,\max}$  是塔架最大振动位置处的位移值。

风电机组设计时, 假设风速呈威布尔分布, 得出塔架在相应工况下的应力循环次数:

$$N = 2 \cdot T \cdot n_y \cdot \varepsilon_0 \cdot \left(\frac{V_{crit,i}}{V_0}\right)^2 \cdot \exp\left(-\left(\frac{V_{crit,i}}{V_0}\right)^2\right) \quad (3)$$

式中,  $n_y$  为塔架的固有频率;  $V_{crit,i}$  为临界风速, 计算公式见 (4);  $T$  是以秒为单位的设计寿命, 风电机组设计寿命一般为 20 年, 因此  $T$  可取  $6.3 \times 10^8$  s;  $\varepsilon_0$  为涡激振动的带宽系数, 一般设定为 0.3;  $V_0$  为涡激振动位置的参考风速, 由风电机组的设计参数决定。

$$V_{crit,i} = \frac{b \times n_{i,y}}{St} \quad (4)$$

式中,  $V_{crit,i}$  为塔架发生第  $i$  阶涡激振动的临界风速;  $n_{i,y}$  为塔架第  $i$  阶固有频率;  $St$  为斯特劳哈尔数, 对于塔架圆柱形结构一般取 0.18。

对于塔架分析最关键的两个位置——环焊缝和法兰连接螺栓, 涡激振动分析时也应该予以考虑。Miner 疲劳损伤累积法则认为每次应力循环都对构件造成一定量的损伤, 且损伤可以线性叠加, 于是得出塔架由于涡激振动造成的疲劳损伤为下式:

$$D = N/N_{allow} \quad (5)$$

式中,  $D$  为损伤值,  $N$  为应力循环次数,  $N_{allow}$  为结构的许用循环次数, 该值由相应结构的 S-N 曲线决定。

## 二、最大位移值分析

根据上节的分析发现, 计算涡激振动引起的塔架结构损伤, 其中的关键参数为最大位移值  $y_{F,\max}$ 。标准中规定该值的计算公式为:

$$\frac{y_{F,\max}}{b} = \frac{1}{St^2} \cdot \frac{1}{Sc} \cdot K \cdot K_w \cdot c_{lat} \quad (6)$$

式中,  $b$  为发生涡激振动位置塔架的外径, 一阶涡激振动一般选取 5/6 高度处的外径, 二阶涡激振动一般选取最大位移处的外径;  $Sc$  为 Scruton 数 (质量阻尼参数);  $K$  为振型参数;  $K_w$  为工作长度系数;  $c_{lat}$  为气动激振力系数。

$Sc$  由式 (7) 得出:

$$Sc = \frac{2 \cdot \delta_s \cdot m_{i,c}}{\rho \cdot b^2} \quad (7)$$

式中,  $\rho$  为空气密度;  $b$  为发生涡激振动位置塔架的外

径;  $\delta_s$  为塔架的阻尼比对数衰减率, 该参数在下节将有介绍;  $m_{i,c}$  为第  $i$  阶模态塔架的单位等效质量, 其值由以下公式计算得出:

$$m_c = \frac{\int_0^l m(s) \cdot \Phi_i^2(s) ds}{\int_0^l \Phi_i^2(s) ds} \quad (8)$$

式中,  $m(s)$  为塔架单位长度的质量,  $\Phi_i(s)$  为塔架的一阶振型值。

工作长度系数  $K_w$  计算公式如下:

$$K_w = \frac{\sum_{j=1}^n \int_{l_j}^n |\Phi_{i,y}(s)| ds}{\sum_{j=1}^m \int_{l_j}^n |\Phi_{i,y}(s)| ds} \leq 0.6 \quad (9)$$

式中,  $L_j$  如图 4 所示;  $l_j$  为塔架的总高度;  $n$  为同时发生涡激振动的区域数, 一般只发生某一阶的涡激振动, 因此  $n = 1$ ;  $m$  为振动的波腹数, 对于塔架前两阶涡激振动, 其值取 1。

振型参数  $K$  由公式 (10) 计算得出:

$$K = \frac{\sum_{j=1}^m \int_{l_j}^n |\Phi_{i,y}(s)| ds}{4\pi \times \sum_{j=1}^m \int_{l_j}^n \Phi_{i,y}^2(s) ds} \quad (10)$$

气动激振力系数基本值  $c_{lat,0}$  与雷诺数  $Re$  相关, 具体见公式 (11)。

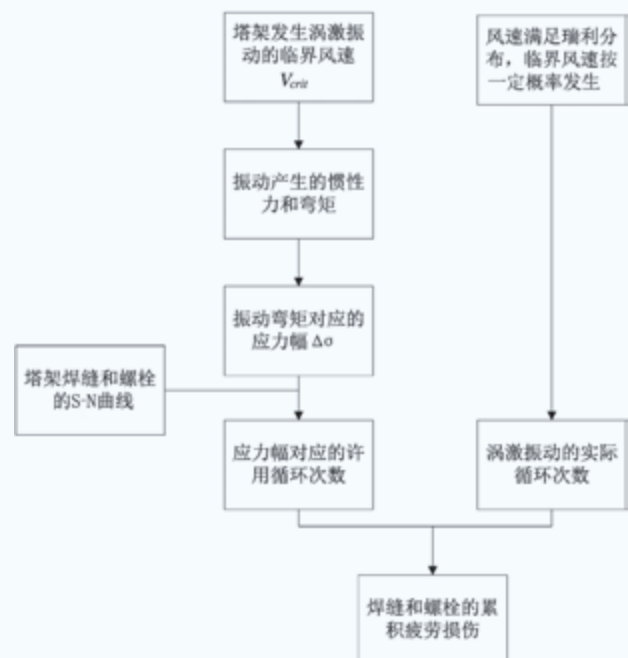


图3 涡激振动计算流程

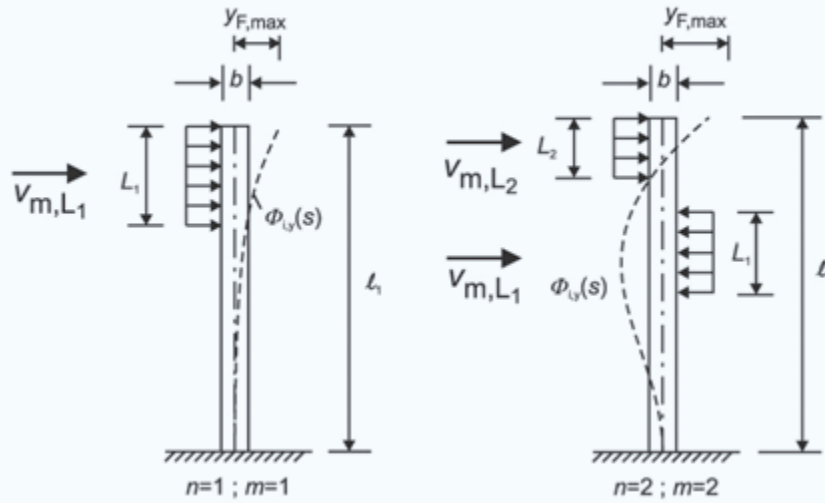


图4 涡激振动相关长度参数 $L_1$ 的示意图

表1 气动激振力系数 $c_{lat}$

$\frac{V_{crit,i}}{V_{m,L_j}} < 0.83$	$c_{lat} = c_{lat,0}$
$0.83 \leq \frac{V_{crit,i}}{V_{m,L_j}} < 1.25$	$c_{lat} = \left(3 - 2.4 \times \frac{V_{crit,i}}{V_{m,L_j}}\right) \times c_{lat,0}$
$1.25 \leq \frac{V_{crit,i}}{V_{m,L_j}}$	0

表2 塔架二阶涡激振动计算参数表

参数	说明	计算值
b	涡激振动位置直径 (m)	3.93
f	涡激振动频率 (Hz)	1
$V_{crit}$	临界风速 (m/s)	21.8
$m_e$	单位等效质量 (kg/m)	2073
$K_w$	长度系数 (-)	0.43
K	振型参数 (-)	0.104
Sc	Scruton 数 (-)	12.45
$y_{F,max}$	最大振动位移值 (m)	0.1

$$c_{lat,0} = \begin{cases} 0.7 & 1 \times 10^4 \leq Re < 3 \times 10^5 \\ -2.5 \times 10^{-6} \times Re + 1.45 & 3 \times 10^5 \leq Re < 5 \times 10^5 \\ 0.2 & 5 \times 10^5 \leq Re < 5 \times 10^6 \\ 0.2 \times 10^{-7} \times Re + 0.1 & 5 \times 10^6 \leq Re < 1 \times 10^7 \\ 0.3 & 1 \times 10^7 \leq Re < 3 \times 10^7 \end{cases} \quad (11)$$

气动激振力系数  $c_{lat}$  与  $c_{lat,0}$  的关系如表 1 所示，其中  $V_{m,L_j}$  如图 4 所示，为涡激振动相应位置的参考风速值。

综合分析以上公式可以看出，在与塔架涡激振动的惯性力有关的参数中结构尺寸、质量、频率和空气密度

等都可以很方便地测量出来，振型可以通过有限元分析软件计算出来，相关的风速也可以通过设计参数获得。其中塔架振动过程中的阻尼主要包含结构阻尼和气动阻尼，涡激振动时气动阻尼较小，因此根据 IEC61400-6CD 标准要求，在计算涡激振动引起的损伤时，不考虑气动阻尼部分。而结构阻尼作为在振动过程中阻碍结构振动的参数，由于其与结构形式、材料、几何尺寸、内部构造及荷载等因素有关，该值具有离散性，因此选取工程上可用且较为合理的阻尼值，一直是国内外科学研究的难题。目前工程上的结构阻尼值多为根据测试数据总结

表3 塔架二阶涡激振动的计算结果 ( $\delta_s = 0.157$ )

项目	结果
塔架二阶固有频率 (Hz)	1
振动风速区间 (m/s)	18.5~25
塔架最大位移 $y_{F,max}$ (m)	0.04
累积二阶涡激振动破坏所需时间 (h)	9500
对于 III 类风能资源区振动风速区间每年累计时间 (h)	198

表4 塔架二阶涡激振动的计算结果 ( $\delta_s = 0.058$ )

项目	结果
塔架二阶固有频率 (Hz)	1
振动风速区间 (m/s)	18.5~25
塔架最大位移 $y_{F,max}$ (m)	0.11
累积二阶涡激振动破坏所需时间 (h)	221
对于 III 类风能资源区振动风速区间每年累计时间 (h)	198

的经验值，而对于高度为 120m 及以上柔塔二阶阻尼的研究文献，笔者暂未找到。

## 二阶涡激振动案例

### 一、柔塔参数

本节以与事故柔塔相类似的某 140m 柔塔（其二阶固有频率为 1Hz）为例，对标准中推荐的和实际测试数据分析得到的二阶结构阻尼值两种工况下的二阶涡激振动进行分析。该柔塔部分二阶涡激振动计算的参数见表 2。

### 二、实测阻尼值

根据该 140m 柔塔（其二阶固有频率为 1Hz）的测试数据，挑选其中具有二阶振动成分（即频谱分析为 1Hz 附近）的塔架停机过程数据进行频谱分析，通过相应的 matlab 软件分析处理二阶振动的塔底载荷和时间曲线的拟合阻尼值，得到二阶阻尼对数衰减率值为 0.058。

### 三、二阶涡激振动计算结果

IEC61400-6CD 标准中推荐的塔架二阶阻尼值为 70m 刚塔的结果，其是否适用于柔塔有待检验。该标准中推荐的塔架二阶涡激振动的阻尼对数衰减率值  $\delta_s = 0.157$ ，因此根据上文介绍的标准 EN1991-1-4 中的涡激振动分析方法，采用该阻尼值对该 140m 柔塔架的二阶涡激振动进行分析的计算结果见表 3。

通过表 3 可以看出，该 140m 柔塔要发生二阶涡激振动破坏至少需累积该振动 9500 小时，远大于 1 年中发生振动的风速区间的累计时间 198 小时，显然与安装不到 1 年的实际情况不符。

同时，上节中柔塔的测试结果显示其二阶阻尼对数衰减率值为 0.058，按照该参数对该 140m 柔塔进行分析，其

结果见表 4。

通过表 4 可以看出，该阻尼值下累积二阶涡激振动破坏所需时间和 III 类风能资源区振动风速区间每年累积的时间接近且偏大。由于阻尼值越大，相应累积二阶涡激振动破坏所需时间越长，因此初步推测事故柔塔的二阶阻尼对数衰减率应比 0.058 略小。

柔塔在设计阶段应充分考虑二阶涡激振动及合适的二阶结构阻尼参数，同时该参数应经过相应的测试验证。如果想减小塔架二阶涡激振动的破坏风险，建议对机组采取适当增加阻尼的措施。

## 总结

本文通过对某 III 类风能资源区风电场安装不到一年且处于非运行状态下的 140m 柔塔发生二阶涡激振动破坏的情况进行简单分析发现，IEC61400-6CD 标准推荐的塔架二阶阻尼对数衰减率值偏大，且分析出的破坏时间和实际情况偏差较大。同时对比某类似柔塔的二阶阻尼测试结果发现，其理论破坏时间和实际时间较接近，因此推断柔塔的二阶阻尼对数衰减率值比标准推荐值要小。同时本文建议塔架设计方在设计柔塔时充分考虑二阶涡激振动的影响，尤其是二阶阻尼对数衰减率值应经过测试验证，同时为了减小二阶涡激振动对柔塔安全的影响，建议在停机和空转状态下采取适当增加阻尼的措施。

由于 IEC61400-6CD 标准推荐的塔架二阶阻尼对数衰减率值偏大，为了使标准能更好地指导风电机组的塔架设计，应向 PT61400-6 塔架标准编制组反映该问题，以期其对该推荐值进行重新审定。✎

（作者单位：北京鉴衡认证中心有限公司）

# 定桨距风电机组叶根加长改造评估

文 | 杨劲, 谢伟, 张伟, 王寿福, 杨松圣

我国风能资源丰富, 陆上风电主要分布于“三北”(东北、华北、西北)地区、东南沿海地区以及内陆局部地区, 其中, “三北”地区风能储量占全国陆上风能储量的 79%。随着全球变暖, 两极与赤道的温差缩小, 全球风速都在变小。有研究指出近 50 年来除青藏高原及其东部和东南地区年平均风速不存在显著线性变化外, 我国大部分地区年平均风速呈明显的减小趋势。加上叶片老化, 国内存量约万台的定桨距风电机组大部分处于欠发状态。出于经济考虑, 运营商希望通过技术手段, 对原叶片进行技术改造以提升其发电性能。

目前, 较为成熟的技术改造方法有叶片加长和加装增功组件两种。相当一部分研究表明, 叶片加长能够有效地提升叶片的发电性能。例如, 山西某风电场数台进行了叶片加长技术改造的机组, 发电量增幅达到 5% 以上。然而, 叶片加长也会带来整机载荷的增加。鉴于目前关于叶片加长对整机载荷及安全性影响的研究相对较少, 本文对某风电场 750kW 定桨距风电机组进行叶根加长技术改造, 并从整机角度分析技改机组的载荷、强度和发电性能, 从而评估该方法的可行性, 也为叶根加长方案的实施提供理论依据。

## 理论基础

风电机组的发电性能主要通过年发电量进行评估。年发电量取决于风电机组的输出功率与风电场的风速分布。

### 一、输出功率

从接收风能的风轮端到输出电能的电机端, 中间要经过空气动力、传动链、电机的转化, 最终电机端实际的输出功率可表示为:

$$W = \frac{1}{2} C_p \rho v^3 R^2 \pi \eta_1 \eta_2 \quad (1)$$

式中,  $W$  为电机输出功率;  $\rho$  为空气密度;  $v$  为额定风速;  $R$  为风轮半径;  $C_p$  为风轮功率系数;  $\eta_1$  为传动链效率;  $\eta_2$  为电机效率。

对实际运行的风电机组来说, 现场的空气密度、叶片

的风能利用系数、风况水平均已确定, 叶片长度的二次方与输出功率成正比。

### 二、风速分布

风速分布作为风电机组设计的重要参考因素, GL2010 标准提供了两种分布函数, 分别为威布尔函数和瑞利函数。根据 IEC61400-1 规定, 本文将以瑞利函数进行载荷和年发电量的计算, 其表达式为:

$$p(V) = 1 - \exp\left[-\pi\left(\frac{V}{2V_{ave}}\right)^2\right] \quad (2)$$

式中,  $V$  为轮毂高度处的风速;  $p(V)$  为风速  $V$  出现的概率;  $V_{ave}$  为轮毂高度处的年平均风速。

### 三、年发电量

风电机组的年发电量不仅取决于风电机组自身的输出功率, 还与现场的风力条件息息相关。年发电量的计算方法为风速在瑞利分布的情况下, 风电机组全年从切入到切出各个风速段所产生年发电量之和。计算公式如下:

$$P_{AE} = \int_{V_{cut-in}}^{V_{cut-out}} 8760 \cdot P(V) \cdot p(V) \cdot dV \approx \sum_{V_{cut-in}}^{V_{cut-out}} 8760 \cdot P(V) \cdot p(V) \cdot \Delta V \quad (3)$$

式中,  $P_{AE}$  为年发电量;  $V_{cut-in}$  为切入风速;  $V_{cut-out}$  为切出风速;  $V$  为轮毂高度处风速;  $P(V)$  为机组在风速  $V$  时的输出功率;  $p(V)$  为风速  $V$  出现的概率。

## 叶根加长方案设计与评估

### 一、叶根加长节设计

结合当地风电场的环境、整机参数, 对 750kW 定桨距风电机组进行叶根加长技术改造。叶根加长节的设计步骤如图 1 所示。

根据发电量增益需求和设计载荷的限制, 使用 Bladed 进行载荷计算与动态年发电量评估, 同时结合整机各部件的强度校核, 不断计算迭代, 获得最佳的叶片长度。最终确定加长节长度为 650mm, 叶片由 24m 增加到 24.65m。加长节

采用圆筒形式并通过长螺栓固定，如图 2 所示。

其中原机组型号为原 50-750，技改机组型号为改 51.3-750。技改机组的整机参数如表 1 所示。

根据上述参数设置 Bladed 整机模型，并将技改后的叶片模型输入到 Bladed 中。以 GL2010 标准为依据，计算该模型的极限、疲劳等工况，并根据计算结果对整机的功率、载荷、强度进行评估。

## 二、计算结果评估

### (一) 整机载荷与强度分析

由于叶片加装叶根加长节，导致了整机载荷的增加。

通过统计各个工况下的载荷计算结果，获得技改机组各个部件的关键载荷，并与原机组的设计载荷进行对比，结果如表 2 所示。

叶根  $M_{xy}$  主要用于轮毂强度分析；旋转轮毂和固定轮毂的  $M_x$ 、 $M_{yz}$  主要用于主轴、机架、主轴承座和各位置连接螺栓等部件的强度分析；塔架顶部的  $M_{xy}$  主要用于偏航系统和塔顶法兰的强度分析。由表 2 对比结果可知，技改机组所有关键载荷均小于原设计载荷，因此技改机组的整机强度满足正常运行要求。但轮毂  $M_x$  载荷与原设计载荷十分接近，额外增加叶根加长节长度可能造成轮毂载荷超限，进而

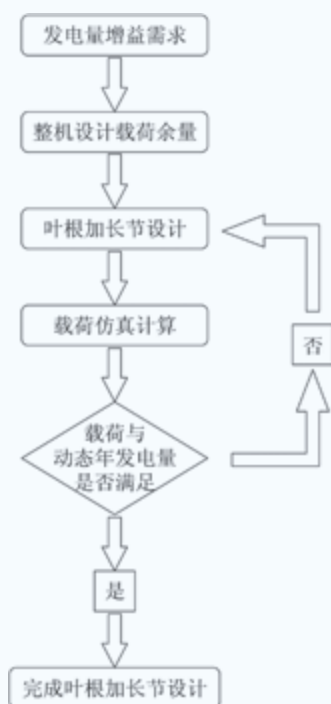


图1 叶根加长节设计流程



图2 叶根加长节示意图

表1 技改机型参数

序号	项目	改 51.3-750
1	额定功率 (kW)	750
2	风轮直径 (m)	51.3
3	轮毂中心高度 (m)	55
4	轮毂高度额定风速 (m/s)	15
5	轮毂中心高度运行风速 (m/s)	3.5 ~ 25
6	空气密度 (kg/m <sup>3</sup> )	0.954
7	轮毂中心高度年平均风速 (m/s)	8.5
8	湍流强度平均风速 15m/s 时的特征值 $I_{15}$	0.18
9	轮毂中心高度 50 年一遇 10 分钟最大风速 (m/s)	42.5
10	轮毂中心高度 1 年一遇 10 分钟最大风速 (m/s)	34
11	轮毂中心高度 50 年一遇 3 秒极大风速 (m/s)	57
12	轮毂中心高度 1 年一遇 3 秒极大风速 (m/s)	47.6

表2 载荷对比

部件	载荷	技改机组计算载荷	原设计载荷	技改机组 / 原设计载荷
叶根 B-Root	$M_{xy}$	1270.8	2055.9	61.8%
旋转轮毂 R-Hub	$M_x$	1213.6	1285.2	94.4%
	$M_{yz}$	690.8	1551.4	44.5%
固定轮毂 S-Hub	$M_x$	1213.6	1190.4	94.4%
	$M_{yz}$	690.8	1551.4	44.5%
塔架顶部 T-Top	$M_{xy}$	1198.3	1710.3	70.1%



导致轮毂与主轴连接螺栓强度不足。

(二) 叶根加长节与连接螺栓强度校核

1. 叶根加长节强度校核

叶根加长节两端分别与桨叶和轮毂相连，如图 3 所示，加长节坐标系与叶根坐标系一致。叶根加长节采用内外筒结构形式，如图 4 所示，该结构使用 Q345E 钢板加工而成，屈服强度为 335MPa。

叶根加长节与轮毂连接处（以下简称加长节底部）的载荷计算如下式所示：

$$\begin{cases} M_x = M_x' - F_y \cdot h - F_y'' \cdot \frac{h}{2} \\ M_x = M_y' + F_x \cdot h + F_x'' \cdot \frac{h}{2} \\ M_z = M_z' \\ F_x = F_x' + F_x'' \\ F_y = F_y' + F_y'' \\ F_z = F_z' + F_z'' \end{cases} \quad (4)$$

式中， $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$ 、 $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  为叶根加长节底部载荷； $M_x'$ 、 $M_y'$ 、 $M_z'$ 、 $F_x'$ 、 $F_y'$ 、 $F_z'$  为叶根（叶片本体）载荷； $F_x''$ 、 $F_y''$ 、 $F_z''$  为加长节所承受的风载和重力载荷。其中： $F_x'' = 0.5P \cdot A$ ， $F_y'' = -mg \cdot \sin\theta$ ， $F_z'' = -mg \cdot \cos\theta$ ； $P$  表示风压， $P = V^2/1.6$ ； $A$  为风截面积； $m$  为叶根加长节质量； $\theta$  为风轮方位角； $h$  为加长节长度。使用上述载荷计算公式，通过 Bladed 通道组合，得到加长节底部最大载荷为： $M_{xy} = 1366.6\text{kNm}$ ， $F_z = 258.1\text{kN}$ 。

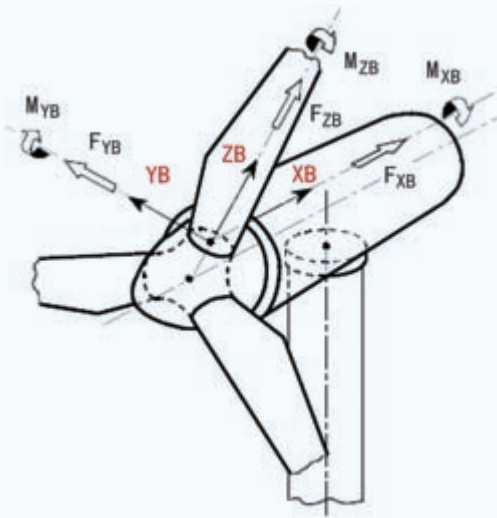


图3 叶根坐标系

加长节截面模量为：

$$W_z = \frac{\pi(1335^4 - 1315^4)}{32 \times 1335} + \frac{\pi(1175^4 - 1155^4)}{32 \times 1175} = 24255819\text{mm}^3$$

加长节面积为：

$$S = \frac{\pi(1335^2 - 1315^2)}{4} + \frac{\pi(1175^2 - 1155^2)}{4} = 78226\text{mm}^2$$

加长节最大应力为：

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{xy}}{W_z} + \frac{F_z}{S} = 59.6\text{MPa}$$

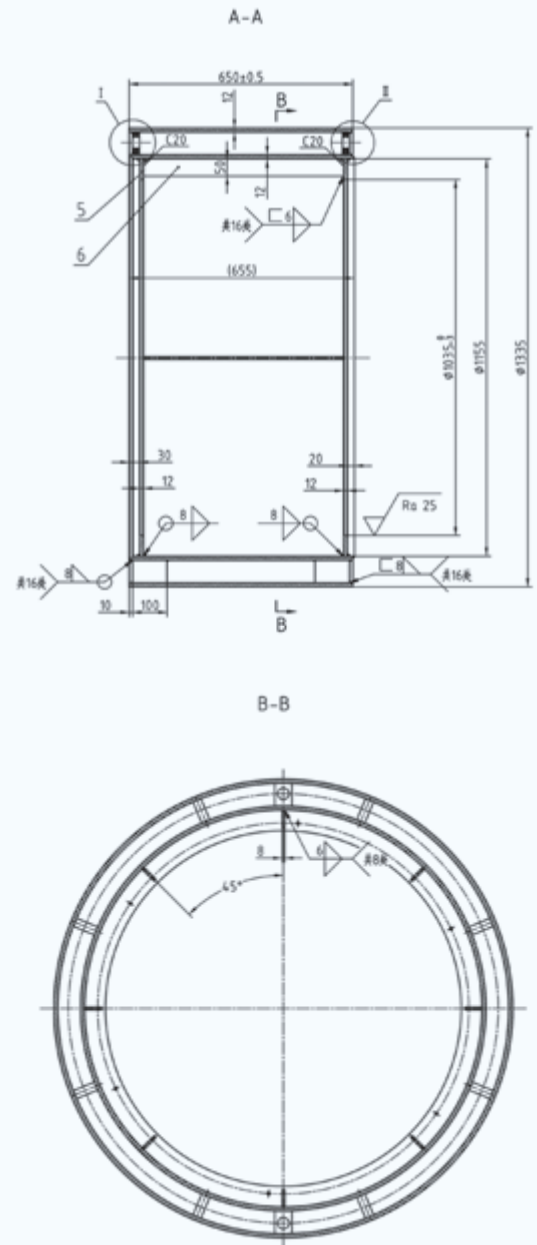


图4 叶根加长节结构示意图

加长节采用 Q345E 钢板加工而成，屈服强度为 335MPa；安全系数采用 1.1，则许用应力为 304.5MPa。因此，叶根加长节最大应力小于许用应力，满足强度要求。

## 2. 连接螺栓强度校核

叶根加长节连接螺栓强度校核采用工程算法，假设工作载荷全部由螺栓承受，计算公式如下：

$$F_0 = F_M + \frac{2Mxy}{R \cdot n} + \frac{Fz}{n} \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{bolt}}^2 = \frac{F_0}{A_s} \quad (6)$$

式中， $F_0$  为受力最大螺栓的轴向力； $F_M$  为螺栓预紧力； $R$  为螺栓分布半径； $n$  为单个加长节上的螺栓个数； $\sigma_{\text{bolt}}$  为螺栓截面应力； $A_s$  为危险截面面积。

本次技改所采用的连接螺栓为 M30，细杆直径为 27mm，扭矩为 1350，扭矩系数为 0.12 ~ 0.14。根据上述公式，可得到螺栓截面应力  $\sigma_{\text{bolt}}$  为 874.86MPa，小于螺栓许用截面应力 940MPa，满足强度要求。

## (三) 气动性能评估

通过 Bladed 计算仿真得出原 50-750 与改 51.3-750 机组的静态功率曲线，如图 5 所示。可以看出，经过叶片加长，改 51.3-750 机组在各个风速段功率值都高于原 50-750 机组。尤其在 15m/s 之后的风速段，原 50-750 机组功率始终处于

650 ~ 670kW，最大为 669kW。而改 51.3-750 机组在 15m/s 之后的功率为 730 ~ 745kW，最大功率为 745kW。

对于机组年发电量的评估不仅需要功率，还需将风电场的平均风速和风频分布考虑在内。经考察，两机组的理论年期望功率，如图 6 所示。

从图中可以看出，两机组年期望功率曲线与瑞利分布基本一致。虽然如图 5 所示，在 10 ~ 12m/s 风速区间内两机组的功率差距并不明显，但考虑风频分布后，在该风速区间内，改 51.3-750 机组期望功率要明显高于原 50-750 机组。计算得到改 51.3-750 机组年期望功率为 232.73kW，比原 50-750 机组的 219.84kW 高出 5.86%。

基于数据完整性与风速相近评估原则，选取 2013 年作为技改前的代表年用于运行数据对比分析，量化评估技改后（2018 年）增功情况。考虑到风速和实际发电时间不同对发电量存在影响，对风速和发电时间进行归一化。其中，风速归一化指的是将技改和未技改机组在技改前后两个时间段均按照一个特定的平均风速计算其发电量；发电时间归一化则是指将技改机组和未技改机组在技改前后均按照统一的发电时间求得发电量。基于风速、发电时间归一化后的发电量对比如表 3 所示。

以未技改组数据为基准，技改前技改组的发电量是未

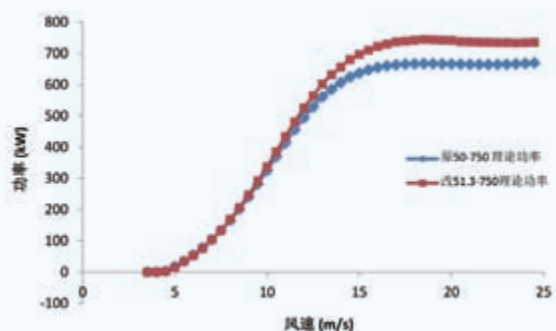


图5 理论静态功率曲线

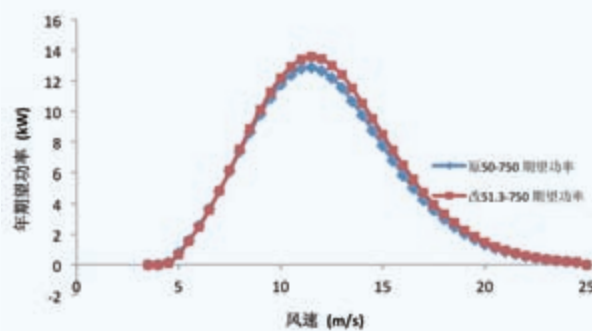


图6 期望功率曲线

表3 技改与未技改机组归一化发电量对比

时间	技改组归一化发电量 (MWh)	未技改组归一化发电量 (MWh)	横向比较 (以未技改组为基准)
技改前	2156.97	2193.85	98.32%
技改后	2205.33	2112.74	104.38%
纵向比较 (以技改前为基准)	102.24%	96.30%	106.16%

技改组的 98.32%；技改后技改组的发电量是未技改组的 104.38%。以技改前数据为基准，技改后未技改组的发电量是技改前的 96.30%；技改后技改组的发电量是技改前的 102.24%。综合考虑两组样本初始差异，假定两组样本结构性能相同，可得技改机组发电量提升 6.16%。

## 结论

本文针对某风电场 750kW 机组叶根加长改造展开研究。通过载荷计算、部件强度校核和发电性能增益评估，对加长节进行优化迭代，最终将加长节定为 650mm。在载荷与部件强度满足设计要求的前提下，发电性能得到了较大的提升，计算结果如下所述：

(1) 根据 Bladed 计算结果，技改机组所有部件的关

键载荷均低于原设计载荷。其中轮毂  $M_x$  弯矩载荷已经达到原设计载荷的 94.4%，叶根加长节长度接近上限，额外的加长会造成轮毂与主轴连接螺栓强度不足。

(2) 叶根加长节采用 Q345E 钢板，许用应力为 304.5MPa，叶根加长节在极限载荷下的最大应力为 59.6MPa，小于许用应力 304.5MPa。加长节连接螺栓最大应力为 874.86MPa，小于螺栓的许用应力 940MPa。叶根加长节及连接螺栓强度均满足强度要求。

(3) 通过理论功率曲线对比可知，技改机组的理论功率较原机组有较大的提升，在风速大于 15m/s 时尤为明显。从期望功率的对比可知技改机组功率提升的较大风速段为 10 ~ 12m/s。通过对实测年发电量数据进行归一化处理，得出技改机组年发电量提升为 6.16%。

(作者单位：华能新能源云南分公司)





www.chinawind.org.cn



# 2019 北京 国际风能大会暨展览会 CHINA WIND POWER 2019

2019年10月22-24日 中国国际展览中心（新馆）  
October 22-24, Beijing, China  
China International Exhibition Center(New Venue)



官方微信 CWPBEIJING

# 三桩基础海上风电机组结构波浪载荷实验研究

文 | 施勇, 姜贞强, 任年鑫, 王滨

随着环境恶化问题和能源短缺问题日趋严重, 世界各国都在积极寻求构建一种清洁、安全、可靠的可再生能源系统。在众多新能源中, 风电技术较为成熟, 具有大规模开发前景。特别是海上风电开发, 以节约宝贵土地资源、风力更稳定、风电机组单机容量更大、年有效利用小时数更高、受噪音标准限制更小、运输条件更为便利等优势, 已成为全球风电产业发展的重要方向。

目前世界范围内的海上风电场主要集中在近海浅水区域, 主要采用固定式基础支撑结构, 如单桩、三桩、重力式、导管架式等。其中, 三桩基础在我国东部近海风电场建设中有着广泛的应用。不同于陆上风电结构, 除了上部风电机组叶片及塔架风载荷, 近海风电结构还要考虑波浪载荷对其动力响应的重要影响。

各国学者通过理论分析和数值仿真对海上风电机组结构波浪载荷进行了研究, 主要是采用 Morison 及其修正公式、势流理论和计算流体动力学 (CFD) 等方法求解海上风电机组结构的波浪荷载、动力响应特征以及桩土耦合效应等; 部分学者也通过物理模型实验验证了浮式风电机组结构水动力荷载特征数值计算结果的有效性, 但鲜见针对三桩基础的海上风电机组结构系统波浪荷载的物理模型实验研究。

本文主要基于物理模型实验方法, 重点研究三桩基础近海风电机组结构的波浪荷载特征。结合某实际工程 4MW 三桩基础海上风电机组模型, 构建三桩基础风电机组结构的缩尺物理模型实验测试系统, 重点研究典型规则波浪、不同波浪入射方向和随机波浪海况下该结构系统的水动力响应特征。

## 实验模型

该模型实验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室进行。波浪水池的主要尺寸为  $40\text{m} \times 8\text{m} \times 1\text{m}$ , 最大

工作水深为  $0.6\text{m}$ ; 自制推板式低、高频 (长、短周期) 复合波造波机, 最大波高为  $0.25\text{m}$ ; 实验采用微机控制及同步数据采集系统。基于弗洛德数相似准则, 三桩基础海上风电机组 1:50 缩尺物理实验模型如图 1 所示。此外, 在三桩基础底部对称布置 4 个高精度防水型测力天平 (协调受力), 测试海上风电机组基础结构 3 个平动方向的力和 3 个转动方向的弯矩, 传感器采样频率为  $100\text{Hz}$ , 并在实验前进行了校核标定。



图1 三桩基础海上风电机组实验模型系统  
(1: 50缩尺比)

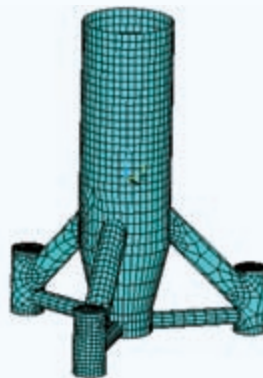


图2 三桩基础结构水动力数值参考模型

## 水动力数值模型

基于势流理论，利用广泛应用于波浪力载荷计算的AQWA软件构建三桩基础支撑结构的水动力数值模型，如图2所示。

## 结果分析

重点考虑最不利波浪载荷工况，即极端高水位情况，此时水深10.0m。为了使实验结果更好地指导实际工程设计，现将所有实验数据依据缩尺关系（ $\lambda = 1/50$ ）放大到全尺寸模型。

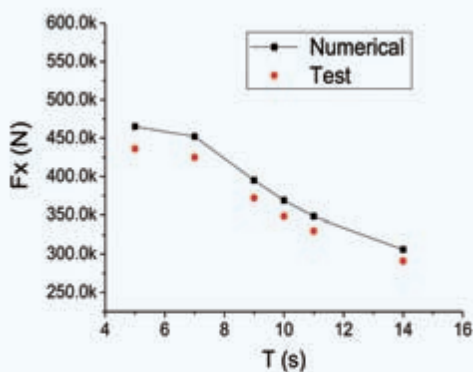
### 一、典型规则波浪工况

首先，对该三桩基础风电机组模型进行典型规则波浪工况的测试，考虑不同周期波浪的影响（波高均为2m），并将主要实验结果与对应数值结果进行对比分析，结果如

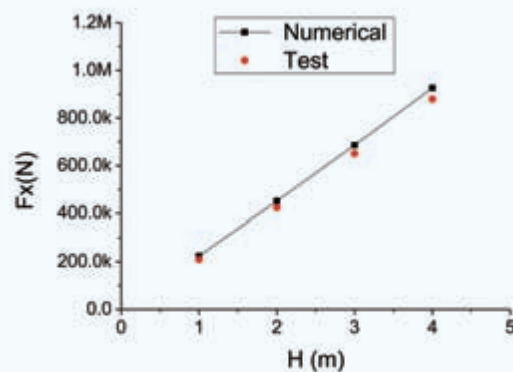
图3所示。从图3可以看出，三桩基础风电机组的基底水平力和基底弯矩响应幅值随着波浪周期的增加而减小，实验测试结果与数值模拟结果有着很好的一致性。基底水平力和基底弯矩的实验测试结果小于数值模拟结果约5%~7%，即数值模拟结果过高地估计了三桩基础的动力响应幅值（主要是因为数值模型没有考虑波浪粘性阻尼的影响）。可见，基于数值模拟结果的工程设计是偏于安全的。

此外，进一步研究不同波高对三桩基础风电机组主要动力响应幅值的影响规律，并将主要实验结果与对应数值结果进行对比分析，结果如图4所示。

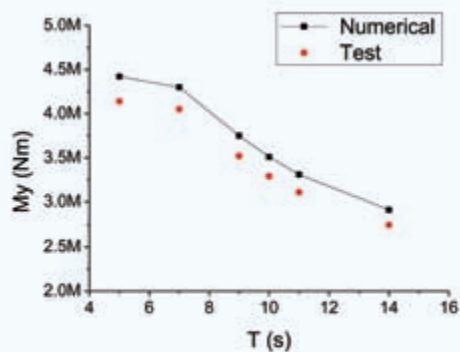
从图4可以看出，三桩基础风电机组的基底水平力和基底弯矩响应幅值随着波浪波高的增加而呈现近似线性的增加，实验测试结果与数值模拟结果有着很好的一致性。与不同波浪周期工况下测试结果与数值结果的对比情况相似，基底水平力和基底弯矩的实验测试结果小于数值结果约5%~8%，即数值模拟结果仍较高地估计了三桩基础的



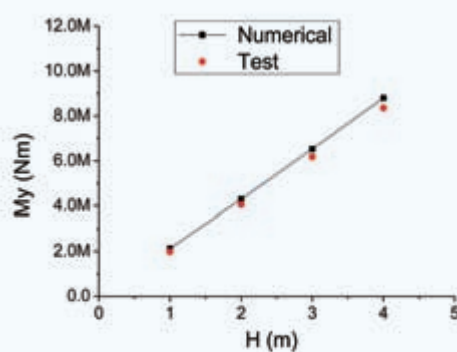
(a) 基底水平力



(a) 基底水平力



(b) 基底弯矩



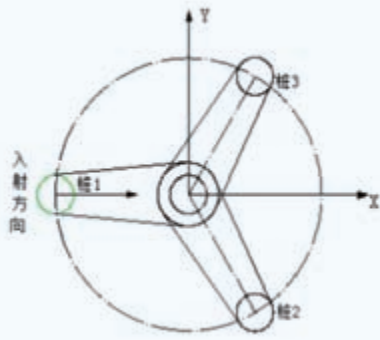
(b) 基底弯矩

图3 不同周期下风电机组主要动力响应幅值对比 (H=2m)

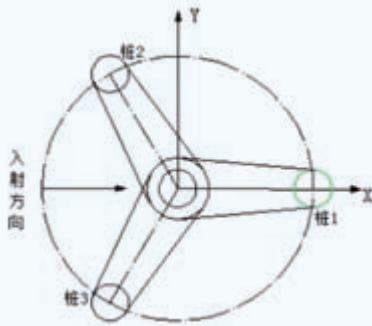
图4 不同波高下风电机组主要动力响应幅值对比 (T=10s)

动力响应幅值。

此外，进一步研究不同波浪入射角度对三桩基础风电机组结构动力响应特征的影响 ( $H = 2\text{m}$ ,  $T = 7\text{s}$ )，鉴于该模型为  $120^\circ$  对称结构，因此选取代表性波浪入射角度分别为： $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ ，波浪入射与三桩基础所成角度示意图如图 5 所示。不同波浪入射角度下三桩基础主要动力响应幅值如表 1 所示。从表 1 可以看出，随着波浪入射角从  $0^\circ$  向  $60^\circ$  增加，基底水平力和基底弯矩的响应幅值逐渐下降，即波浪  $0^\circ$  入射角为最不利波浪载荷角度。因此，依



(a)  $0^\circ$  入射



(b)  $60^\circ$  入射

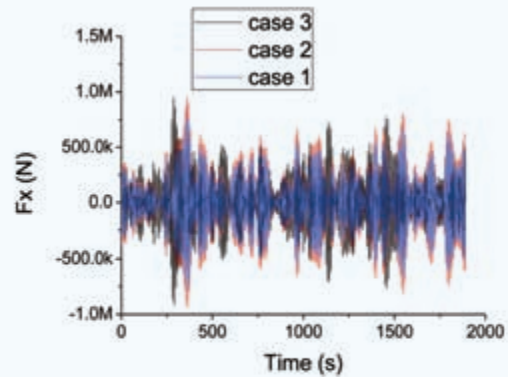
图5 入射波浪与三桩基础所成角度示意图

照结构安全设计的基本原则，接下来模型实验的波浪入射角度统一选择  $0^\circ$ 。

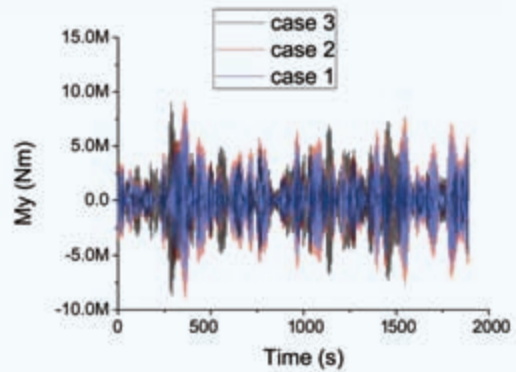
## 二、典型随机波浪工况

鉴于实际海况的复杂性，进一步研究典型随机海况下三桩基础海上风电机组结构的动力响应特征。选取 Jonswap 谱对不规则波浪的统计信息进行描述 ( $\gamma = 3.3$ )，参考的典型工况 ( $0^\circ$  入射波浪) 如下：

Case 1 :  $H_s = 2\text{m}$ ,  $T_p = 7\text{s}$ , Jonswap 谱 (风电机组一般运行海况)



(a) 基底水平力



(b) 基底弯矩

图6 代表性不规则波浪下风电机组主要动力响应时程对比 (Jonswap谱)

表1 不同波浪入射角度对三桩基础主要动力响应幅值

波浪入射角度 ( $^\circ$ )	$F_x$ (N)	$M_y$ (Nm)
0	4.25E+05	4.05E+06
30	3.71E+05	3.52E+06
45	3.01E+05	2.86E+06
60	2.13E+05	2.01E+06

表2 代表性Jonswap谱工况下主要动力响应特征统计

JP	基底水平力 $F_x$ (kN)		基底弯矩 $M_y$ (kNm)	
	最大值	标准差	最大值	标准差
Case 1	789	230	7490	2177
Case 2	946	275	8990	2613
Case 3	952	235	9050	2230

Case 2 :  $H_s = 2.4\text{m}$ ,  $T_p = 7\text{s}$ , Jonswap 谱 (风电机组最大运行海况)

Case 3 :  $H_s = 3\text{m}$ ,  $T_p = 9\text{s}$ , Jonswap 谱 (极端海况)

重点研究上述三种代表性不规则波浪海况下基底水平力和基底弯矩的响应特征, 结果如图 6 所示。从图 6 可以看出, 随着三种代表性海况波高的增大, 其主要动力响应幅值及波动情况也显著增加, 具体相关统计结果如表 2 所示。该结果对于三桩基础海上风电机组结构的极限结构承载力设计和疲劳性能分析都有着积极的参考价值。

此外, 进一步研究代表性 PM (Pierson-Moscowitz) 谱工况下三桩基础海上风电机组的动力响应特征, 所选取的有义波高和谱峰周期与 Jonswap 谱一致, 具体波浪工况 ( $0^\circ$  入射波浪) 如下:

Case 1 :  $H_s = 2\text{m}$ ,  $T_p = 7\text{s}$ , PM 谱 (风电机组一般运行海况)

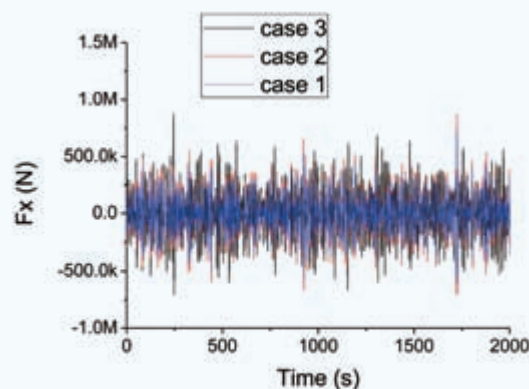
Case 2 :  $H_s = 2.4\text{m}$ ,  $T_p = 7\text{s}$ , PM 谱 (风电机组最大运行海况)

Case 3 :  $H_s = 3\text{m}$ ,  $T_p = 9\text{s}$ , PM 谱 (极端运行海况)

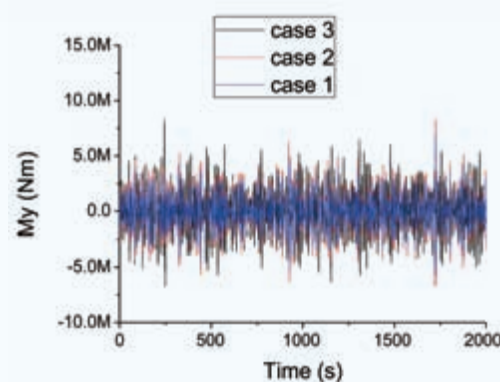
重点研究上述三种代表性不规则波浪海况下基底水平力和基底弯矩响应特征, 结果如图 7 所示。从图 7 可以看出, 与 Jonswap 谱相似, 随着三种代表性海况波高的增大, 其主要动力响应幅值及波动情况也有所增加, 具体相关统计结果如表 3 所示。从表 3 与表 2 对比分析结果 (表 4) 可以看出, PM 谱下的基底水平力和基底弯矩的动力响应最大值及标准差显著小于 Jonswap 谱下的对应结果, 其中, 前者的动力响应最大值约为后者的 90%; 前者的标准差约为后者的 70% ~ 90%。由此可知, 三桩基础动力响应的最大值对波谱类型较为不敏感, 而三桩基础的疲劳性能受波谱类型的影响较大。

## 结论

通过构建某 4MW 三桩基础海上风电机组结构的缩尺实验模型, 较为系统地测试研究了典型规则波浪、不同波浪入射方向和随机波浪下三桩基础结构的水动力载荷特征。对比数值模拟结果与实验结果可知, 数值模拟结果略大于实验结果 (约 5% ~ 10%), 三桩基础在  $0^\circ$  入射波浪方向上的载荷最大, 即最为不利。此外, 三桩基础动力响应的最大值对波谱类型较为不敏感, 而三桩基础的疲劳性能受波谱类型的影响较大 (约 70% ~ 90%)。✎



(a) 基底水平力



(b) 基底弯矩

图7 代表性不规则波浪下风电机组主要动力响应时程对比 (PM谱)

表3 代表性PM谱工况下主要动力响应特征统计

PM	基底水平力 $F_x$ (kN)		基底弯矩 $M_y$ (kNm)	
	最大值	标准差	最大值	标准差
Case 1	725	160	6881	1526
Case 2	873	193	8292	1831
Case 3	878	214	8345	2036

表4 代表性PM谱与Jonswap谱工况下主要动力响应统计信息对比

PM/JP	基底水平力 $F_x$		基底弯矩 $M_y$	
	最大值	标准差	最大值	标准差
Case 1	91.89%	69.57%	91.87%	70.10%
Case 2	92.28%	70.18%	92.24%	70.07%
Case 3	92.23%	91.06%	92.21%	91.30%

(作者单位: 施勇: 江苏海上龙源风力发电有限公司; 姜贞强, 王滨: 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司; 任年鑫: 大连理工大学深海工程研究中心)



# WIND ENERGY

A COVERAGE OF ALL EXCELLENCE OF WIND

传播专业知识 启迪成长智慧



[www.fengneng.org.cn](http://www.fengneng.org.cn)



扫一扫，关注中国风能协会官方微信  
轻松阅读杂志精华文章

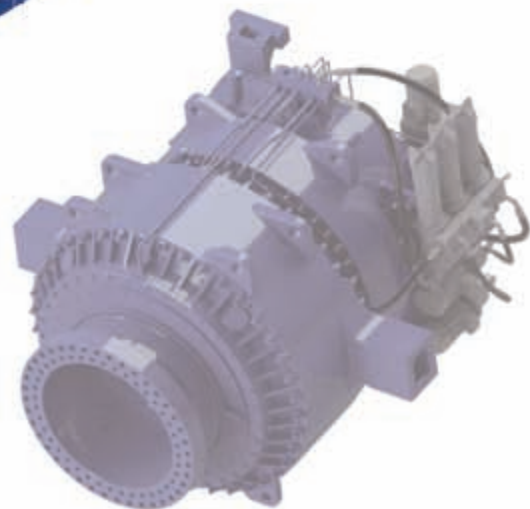
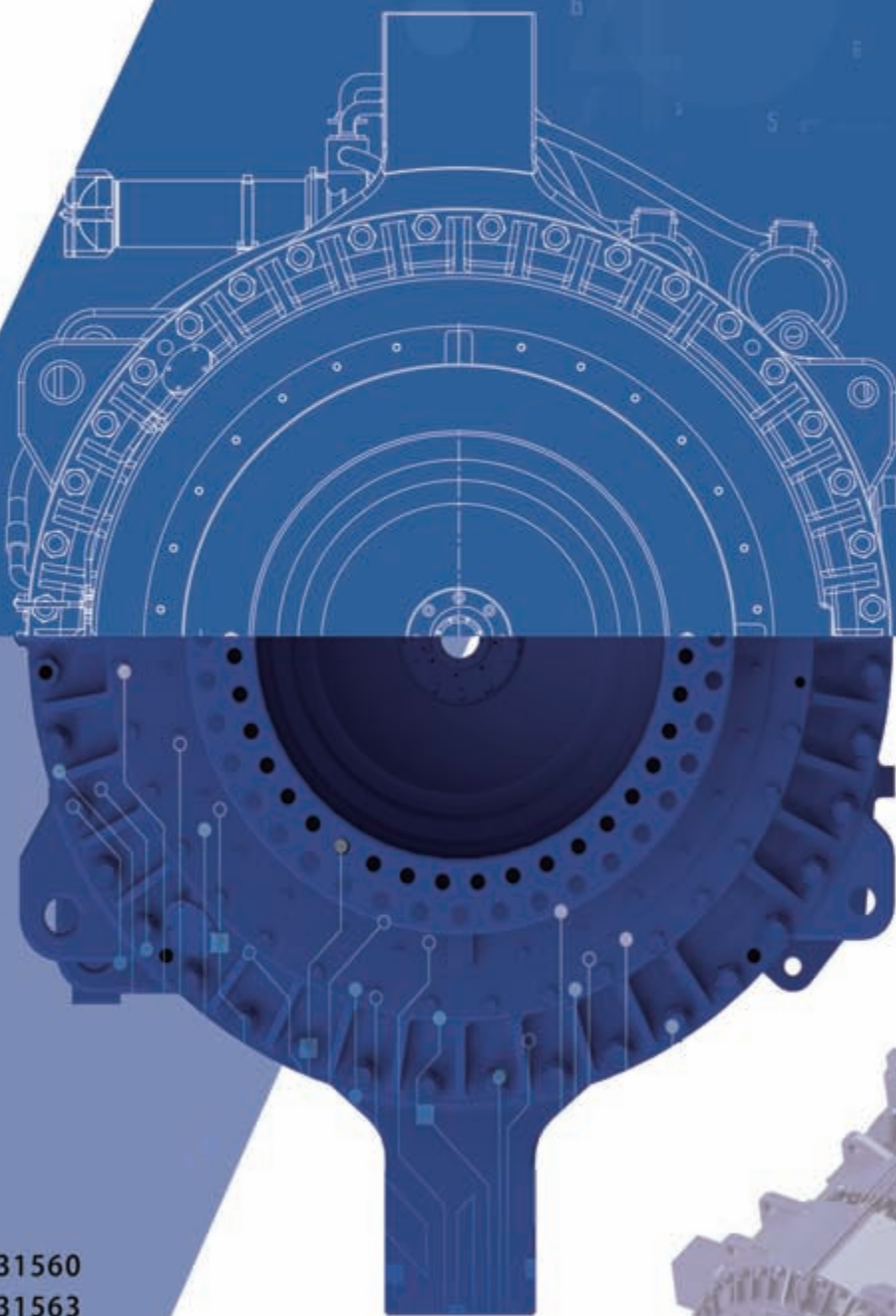
**风能**  
WIND ENERGY 杂志

地址：北京市东城区和平里北街6号远东文化园26楼3层  
电话：010-59796665-3953(编辑部)  
010-64405232-3501(广告部)  
传真：010-64228215 邮编：100013  
投稿邮箱：gaojian@cwea.org.cn



**重庆齿轮箱有限责任公司**  
CHONGQING GEARBOX CO.,LTD

# 改变成就未来



服务电话：023-47231560

销售电话：023-47231563

网址：[www.cngpower.cn](http://www.cngpower.cn)

邮编：402263

传真：(023) 47231590

地址：重庆江津德感工业园区

电子邮箱：[cngpower-fd@chongchi.com](mailto:cngpower-fd@chongchi.com)

# 罗特艾德 (rothe erde®)

## 全球先进的回转支承制造商

徐州罗特艾德回转支承有限公司是由德国蒂森克虏伯集团旗下的罗特艾德公司与徐工集团合资组建的回转支承专业制造商,我们的产品在工程机械、风力发电、海洋平台、冶金、矿山、医疗CT机以及军工等领域有着广泛的应用,一流的产品设计、精湛的制造工艺和可靠的质保体系让我们的回转支承产品享誉中外。创立于1861年的德国罗特艾德公司在全球10个国家建有16家回转支承工厂,个性化的解决方案更快捷地为客户提供优质服务。

徐州罗特艾德回转支承有限公司

地址: 徐州经济开发区螺山路15号

邮编: 221004

销售电话: +86 516 87661998

销售传真: +86 516 87767228

sales@xreb.com | www.xreb.com

engineering. tomorrow. together.

数据来自于德国总部网站<http://www.thyssenkrupp-rotheerde.com/GB/index.htm>



thyssenkrupp