

# 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

09



2017年 总第91期 赛迪出版物

### P38. 海上风电

2017年上半年德国海上风电新增并网容量 640.6MW

### P58. 技术

叶片故障时风力发电机组瞬态受力特性分析

## P22

# 远景为什么

从掌握风电机组核心控制系统开始,这家公司一路向前,依次打开了变频器、变桨、叶片、发电机和齿轮箱的黑匣子。而这,或将引发连锁反应,加快中国风电走向世界强国的步伐。

ISSN 1674-9219



人民币 25元

# 用创新回应发展的需求

文 | 秦海岩



我国正处在经济社会转型的关键时期，也是建设生态文明、推动能源革命的攻坚阶段，为了完成相关约束性指标和战略安排，风能等可再生能源必须在“十三五”实现从补充能源向替代能源的转变。面对一系列发展中的需求和难题，唯有通过体制机制、商业模式和技术创新的方式才能有效回应和解决。因此，如何提高产业发展质量，提升行业创新能力，已是时代赋予“风电人”的使命。历史上，中国风电从零起步，正是通过对国外产品的引进、消化、吸收、再创新，形成了具有一定国际竞争力的完善产业体系，无论是装机量还是发电量，已跃居世界第一。当前，要继续保持全球引领的优势，就必须在“再创新”上下大功夫。从近几年的发展趋势中可以看出，国际化、定制化、智能化、互联化和服务化日益明朗，这将成为我国风电下一个阶段发展的主线，而提升技术和服务的创新能力将是企业增强竞争力的法宝。

随着产业发展的“东进”，无论是中东南部低风速地区，还是海上区域，复杂的风能资源环境都对风电机组的适应性提出了更高要求，这就要求企业根据不同环境和不同客户的需求进行差异化配置，比如，在同一风电场的不同机位点配置不同的塔筒高度、风轮直径以及控制策略，最大限度提升风能资源的利用效率。因此，企业必须提升基于定制化的设计和生产能力。不仅如此，风电后市场作为服务体系的重要组成部分，也蕴藏着更大的市场和更多样的商业模式，众多企业已经意识到这一点，并加大在风电场服务模式和软件开发方面的投入，这都将是决定企业竞争力的核心指标。

当今，互联网已渗透到风电的各个环节，并深刻地改变着行业。借助先进的传感器、高速的传输线路和大容量数据存储装置等，可以在微观选址中实现低成本、快速、精准寻找最优质的风能资源，风电运行中则实现了设备的智能监测和智能控制，大大提高了机组的发电效率和可靠性。我们注意到一些风电企业将互联网创新基因与产业需求相结合产生了非常好的效果，例如，远景能源作为一家具有创新精神的企业，正是通过将互联网思维和技术融入风电产品中，在获得良好市场反响的同时，实现了快速发展。未来互联网带来的物联网、人工智能、云计算等功能还会不断发展和成熟，行业唯有深度融入其中才是创新的题中之义。

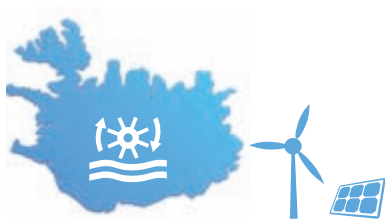
伴随着企业的做大做强，更需要在国际竞争中占有一席之地，因此，协同创新就尤为关键。现在，世界上的风能、太阳能利用大国都在加大公共试验平台的建设，推动那些研发投入大、难度高、周期长的关键共性技术发展，这些技术对提升产业技术水平、产业质量、产业效率都有很强的带动作用，这也是实现产业进步和创新发展的基础。因此，在企业不断适应新形式、新需求而加速创新的同时，国家也应加大对创新的支持力度。通过不断创新，使可再生能源电力获得高于其他能源品种的竞争力，既是行业发展的出路，也是能源转型的方向。❏

22

封面故事 Cover Story

## 远景为什么

从掌握风电机组核心控制系统开始，这家公司一路向前，依次打开了变频器、变桨、叶片、发电机和齿轮箱的黑匣子。而这，或将引发连锁反应，加快中国风电走向世界强国的步伐。



12 专栏 Column

## 冰岛的能源转型（下）

18 对话 Dialogue

## 风电行业对升降梯的价值缺乏全面认知

专访德国海铎风电亚太区执行总经理于红国。



## 历史回眸

2014年9月5日，国家能源局印发《关于规范风电设备市场秩序有关要求的通知》，明确提出，接入公共电网（含分布式项目）的新建风力发电项目所采用的风力发电机组及其风轮叶片、齿轮箱、发电机、变流器、控制器和轴承等关键零部件，须按照《GB/Z25458-2010 风力发电机组合格认证规则及程序》进行型式认证，认证工作由国家认证

认可主管部门批准的认证机构进行。风电开发企业进行设备采购招标时，应明确要求采用通过型式认证的产品。《通知》还要求规范风电设备质量验收工作，建立质量保证期验收和争议解决机制。国家能源局将委托相关技术单位开展全国风电设备质量信息监测和评价，并定期发布风电设备市场的质量相关信息，引导产业健康发展。



# 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

2017 CHINA  
WINDPOWER

17-19 October • Beijing, China



欢迎莅临运达风电展位

W2-B09



浙江运达风电股份有限公司  
地址：浙江省杭州市文二路591号  
西湖国际科技大厦A座22F  
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 用创新回应发展的需求  
/ 秦海岩

## 08 风向/ Direction

### 专栏/ Column

- 12 冰岛的能源转型(下) / 何继江

### 现场/ Presence

- 16 迎风而上, 直入云霄 / 石文明

### 对话/ Dialogue

- 18 风电行业对升降梯的价值缺乏全面认知

### 封面故事/ Cover Story

- 22 远景为什么 / 张博, 夏云峰

### 公司/ Company

- 32 这款机型为何能有如此优异的表现?  
/ 夏云峰

### 调研/ Survey

- 34 不同风轮直径的1.5兆瓦机组市场应用  
情况分析 / 夏云峰

### 海上风电/ Offshore Wind Power

- 38 2017年上半年德国海上风电新增并网  
容量640.6MW / 夏云峰

### 国际/ International

- 42 发展可再生能源的经济社会效益正在  
全球显现 / 何婷婷

### 公开课/ Open Class

- 44 新能源科学与工程专业实验课程教学改  
革研究 / 郭苏, 许昌, 赵振宙, 霍志红

### 产业/ Industry

- 48 无人机近距离巡检风电机组叶片应用  
研究 / 韩斌, 赵勇, 邓巍, 房刚利

## 风电场/ Wind Farm

- 54 数值模拟在风电场设计中的应用研究  
/ 丛明

## 技术/ Technology

- 58 叶片故障时风力发电机组瞬态受力特  
性分析 / 何建武, 刘超, 张正川, 张  
洪磊, 汪冬冬
- 64 基于MATLAB的齿轮箱油路模拟计算  
/ 陈晓爱, 王晓东
- 70 高空风力发电机组概念设计研究  
/ 闫溟, 陈广强, 陈冰雁, 杨云军,  
周伟江
- 74 海上风力发电机组防雷系统浅谈  
/ 田宇, 杨娅曦, 曹贝贞

### 广告索引

封面拉页	海装风电
封二	中际联合
扉页 1	中国中车
扉页 2	埃斯倍
扉页 3	赛米控
扉页 4	恩斯克
扉页 5	麦加涂料
扉页 6	贺德克
扉页 7	锐奥德
扉页 8	NRG
扉页 9	中科宇能
扉页 10	歌美飒
扉页 11	壳牌
卷首语对页	远景能源
目录对页 1	运达风电
目录对页 2	岳能科技
版权对页	南高齿
P15	华豹涂料
P21	华仪风能
P31	金风科技
P41	科诺伟业
P53	穆格
P69	科凯前卫
P73	奥特科技
P78	鉴衡认证
P79	CWP2017
后彩一	永济电机
封三	重齿风电
封底	敏泰液压

YUE NENG.SMARTER WIND ENERGY AND SOLAR

# 更智慧的风能、太阳能 来自岳能

新模式 新服务 新生态

运行监控服务

综合运维服务

分析诊断服务

技术支持服务

运营决策服务

 **岳能科技**  
YUENENG TECHNOLOGY

地址：北京市南四环西路186号总部基地，汉威国际广场4区2号楼6M层

电话：010-63430001 010-63430002

传真：010-63390168 网址：www.bjyn.com

2017北京国际风能大会暨展览会



——岳能科技

时间：2017年10月17日-10月19日

地点：中国国际展览中心（新馆）

W3馆A01展位



扫码关注  
获取产品手册



中国可再生能源学会风能专业委员会  
2017年第09期

顾问 **Consultant**

石定寰	史立山	杜祥琬	黄其励	Shi Dinghuan Shi Lishan Du Xiangwan Huang Qili
徐建中	倪维斗	胡文瑞	杨裕生	Xu Jianzhong Ni Weidou Hu Wenrui Yang Yusheng
李宝山	韩文科	朱俊生	贺德馨	Li Baoshan Han Wenke Zhu Junsheng He Dexin
王承熙	朱瑞兆	戴慧珠	马学禄	Wang Chengxi 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：曹宏源

**Editor in Chief:** Cao Hongyuan

编辑：金杭川 王菲 时春景 张雪伟 何婷婷

**Editor:** Jin Hangchuan Wang Fei Shi Chunjing Zhang Xuewei He Tingting

本期责编：王菲

**Duty Editor:** Wang Fei

视觉设计：荆莹 刘湛 孙昱婷

**Visual design:** Jing Ying Liu Zhan Sun Yuting

广告部经理：徐晓英

**Advertising Manager:** Xu Xiaoying

发行部经理：金杭川

**Distribution Manager:** Jin Hangchuan

编辑制作：《风能》杂志社

**Produced by:** Wind Energy Magazine

地址：北京市北三环东路28号

**Address:** Room 1108, Yiheng Building, No.28,  
the 3rd Ring Road East, Beijing, P. R. China

易亨大厦1108

邮编：100013

**Zip Code:** 100013

电话：010-59796665-3953（编辑部）

**Tel:** 010-59796665-3953（Editorial）

010-59796665-3501（广告部）

010-59796665-3501（Advertising）

010-59796665-8933（发行部）

010-59796665-8933（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：北京中科印刷有限公司

出版日期：每月6日出版

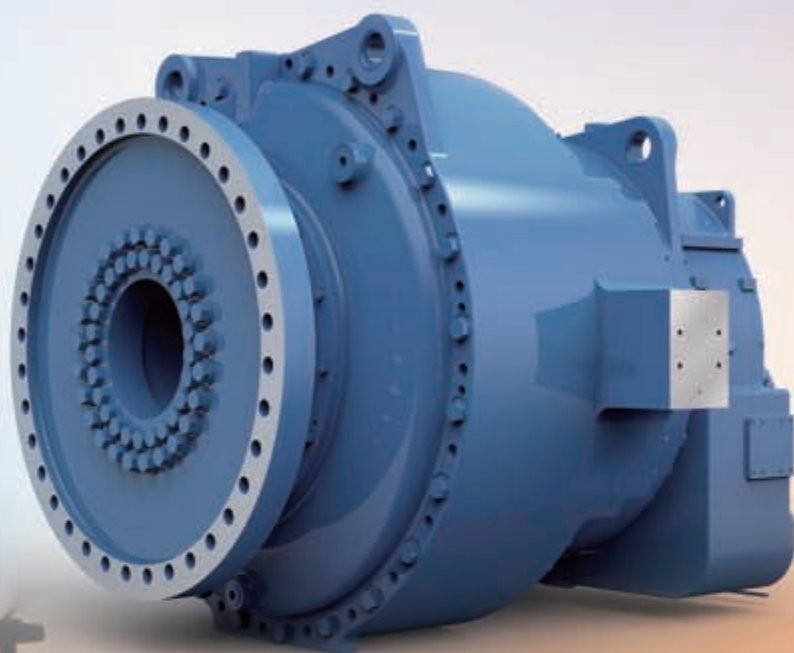
发行范围：全国发行

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。

# 为人类文明 传递进步动力



欢迎莅临南高齿展位：  
W2-C12

## 南高齿 齿轮箱与动力传动系统解决方案专家

作为全球风电齿轮传动设备的领军者，南高齿一直与众多国内外一流风机厂商实行战略合作。经过十多年的稳健发展，NGC 品牌的产品遍布中国、北美、南美、欧洲、印度等三十多个国家和地区，久经自然环境的卓绝考验而无虞。在严寒、酷暑、高海拔、台风及海洋气候之中，NGC 产品为全世界的千家万户使用清洁能源提供着可靠的保障。

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







### 13个项目进入首批风电平价上网示范项目名单

8月31日，国家能源局下发通知，公布了风电平价上网示范项目名单。位于河北、黑龙江、甘肃、宁夏、新疆的风电平价上网项目及张家口国际可再生能源技术创新试验实证基地、建投康保大英图平价上网示范项目等13个项目（总计70.7万千瓦）入选。这些示范项目将不受各省年

度规模指标限制，上网电价按当地煤电标杆上网电价执行，所发电量不核发绿色电力证书，在本地电网范围内消纳。

通知提出，相关省（区）发展改革委（能源局）要认真分析总结本地区风电开发建设经验，做好风电平价上网示范项目的组织、保障和监管工作。国家电网公司要协调相关省（区）电力公司做好示范项目配套送出工程的建设工作，结合示范项目建设时序合

理编制相关输变电设施的建设方案，确保配套电网送出工程与风电平价上网示范项目同步投产。示范项目建成后，要及时与风电开发企业签订购售电合同，同时创新调度运行机制，充分挖掘系统调峰能力和消纳潜力，优先满足项目消纳需求，确保全额消纳风电平价上网示范项目所发电量。各项目开发企业要高度重视环境保护和工程建设质量，按计划完成示范项目建设任务。

### 增量配电试点或有新动作 将向社会资本开放

日前，国家发展改革委、国家能源局等部门召开电力体制改革专题会，研究电力体制改革有关工作，对加快启动电力现货市场建设试点、规范推进增量配电业务试点、开展清洁能源发电跟踪评估工作、组建全国电力交易机构联盟等工作进行了议定。

会议决定开展燃煤自备电厂专项治理，抓紧制定燃煤自备电厂规范建设和运行的专项治理方案。

会议还要求规范推进增量配电业务试点。地方政府不得指定项目业主。电网企业要积极参与竞争，但应当采取与社会资本合作的方式。第一批试点项目中电网企业控股、参股的项目不得超过50%，原则上不搞绝对控股。第二批试点可以没限制，按照招投标定项目业主。对于增量业务和存量业务的划分，由联合工作组结合实际拿出意见。公共电网要向增量配电项目公平开放。价格司抓紧核定增量配网价格。

此外，会议提出开展清洁能源发电跟踪评估工作。对弃水、弃风、弃光、弃核情况进行即时跟踪评估，目的就是要把存在的问题研究清楚，提出解决措施。

### 中国“十三五”期间风能产业投资需求预计达7000亿元

中央财经大学绿色金融国际研究院9月4日发布的《中国能源金融发展报告（2017）》显示，中国能源行业投资规模将达到6万亿元左右，清洁能源（含核电，不含新能源汽车产业）总投资需求将达到3.1万亿元左右。预计“十三五”期间，风能产业投资需求为7000亿元。

据BP统计数据预测，未来20年，中国清洁能源仍将快速发展，特别是核能以及由太阳能、风能为代表的可再生能源，二者复合年增长率将维持在10%以上。

2016年，中国已经取代

美国成为世界最大的可再生能源消费国。当年，中国可再生能源消费增长33.4%，在世界可再生能源消费中的比重也增长至20.5%。

考虑到清洁能源领域技术创新驱动特征明显，《报告》认为，技术进步将带来比较成本优势，同时吸引更多金融资本的加入。

针对中国能源金融发展目前存在的问题，《报告》提出了政策建议，包括对能源金融，尤其是绿色能源金融给予具体细化、可持续、可落地的政策扶持；在加快中央政府针对能源

金融“自上而下”顶层设计和鼓励措施细化实施的同时，充分发挥地方政府、金融机构、能源企业等非政府组织在促进能源金融发展中的重要作用，逐步培育“自下而上”的能源金融发展动力；金融机构应积极创新能源金融工具、丰富能源金融服务种类，为能源企业提供覆盖全产业链的能源金融服务；加快PPP退出机制顶层制度化设计，落实细化财政贴息、贷款利率优惠、PPP项目绿色通道、政策增信等配套政策支持等。



## 8个地区被列为电力现货市场试点

9月5日，国家发展改革委和国家能源局联合印发《关于开展电力现货市场建设试点工作的通知》，选择南方（以广东起步）、蒙西、浙江、山西、山东、福建、四川、甘肃等8个地区作为第一批试点，加快组织推动电力现货市场建设工作。电力现货市场建设试点原则上按现有电力调度控制区（考虑跨省跨区送受电）组织开展，具备条件的地区可积极探索合并调度控制区。电力现货市场建设试点成熟一个，启动一个。

《通知》确定的试点工作目标是：试点地区应围

绕形成日内分时电价机制，在明确现货市场优化目标的基础上，建立安全约束下的现货市场出清机制和阻塞管理机制。组织市场主体开展日前、日内、实时电能交易，实现调度运行和市场交易有机衔接，促进电力系统安全运行、市场有效运行，形成体现时间和位置特性的电能商品价格，为市场主体提供反映市场供需和生产成本的价格信号。

《通知》还要求，试点地区应加快制定现货市场方案和运营规则、建设技术支持系统，2018年底前启动电力现货市场试运行；

同时，应积极推动与电力现货市场相适应的电力中长期交易。

据悉，上述8个试点地区均为用电量省，2015年，这些地区的用电量占全国总用电量的41%。

国家能源局法制和体制改革司司长梁昌新此前表示，建立电力现货市场有利于通过市场机制形成电力价格，有利于资源优化配置，有利于促进可再生能源消纳。比如，风电、光伏的边际成本是很低的，如果有现货市场，它们是有竞争优势的。当前推进电力现货市场建设具备良好条件。

## 上海电力体制改革： 绿色能源优先消纳

8月21日，上海印发《上海市电力体制改革工作方案》，明确电力体制改革的重点任务、保障措施等。

在确定的改革基本原则中，《方案》提出要切实发挥政府在电力规划、统筹协调、市场监管和保障民生中的作用，市场规则设计要兼顾市场公平竞争与绿色能源优先消纳两方面因素，创新政策制定、宏观指导和协调，有效保障电力公共服务。

《方案》要求有序放开发用电计划。结合上海发用电市场实际，遵循三权并重的原则，确定一、二类优先发电的保障机制与调整机制。一是确立优先权。对一、二类优先发电给予足额优先权，其中跨省跨区计划内二类优先发电按照不低于多年平均水平确定足额优先权。二是量化保障权。依发电性质，对享有优先权的一、二类优先发电给予差别化保障。其中，本地煤电机组调峰调频电量按照供电煤耗、环保水平差别化保障。三是公平竞争权。超出保障权外的一、二类优先发电和其他发电，同等进入电力市场公平竞争，逐步实现非公益性、调节性电量由市场配置。

## 新疆出细则要求测算并上报弃风电量

为进一步规范和完善新疆区域风电场弃风电量计算、统计工作，国家能源局新疆监管办公室于日前印发《新疆区域风电场弃风电量计算实施细则(试行)》。《细则》提出，新疆区域风电场弃风电量计算方法为样板风机法、测风塔外推法和机舱风速法，并给出了相关计算方法。

对于各方职责，《细则》也进行了明确：风电场应将全场机组型号及其数量、机组状态信息、机组轮毂高度、风轮直径、地貌数据等接入调度机构业务平台，并保证数据的真实性、及时性。

省级调度机构负责接收各风电场上传的数据，并根据数据和选取的弃风电量计算方法确定弃风电

量，每月向各风电场公示。各风电场也可根据测算数据进行弃风电量计算，如计算数据与调度机构数据存在偏差，可联合进行修正。对修正结果不能达成一致意见的，由国家能源局新疆监管办公室仲裁。

国家能源局新疆监管办公室不定期对样板机组确定的合理性进行抽查。



### 携手行业协会 金风科技打造风电跑团

近日，金风科技携手中国可再生能源学会风能专业委员会、中国农业机械工业协会风力机械分会正式成立风电跑团，全力备战于今年9月17日鸣枪开跑的2017华夏幸福·北京马拉松。

作为风电行业跑步“盛宴”，跑团成立大会吸引了

来自全国各地近200名马拉松健儿共襄盛举，旨在通过马拉松这项挑战毅力、耐力和智力的运动，身体力行地诠释“风电是一场马拉松”的理念。跑团成立大会上，风电跑团举办了首场马拉松集训。

事实上，成立风电跑团只是第一步，未来行业

协会与金风科技一起，秉持“风电是一场马拉松”的理念，以榜样的力量，进一步提高

风电企业认知，引领风电企业健康发展，带动行业发展，共建风电行业新生态。



### 龙源电力风电装机达1741.7万千瓦

8月24日，龙源电力集团公布2017年上半年成绩单。

截至2017年6月30日，该公司控股装机容量为1954.2万千瓦，其中风电

控股装机容量1741.7万千瓦，其他可再生能源控股装机容量25万千瓦。

累计发电227.32亿千瓦时，其中风电发电量171.03亿千瓦时；风电平

均利用小时数为1030小时，同比提高50小时。

还有28个项目列入各省能源局下达的“十三五”第二批风电项目开发方案，合计容量187.3万千瓦。截

至2017年6月30日，该公司列入国家能源局开发方案或国家批复“路条”未投产风电项目达970万千瓦，核准未投产风电项目达到740万千瓦。

## 数据

15522 万千瓦

8月21日，国家能源局发布1—7月全国电力工业统计数据：全国6000千瓦及以上电厂发电设备容量达到164545万千瓦，其中，风电累计装机容量为15522万千瓦。

255 亿元

1—7月，全国电网工程完成投资2813亿元，同比增长9.9%。全国主要发电企业电源工程完成投资1255亿元，同比下降13.7%。风电完成投资255亿元，同比下降18.3%。

185.5 亿千瓦时

1—7月，新疆电网调度口径累计发电1442.8亿千瓦时，同比增长11.1%。其中，风电185.5亿千瓦时，同比增长54.4%。光伏59.1亿千瓦时，同比增长59.7%。



## 国际热点

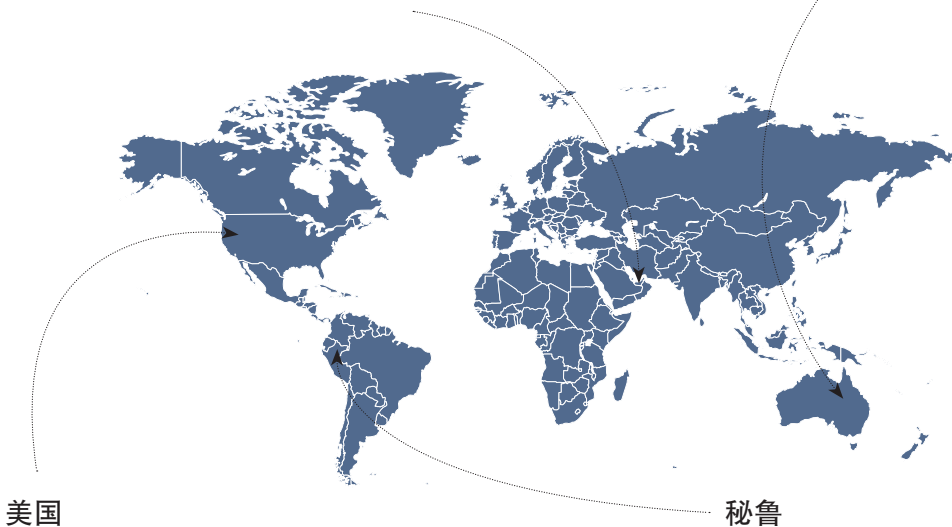


## 阿联酋

阿联酋的迪拜准备 2018 年安装一些智能灯杆，它们可以提供 Wi-Fi 上网服务。不仅如此，迪拜还计划修建太阳能公路，目前正在对技术进行评估。迪拜水电局与德国 Innogy 成立了一家合资公司，Innogy 与法国灯饰企业 Ragni 签署谅解备忘录，决定一起设计、部署智能灯杆。

## 澳大利亚

澳大利亚公司 PowerLedger 推出了一种可以让客户将屋顶太阳能光伏产生的电力销售给邻居和小型企业的加密货币。这种新的加密货币被称为 POWR 代币，将用于促进客户、企业和太阳能光伏电站之间的支付。PowerLedger 希望这将有助于提高市场效率，鼓励更多房主安装屋顶太阳能光伏面板。



## 美国

斯坦福大学的研究团队在 8 月底发表的论文中指出，能源转型不仅不会伤害经济，还会为全球带来超过 2400 万个工作岗位以及更低的社会成本。他们为 139 个国家制定了能源转型计划，并强调若到 2050 年这些国家都落实这一进程，将可阻止全球陷入“摄氏 + 1.5 度”的魔咒。

## 秘鲁

意大利电力公司 Enel 集团在 9 月 4 日发布的声明中宣布，该公司在秘鲁建设的第一座风电场 Wayra I 已经开始动工，装机容量达到 13.2 万千瓦。这座风电场是目前秘鲁最大的风电场，由 Enel 集团在秘鲁的子公司 Enel Green Power Peru 负责建设，预计将在 2018 年上半年投运。

8340 万千瓦

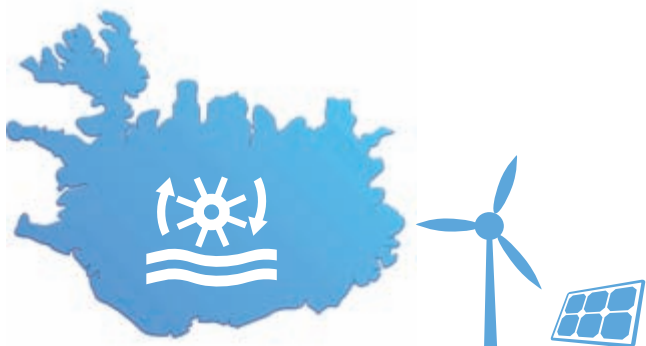
截至 2017 年 6 月，美国风电装机达到 8340 万千瓦，占全部发电装机的 7.7%。1—6 月，公共事业级电厂（不计小型光伏）发电量总计 19181 亿千瓦时，风电占 7%。

43.5%

可再生能源在巴西能源结构中的占比已经从 2015 年的 41.3% 上升至 2016 年的 43.5%。2016 年，巴西发电总量为 6197 亿千瓦时，风能和太阳能发电量分别增长 54.9% 和 44.7%。

36 亿美元

日前，外国投资者提出一项价值 36 亿美元的联合提案，以开发伊朗的可再生能源。计划到 2022 年将该国的可再生能源发电能力提高至 500 万千瓦，其中，风电装机 450 万千瓦。



# 冰岛的能源转型（下）

文 | 本刊特约评论员 何继江

## 五、地热用于工业生产

冰岛西部 Reykholar 地区的海藻制造厂（Thorverk 公司）直接利用地热资源进行烘干。该公司通过使用专用的船只，收割西北部 Breidafjordur 河河底的海藻，再利用 107℃ 的地热水对海藻进行烘干。该公司于 1976 年建成烘干工厂，每年生产约 2000 吨至 4000 吨的墨角藻和海藻粉。在冰岛，还有企业利用地热能生产鱼干产品，主要包括咸鱼干、鳕鱼头、鳕鱼干和其他产品。烘干的鳕鱼头年出口量达 1.5 万吨。宠物食品烘干是一个新兴起的行业，每年产量约为 500 吨。

冰岛南部 Grimsnes 地区 Haedarendi 地热田的一个工厂，利用地热流生产商业上使用的液态二氧化碳，每年产量约 2000 吨。

## 六、道路融雪

除了为建筑供暖之外，冰岛的地热还有一个特殊的供热领域——加热

路面和融化积雪。这项工作是从 20 世纪 80 年代开始的。冰岛首都雷克雅未克市中心地区的人行道和街道地下安装了雪融化系统，该系统所消耗的能量主要来自地热供热系统的回流水。雷克雅未克地区雪融化系统的总面积约为 55 万平方米，全国雪融化系统的总面积约为 74 万平方米。冰岛凯夫拉维克机场的融雪跑道则是世界上利用地热融雪的典范。

## 七、冰岛深钻计划

为了探索深层地热能的开发技术，冰岛还发起了“冰岛深度钻孔计划（IDDP）”。这个项目的核心目的是，计划使钻井深度达到 4000 米—5000 米，以了解“超临界含水液体”在 400℃—600℃ 时的性状。

IDDP 项目启动于 2000 年，由 3 家冰岛能源公司和冰岛国家能源局共同发起。2005 年，能源联盟与国际科学基金会和美国国家科学基金会（NSF）加入 IDDP 计划。2007 年—2008 年，又有一家国际铝业公司 Alcoa Inc 和挪威石油公司加入。

在开发第一个全尺寸 IDDP-1 井时，曾计划使钻井深度达到 4500 米。然而，由于意外钻至熔岩，钻井作业被迫终止。2010 年，对这口井进行的流量测试显示，它产生了约 30 千克/秒的 330℃ 过热蒸汽，压力为 165 巴，大约相当于 2 万千瓦的发电能力。

第二口深钻井——雷克雅日 IDDP-2 井的钻井作业于 2016 年 8 月 11 日开始，于 2017 年 2 月 1 日圆满完成，深度为 4659 米，完成了所有初步目标。井底温度为 427℃，流体压力为 340 巴，达到超临界状态。以此建设地热发电厂，单井的发电规模可达 5 万千瓦，是目前普通地热井发电能

冰岛还发起了“冰岛深度钻孔计划（IDDP）”，目的是使钻井深度达到 4000 米—5000 米，以了解“超临界含水液体”在 400℃—600℃ 时的性状。

力的约 10 倍。通过 IDDP 计划，人类正在掌握更多深地科技，深层地热层的开发利用很有可能引起一场能源变革。

## 交通能源转型的探索

冰岛曾计划在 2050 年之前把整个交通系统改造成依靠氢动力。2008 年，该国曾投运氢燃料电池汽车，并投运第一艘氢动力商船。然而，2008 年的金融危机对冰岛的氢燃料电池汽车发展造成很大影响。金融危机过后，其将零排放汽车的发展重点放在电动汽车方面。

冰岛具备电动车普及的两大基础条件：75% 的人口居住在离首都雷克雅未克不到 37 英里的范围内，其乡村地区由一条长为 840 英里的环形公路串接，按电动车单次充电行驶里程数为 40 英里计算，约用 20 个充电站即可相连；此外，85% 的能源为可再生能源，主要为地热与水力。

2009 年 10 月，首都雷克雅未克城市环境和交通委员会成立一个特别小组，负责推广电动汽车在首都地区的使用和充电站的建立。该委员会主席 Gísli Marteinn Baldursson 称，基于冰岛的绿色和可持续能源的发展，雷克雅未克有成为世界主要电动车市场的特定条件。特别小组的主要任务是负责制定电动车在该市得以广泛使用的时间表及付诸实施的具体办法。

政府还鼓励电动汽车分时租赁。2014 年，电动汽车租赁公司 Electric Carrental 开始对外营业。

冰岛政府对燃油征收很高的税收，这使得电动汽车等零排放汽车产生巨大的优势。

2016 年，在电动汽车销量（插电

式混合动力汽车）占本国汽车销量比重全球排行榜中，冰岛以 6.3% 的比例仅次于挪威，排名世界第二。

用绿色甲醇替代汽、柴油燃料也是冰岛探索交通系统去碳化的尝试方向。地热电厂的热水伴生二氧化碳，形成一定的碳排放，于是冰岛的地热公司努力探索二氧化碳的捕集。创立于 2007 年的 Carbon Recycling International（碳循环国际）公司将地热发电过程中伴生的二氧化碳进行捕集和再利用，用可再生能源制的氢气或化工行业副产的氢气与二氧化碳进行作用，制成甲醇，替代汽、柴油燃料，实现交通能源的近零碳。2014 年，冰岛的甲醇年产能达到 4000 吨，碳捕集量约 6000 吨。

## 对中国能源转型的启示

### 一、学习冰岛的理念，坚定能源转型的信心

冰岛在环保意识和零碳理念的推动下持续推进能源转型，向世界展示了 100% 可再生能源的可信情景，向世界提供了一个电力系统转型、供热能源转型和交通能源转型协同推进的系统性样本。中国的能源结构目前是以煤炭、石油和天然气等化石能源为主，但有着丰富的可再生能源资源，如风能、太阳能、水能、生物质能，以及海洋能。中国借鉴冰岛的经验，能够更加坚定能源转型的信心，可以考虑勇敢地设定 100% 可再生能源的目标，加速能源转型。

### 二、地热在中国能源转型中将发挥积极的作用

2016 年 12 月，中央财经领导小组要求推进北方地区冬季清洁取暖。

中国借鉴冰岛的经验，能够更加坚定能源转型的信心，可以考虑勇敢地设定 100% 可再生能源的目标，加速能源转型。



在治理雾霾的共同愿景下，供热能源的去煤炭化正在加速。地热是一种可以快速、大规模替代煤炭的清洁能源。中深层地热的单井供暖能力可以在 10 万平方米以上。在河北省雄县、陕西省武功县等地区，中深层地热已经取代燃煤成为供热主体能源。雄县地热供暖面积已经达到 450 万平方米，覆盖率超过 95%。可以预测，在地热资源丰富地区，地热有可能成为供热的主体能源。

今年 4 月，中央提出建设雄安新区，已经采用地热供暖的雄县和容城县都在雄安新区内。以地热作为主体能源，实现雄安新区的清洁供热已经成为各方共识。雄县地热田面积 300 余平方公里，是中国东部平原中地热水资源埋藏浅、温度高、水质优、资源丰富、开发利用条件好的地热田之一。雄安新区的地热开发将为中国供热能源转型和地热融入城市能源体系树立典范。

### 三、科技决定能源的未来，科技创造未来的能源

冰岛的各种化石能源都是匮乏的，但这恰恰使冰岛人民的科技创新愿望得到激发。通过在地热领域持续的科技创新，该国在地热供暖、地热发电、地热井二氧化碳捕集，乃至绿色甲醇领域创造了世界领先的科技水平，并进而创造了能源转型的奇迹。

中国的地域、人口、能源规模都远远大于冰岛，能源转型的复杂程度肯定也远超后者。但制约中国能源转型的并不是资源，而是有效利用可再生能源的科学技术。中国在放眼全球，学习冰岛等国能源转型经验的同时，更要持续开展各领域的科技创新。中国这样的大国，应当为世界承担起能源转型技术研发者和引领者的角色。

### 四、对地热技术的再思考

(1) 保护自然与改造自然的平衡。冰

中国在放眼全球、学习冰岛等国能源转型经验的同时，更要持续开展各领域的科技创新。中国这样的大国，应当为世界承担起能源转型技术研发者和引领者的角色。

岛著名的温泉——蓝湖并不是天然温泉，而是地热发电厂的地热尾水排到火山熔岩形成的天然泻湖，它是一种人类技术改造后的自然，能否将其看作是人与自然关系的一种创新？在地热开发利用的过程中，如何处理保护自然与改造自然的平衡？

(2) 地热资源的可再生性。冰岛全国人口数只有 33 万，面积为 10 万平方公里。单位面积上的用能负荷很低，地热的水资源和热资源的恢复比较容易。但在中国，人口密度大，用能密度高出冰岛许多倍。中国有很多县，人口总量超过百万，是冰岛的数倍，但面积却只有 1000 多平方公里，相当于冰岛的百分之一，更不要说人口高度密集是北京、天津这样的超大型城市了。在这些城市和乡村，清洁供暖如果采用地热，在地热资源的可持续性方面将面临巨大挑战，需要在地热开发时进行特别谨慎的考虑。

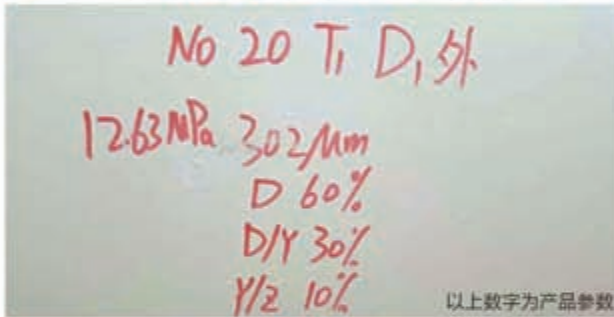
(3) 回灌问题。冰岛最初开发地热时，并不考虑地热水的回灌问题。但在中国，必须考虑回灌，现在冰岛也把回灌列入监管体系。应当说，回灌的技术标准和监管体系还远未完善，这在中国的地热开发中，是必须要着力解决的。

(4) 地热开采诱发地震问题。石油开发的钻井工程会影响地下的地质条件，进而会诱发地震，这已经众所周知。地热井因钻井深度超过 2000 米，也对地层造成明显的扰动，已有的研究表明，地热井会诱发地震。但目前这方面的研究尚不足，也缺乏相应的技术标准。雄安新区的地热开发将需要建设大量的地热井，在规划建设阶段就必须考虑诱发地震因素，提前准备地层变化监测和地震监测体系，以备开展科学研究，制定相应技术标准和管理标准，最大程度减少地热开发诱发地震造成的不良后果。(全文完) (作者单位：清华大学能源互联网创新研究院)



# 华豹水性风电漆

## 中国水性工业漆先行者



### 华豹水性风电漆三大优势

- 1 绿色环保，安全健康** → VOC 含量低，低于国家标准；以水为溶剂不含重金属有害物质，有效保护从业者的职业健康；并且不燃不爆，安全可靠。
- 2 质量优越，综合成本低于溶剂型漆** → 华豹水性漆性能指标达到或超过溶剂型同类产品。为加快推进环保涂装，保障员工身体健康，水性漆综合使用成本较低。
- 3 环保涂装一体化服务** → 华豹公司于 2003 年组建了专业涂装公司，现有 500 多名专业人员，按照施工管理 6S 要求，确保环保涂装一体化目标的实施。



# 迎风而上，直入云霄

图文 | 石文明



古人云：“读万卷书，不如行万里路。”对于一个经常奔走于风电场的技术人员来说，“行万里路”已是家常便饭。自从投身风电行业以来，就一直处于“在路上”的状态，可谓“走南闯北”。在路上，意味着即使已饱览祖国的山川与河流、眼前的风景不断变换，可还是会见到从未见过的风景、遇到从未经历过的奇闻趣事和困难。

入行以来，跑过了许许多多的风电场，虽然每个风电场都有独特的风景和特点，但给我印象最深的却是云南姚安风电场和四川会理风电场。之所以印象深刻，是因为这两个风电场都属于高原地区、有着相似的自然环境，所有机组均安装在群山峻岭之上。

在云南姚安风电场三、四期还处于吊装阶段时，我经历了许多惊险的事情，也见证了沉重的机组及硕大无比的叶片如何在崎岖的山路上运输。期间经常会遇到山体滑坡、暴雨天气、在泥淖的山路上推车的情形，但当我看到硕大的叶片在泥泞的盘山路上缓缓移到机位时，心里除了深深的震撼之外，还有莫名的感动，感动于风电场建立背后的辛苦，感动于自己似乎在从事一项伟大的事业。

会理风电场位于四川凉山彝族自治州的南部，距离金沙江不足 100 公里，平均海拔 2000 米以上。在我走进大凉山之前，就对大凉山的穷困早有耳闻，但不走进大凉山，真的无法想象什么是“大山里的大山，山路中的山路”，层层叠叠的山峦望不到边，曲曲折折的山路走不到头。走进大凉山让我认识到了“山里人”的世界，也让我看到一个远离喧嚣、回归宁静的世外桃源，在感叹风电场条件艰苦的同时，也感慨祖国山河的千姿百态。

风电场建于距离镇上十几公里的大雪山上，虽然只有短短的十几公里，开车从镇上到机位却需要三个多小时的时间。车子在蜿蜒的山路上时而盘旋而上，时而顺势而下，十几公里的直线路程要翻过无数个山头。山路很窄，很难走，恰逢雨天，驾车行走更是难上加难。在雨水天气，山路经常发生山体滑坡，这对每个在现场的工作人员来说都危险至极。

为了在规定时间内使所有机组并网投产，工作人员有时不得不冒雨前行，在翻山越岭之后，对



一台台机组进行并网调试。机位大多在海拔 3000 米以上的山尖之上，所谓的“高处不胜寒”，在这里体现得淋漓尽致。每当太阳稍稍躲在云层后，天气就变得阴冷，现场人员被冻得瑟瑟发抖；一旦太阳从厚厚的云层中钻出来，强烈的紫外线会使白皙的皮肤慢慢涂上黝黑的颜色。在大山之上，除了要忍受阴冷和紫外线的照射，每天还要与饥饿进行顽强抗争，荒无人烟的大山上没有食物和水，每天带上山的零食根本无法阻挡饥饿折磨身体的脚步。我想只有亲身经历过在风电场工作的过程，才能体会到那种艰辛和每个风电人内心的执着。

在出现问题时，山巅之上的作业难度与在平地上相比，会成倍增加，一个简单的部件损坏可能需要几天的时间才能维修好。当问题出现时，会有苦恼，也会有畏惧，但没有困难就不会成长，更不会有困难解决之后的喜悦。当我们调试完机组，看到每一台机组顺利并网后，心中都会有莫名的喜悦与自豪；当看到机组在崇山峻岭之上迎风转动、昂首挺胸地耸入云霄时，会觉得所有的付出与辛苦都是值得的。📍（作者单位：浙江运达风电股份有限公司）

受访嘉宾：  
于红国，德国海铨风电  
亚太区执行总经理。

# 风电行业对升降梯的 价值缺乏全面认知

本刊 | 夏云峰

于红国认为，经过多年的实践，塔筒升降梯已经被从专业角度视作目前最安全、高效的风电运维人员攀爬设备。他建议，无论用户是否在建设初期安装该设备，都要在塔架中预留升降梯的安装接口，大规模安装升降梯是风电发展的必经阶段。

**《风能》：请介绍海铨风电在全球市场的业务开拓情况。**

**于红国：**作为最早在风电行业使用铝梯的企业，海铨在欧洲将先进的爬梯系统引入风电中已经有了50年的历史。海铨风电也由此孕育而生！

现如今，海铨风电已经成为全球人员安全和登高攀爬解决方案供应市场的主要技术引领者。我们拥有优质的爬梯系统、定制的升降梯系统、智能攀爬系统、现代防坠落系统等，可以提供所有与人员攀爬风电机组相关的先进技术产品。

由于海铨风电在中国、美国、巴西和欧洲均设有生产制造客户服务中心，我们的客户可以接触到世界各地训练有素的服务工程师，全球化的发展战略和优质品牌使我们成为客户值得信赖的合作伙伴。

另外，我们还提供全方位系统性的咨询服务，拥有全球风能组织（GWO）认证的培训中心，其中包括安全逃生救援学院（S.A.R.A.），以及设施齐全的训练塔、所有与安全相关的培训以及其他培训课程。

塔筒升降梯一直是海铨风电的“拳头”产品，一般分为爬梯导向和钢丝绳导向两种类型。为进一步满足中国市场和亚太区域个性化的需求，我们专门推出了两款新型 Toplift 和 Globalift 升降梯。这两款机型的最大特点是核心部件（提升、控制、安全模块）配置在升降机箱体的侧面，便于用户进行操作以及维护，紧急情况下可以用于从不同角度逃生。该产品推出后，我们立即获得了一批新订单，目前正在生产和交付中。

相比其他厂家，海铨风电的铝合金爬梯具有明显优势。我们对梯蹬和梯框的连接处采用双翻边

技术，从而使它更加安全、可靠。此外，我们与德国的一家合作伙伴联合推出了名为“风电小飞人（E-lift）”的新型助爬设备。它采用电池供电，便于携带与操作，特别适用于已安装机组的运维。

**《风能》：面对激烈的市场竞争，下一步，海铨风电制定了什么样的发展战略目标？将为此进行哪些业务布局调整？**

**于红国：**应该说海铨风电进入中国是比较早的，也有幸见证了中国风电开发的高潮期。可是总体发展并非一帆风顺，作为一家外资公司，我们也出现了水土不服的现象。但从2016年起，我们重新调整全球业务发展战略和布局，将海铨中国作为亚太区的发展中心，确立了紧密贴近本土市场的新思路，在宁波设立独资生产基地和服务技术中心，在韩国和印度建立销售分支机构，力争用三到五年的时间跻身顶级供应商行列。

当然，在目前中国风电新增装机出现下滑的情况下，很多同行也对我们的策略提出质疑。但是我想至少有三个主要原因支持海铨中国可以做强、做大：一是我们的背后有一家实力雄厚的母公司 JLU 集团。依托这家多元化经营的德国家族企业，我们可以更加从容地从中长期的角度规划未来，而不是过多地拘泥于眼前的数字。二是我们有一支年轻、充满活力、渴望成功的团队。多年全球领先的风电行业运作经验，加上一直奉行的企业家精神所带来的创新与变革意识，使我们竭力追求成功的梦想，励精图治。三是我和高管团队坚信对现代企业管理理念的深入挖掘与应用将使我们无往而不胜。我曾先后运作过4个欧洲品牌在亚太地区的推广，均

取得了超出预想的成功。这使得我更加坚信海铎风电的未来既不是靠关系操作，也不是靠吃老本混日子，我们将主要依靠科学、系统、专业的现代业务开发模式，也就是通常所说的要变 P2P 模式为 B2B 模式。同时，我们将全面推广提倡团队协作，在客户、企业、个人之间实现“三赢”发展，把企业发展的红利合理公平地分享给每一位参与者。

目前我们正规划在宁波设立海铎风电系统 (HWS) 区域研发中心，下一步将在印度和中国北方增设新的生产基地。在未来三到五年中，如果时机成熟，我们有可能收购本土企业，以及谋求业务几何式增长。

**《风能》：据悉，海铎风电此前中标了哈密某风电项目 100 套攀爬系统的供货合同，该项目有哪些特点？它对于支撑海铎风电下一步发展战略的落地有着哪些特殊意义？**

**于红国：**这个项目是中国国内第一个规模化、大批量全混凝土风电项目。这种技术源自欧洲，在国内目前优质风能资源越来越稀缺的情况下，可以帮助降低塔筒制造成本。海铎风电有幸通过客户的反复筛选，为该项目提供 100 套升降梯以及爬梯和防坠落系统。目前，我们的第一批 4 台升降梯已经顺利安装完毕，进入质保期。期间，我们审慎地分析了各种可能遇到的技术工程难题，准备了不同的应急预案，确保一次安装调试成功。

哈密项目是在我们实施本土化战略一年以后结出的重要果实，不仅从侧面印证了我们市场策略的可行性，使广大用户增加了对海铎风电的了解和认识，同时也让公司内外的流程得到一次系统梳理和再造的机会，我们有信心继续做好后哈密市场的开拓发展工作。

**《风能》：我国风电开发重心向低风速地区和海上转移将给攀爬系统带来哪些挑战？海铎风电为应对这些挑战进行了哪些有益探索？**

**于红国：**随着我国风电的发展，塔筒的高度不断提升，机组所处的环境更加复杂。尤其是在海上风电项目中，气候多变对运维工作的影响会明显增加。安全、高效地实施现场服务，将越来越离不开升降梯。

经过多年的实践，塔筒升降梯已经被从专业角度视作目前最安全、高效的风电机组攀爬设备。10 年前，只有个别项目会装 1 台升降梯供参观使用；此后，该设备得以不断普及，甚至某个风电场 33 台 1.5 兆瓦机组全部安装了升降梯，有些客户则将它作为 3 兆瓦以上海上风电机组的标配。

作为 GE 等全球主要整机厂家的重要合作伙伴，我们一直在探索如何为用户提供安全、高效的解决方案。我很赞同一种提法：安全是工作方式，也是生活方式。只有确保安全，才不会让客户失望，只有建立在安全前提下的效率才是有价值的效率。针对 GE 的要求，我们专门开发了单人和双人的升降梯用于不同环境；在南美洲和欧洲，我们同步向西门子—歌美飒提供了两种版本的新款升降梯。与此同时，我们独家向 Senvion 公司提供了 5MW/6MW 海上风电机组的专用升降梯，可以同时承载 3 名运维人员，已有超过 300 台在德国、英国、爱尔兰的风电场中运行，今年将有一批同型号的升降梯在亚太海上风电项目中首次使用。2016 年，我们成功为湘电风能第一个 50 兆瓦海上项目配备了 10 台升降梯。运行一年来，客户反映良好。

根据将近十年的实践经验，我认为升降梯是目前性价比最高的一种安全、高效人员运输设备。一些客户由于没有亲身体验，往往忽视了使用升降梯的明显优势。我在接触那些较早使用升降梯的客户时，从来没有听到抱怨和后悔的言论，他们都表示会在未来的项目中选配升降梯。值得一提的是，升降梯的安装接口必须在塔筒制造前完成设计，否则后续改造成本将十分昂贵。因此，我强烈建议，无论是否在建设初期安装升降梯，都要在塔架中预留升降梯的安装接口。🔧



# 开拓新能源 创造新生活

随着风资源不断开发和风力发电机组技术地不断进步，依据我国的低风速风能资源特点，  
华仪风能潜心研制出HW2/S2000及HW3/S2500低风速机组，  
并通过国内认证机构颁发的型式认证、设计认证证书，现已在浙江、山西、宁夏、内蒙等地稳定并网运行。  
此外装有HW2/S2000机组风场，2016年在浙江被评为低风速示范风电场项目。



**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



封面  
故事

# 远景为什么

从掌握风电机组核心控制系统开始，这家公司一路向前，依次打开了变频器、变桨、叶片、发电机和齿轮箱的黑匣子。而这，或将引发连锁反应，加快中国风电走向世界强国的步伐。

---

文 | 张博，夏云峰

---



10年前，业内把掌握风电整机的核心控制比作打开制约中国风电发展的黑匣子，那时远景已经打开了这个黑匣子，但同时也意识到，打开变频器等关键大部件的黑匣子并掌握其核心技术，才是持续推动中国风电发展的根本所在。

到2017年9月，远景已经打开了风电整机所有关键大部件的黑匣子，且将最先进的技术用于这些部件的设计和制造中——这无疑会为这家公司在风电行业一路向前增加重量级砝码，关键大部件技术在风电领域的重要作用或将引发连锁反应，加快中国风电走向世界强国的步伐。



## 为什么要打开变频器的黑匣子

远景早在2009年10月就开始自研风电机组变频器了，即便已经量产实现了规模化应用，也还是刻意在低调行事。事实上，这家公司研发和扩产变频器的脚步从未停歇。

远景能源副总经理王晓宇博士回忆说，2010年，中国市场上的风电机组采用的变频器大多来自外资品牌，它们掌握了中国风电变频器市场的话语权，而中国整机厂商也为此付出了较高的成本。但即便如此，变频器故障率仍是整机厂商挥之不去的痛点。

远景自研变频器项目团队在对国内市场变频器故障率及故障类型进行深度研究后，得出一个重要结论：变频器与机组控制系统的协同不畅，不仅会诱发变频器故障，还会影响机组的发电量。正是受此启发，站在系统优化的层面上，远景不仅仅将变频器定位成一个实现电能变换的独立子部件，而是更多地考虑如何使其帮助提高系统性能和寿命。

2011年3月，远景自研的首台1.5MW标准变频器样品在启东风电场成功并网，后经安徽鲁山等风电场的批量化运行业绩验证，远景自研变频器正式步入产业化进程。

来自远景产品质量部门的数据显示，2014

年，远景自研变频器导致的停机平均1年2次，到了2017年，自研变频器导致的停机平均3年才有1次。远景智慧电气卓越中心负责人李磊博士解释：“对自己的产品做改进能快速闭环，因为深入理解风机和变频器产品的机理，对系统的精准改善可以实现事半功倍。”

正是得益于从风机整机系统层面对变频功能组件的深刻理解，远景的变频器还拥有自行开发的寿命模型，可以对一系列关键子部件的寿命做出预测和实时状态监测，这些模型输出的动态边界能力不仅能够最大程度地帮助风机在超速过载等危险工况下安全运行和停机，更在机型设计之初即成为整机系统优化设计不可分割的一部分。

“远景在设计变频器的同时，也自主开发了自动化仿真控制软件平台，其全息模型可以定义现场所有可能出现的电压、电流、功率、频率以及工况场景，仿真精度和现场运行实况完全吻合。先进的高精度全息仿真模型，为自研变频器配置先进的控制算法提供了技术支持。”从仿真模型的角度出发，远景自研变频器项目团队王晓钰博士解释了自研变频器高性



能背后的技术逻辑。

实际上，远景的高精度全息仿真系统为变频器设计注入了优质基因，这就不难理解为什么自研变频器具有协同机组优化控制系统的能力——变频器是距离发电机最近的智能单元，作为机组最底层的控制单元，其性能好坏和智能程度直接决定了机组能在何种场景及尺度下进行整机运行控制。

从设计层面看，作为控制单元，变频器在执行机组指令时的协同配合，不仅能实现电气传动链的效率优化，也可从整体上保证远景智能风机控制策略的执行。王晓钰博士强调，“自研变频器与风机的集成设计，提高了风机的并网友好性，减少了因涉网特性差导致的风电场弃风损失。”

不止如此，远景自研变频器中的机组传动链振荡抑制算法，还可以更有效地抑制机组传动链在运行过程中出现的低频振荡，防止传动链部件疲劳，从而保证传动链部件的使用寿命。在李磊博士看来，通过变频器的控制算法保护传动链部件全生命周期的安全，也是自研变频器的价值所在。但他也强调，客户对服务响应

更为敏感，由于自研变频器不存在技术壁垒，研发人员可直接面对现场，并在3小时内给出解决方案、24小时内给出根因分析，不但能快速闭环，还可将一些现场问题输入产品设计中，最终实现产品性能的优化。

须提及的是，由于远景自研变频器与整机系统的协同优化，在远景机组内，传统分立的主控柜和变频柜已合并成一个柜体，但更为重要的在于，从系统设计层面，传统的主控柜和变频器的边界已经模糊了，在软件系统设计上，也已经成为不可分割的整体。

那么，远景自研变频器的直接结果是什么呢？

据远景电气系统采购负责人许智强透露，2015年以后，远景陆上全系列机组已经全部配备为远景自主知识产权的变频器。2018年以后，远景海上全系列机组也将全部配备远景变频器。许智强进一步说，“远景通过掌握变频器产品的全部知识产权，包括所有的软硬件设计，然后通过发包给类似富士康这样的代工企业生产，使得变频器的采购成本得到了大幅的降低。”



更重要的在于，自研变频器对整机的开发和演进产生更多可能的自由度。正是由于对变频器技术完全的自主知识产权，远景的机组整机开发团队才可以根据新的机组特性，在程序设计、参数设计等算法开发的核心环节进行系统整合，更好更快地推出引领市场的创新机型。

远景智能双模机组和中压机组都是基于其变频器技术的创新。远景 2012 年 7 月推出的双模机组不但兼具直驱全功率和双馈机组的优势，还有最好的风能捕获优势，在高风速工况和低风速工况下均有较高的发电效率。它是一款机型，也是一项应用技术，已在多个风电场批量应用。从运行数据来看，经双模技术改造后，机组的年发电量比未改造的双馈机组最高可提升近 2%。



## 为什么要突破叶片技术理论

要知道，远景设立在美国科罗拉多的全球叶片创新中心汇聚了全球叶片领域的顶尖人才，当空气动力学的资深科学家遇上复合材料结构学的顶尖工程师，下一代更轻更具捕风效率的叶片就出现在人们的眼前——射阳风电场就运行了这样的叶片。

“这款叶片采用了全三维叶片设计技术，”远景美国科罗拉多全球叶片创新中心叶片气动专家、前波音飞机高级气动工程师孙毓平博士说，“从借鉴 V22 鱼鹰机翼设计理论到下一代风机叶片技术突破，远景付出了 3 年的艰苦努力。”

在远景，叶片领域的全球顶尖专家可不只是孙毓平博士，中国叶片工程集成中心研发总监、前 LM 研发总监 Peter Grabau 先生曾经主导开发了 LM 近 1/3 的专利，美国全球叶片创新中心负责人、前西门子叶片研发中心首席工程师 Kevin Standish 先生在叶片设计上的独特建树也为远景最新的叶片技术注入了全球最新的研发思想。一份内部文件显示，远景自研叶片团队的全球顶级专家已达 55 人，涉及叶片气动、结构设计及载荷、材料及工艺、测

试与验证等多个领域。

这是一个关乎风电整机开发的本质问题。

风电整机设计开发，本质上是一个基于叶片空气动力学应用的流体和结构反复迭代寻优的过程，其中机组结构载荷、叶片气动性能和核心控制手段是风机设计寻优的三大变量，也就是设计工程师所说的 LAC 风机设计寻优。

关键在于，风机设计工程师要真正掌控这些变量，而不是面对仅能输出或输入设计参数的黑匣子。也正因此，远景执意要打开叶片设计的黑匣子，让叶片气动成为一个可寻优的变量。叶片是把风能转化成机械能的核心部件，成本约占风机成本的 30%，其气动载荷主导了风机另外 70% 的主要成本。这意味着，如果叶片通过自身的气动外形卸掉某些风况带来的有害载荷，就会相应降低传动链上其他部件的载荷，那么降低整机用材成本也就水到渠成。

但这取决于远景叶片研发团队对叶片空气动力学未知的认知程度。在远景全球叶片创新中心负责人 Kevin 先生看来，“这几乎就是向叶片的基础理论发起挑战！”

专业人士知道，直到目前，对叶片的气动性能分析还是基于格朗特在 1935 年提出的叶素动量理论（BEM），可很多科技文献和验证结果已表明，在模拟叶尖速比较低的短叶片时，格朗特理论模型尚能近似符合风洞实验结果，而当叶片越来越长时却不能真实地体现风轮在流场中的气流形态。实际上，BEM 理论基本方法和模型已经表明，在较高叶尖速比条件下，由于风轮尾涡螺距变小，叶片的诱导速度分布十分复杂，而 BEM 理论基于独立平衡流管假设的计算准确性，会随着叶尖速比升高而下降，直到不适用。

远景注意到的一个变化是，随着低风速风电场的开发，风轮直径不断加大，最优叶尖速比已高达 10 甚至 12。这表明，建立在较低叶尖速比假设基础上的传统 BEM 理论已不能准确模拟大叶片的实际气动载荷，也不再适用对较高叶尖速比的大叶片进行气动效率分析。

这样的发现令远景全球叶片研发团队既兴

奋又焦虑：如果不能还原风能在流场中的气流形态，叶片未被认知的气动效率岂不是永远无法被唤醒？更现实的问题是，由格朗特修正经验公式推导而来的叶片气动效率  $C_p$  值的利用上限很可能被低估了。那么，叶片实际可利用效率的极限究竟在哪里？

如此本质的问题可从航空航天业得到深刻的启迪。

美国 V22 鱼鹰的旋翼采用全三维旋翼气动外形设计技术，这其中就包括了基于自由涡运动理论的非定常气动载荷求解技术。与固定翼飞机不同，直升机旋翼的流场与风机叶轮的流场更接近。与 BEM 理论相比，自由涡尾迹方法更接近物理实际，实际求解了尾涡的空间位置分布和强度分布，建立了叶片诱导速度径向分布和尾涡分布的数学关系，具有更高的计算准确性，尤其是可以通过模拟叶片的涡流运动细节得到叶片非定常气动载荷。远景全球叶片团队的研究显示，在叶片处于最优叶尖速比时，自由涡方法可以避免传统的 BEM 理论预测失效问题，获得更准确的最优功率系数和最优叶尖速比。

“远景全球叶片团队将直升机旋翼设计中使用的自由涡尾迹方法应用到远景自研叶片的设计中，当然也包括计算流体力学 CFD 技术和全三维叶片气动、结构耦合优化等技术。”远景美国全球叶片创新中心叶片设计专家、前 GE 叶片高级工程师 Mohamad Sultan 先生表示，有两个维度的数据可以说明远景叶片效率的突破：一个维度的数据是，叶片最佳捕获段的气动效率提升 5% 以上；另一个维度的数据是，远景叶片改变了传统叶片设计中对刚度制约的上限，测试结果表明叶片整体刚度提升了 10%。

出于商业上的考虑，Mohamad Sultan 不愿意过多透露远景叶片技术的设计细节，但是实际叶片在中国风电场的运行还是引起国内叶片制造厂商对远景叶片技术的探究。

在射阳风电场，一位精于叶片制造的专业人士看出了远景 121 叶片气动外形的不同。“利用自开发的先进数字仿真平台，实现了这款叶

片的二维及三维气动设计，再通过多目标寻优实现了性能、载荷、重量以及噪音的最优设计。”远景叶片测试与验证专家、前美国新能源实验室高级工程师 Michael Desmond 先生在向这位专业人士提及这款叶片的设计时说，“全球叶片风洞测试资源的整合利用，为这款叶片高效率翼型开发提供了数据支持。”

值得一提的是，远景叶片翼型是针对中国风电场特点的定制化设计，其抗污染、低噪音以及更优的气动性能得益于和整机系统的协同开发、无缝对接，不仅实现了风机的最优发电性能，整机成本也下降了 10%。

## 为什么用软件定义自研发电机

发电机已是风电大部件领域普通且成熟的产品，可远景仍未停歇对它的不断探索。基于对发电机的使用以及对失效模式的认知和理解，远景汇聚了超过 20 位全球发电机领域的高端人才，涉及电磁计算及仿真开发、机械有限元分析和验证、CFD 流体仿真等多个领域。在这个全球化的自研发电机团队中，Kurt Andersen 先生曾任 Vattenfall CTO 和 Siemens 风电首席产品架构师，他对发电机的研发有独到见解。Jarkko Saramo 先生曾任 ABB 芬兰研发中心全球技术总监，主导了 ABB 双馈风力发电机在行业的领先地位。Deng Heng 博士在维斯塔斯、西门子丹麦研发中心工作超过 10 年，作为西门子丹麦研发中心研发经理以及电力电子与控制专家，他主导了西门子直驱发电机控制算法、风机数字化仿真平台、噪声与振动控制算法以及变频器与发电机调优算法，是构建西门子直驱核心技术的关键贡献者。

事实上，2016 年年底，远景 2.X MW 发电机就已在多个风电场运行了。而且，其更高性能的发电机也正在测试中，有望于 2018 年上半年在风电场小批量投入运行。

回到已在风电场运行的远景 2.X MW 发电



机上，专业人士可从它现有的技术亮点上感知到它的客户价值。“这款发电机适用于 2.1MW 至 2.5MW 的风电机组，设计理论寿命超出 22 年，绝缘设计理论工作寿命远超 30 年，短时过载能力 1.1 倍，极限工况下超发能力大于国内主流电机产品，且能满足电网正负 10% 及无功工作需求。” Kurt Andersen 先生透露，发电机总体损耗比常规发电机损耗减少约 20%，整机年发电量预计可提高 1%。在性能对比上，远景发电机有 5 项关键性能指标优于全球知名品牌的同功率发电机。

从风电整机系统设计优化的角度看，发电机应当是一个能与系统互动的大部件，而不是整机组装中的一块积木，“无论是机械传动链的轻量化，还是电气传动链的效率提升，发电机都可以扮演关键角色。”在 Kurt Andersen 先生看来，“远景认知发电机的最大价值在于，将发电机置于风电场的风频分布场景，通过整机系统的优化挖掘发电机的潜力。”

也就是说，远景发电机是风电整机平台上一个不断被优化的变量，发电机的认知与研发始终处于“平台变量”这一纵向的维度中。比如，充分利用齿轮箱的变速比来抬高系统转速，以

降低发电机的变频器侧电流，按照这样的方法，即使在增加发电机功率的情况下，也能保证变频器容量不需要发生变化，并可以在电网恶劣的工况下将发电机电流控制在足够的水平。“实现这一点，只需要用较少的成本改变发电机的短板部件即可，其更大价值在于，将齿轮箱和发电机做到最优的选型和设计，就可以抬高整机的输出功率，并能在大功率下使用低一个等级的变频器机侧单元，从而降低整个传动链的成本或提高系统的整体发电输出。”远景自研发电机项目主任设计工程师、前 ABB 发电机设计高级工程师、前 Siemens 风电电机亚太区负责人 Yang Jian 这样说道。

发电机是把机械能转换成电能的大部件，发电量和成本的平衡是发电机设计优化中最重要的考量因素，这在电磁设计环节尤为明显。在这方面，远景不但有全球顶尖的电磁设计团队，还有自行开发的基于风电场数据的发电机设计仿真工具，它可以产生多个电磁设计方案，“实际上，我们是在几百个电磁设计方案中选择一个最优的方案，这就是软件仿真的力量。”Deng Heng 博士强调了软件对发电机设计的价值。

实际上，用软件来定义自研发电机贯穿了发电机的全寿命周期，除了基于功能的设计思路，更重要的是在推动设计朝着更大范围满足客户风电场风况及特殊环境要求的方向演进，不但整机的核心控制系统要掌控发电机的运行行为，发电机也要知晓自身的边界效率。远景自研发电机项目模块管理负责人 Ballack Liu 举例说，“在开发这款发电机的过程中，自研团队将动力电缆的损耗、变压器的损耗模型以及变频器的协同模型和低风速风电场的风频模型等，全都放到了整机系统软件平台上一同来进行发电机的设计优化，也就是说，从发电机的角度选择一个最优的发电机设计方案。”

很微妙，发电机的设计是通过传动链上的不同部件、不同模型来实现最优发电量功能的，它不再是块冷冰冰的积木，而是变得更有灵性。比如，远景发电机可以根据自己对温度的掌控情况，在某个风速时段决定自己的超发时间，而又不影响自己的寿命，还可以根据绝缘性能算法来预测自己的绝缘寿命。

显然，这是整机系统下软件定义发电机设计的结果，这也反映在可靠性设计和寿命测试验证环节中。在这款发电机可靠性设计上，自研团队进行了超过 45 项设计及工艺优化，将各个子系统上的精细化做到了极致。“这款发电机经历了地面型式测试、加速老化测试和风电场运行磨损验证，完全印证了它的可靠性，我们坚信它的寿命会超过 20 年！”提及发电机寿命测试，Yang Jian 列举了一组数据：地面型式测试项目超过 100 项，加速老化测试时间超过 20000 小时，样机在风电场运行 3 个月无一例故障。

稍微展开点说，通过对发电机、减震器和安装支架系统层面进行的固有频率多阶仿真，以确保这款发电机的工作转速频内没有共振点，模态测试和整机的振动测试结果也表明了该发电机工作转速下的极低振动幅值，这使得发电机具备更高的超速能力和更长的轴承寿命。

更需要补充的一点是，远景自研发电机团

队通过 3 种测试方式分别对 3 台发电机的剩余寿命进行了测试验证，三组数据的比对情况足以成为这款发电机 20 年使用寿命的例证。



## 为什么要登上齿轮箱设计的制高点

远景要登上齿轮箱设计制高点的逻辑在于这家公司的人才优势。

远景内部文件显示，全球齿轮箱领域里的 15 位顶尖开发设计专家和 30 位工艺质量控制专家汇聚远景，就是“为了开发制造行业领先的齿轮箱产品”。

远景自研齿轮箱项目经理付强表示，“正是全球化齿轮箱团队的存在，远景才在这一目标的实现上信心十足。”团队中可以透露的成员是 Claus Kurt 和 Jorget Nielsen，他们都有超过 30 年的风电行业经验，都是风电齿轮箱和轴承专家，又都在全球知名公司担任过传动系统和齿轮箱技术负责人，取得过非凡的业绩。比如 Claus Kurt，2010 至 2013 年间，他在英国 LORC-Landoe Offshore Renewables Center 主持设计了当时最大的海上 10MW 风电机组测试中心，引起全球关注。

付强曾任 GE 风电工程部齿轮箱团队主任工程师，作为远景自研齿轮箱项目开发设计团队和工艺质量控制团队的“衔接者”，一直到 2017 年 8 月中旬远景 2.X MW 齿轮箱小批量交付运行以后，他才感到自研这事儿走到了一个比较明亮的时间节点。

值得关注的是，这款齿轮箱的两个性能指标，一个是高出行业产品 20% 的变速比，这不但为结构件、叶片和发电机降本提供了可能性，更重要的是扩大了机组发电风速的区间，尤其对低风速风电场电量提升更显著；另一个是高出行业产品 10% 至 15% 的功率密度，这意味着齿轮箱轻量化上的技术进步。

事实上，远景自研齿轮箱是基于风电发展趋势的考虑。

齿轮箱是风电机组的关键部件，随着单机

容量的逐渐增大，它不但可能会成为传动链中可靠性相对薄弱的环节，而且齿轮箱的可靠性与轻量化之间的矛盾也日渐突出，需要更先进的设计理念和技术来解决当下的矛盾，真正设计出又可靠又轻量的齿轮箱。作为低风速风电的开拓者和领导者，远景通过大量低风速风电场案例数据分析发现，齿轮箱在低风速风机传动链上的效率仍有潜力可挖，尤其在与高塔筒、大风轮智能风机系统协同优化上也有较大空间，而现有齿轮箱在性能上有所不及，开发更高效率的齿轮箱是风电趋势所需。

一直以来，在齿轮箱的选择上，远景坚持使用全球知名品牌，但遗憾的是，外购难以打开的成本链以及在分享部件微观参数上的受限，不但无法改进供应链的成本管理，也不利于整机系统设计上的优化，正因为如此，远景必须要通过自研来彻底打开齿轮箱的黑盒子，进一步拉低齿轮箱在整机成本上的占比，提升整机系统的性能。

那么，选择何种技术路线的齿轮箱以及进行哪些全生命周期的齿轮箱测试验证才能保证远景自研齿轮箱的可靠性，就成了项目团队要解决的重大问题。远景自研齿轮箱项目开发设计团队核心成员、远景整机机械总监、前 GE 风电工程部中国区总监、前 GE 风电全球齿轮箱联合开发项目技术负责人和首席工程师 Jim Li 透露，“远景在齿轮箱失效模式数据挖掘、成熟技术路线优化和极严测试验证这三个环节投入了大量的人力和财力，保障自研 2.X MW 齿轮箱的质量可靠性和技术先进性。”

可以说，远景在齿轮箱失效模式数据挖掘上有其独到的优势，除了通过使用全球知名品牌的齿轮箱直接获得失效模式外，远景智慧风场平台上还接入了巨量的风电场资产，通过大数据分析可挖掘出齿轮箱的失效概率，形成最全面的潜在失效模式及后果分析，并在开发设计阶段予以规避。

“失效模式的分析结果表明，成熟的技术路线是风电齿轮箱可靠性的支撑。” Jim Li 说，“远景自研齿轮箱采用最经典、最成熟、应用

量最大、经验沉淀最丰厚的一级行星二级平行齿轮箱结构，被优化的齿轮参数和大重合度设计，进一步提升了齿轮箱的效率，而且降低了运行噪音，确保了最优的整机运行工况和发电效率。”

值得注意的是，这款自研 2.X MW 齿轮箱的大速比和高功率密度比，在一定程度上成为了低风速风机系统大部件之间产生化学反应的催化剂，而更宽的发电风速区间、更高的发电性能、更低的运行噪音，实际上是让高塔筒、大风轮风机友好靠近城市和居民区的定制化设计。通常来讲，大速比会造成齿轮箱体积增大，但通过先进的齿轮参数优化设计，不仅可以做到大速比，还可以减少齿轮箱的重量，提升功率密度比。不过，这就需要先进的齿轮箱设计技术了。

Jim Li 透露了两点，一点是系统完善的设计，另一点是整机系统场景下的设计优化，前者包括采用全球最先进的齿轮箱设计标准以及软件工具，后者包括整机系统多体动力学分析、传动链整体有限元分析，也就是说，在远景这里，齿轮箱设计不只是齿轮箱自己的事了，还要跟整机系统以及其他部件产生一番化学反应，最终形成优质基因。实际上，远景自研齿轮箱项目团队把齿轮箱设计的边界扩大了，被打开的黑盒子就在整机系统中有了话语权。当制造出具体的齿轮箱产品后，远景的项目团队还对这款齿轮箱进行了极其严格的全生命周期的测试验证，比如在 +200% 到 -183% 极限工况下的极限载荷测试，还进行了延伸寿命破坏性试验，以此发掘齿轮箱的潜能。

不仅在地面测试，项目团队还把齿轮箱放到了塔顶上进行测试。远景整机总工程师洪熠解释，“天上 LDM 测试旨在对比验证测试台和天上运行的齿轮与结构件的应力状况，以及对弯矩对齿轮箱受力的影响。”

数据表明，远景自研 2.X MW 齿轮箱的天上 LDM 测试结果令人惊喜。可在淡定的远景全球齿轮箱研发团队看来，远景自研的齿轮箱就应该如此。✎



**GOLDWIND**  
金风科技

直驱未来  
点亮世界



[www.goldwind.com.cn](http://www.goldwind.com.cn)  
新疆乌鲁木齐经济技术开发区上海路107号

微信二维码





# 这款机型为何能有如此优异的表现？

本刊 | 夏云峰

在内蒙古克什克腾旗的茫茫大草原中，有这样一座安装了 17 台 3.0 兆瓦机组的风电场，自并网发电以来，取得了较好的成绩。

它是内蒙古明阳新能源公司的第一个风电项目——红土井子风电场。这座风电场的特殊之处在于，它还是明阳智慧能源集团股份有限公司（简称“明阳智能”）的主力机型之一——MySE 半直驱机组的示范性标杆风电场。

明阳智能一位 MySE 系列机组研发人员告诉《风能》杂志记者，该风电场投运了 MySE3.0-121 和 MySE3.0-135 两种机型。“红土井子风电场的良好运行表现，也佐证了我们当初的选择是对的。”

他提到的“选择”，指的是该公司在 2008 年对风电机组传动技术路线发展的预判。当时，双馈和直驱作为两大成熟的技术，在业内被广泛采用，但它们也有各自不完

美的地方。经过充分调研，并结合我国风况特征，明阳智能决定走半直驱传动技术路线，这才有了后来专门针对低风速、山地、海上等特殊自然环境研发设计的 MySE 系列风电机组。

据悉，在借鉴直驱和双馈技术优点的基础上，该机型采用将两级行星低传动比齿轮箱与中速永磁发电机混合的传动链结构和主轴一体化设计，具有高效率、高可靠性、小体积、低重量、高环境适应性等特点。

据相关技术负责人介绍，该机型的调速范围较宽，因此风轮可以在更宽的风速范围内追踪最佳  $C_p$  值，实现高效发电。再加上它应用了基于模型控制的策略（Model Based Control, MBC），运行时可根据所处位置的外部条件变化进行自寻优调整，从而确保了机组能够运行在最佳效率点。

为了保障发电量，明阳智能在设计 MySE 系列机组时充分考虑了可靠性这一因素。中速发电单元的使用，大大减少了传动系统部件数量，使得发生故障的可能性大幅降低。同时，相对于高传动比齿轮箱来说，中速发电单元中输出轴的转速低，减轻了高速旋转产生的摩擦和冲击，进而减少对轴承带来的损害。此外，传统的整流罩和机舱罩设计被取消，轮毂和机舱均使用铸件外壳直接密封，拥有优异的防腐性能。

“通过应用多体动力学软件，我们还对关键部件进行了冗余安全设计，避免因其中某一环节出现故障而影响整机的运行。”上述 MySE 系列机组研发人员强调。

采访中，记者注意到了有一个有趣的细节。虽然同属大容量机型，但是通过超紧凑型设计，MySE3.0 系列机组的整体重量远低于市场中的其他 3.0 兆瓦机组，运输高度和宽度仅相当于 2.0 兆瓦机组，运输和吊装方面的优势十分明显。尤其是随着风电场越来越多地处于复杂山地环境中，运输道路更加崎岖，这种优势将会凸显。

上述研发人员认为，这也是研发 MySE3.0 系列机组的初衷所在。“我们之所以推出大容量的 3.0 兆瓦机组，就是为了提升发电效率，并努力降低度电成本，使业主有更好的收益，也为平价上网的早日到来助一臂之力。”

海上风电机组则是明阳智能布局的另一个重点，并已经推出了 MySE5.5-155 抗台风机组。

据了解，针对海上的特殊自然环境，除了采用密封设计，该机组的发电机和机舱都采用独立的冷却系统，将发电机内部与外界环境完全隔离，减少了水汽、盐雾对内部零部件和电气部件的影响，解决了海上风电机组防盐雾、防潮湿的难题，大大提高了可靠性。

作为一款抗台风机组，MySE5.5-155 机型还配备了多重抵御台风的安全措施。它采用经过多年抗台风考验的超紧凑型传动链设计，机舱弯头采用一体化铸件制造，有效增加了机舱的刚度。这种设计的另一个优点在于，由台风引起的载荷通过风轮，将以最短的路径依次传递到主轴、传动链、偏航、塔架。其传动链也是一体化设计，主轴能够直接将载荷通过发电单元外壳传递到铸造的主机架，避免了弯矩传递到齿轮和发电机上。

另外，明阳智能还对机舱外形进行减阻设计，减少了迎风面积，优化了机组和基础载荷。

运用控制策略则是提升机组抗台风性能的重要手

段之一。借助远程控制系统以及机组自身的控制系统，MySE5.5-155 机型拥有两种抗台风模式——手动和自动。在手动模式下，当接收到台风预报后，风电场中央监控室通过登录机组控制系统，再通过人机交互界面手动操作，使其进入台风控制模式。自动模式则是指，通过机组传感器对风速的实时测量，当风速达到预设值，机组自动激活抗台风模式，进入自我保护状态。

值得一提的是，对台风未来的登陆区域、平均风速和极大风速以及降雨量，明阳智能能够利用大数据手段实现超前 48 小时进行精准预测。根据全球气象监测平台的预测数据，明阳智能迅速对台风的影响程度进行分析，然后依据受影响程度的不同对相关风电场定制最优抗台方案，不仅保证风电场安全运行，还能够有效利用台风风能，实现可观收益。

在 MySE 系列机组的研发人员看来，MySE5.5-155 机组的成功为明阳智能的海上风电机组研发奠定了良好基础。下一步，这家公司还将陆续推出适用于高风速的福建区域的 MySE7.0-155 抗台风机组以及应用于长江以北非台风地区的 MySE5.5-18X 机组。

“未来，我们将坚持陆海并进的策略，重点开拓陆上低风速、超低风速和海上风电市场，不断丰富 MySE 系列机组的谱系，让更多地区的风能资源实现经济性开发。”这位研发人员表示。✎



近几年，虽然 1.5 兆瓦机组的累计装机容量在全部累计装机中的占比不断下降，但它仍是我国风电市场中应用最为广泛的机型。目前，该机型已经细分出超过 20 种风轮直径规格的产品，可以覆盖从“三北”地区到中东南部的各类风资源区。

# 不同风轮直径的 1.5 兆瓦机组市场应用情况分析

本刊 | 夏云峰

据中国可再生能源学会风能专业委员会（CWEA）统计，2016 年，我国新增 2772 台 1.5 兆瓦机组，装机容量为 4158 兆瓦，占全部新增装机的 17.8%，比上一年下降 16 个百分点。截至 2016 年底，该机型共吊装了 56658 台，累计装机容量达到 84987 兆瓦，在全部累计装机中占比 50.4%，虽然同比下降 5%，但依然在风电市场中处于主导地位。

时至今日，1.5 兆瓦机组已经细分出了超过 20 种风轮直径的产品，最长的达到 121 米。与 2.0 兆瓦机型相比，1.5 兆瓦机组各个风轮直径所占市场份额的集中度要高得多，吊装最多的 77 米、82 米和 87 米规格占此类机组全部装机容量的 74.3%。

## 整体情况概述

图 1 和图 2 分别为 2004 年一

2016 年，我国不同风轮直径的 1.5 兆瓦机组新增装机以及占比情况。从中可以看出，历年有新增装机的 1.5 兆瓦机组的风轮直径类型日趋丰富，2016 年达到 16 种。

其中，82 米规格依然是累计装机容量最大的 1.5 兆瓦机型，达到 32832 兆瓦，占全部累计装机容量的 38.6%。从图 1 中可以看出，自 2010 年首次超过 77 米规格之后，82 米规格的年新增装机一直在 1.5 兆瓦机型各个风轮直径产品中稳居首位。直到 2016 年，这种趋势才被 93 米规格中断。

77 米规格则是累计装机容量第二多的机型。该产品投入商业化应用后迅速得到市场的认可。2006 年—2009 年，它是市场中最受欢迎的 1.5 兆瓦机型。尤其是 2009 年，其新增装机容量一度高达 5529 兆瓦。但在 2010 年被 82 米规格赶超后，该机型的新增装机此后呈逐年下降的态势。

2010 年，87 米规格产品开始在我国市场批量装机，并一直保持着较高的增速，这也促使其在 1.5 兆瓦机组各风轮直径产品的累计装机容量中位居第三位。

风轮直径为 93 米的 1.5 兆瓦机组在 2011 年才实现批量安装，它的累计装机容量虽然仍然低于 87 米规格，但一直保持着较快的增长势头。从图 1 和图 2 可以看出，该规格产品最近几年在 1.5 兆瓦机组全部新增装机中所占的比重不断扩大。2015 年和 2016 年，在相继超越 87 米和 82 米规格之后，该机型成为新增装机最多的 1.5 兆瓦机组类型。2016 年，93 米规格机型的新增装机容量较上一年有所下降，但与其他风轮直径的 1.5 兆瓦机型相比，仍保持较大的优势。

从整体来看，与 2.0 兆瓦机组的发展趋势类似，1.5 兆瓦机组也在朝着风轮直径越来越大的方向发展。直

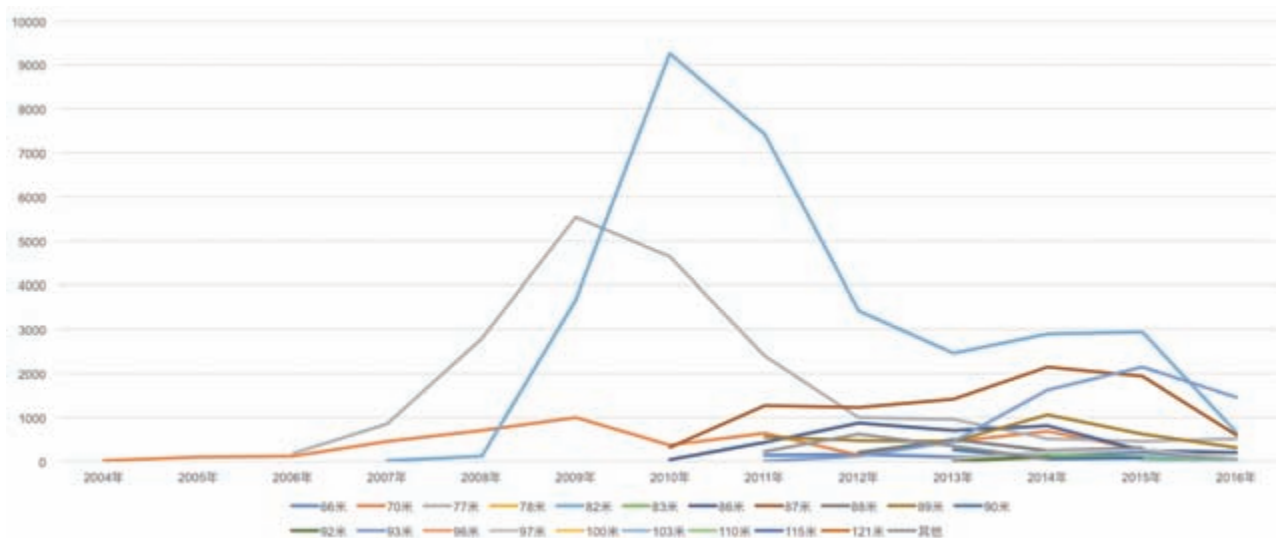


图1 不同风轮直径的1.5兆瓦机组装机走势（单位：兆瓦）

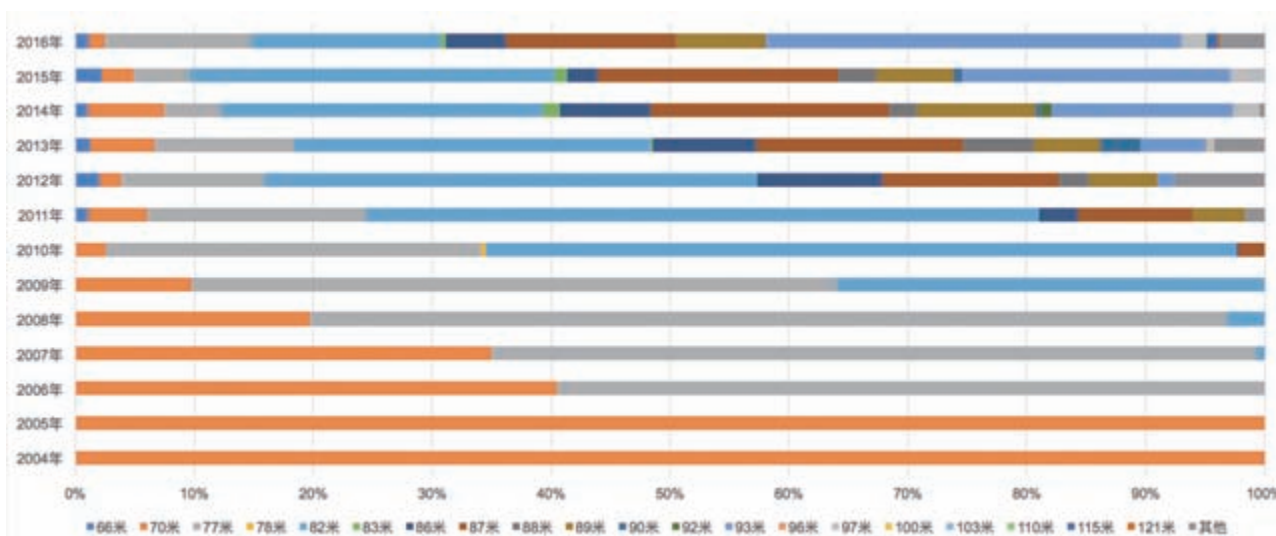


图2 历年不同风轮直径的1.5兆瓦机组装机占比

至 2010 年，后者最大的风轮直径尚未突破 90 米，此后，更多 90 米以上风轮直径的 1.5 兆瓦机型开始进入市场。到 2016 年，110 米、115 米和 121 米规格产品开始商业化应用。之所以出现这种趋势，主要还是与我国风电开发布局的调整有关。随着低风速风电开发渐入佳境，整机商开始研制更多规格、更大风轮直径的 1.5 兆瓦机组，

以提升机组的捕风能力，并满足市场多元化的需求。

### 各整机商和开发商的装机情况

2016 年，金风科技是新增 1.5 兆瓦机组最多的整机商，遥遥领先于其他企业。从图 3 中可以看出，这家公司所制造的 1.5 兆瓦机组的风轮直径

规格最多，共计 8 种。其中，装机最大的 93 米规格，占比 41.6%。77 米、82 米和 87 米规格的装机量也较大，三者的比重十分接近。

联合动力和华创风能新增的 1.5 兆瓦机组则分别涵盖 4 种和 3 种风轮直径。前者装机容量最大的为 86 米规格，其他 3 款机型的新增量则较为接近。后者则以 82 米和 93 米两种规格

为主。

通过对比可以发现，2016年，多数整机商的1.5兆瓦机组新增装机的风轮直径类型相较于2015年都有所减少。1.5兆瓦机组新增装机排名前十的整机商中，8家的风轮直径规格均不超过2种。

图4显示的是2016年各开发商不同风轮直径的1.5兆瓦机组装机占比情况。是年，国电集团是1.5兆瓦机组新增装机最多的开发商，其中涵盖的风轮直径规格也较多，达到5种。安装量最大的为93米，其次则为86米。

大唐集团是1.5兆瓦新增装机第

二多的开发企业，其应用的风轮直径规格则最多，达到6种。其中，以82米和93米居多，两者的装机容量较为接近。

国电投在1.5兆瓦机组新增装机排名中居于第三位，并应用了5种风轮直径规格，以82米和87米规格居多。

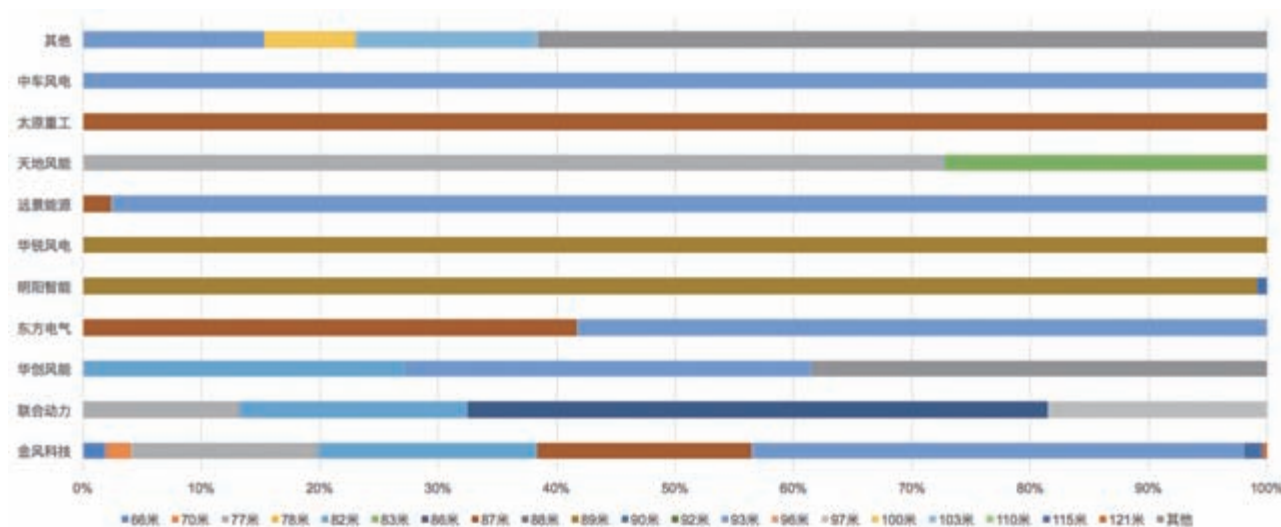


图3 2016年各整机商不同风轮直径的1.5兆瓦机组装机占比

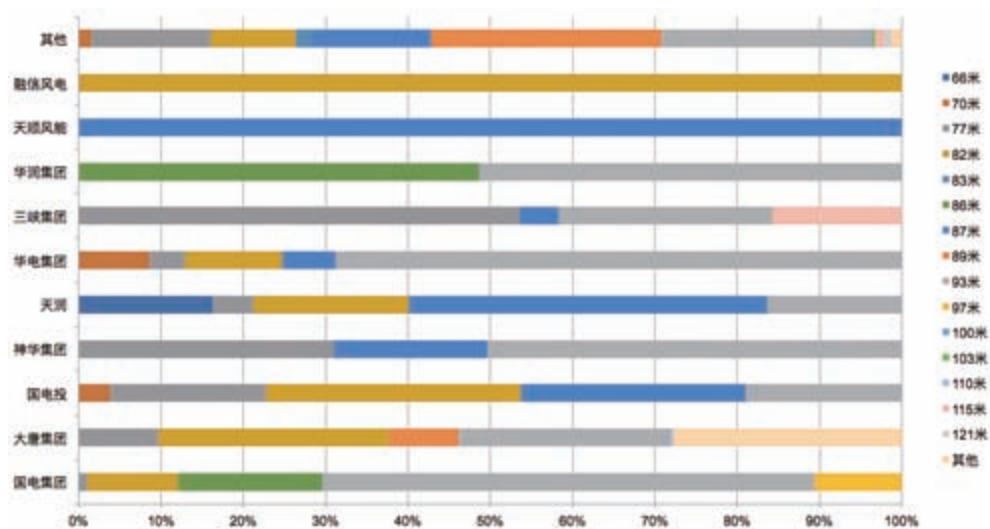


图4 2016年各开发商不同风轮直径的1.5兆瓦机组装机占比

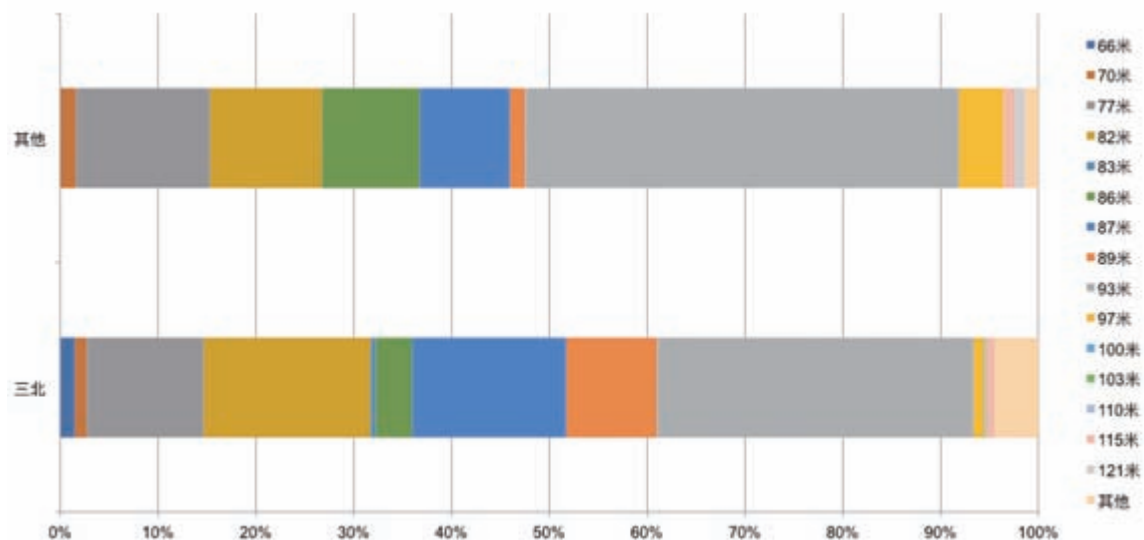


图5 2016年各地区不同风轮直径的1.5兆瓦机组装机占比

## 不同地域的吊装情况

从整体上来看，“三北”地区是2016年1.5兆瓦机组最主要的应用市场，占全部新增装机容量的78.3%。并且所包含的风轮直径类型也更加丰

富，达到14种，比其他地区多3种。

图5显示了2016年各地区不同风轮直径的1.5兆瓦机组装机占比情况。在“三北”地区，装机容量最大的是93米规格机型，其次则为82米和87米规格的产品。在其他地区，最

受欢迎的也是93米规格机型，但装机容量不到“三北”地区的一半，排名第二和第三位的依次是77米和82米风轮直径的产品。☑（中国可再生能源学会风能专业委员会研究中心何杰英对本文亦有贡献。）



摄影：张旭

2017年上半年，德国海域有108台风电机组首次并网发电，总装机626.2MW。还有80台已投运机组的单机容量得到提升，共扩容14.4MW。这些容量已经达到2016年全年新增并网装机的78%。此外，该国海域目前共有未并网机组54台，装机容量为296MW。

# 2017年上半年德国海上风电新增并网容量640.6MW

编译 | 夏云峰

## 整体情况

2017年上半年，德国海域共有108台风电机组首次并网发电，总装机626.2MW，除了3台是上一年尚未并网的机组，其余机组都是在今年刚完成吊装。

除此之外，还有80台已投运机组的单机容量得到提升，平均扩容180kW，共新增14.4MW。

这些容量已经达到2016年全年新增并网装机的78%。图1显示了2008年以来德国海上风电并网容量的发展走势。截至2017年上半年，该国共有并网海上风电机组1055台，总装机容量为4749MW，比2016年底增长16%。

## 已安装的机组和基础

今年上半年，德国海域共吊装了

141台机组，装机容量为799MW。其中的36台（185MW）尚未并网。加上去年的18台机组（111MW），德国海域目前共有未并网机组54台（296MW）。

同期，基础的安装数量达到69个，全部都没有吊装机组。包括2016年的57个基础在内，截至2017年上半

年，德国海域共有126个基础有待吊装机组。

69个基础中，只有单桩式和导管架式两种类型，这与2015年和2016年的情况相似。其中，单桩式的占比高达96%。

截至今年上半年，德国海域共安装了1235个基础，单桩式占70%（862

表1 德国海上风电发展情况一览（截至2017年6月30日）

年份	指标	装机容量 (MW)	数量
2017年上半年新增	已并网机组	626.2	108
	现有机组的扩容	14.4	80
	已吊装但尚未并网的机组	185.1	36
	尚未吊装机组的基础		69
2017年上半年累计	已并网机组	4748.9	1055
	已吊装但尚未并网的机组	295.8	54
	尚未吊装机组的基础		126

个),是最常用的基础类型。此外,导管架式、三脚架式和三桩式则分别占13%、10%和6%。

图2显示了自2012年以来历年各种基础类型的新增数量。

## 机组配置

今年上半年并网机组的平均单机

容量为5798kW,同比提高11%。平均风轮直径则较上一年略有下降,只有144m。在这种情况下,比功率(单机容量与扫风面积的比值)从2016年的314W/m<sup>2</sup>提高到356W/m<sup>2</sup>。

截至2017年6月底,德国所有已吊装机组的平均单机容量为4826kW,平均风轮直径达到126m,平均轮毂高度为92m,比功率则为

387W/m<sup>2</sup>。

今年上半年全部新增机组所处的平均水深为35米,同比增加16%。平均离岸距离则为88km,同比增加30%。

截至2017年上半年,德国海域所有机组的平均离岸距离为65km,平均水深则达到29m。

## 各地区的装机分布

分海域来看,2017年上半年,北海新增108台机组并网发电,装机容量为626MW。此外,单机容量被提升的所有机组也分布在该海域。至此,北海并网机组的数量总计达953台,装机容量为4410MW。波罗的海地区则共有102台机组并入电网,总装机容量为339MW。北海和波罗的海所占比重分别为93%和7%。

北海地区还吊装了总容量为129MW的21台机组,并安装了89个基础。波罗的海地区则吊装了总容量为167MW的33台机组,还有37个基础的安装工作也已完成。

从各州的情况来看,可以根据各个风电机组输电线路在陆上电网连接点的所在位置,将其划归到不同的州。图3显示了自2008年以来各个州的海上风电累计并网容量。其中下萨克森州以56%的占比居于首位。自2009年以来,该州的海上风电并网容量迅速增长,到2017年上半年已经达到2646MW。石勒苏益格-荷尔斯泰因州则位居次席,并网容量为1764MW,占37%。梅克伦堡-前波美拉尼亚州的并网容量则为339MW,占7%。2011年和2015年,该州的装机显著增长。

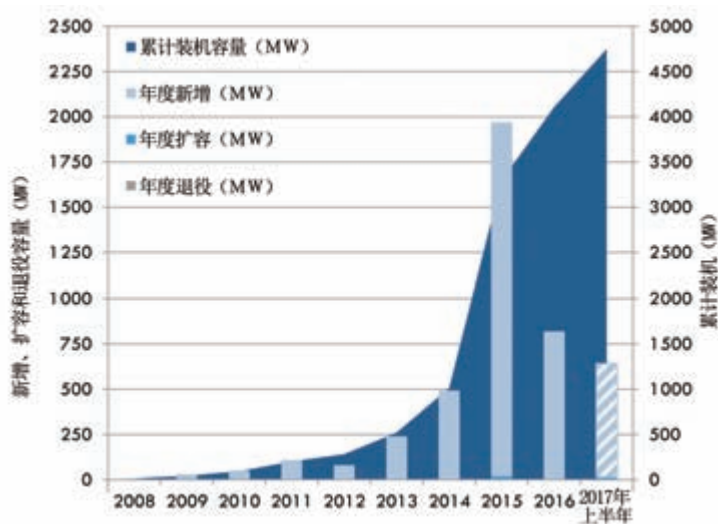


图1 德国海上风电并网容量发展走势

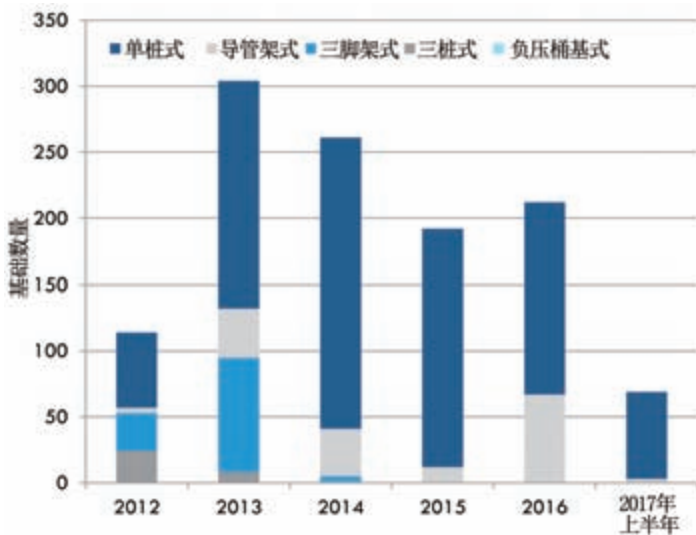


图2 各种基础类型的历年新增数量



表2 已并网机组的配置参数

参数	2017年上半年新增	2017年上半年累计
平均单机容量 (kW)	5798	4826
平均风轮直径 (m)	144	126
平均轮毂高度 (m)	98	92
比功率 (W/m <sup>2</sup> )	356	387

表3 德国各海域海上风电发展情况一览 (截至2017年6月30日)

海域	北海			波罗的海	
	指标	装机容量 (MW)	数量	装机容量 (MW)	数量
2017年上半年新增	已并网机组	626.20	108		
	现有机组的扩容	14.40	80		
	已吊装但尚未并网的机组	18.45	3	166.65	33
	尚未吊装机组的基础		66		3
2017年上半年累计	已并网机组	4410.10	953	338.80	102
	已吊装但尚未并网的机组	129.15	21	166.7	33
	尚未吊装机组的基础		89		37

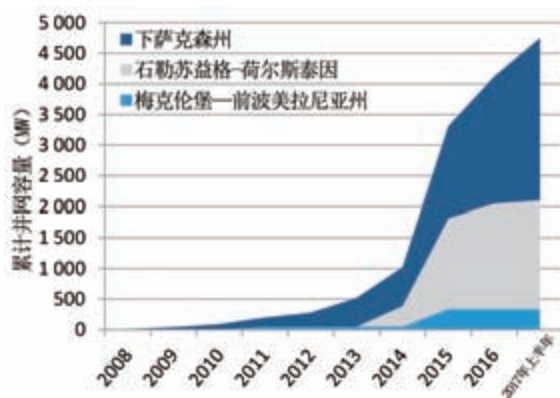


图3 各州的累计并网容量

## 招标

2017年4月1日，德国首轮海

上风电招标结束。4月13日，结果公布，共有装机容量为1490MW的4个项目中标，全部位于北海地区。中标

企业分别是 EnBW 和东能源，项目将在 2024 年和 2025 年投运。4 个项目的加权平均报价为 0.44 欧分 / 千瓦时，其中 3 个项目的补贴为零。

第二轮招标将于 2018 年 4 月初进行，涉及到 1610MW 的并网容量，其中的 500MW 装机将位于波罗的海地区。这些项目有望在 2021 年—2025 年投用。

## 项目建设

到 2017 年上半年，Sandbank 和 Veja Mate 两个风电场的机组已经全部并入电网，共有 17 台海上风电机组和 2 台单独的近海风电机组投运。Nordsee One 项目的部分机组也开始并网。在陆续投运的同时，这个风电场还将于今年进一步扩容。2016 年，Nordergründe 风电场的机组吊装工作已经全部完成，到 2017 年底，海上变电站有望建设完工。在安装好所有基础之后，北海的 Wikingen 风电场目前正在吊装机组。Mercur Offshore 项目的基础安装工作也已经结束。

在 Arkona Becken Südost 项目中，基础安装工作尚未开始，但是已经在开始准备内部布线了。Borkum Riffgrund 2、Albatros、Trianel Windpark Borkum II、EnBW Hohe See 以及一台独立机组的最终投资决定 (FID) 已经做出。Deutsche Bucht 风电场和两个示范项目的并网协议已经签署，但还未做出最终投资决定。还有 4 个项目是在 2017 年 4 月招标中中标的，分别为 Borkum Riffgrund West II、Gode Wind 3、OWP West、EnBW He Dreiht。(编译自 Deutsche WindGuard 网站)



科诺伟业风能设备（北京）有限公司  
Corona Wind Energy Equipment(Beijing) Co., Ltd.

# 海上风电

## 5.0MW 全套电控系统产品



5.0MW 海上风电变桨系统



5.0MW 海上风电变流器



5.0MW 海上风电机组主控系统



科诺伟业风能设备（北京）有限公司  
Corona Wind Energy Equipment(Beijing)Co.,Ltd.  
地址：北京市海淀区王庄路1号清华同方科技广场B座19层  
销售热线：010-82378899-302



目前，发展可再生能源所带来的经济、社会效益正在全球范围显现。在澳大利亚，可再生能源正成为最便宜的能源来源之一，相关项目的开发还创造了数以万计的就业岗位。在美国，过去9年中，通过大力开发风能和太阳能，就防止了1.27万人过早死亡。

# 发展可再生能源的经济社会效益正在全球显现

编译 | 何婷婷

## 澳大利亚：风能正成为最便宜的能源之一

最新数据显示，澳大利亚的可再生能源产业正以惊人的速度发展。上一个财年，该国可再生能源产生的电力可以满足70%家庭的用电所需。

由可再生能源研究机构绿色能源市场（Green Energy Markets）创立的第一个澳大利亚可再生能源指数（Australian Renewable Energy Index）显示，一旦2016年—2017年处于在建状态的风电和光伏项目完工，可再生能源电力将可以满足全国90%家庭的用电需求。该指数主要依靠澳大利亚公益组织GetUp从支持者那里募集来的资金维持日常运转。

尽管澳大利亚的电力市场仍然在很大程度上依赖于煤电和天然气发电，但是该国已经清醒地认识到发展可再

生能源在经济、社会等方面所带来的好处。维多利亚成为澳大利亚第一个把可再生能源发展目标写进法律的州。

而在10年之前，可再生能源发电量在澳大利亚全国总发电量中的占比只有7%。上一个财年，这一比例增加到了17.2%，到2017年8月更是进一步提升到18.8%。

据绿色能源市场（Green Energy Markets）测算，通过大力发展可再生能源所减少的二氧化碳排放量相当于澳大利亚全国半数以上机动车辆的排放量。

按照澳大利亚绿色能源市场（Green Energy Markets）的统计，在该国可再生能源中，水电占比最高，达到40%；其次是风能，占31%；屋顶太阳能光伏则占18%。

其中，大型光伏电站的占比只有不到2%。但目前有大量此类项目正在

建设中，因此，今后其所占的比重越来越大。

绿色能源市场（Green Energy Markets）的分析师特里斯坦·艾迪斯（Tristan Edis）认为，可再生能源，尤其是风能和太阳能的快速发展，不仅创造了大量就业岗位，也带来了投资热潮。

“在托尼·阿博特（Tony Abbott）担任澳大利亚总理期间，可再生能源领域的投资大幅下滑。现在，该产业在澳大利亚已经走出低谷期，实现了复苏。”他表示。

艾迪斯认为，马尔科姆·特恩布尔（Malcolm Turnbull）当选新一任总理，再加上各级政府出台了一系列激励政策，这些利好因素帮助投资者们恢复了信心。

他指出，按照现在的发展势头，澳大利亚有望在2019年底兑现可再生

能源在全国能源消费总量中占比达到20%的联邦可再生能源发展目标，比原定的2020年提前一年。

然而，艾迪斯也强调，可再生能源行业要创造大量就业岗位，离不开联邦政府制定的可再生能源目标，但这一目标也有可能“迅速破灭”。

如果特恩布尔政府在首席科学家艾兰·芬克尔（Alan Finkel）提议为未来设立的清洁能源目标上不能向前迈进，那么澳大利亚的可再生能源投资就面临着崩溃的风险。

截至今年6月底，澳大利亚共有46个大型可再生能源项目正在建设中，能够为8868个劳动力提供了为期一年的工作岗位。到7月，这一数字将增加到1万。其中的3018个工作岗位分布在新南威尔士州，主要来自于风电项目；紧随其后的则是昆士兰州，新增了2625个就业岗位，其中的70%都是来自光伏电站。在2016—2017财年，澳大利亚的屋顶光伏安装共创造了3769个全职工作岗位。

可再生能源指数的数据显示，尽管昆士兰州有大批项目处于在建状态，但是在2016—2017财年，大型光伏电站的发电量在全部可再生能源发电量中只占不到2%的份额。

艾迪斯表示，兴起于2008年的屋顶光伏市场则增长迅猛。仅2016年，澳大利亚就新安装了15万套屋顶光伏系统，所发电量足够供22.6万户家庭使用。“这部分装机将在未来10年帮助消费者节省15亿美元的电费支出。”

GetUp机构的能源运动主管米瑞爱姆·雷昂思（Miriam Lyons）指出，“每一个澳大利亚居民都在用自家的屋顶对能源运动进行‘投票’，这也预示

着由传统大型化石能源电力企业主导市场的时代已经结束，由居民自主掌管自家电力花销的时代正在到来。”

“对于可再生能源的高速发展，我们要感谢谁呢？答案当然不是联邦政府。”她表示，“我们要感谢的是成千上万的澳大利亚民众，是他们站出来才使得国家的可再生能源目标免受阿博特政府的侵扰，也正是他们才使得澳大利亚可再生能源署能够在联邦政府预算被大幅削减的过程中得以幸存，他们还通过努力让自己所在的州政府走在了发展清洁能源的前列。”

## 美国：风能和太阳能挽救了1.27万人的生命

一项最新的研究显示，过去9年中，仅在美国，通过大力开发风能和太阳能，就防止了1.27万人过早死亡。这项研究主要是分析除了可以减缓全球变暖，放弃使用化石燃料还可以带来哪些更广泛的益处。

该研究的成果已经以论文形式发表在了《自然—能源》杂志上。文中指出，通过降低碳排放，可以避免一系列由使用化石燃料引发的问题，其价值将达到数十亿美元。

英国政府承诺从2040年起将禁止化石燃料的销售。但这遭到了环保主义者的批评，他们认为2040年还有点久远。与之形成鲜明对比的是，挪威计划在2025年就淘汰传统机动车。

英国皇家内科医师学会（Royal College of Physicians）的研究显示，该国每年有4万个死亡案例要归因于户外的空气污染，死因包括癌症、哮喘病、中风、心脏病、糖尿病、肥胖

症以及神经错乱。


由美国能源部资助的上述最新研究则显示，2007年—2015年，美国的主要空气污染物都大量减少。二氧化碳下降了20%，二氧化硫减少了72%，氮氧化物下降了50%，细小颗粒物，也就是大家熟知的PM2.5则下降了46%。

之所以如此，部分原因是可再生能源部分取代了化石燃料，政府实施更加严格的排放法规也起到了一定的作用。为了使排放的尾气质量达标，煤电厂都加装了过滤装置，这也使二氧化硫的排放量从2007年的900万吨下降到了2015年的25万吨。

2007年—2015年，美国的光伏和风电的装机扩大了10倍，从1000万千瓦增加到2015年的1亿千瓦。

研究人员在文章中提到，“2007年到2015年间，光伏和风电装机容量迅猛增加，再加上政策调整以及化石燃料价格的变化，导致能源领域的有害气体排放大幅降低。”这挽救了数以万计民众的生命，仅在2015年就避免了1850人因为污染而过早死亡。

据劳伦斯伯克利国家实验室的米尔斯坦恩博士（Dr Dev Millstein）领导的上述研究团队估算，在同期，可再生能源不断增加的发电量将创造出价值53亿—1068亿美元的“累积气候效益”。

环境行动小组ClientEarth的律师山姆·布朗特（Sam Bright）说道，“减少煤炭的使用会为人类生命健康带来诸多好处，这是显而易见的。”他曾经针对政府公布的空气质量计划发起了2次成功的诉讼。（编译自《卫报》、雅虎新闻网站）

河海大学于 2008 年依托传统优势学科建立新能源科学与工程专业，以风力发电方向为主，是国家级特色专业和江苏省重点专业。经过近 10 年从无到有、从有到力求完善的过程，河海大学在该专业实验课程教学建设上初步取得了一些心得。

# 新能源科学与工程专业实验课程教学改革研究\*

文 | 郭苏，许昌，赵振宙，霍志红

为积极响应国家新能源发展重大战略和新能源产业人才需求，河海大学于 2008 年依托传统优势学科建立了新能源科学与工程专业，是江苏省第一所、全国第二所建立新能源科学与工程专业的高校。河海大学新能源科学与工程专业以风力发电方向为主，兼顾太阳能发电、海洋能发电、潮汐能发电等多种可再生能源发电方向，是国家级特色专业和江苏省重点专业。

河海大学新能源科学与工程专业开设的实践教学课程共有 42 个学分，其中《空气动力学实验》和《风力发电实验》是该专业开设的两门最主要的专业实验课程。由于河海大学开设此课程时间较早，在课程设置、教学理念、教学方法及考核方法等方面，兄弟院校都没有成熟的方案可供参考。经过近 10 年从无到有、从有到力求完善的过程，河海大学在该专业实验课程的建设上初步取得了一些教学心得。本文总结了该校新能源科学与工程专业

实验课程的建设工作，为同类课程的建设提供参考。

## 务实的课程内容设置

在专业建设的初始阶段，为了解国家、社会对风电人才的需求特点，该专业老师分组到华北电力大学（国内第一所设置本专业的高校）、风电场、设计院、风机制造厂家等二十余家单位进行调研，并与来自中国可再生能源学会风能专业委员会、水利部、水利水电出版社等单位的多名专家学者对专业培养方案进行多次研讨和论证，建立了符合国家、社会需求的培养方案和教学大纲。

具体到实验课程中，《空气动力学实验》属于专业基础实验课，通过此课程的学习，使学生学习并验证流体力学中的连续性方程、伯努利方程；掌握流动空气中总压力、静压力、动压力的测试仪器及测量方法；研究与

进行风洞等实验。教学内容包括：文丘里管实验、阻力测定实验、升力测定实验等。

《风力发电实验》属于专业实验课，通过此课程的学习，使学生深入了解风力发电机组整体结构、单部件结构；熟悉风力发电机组偏航调节原理、制动原理、变桨原理以及发电工作原理等。教学内容包括：小型风力发电机组模型参观，大型风洞参观，在采用虚拟现实技术开发的风力发电教学平台上实现风力发电机组整体结构、单部件结构的展示，偏航调节原理、制动原理、变桨原理、以及发电工作原理的展示等。

## “探索式”的教学理念

作为新能源科学与工程专业的主力实验课程，其知识内容更新速度快，改革是其发展的必然趋势，超前的教学理念是关键。长期以来，高校的实

\*国家自然科学基金 (51507053)

验课程均以教师讲授、学生“照猫画虎”完成实验为主。传统的教学模式基本上属于学生不用动脑即可完成。由于学生处于被动的接受地位,因此限制了学生的积极主动性,不利于培养其自主学习的能力,学生的创新能力和动手能力得不到提升。

本实验课程采用“探索式”的教学理念,学生根据实验题目,自主查找资料、设计实验内容,从而获得实验结论、验证所需证明的理论或知识。该教学模式充分调动学生的主观能动性,激发学生潜在的创造欲望和热情。

## 多样性的教学方法

在《空气动力学实验》和《风力发电实验》教学过程中,教师根据教学大纲要求,注重课程的知识性和趣味性,在实验教学中采用多媒体与传统教学相结合、风力发电虚拟实验平台和实际操作实验平台相结合的方式,使学生充分结合理论知识点,做到有的放矢地学习相关知识。在教学中,主要采用了以下几种方法。

### 一、启发预习法

教师在实验课程之前下发实验指导书,在实验指导书中提出实验目的和内容,引导学生去查阅相关资料、了解相关背景知识、研究实验器材组成等,并设计实验。该方法能有效提高课堂教学效率、增强学生自主学习意识,为其今后的独立学习和工作打下基础。

### 二、小组讨论法

在实验教学过程中,以3—5人为一组将学生分成若干小组,通过角色互换机制,组织小组成员轮流承担不同的实验任务。教师在指导实验中有针对性地提出相关理论问题或本小



图1 风力发电虚拟实验平台



图2 空气动力学实验平台



图3 小型风电机组实验平台



图4 风洞实验平台

组在操作上存在的问题,学生采用小组讨论的形式解决问题,并在提交实验报告时,简述提出的问题以及相应的解决方法。从而确保每个学生都能积极主动、全程参与到实验中来。

### 三、参与科研法

在实验教学中,适当引导学生参与科研活动。以风洞参观为例,河海大学购置的风洞为低速直流式风洞,除完成本科教学任务外,还需承担一部分的科研任务。在课程设计时,将科研任务与教学任务相结合,使本科学生在进行科研试验时完成参观任务,近距离了解风洞的工作原理、工作过程,并学习一些简单的操作方法和规范。该方法有效提高了学生的学习兴趣 and 动手能力。

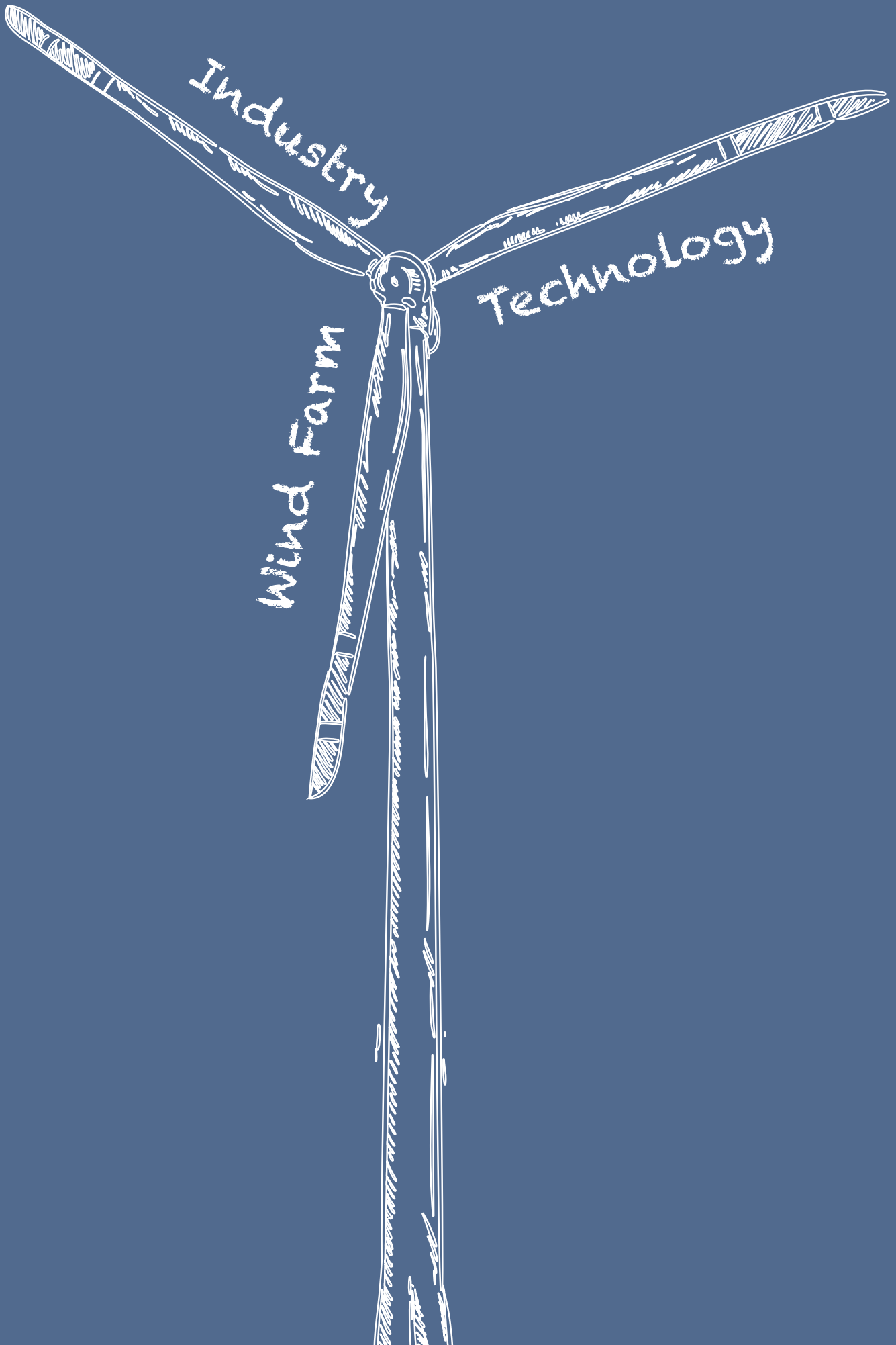
## 灵活的考核方式

在实验课程考核中,原有的提交实验报告的考核方式单一枯燥,不利于学生真正掌握所学知识。考虑到这一点,在实验课程的考核环节中,加

入了自主设计实验环节。并将平时成绩、作业成绩、自主设计实验成绩的综合作为课程的期末总成绩。这样的考核方式,全面调动了学生的积极性,锻炼了学生的创新能力,取得事半功倍的效果。

## 总结

实验课程是新能源科学与工程专业理论课程的有效实践和延伸。随着新能源科学与工程专业以及风电技术的不断发展,其课程内容和教学方法等也需不断改进和完善,以适应专业发展需求。河海大学针对课程本身的特点,从课程设置、教学理念、教学方法和考核方式等方面采取了一系列的改革措施,为新能源行业培养具有自学能力、创新能力和动手能力的专业性人才奠定基础。希望河海大学新能源科学与工程专业的实验课程改革措施可以为兄弟院校同类课程提供参考,为同行交流提供依据。 (作者单位:河海大学能源与电气学院)



## 产业

无人机近距离巡检风电机组叶片应用研究

## 风电场

数值模拟在风电场设计中的应用研究

## 技术

叶片故障时风力发电机组瞬态受力特性分析

基于 MATLAB 的齿轮箱油路模拟计算

高空风力发电机组概念设计研究

海上风力发电机组防雷系统浅谈



# 无人机近距离巡检风电机组叶片应用研究

文 | 韩斌, 赵勇, 邓巍, 房刚利

随着国内风电装机量的持续攀升, 风电机组的绝对数量也随之逐年递增, 叶片作为风电机组的关键部件, 每年都需要定期巡检。目前常用的叶片巡检方式主要有望远镜观察、高空平台(吊篮)垂降人工巡检等, 其中望远镜观察存在观测精度低的缺点, 高空平台(吊篮)垂降人工巡检方式工作效率较低、成本高、工作过程中危险度高、工作强度大。

近年来随着民用无人机性能的不断提高, 无人机正逐步代替人开展部分空中侦查、监控、通信、勘测、电力巡线等任务。目前, 应用无人机对风电机组叶片进行检测的工作在国内外已经开展起来, 2015年凯普斯基础设施公司与ING Robotic航空公司联手, 利用无人机在加拿大的风电场进行叶片检测工作。工作组发现, 无人机可以更快、更安全地收集数据。德国多家公司都开发了相应的无人机检测系统。国内利用无人机进行叶片巡检, 尚处于一个研究试验阶段。中能公司在麒麟山风电场进行了风电机组叶片无人机检测试点应用, 成功实现了6台机组叶片检测, 取得良好成效。2015年国电联合动力利用无人机顺利完成了麻黄山现场MG17#风电机组叶片的巡检工作。龙源电力也开始进行相关可行性试验。根据国外经验, 无人机巡检叶片比传统的高空平台(吊篮)垂降人工巡检至少快3倍,

成本节约近50%, 减少发电机三分之二的停机时间。

本文通过对国内市场现有无人机的调研及比较, 给出了近距离(<2.5m)巡检风电机组叶片用无人机的选型原则, 并从影响无人机巡检叶片效果的因素、人员配备等方面研究了无人机巡检叶片的可行性, 最后总结了影响无人机近距离巡检风电机组叶片效果的不利因素, 并对无人机大规模应用于叶片微观巡检时需要改进的方向提出了建议。

## 无人机选型

目前常见无人机有固定翼、直升机和多旋翼无人机。固定翼和直升机因有活动的机械连接部件, 飞行过程中会产生磨损, 导致其可靠性下降。相比而言, 多旋翼无人机操控简单, 可靠性也较强, 而且能够悬停, 飞行

范围受控, 相对固定翼无人机更安全。

无人机在风电领域的应用可分为风电场宏观巡检和风电机组微观巡检两类。风电场宏观巡检主要检查风电场是否有风电机组倒塔、叶片断裂、轮毂罩掉落等较大故障或事故的发生。风电机组微观(近距离)巡检主要检查风电机组叶片、机舱、塔筒表面状况、风速风向仪(机械式)是否工作等。

本文结合现有风电机组的容量、塔筒高度、风轮直径等因素, 提出了无人机微观巡检风电机组叶片的选型原则及要求, 具体包括:

(1) 无人机能稳定悬停。

(2) 无人机自带成像系统、具备高速成像及防抖功能, 成像设备具有变焦功能。

(3) 较强的抗风能力, 至少抗5级风速。

(4) 飞行高度>150m。

(5) 操控简单、可靠性高。

表1 各类型无人机比较

性能	固定翼	直升机	多旋翼
能否悬停	否	是	是
操作难易	难	较难	易
可靠性	高	一般	高
维护成本	高	一般	低
维修难易	难	难	易
续航时间	长	一般	短
起飞方式	需要跑道	垂直起降	垂直起降
载荷	大	一般	小

(6) 价格适中、维护方便。

通过比较各类无人机, 如表 1 所示, 可见多旋翼无人机由于具备能稳定悬停、操控简单、可靠性高、维修方便等特点, 适合作为叶片巡检的工具。

本文从抗风能力、起飞重量、续航时间、成本、成像稳定性、操作难易等因素综合考虑, 选用大疆 Inspire 1 pro 多旋翼无人机进行风电机组叶片无人机微观巡检应用研究。

## 影响巡检效果的因素

在无人机巡检叶片过程中, 风速、湍流的突然改变会影响无人机的飞行安全, 太阳光线与无人机所带成像设备间的角度会影响成像效果, 环境温度会影响无人机电池性能, 进而影响到无人机的续航能力, 叶片在空间的位置将直接影响巡检过程。为了防止风速、湍流的突然改变造成无人机与叶片碰撞事故的发生, 并确保成像设备的成像效果不受太阳光线影响, 本文给出了通过调整机舱位置来确保无人机、叶片待观测面处于最佳区域的方法。

### 一、考虑风向、风速、湍流时无人机所处安全区域确定方法

风向、风速、湍流大小的突然改变在风电场中是无法避免的, 为此须确保无人机相对叶片所处的位置在风速、湍流突然增大时也不发生碰撞事故, 因此无人机相对所巡检叶片的待观测面: 迎风面 (S-S 面)、背风面 (P-S 面)、前后缘, 应处于其“下风”位置。例如当用无人机观测图 1 中叶片 A 前缘、机舱头部 (出现在图 1 所示的  $180^\circ$  角范围内) 时, 无人机处于风电机组下风的位置, 如果风速、湍流突然增大, 无人机将被吹离叶片 A 的前

缘, 可有效避免与叶片相互碰撞; 而当机舱头部出现在其他区域时, 则可能导致无人机与叶片碰撞事故的发生。巡检 A 叶片的 S-S 面、P-S 面、后缘时可用类似方法确定出机舱头部应调节的区域范围。

### 二、考虑光线对成像效果影响时叶片待巡检面所处区域确定方法

为了能充分获得叶片表面信息, 尤其是 S-S 面的信息, 利用无人机所带的成像设备对叶片进行检测, 尤其是晴天时 (阴天时可参考), 应充分考虑光线对成像效果的影响。当有太阳光线时, 为了获得清晰的图像信息,

成像设备的镜头光轴与光线之间的夹角最好在  $0^\circ$  至  $\pm 60^\circ$  之间, 此区域属于顺光 ( $0^\circ$  至  $\pm 30^\circ$ ) 和前测光 ( $\pm 30^\circ$  至  $\pm 60^\circ$ ) 范围, 此外, 镜头光轴应垂直于叶片待巡检面, 由此可以确定考虑光线因素时叶片待巡检面所处的最佳区域。例如要巡检图 2 中 A 叶片的前缘时, 可以通过调整机舱头部到图 2 所示的  $\pm 60^\circ$  角范围内以确保叶片待观测面处于最佳区域。

图 3 中无人机所带镜头光轴与光线之间成  $90^\circ$  夹角观测叶片前缘时, 存在阴影区域, 成像效果较差。图 4 中无人机所带镜头光轴与光线之间成  $0^\circ$

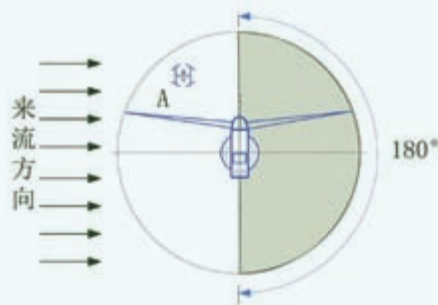


图1 考虑风向时机舱头部可调整范围

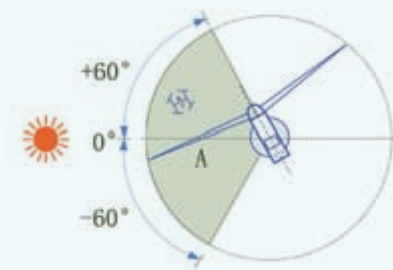


图2 考虑光线时机舱头部可调节范围



图3 叶片前缘



图4 叶片S-S面

夹角观测叶片 S-S 面时,成像效果较好。巡检 A 叶片的 S-S 面、P-S 面、后缘时可用类似方法确定出机舱头部应调节的区域范围。

### 三、考虑风向、风速、湍流、光线时机舱所处最佳区域确定方法

当综合考虑风向、风速、湍流、光线对成像效果的影响时,根据上述方法,取机舱头部所出现的公共区域范围,即可确定出机舱头部应调整的最佳区域范围。以巡检某叶片前缘以及风向与光线相对于风电机组成  $90^\circ$  夹角时为例,当机舱头部调整到图 5 所示阴影区域范围内时,可同时消除风向、风速、湍流、光线等因素对巡检效果的不利影响。巡检 A 叶片的 S-S 面、P-S 面、后缘时可用类似方法确定出机舱头部应调节的区域范围。

根据上文一、二确定的方法,当风向与太阳光相对于风电机组成  $0 - \pm 30^\circ$  夹角时,如图 6 所示,要巡检叶片 A 前缘,无论机舱头部调整到哪个区域,都无法同时满足安全和成像效果最佳的要求,此时如果风速较大,应本着“安全第一”的原则调整机舱头部位置。如果风速及湍流度较小或者无风,可以考虑让无人机在方法一确定的安全区域外飞行。可用类似方法确定使用无人机巡检 A 叶片的 S-S 面、P-S 面、后缘时机舱头部所处的最佳位置。

### 四、叶片位置对检测效果的影响

无人机所带成像设备虽然能在俯仰及水平方向调节,但调节范围有限。为了获得最佳成像效果,镜头轴线最好垂直于叶片待观测面。

应用无人机对叶片巡检时,叶片需顺桨且需要将叶轮完全固定,以防叶轮突然转动造成无人机与叶片的碰撞。叶轮静止状态下风电机组叶片所

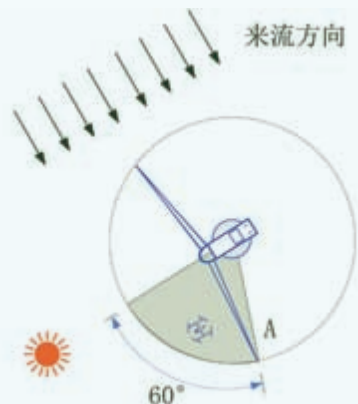


图5 考虑风向、光线时机舱头部可调节范围

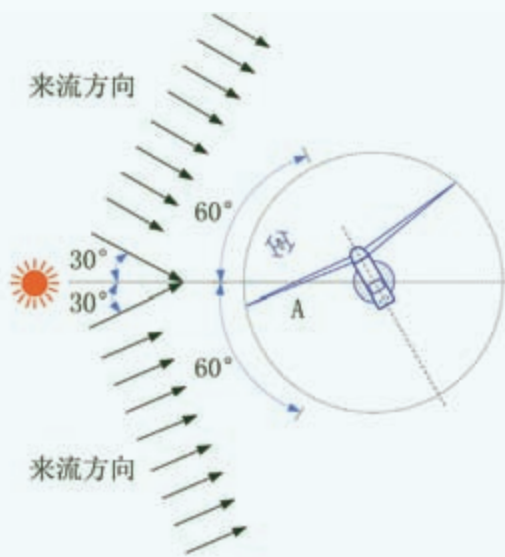
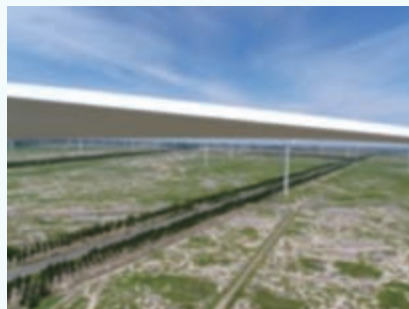


图6 机舱与光线、风向的相对位置



(a) 水平位置



(b) 竖直位置

图7 叶片处于不同位置时后缘观测结果

处典型位置示意图如图7所示。

在不考虑光线、风向等对巡检效果影响、叶轮处于图8(a)所示位置时,通过无人机可以方便地巡检A叶片各表面、B、C叶片的前后缘,但巡检B、C叶片的S-S或P-S面时,为了使镜头轴线垂直于叶片待观测面,无人机有时需要在叶片上方飞行,存在视觉盲区,此时操作人员将无法判断无人机与叶片之间的距离。从设备安全角度出发,为防止无人机与叶片碰撞事故的发生,巡检过程中不建议无人机在叶片上方飞行。为有效巡检B、C叶片的S-S或P-S面,需将B、C叶片转到图8(a)中A叶片或图8(c)中C叶片的位置。同理,当叶轮处于图8(b)位置,巡检三支叶片时均会存在不同程度的视线盲区,因此需要将各叶片转到图8(a)中A叶片或者图8(c)中C叶片所处的位置,以便完成对相应叶片各面的巡检。当叶轮处于图8(c)位置时,可以完成对A、B叶片前、后缘以及C叶片的S-S、P-S面、前缘的巡检,但无法完成对A、B叶片S-S、P-S面(视觉盲区原因)、C叶片后缘(空间原因)的巡检。

在考虑太阳光线对巡检效果的影响时,巡检过程中待巡检面所处的位置应避免存在阴影区域,否则将影响巡检效果,如图7(a)所示。如果待巡检面存在阴影区,需将待巡检面转到无阴影区域,这样才能获得较好的成像效果,如图7(b)所示。

晴天时在巡检叶片过程中为满足光线的要求,当观测处于图8(a)中A叶片所示位置——叶片的S-S、P-S面及前、后缘时,如图9所示,至少需要将风电机组偏航三次(阴天时视光线情况确定偏航次数),同时机舱头部所处位置还需满足方法一的要求,

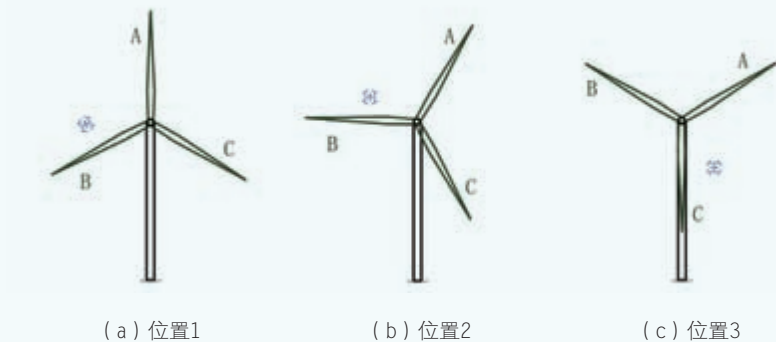


图8 叶轮所处典型位置示意图

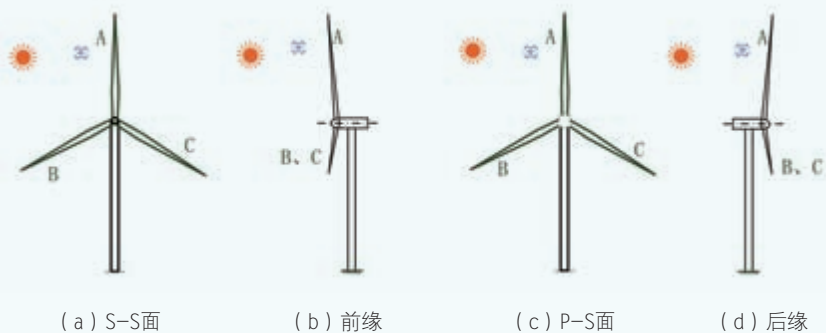


图9 观测叶片不同位置时叶轮所处位置

以保证无人机的安全飞行。当待检叶片处于图8(c)中C叶片所处位置时,为有效观测C叶片的S-S、P-S面及叶片前、后缘,晴天时至少需要将风电机组偏航三次,叶片位置调整一次(调整到竖直位置),以满足光线及无人机安全飞行要求。

由上可见,为了提高检测效率,本文建议利用无人机巡检叶片时将待测叶片调整到接近图8(a)中A叶片所处位置,然后按顺序检测三支叶片。在晴天时巡检三支叶片需要偏航9次(阴天时视光线情况确定偏航次数),才能获取清晰可用的检测图片及视频数据。

#### 五、温度、湿度、海拔高度对巡检效果的影响

温度主要会对无人机电池性能造

成影响,例如本文所用无人机所带的锂电池,当环境温度在35℃以上、5℃以下时,无人机的续航能力将随着锂电池性能的变差而下降,从而降低巡检效率。

湿度也会影响无人机所带电池的性能,当空气湿度较大时,锂电池的性能也会变差,在沿海及空气湿度较大的地区利用无人机巡检叶片时,要特别注意观察电池状况及电量相关提示,以确保飞行安全。

当风电机组所处海拔高度超出无人机允许飞行的海拔高度要求时,环境因素(温度、湿度等)才会导致飞行器电池及动力系统性能的下降,进而影响飞行器的性能。目前国内高海拔风电机组大约在2000m—4000m之

表2 各工作人员工作内容

人员	工作位置	工作内容
A	机舱	叶轮的锁定与解除、风电机组偏航控制
B	地面	控制无人机，观察无人机与叶片间的距离
C	地面	图像及视频拍摄
D	地面	观察无人机与叶片间的距离



图10 无人机现场巡检照片

间，未超出现有民用无人机可飞行海拔高度范围。

### 人员配备及工作分工

无人机巡检叶片过程中，为防止无人机与叶片发生撞击，需要将叶片

顺桨并将叶轮锁死。由于目前现有民用多旋翼无人机无法自主避开障碍物，为了确保巡检过程中的设备安全及获取有效的图像信息，也为提高巡检效率，通过现场试验，就目前现有无人机技术而言，巡检过程中建议配备3—4名工作人员，各人员的工作内容等如表2所示。

### 影响巡检效果的不利因素

通过现场试验，本文总结了影响无人机近距离微观巡检风电机组叶片效果的不利因素，包括：

(1) 现有可用无人机水平方向上无360°范围内的距离检测及报警、自主避开障碍物功能，观测人员的视觉误差及较强湍流会造成无人机与叶片碰撞事故的发生。

(2) 无人机续航时间过短。目前常见无人机续航能力最多维持15min。

(3) 无人机操作人员及观察员长时间、远距离大角度仰头观察无人机，极易疲劳，直接影响到无人机的飞行安全。

(4) 叶片表面的灰尘会影响成像效果，导致从拍摄的图像中无法准确

获取早期裂纹或腐蚀斑点等信息。

### 结论和建议

无人机巡检叶片作为新生事物，虽不能完全替代现有传统的巡检方式，但其本身在减少停机时间、提高巡检效率、减少人员伤亡、降低叶片检测成本等方面具有较强的优势。随着风电机组叶片巡检需求的增大，无人机在风电领域的应用市场将迅速发展。

目前国内市场可用的无人机多为航拍研制，不适合在风电机组叶片近距离巡检过程中使用。通过试验可以得出无人机大规模用于叶片微观巡检时还需从如下几方面进行改进：

(1) 无人机需具备自主避开障碍物及水平方向360°范围内的雷达测距、显示及报警功能。

(2) 无人机除携带高清成像设备外，还应添加360°范围内的成像设备，使操作人员从地面接收装置上能查看无人机四周的情况，不需要通过人眼直接观察来确定无人机与风电机组间的相对位置，避免疲劳操作。

(3) 无人机的旋翼外需添加保护装置，使无人机与风电机组碰撞时旋翼不至于马上损坏。

(4) 无人机的电池容量及性能需进一步提高，以增加无人机的续航能力，提高巡检效率。

此外，为了有效巡检风电机组叶片的表面状况，叶片表面需尽可能保持清洁。☒

(作者单位：西安热工研究院有限公司)

# 降低风机发电成本， 使用穆格变桨系统。

# 降低风机停机时间

您是否知道，变桨系统是对风机停机次数和停机时间影响极大的关键部件？穆格变桨系统，提供更高的可靠性和更低的维护需求，帮助您减少风机停机时间，让风机发更多的电；这一切都体现于度电成本（LCOE）的降低！



欢迎下载《变桨系统平均可靠性水平研究报告》，了解如何采用先进的设计降低风机度电成本。

下载请至 [www.moogwind.com/56](http://www.moogwind.com/56)

YOUR PARTNER IN PITCH CONTROL

MOOG

# 数值模拟在风电场设计中的应用研究

文 | 丛明

风能资源是一种清洁的可再生能源，开展风能资源利用对促进社会经济可持续发展具有重要意义。为弄清楚某地区风能资源有没有利用价值，需要对该地区风能资源的储量进行科学的评估。风能资源状况的分析研究及风能资源的评估是风电机组选型、布置和发电量计算的基础，评估结果准确与否是风电场投资成败的关键，其结论的精度和可靠程度受风能资源数据质量及风能资源评估方法选取的影响很大。

目前，气象数值模型已经越来越广泛地应用到风能资源评估中，如WRF（Weather Research Forecast）、MM5、WEST（Wind Energy Simulation Toolkits）等，但主要是针对区域风能资源的整体评价。已有研究表明数值模拟可以较准确地模拟区域风能资源的分布趋势，发现气象站观测资料统计分析无法找到的风能资源；很多学者在不同地区利用数值模拟开展了风能资源评估方法的研究；另外，风电开发商和主要厂家也以数值模拟为基础开发了诸如格林威治、Free MESO等系统，以指导宏观选址和资源储备。

数值模拟技术不仅在前期规划中发挥重要作用，在风电场设计阶段也非常关键。在项目开发过程中补齐和延长数据序列最常用的方法是进行测量关联预测。风电场测风数据的测量关联预测（Measure Correlate Predict, MCP）是反映风电场风能长期平均水

平的主要技术手段，《风电场风能资源评估方法》（GB/T 18710-2002）将MCP称为数据订正，并规定了长期参考数据必须满足的条件。然而，实际工程中往往因为长期数据质量差、无法满足技术指标要求，而影响MCP分析结果。因此，很多学者采用了NCEP、MERRA等再分析数据研究如何补齐和延长风能资源序列。

本文以陕西定边某项目为依托，讨论利用数值模拟技术解决数据缺失、序列长度不够等问题，同时采用测风塔实测数据进行检验，讨论更有效的数据插补和代表年评估方法。

## 测风数据及模式介绍

### 一、测风情况介绍

本文依托的项目位于陕西省定边县，项目附近有三基测风塔（T01#、T02#和T03#），相对位置关系如图1所示，基本配置情况见表1。三基塔之间最远距离约24公里，最近距离约13公里，测风高度均为80米高度，同期测风数据自2010年7月至2011年9月。

### 二、数值模式介绍

本文中采用的中尺度模式为天气预报模式WRF，是由美国许多研究部门及大学的科学家共同参与开发研

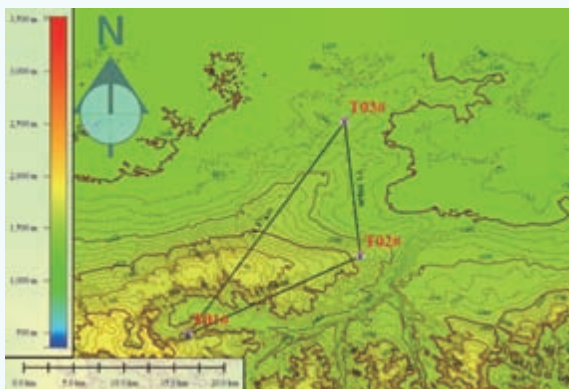


图1 三基测风塔的距离及相对位置关系示意

表1 三基测风塔风速及配置情况

塔号	海拔 (m)	平均风速 (m/s)	记录仪配置情况
T01#	1761	7.04	风速： 80A\80B\70\60\50\30\10； 风向：80\10
T02#	1581	6.47	
T03#	1445	5.73	

注：风速配置为10米-80米6层共7个风速仪；风向配置为10米和80米高度各一个风向标。

究的新一代中尺度预报模式和同化系统，为完全可压缩以及非静力模式，采用Fortran90语言编写，水平方向采用Arakawa-C网格点，垂直方向则采用地形跟随质量坐标。

模拟实验设计中采用三重嵌套，从最外层到最内层的水平分辨率分别为18公里、6公里和2公里；其中，微物理方案选择WSM6；边界层方案选择k闭合的YSU方案；积云对流参数化方案选择BMJ方案；长波和短波辐射方案分别选择RRTM和Dudhia方案，垂直分辨率设为44层。

数值模拟试验的结果可以提供三基测风塔相同位置处的80米高度自2010年7月1日—2011年9月30日（与实测同期）的逐10分钟风速序列。

## 测风数据插补及订正技术

在风电场设计过程中经常遇到风电场区内不仅单个测风塔的测风数据完整率低或者不合理，而且多台测风塔也存在着同期数据缺测或不合理等情况，而距离场区内最近的气象站所提供的气象数据往往与测风塔的数据相关性较差，不宜进行插补订正。

通过三基测风塔风速的相互推导和实测数据来检验模拟数据对测风塔插补的可靠性和合理性。假设T01#测风时间仅为半年（2010年7月1日—2010年12月31日），利用同期的T01#位置处的模拟结果进行数据插补和平均风速推算。同时，利用T02#和T03#在2010年7月1日—2010年12月31日的的数据对T01#自2011年1月—2011年9月的数据进行插补和平均风速推算，将结果与实际风速对比。三基测风塔各自进行相同模式的试验。

在通常的风能资源评估中，数据

插补和订正的方法主要有两种，按16个风向象限分别进行相关性分析及风速订正，称之为16扇区法；也有不分风向象限直接进行相关性分析及风速订正，这种方法称为全范围法。经过对比，在参考序列与待插补序列同期相关性较高的情况下，16扇区法与全

范围法的结果比较接近，本文采用全范围法进行数据订正。

测风塔T01#与T02#、T03#同期风速序列的相关系数分别为0.96和0.92，T02#与T03#的相关系数为0.93，三基测风塔的模拟风速序列与同期实测风速的相关系数分别为0.89、0.88和

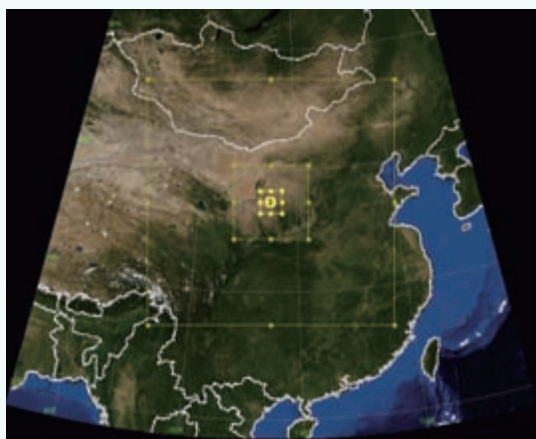


图2 模拟区域及模式三重嵌套范围

表2 基于T01#的不同推算方式的结果比较

塔号	相关系数 R	推算风速( m/s)	与实测风速差 ( m/s)	相对误差
T01# 实测风速		7.04		
T02# 推算 T01#	0.96	7.11	0.07	1.0%
T03# 推算 T01#	0.92	7.32	0.28	4.0%
模拟结果推算 T01#	0.89	7.20	0.16	2.3%

表3 基于T02#的不同推算方式的结果比较

塔号	相关系数 R	推算风速( m/s)	与实测风速差 ( m/s)	相对误差
T02# 实测风速		6.47		
T01# 推算 T02#	0.96	6.42	0.05	0.8%
T03# 推算 T02#	0.93	6.63	0.16	2.5%
模拟结果推算 T02#	0.88	6.54	0.07	1.1%

表4 基于T03#的不同推算方式的结果比较

塔号	相关系数 R	推算风速( m/s)	与实测风速差 ( m/s)	相对误差
T03# 实测风速		5.73		
T01# 推算 T03#	0.92	5.57	-0.16	-2.8%
T02# 推算 T03#	0.93	5.62	-0.11	-1.9%
模拟结果推算 T03#	0.86	5.52	-0.21	-3.7%



0.86，上述所有序列之间的相关关系全部超过了99.9%的信度检验，全部存在显著正相关关系。

在风速的修正结果中，T01#与T02#相互推算的风速最为接近，平均风速差为0.06m/s，相对误差均低于1%；T01#和T03#相互推算的风速平均差值为0.22m/s，相对误差分别是4%和-2.8%；T02#和T03#相互推算的结果位于前两组之间，平均风速差值约为0.14m/s，相对误差都在2.5%以下；模拟结果对三基测风塔风速推算所得的风速差值分别是0.16m/s、0.07m/s和-0.21m/s，相对误差最大为-3.7%，最小仅为1.1%。

三组试验的结果表明，中尺度WRF模式导出的数据与测风塔相关性很好，修正后的风速差值与误差均在可接受范围之内，在风电场单个测风塔数据完整率低或不合理，或者场区内有多个测风塔但是同期数据缺测的情况下，利用数值模拟数据对测风数据进行插补和订正是合理且可靠的。

### 风速的代表年修正方法

在风能资源评估中，当地气象站具备以下条件才可将风电场短期数据订正为长期数据：同期测风结果的相关性较好、具有30年以上规范的测风记录、与风电场具有相似的地形条件以及距风电场比较近。由于风电场场址一般距城镇较远，而气象站大多数位于城镇近郊，两者之间的地理位置距离较远，地表环境也有一定程度的差别，导致气象站数据和风电场内测风数据的相关性受到削弱。所以，当前国内很多设计院主要采用基于再分析数据的方法评估项目代表年情况。

本文以美国国家环境预报中心和

大气科学研究中心的NCEP/NCAR再分析数据（水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ）、欧洲中期天气预报中心的ECMWF再分析数据（水平分辨率为 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ ）、中尺度WRF模式输出结果三种数据为例，比较和讨论风电场代表年风速的订正方法。

三种数据与测风塔实测数据的相关关系中（图3、图4、图5），NCEP/NCAR数据相关性最差，相关系数不足0.7；数值模拟结果相关性最好，相关系数接近0.97；EC数据位于二者之间，相关系数约为0.92。结果表明，利用NCEP/NCAR再分析数据判断风电场

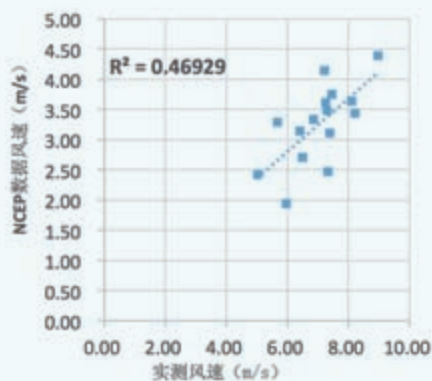


图3 测风塔T01#实测风速与NCEP/NCAR数据风速的相关关系

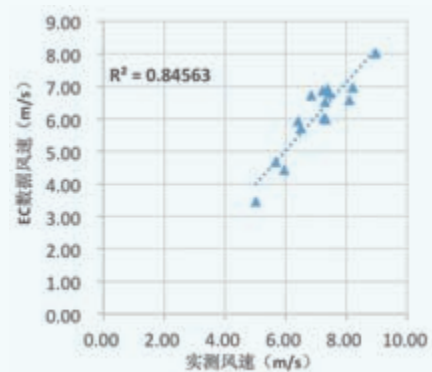


图4 测风塔T01#实测风速与EC数据风速的相关关系

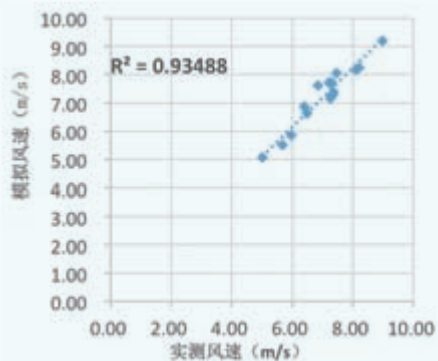


图5 测风塔T01#实测风速与模拟风速的相关关系



图6 测风塔T01#在80米高度近30年风速变化情况

代表年的可靠性较低，利用EC数据评估代表年的方法是可行的，但利用中尺度WRF模式输出数据进行代表年订正的方法是最可靠的。使用数值模拟结果对测风塔T01#自1984年至2013年的平均风速进行了订正，得到测风塔

30年来的风速变化情况（图6）。

## 结论

深入研究中尺度数值模拟技术在风能资源评估中的应用方法，可以

解决诸多风电开发过程中的难题，将提高风能资源评估的效率和准确性，为风电行业的健康发展提供强有力的保障。

本文以陕西定边项目为依托，参考三基测风塔的完整数据，讨论如何应用数值模拟技术解决具体项目的风速评估难题。得出的主要结论：

（1）在项目单个测风塔的数据完整率低或不合理，或者区域内多个测风塔同期观测数据完整率低或不合理的情况下，中尺度模式计算结果完全可以代替高质量测风塔，对缺测或不合理数据进行插补订正，保证数据质量达到评估要求。

（2）通常气象站数据与风电场内的测风数据相关性很差，此时可采用高质量的再分析数据辅助判断代表年风速，但利用中尺度模式的结果进行代表年订正是效果相对最好的，也是与实际最接近的。❏

（作者单位：中能电力科技开发有限公司）



摄影：陈裕法

# 叶片故障时风力发电机组瞬态受力特性分析\*

文 | 何建武, 刘超, 张正川, 张洪磊, 汪冬冬

由于风力发电机组风轮复杂的三维非定常运动, 叶片旋转产生时变载荷, 从而对结构产生时变激励, 这对风力发电机组结构强度有重要影响, 而且在某些故障情况下叶片载荷随时间的波动可能会更加剧烈, 甚至引起整个结构的破坏, 所以有必要对风力发电机组叶片瞬态受力特性及瞬态结构强度进行研究。

在距叶尖三分之一叶长的地方发生断裂是小型离网型风力发电机组常见的叶片断裂情况之一, 特别是在内蒙古地区, 由于各种原因, 故障发生后机组常有带故障运行的情况发生, 严重时甚至会造成机组的整体结构破坏, 但是未到检修期, 故障问题一般难以及时发现并处理。为降低这种常见的叶片断裂故障造成的风力发电机组损坏程度、减小经济损失, 有必要在风力发电机组设计初期确定出带故障运行时的结构易受损区域, 以进行合理加固。本文针对额定风速下叶片完好、距叶尖三分之一处断裂两种情况, 基于单向流固耦合方法, 将流场瞬态数值模拟得到的载荷数据进行传递, 对风力发电机组结构进行瞬态动力学及结构强度分析, 确定出叶片断裂情况下的大应力应变区, 为结构的合理优化、故障诊断分析提供一定的参考。

## 三维模型

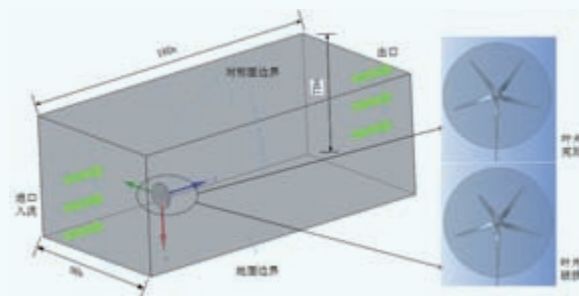
本文以国产 HY-1000/48 小型水平轴风力发电机组为研究对象, 其基本参数为: 额定转速 750rpm, 额定功率 1000W, 启动风速 2.5m/s、切入风速 3.0m/s、额定风速 12m/s、最大承受风速 50m/s, 风轮直径 1.75m, 叶片数量 5 片, 整机重量 28kg。针对叶片完好、某一叶片距叶尖三分之一处断裂两种情况, 利用 SolidWorks 软件分别建立三维模型,

并以轮毂与叶片连接处的轴心(风轮中心)作为原点建立计算坐标系, 采用施加合力的方式对轴施加载荷, 所以在固体结构计算中省去叶片。简化后的流体、固体计算域三维模型如图 1 所示。

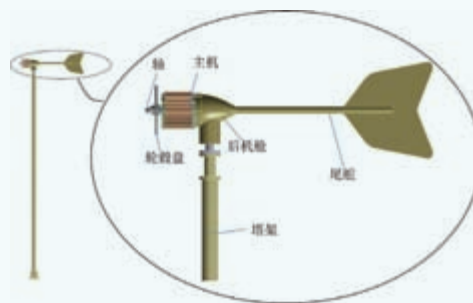
## 网格划分和边界条件设置

### 一、网格划分

由于叶片扭曲, 机舱和塔架形状不规则, 为保证数值



(a) 流体计算域



(b) 固体计算域

图1 风力发电机组三维模型

\*基金项目: 上海市青浦区产学研合作发展资金项目(青产学研 2015-23)

模拟的准确性，需要对固壁边界层进行加密处理以尽量保证  $y^+$  要求，网格划分采用非结构网格，叶片边界层采用 5 层棱柱网格，其余流场采用四面体网格。为验证网格无关性，对完好叶片风力发电机组设计五套网格，进行稳态 (steady) 计算，统计各套网格下风轮输出功率，如表 1 所示，比较发现，网格四和网格五相差不到 2%，则网格满足无关性要求。为节约计算资源，取网格四为计算网格，最终划分结果如图 2 所示。完好叶片和断裂叶片状态都采用相同的网格划分设置，以保证网格对计算的影响最小。固体采用非结构网格进行划分，最终网格节点数为 452589，网格单元总数为 211245。划分结果如图 2 所示。

## 二、边界条件及相关设置

采用 CFX 软件进行流场数值计算，为保证计算结果的收敛性，以稳态计算结果作为瞬态计算的初始条件。分别对叶片完好、叶片断裂情况下的流场进行数值计算。

稳态计算：进口给定速度值为 12m/s，湍流强度 10%；旋转域转轴为 Z 轴，旋转速度 750rpm；出口设定为自由出流，给定静压值为一个标准大气压；将地面设置为无滑移壁面，其余面设为对称面；湍流模型选择  $k-\omega$  SST 模型；转动和非转动交界面采用冻结转子模型 (Frozen Rotor)；时间步长设为 0.0016s；设定收敛残差小于  $1e-4$ ；最大收敛步长设为 5000。

表1 网格无关性验证

	节点	单元	风轮输出功率 (W)
网格一	684401	3618061	756
网格二	778974	4156370	798
网格三	821988	4629222	869
网格四	945873	5594607	942
网格五	1107464	6453789	944

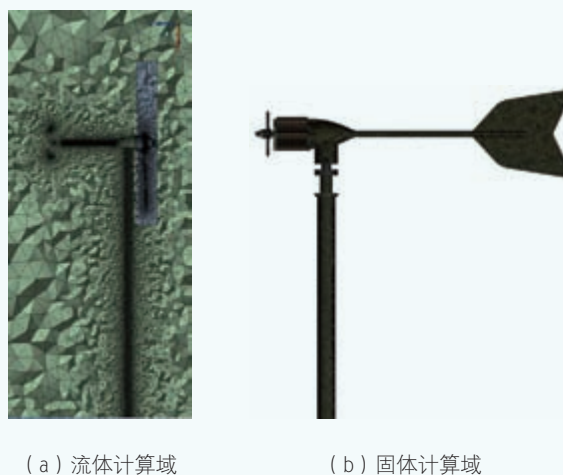


图2 网格划分结果



摄影：吴振华

瞬态计算：进出口条件、壁面设置等与稳态计算相同；转动和非转动交界面采用瞬态动静干涉模型（Transient Rotor Stator）；瞬态计算时间总长为 1.6s（20 圈），时间步长设为 0.0016s，每个迭代步最少计算 3 次，最多计算 10 次；收敛残差小于  $1e-4$ 。

采用 ANSYS 软件瞬态结构计算模块进行风力发电机组结构受力计算。风力发电机组塔架、尾翼材料为 45# 钢，发电机轴为 40 铬，机舱外壳材料为铝合金。对于风力发电机组，除受风载荷外，还受到自身重力和底座的固定支撑作用。计算总时间取 0.8s（10 圈），载荷时间步长设置为 0.0016s，从流场中提取两种状态下 0.8s 到 1.6s 的面载荷分别施加于固体对应面上。

## 计算结果分析

### 一、流场计算结果分析

空气流经叶轮旋转区域时，由于空气和叶片的相互作用，叶片获得来自空气的能量，同时叶片作为阻碍体，对流场有严重干扰，因此，要比较叶片断裂对流场的影响，必须从叶轮旋转区域入手。以图 3 作为初始状态，过叶轮旋转中心分别作垂直于 Y、Z 轴的截面  $Y = 0$ 、 $Z = 0$ ，将其作为流场分析截面，如图 4 所示，并选取两种情况下风轮旋转一圈 5 个典型位置（叶片每旋转  $72^\circ$ ）的流场进行比较，以分析不同叶片旋转位置下的流场特性。

#### （一） $Z = 0$ 截面压力分布

图 5 是  $Z = 0$  截面不同时刻的静压力分布，该截面通过叶轮旋转中心并穿过叶片，从静压力云图可以看到，叶片表面附近压力较低，且叶尖附近有压力极小值。而叶片断裂情况下，由于断裂叶片缺少叶尖部分，所以没有明显的压力极小值出现。

#### （二） $Y = 0$ 截面速度分布

$Y = 0$  截面平行于塔架并经过叶轮旋转中心，所以该截面的速度分布可以反映经过叶轮后流场的受扰动情况。图 6 是  $Y = 0$  截面不同时刻的速度分布，可以看到两种情况下截面速度分布整体上是—致的。分别截取两种叶片状态下不同时刻的叶片速度矢量，如图 7 所示，可以看到叶片完好情况下叶尖附近有速度极大值，叶片断裂情况下断裂的叶尖部分速度值明显减小。

#### （三）叶片受力情况

为分析叶片在流场中的受力情况，在 CFX 求解器中设



图3 初始时刻两种风轮状态

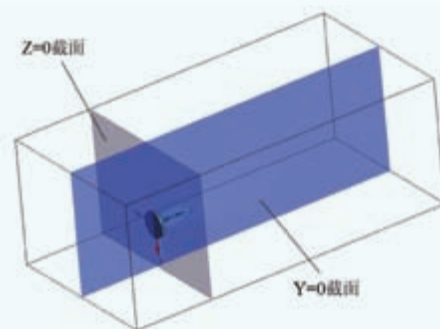


图4 流场分析截面示意图

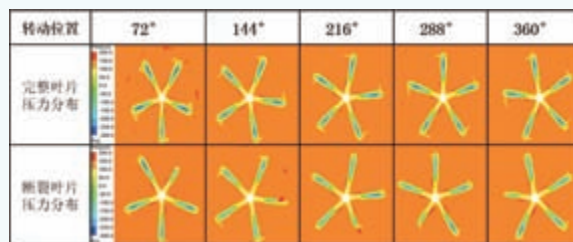


图5  $Z=0$ 截面静压力云图

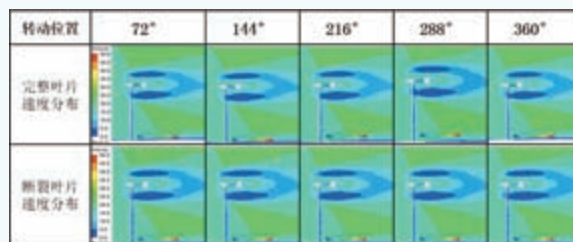


图6  $Y=0$ 截面速度分布

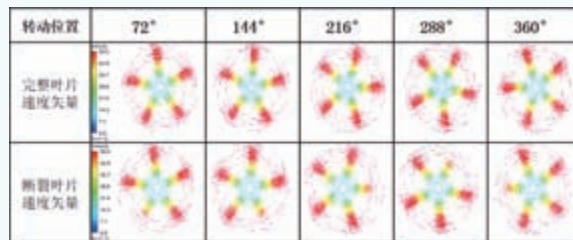


图7 两种情况下叶片速度矢量

置监控点,以全面监测所有叶片在X、Y、Z方向上合力和合力矩的变化情况。图8给出了0.5s(6.25圈)内两种情况下所有叶片X、Y、Z三个方向所受合力情况。可以看到,在叶片完好情况下,X、Y方向受力在-1N到1N间波动,Z方向受力大小在280N附近波动,波幅较小。叶片断裂情况下,X、Y方向受力在-3N到3N间波动,Z方向受力大小在250N附近波动,波幅较叶片完好情况下的大。图9是0.5s内两种情况所有叶片X、Y、Z三个方向所受力矩情况。叶片完好情况下,X、Y方向力矩在-5N·m到5N·m之间波动,Z轴力矩值在12N·m附近波动。叶片断裂情况下,X、Y方向力矩值在-25N·m到25N·m之间波动,Z轴力矩值在13.5N·m附近波动。

出现这种现象的主要是X轴、Y轴、Z轴的合力矩分别由YZ方向、XZ方向、XY方向合力决定,叶片断裂时叶轮沿Z向的受力面积减小,而周向受力偏离轴心,最终造成Z向受力减小,X方向、Y方向合力波动幅度增大,对应的X轴、Y轴、Z轴力矩波动幅度也随之增大。

## 二、瞬态结构计算结果分析

采用工程中常用的第四强度理论,即 Von Mises 屈服条

件进行强度分析。由图8、图9可以看到叶片受力具有明显的周期性,为寻找瞬时最大应力出现部位,只需分析旋转一圈内的受力情况则可,因此,对旋转一圈内的几个典型时刻,如1.51s、1.53s、1.55s、1.57s时刻的结构应力分布进行分析。图10是叶片完好情况下不同时刻等效结构应力云图,如图所示,最大应力出现在塔架底部,轴上也有较大应力分布,其余部位应力较小。图11是叶片断裂情况下不同时刻等效结构应力云图,可以看到,最大应力也出现在塔架底部,应力值大小较叶片完好情况明显增大,并且轴、尾舵等部位应力也有增大。

从图10、11可看出,一段时间内,在轴或塔架底部出现应力集中,为研究应力集中部位随时间的应力应变情况,在轴和塔架底部表面各取一监测点,如图12所示,由于旋转的周期性,只需对叶轮旋转一圈的时间内(取1.5s到1.58s)随时间变化的等效应力应变进行提取则可,如图13、14所示。从图中可以看出叶片完好情况下,一个旋转周期内,塔架底部监测点的应力应变随时间的波动程度大于轴监测点,但差距不大;叶片断裂情况下,一个旋转周期内,塔架底部监测点和轴监测点的应力应变随时间的波动程度都

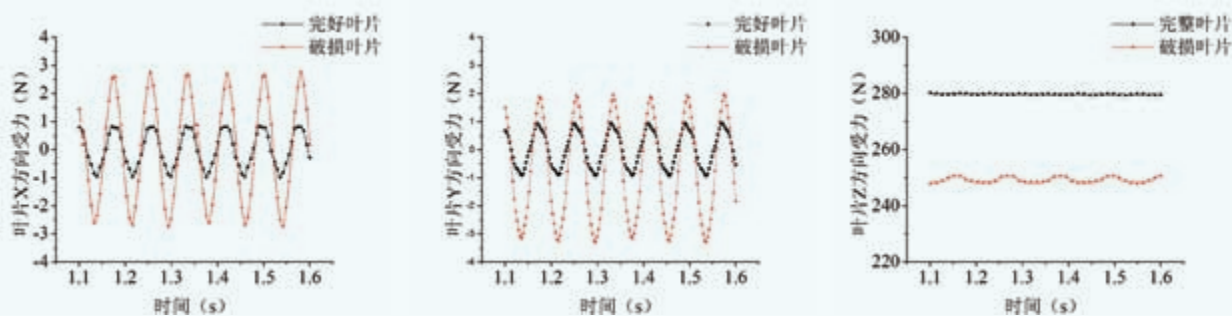


图8 叶片0.5s内受力变化情况

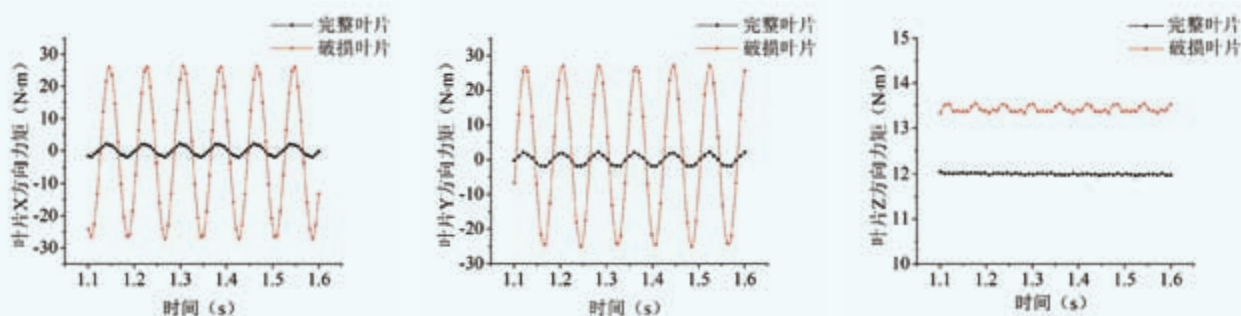


图9 叶片0.5s内力矩变化情况

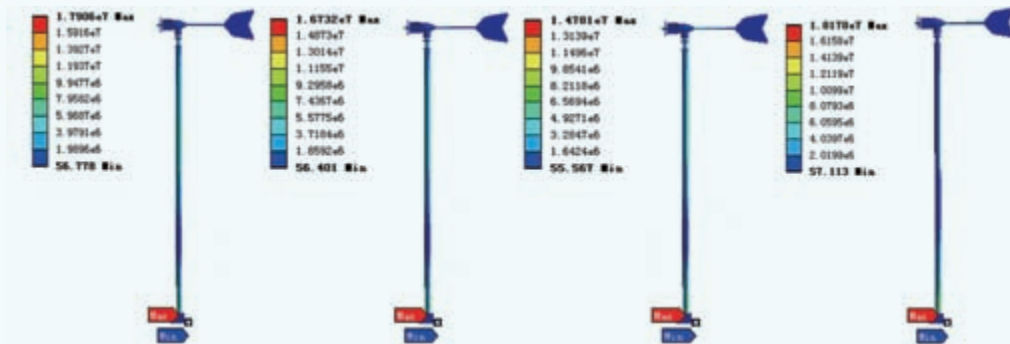


图10 叶片完好情况应力分布云图 ( 1.51s、1.53s、1.55s、1.57s )

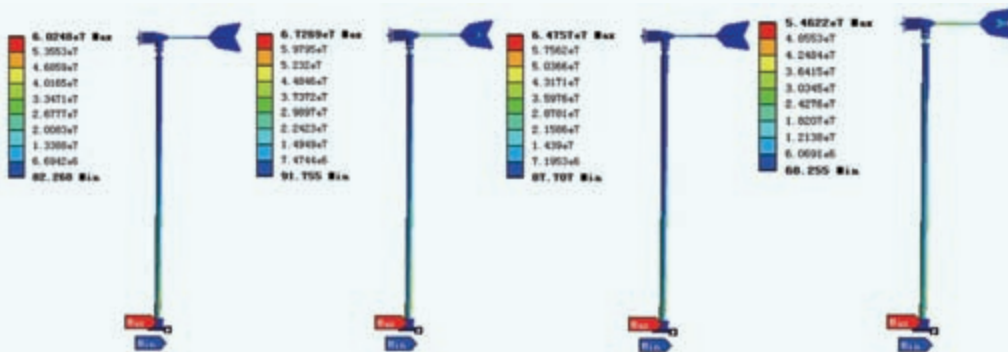


图11 叶片断裂情况下应力分布云图 ( 1.51s、1.53s、1.55s、1.57s )

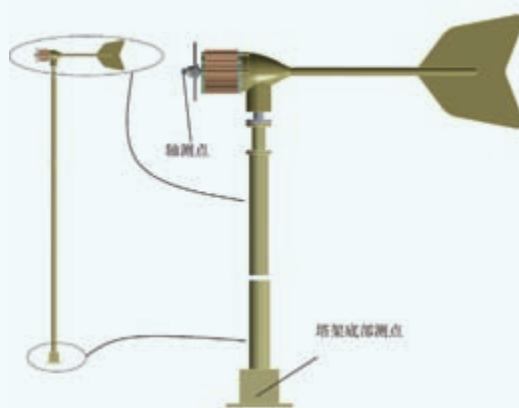


图12 监测点示意图



图13 监测点0.08s内应力



图14 监测点0.08s内应变

被放大，其中塔架底部监测点的波动程度明显大于轴监测点，最大应力增幅达 45Mpa；塔架底部监测点和轴监测点的最小应力值差距较小，为 12Mpa 左右，但最大应力值差距较大，达到了 30Mpa 左右。因此，对于出现大应力应变的塔架底部区域，应对塔架底部采取一定的优化、加固措施，以保证整体结构强度，并在运行过程中加强对该区域的故障监测。

## 结论

本文以某小型水平轴风力发电机组为对象，建立叶片完好和距叶尖三分之一处断裂两种情况的风力发电机组流体、固体计算域三维模型，分别进行流场数值计算，并基于单向流固耦合，分别将提取流场数值计算得到的瞬态载荷，

施加于固体结构，进行两种情况下的瞬态结构计算，得到以下结论：

(1) 叶片叶尖处断裂会对流场产生扰动，相较于完好叶片，断裂的叶尖压力值有所增大，速度值明显减小，风轮水平和竖直方向的力和力矩随时间波动幅度增大，轴向力有所减小，轴向力矩稍有增大。

(2) 利用第四强度理论进行强度分析，结果发现，一个旋转周期内，叶片断裂情况下：塔架底部和轴的最大应力应变值不同程度地增大；塔架底部和轴的应力应变随时间的波动程度都被放大，塔架底部的波动程度明显大于轴；虽然塔架底部和轴的最小应力值几乎相等，但塔架底部的最大应力值几乎是轴的两倍。因此，应对塔架底部采取合理优化、加固措施，以保证结构强度。■

(作者单位：上海市应用数学和力学研究所)



# 基于MATLAB的齿轮箱油路模拟计算

文 | 陈晓爱, 王晓东

在通用工业齿轮箱设计中, 润滑油路的计算更多源自经验; 但对于高可靠性要求的风电齿轮箱而言, 润滑油路的精确计算是必不可少的, 实际经验表明, 理论计算的难度和工作量都比较大, 借助软件计算相对精确且所需时间较少; 可进行流体计算的大部分软件, 如Fluent、Abaqus有限元软件等, 因需要完成立体建模、划分网格等耗时耗力的工作, 从时间上来说并不经济, 因此本文采用以数学模型计算的软件MATLAB (版本R2010b) 为例进行油路模拟计算的探讨。

MATLAB是MathWorks公司出品的商业数学软件。Simulink模块是MATLAB最重要的组件之一, 利用该模块可以很方便地实现可视化仿真, 并且无需完成立体建模和网格划分, 只需要完成框架化的数学模型搭建即可。本文借助此模块搭建两个简单的油路模型, 并与人工理论计算进行比较; 在此基础上, 计算一个具体的工程案例, 利用试验测得的结果, 验证此计算模块的应用性。

## 模拟计算的基础条件

计算前, 先要明确一些计算条件。在油泵工作稳定、温度达到平衡的情况下, 整个风电齿轮箱的油路中润滑油的流动属于定常流动。

风电齿轮箱常用润滑油为VG320, 密度约为 $800\text{kg}/\text{m}^3$ , 齿轮箱油温 $60^\circ\text{C}$ 时, 运动粘度 $\nu$ 约为 $110\text{mm}^2/\text{s}$ , 整个油路的高度差一般不超过 $0.5\text{m}$ , 重力造成的最大压力差 $=\rho gh=3920\text{Pa}=0.00392\text{MPa}$ , 而油路最小的油压 $\Delta P_{\min}\geq 0.1\text{MPa}$ , 重力对油路的影响远不如油压; 为了简化计算过程, 忽略进出口以及各支路的高度差。

## 理论计算和软件计算的比较

在以上基础情况下, 油路计算时会碰到两种压力损失形式, 即沿程压力损失和局部压力损失。以下对两种损失

形式理论计算和软件计算的结果进行比较分析。

### 一、沿程压力损失的计算比较

假设整个油路都是细长管路, 无弯管、阀口等, 这样仅需计算沿程压力损失。根据《液压与气压传动》(华中科技大学出版社第三版), 光滑的金属圆管临界雷诺数 $Re_{cr}=2320$ ; 根据ISO/TR 18792 Lubrication Of Industrial Gear Drives, 直管中的油流速度 $v$ 推荐不超过 $3\text{m}/\text{s}$ 。那么以管径 $d=10\text{mm}$ 为例, 直管油路的雷诺数 $Re$ 为:

$$Re = vd/\nu = 3\text{m}/\text{s} \times 10\text{mm}/110\text{mm}^2/\text{s} = 272.73 \ll 2320$$

因此, 风电齿轮箱直管油路可以按层流计算。现通过简单地对比计算来说明建模计算过程:

#### (一) 理论计算

例1: 按总流量 $Q=100\text{L}/\text{min}$ , 动力粘度 $\mu=110 \times 10^{-6} \times 800 = 8.8 \times 10^{-2}\text{Pa}\cdot\text{s}$ , 第一支路 $d_1=10\text{mm}$ 、 $L_1=100\text{mm}$ , 第二支路 $d_2=15\text{mm}$ 、 $L_2=400\text{mm}$ ;

假设两支路为层流, 则总流量:

$$Q = q_1 + q_2 = \left( \frac{\pi d_1^4}{128\mu L_1} + \frac{\pi d_2^4}{128\mu L_2} \right) \times \Delta P$$

$d$ 为油管直径,  $\mu$ 为润滑油动力粘度,  $L$ 为油管长度,

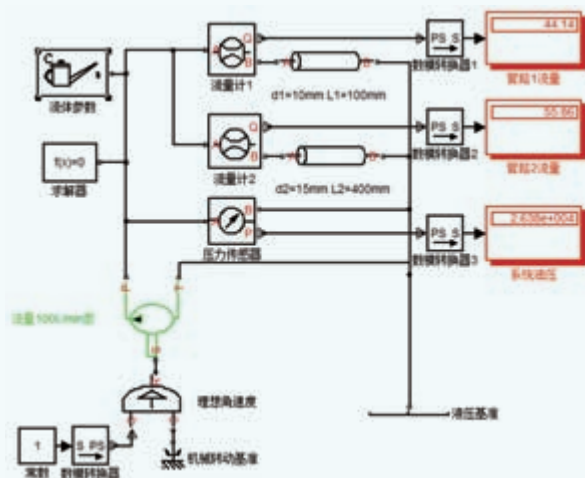


图1 例1在Simulink中的计算模型图

$\Delta P$ 为入口和各出口的压力差（因忽略各支路的高度差，因此这里各支路 $\Delta P$ 相同）。

计算可得： $\Delta P = 2.64 \times 10^4 \text{Pa}$ ， $q_1 = 44.14 \text{L/min}$ ， $q_2 = 55.86 \text{L/min}$

经比较，两支路的雷诺数 $Re$ 均小于临界雷诺数 $Re_{cr}$ ，属于层流，因此计算结束，不需要复杂的迭代计算。

## （二）软件计算

Simulink中建模过程：（1）常数1经数模转换器变为1rad/min；（2）经理想角速度变换，参考转速为零的机械转动基准，形成100L/min泵的输入；（3）100L/min泵分成两个管路 $d_1$ 和 $d_2$ 完成油路循环；（4）油路中加入流体参数、求解器；（5）各管路中加入流量计，经数模转换输出流量值，其中主管路加入压力表，同样经数模转换，输出油压值。

从Simulink的计算结果来看，其结果和理论计算完全一致。

此模型比较简单，如果同一支路中管路直径发生变化，理论计算的方法是用公式  $q = \frac{\pi d^4}{128 \mu L} \times \Delta P$  把不同直径的管路转化为同一直径的等效长度代入计算。

需要注意以下两点：

（1）Simulink的模拟中，因关注的是定流量下管路的流量分配，故设泵的体积效率和总效率为1，即100%。

（2）如果直管中的实际雷诺数 $Re$ 超过临界雷诺数 $Re_{cr}$ （风电齿轮箱行业很少见），理论计算的难度会非常大，需要借助莫迪图做迭代计算，软件计算的优势会非常明显；不过本行业中的直管流动一般都是层流，因此本文对此不作更多说明。

## 二、局部压力损失的比较

### （一）理论计算

相对于沿程压力损失，由于造成局部压力损失的结构多种多样，局部压力损失的计算要相对复杂得多，这里举油路计算中最常见的两种类型：薄壁小孔和90°弯管。

例2：按总流量  $Q = 100 \text{L/min}$ ，运动粘度  $\mu = 110 \times 10^{-6} \times 800 = 8.8 \times 10^{-2} \text{Pa}\cdot\text{s}$ ，第一支路  $d_1 = 20 \text{mm}$ 、 $L_1 = 100 \text{mm}$ ，第二支路  $d_2 = 20 \text{mm}$ 、 $L_2 = 100 \text{mm}$ ，同时第一支路有一个20mm的90°弯管，其弯曲半径 $r$ 为60mm，第二支路有一个直径为4mm节流孔；

（1）对薄壁小孔，液压教材中的公式见下：

$$q = C_d \times A \times \sqrt{\frac{2}{\rho} \times \Delta P}$$

其实此公式有一个隐含的应用条件，即雷诺数 $Re > Re_{cr}$ （临界雷诺数），达到紊流状态；如为层流状态，计算公式反而不同，详细见MATLAB的“Fixed Orifice”帮助条目。

为此首先要确定薄壁小孔的临界雷诺数，MATLAB给出建议值为12，但各教材和手册中未给出具体值。

薄壁小孔和锥阀阀口结构接近，临界雷诺数 $Re_{cr}$ 处于20—100的范围（表1）；在实际 $Re$ 明显大于此范围的情况下，具体取值可取MATLAB推荐值12，也可取锥阀阀口的平均值60。

另外公式中 $C_d$ 为小孔流量系数，液流不完全收缩时， $C_d \approx 0.7 - 0.8$ ，这里取0.7。

（2）对90°弯管的局部损失，液压教材中的公式见下：

$$\Delta p = \zeta \times \frac{\rho v^2}{2}$$

根据《液压流体力学》（国防工业出版社），局部损失系数 $\zeta$ 按流态的不同分为层流区、光滑管区、阻力平方区，这几个区域里 $\zeta$ 的取值也不相同，但在层流区和光滑管区的取值均需靠实验确定，无实用意义；实际上流体流经局部障碍时， $Re$ 很小就可以使局部损失系数进入阻力平方区，此时， $\zeta$ 只决定于局部障碍的结构形式，相关的液压手册上列出的 $\zeta$ 值实际上是阻力平方区的 $\zeta$ 值。

MATLAB则对此问题作了简化，仅把流态分为层流区和紊流区，紊流区的计算和上述一致；关于层流区的计算，MATLAB在上述公式中增加了系数： $Re_{cr}/Re$ 。为使计

表1 常见液流管道的临界雷诺数

管道	临界雷诺数 $Re_{cr}$	管道	临界雷诺数 $Re_{cr}$
光滑金属圆管	2320	带环槽的同心环状缝隙	700
橡胶软管	1600—2000	带环槽的偏心环状缝隙	400
光滑的同心环状缝隙	1100	圆柱形滑阀阀口	260
光滑的偏心环状缝隙	1000	锥阀阀口	20—100

注：引自《液压与气压传动》（华中科技大学出版社第三版）。

算结果更符合实际情况，对于90°弯管的临界雷诺数，取值应尽量在实际雷诺数之下（推荐小于200），并把紊流作为流体流态。

参考《Flow of Fluids Through Valves, Fittings and Pipe TP-410M》（[美]CRANE工程部 编）附件A-26，局部损失系数ζ即此文献中的K（r为弯曲半径，d为油管直径，见图2）取值如表2所示。

其中fT可按上述参考文献的列表取值，见表3。也可按上述参考文献中的公式计算：

$$fT = \frac{0.25}{\left[1g\left(\frac{\epsilon/d}{3.7}\right)\right]^2}$$

式中的ε代表管壁的粗糙度；需要注意的是：在MATLAB中ε采用了固定值，即全部为洁净商业用钢管的管壁粗糙度0.05mm。

可计算如下：

$$\Delta P = q_1 \times \frac{128\mu(L_1 + 0.5\pi r)}{\pi d_1^4} + \zeta \times \frac{\rho v^2}{2}$$

$$\Delta P = q_2 \times \frac{128\mu L_2}{\pi d_2^4} + \frac{\rho}{2} \times \left(\frac{q_2}{C_d \times A_d}\right)^2$$

由 $q_1 + q_2 = 100L/min$ ，解此二元二次方程组可得：

$$\Delta P = 1.026 \times 10^4 Pa, q_1 = 97.33L/min, q_2 = 2.66L/min$$

（二）软件计算

在MATLAB中建立的模型与计算结果如图3所示。

可知模型的计算结果和理论计算非常接近。需要注意的是无论是理论计算还是在MATLAB中模拟，局部损失的计算都很难与实际情况完全一致，因为在此类计算中，难以考虑到相邻局部损失之间的干扰：在相邻局部损失之间距离较小的情况下（通常为直管直径的20倍），两个局部损失之间有相互的扰动，计算结果往往比实际情况理想。

设计实例

以上计算演示了油路计算的基本类型，在管路复杂的

表2 90°弯管和法兰或对焊连接90°弯头的阻力系数

r/d	K	r/d	K
1	20fT	8	24fT
1.5	14fT	10	30fT
2	12fT	12	34fT
3	12fT	14	38fT
4	14fT	16	42fT
6	17fT	20	50fT

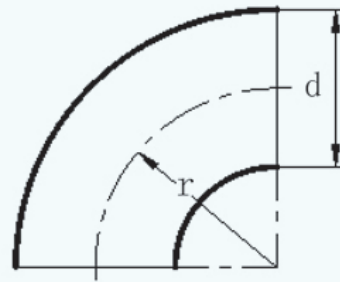


图2 弯曲半径

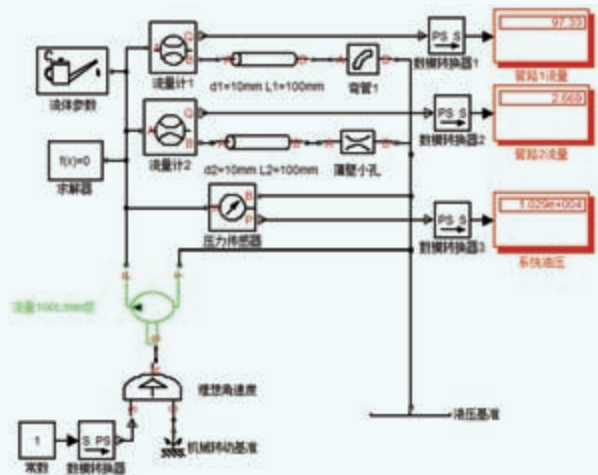


图3 例2在Simulink中的计算模型图

表3 洁净的商用钢管在全紊流区的摩擦系数

公称直径	mm	15	20	25	32	40	50	65, 80	100	125	150	200,250	300-400	450-600
	in	1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2, 3	4	5	6	8, 10	12-16	18-24
摩擦系数 /fT		0.027	0.025	0.023	0.022	0.021	0.019	0.018	0.017	0.016	0.015	0.014	0.013	0.012

情况下，理论计算几乎是不可能的，MATLAB的使用简化了计算工作量。

工程中，如果要得到齿轮箱润滑流量的精确结果，可以在齿轮箱装配完毕后，在管路中接入各类电磁/超声流量传感器；不过由于成本高以及装配后不便于调整，很少使用这种测试方法。通常做法是仅装配必要的壳体、管路和相关的润滑系统部件等，通入一定温度的润滑油后测量各个润滑点的油量，并与设计值比较，以此来调整各个润滑点的油量大小。

针对某兆瓦级一级行星两级平行轴结构的风电齿轮箱，首先使用Simulink模拟计算流量（图5），然后按图4所示的装配形式实测了各润滑点的流量，将两者进行对比，来验证Simulink的计算结果。图5为软件中模拟计算的结果，表4为模拟计算和实际测量的结果对比。

对图5所示管路作简要说明。

系统总流量 $Q=105\text{L}/\text{min}$ ，动力粘度 $\mu=110\times 10^{-6}\times 800=8.8\times 10^{-2}\text{Pa}\cdot\text{s}$ ，共有15个位置的润滑点（部分位置8、13、15润滑点分为2个）；其中：

位置1和位置3在三通1处分开，分别流经各自的直管、弯头、弯管、小孔后达到润滑位置；

位置2和位置4在三通2处分开，分别流经各自的直管、弯头、弯管、小孔后达到润滑位置；

位置5、6、11、12单独流经各自的直管、弯头、弯管、小孔后达到润滑位置；

位置7、9、10流经共同的直管、弯头、弯管部分



图4 左图，测试流量时装配情况示意图；右图，油管三维模型

表4 试验和Simulink软件计算结果对比

润滑点		实际测量值 (L/min)	软件计算值 (L/min)	误差百分比
位置 1	高速轴转子侧轴承	5.7	5.87	2.98%
位置 2	高速轴电机侧轴承	6.2	6.418	3.52%
位置 3	中间轴转子侧轴承	4.1	4.072	-0.68%
位置 4	中间轴电机侧轴承	4.8	4.945	3.02%
位置 5	低速轴转子侧轴承	3.9	4.11	5.38%
位置 6	低速轴电机侧轴承	4.0	4.182	4.55%
位置 7	行星架转子侧轴承	4.6	4.743	3.11%
位置 8	行星架电机侧轴承	5.6	5.896	5.29%
位置 9	齿圈转子侧	5.5	5.611	2.02%
位置 10	齿圈电机侧	5.5	5.715	3.91%
位置 11	高速级啮合	14.7	14.97	1.84%
位置 12	高速中间级啮合	11.2	11.57	3.30%
位置 13	太阳轴花键	3.4	3.15	-7.35%
位置 14	太阳轮啮合	7.6	7.956	4.68%
位置 15	行星轮轴承	15.1	15.74	4.24%
试验中流量损失 (L/min)		3.1		
总流量 (L/min)		105		
压力 (bar)		1.75	1.828	4.45%

注：因测量误差和少量的泄漏，测量的总流量有少许损失。

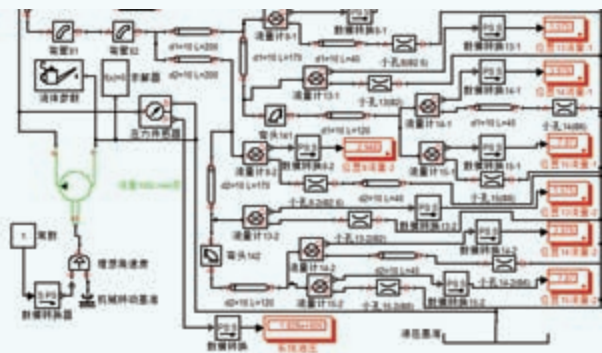


图5 某兆瓦级齿轮箱油路在Simulink中的计算模型图

后，分别流经各自的直管、弯头、弯管、小孔后达到润滑位置；

其余位置均流经共同的直管、弯头、弯管部分后，分别流经各自的直管、弯头、弯管、小孔后达到润滑位置。整个管路在模拟计算中无泄漏。

由表4可看出，大部分润滑点油量误差在 $\pm 5\%$ 以内，只有少数流量较低的支路结果大于 $5\%$ ，油压的计算结果相比测量结果略高。考虑到测量误差和相邻局部损失之间的干扰，这样的结果对风电齿轮箱的油路计算已经足够。

### 结语

结合以上计算与应用实例可知，与人工理论计算相比，采用MATLAB模拟计算风电齿轮箱的油路，准确度高，不再依赖个人经验，尤其在新设计、无类似油路设计经验的情况下，非常有效；对比其他流体计算软件如Fluent、Abaqus等，只需要搭建框架化的数学模型，不需要做复杂的立体建模、划分网格、后处理等工作，因此总的计算时间较少。可以说，MATLAB的油路模拟计算同时具备了准确性高和工作量少的特点，非常值得在实际工作中推广应用。

(作者单位：陈晓爱：苏州吾纳德传动技术有限公司；王晓东：新疆金风科技股份有限公司)



摄影：王志远



无惧严酷运行环境，  
值得信赖的 5MW 海上风电机组控制系统已经批量上线！

风为我控  
引领未来

更多详情，请访问 [www.kekaiqianwei.com](http://www.kekaiqianwei.com)

地址：重庆市渝北区黄山大道中段69号  
电话：+ 86 23 67889827  
传真：+ 86 23 67889837  
邮编：401120  
网址：[www.kekaiqianwei.com](http://www.kekaiqianwei.com)



欢迎莅临科凯前卫展位W2-B11

# 高空风力发电机组概念设计研究

文 | 闫溟, 陈广强, 陈冰雁, 杨云军, 周伟江

高空风力发电是一种新型的风能利用技术。与传统的水平轴风力发电机组不同, 高空风力发电机组不需要高耸的塔架来支撑发电机和风轮, 而是利用飞行器或浮空系统来捕获高空当中的风能, 从而摆脱了塔架高度的限制, 可以捕获到更高高度的风能, 充分利用高空风能储量大、风速平稳的特性, 因此更具备发电能力高、成本低的优点, 极具开发应用前景。

人们从上个世纪八十年代初开始关注高空风力发电技术, 发展至今已经提出了若干种设计方案, 各方案的设计原理和系统组成都存在巨大差异, 但到目前为止该项技术还不成熟, 都还处在概念设计或试验阶段, 并没有一种方案真正投入工业应用。目前看到的各种方案都还存在一定的不足: 有的方案由于控制策略过于复杂, 系统不能长时间稳定运行; 有的方案由于制造和运维成本过高, 不具备经济性; 还有的方案由于设计过于超前, 目前无法实现等。

为此, 还需要针对高空风力发电机组开展设计方案探索, 需要基于空气动力学原理, 同时结合材料、控制等方面的新兴技术, 对高空风能利用方法进行概念创新, 设计新的高空风力发电系统, 提高风能利用效率并降低发电成本, 力求找到一种适合实际应用并具备经济优势的设计方案。本文针对这一需求, 提出了一种控制简单、建造较为容易的高空风力发电机组设计方案, 并对该方案的风能利用效率进行了计算评估。

## 总体方案介绍

本文提出的设计方案将发电机置于地面, 采用特制风筝作为飞行器捕获高空风能, 通过牵引绳索驱动地面系统发电。飞行器以较大攻角上升飞行, 牵引绳索带动发电机发电; 当到达一定高度后改变姿态向下俯冲, 发电机回收绳索, 此时需要消耗一些能量; 当飞行器下行一定距离后再改变姿态向上爬升, 重复发电过程。飞行器俯冲过程消耗的电

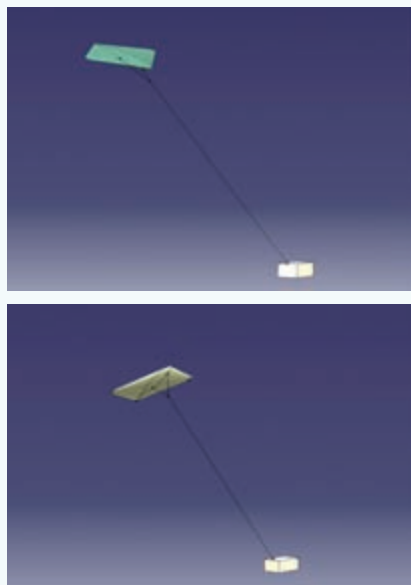


图1 高空风力发电系统总体方案示意图

能远小于爬升过程所发电能, 从而整个过程达到发电效果。

为了便于控制, 同时减少用地和飞行器之间的相互干扰, 飞行轨迹为沿直线方向上升, 上升到最高点后改变姿态, 按照与上升轨迹相反的路径俯冲下来。

对飞行器姿态的控制通过改变与飞行器直接相连的两根绳索的长度来实现: 当需要减小飞行器迎角时, 回收与飞行器前端相连的绳索, 同时释放与飞行器后端相连的绳索; 当需要增大飞行器迎角时, 执行相反操作, 释放与飞行器前端相连的绳索, 同时回收与飞行器后端相连的绳索。

飞行器的布局方案采用了飞翼布局, 飞翼布局具有高升力、高升阻比、结构强度高等优点, 非常适用于高空风力发电机组。整个飞行器呈一个大的菱形, 翼展为根部弦长的2倍, 根稍比为10。机翼各截面选用同一种翼型, 均为EPPLER399翼型, 该翼型同样具有高升力、高升阻比特

点。同时相对厚度也较大，这样更适于增加整个机翼的结构强度。

## 飞行器气动性能分析

利用CFD技术，对该布局方案的气动性能进行了评估。计算选用通用流体力学计算软件Fluent完成。计算域选取了一个正方体空间，正方体边长为机翼展长15倍。计算采用了六面体计算网格，总的计算网格单元数为200万左右。

在研究传统飞机的气动性能时所关注的是飞机的升力和阻力，或者是机体坐标系下的轴向力和法向力；而在研究高空风力发电机组的飞行器的气动性能时，需要关注的是轴向力和法向力的合力，也就是飞行器受到的总的气动力，因为飞行器最终将沿着总的气动力的方向运动，发电机的发电或耗电功率为飞行器运动速度与总气动力的乘积。另外一个需要关注的参数为气流方向与总气动力方向之间的夹角，本文中定义为“气力夹角”，用符号 $\beta$ 表示，如图3所示。

图4给出了飞行器在不同攻角状态下总的气动力系数 $C_F$ 和 $\beta$ 角随攻角的变化情况。随着攻角增大， $C_F$ 首先迅速增大，在攻角为20度附近达到最大值，此后随着攻角增大， $C_F$ 有一定振荡。 $\beta$ 角随攻角的变化则是先迅速增大，然后再缓慢减小。图5给出了 $C_F$ 随 $\beta$ 角的变化情况，可以看出在较大范围内每个 $\beta$ 角都对应有两个 $C_F$ 值，一个较大，而另一个则非常小，这两个 $C_F$ 对应的是两个不同的攻角状态。这样就可以控制飞行器的姿态，使其上升飞行时受到的气动力系数为 $C_F^+$ ，而下降时受到的气动力系数为 $C_F^-$ ，从而达到较好的发电效果。

## 风能利用效率评估

飞行器的自身重量以及牵引绳索的重量会对整个系统的风能捕获能力造成一定的影响，为了简化问题，本文首先研究了不考虑以上二者重量的情况。在计算高空风力发电机组的风能利用效率时，采用与传统风力发电机组相类似的方法，定义风能利用系数 $C_p$ ，形式如下：

$$C_p = \frac{P^*}{P_m}$$

其中 $P^*$ 为风电机组捕获风能的平均功率， $P_m$ 为风电机组的输入功率，将飞行器的机翼面积 $S$ 定义为高空风力发



图2 飞行器布局示意图

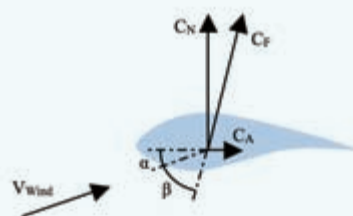


图3 飞行器受力分析图

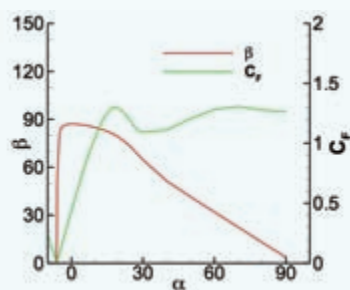


图4  $C_F$ 和 $\beta$ 角随攻角的变化曲线

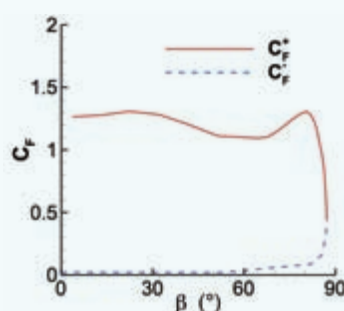


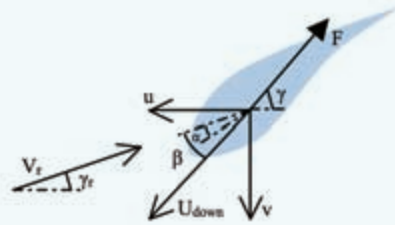
图5  $C_F$ 随 $\beta$ 角的变化曲线

电机组的风能捕获面积，则有如下形式：

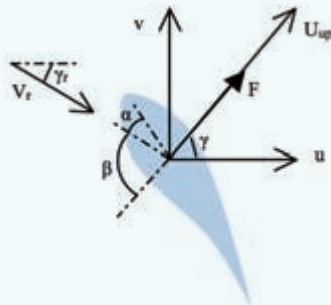
$$P_m = \frac{1}{2} \rho V^3 S$$

其中 $\rho$ 和 $V$ 分别为空气的密度和风速。假设飞行器上升或下降过程的直线距离为 $L$ ，在一个往复周期内，上升段的





(a) 上升段



(b) 下降段

图6 飞行器受力分析图

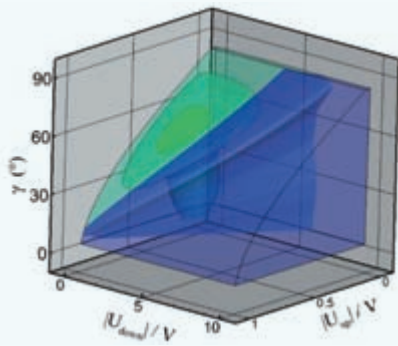


图7 风能利用系数 $C_p$ 分布图

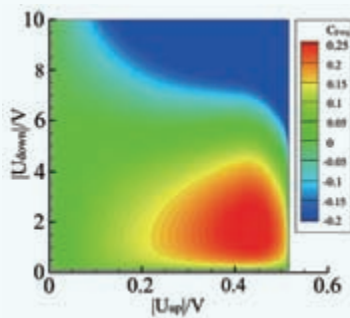


图8 轨迹角为 $47^\circ$ 时的 $C_p$ 分布云图

时长为 $t_{up}$ ，下降段的时长为 $t_{down}$ 。上升段风电机组发电，发电功率为 $P_{up}^*$ ，下降段风电机组耗电，耗电功率为 $P_{down}^*$ ，则风能利用系数又可以写为如下形式：

$$C_p = \frac{P_{up}^* t_{up} - P_{down}^* t_{down}}{P_{in} (t_{up} + t_{down})}$$

图6给出了飞行器在上升时和下降时的受力分析，飞行器的飞行轨迹与地面的夹角称为轨迹角，用 $\gamma$ 表示。通过公式推导，可将风能利用系数写成如下形式：

$$C_p = \frac{\sqrt{u_{up}^2 + v_{up}^2} \cdot \sqrt{u_{down}^2 + v_{down}^2} \cdot [(V - u_{up})^2 + v_{up}^2] \cdot C_p^+ - [(V + u_{down})^2 + v_{down}^2] \cdot C_p^-}{(\sqrt{u_{up}^2 + v_{up}^2} + \sqrt{u_{down}^2 + v_{down}^2}) \cdot V^3}$$

式中，

$$u_{up} = U_{up} \cdot \cos\gamma, \quad v_{up} = U_{up} \cdot \sin\gamma, \quad u_{down} = U_{down} \cdot \cos\gamma,$$

$$v_{down} = U_{down} \cdot \sin\gamma$$

经过计算，该系统的最大风能利用系数为0.27。图7给出了飞行器以不同的轨迹角、上升速度、下降速度飞行时整个系统风能利用系数的分布情况。当飞行器的飞行轨迹角在 $45^\circ-50^\circ$ 范围内，上升速度为风速的0.4-0.45倍，下降速度为风速1-2倍时，风能利用系数可以达到0.25以上。图8给出了当轨迹角为 $47^\circ$ 时，飞行器以不同的上升速度和下降速度飞行时系统的风能利用系数。

## 结论

本文提出了一种结构和控制都较为简单的高空风力发电机组设计方案，采用特制风筝作为飞行器，沿斜向上的直线路径往复飞行，驱动地面的发电机进行高效发电。为提高气动性能，飞行器采用了具有高升力和高升阻比的飞翼布局 and EPPLER399翼型。

采用CFD方法对飞行器的气动力特性进行了计算，结果表明针对每个“气力夹角”都存在两个气动力相差很大的状态，因此通过控制飞行器姿态使其以气动力较大的姿态上升，再以气动力较小的姿态下降，即可使系统在整个往复运动中的总体效果为发电状态。

采用与传统风电机组相似的评估方法，定义了高空风力发电机组的风能利用系数 $C_p$ ，并分析了飞行器沿各种路径以不同速度上升和下降时的风能利用系数，计算结果表明该方案在很宽的运行范围内都可以获得0.25以上的风能利用系数。✎

(作者单位：中国航空气动力技术研究院)



# 奥特润滑 给您的风机更全面的润滑呵护

- 独创自动吸排式废油回收技术，主动彻底清理轴承内废旧油脂，确保轴承以新油脂润滑
- 独创高泵送型气压油箱技术，确保旋转工况、高寒低气压等恶劣环境下的正常润滑作业

郑州奥特科技有限公司  
北京奥特勒新能源科技有限公司

- 全国免费客服热线  
4006-836-862  
8008-836-862
- 网址: [www.autol.net](http://www.autol.net)
- 邮箱: [sales@autol.net](mailto:sales@autol.net)



# 海上风力发电机组防雷系统浅谈

文 | 田宇, 杨娅曦, 曹贝贞

随着陆上风力发电技术发展的日益成熟, 风力发电机组的装机容量逐年递增, 陆上可经济开发的风能资源地区已经越来越少, 因此人们把目光投向了风能资源丰富的海上。海上风力发电机组单机容量大且呈上升趋势, 叶片越来越长, 整机高度不断增加; 而海上盐雾腐蚀严重, 风浪载荷大, 交通不便, 风电机组的建造和维护成本远高于陆上风电机组, 因此要求风力发电机组具有更可靠的性能。雷击可直接对机组造成不可逆的破坏, 这种破坏的维修周期长, 发电量损失大。因此, 防雷系统作为风电机组安全防护系统之一, 对保障风力发电机组的可靠性有重大作用。

本文首先针对海上的特殊情况对风力发电机组带来的问题进行分析, 然后从叶片接闪器、机舱电磁屏蔽、轴承跨接防雷等方面的设计原理出发, 论述了如何对防雷系统进行设计, 从而保障风电机组以更稳定、可靠的性能使用海上绿色风能。最后对海上风电机组防雷的一些待解决的问题进行探讨并提出了建议。

## 海上风电机组所面临的挑战

与陆地环境相比, 海上风电机组所处区域更加空旷, 面临更多雷击可能性和更严重的雷击后果, 相关研究表明:

(1) 我国近海海域闪电平均密度是全球海洋的 5 倍, 并且海陆交界处为闪电密度高值区。在冬季, 由于雷云高度较低, 更易发生雷击。

(2) 由于风电机组遭受雷击次数与风电机组高度的平方成正比, 故海上风电机组更易遭受雷击。且其中破坏性更强的上行雷(地面-雷云)比下行雷(雷云-地面)发生的概率更高, 约占总雷击的 80%。

(3) 海上风电机组同时受到海洋环境的影响。由于长期处于潮湿和高盐环境, 叶片表面集聚的潮湿盐层, 导致叶片闪络放电仅为干燥时的一半, 而且接闪器的接闪效率也会下降。严重时, 可导致叶片断裂、烧毁。

(4) 通过对海上风电机组雷击暂态一体化模型的分析,

发现海上风电机组较低的接地电阻导致雷击后的波过程更为复杂。

## 海上风电机组防雷系统的工程设计

风力发电机组的防雷系统就是通过接闪、传导、最后泄放到大地的一体化系统。一个完整的防雷系统是外部防雷和内部防雷的总称。外部防雷由接闪器、引下线和接地装置等组成, 用于直击雷防护; 内部防雷由等电位连接、屏蔽、合理布线、浪涌保护器 (SPD) 等组成, 用于减小和防止雷电流在需防护空间内所产生的电磁效应。

本章节主要介绍海上风电机组防雷系统设计要点。

### 一、防雷等级 (LPL)

同陆上风电机组 LPL 确定方式不同的是, 海上风电机组防雷等级要求为等级 I。陆上风电机组若通过雷电风险评估可以选择 I 级以下的防雷等级, 由此可见海上风电机组对于防雷系统的要求更为严格。I 级防雷的雷击电流参

表1 | 级防雷雷电流特征值

典型值	符号	测量单位	值
峰值	I	kA	200
总负载	$Q_{total}$	C	300
脉冲负荷	$Q_{pulse}$	C	100
特征能量	SE	$\text{kJ}/\Omega$	10000
平均上升率	$di/dt$	$\text{kA}/\mu\text{s}$	200

注: 引自 IEC 61400-24。

表2 雷电球半径

防雷等级	最小峰值电流	雷电球半径
I	3kA	20m
II	5kA	30m
III	10kA	45m
IV	16kA	60m

注: 引自 IEC 62305-1。

数见表 1。这些参数是用以设计防雷部件（例如导体截面、金属板厚度、SPD 的电流能力、对危险火花的间隔距离），并在对这些部件受雷击影响做模拟时定义其测试参数。

防雷设计工作中一个重要的工具是雷电球，各防雷等级对应不同半径的雷电球。雷电球从机组表面滚过，所有能接触到的点都是潜在的雷击点。通过这个方法来决定接闪器的位置和定义雷电保护分区。各防雷等级雷电流半径见表 2。

海上风电机组采用最严格的——半径为 20m 的雷电球来探测机组潜在的雷击点，并据此来进行防雷设计。

## 二、接地系统

防雷系统的本质就是借助防雷装置将雷电流安全地导入大地或将过电压限制在一个安全的范围内来保护风电机组本身，这都需要一个低阻的接地系统来实现。

海上风电机组接地电阻存在优势，因为海水的电阻率远低于大多数土壤。因此，对于海上的地基，例如单桩或钢筋混凝土地基，接地系统要求比较容易达到，并且不需要额外的措施。

但应该注意接地电阻的测量应使用不同于工频（50Hz - 60Hz）的低频手段进行测量。

## 三、外部防雷系统设计

### （一）避雷针

避雷针作为最直观的防雷措施，同样应用于海上风电机组。根据风电机组的具体尺寸，在机舱顶部布置数根避雷针，保障机舱处于 LPZ0B 区，不承受直接雷击。

### （二）叶片接闪器

叶片防雷一直是风电机组防雷系统设计的一个重要部分。图 1 为 IEC61400-24 推荐的叶片防雷保护方法。

目前，出于性能、成本等方面的考虑，风力发电机组

采用的叶片大多为非导电性材料的 D 型叶片。通过对叶片雷电易击点试验，90% 的损伤发生叶尖 4m 内。其余的 10% 发生在距叶片 5m - 10m 范围内。但随着海上风电机组高度、叶片半径的增加，尺寸增大带来的各方面变化应予以重视。叶片长度大于 45m 的，建议布置 1 个叶尖接闪器和 3 对（6 个）叶中接闪器，用截面积 50mm<sup>2</sup> 的铜导线作为引下线进行连接，压接在叶根法兰上。

### （三）法拉第电缆笼

风力发电机组的罩壳同叶片一样，也大多采用非导电性材料制作而成，机舱被确定为 LPZ0B 区。

LPZ0 区（0A 和 0B 区）和 LPZ1 区之间的界面可以确定为塔筒壁或机舱罩壳。如果机舱罩壳是玻璃钢材质的，使用金属框架或者金属带将机舱覆盖，这样至少可以将机舱界定在 0B 区内，使机舱设备不直接遭受雷击的破坏。但要确保这些金属框架与机架充分连接在一起。

同陆上风电机组不同的是，海上风电机组在罩壳内部采用 70mm<sup>2</sup> 的铜芯电缆线以相互连通的敷设方式，形成了一个封闭的法拉第笼，起到电磁屏蔽的作用。并在法拉第笼上引出两根电缆线，同金属机架相连，沿防雷路径引入大地。机架本身也是相互连接的工字钢，这样机舱整体即可定义为 0B 区。图 2 为法拉第笼示意图。

电缆放置在机舱罩壳内的电缆沟里，只有电缆连接点和交叉点用螺栓连接在表面。据 I 级防雷要求，网格的尺寸不大于 5m × 5m。如图 2 所示，黑色线条表示电缆。这里也使用了并联通路的概念，将雷电流分散，减小危害能力。图 2 中红圈处显示的是电缆与主轴处的防雷装置连接，在电气上保证了法拉第笼的连通。

### （四）轴承处的跨接防雷

若轴承处没有防雷保护装置，则轴承在设计之初就必

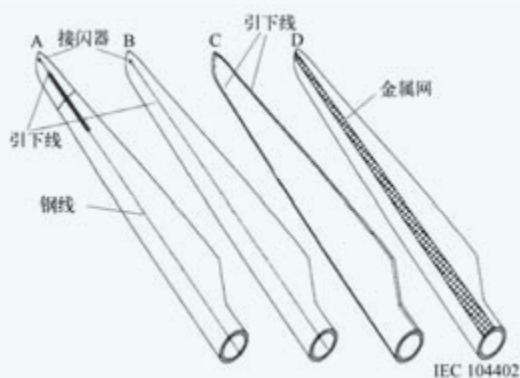


图1 叶片防雷保护方法

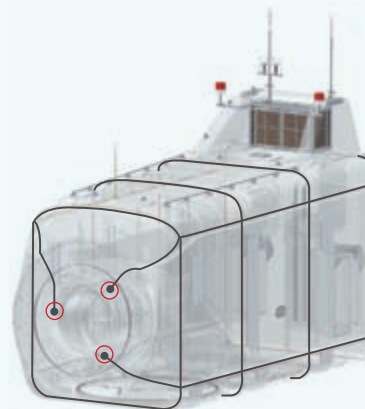


图2 机舱内法拉第笼示意图

须满足在整个使用寿命内遭受数次雷击而不被损坏的要求；若轴承自身不能满足设计要求，则需要间隙放电和滑动接触等保护装置。

关于雷电流对轴承的损坏效果，通过研究表明，雷电流会在轴承的滚珠和滚道上形成电弧的位置上造成擦伤。造成损伤的电流密度的下限值约是  $4\text{kA}/\text{mm}^2$ ，该限值将随着设备的机械负载的增加而增大。低机械负载的轴承具有离散的蚀损和熔损，而高机械负载的轴承受损时则是在沿着滚道和滚珠的接触面上呈现出笛状的伤痕。在大电流时它们的特性是相似的，但被熔损材料的数量和面积都会增加。除了电流的密度和设备的负载外，还发现当轴承润滑良好时损伤的数量会减少。

其他研究人员得出了另外的一组结果，他们将雷电流施加到旋转轴承和静止轴承上，结果发现只有旋转轴承受到损伤，在旋转的轴承上电弧击穿了滚珠和滚道之间的绝缘润滑油，从而在击穿点上造成了损伤。

重载轴承和静止的轴承能传输雷电流而本身并无明显的损坏，所以对于缓慢移动的变桨轴承和偏航轴承可能并不需要防雷保护，但强烈建议对于有风险的轴承采用软导线、滑动接触器或其他类似部件将其跨接以提供一条额外的电流路径，见图 3。

轴承处防雷装置，实质为旋转到非旋转部件的跨接传导装置，将本来从轴承中通过的雷电流改为由防雷装置来传导，这样极大地减小了轴承滚珠、滚道被电蚀的危险，保证了轴承的安全。对于轴承处跨接的雷电保护装置设计要点总结如下：

(1) 在每个轴承处分布有数个防雷装置，数量根据机组防雷等级、选择的防雷器件参数、机组机械结构、经济性共同决定，但必须尽量保持并联电路的均衡性；陆上机组防雷装置一般  $180^\circ$  均分，设置两处；海上机组尺寸大，设置三处防雷装置， $120^\circ$  均分。

(2) 采用间隙放电板 + 防静电电刷或间隙放电板 + 碳刷的组合方式，应结合机组实际的机械结构。从图 3 可以看出，防静电电刷在变桨轴承这种空间相对狭小的地方是非常适用的；采用这种组合是因为间隙放电板在机组正常运行状态下是高阻状态，对于雷电流传递路径来说是一个断路，只能在雷电高压情况下建立通路；而防静电电刷或碳刷则能时刻建立各部件间的电气连接，保持雷电流传递路径的畅通。

(3) 雷电流会自动流向低阻的物体，并根据它们的阻抗来分流，因此必须保证防雷装置安装到位，保证通路的

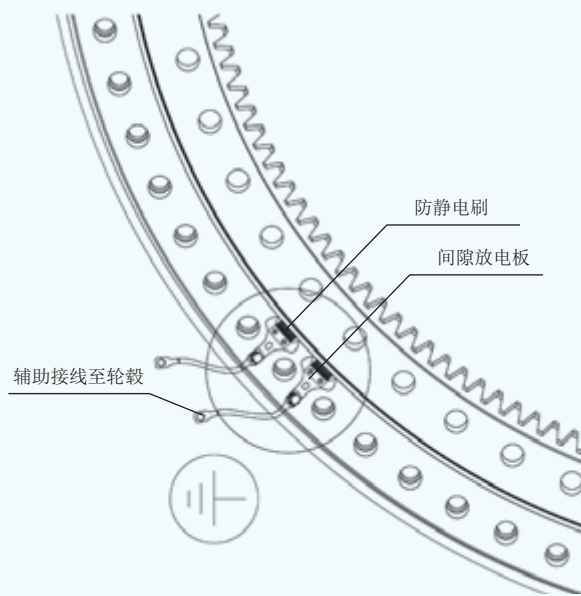


图3 变桨轴承处雷电保护装置

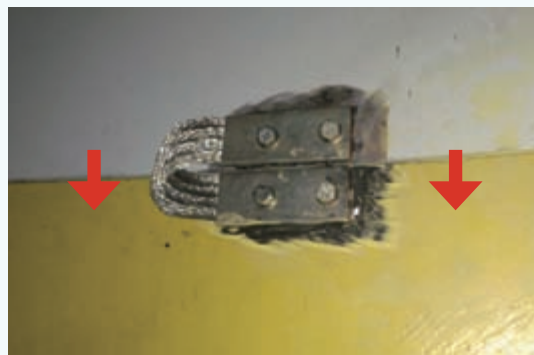


图4 塔筒段间辅助防雷通道

低阻，才能顺利地引导雷电流。

(4) 海上风力发电机组所用的防雷装置，包括防静电电刷，间隙放电板，防雷碳刷，刷架等应全部考虑海上的盐雾环境，按 C4 环境条件进行设计。海上防雷碳刷与陆上型不同，不添加任何金属材质并加以辅助的防腐成分。防雷刷架采用黄铜镀镍材质来防盐雾腐蚀。放电间隙板和其他支架部分均采用不锈钢材料，并进行表面防盐雾腐蚀处理。

(5) 防静电电刷、碳刷所接触的表面，为保证良好的导电性，不能进行涂层处理。

#### 四、塔筒连接段

全钢制的塔筒自身是一个完美的法拉第笼，雷电流通过塔筒及塔筒段间的连接螺栓传导入地。但海上风电机组专门的防腐蚀设计，可能会造成塔筒段间雷电流通路的不顺畅。因此在塔筒连接段上下法兰间跨接金属传递装置，辅助雷电流的传导。

目前，采用在塔筒连接处上下法兰的端面上增加镀锌铜辫子，作为辅助防雷通道，见图4。实验证明，单根铜辫子通流量可达800A，在有限的安装空间条件下，较电缆有很大的优势。与陆上风电机组比较，海上风电机组塔筒直径大，因此增加了均分的柔性连接器个数（每个连接处布6根铜辫子，60°均分），也相当于增加了并联路径。

#### 五、内部防雷装置

机舱内法拉第电缆笼为海上风电机组提供了一个相对良好的电磁屏蔽环境，使机组机舱所处的防雷分区与陆上风电机组无异，内部防雷设计仅需严格遵从标准来合理设计布线并选择恰当的SPD，因此内部防雷主要从等电位连接选择来优化。

绝大多数陆上风电机组采用金属机架作为等电位体，机舱内各电气部件的接地、防雷分区跨接处SPD的接地线都直接压接于机架处。与陆上风电机组不同之处在于，海上风电机组机架尺寸更为巨大，为了提供一个更理想的等电位连接体，更好的方式是在机架上设置一个专门的等电位母排（EBB），EBB与机架之间可靠连接，机舱内所有的接地直接与此母排连接，保证机舱各部件良好的等电位。

海上风力发电机组塔筒内也有很多电气部件，因此在塔筒底部也设计了一个专门的EBB，EBB与塔筒可靠连接，塔基所有电气部件的接地直接与此母排连接，保证塔基各部件的等电位。最后机舱和塔筒间2个等电位母排也通过电缆相连，实现了整机的等电位。接地电缆线的规格最小选取16mm<sup>2</sup>的铜芯电缆线。实际工程中，建议选择50mm<sup>2</sup>或70mm<sup>2</sup>的铜芯电缆线。

### 海上风电机组防雷系统尚需研究的问题

目前海上防雷系统设计并不成熟，实际运行经验也较

少，仍有以下问题需要解决：

(1)关于雷击演化物理机制的研究仍不完善，缺少关于机组雷电暂态过程的整体分析。

(2)海洋环境对机组性能的影响研究不够深入。

(3)风电机组防雷技术处于理论和实验室研究模拟测试阶段，测试采用的多是尺寸缩小的叶片。实际中的长叶片可能会出现强度问题。

(4)缺乏叶片接闪器效率、布置优化及叶片机械爆裂机理的系统理论化研究。

(5)现有风电机组年雷击次数计算公式存在问题，应探讨适合大型风力发电机组的年雷击次数计算方法。

(6)新叶片材料的防雷性能研究，及实际应用应快速开展。目前已知碳纤维材料能有效增强复合材料的防雷性能，但其价格太高，仍需进一步研究降低成本的方法。

(7)面对实际工程应用，国内海上风电刚起步不久，雷暴对机组的损坏记录匮乏，特别是机组内部设备如变桨、主控等受到的雷暴损害数据较少。厂家对于机组哪些部件更容易受到雷暴损害、损害程度、故障频率没有数据积累，因此在设计上只能依据理论和仿真以及陆上风电机组的经验，而不能提出针对海上的解决方案。

### 结语

海上风力发电机组防雷系统作为整机稳定运行的重要安全保障之一，必须结合海洋特殊的气候环境，结合风电机组实际的电气、机械情况，来设计风电机组的防雷系统。内部防雷系统和外部防雷系统必须相互配合，相互统一。

本文结合海上特殊的环境条件和风电机组部件的实际情况，阐述了外部防雷系统中避雷针、叶片接闪器、法拉第电缆笼、轴承处的跨接防雷、塔筒的防雷方案，以及风力发电机组内部布线、等电位连接等内部防雷措施应用。这些设计针对海洋环境，增强了风力发电机组防雷系统的电流传导能力及环境耐受能力，可最大限度地提高海上风力发电机组的整套防雷系统的可靠性，保证机组安全运行。✎

（作者单位：东方电气风电有限公司）



重点实验室办公楼



52.5米叶片静力试验



叶片检测车间



## 国家能源风能太阳能仿真与检测认证技术重点实验室 ——风电机组风轮叶片检测中心

### 以先进设备、专业技术为风电设备检测提供高效优质服务

以鉴衡认证中心为依托单位的“国家能源风能太阳能仿真与检测认证技术重点实验室”，是我国风能太阳能行业集仿真技术、标准研究、检测认证技术研究和实践于一体的公共技术服务平台。

重点实验室设立的风电机组风轮叶片检测中心位于河北省保定市，占地36000平方米，拥有先进的实验检测设备，执行与国际接轨的实验检测标准，为叶片检测出具权威报告。

目前检测中心已完成多项叶片实验测试任务，可承接100米内叶片全尺寸结构试验、无损检测和叶片零部件测试项目。



**CHINA**  
**WINDPOWER**  
**2017** 17-19 October  
Beijing, China

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



# 2017 北京 国际风能大会暨展览会

**CHINA WIND POWER 2017**

2017年10月17-19日 中国国际展览中心（新馆）

October 17-19, Beijing, China

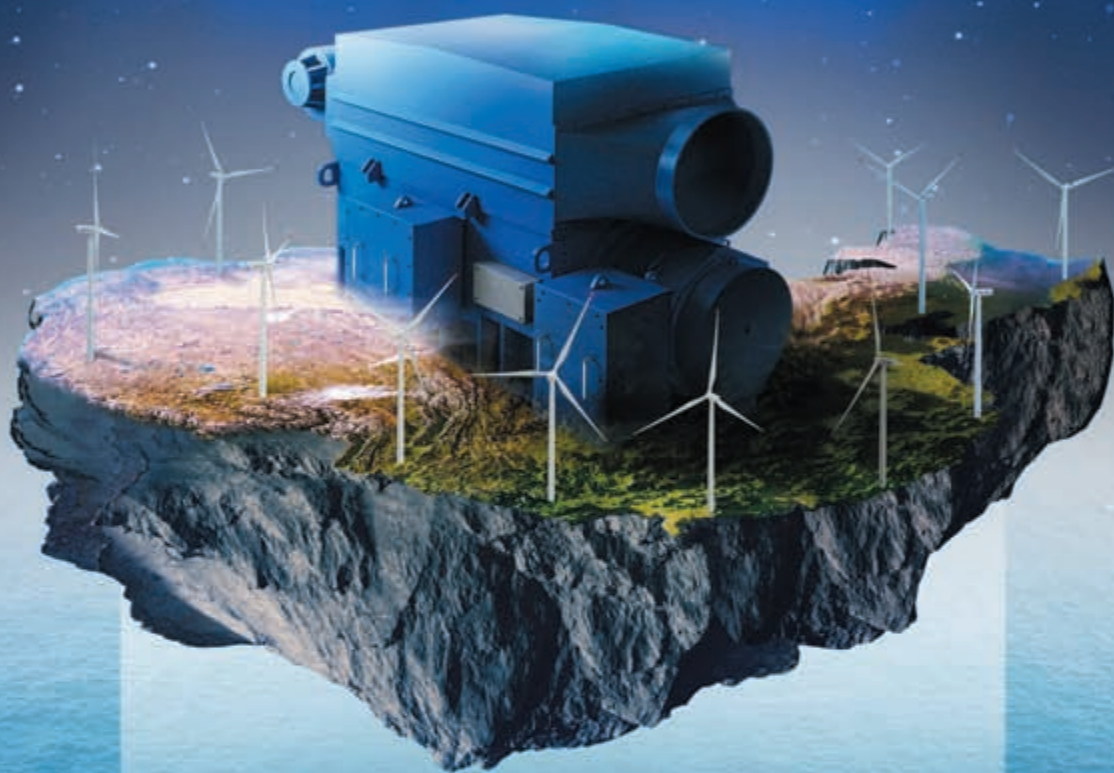
China International Exhibition Center (New Venue)





# 擎动中国芯 慧聚世界能

## China core World energy



大道无形，大音希声。

中车永济电机，中国风电产业的先驱和探路者。

2000年率先推出中国具有完全知识产权的600千瓦笼式风力发电机，  
开启中国人的风电梦想之旅。

18年耕耘，

建立了中国风力发电机市场牢不可破的领导地位和先发优势。

累计装机超过22000台\*。

真正掌握了直驱风力发电机核心技术，系列产品在全球风电市场被广泛采用。

中车永济电机，中车风电智慧，

一如高铁奇迹，再一次让世界感动。

\*数字来自于内部统计

### 中车永济电机有限公司

山西省永济市电机大街18号

T: (86) 359-8075162 F: (86) 359-8075290

 中国中车  
CRRC