

# 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

06

2017年 总第88期 赛迪出版物

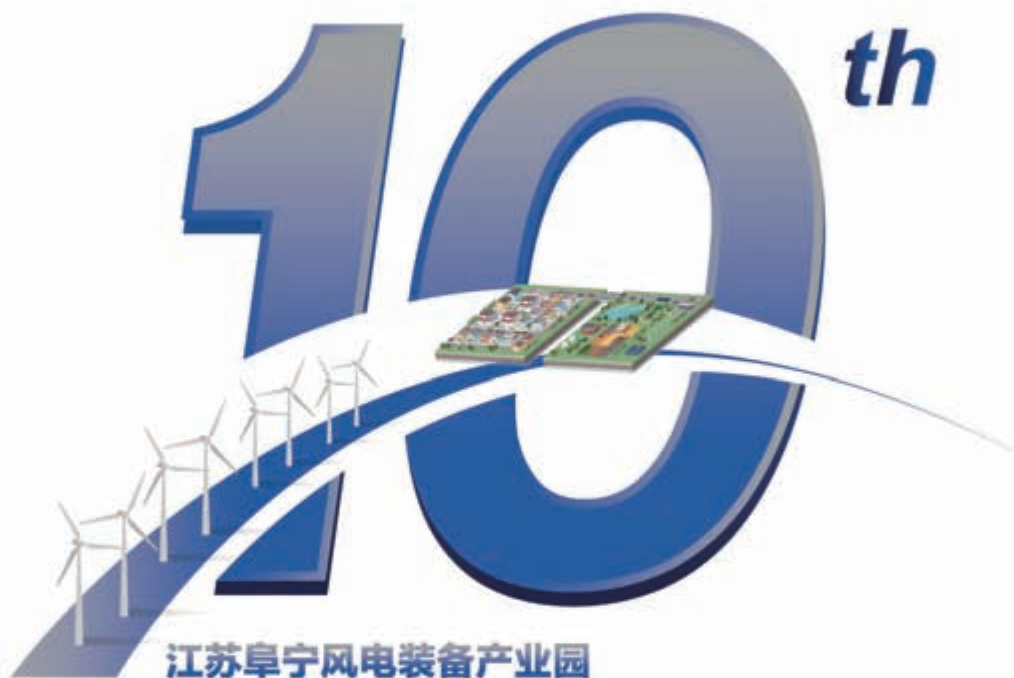


P16. 对话

质量管理应以“零缺陷”为目标

P32. 调研

风电机组变桨系统专利申请态势分析



P20

江苏阜宁风电装备产业园

## 阜宁的十年风电“创业路”

打造一个成功的风电装备产业园需要具备哪些要素? 江苏阜宁给出的答案是, 把握好宏观产业政策, 选择好招商引资对象, 建立好政策扶持机制。经过十多年的精心培育, 风电装备制造已经成为该县对外的一张靓丽“名片”, 为当地经济社会发展和产业结构转型注入一股绿色之源。



ISSN 1674-9219

# 既要高速发展，又要 转变方式

文 | 秦海岩



日前，国家能源局发布了《关于可再生能源发展“十三五”规划实施的指导意见》，为解决弃风、弃光、弃水和补贴资金不足等问题，就加强目标引导、规划引领、电力送出和消纳、健全规模管理机制等方面提出指导性意见，并随文公布了2017年—2020年风电和光伏的年度新增建设规模方案。

这无疑为行业注入了一剂“强心剂”。2017年上半年，可再生能源产业保持较好的发展态势，尤其是光伏，新增装机达到2440万千瓦。但由于2017年度开发建设方案一直未公布，引发业内担忧。《意见》的下发，既指明了未来几年的发展方向，也反映出国家大力发展可再生能源的决心。从公布的方案来看，风电和光伏的年度新增建设指标均在2000万千瓦以上。据此计算，到2020年，风电累计装机将达到2.8亿千瓦，光伏则接近1.64亿千瓦，远远高于“十三五”规划设定的目标。这样的新增规模，在坚定行业信心的同时，也有利于使产业保持良好的发展势头，并加速兑现我国在国际上做出的应对气候变化自主减排承诺。不过，需要明确的是，上述指标是动态可调的，并非强制性指标。

与此同时，这背后也存在一些隐忧，补贴资金缺口和拖欠就是较为严重的问题之一。根据相关机构的测算，截至2016年底，我国可再生能源补贴资金缺口已超过500亿元，预计到2020年将累计超过3000亿元。再加上18个月到3年不等的延迟发放以及弃风、弃光，严重影响了开发企业的现金流，经营状况不容乐观，最终将动摇投资者的信心。

之所以出现这样的局面，很大程度上与我国能源发展规划、价格、财政等主管部门不协调有很大关系。如果把可再生能源发电项目比作一个孩子，国家能源局负责孩子的出生，国家发展改革委价格部门负责孩子吃什么档次的奶粉，财政部负责奶粉供应的数量，各负其责，表面无可挑剔，而实际上容易出现“管生不管养”的问题，管理不协调，孩子的健康成长得不到很好的保障。

因此，必须从以下几方面入手尽快解决以上问题：一是提高电价附加标准或者增加财政预算来补足缺口资金，并加大对应收未收上来的电价附加费用的征收力度。粗略测算，如果把附加标准从现在的0.019元/千瓦时提高到0.03元/千瓦时，基本可以满足2020年前的补贴需求，但附加标准也不能无限度提高。二是转变补贴方式，建立市场化的补贴机制。目前，我国已经建立起自愿认购的绿证交易机制，但要想借此对可再生能源发展起到实质性推动作用，未来还必须建立强制性认购交易市场。这种补贴方式，不仅是解决补贴资金来源和提高补贴效率的有效办法，并且能够通过市场化交易，实现优先上网。同时，也需进一步优化制度设计，体现不同可再生能源品种的成本差异，最终实现整个产业的可持续发展。■

20

封面故事 Cover Story

## 阜宁的十年风电“创业路”

打造一个成功的风电装备产业园需要具备哪些要素？江苏阜宁给出的答案是，把握好宏观产业政策，选择好招商引资对象，建立好政策扶持机制。经过十多年的精心培育，风电装备制造业已经成为该县对外的一张靓丽“名片”，为当地经济社会发展和产业结构转型注入一股绿色之源。



12 专栏 Column

## 共享经济在能源领域的应用值得期待

16 对话 Dialogue

## 质量管理应以“零缺陷”为目标



## 历史回眸

2011年6月9日,《风电场功率预测预报管理暂行办法》由国家能源局发布,并于2012年1月1日起施行。《办法》明确要求,所有并网运行的风电场必须建立风电功率预测系统,并配备专职人员负责系统运行维护;风电场与电网调度机构的风电功率预测系统建立接口并运行于同一安全区,自动向电网调度机构传送预测结果;风电场功率预测

系统日预测曲线最大误差不超过25%,实时预测误差不超过15%,全天预测结果的均方根误差小于20%。《风电场功率预测预报管理暂行办法》加强了我国风电场的运营管理规范,提高了风电场与电力系统协调运行的能力,对促使风电行业健康有序发展以及我国风能产业政策体系完善起到了重要支撑作用。



# 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 既要高速发展，又要转变方式  
/ 秦海岩

## 08 风向/ Direction

### 专栏/ Column

- 12 共享经济在能源领域的应用值得期待  
/ 曹寅

### 现场/ Presence

- 14 以专业技术为基础，做好风电场建设、运维工作 / 张长存，王柱

### 对话/ Dialogue

- 16 质量管理应以“零缺陷”为目标

### 封面故事/ Cover Story

- 20 阜宁的十年风电“创业路”  
/ 夏云峰，王菲

### 公司/ Company

- 30 中科宇能：品质铸就发展，技术引领未来 / 王菲，夏云峰

### 调研/ Survey

- 32 风电机组变桨系统专利申请态势分析  
/ 应一鸣，卫红

### 海上风电/ Offshore Wind Power

- 36 丹麦海上风电开发的主要经验（下）  
/ 丹麦能源署

### 国际/ International

- 40 浅析澳大利亚风电行业发展中的社区参与 / 叶井龙

### 公开课/ Open Class

- 46 风电工程教育砥砺前行，助推风电产业快速发展（上）  
/ 王华君，岳大为，李洁，张琨

## 产业/ Industry

- 52 SPM750模块及其附件包装探讨  
/ 汪静，李长青

## 风电场/ Wind Farm

- 56 风电场后评估对运行工作指导作用的研究 / 王靖程，敖海，李育文，姚玲玲，杨旭

## 技术/ Technology

- 60 海上风电机组技术路线分析及对策  
/ 孙成刚，车三宏，邓方林，刘畅
- 64 风电机组中的轴电流分析  
/ 张富全，王伟
- 68 风电机组用高强度紧固件扭矩系数的实测分析 / 赵少伟，王洪波，袁坚，卢晟，杨少华
- 72 浅谈海上风电防腐技术应用及优化方案 / 王健，高宏斌，刘碧燕

## 广告索引

封面拉页	明阳智能
封二	联合动力
扉页 1	中国中车
扉页 2	麦加涂料
扉页 3	赢创工业
扉页 4	望江工业
扉页 5	贺德克
扉页 6	恩斯克
扉页 7	中国海装
卷首语对页	远景能源
目录对页 1	运达风电
目录对页 2	壳牌
版权对页	南高齿
P19	华豹涂料
P29	穆格
P45	奥特科技
P55	CWP2017
后彩四	鉴衡认证
后彩三	科凯前卫
后彩二	NRG
后彩一	永济电机
封三	重齿风电
封底	鉴衡认证



# 可靠保护 助力绿色能源

协同创新 价值共享

**携手共进 成就无限可能**

TOGETHER ANYTHING IS POSSIBLE

**壳牌工业润滑油**  
SHELL LUBRICANTS



扫码关注，参与壳牌工业润滑油全新  
品牌战略发布，有机会赢取豪华之旅





中国可再生能源学会风能专业委员会  
2017年第06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 褚骁骥 时春景

**Editor:** Jin Hangchuan Wang Fei Chu Xiaoji Shi Chunjing

本期责编：褚骁骥

**Duty Editor:** Chu Xiaoji

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

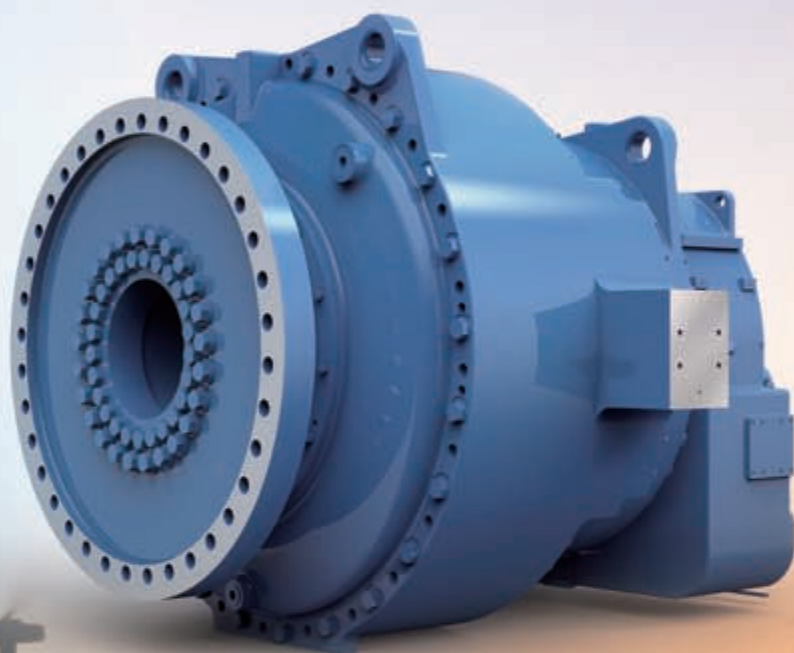
发行范围：全国发行

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



 **HUSUM  
Wind**  
The German  
Wind Trade Fair  
and Congress  
12-15 Sept. 2017  
Husum, Germany

欢迎莅临南高齿展位:  
Halle 1 / Stand 1E08

## 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)



**NGC**





### 国家能源局：加快推动分散式风电开发

为切实做好分散式接入风电项目建设，探索有利于推动分散式接入风电项目发展的有效模式，国家能源局于6月6日发布《关于加快推进分散式接入风电项目建设有关要求的通知》。

《通知》提出，分散式接入风电项目开发建设应按照“统筹规划、分步实施、本地平衡、就近消纳”的

总体原则推进，项目建设应严格满足相关技术要求。各省级能源主管部门按照有关技术要求和并网规定，结合前期区域内风能资源勘察的成果，在认真梳理区域内电网接入条件和负荷水平的基础上，严格按照“就近接入、在配电网内消纳”的原则，制定本省“十三五”时期的分散式风电发展方案。开发企业要在保证施工安全、工程建设质量和可靠性的前提下，有序推进项目建设，

推进技术进步和成本下降，鼓励探索分散式风电发展模式。国家电网公司、南方电网公司、内蒙古电力公司及其他地方供电企业应对各自供电区域内的分散式接入风电项目规划方案出具意见函，对于规划内的项目应及时确保项目接入电网。各省（区、市）、新疆兵团能源主管部门要会同相关技术单位、电网企业对规划方案内的分散式风电项目开发和并网运行情况进行全过程监管。

### 宁夏电网新能源发电量突破100亿千瓦时

截至6月11日，2017年宁夏电网新能源发电量达到100.14亿千瓦时。这是宁夏电网首次达到新能源发电量“年未过半，已破百亿”的历史性成就。

今年以来，在国家电网公司新能源消纳全网“一盘棋”理念的指导下，国家电网宁夏电力公司积极参与西北地区省际间互济和跨区现货市场交易工作并加大新能源消纳力度，优化机组开机方式，深挖火电调峰能力。从今年3月起，宁夏电网通过减少火电开机，提升新能源消纳能力约50万千瓦；配合西北能监局完成该地区供热机组调峰能力核查，供热期内释放供热机组调峰能力近100万千瓦，并将其全部用于新能源消纳。同时，该公司积极开展跨省日前、实时交易和主控区电量置换，实现新能源跨省错峰消纳。今年1月至5月，宁夏电网累计完成日前实时交易908笔、主控区电量置换621笔，累计外送新能源电量约2.5亿千瓦时，通过日前、实时省间交易，降低新能源弃电率约三个百分点。

### 山西电网风电出力再创新高

根据国家电网山西省电力公司统计，6月8日19时48分，山西电网风力发电出力再创新高，达到549.5万千瓦，占当时山西电网直调用电的28.5%。

国家电网山西省电力公司采取多项措施促进新能源充分消纳。2017年以来，该公司已陆续完成500千伏明海湖站220千伏接续工程6回线路投产，有效解决了水头风电汇集区域的网络受阻问题，释放风电机组容量超过70万千瓦。实施精细化科学调度，国家电网山西省电力公司还实时跟踪风电出

力变化情况，加强新能源输送通道的实时监控工作，在保证电网安全前提下最大限度接纳新能源，有效提升新

能源消纳水平。截至6月8日，山西省调风电装机容量达到802万千瓦，较去年同期增长12.4%。





## 贵州“十三五”风电装机或翻番

日前，贵州省发展改革委、省能源局联合发布《贵州省能源发展“十三五”规划》。《规划》指出，到“十三五”末，该省风电装机规模达600万千瓦以上，其中“十二五”结转67.9万千瓦。这意味着，贵州“十三五”期间风电累计装机将在“十二五”的基础上实现翻番。在贵州省发展改革委近日公布的《2017年贵州省重大工程和重点项目》名单中，2017年，贵州省重大工程和重点项目共2620个，其中有24个风电项目。关岭县普利风电场项目、瓮安县花竹

山风电场项目等名列其中。

近年来，贵州省风电产业快速发展，一方面得益于当地没有新能源消纳之忧，另一方面得益于低风速风电技术进步。但是受气候影响，贵州省风电年利用小时数在逐年下降。同时，贵州省风能资源存在较大的不确定性，风电场选址时存在很大的资源判断风险。

针对此现状，上述《规划》提出，“十三五”期间贵州将加强风能资源普查及评价，加快适用于贵州高原山区风电机组的研发，培育一批百万千瓦级风电

企业，积极推广低风速风电机组和智能风电机组，加大风能资源的开发利用力度。



## 湖南益阳首座风电场顺利并网发电

6月22日，柴下洲风电场首批3台风电机组并网发电，这标志着湖南益阳地区首座风电场——柴下洲风电场顺利并网发电。柴下洲风电场不仅是益阳地区第一家湖区风电场，也是湖南省内第一家湖区风电场，是湖南省平均海拔最低（海拔高度约25米—28米）的风电场以及湖南省风电机组轮毂高度

最高（106米）的风电场。它的规划容量达99.9兆瓦，年利用小时数2071小时，一期安装风电机组25台，装机容量49.9兆瓦，设1座升压变电站，变压器容量为100兆伏安，年发电量约10355万千瓦时，并以110千伏电压等级接入系统。

柴下洲风电场的成功

投运，对解决益阳电网用电紧张局面，改善湖区电网的电压质量，缓解益阳电网电力供求矛盾，提高益阳电网的稳定性和可靠性，优化益阳电网结构，加快全市调整能源结构、促进经济可持续发展、保护社会环境、电力保障等方面有着十分重要的作用和深远的影响。

## 山西吕梁交口县100兆瓦风电场开建

6月26日，山西省吕梁市交口县棋盘山100兆瓦风电场项目举行开工仪式。国家电投内蒙古能源公司山西分公司总经理聂英才、交口县委书记霍慧文等领导出席开工仪式并致辞。

交口县棋盘山100兆瓦风电场项目由国家电投集团交口县棋盘山新能源有限公司投资开发建设，项目总投资约8亿元，规划容量100兆瓦，分两期建设。该项目计划在2017年6月开工建设，第一期工程将于2017年底完成并网发电，2018年完成第二期工程后，该项目全部竣工。项目建成后，年上网电量能够达到约2亿千瓦时，年产值为1.2亿元，在项目周期内可实现利税约12亿元。

交口县棋盘山风电项目是该县首个落地的新能源项目，项目的建设不仅可以带动当地经济发展，完成扶贫攻坚的目标，还可以帮助当地完成能源转型，从而实现环境保护、可持续发展的目标。因此，交口县棋盘山风电项目能够起到推动产业结构调整和经济转型的标杆示范作用，对推动当地完成生态、经济以及文化建设具有重要的意义。



### 国家电投拟收购拉美电力在智利的资产

日前，国家电投正与拉美电力进行谈判，打算以 3.25 亿美元至 4 亿美元收购拉美电力旗下的智利资产。若收购成功，则标志着国家电投在进军拉美可再生能源市场方面又迈进了一大步。2015 年底，国家电投以 25 亿美元从 IFM Investors 手中买下 Pacific Hydro。收购时，拉美电力拥有将近 100 万千瓦的分布在巴西、智利和澳大利亚的风力和水力发电资产。近些年，中国一直在加大对智利的投资。除了该并购外，中资企业还竞标大型基建项目，并正在就利用价值 6 亿美元的水下光缆联通进行磋商。



### 国神集团白云40兆瓦风电工程顺利移交生产

近日，国神集团内蒙古风电公司白云 40 兆瓦风电工程顺利移交生产。该工程于 2016 年 7 月 10 日完成首台风电机组基础浇筑，工程正式开工建设。2017 年 1 月 11 日，全部风电机组顺利并网发电。2017 年 4 月 23 日，16 台风电机组顺利通过 240 小时试运行，风电机组的安全性、功率特性、电能质量、可利用率和噪声水平均满足设计要求。2017 年 5 月 27 日，该公司完成了工程生产交接书签订工作，根据 2017 年 5 月 31 日白云三期基建机组转生产视频会议安排，该工程于 2017 年 6 月 1 日起正式移交生产。



### 上海电气发布7兆瓦—154海上风电机组

6 月 9 日，上海电气福建海上风电新产品发布会暨产业联盟签约仪式在福建莆田市举行。会上，上海电气重磅发布了新引进的 7 兆瓦—154 海上风电机组。7 兆瓦机组是目前全球批量化、商业化运行的单机容量最大的海上风力发电机组，引入中国后将刷新此前 6 兆瓦创造的纪录，成为中国单机容量最

大的风力发电机组，是中国风电产业发展的又一里程碑。随着国际风电整机商巨头不断推出大功率机组，目前最大的风电机组功率

已达到 9.5 兆瓦，海上风电机组大型化趋势也日渐明显。上海电气本次重磅引进 7 兆瓦风电机组也引领了中国风电市场上的大机组风潮。

## 数据

12%

国家能源局于 7 月 21 日公布了 2017 年 1 月至 6 月电力工业运行简况。截至 6 月底，全国 6000 千瓦及以上电厂装机容量 162907 万千瓦，同比增长 6.9%，其中风电发电设备 15355 万千瓦，同比增长 12%。

1400 万千瓦

近日，山东省发布了《新能源和可再生能源中长期发展规划（2016—2030 年）》，提出将计划打造陆上、海上“双千万千瓦级风电基地”，力争到 2020 年全省风电并网装机容量达到 1400 万千瓦。

100 亿元人民币

6 月 28 日，西门子—歌美飒可再生能源公司在陕西省延安市甘泉县柴关山举行风力发电项目开工仪式。该项目共分 4 期投资，总投资达 100 亿元人民币。一期项目计划开发 20 万千瓦风力发电。



## 国际热点

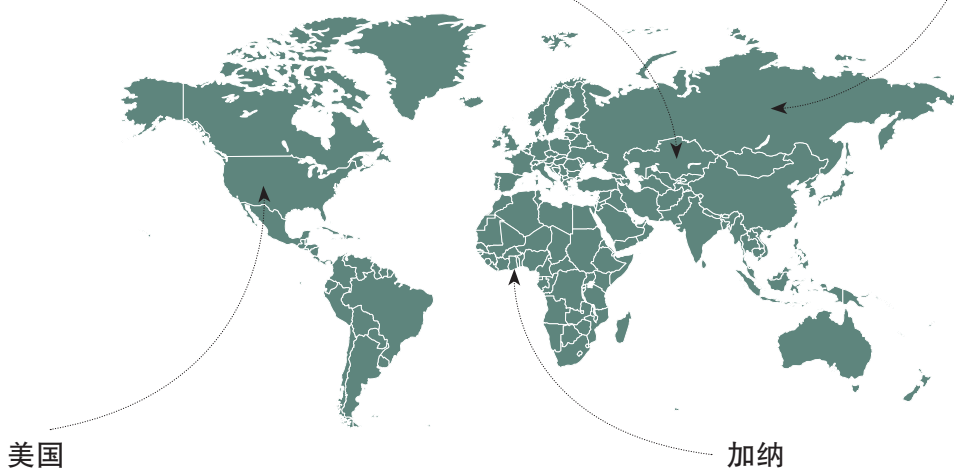


## 哈萨克斯坦

哈萨克斯坦总统纳尔巴耶夫在出席外国投资商理事会第 30 次会议时表示，到 2020 年底，哈萨克斯坦计划建成使用超过 50 个可再生能源项目，发电能力达 200 万千瓦；到 2050 年前，可再生能源在能源消费总量中的占比应达到 50%。

## 俄罗斯

在近期结束的俄罗斯可再生能源项目拍卖中，由芬兰清洁能源公司 Fortum 和俄罗斯国有开发公司 RUSNANO 各出资 50% 设立的风电投资基金 Fortum-RUSNANO 中标一系列陆上风电项目，并已经选择维斯塔斯集团为供应商。维斯塔斯集团也由此正式进入俄罗斯市场。



## 美国

在德克萨斯州，风电发电量的占比每年都在增加。2016 年，风电发电量占全州总发电量的 15%，高于 2015 年的 12% 和 2010 年的 3%。10 年前，德克萨斯州只有 14 个县级风电场，到 2016 年，该州县级风电场的数量已经达到了 50 个。

## 加纳

近日，西非电力和运输项目的开发商 ENGIE 和埃勒克特拉公司签署了一份风力发电项目的联合开发协议。根据协议，双方将在大阿克拉地区开发和建设一个装机容量为 5 万千瓦的风力发电项目。该项目预计投资 1.2 亿美元，并计划于 2019 年初正式运营。

## 274 亿美元

根据 GlobalData 的分析，全球风电运行维护市场预计将从 2016 年的 137 亿美元增长到 2025 年的 274 亿美元。中国是世界上最大的风力发电运行维护市场，占 2016 年全球市场规模的 30%。

## 218.54 万千瓦

根据国家能源局西北监管局的统计数据显示，截至 6 月底，陕西风电装机容量达到 218.54 万千瓦，光伏为 392.48 万千瓦。在今年下半年，陕西省电力公司将进一步提升并网服务质量以及并网工作机制，促进新能源有序发展。

## 500 米

为了追求更低的清洁能源发电成本，弗吉尼亚大学研究人员领导的由 6 个机构组成的联盟正在设计一个 5 万千瓦的系统。该系统将拥有 500 米高的风力发电塔和两个长达 200 米的叶片，它比帝国大厦还高 50 多米。



# 共享经济在能源领域的应用值得期待

文 | 本刊特约评论员 曹寅

近日，包括国家发展改革委、工信部、中央网信办等主要行业主管部门在内的八部委联合下发《关于促进分享经济发展的指导性意见》，具有前瞻性地明确指出分享经济有利于提高资源利用效率和经济发展质量，有利于激发创新创业活力和拓展扩大就业空间，对于推进供给侧结构性改革，深入实施创新驱动发展战略，促进大众创业、万众创新，培育经济发展新动能和改造提升传统动能，具有重要意义。这是我国政府为了适应和鼓励不断发展的互联网经济新形态的再一次重大体制突破，体现了本届政府与时俱进、开放创新的特点。

共享经济的辉煌肇始于硅谷，以Uber、Airbnb为代表的资源共享，

代表能源行业未来发展方向的能源互联网，同共享经济有着很强的内在一致性。能源互联网所强调的分布性、互动性、共享性、市场化，同共享经济模式之间的关系简直是天作之合。

互助互利的共享经济模式一经出现就迅速辐射全球，相关企业的规模和市场也随着这一浪潮得到爆炸性增长。但与其他国家不同的是，这些来自于硅谷的“共享经济之父”在中国的发展远远落后于中国的共享经济后发企业，这并不是因为这些硅谷企业所代表的共享经济模式本身出现了问题，而是因为，中国的本土共享经济企业在对于共享经济的理解上已经超越了那些发明者。可以说，真正将共享经济在各领域发扬光大的是中国，国内企业将共享经济从共享汽车、共享住宿发展到共享单车、共享充电宝，甚至共享雨伞等模式，共享经济模式正在中国百花齐放。共享经济在中国的成功，并非是偶然，这同中国传统文化中重视集体、重视互助、重视分享的文化基因有密切关系，并且共享经济模式同新中国成立以来所提倡的社会主义核心价值观存在极强的内在一致性。在共享经济出现之前，人人为我，我为人人的观念早已深入我国人心。

目前的共享经济仅仅是大繁荣的雏形，可以非常肯定地说，在未来，共享经济模式将在各行各业开花，并彻底地改变很多行业的业态。而能源行业不仅不可能无动于衷，更有可能成为共享经济大改造的重大战场，成为解决目前困扰能源四大革命面临的诸多根本挑战的利器。从另外一个角度看，作为最基础的公共事业——能源的共享经济化，也会促进共享经济模式在其他领域的快速发展。其实，代表能源行业未来发展方向的能源互联网，同共享经济有着很强的内在一致性。能源互联网所强调的分布性、互动性、共享性、市场化，同共享经济模式之间的关系简直是天作之合。

在能源互联网时代，共享模式是



聚合装机和负荷资源，然后优化配置的最佳模式，共享经济结合互联网将彻底改变原有能源系统“条块分割”的状况，把电、热、冷、气等多种能源形式在生产、输送、存储、消费等各个环节耦合起来，能够调度的资源将更多元化，调度方式不是基于决策中心的单边指令，而是基于商业博弈的去中心化系统均衡。能源互联网共享经济模式将以互联网为载体，能够将能源系统中分散化的用户、差异化的能源、多元化的商业主体紧密联系起来，扩大市场成员的交互范围与频度，降低交易成本，显著提高市场成员参与能源交易的便利性与存在感。

具体来看，能源产业的共享经济化可以贯穿能源生产、消费、储存的全价值链。

**生产：**未来会有大量的分布式能源生产设备布置在消费侧，包括可再生能源和小型清洁化石能源发电设备，而目前自发自用、余电上网的利用模式其实已经体现了共享的商业模式。但目前的生产模式以自发自用为主，而由于我国的国情，能够有条件安装分布式发电设备，比如光伏电站或者小型风电的居民住宅和商用楼宇比例很小，而有条件安装发电设备的业主又不一定有发用电需求。因此，基于互联网的共享模式可以有效解决这种资源难以匹配的挑战，从自发自用、余电上网的模式进化为互发互用，最大化本地消纳的模式。

**消费：**未来能源消费领域最大的变化在于交通能源的革命，电动汽车正在快速替代汽、柴油汽车。电动汽车的电池能量密度限制，以及充电效率限制，决定了未来的电动汽车消费模式会从根本上不同于目前的汽、柴油汽车，共享经济将在这种消费模式

切换中发挥重要作用。以所有权、使用权、收益权相互分离的电动汽车共享模式，可以很好解决电动汽车充电等待时间过长、电动汽车巡航历程有限的问题。除了电动汽车，通过共享模式协调柔性负荷资源，也能够解决大城市的用电峰谷差矛盾和可再生能源的发电波动性矛盾的共振加剧问题。

**储存：**储能未来将成为能源互联网价值链上的重要环节，但储能目前存在利用效率低、投资成本高的问题，如果结合众筹+共享经济，可以实现社区级储能集资建设，并且由社区内用户通过互联网按需协调储能容量，实现储能设备的高效率应用，最大化降低储能的生命周期度电充放循环成本。

未来，随着共享经济模式和能源互联网的深入结合，能源生产者、消费者身份的边界进一步消解，各类发电和用电设备资产的所有权、管理权、收益权都会被分离。在售电侧，由于能源生产和消费者，电网资源使用者和辅助服务提供者的身份模糊化，狭义的售电公司甚至有可能会消失，各类售电公司都进一步通过共享模式被抽象为类似 Uber 的能量交换和配对撮合的平台，并且提供各类增值服务。

届时，能源互联网的典型商业模式将是基于共享经济的能源泛在云。由于分布式能源、柔性负荷达到较高比例，能源生产者和消费者边界消弭，各种设施和设备的普遍智能化和互联化，计算能力和人工智能的泛在化，以及基于区块链的新互动交易机制的成熟，各类能源生产和消费设施将基于共享模式融合为开放和动态的能源云，共享经济在能源领域掀起的革命的激烈程度可能会超越在出行、住宿领域，非常值得期待。🔗（作者单位：能源区块链实验室）

未来，各类能源生产和消费设施将基于共享模式融合为开放和动态的能源云，共享经济在能源领域掀起的革命的激烈程度可能会超越在出行、住宿领域，非常值得期待。



图 1



图 2



图 3



图 4



图 5



图 6

风电项目核准后，勘测设计、招投标、现场施工、大件运输、并网发电，直至投产运行维护，每一个环节都是以专业技术为基础的，还要面对各种考验。

其中最大的考验来自自然环境：洪水、雷暴、滑坡、泥石流，对人员、设备造成了巨大威胁，设计、施工时要拿出专业的技术解决方案。其次是人为环境，由于设备组件超大规格，长达 50—60 米、重达百吨，这对建设者和运输方都是不小的挑战。吊装时，在它们一点点升起的过程中，需要避让大风、降雨、雷暴、云雾等恶劣天气。风电人的胆识、技术都在不断经受着严峻的考验。

等到终于发电时，风电人不管天气如何，都会带着像呵护孩子般的心情，走到电气设备旁。这里既有 20—30 米杆塔，也有 80—90 米塔筒，有事故时要爬上去，没有事故例行检查也要爬上去。另外还有主变、箱变、配电柜等诸多电气设备的维护工作。

点点滴滴的汗水，聚合点点滴滴的风能。为风电人心怀碧水蓝天、不畏艰难的工作精神点赞！

#### 图 1：野外巡检

运维人员进行着线路巡视，一年又一年。杆塔拉线、基础回填情况如何？固定件、磁瓶、绝缘子、跌落保险、电缆头、避雷器、避雷线等，是否存在问题？在技术人员的表格中，一一记录，存在问题的，要制定消缺计划，统一处理。

#### 图 2：箱变高压侧检修

箱变高压侧避雷器的耐压试验是必需的。雷击后，必然会损坏避雷器，降低耐压值，过电压、过电流时，存在单项对地短路隐患。

#### 图 3：箱变进线测试

箱变进线段的电缆接头是有高度的，穿上绝缘鞋，系好安全带，爬上挂梯，再进行测试，锻炼着风电人的心理素质和技术水平。

#### 图 4：风电机组吊装

当主吊竖起，吊起塔筒、机舱、叶片时，风电人为平台的开挖、基础的施工、设备的运输，已经操碎了心。

#### 图 5：风电机组开关柜调试

风电机组发电后，将经开关柜向外传输。技术人员本着严谨的态度，检查风电机组并网主开关，做风电机组系统检查，查明是否存在开关断路故障、主开关机构故障，否则将造成风电机组不能并网事故。

#### 图 6：检修比武

风电场中，专业技能高于一切。为了更好地掌握运维技能，还会安排检修比赛。如图中进行的高压电缆的绝缘测试中，参赛人员认真地完成着操作。



# 质量管理应以 “零缺陷”为目标

本刊 | 夏云峰



提质增效将是未来我国风电发展的一条主线，为此，需要设备具备高可靠性。作为全球风力发电主传动及偏航变桨传动设备主要生产厂商之一，南高齿集团大力推行“零缺陷”管理理念，努力“第一次就把事情做对”，探索出了一条属于自己的质量管理之路。

**《风能》：请简要介绍南高齿最近几年的风电业务发展情况。**

**南高齿：**南高齿是一家以专业生产高速重载齿轮为主的大型企业集团，名列中国机械工业企业核心竞争力100强、全球新能源企业前100强。我们是从2004年开始重点发展风电业务的，13年来经受住了从无到有、从弱到强道路上的各种考验。2004年，南高齿的风电业务销售额不足百万元，到2016年，这一数字已超过73亿元。我们生产的风电主齿轮箱产品在国内市场已经占到了半壁江山，也因此于2016年被工信部评为首批制造业单项冠军示范企业。

目前，考虑到扩大再提升的需要，南高齿正在建设全新的厂房，并将以此为契机进一步提升工厂的设备、制造水平。预计新工厂的数控化比例将超过80%，关键工序的数控化率达到100%，这势必将为南高齿的新一轮高速发展奠定坚实基础。

除了国内业务，我们还在积极开拓国际市场。截至2016年年底，南高齿风电主齿轮箱产品在国际市场所占的份额超过30%。与此同时，我们完成了欧洲、美洲、亚太的全球战略布局，包括在欧洲建立了研发中心和运维中心，在美洲拥有风电齿轮箱维修厂以及覆盖北美、部分南美的运维中心和服务网点，在亚太设立了亚太区销售服务中心。去年我们还建立了南高齿印度公司，抢占印度高潜力市场先机。此外，南高齿还在全面布局风电后市场，成立了后市场业务发展部门，对全球风电后市场进

行规划和资源配置。

2017年，预计南高齿的风电业务将继续保持增长态势。到2020年，我们的目标是国外和国内业务各占50%。

**《风能》：近些年来，南高齿一直将加强质量管理、提升产品可靠性作为经营的重点，积极推行“零缺陷”管理，这是基于什么样的考虑？**

**南高齿：**这主要有以下几个方面的考虑：

从行业角度来看，经过十多年的发展，中国风电产业已经走过了以数量求规模的阶段，更加注重通过提升设备性能来求效益。齿轮箱是风电机组中的核心部件，是保障机组在全生命周期中实现高效、可靠运行的决定性因素之一。因为机组是在60米—100米的空中运行，如果齿轮箱出现问题要下架维修，吊车的费用十分昂贵，每天都是以万元计。有些还要另算出场费和运输费，整体维修费用比更换齿轮箱的代价还高。因此，齿轮箱的高可靠性十分重要。

仅就企业角度而言，南高齿的市场占有率虽然已经很高，但强化质量管理是客户发展的需要，是企业自身发展的需要，也是企业未来发展和生存的基础。通过做好这方面的工作，能够将公司各部门工作和产品质量提升到新高度，成本持续降低，有助于提高企业的市场竞争力。

“零缺陷”理论是被誉为“全球质量管理大师”的菲利普·克劳士比（Philip B. Crosby）在20世

纪 60 年代初提出的，核心思想是：“第一次就把事情做对”。我们之所以从众多管理理念中选择了“零缺陷”理论，是因为它与我们原来提出的“责任到位，一次做对”理念不谋而合，长期的质量发展也为推行“零缺陷”理念打下了基础。同时，它又是一种从预防性角度看待产品质量问题的管理理念，可以很好地提升产品可靠性。推行“零缺陷”理念还契合了我们此前的转变时点，符合未来发展趋势。在风电和传动领域，南高齿必须以质量求生存、求发展、求创新。因此，可以说，开展“零缺陷”管理是企业发展的必由之路。

更重要的是，南高齿希望借“零缺陷”理念转变员工在质量管理的思维认知，在工作中首先就要有“做正确的事、正确地做事以及第一次就做正确”的思想理念，不要等到后期再去纠错。因为十个操作工有十个样子，如果规范设计很粗糙，制造差异就会很大，产品的不确定性就会大大增加，所以，“零缺陷”就是规范好流程，大家严格按流程走，每一步都做对的话，后面的结果自然是对的。

#### 《风能》：为了落实“零缺陷”的理念，南高齿采取了哪些措施？

南高齿：2013 年，我们开始有计划地系统开展提升质量管理的工作，包括将质量部门从生产部门独立出来，使整个质量体系独立于生产体系，以强调质量的重要性和独立性。

2014 年末，南高齿提出了推行“零缺陷”的质量战略目标，对“零缺陷”的推行设立了方向和阶段性目标，力图进行精益生产，追求零缺陷品质，提倡预防性管理，并将其作为企业的一大发展战略在整个公司全面推行。主推“零缺陷”管理后，我们不断细化和完善公司的质量管理架构设计，加大了独立后的质量部职权，并新增了各种类型的质量职能部门，比如有专门负责各种管理体系推行与监

督工作的质量体系部；专抓质量 KPI 管控以及相关质量文化推广的质量保证部等。

南高齿还引入各种先进的管理体系，如将德国严苛的汽车质量标准 VDA6.3 过程审核引入风电业务领域，以及质量水平评估系统、卓越绩效 ISO19580、风险管理系统等。并在公司管理上引入信息化系统，比如 SAP（企业管理系列软件）、MDM（数据管理系统）和 FineReport（商务智能报表）等，减少人为差错率。同时开发先进的质量管理工具，如六西格玛管理、FMEA 信息系统管理、质量闭环系统管理、质量风险度评级、质量水平评估等。

此外，我们加强了人力资本的管理，投资于人，加强员工培训，转变人员质量意识、质量管理认知方式、风险意识和顾客服务意识，让预防为主的思想理念逐步深入人心。

#### 《风能》：从目前的情况来看，“零缺陷”管理理念实施的效果如何？

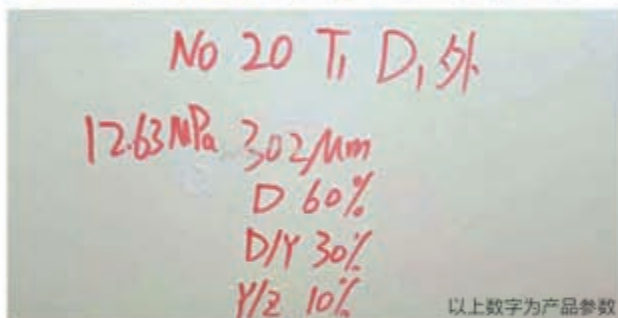
南高齿：经过 3 年的质量管理内部提升，南高齿已逐步形成了自己的质量管理闭环系统，通过一系列的质量管理理念、工具方法的推进和运用，有力保障了后续新产品的高可靠性，并得到了顾客的认可。2016 年，南高齿获得了南京市市长质量奖（组织）提名奖。

世界著名的管理咨询公司麦肯锡根据调查结果，将企业的质量管理水平及其对应的质量绩效水平分为四个等级，即质量检验水平级、质量保证水平级、质量预防水平级、质量完美级。经过近年的发展，应该说，我们的质量管理已经走过了检验级和保证级阶段，如今迈入到了预防级的阶段，正逐步靠近完美级阶段。2017 年，我们实施质量管理的着重点还是预防管理，继续提升现有产品的技术可靠性，将可靠性理念进行升华。☑



# 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。



10MW 大功率叶片试验台

中国风电叶片有限公司  
CHINA WIND BLADE CO., LTD.

封面  
故事

# 阜宁的十年 风电“创业路”

打造一个成功的风电装备产业园需要具备哪些要素？江苏阜宁给出的答案是，把握好宏观产业政策，选择好招商引资对象，建立好政策扶持机制。经过十多年的精心培育，风电装备制造业已经成为该县对外的一张靓丽“名片”，为当地经济社会发展和产业结构转型注入一股绿色之源。

---

本刊 | 夏云峰，王菲

---

7月4日，位于江苏盐城市西北部的阜宁，天空阴沉，不时飘落阵阵细雨。坐落在阜宁风电装备产业园的中材科技（阜宁）风电叶片有限公司（简称“中材叶片阜宁公司”）厂区内则是一片忙碌景象。这一天，由该公司自主研发生产的国内首套68.6米风电叶片成功下线，3支“巨无霸”整装待发，即将运往新疆安装发电。

而这只是阜宁风电装备产业园中时常上演的一幕。自2005年阜宁县委、县政府审时度势，在全国率先决定发展风电装备制造以来，当地不断优化软硬件环境，用高效的服务弥补资源禀赋的先天不足，吸引了一批风电龙头企业入驻。现在，这个产业园正在不断结出硕果，年销售额20亿元左右，纳税超1.3亿元。



## 突破资源禀赋瓶颈

将时针拨回到12年前的2005年。彼时，我国风电开发尚处于起步阶段，但一系列利好消息预示着这一产业将迎来爆发。

2005年2月28日，《可再生能源法》获得通过，自2006年1月1日起施行，奠定了我国可再生能源产业高速发展的法制之基。

为了推动风电发展，从2003年至2005年，国家发展改革委相继组织了3次风电特许权招标。在第三轮招标中，国华能源投资有限公司在盐城下辖的东台市中标了20万千瓦项目，拉开盐城风电规模化开发的大幕。

此时，年过半百的陈平正在苦苦思索着阜宁的产业结构转型路径选择问题。作为当时的阜宁县委副书记、县政协主席，陈平分管经济工作，为当地经济发展找准方向自然就成为摆在他案头的最紧要工作。

当得知东台将建风电场的消息时，陈平敏锐地意识到其中蕴藏着巨大契机。

“盐城有较长的海岸线，我们实地考察后觉得盐城的资源太丰富了，有大量滩涂，十分适合发展风电。”陈平向本刊记者介绍，“这给

我的启发就是，盐城会成为中国未来非常重要的一个风电开发区域。”

开发风能资源，离不开风力发电设备，这也意味着盐城地区的风电装备制造将非常具有发展前景。

事实上，之所以选择发展装备制造业，也是无奈之举。记者了解到，由于经历过几次行政区划调整，阜宁逐渐远离了海岸线，形成“沿海不靠海”的特殊区位特点。同时，按照当时的技术条件，该县陆上风能资源也不具有可开发的经济性。资源禀赋的不足，使得当地无法涉足风电项目开发。

风能资源条件差还让阜宁难以吸引整机企业落户。陈平回忆，在最初确定招商引资对象时，也曾将整机企业作为重点，与一些公司进行了广泛接触。“但是恋爱谈了很长时间，就是不能成亲，因为缺少可实现经济性开发的风能资源。”

在这种情况下，阜宁及时调整思路，转向部件制造业，迅速组织力量进行了大量调研和细致梳理，并最终决定将叶片制造作为突破口。这是因为叶片属于风电机组中的一个重要部件，具有较高的科技含量。

陈平清晰记得，2007年，德国的风电企业——恩德公司刚刚进入中国，在各地考察，计划投资建厂。双方接触后，汉德风电设备（阜宁）有限公司随即注册成立，恩德公司由此主导了产业园的早期叶片制造业务发展进程。但此后由于种种原因，经过几轮资产重组，中材叶片接手了这部分业务。

在此期间，阜宁县政府不断延伸产业链，引入了江苏金海新能源科技有限公司（简称“金海新能源”）、江苏神山风电设备制造有限公司（简称“神山风电”）、江苏三得普华智能电力技术有限公司、江苏中成紧固技术发展股份有限公司（简称“中成发展”）、江苏京冶海上风电轴承制造有限公司（简称“京冶轴承”）等10多家大型风电制造和服务企业，初步建成以重要风电部件生产为主、产业集聚度和知名度较高的专业园区。

产业园的良好发展态势得到了江苏省和国家相关部门的肯定。2009年7月，该产业园正式被江苏省命名为“江苏阜宁风电装备产业园”，成为江苏沿海首家省级风电装备特色产业园区。此后，园区还相继获批江苏省级风电特色产业集群（2011年7月）、国家海上风电产业区域集聚发展示范基地核心区（2013年10月）、国家可持续发展实验区示范基地（2014年12月），其产品也于2012年被列入江苏省风电装备产品目录。

作为设计者和主要参与者，陈平在言及产业园的发展成就时，总是充满自豪感。“十多年来，风电装备制造已经成为阜宁经济转型的一个重要标杆。我们没有任何优势，能把它做起来，也不是很简单的事情。一路走来，还是比较成功的。县里领导出去宣传，这个产业还是一张王牌。”

“产业园能够发展到今天的规模，一方面是由于我们对宏观产业政策进行了前瞻性把握，另一方面也离不开我们对招商引资对象的严格筛选以及为企业做好全方位的服务。”他总结道。

## 努力提升服务水平

服务，是记者在走访阜宁风电装备产业园时听到最多的一个词，也是陈平反复强调必须

做好的一项工作。“经过多年的招商引资，我们深深懂得只有政府搭好‘台’，企业才能唱好‘戏’。”

规划之初，阜宁县政府从园区位置的选择开始，即想方设法为企业的生产经营便利创造条件。早在2005年，当地就将经济开发区中的“黄金地段”预留下来，专门用于建设风电装备产业园。

完善的基础设施也是必不可少的。在产业园中，一条宽阔、整洁的主干道横贯园区，风电企业的厂房沿着道路两旁一字排开，时不时能够见到一排排巨大的叶片和塔筒等部件整齐地摆放在厂区内，场面甚是壮观。

“不光是道路，现在园区的基础设施配套也由最初的‘三通一平’提升到了‘九通一平’，







我们仍在逐年增加这些方面的投入。”阜宁经济开发区党工委副书记孙卫青告诉记者。

除了完善硬件条件，当地还在不断优化软环境，建立起了“保姆式”服务机制，为企业提供覆盖洽谈、签约、证照办理、工程建设、人员招聘、生产运营全过程的一整套服务。

为了化解投资“跑审批”的烦恼，每一个项目均会落实一个政府工作组与之对接，帮助其办理所有手续。投资者只需要提供材料，基本上不用直接面对审批单位。

企业入驻园区后，工作组负责人每周至少要到企业调研一次，了解生产经营情况。对于发现的问题，当地依托周周清的会办机制，由县重大项目办公室牵头，提请相关机构和领导协调国土、住建等部门进行会办。

制定科技创新、人才引进等方面的激励政策，是目前各地招商引资的通行做法。但在陈平看来，政策再多，关键还是要看能不能落到实处。“当企业需要资金时，政府能不能提供担保，为企业兜底？当产品的市场推广遇到困难时，政府能不能有所作为？”

帮扶企业离不开“真金白银”。2009年，阜宁专门从财政中拨出1亿元作为风电装备产业的引导资金，用于厂房代建、过桥资金、平台担保、科技扶持、人才引进等方面。陈平认为，从后来的情况看，这笔资金“对企业的发展起到了很好的支撑作用”。

项目投产初期，产品能否打入市场，直接

决定着企业是否可以发展壮大。为了帮助企业顺利渡过产品推广期，阜宁县相关部门也是全力以赴。

陈平坦承：“产业园中的叶片和塔筒项目刚投产时，产品根本销售不出去，因为招标企业通常会对产品的历史销售情况作出要求。后来，我们就动用人脉关系，与招标企业协商，帮助企业争取到了参加竞标的机会。”

这种真诚的服务态度打动了企业。金海新能源总经理杨州告诉记者，选择落户阜宁，很重要的原因就是看中了当地的服务水平和规范化管理。“园区的服务做得非常好，为企业排忧解难，尤其像新产品推广，园区领导都会动用不同资源，和我们一起跑市场。”

“对于企业遇到的困难，开发区相关人员都是第一时间给予协调解决，为我们的发展提供了高效优质的‘保姆式’服务。”中成发展总经理余成华对园区的服务也是赞口不绝。

## 社会经济效益显现

十年坚守，成效斐然。

目前，阜宁风电装备产业园年产值近20亿元，入库税收占全县工业税收的12.4%，培育出6家规模以上工业企业，其中有4家的纳税额超过了千万元。

发展风电装备制造制造业，还为当地创造了

2000多个就业岗位，并带动物流运输、餐饮服务及周边产业的发展。

在背后支撑这些业绩的则是一条较为完整的风电装备制造产业链。据孙卫青介绍，阜宁风电装备产业园已经成为华东地区风电机组零部件产业链条最长的专业园区之一，业务覆盖叶片及配套新材料、塔筒、轴承、控制系统、法兰、高强度紧固件等部件制造和在线监测、运行维护、叶片检测认证等综合服务环节，产业集聚度较高，产品门类较多。

这些条件，还使企业通过上下游协作降低成本成为可能。据了解，金海新能源生产的新型反向平衡法兰，所需的配件螺栓是从一墙之隔的中成发展采购来的；而这些法兰出厂后，又会被送到一路之隔的神山风电，用于生产塔筒……借助这种企业之间的配套，运输成本大大降低，仅这条产业链就可以为每个风电场的建设节省数千万元的投资。

十年间，壮大的不仅是产业园，还成就了一批“明星”企业。它们不断崛起，在全国打响了自己的品牌。

中材叶片阜宁公司就是这样一家企业。自进入产业园以来，该公司通过改善管理、加强研发、提升制造能力，已经发展成全国最大的海上风电叶片生产基地，拥有2.5兆瓦以上模具16套的工位定制，以及最大可用于10兆瓦级别海上风电叶片开发的试制车间和叶片检测平台，年产能可达500套。其产品不仅销往国内市场，还出口至巴拿马、泰国、澳大利亚等国家和地区。

记者拿到的资料显示，目前，该公司拥有员工1000多人，其中的85%以上是本地员工。它还是园区的纳税大户，连续五年为园区纳税前三强企业。

“应该说，我们的叶片研发设计和制造实力在国内已经处于前列。”中材叶片相关负责人表示，“除了这次下线的68.6米产品，我们在2014年还生产了长达77.7米的海上风电叶片，是当时亚洲自主制造的首支最长叶片，也是世界第三长叶片。”

另一家值得一提的企业是金海新能源。它是内蒙古金海新能源科技股份有限公司（由中国三峡新能源有限公司、金风投资控股有限公司等共同组建）的全资子公司，主要生产预应力锚栓组合件、反向平衡法兰等产品。

据金海新能源相关技术负责人介绍，反向平衡法兰是该公司自主创新研发的一种新型连接技术，它改变了传统法兰的受力模式和产品结构，具有节约成本、安装便捷、结构稳定、免维护等优点，被国内外风电机组厂商广泛采用。

凭借这些优质产品，金海新能源实现了良好的发展。金海新能源总经理杨州告诉记者，该公司2011年入驻产业园，当年建设，当年即实现销售，第一年的盈利就超过了2000万元。此后，每年的纳税额都在千万元以上，最多的一年则达到6000万元，在产业园中名列前茅。

“我们总公司的第一大股东是三峡新能源。三峡精神要求我们勇于承担社会责任，不仅要在工厂建设上坚持高标准，生产过程必须做到安全、环保，还应帮助当地解决就业问题。在这里，我们雇用了300多名当地人。其中不少是残疾人，这也符合我们的企业文化。”他强调。



## 重点引进整机企业

看到上述发展成就，或许很多人都会以为陈平会心满意足退居二线了，但实际上这位精神矍铄、十分健谈的老人也有自己的“心结”。

“在产业园建设方面，唯一比较遗憾的就是，一直没能吸引整机企业落户，这也使我们在引入部件制造企业时多少受到了一些制约。”他解释道。

整机企业自然就成了阜宁下一步招商引资的重点，并为此采取了一系列行动。孙卫青表示，目前，阜宁正在尝试开发本地的低风速风能资源，并积极向盐城市政府争取一部分沿海风能资源，再结合人脉资源关系，力争引进一家相对具备规模条件的整机企业。

他透露，随着技术进步，长叶片、高塔筒的广泛应用，阜宁的风能资源也具备了开发的条件。实测显示，当测风塔升高到 150 米，当地的风速也相应提高了 7 米 / 秒以上。基于此，阜宁正在开发一个试验风电项目，其中吊装了一台塔筒高度为 150 米的 3 兆瓦机组，预计将于今年年底并网发电。“一旦成功，不仅将打破阜宁无风电项目的历史，为产业园在低风速风电市场上打造出一批‘拳头’产品，也将加速整个低风速地区的风电开发进程。”

海上风电则是产业园未来业务布局的另一个重点。除了继续开拓部件制造等原有业务，一些企业还在积极涉足运维服务市场。

杨州告诉记者，金海新能源计划通过引进国外的先进运维船，组建自有运维队伍，与外资企业合建培训中心，打造海上运维服务平台。

当被问及工业区管委会在产业园中的下一步工作时，孙卫青强调，在进一步优化园区业务布局的同时，提升服务水平仍然是重中之重。

成立风电装备产业联盟则是最新举措之一。阜宁县人大常委会副主任、风电装备产业联盟主席王飞介绍：“该联盟于今年成立，旨在持续推进培育壮大现有企业、招引重大产业

项目（重点突破风电总装）、优化产业发展环境等工作。当下，阜宁正处在盐城市政府用风能资源换取风电产业链项目的政策机遇口，同时自身也拥有阜宁港（内河二类口岸）通江达海的优势。我们的风电产业一定能进一步做大做强。”

作为联盟顾问，陈平坦言，希望通过这种方式，集思广益，进一步拉长、增粗产业链。“毕竟与完整的风电产业链相比，园区现有的业务布局还不够完善，在产业链的延伸上还有很大的空间。”

据悉，阜宁目前正在与一些专业生产锻铸件、电缆、齿轮箱等配套产品的风电企业进行洽谈，争取在这些方面实现突破。

“从某种意义上来说，阜宁风电装备产业园已经成了中国风电产业发展的缩影，我们也见证了中国风电从无到有，从有到强的发展历程。下一步，我们将继续坚持‘集聚效应与创新’不动摇，‘优质服务与专业招商’不松懈，以打造‘中国风电装备城’为目标，充分利用产业园的品牌优势，不断提高产品在国内市场的占有率，并加大对海外市场的开拓力度。”陈平说。🔗



# 初心筑梦 匠心逐风

## ——贺阜宁风电装备产业走过十周年

文 | 周利利

迎着黎明的朝露

你带着阜宁风电的温度

承载着阜宁风电人的梦

用一个直立的背影和旋转的翅膀

站在草原的肩上

立于大海的深蓝里

用风的手照亮大地的心

回首十年

长风磨利剑，高吊平地起

弯弯射阳河畔成了你的家园

从谋划布局到江苏沿海地区首家省级风电装备产业园成立

从第一个项目落户到建成江苏沿海最长风电装备产业链条

央企、国企、上市公司

走进阜宁、投资阜宁

……

这是风的竞争

这是梦的追逐

这是高端的对话

这是顶尖人才的翱翔

风电锚栓占据行业领先地位

亚洲最长的风电叶片成功下线

世界反向平衡法兰独一无二

清华团队拨弄出全球声音

“新三板”敲响阜宁风电企业的锣声

那些风雨无声的每一个日子

那些披星戴月的无眠夜晚

那些挥汗如雨的春夏秋冬

是你们在经济指标上务实担当

在创新驱动上勇立潮头

在跨越发展上只争朝夕

我们无法忘记，我们不能忘记

多少感慨的话语在心头激荡

多少难忘的记忆在脑海沸腾

你是阜宁新能源旗帜上的骄傲

你是我心中永远的风帆

回首十年

我们记不清有过多少身影从国企央企走来

我们记不清在蓝天下自由转动风机有多少部件来自阜宁

我们同样记不清有多少个第一

从这里发布

感恩有您携手同行

我们记得有一大群人远离家乡来到阜宁筑梦

我们记得面临“6·23”灾难

你们捐资捐物

你们说出“老乡坚强”

我们记得日夜奋战在一线的兄弟姐妹们高远的目光

电焊机的火花是你心中最美的绽放

塔台上每一次精准的起降是你不懈的追求

朝阳和晚霞也许你一次也没有赶上

但你一定是最美的

十载风雨，十年一梦

秉承工匠精神共筑百亿风电

你是逐风的人，你是电的使者

前方的路无论多难你总是不忘初心

发展，转型；转型升级，再发展

主宰那一台台先进设备的高端人才

从一个个研发中心奔跑而出的新品牌

产业联盟集聚而成的顶端平台

创新是你的生命

更是你一路前行的陪伴

你的腾飞，我们见证

你的辉煌，我们铭记

初心筑梦，匠心逐风

我在卧听大海的潮声

它是在呼唤你的名字——阜宁风电

我在草原的马背上仰望你的舞姿

风儿轻轻地告诉我你的坚强

你的路在远方

在黄天漠北，水色南国

在宽阔的海洋在辽阔的草原

在风电人的肩上心头

祝愿你永立时代潮头

呼啸奔腾向前

# 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



# 中科宇能： 品质铸就发展，技术引领未来

本刊 | 王菲，夏云峰

中科宇能科技发展有限公司（简称“中科宇能”）成立于 2008 年，是国内唯一具有完整技术研发设计能力的专业风电叶片公司，历经近 10 年的发展，已经在河北保定、甘肃白银、内蒙古乌拉特中旗建立生产基地，湖南益阳基地也将在年内投入使用，具备了年产 1500 套叶片的能力。中科宇能自创建伊始就确立了结合中国风资源状况的自主研发路线，将公司定位为专业的风电叶片系统解决商，能够提供叶片全寿命周期服务，包括气动与结构设计及优化、模芯与模具设计制造、生产、测试和售后运维等。该公司产能和销售额连续 5 年保持高速增长，即使在 2016 年装机总量下滑、行业竞争激烈的大环境下，其业绩依然保持逆势上涨。

我们不禁要问，到底是什么促使这家公司能够保持快速稳健发展的？

日前，本刊记者参观了中科宇能位于河北保定的生产基地。在宽敞的车库里，工人们正在几个巨大的模具上

忙碌着。“今年在手订单依然充足，现有的 2MW 模具都会保持满产的状态。”中科宇能总经理徐宇博士说道。

记者了解到，该公司拥有具有自主知识产权的 1.5MW、2.0MW、2.5MW、3.0MW、3.4MW 及 5.0MW 等系列近 30 个型号叶片的设计制造技术，并有多个型号叶片实现批量化生产。“在这个过程中，我们始终坚持自主研发的路线，坚守在风电叶片研发和制造的一线。为此，中科宇能汇聚了一批空气动力学、结构力学、复合材料、机械设计制造等方面的高技术人才，形成了一支具有丰富经验和快速响应能力的专业技术团队，并与国际领先的研究和开发机构保持着密切的合作关系。”

众所周知，制造叶片离不开模具，它也是决定叶片成型质量的关键因素之一。为了更好地保障叶片质量，中科宇能所有的模具均为自主设计、制造，具有工艺便捷、精准度高、使用寿命长等特点。

“模具采取水加热方式，温控稳定、安全性高，满足

了风电叶片产品生产的温度要求。模具加热采取分区设计，可以进行升温及降温调节，更有利于实现叶片控温的精细管理。”徐宇博士表示，“另外，例如导入销等设计细节的应用有效提高了模具使用的准确度。”

另一个与叶片质量休戚相关的因素则是原材料。据徐宇博士介绍，“我们公司所用的主要原材料均来自业内主流供应商，且通过国际权威机构认证。此外，我们还会对原材料进行严格的管控，逐批次进行来料检验和过程随机抽检，以保证材料性能满足设计和工艺要求。”

在叶片制造过程中，众多工艺、制造环节均会影响叶片质量。有着10年以上叶片制造经验的中科宇能自然也深知这一点。因此，非常重视关键工序的控制，并建立起了严格的质控体系。例如，会实时监测每个叶片树脂和结构胶的固化度，以保证聚合反应充分进行，达到理想的材料性能；树脂灌注前，采用单组份消泡设备，脱除树脂中的气泡，避免叶片因树脂中的气泡导致灌注后发白；合模时，使用在线涂胶设备，混胶机直接将混合的结构胶涂覆在粘接区域，避免在混胶过程及结构胶涂覆过程中掺杂气泡，保证叶片粘接质量；在装配工序阶段，使用叶根端面打磨机，以便保证叶根的平面度。

此外，该公司还将6S管理、精益管理等一些先进的管理方法引入到制造环节中。“我们成立了6S专项推行小组，对全生产过程的各工序进行6S管控；并制作了质量、安全等方面的看板和标识，确保员工能够合理有效利用资源，优化车间配置，改善生产现场环境；在质量提升方面，通过项目小组制度、质量月活动、合理化建议等方式鼓励员工对公司的质量提升建言献策。”徐宇博士指出。

在参观期间，记者注意到，对于每支叶片，中科宇能都会建立叶片全寿命周期数据库，包括叶片原材料信息、过程生产质量记录、产品质量不合格处理报告表（NCR）等。通过这些数据，可以对叶片自生产过程到运行周期内的所有状态信息进行查询、追溯，使得所有产品信息处于可控状态，便于对产品的异常情况及时做出原因分析及处理。例如，利用产品NCR系统能够追溯产品的缺陷详细信息，分析缺陷问题的类型，并分析出主要原因，立项进行解决。

在这些措施的有力保障下，中科宇能出产的在役叶片在运行中表现出了卓越的性能和可靠性，10年间未出现过任何重大质量事故，赢得了客户及行业的一致认可。

2016年，该公司被金风科技评为“质量信用5A级供应商”，并获得“协同创新奖”。

在向客户提供叶片产品的同时，凭借雄厚的研发积累，中科宇能还向国内外客户进行技术输出。

早在2009年，中科宇能就与韩国某叶片厂商正式签署合作协议，为其提供模芯、模具设计制造及叶片制造工艺技术，并在保定基地完成认证检测工作。这是中国风电叶片首例技术合作出口项目。

2010年，中科宇能将针对低风速地区自主设计研发的1.5MW（42.8米）叶片设计技术转让给德国某知名整机厂商，并进行了样片生产与挂机试验。该型号叶片的生产许可也被转让给了国内知名叶片企业。

2016年，在自主研发的SW2000—59.5低风速叶片成功下线后，中科宇能再次向国内知名叶片企业转让了叶片生产许可，这是继1.5MW技术实现转让后的又一案例，成为该公司与业内企业开放合作的最佳证明。

针对近年来成为开发热点的低风速风电市场，中科宇能也一直走在了行业前列。据悉，该公司自主研发的1.5MW—42.8m、2.0MW—56.5m、2.0MW—59.5m、2.2MW—64m低风速及超低风速系列化叶片，均率先完成设计研发、叶片试验并快速投放市场，满足客户需求。该系列叶片技术及产品引领了中国低风速叶片市场发展。早在2013年，中科宇能研发的“适合中国风资源低风速特点的系列化风轮叶片研究开发”成果，就获得了国家能源局的科技进步奖。

为了适应靠近电网负荷中心的低风速风电场开发要求，降低运输成本和难度，2016年，中科宇能在湖南益阳建立南方生产基地，占地面积450亩。年内投产后，将进一步重点满足低风速和超低风速市场的需求，拓展该公司在低风速市场的份额。

徐宇博士还向记者透露，中科宇能针对海上风电叶片开发的技术储备一直在进行中，并准备筹建海上叶片生产基地，计划在沿海地区进行海上布局，辐射海上及海外市场，实现最优的项目配置。

“未来，中科宇能将会继续践行科技创新、精益制造、成就客户的企业理念，为客户提供高性能的产品和服务，巩固和提升我们在国内风电叶片市场中的地位。同时，我们也会一如既往、持开放合作的态度与我们的客户及兄弟企业共同打造更加健康的风电市场环境。”徐宇博士强调。■



统计分析发现，在风电机组变桨技术的专利申请方面，中国企业还与国外存在较大差距，把握技术热点的能力也偏弱。尤其是在作为变桨系统未来发展趋势的独立变桨技术的研发上，还需要国内企业与各大高校共同合作，加强基础学科的研究。

# 风电机组变桨系统专利申请态势分析

文 | 应一鸣，卫红

在风电机组中，变桨系统的主要作用包括：根据风速的大小自动调整叶片与风向之间的夹角，从而实现风轮对风力发电机有一个恒定转速；利用空气动力学原理可以使桨叶顺桨 90 度，与风向平行，使机组停机。变桨系统的工作原理为：通过控制叶片的角度来控制风轮的转速，进而控制机组的输出功率，并能够通过空气动力制动的方式使机组安全停机。风电机组正常运行期间，当风速超过额定风速时，通过控制叶片的角度使风轮的转速保持恒定，任何情况引起的停机都会使叶片顺桨到 90 度位置。变桨系统主要包括：变桨轴承，机组的叶片（根部）通过变桨轴承与轮毂相连；变桨电机，其通过一个小齿轮与变桨轴承内齿啮合联动。此外，变桨系统有时需要由备用电池供电进行变桨操作，因此，变桨系统必须配备备用电池以确保机组发生严重故障或重大事故时可以安全停机；并且还需要一个冗余限位开关，在主限位开关失效时确保变桨电机的安全制动。

本文从全球专利申请态势、中

国专利申请态势两个方面对变桨系统的专利申请情况进行分析，从而对比国内外技术的差距。其中全球专利申请态势分析的样本来源于世界专利索引（WPI）数据库，中国专利申请态势分析的样本来源于中国专利数据库（CPRS）。

## 变桨系统全球专利申请态势分析

为分析变桨系统全球专利申请态势，本节重点关注全球专利申请趋势和重要申请人排名两个方面。

### 一、申请趋势

图 1 显示了风电机组变桨系统专利全球申请量的走势，大致可分为三个阶段：

（一）技术积累期（1970 年—2005 年）

1970 年，出现了首件关于变桨系统的专利申请，但从 1970 年至 2005 年，申请量总体上处于增长缓慢的状态。1978 年—1988 年，申请量达到了一个小的峰值，这得益于美国众议

院和参议院于 1978 年通过的风能政策法，确定 1978 年—1988 年国家风能开发计划。在此期间，美国企业提出了大量专利申请，使得这段时期的专利申请量出现了一次峰值。然而在 1988 年—1999 年这十年的期间，变桨系统的申请不仅没有增长，反而小幅回落。到了 2000 年—2005 年，变桨系统才开始重新得到了关注，专利申请量也有了小幅度增长。

（二）快速发展期（2006 年—2011 年）

从 2006 年至今，变桨系统技术得到了快速的发展，特别是在 2006 年—2011 年期间，申请量增长了数倍。这主要得益于 2006 年 1 月 1 日中国开始实施的《可再生能源法》，国家鼓励和支持可再生能源并网发电，从而使得中国的申请量出现了井喷式增长。这期间，中国申请人提交了大量相关申请。

（三）技术稳定期（2012 年至今）

在经历了快速的发展期后，到 2012 年后，风电机组市场出现短期饱和，专利申请量也出现了小幅回落，

但每年仍保持了较高的申请量水平。而 2014 年后的申请量数据受到公开滞后的影响，并不能准确反映真实申请量。

## 二、主要申请人排名

图 2 显示了风电机组变桨系统专利的全球申请人排名。在变桨系统专利领域排名前十的申请人中，中国企业仅占到了 3 席，且总申请量也远落后于国外企业。这显示出中国企业在风电变桨系统的研发和保护上已有一定的成效，但与全球范围内领先的企业相比仍有较大差距。此外，通用电气、维斯塔斯分别名列第一、第二，在申请量上并驾齐驱，这两家企业的申请量远远多于其他企业；西门子和三菱重工位列第三、第四。上述排名前十的申请人全部为公司，其余排名靠前的也均为公司或者研究机构，基本没有个人申请。可见变桨系统是一个技术水平要求和产业化较高的领域，个人很难进入。

## 变桨系统中国专利申请态势分析

为分析变桨系统中国专利申请态势，本节重点研究了变桨系统中国专利申请趋势、申请技术分布、国内外技术对比三个方面。

### 一、申请趋势

图 3 显示了风电机组变桨系统领域中国专利申请量的发展趋势。

1990 年，中国出现了首件变桨系统的专利申请。但从 1990 年开始至 2005 年，申请量总体上处于增长缓慢的状态，15 年间仅有 26 件。在这 15 年时间内，变桨系统的整体研发水平较低，成果较少。2006 年后，申请量出现了快速增长，尤其是 2011 年、

2012 年达到 200 件以上专利申请的顶峰，之后的几年也都一直保持着 100 件以上的申请量。这同样也主要得益于 2006 年 1 月 1 日中国开始实施的《可再生能源法》。2012 年后，这种趋势有所放缓。2013 年—2015 年，申请量出现了一定下滑。

### 二、技术分布

图 4 是变桨系统中国专利申请的技术分布及申请量走势。从图中可以看出，在中国申请的变桨系统专利中，以变桨装置总成和变桨控制方法居多，分别占 29% 和 25%，其次为变桨电控结构、安全和可靠性。从申请量走势来看，2004 年及以前，各大技术分支

的申请量均较少。早期的申请大部分涉及变桨装置总成，并且自 2005 年以来，变桨装置总成和变桨控制方法的申请量出现了较快增长。然而在 2011 年达到顶峰之后，变桨装置总成的申请量出现了大幅下滑，而变桨控制方法的申请量仍然保持了较高的水平；变桨电控结构、变桨轴承齿轮的专利申请量则在 2009 年开始增长，之后一直保持稳定；涉及安全及可靠性方面的专利申请在早期就有少量，而在 2007 年开始出现井喷，2011 年后至今更是成为重点关注的技术分支之一。

### 三、国内外技术分布对比

图 5 显示了变桨系统国内外专利

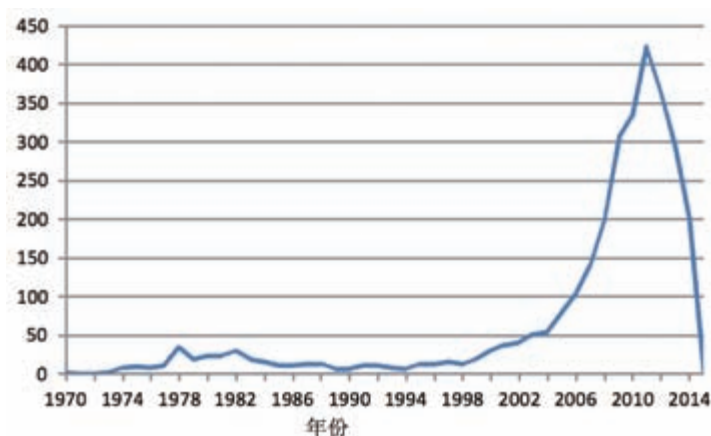


图1 变桨系统全球专利申请量走势

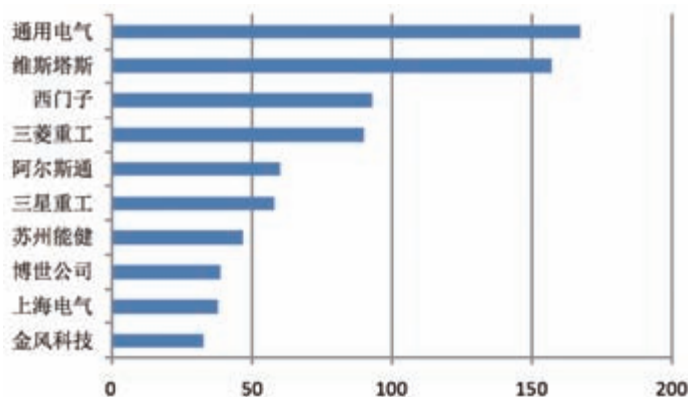


图2 变桨系统全球主要申请人

申请的技术分布对比雷达图，其中申请量按照百分计算。从图中可以看出，在变桨系统的七大技术分支中，国内外最关注的技术点不同。首先，国内申请人较为关注变桨装置总成，占总申请量的 26%；而国外申请人对变桨控制方法的关注远远超出了其他技术分支，占到总申请量的 43%。进一步对这些申请进行详细分析后可以看出，上述国内申请主要涉及变桨装置总体结构的改进，而国外申请更加关注独立变桨控制方法、根据信号执行变桨控制的方法等。其次，国外申请非常关注变桨系统在安全和可靠性方面的改进，涉及该方面的申请量所占比重很大，达到 21%；而国内对这方面的关注较少，仅占总申请量的 6%。另一方面，国内申请人较为关注的电控、液压变桨系统则少有国外申请。

综上所述，我们认为在此类专利申请上，目前国内与国外还存在一定差距。通过对变桨系统专利申请的技术分布走势进行分析可知，目前变桨系统的热点在于变桨控制方法以及安全和可靠性。国外申请人把握住了热点，十分注重对这两项技术分支的申请。而国内申请人则过于注重对于变桨装置结构的改进，对上述技术热点关注不足，特别是在安全和可靠性方面，国内申请人对这些技术分支的专利申请更是远远落后于国外。

### 独立变桨技术专利申请分析

随着风电技术的发展，机组容量越来越大，风轮直径也持续增大。由于风切变、湍流、扰动效应，塔筒的塔影效应，叶片的重力、离心力等因素使叶片载荷发生不规则变化的影响也随之加剧，叶片、轮毂、主轴、塔

筒等部件的疲劳载荷增加，降低了这些部件的寿命和机组的可靠性。另一方面，随着载荷测量传感器技术的发展，能够长期可靠测量机组上的载荷。通过独立变桨控制，以减小大型风电

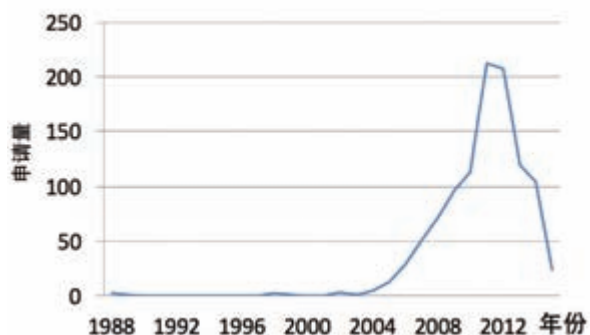


图3 变桨系统中国专利申请量走势

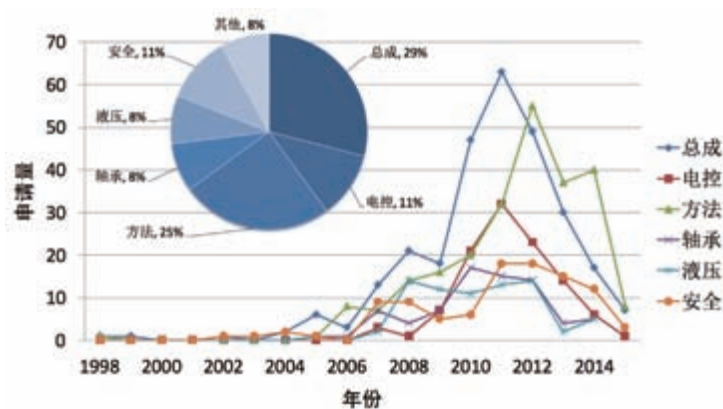


图4 变桨系统中国专利申请的技术分布及申请量走势

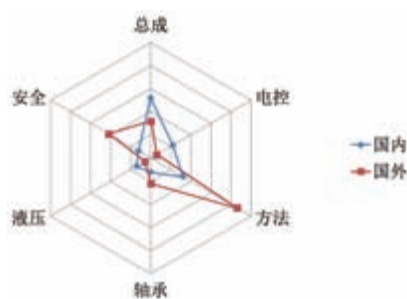


图5 变桨系统国内外专利申请的技术分布对比

机组各主要部件的疲劳载荷，比通过增加机械结构强度来提高设备的可靠性和寿命更经济实惠。2005年后，独立变桨技术的专利申请量有了显著增长。本节选取了变桨系统专利申请量在全球范围内排名前四的通用电器、维斯塔斯、西门子以及三菱重工，来具体分析它们的独立变桨技术专利申请情况。

从图6中可以看到，这四家公司均申请了独立变桨技术专利。特别是维斯塔斯公司，作为专门致力于风能利用研究的一家公司，以 32 件与独立变桨技术相关的专利申请量遥遥领先于其他公司。这主要是由于维斯塔斯公司供应的产品大部分为单机容量在

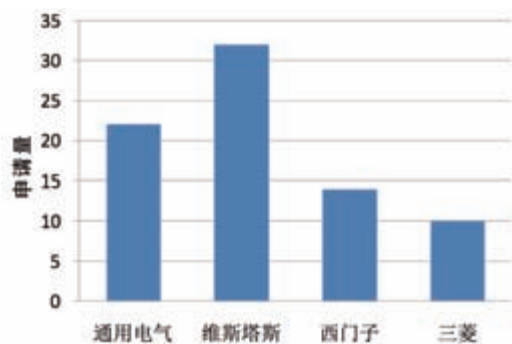


图6 四大公司全球独立变桨技术专利申请量

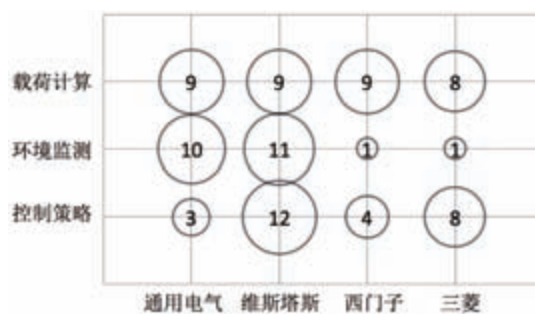


图7 四大公司独立变桨专利申请的技术分支情况

兆瓦级以上的大型风电机组，而目前绝大多数大型机组均采用了独立变桨技术。

图7显示了四大公司独立变桨专利申请的技术分支情况。经过对比分析发现，这些申请主要涉及三个方面：

1. 载荷计算。技术的主要作用是，在保证功率输出的前提下，降低运行过程中机组各部件的疲劳载荷。因此，对于各部件载荷的测量计算（或估算）是独立变桨技术的基础。通用电气、维斯塔斯和西门子公司均有9项与载荷计算相关的申请，可见这些公司十分注重对这方面专利的保护。

2. 环境监测。各桨叶所受风速、风向不同是引起载荷不平衡的主要因素，因此，对风速、风向进行实时监测，以及更加准确、有效地测定这些参数是独立变桨技术研究的重点方向。另外，对风电机组周围的噪声、桨叶的振动、塔架的侧摆、甚至是叶片上的结冰等环境因素进行监测，并通过独立变桨技术控制相应地消除这些不利因素也是独立变桨技术的一些具体应用方向。在环境监测方面，维斯塔斯、通用电气分别以11件、10件申请量名列前茅，而西门子和三菱重工在这方面的技术研发明显较为薄弱。

3. 控制策略。在获得风速、风向、载荷等参数后，还必须利用这些参数建立有效的模型，并通过相应的控制策略才能够实现更优化的控制。目前常用的模型中，线性模型相对简单，但是通常忽略了机组的部分特性；非线性模型则通常较为复杂，难以分析计算。而控制策略主要有基于模糊控制的智能控制策略以及基于叶片疲劳载荷的控制策略等。在这方面，维斯塔斯公司以12件申请量排在第一位，而三菱重工的大部分申请也均集中在控制策略上。

从各大公司的申请方向来看，通用电气主要关注载荷计算和环境监测两个方面，并且具有较强的竞争力；而维斯塔斯在三个方面的申请量十分均衡，并且均为第一或并列第一；西门子主要致力于载荷计算方面的研发，另外在控制策略方面也有少量布局；三菱重工则在控制策略方面有一定优势，对载荷计算、环境监测的研发涉足甚少。

## 结论

随着风电机组的整体结构、各部件结构增大，导致其承受的负载增大，

因此，能够实现降低不平衡载荷的变桨系统的应用也会更加受到如通用电气、维斯塔斯、西门子等全球各大风电厂商的重视，并在世界范围内申请了大量的相关专利。这些全球最强的风电厂商也不约而同地进入中国申请了大量变桨系统专利，构筑了一道道“壁垒”。而中国企业对变桨系统的研究还不够深入，仅仅停留在对变桨装置结构、部件的改进上，对变桨控制方法以及采用变桨系统提高机组安全性和可靠性等方面的成果仍然较少。独立变桨技术是变桨系统未来发展的一个必然趋势，想在独立变桨技术占有一席之地，对于各部件载荷测量与计算，风速、风向等环境因素的检测，以及基于线性非线性模型的模糊控制策略方面的基础研究都必不可少。而在这三个方面中，国内企业虽然与国外差距较大，但是国外企业也是近些年才获得了一些成果。特别是对于控制策略方面，由于其相比载荷计算以及环境监测更接近于技术理论与算法的研究，建议国内企业与各大高校共同合作，加强基础学科的研究，以期在独立变桨控制策略方面能够有所突破。☒（作者单位：国家知识产权局专利局机械部风力机械处）

丹麦是全球发展海上风电最早的国家之一，拥有丰富的开发经验。日前，丹麦能源署（Danish Energy Agency）发布报告，全面介绍了该国海上风电发展的相关经验，具有重要借鉴意义。本刊分两期刊登该报告，以飨读者。

## 丹麦海上风电开发的主要经验（下）

文 | 丹麦能源署

### 海上风电招标

丹麦议会以广泛多数通过了一项政治决议，到 2020 年，海上风电装机翻一番，陆上风电装机得到显著增长，确保丹麦 50% 的用电量源自风电。

通过海上风电招标程序，有望新增 135 万千瓦装机容量。招标程序高度开放、透明。

招标区域为海上风电空间规划过程中筛选出的场址。其他政府主管机构参与新建海上风电场址的筛选过程并批准最终报告，这是对该场址确定性的承诺。它反过来将为投资商提供保障，也可以使其了解场址信息。

在项目招标前的规划阶段，丹麦输电运营商负责开展环境影响评估、地质物理调查及一些岩土工程调查。对场址物理特征的深入研究有助于深化对场址的认识，帮助投资商深入了解在招标程序中可选取的技术方案。开展这些早期评估和勘察是为了缩短审批时间，帮助申请人提供基于实际成本的更优报价。与此同时，这些评

估和勘察行动还为竞标者提供高投资保障，进而削减风险。

前期地质调查的目的是，了解地质状况、二战时遗留下来的未引爆炸药及其他人为障碍、生物学特征及海底海洋考古物体的相关信息。

前期勘察将包含在环境影响评估报告中，以优化海底输电线路的规划和建造。此外，前期勘察还将提供风电场设计要求的信息，包括基础类型的选择。

前期勘察结果将在完成招标流程之前适时公布，相关成本则由取得特许经营权的企业承担。

与此同时，另外一个重要部分是海上升压站与海底电缆项目，输电运营商将负责该环节的规划、投资及采购。这必须在海上风电场建成和投运前完成。如果未完成，那么业主要求输电运营商提供赔偿。

Horns Rev III 和 Krieger's Flak 被视为是最适合进行公开招标的场址。这两个区域的平均风速达到 10m/s，良好的风况使得年满负荷运行

小时数有望达到约 4000 小时。由于场址的水深达 10m—35m，且与海岸相距 22km—45km，实现了经济性与海岸线视觉影响之间的平衡。

招标文件中将提供 4 项必要许可证草案：前期勘察许可证、海上风电场建设许可证、发电许可证及发电上网许可。

在完成招标程序后，被授予特许经营合同的企业或联合体可获得前期勘察许可证和海上风电场建设许可证。前期勘察许可证允许中标企业或联合体开展进一步的岩土工程和地质物理调查作为补充。

与此相类似，获得海上风电场建设许可证的企业或联合体能够开展详细的规划活动，进一步筹备最终项目。在启动建设工作前，最终项目必须获得批准。

此外，企业或联合体也需要获得在某一特定区域开发风资源以进行发电并网的许可。一般在建设工作启动后（不得晚于首台机组完成并网后）发放发电并网许可。此外，需要记录

建设许可证的相关条款遵守情况。

在并网前，必须获得发电上网授权许可，这需要企业具备一定的技术和财务能力。

以上提及的所有许可证均以许可证草案的形式包含在由丹麦能源署发布的投标规范中。

### 一、其他条件和要求

投标规范中还将指出，中标人须缴纳正常的公司税收，即不实施任何特殊税收规则。就保险要求来看，必须记录涵盖特许经营权持有人及其供应商的责任保险。

在最终授予特许经营权之前，需要落实风电场退役成本，或由母公司提供担保。

中标人可自行选择如何为海上风电场进行融资。由于中标人为风电场建设及运行提供资金的财务能力已经在资格预审过程中得到确定，主管机构不会提出进一步的融资要求。

这意味着主管机构并不了解投标人的详细商业案例假设，如资本支出、运营支出、风险溢价、内部收益率等。当特许经营权持有人或相关运营商签订基础、电缆和风电机组等的合同时，这些合同条款将作为商业机密，不向主管机构公开。

### 二、特许经营权持有人的典型公司结构

一般而言，中标人将注册一个特殊目的公司（SPV），即项目公司，其单一使命是建设、拥有和运营正在考虑中的海上风电场。

此类结构将放宽特许经营权持有人可能希望获取的有限无追索权融资（项目融资）。如果中标人为两家（或以上）公司构成的合资企业，参照油气行业，这些企业往往签署合资企业合同。在这种情况下，可指定一家运

营商来代表合资企业执行建设或其他任务。

### 三、近海风电场开发的新招标模式

由于位于更浅海域，且连接海岸的电缆线路更短，近海风电场的建设成本将更低。正在考虑的近海风电场址应至少与海岸相距 4km。

丹麦议会广泛多数通过了一项政治决议，将对 6 个近海风电场址（最大场址 20 万千瓦）总容量为 35 万千瓦的项目开展竞标。这些近海风电场址将展开相互竞争，因此，预计本轮招标活动仅开发不到 3 个场址。

从海岸可看到近海风电场，因此，项目获得当地支持十分重要。选择这 6 个区域的部分原因在于，项目业已获得了当地政府的大量支持。为了继续取得当地支持，要求特许经营权持有人为当地居民和企业提供至少 20% 的项目股权。为了进一步鼓励中标人取得当地公众支持，如果在并网之日社区股权达到 30%（及以上）的比例，该项目就可以获得更高上网电价。

海上风电场的送出工程由开发企业负责投资建设，并网费用将作为公共服务义务（PSO）费用，由电力用户承担。这主要是因为，在招标之前，风电场的规模或具体修建区域都是未知的。在这种情况下，最好将并网作为项目的一部分，由特许经营权持有人来负责并网和变电站规划，并承担相关成本。

输电运营商负责开展环境影响评估。在 6 个装机共 35 万千瓦的近海风电场的招标中，丹麦输电运营商 Energinet.dk 将开展前期勘查，包括地质物理和岩土工程调查、环境影响评估报告及海洋气象调查。

Energinet.dk 进行前期勘查后，将在整个招标流程走完之前适时发布

相关结果。这样，参加建设、拥有和运行近海风电场投标的企业能够了解建设条件和风险。

中标企业必须承担前期勘查成本，以及地质调查、海洋气象调查及环境影响评估报告的成本。相关成本规模将在投标书提交之前发布。

## 开放式项目

在开放式项目中，开发企业对在哪个区域建设海上风电场有一定的主动权。首先，企业须主动提交申请，获取在某一特定区域（空间规划过程中指定的风电区域以外的海域）开展前期勘查的许可证。申请中必须至少包含项目描述、前期勘查预期范围、风电机组大小和数量及项目所在地理区域选址局限等信息。

在着手处理相关申请前，丹麦能源署将对其他政府机构发起听证会，以澄清是否存在其他可能妨碍项目实施的重大公共利益。在此基础上，丹麦能源署决定申请区域是否可进行开发，如果许可开发，将为申请人发放开展前期勘查的许可，包括环境影响评估许可。前期勘查至少应包括环境影响评估、海底地质物理和岩土工程调查。环境影响评估则必须评估海上风电场对环境的影响。

在与其他主管机构及利益相关方进行初步磋商后，丹麦能源署将决定海上风电场环境影响评估应涵盖哪些内容。由于环境影响评估须核查整体项目，也包括必要的陆上基础设施，因此，由丹麦自然署和各属地政府作为陆上基础设施相关的环境影响评估主管机构。环境影响评估必须证明、描述和评估项目实施对以下方面造成的环境后果：人群、动植物、海床、水、

空气、气候和景观、有形资产和丹麦文化遗产。此外，还必须描述替代选址方案及如何预防或减少环境滋扰的方案。

开发企业建设海上风电场的申请中必须包含以下相关的完整描述：项目预期范围、规模、地理位置、风电机组坐标、并网方案和电缆路径等，以及前期勘查结果。

丹麦能源署收到环境影响评估报告及最终的海上风电场建设申请后，将发起至少为期 8 周的公众咨询活动，以征询公众意见。收集到的相关意见建议，将纳入项目开发申请的处理流程及环境影响评估中。如果未收到任何要求取消项目的有力反对意见，那么将发放海上风电场建设许可证。因此，丹麦能源署一般要求开发企业在启动建设工作前提供详细的项目描述。

最后，开发企业必须申请海上风电场开发风电的许可，如果风电场容量超过 2.5 万千瓦，还须申请发电授权许可。这必须在安装工作开始以后，首台风电机组投入运行之前的 2 个月内进行。在获得相关许可证之前，海上风电场不得向电网供应电力。这样一来，便可确保许可文件中的所有义务得到履行。

对于开放式项目，开发企业将获得与新安装陆上风电机组相同的上网电价。对于开放式及近海风电项目，开发企业还须支付送出并网工程的费用。

### 一、试验风电机组和示范项目

丹麦的海上风电发展计划还规划了 5 万千瓦的试验风电机组。试验项目不与指定区域挂钩，可位于任何条件允许的区域。此外，试验项目也不与特定风电机组挂钩，可用于测试新基础类型、安装方法及电缆等。试验

项目可包含 8 台风电机组。这些项目必须具有明确的技术发展目标，以降低未来海上风电机组的成本。

在此框架下，一个 2.8 万千瓦试验项目已获得特许经营权。此项目正处于建设中，将对一台 7MW 的风电机组和新型基础进行试验。该风电场在 50000 满负荷运行小时数之内的电价为 0.7 丹麦克朗 / 千瓦时。

## 电网和电力市场

丹麦建立了完善、高效的电力市场。目前已有 42% 的风电（在 2015 年用电总量中的占比）进入到电力市场，且未出现任何弃风限电情况。全面的规划，加上完善的市场机制，将确保丹麦到 2020 年，有近 50% 的风电进入到电力系统，同时还能保障高度的电力供应安全。

### 一、电网、电价和结算，如何发挥作用

丹麦是北欧电力合作的创始成员国之一。北欧电力合作发起于 2000 年之前的电力行业垄断时期，彼时，如果两国发现存在共同的经济利益，那么双方将开展电力交流合作。如果某国的边际电价为  $x$ （两者更高），而另一国的边际电价为  $y$ （两者更低），那么交流电价为： $y+(x-y)/2$ ，即平均划分差价。

自 2000 年起，所有欧盟成员国均实现了电力市场自由化改革，这一进程推动了北欧电力市场 Nordpool 的形成。目前，北欧电力市场已发展得愈发成熟，可交易多种产品。Nordpool 由北欧各国输电运营商联合所有，实时市场（日前市场）被视作是全球流通性最大的电力市场，售电方和购电方以受监管

的平衡市场为支撑，通过日间市场实现整体的交易平衡。

有必要指出的是，正是由于电力市场自由化改革前后的跨境交易，丹麦与邻国建立了强有力的电力互联关系。从理论上来说，既然互联电力系统容量如此之高，那么丹麦几乎可进口所有用电量（某些最高峰值时段除外）。更多的跨境互联电力系统容量正在建设当中，因为这是能够接入不断增长的陆上和海上风电等波动性可再生能源电力的重要前提。

### 二、输电运营商

根据欧盟的要求，丹麦成立了独立输电运营商，它们不得拥有或运行发电资产。这些运营商的一个重要职责是，确保透明、非歧视性的日前市场，即所谓的市场组织者。独立输电运营商拥有和运行高压电网（132 kV—400kV）及与邻国的电力互联系统，目前完全为国有，按照自己制定的战略性前景规划，以强有力的项目管理能力新建丹麦的输电基础设施。

在丹麦电力部门结构下，所有发电均完全商业化，而配电则为一项受监管业务。可再生能源优先并网为新能源企业提供保障，确保按照现有并网规则出售和输送电力。如果出现弃风现象，那么独立输电运营商有义务完全赔偿因弃风导致的收益损失。

### 三、海上风电并网

在丹麦（及德国），独立输电运营商负责规划、采购、安装、运行大型海上风电场的并网工程，并承担相关费用。并网模式的优势在于能保持高压电网的电气性能完整性，因为责任由独立输电运营商承担。这也意味着，并网和风电场的环境影响评估责任由独立输电运营商单方承担，因此可将

两者相结合。

## 海上风电的经济性

丹麦海上风电发展的宏观经济驱动因素自政府部署风电项目以来，陆上风电经历了巨大的技术发展。目前，陆上风电成为最廉价的可再生能源发电技术，5年内，对一些理想场址的风电场来说，有望在不依靠政府补贴的情况下实现盈利。

海上风电有望取得与陆上风电一样的显著发展成果。丹麦海上风电发展的优势如下：

- 丰富的陆上和海上风资源；
- 在风电领域具有先发优势；
- 风电行业将带来大量就业机会，且可实施出口；
- 陆地资源有限，且人口相对密集；
- 拥有很长的海岸线（>7300km）及丰富的浅海水域。

丹麦海上风电场实施的上网电价高于目前的电力批发市场平均电价。这一差价体现在公共服务义务（PSO）费用中，由所有电力用户承担。

丹麦与其他欧盟国家居民电价的比较结果表明：丹麦的所有商业电力用户可免除能源税，某些重工业则可进一步享受其他能源税豁免。因此，不应将以上居民电价与商业电价混淆。

丹麦电价高的部分原因在于收取的税收和 PSO 费用较高。

丹麦的能源价格本身在所有国家中是最低的。丹麦选择通过电价来支付可再生能源补贴，但其他国家则并非如此，这在某种程度上加大了对比难度。丹麦是根据用电量来分担相关成本的，这种方法可能是最公平的。目前，丹麦决定逐步将可再生能源的

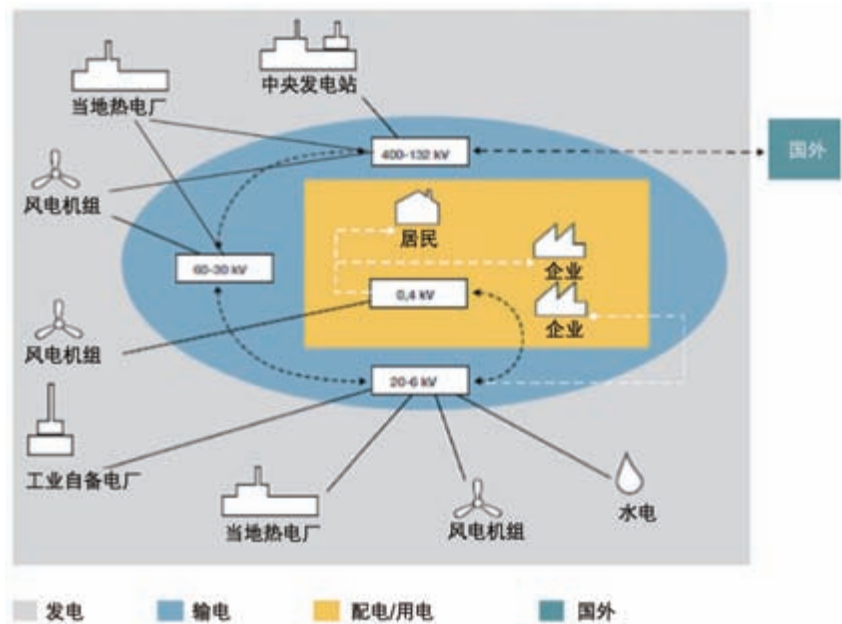


图2 丹麦的电网结构

融资补贴转移到年度财务法案。

## 投资环境

当前，致力于开发海上风电场等的企业业务已遍及全球。这意味着其投资策略将基于以下内容：

- 盈利性最好同时风险最少的投资机遇在哪里？
- 最具保障性、稳定的监管框架在哪里？
- 他们如何设计具有均衡风险的项目组合（而非孤注一掷）？
- 风力条件、海底状况、离岸距离、与其他资产的协同效应等。

由于海上风电的监管框架在某种程度上存在相互竞争关系，因此，丹麦能源署竭力向国际受众宣传该国的投资机遇。如果希望项目取得成功（及时完成，以最佳方案运营），最佳保障

就是吸引具有配套策略、能力最强的开发商的最好方式。

随着海上风电行业的发展和成熟，欧洲正力求吸引新型投资商的加入，即养老基金等机构投资者。养老基金一般具有很强的风险规避性，但其往往选择投资具有稳定收入和低风险的长期资产。

通过与电力公司等经验丰富的行业投资商建立创新伙伴关系，机构投资者开始设法解决内在风险问题。在首个此类合资企业中，机构投资者仅在试运行取得成功后才加入，但是目前，机构投资者有信心承担部分建设风险。

丹麦海上风电项目对养老基金的一个吸引力在于，由于历届政府对稳定的框架条件作出了长期承诺，海上风电项目的收入是长期、稳定且确定的，几乎为零风险。（全文完）



澳大利亚很多风电企业在开发风电的过程中，努力与当地社区建立长期互信的良好关系，实现投资者和当地社区利益的双赢，这已成为澳大利亚风电行业发展壮大的关键因素之一。

## 浅析澳大利亚风电行业发展中的社区参与

文 | 叶井龙

澳大利亚可再生能源非常丰富，政府对可再生能源的利用非常重视，并一直致力于研究发展高效先进的可再生能源技术。同时，澳大利亚政府也重视提高公民意识，并组织各方面的力量研究与制定能源扶持与激励政策，搭建并整合自由的能源供应与消费市场。澳大利亚目前风电市场规模虽然很小，但其风能资源丰富，开发利用潜力很大，是澳大利亚可再生能源发展的重点领域。澳大利亚大部分风能资源分布在沿海地区，南部沿海尤其丰富，内陆地区风力不强。由于塔州、维州、南澳、新州及西澳的风能资源丰富，风电项目开发主要分布在这些区域，其风电累计装机容量保持稳步增长。

目前，澳大利亚约 12% 的电力来自可再生能源，2015 年澳大利亚联邦政府最新提出的可再生能源发展目标为：计划到 2020 年，20% 的电力来自太阳能、风能等可再生能源，2020 年要实现可再生能源发电量目

标为 33000GWh。该可再生能源目标 (RET) 法案的通过，使连续数月、前景不明的可再生能源政策迎来了希望的曙光，鼓舞了企业向风电等可再生能源领域投资的积极性。优良的社区关系与成熟的技术优势一样，对于企业在澳大利亚开发投资风电的作用是同等重要的，风电企业需说服所在的社区，解释风电的发展会给他们带来好处以获得社区同意，同时政府也希望社区能够积极参与企业的开发活动中，通过社区参与对企业开发投资风电给予支持，进一步吸引更多投资，促进风电行业发展，完成可再生能源目标。

本文重点介绍澳大利亚风电场的生命周期、社区特点，阐述了风电行业社区参与的基本原则、IAP<sub>2</sub> 模式的社区参与方法和制定社区参与计划的步骤，并列表分析社区参与在各阶段的实施目标、关键步骤和方法手段，这些社区参与的方法和步骤不仅能实现风电投资者和社区参与者间的互惠

互利，而且对促进澳大利亚风电行业发展、完成可再生能源目标具有重要意义。

### 风电场的生命周期

开发风电场需要考虑到一系列综合因素，包括风能资源质量、与土地所有者谈判，并网成本，对当地设施、环境、遗迹的影响以及风电场对该地区带来的益处等。只有开发申请被相关部门授权批准，风电场才可能开工建设，建成的风电场通常将运营大约 20 年后退役，此后风电场将被恢复到未开发前的状态。图 1 描述了风电场生命周期的 6 个阶段以及每个阶段的时间跨度。

第一个阶段，即选址阶段，主要是确定未来的风电场场址以作进一步调查研究，该阶段需要考虑的三个重要因素是：风能资源、与并网点之间的距离、周边社区的人口密度。一旦场址被选定，开发者将会与愿意参与



图1 风电场的生命周期

该项目的土地所有者商讨风电场的概念，他们会开展一些关于风电场限制因素的调查，比如濒危物种、文化遗址或附近机场等。

第二个阶段，即可行性研究阶段，为了确定该场址是否具有可行性，开发者需进行测风，以弄清该风电场的发电能力。为确保具有使用土地的权利，他们与相关土地所有者联络、会谈，并签订进入该土地测风的合同，通常，同时把该土地用来开发风电场的内容作为合同备选项。测风时间一般持续至少一年或多年，如果测风数据显示风能资源较差，该场址可能将被放弃。

第三个阶段，即规划和批准阶段，该阶段将开展一系列的调查和研究来评估风电场的益处及影响，这些研究也是项目开发申请的一部分。评估的调查结果会介绍影响风电机组数量的限制条件、风电机组类型和风电机组定位。详细的评估报告考虑的因素有：环境影响、并网可行性和成本、当地设施如噪音和视觉影响、文化遗址、电磁干扰和对航空的影响等。风电场规划设计是一个持续而且反复的过程，比如当新限制条件出现时，就需要对风电场布局进行修订和发电量重新模拟。评估是为了将现场影响的全面信息呈递给权力部门，使得风电场能够满足相关的规划要求。当土地使用发

生变化时，项目开发者需向相关部门的决策者（地方市政、州、联邦）提交规划申请，然后由决策者审核申请并决定是否授权批准开发。审核批准项目的耗时和过程在不同层级和地区的政府会有很大差异。如果获得政府授权的风电场规划许可，开发者既可能会立即开工建设，也有可能等待很长一段时间待经济条件好转后才正式开始建设，还有可能将开发权卖给其他有能力的公司来建设。

一旦项目规划被批准，开发者不仅要与风电机组供应商进行谈判，还要与风电场道路和电气设备的各方联系人进行会谈。规划被批准后将不再允许风电场布局出现变化。然而，在特殊情况下，对少量已被批准的机位进行微调是被允许的。开发商还将会与不同的售电公司谈判比对，并最终签订一份购电协议（PPA），以便将来出售电力获得项目利润。

第四个阶段，即建设阶段，该阶段包括土木和电气工作、风电机组吊装、风电机组最终调试和并网。土木工作涉及到场区道路、吊车起重坪、现场办公楼和风电机组基础等环节；电气工作则涉及到升压站、集电线路电缆沟等建设。风电机组吊装从塔筒开始，用吊车将三至四节塔筒吊起并通过顶部螺栓连接上一段塔筒，随后

起吊机舱、轮毂和叶片。

第五个阶段，即调试和运营阶段，当风电机组吊装完毕后，将进行全面调试和质量考核，最终确保风电机组并网向外输送电能。运营阶段的典型工作内容包括给轴承添加润滑油、部件更换和维修等。风电场一般运营寿命约为20年，主要雇用当地员工从事风电场运维工作。

第六个阶段，即退役阶段，当风电场完成其生命周期时，它将被拆除或者退役。土地所有者会要求从水泥基础上拆除所有风电机组，并用表土进行覆盖，以确保能继续从事正常的农牧业活动。风电场退役过程将涉及使用大量车辆将风电机组部件运离现场，这需要有详细的交通管理计划来描述运输路线和期望的车辆数。当退役工作结束后，所有运输道路需被修复到先前状态。

需注意的是，截至目前尽管在澳大利亚没有风电场退役情况，但风电场退役是项目所有者必须应尽的责任。

## 澳大利亚的社区特点

社区参与的含义是社区居民自觉自愿地参加社区各种活动或事务，表达自己的意见和建议，并影响权利持有者决策的行为。其最初的内驱力是来自于对利益或民权的追求。它是社区居民自觉自愿地参加社区各种活动或事务的过程。社区参与是一种公众的参与，意味着社区居民对社区责任的分担和成果的共享，它使每一个居民都有机会为谋取社区共同利益而施展和贡献自己的才能。

澳大利亚社区的地理范围与地方政府管辖的范围相一致，大的社区有

9万多人，小的社区只有几百人。澳大利亚社区的独特性在于它的管理机构，其地方基层政府就是它的社区管理部门，设在州和地区以下，有的叫市（city），有的叫镇（town），有的叫地方议会（local council），还有直接叫社区（community），我们把它统称为市。它们是澳大利亚最低层次的社区事务管理机构，直接面对社区居民，在居民与市政府之间再没有中间机构。也就是说，澳大利亚市政府的职能与运作方式完全类似我国的居民委员会，所不同的是澳大利亚市政府还是基层政权，而我国的居民委员会是居民的自治组织。澳大利亚社区管理制度保障了社区居民民主管理与参政的权利，所有居民都有权参与市政府的决策，也有权参加市政议会。市政府必须保证社区的所有成员均在生活中都享有平等机会，都可以平等地参与市政府的决策、服务和计划等活动。因此社区中每个居民在社区管理中具有较大的参与权、知情权、管理权和监督权，以便帮助市政府在社区管理上准确和有效地做出决策。

## 澳大利亚风电行业的社区参与分析

在澳大利亚风电发展过程中，社区参与活动始终贯穿于风电场的整个生命周期，在项目开始建设前的很长一段时间，社区已经开始形成对项目的感知和态度，因此风电开发者积极主动地介入社区参与活动能够减少社区居民对风电支持的不确定性，并降低开发者的风险。如果项目早期阶段社区参与不足，很有可能会导致项目的失败。

在完成最佳实践之前，需要

理解风电行业社区参与的四项基本原则，即公开性（Openness）、包容性（Inclusiveness）、响应性（Responsiveness）和责任性（Accountability），所有社区参与的各个方面必须在总体框架范围内服从这四项原则。全球很多国家的社区、政府和风电开发者们所引用的是由公众

参与国际协会（IAP<sub>2</sub>）建立的框架模式，以此来确保影响风电开发和社区的政策都能够多方组织的尊重和参与下实施。IAP<sub>2</sub>模式概述了不同级别的参与活动对社区不同程度的影响，该模式展示的方法有：告知（Inform）、咨询（Consult）、介入（Involve）、合作（Collaborate）和授权（Empower）。



图2 IAP<sub>2</sub>模式的社区参与方法



图3 制定社区参与计划的五个步骤

每个方法对其社区的目标、核心承诺以及实施方法示范如图 2 所示，开发者将根据每个社区的需求、项目生命周期的每个阶段来选择方法。

社区参与活动必须在项目建设开始前很早一段时间就开始进行，因为社区关系和态度是在任何项目早期就开始逐渐成形的。由于这个原因，在风电项目被批准前，开发者们必须从最初阶段开始就要制定出社区参与计划。可以说，风电项目的成功与否完全取决于开发者与社区之间的良好信

任关系，因此，建立一份完善的社区参与计划是项目成功的关键因素。确定一份社区参与计划共有五个关键步骤，包括发现（Discover）、分析（Analyse）、建立（Develop）、实施（Implement）、监督（Monitor），每步之间是相互关联的，每个步骤都需通过不断学习来确保持续改进，构成一个完美的循环。制定社区参与计划的五个步骤如图 3 所示。

风电行业社区参与计划制定完成后，将结合实际情况逐步实施。风电

场生命周期的 6 个阶段中，社区参与活动贯穿于每个阶段，社区参与在各阶段的目标、关键步骤及方法手段如表 1 所示。

## 结束语

风能作为一种清洁的可再生能源，已经造福于世界各国人民。在投资开发风电的过程中，如何让当地社区和居民了解、熟知、认可和支持发展风电，并调动积极性参与到风电发展，让他

表1 澳大利亚风电行业社区参与目标、步骤和方法

阶段		社区参与的目标	社区参与的关键步骤	社区参与的方法和手段
1	选址阶段	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 了解目标区域的社会环境</li> <li>* 与潜在的各利益相关方接触</li> <li>* 与各利益方互动并建立一种项目正面积极的印象，但需知该项目可能无进展</li> <li>* 准备应对回复任何相关问题</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 开展物理、环境和社会环境资料调查。（包括本土动植物和生物多样性、设施和交通条件、人口密度等）</li> <li>* 与土地所有者、当地市政或规划部门接触，讨论景观、噪音、健康、土地价值、叶片闪烁等方面的影响</li> <li>* 确定保密等级</li> <li>* 提供本阶段适合的沟通渠道</li> <li>* 提供清晰实时的调查状况信息给各利益方</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 识别、了解和记录潜在各利益方</li> <li>* 基准社区研究</li> <li>* 与各利益方一对一咨询</li> <li>* 与各利益方电话联系</li> <li>* 建立公开对话的沟通渠道</li> </ul>
2	可行性研究阶段	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 主动识别、沟通与项目相关的所有潜在利益和影响</li> <li>* 建立社区沟通渠道便于社区提问及答复</li> <li>* 收集社区相关信息，尤其是社区关注点和期望点</li> <li>* 开诚布公地管理公众期待</li> <li>* 获得该项目的社区支持</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 向社区介绍项目，并提供准确及时的项目状态信息</li> <li>* 制定社区参与计划，并开始实施</li> <li>* 继续调查和报道社区利益相关问题：本土动植物和生物多样性、景观、噪音、健康、土地价值、叶片闪烁等方面的影响</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 完成各利益方的确认和信息了解</li> <li>* 与确定的各利益方一对一咨询</li> <li>* 面谈和调查</li> <li>* 电话连线</li> <li>* 网站</li> <li>* 广告</li> <li>* 社区权益参研社</li> </ul>
3	规划 & 批准阶段	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 维持社区沟通渠道便于社区提问及答复</li> <li>* 收集关于项目的意见和期望，并解答相关问题</li> <li>* 通过主动沟通来避免沉默期</li> <li>* 继续担任社区中能够建立信任和建设性关系的积极主动的成员</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 建立机制收集和响应来自社区的有关项目规划的意见</li> <li>* 实时告知社区有关项目规划和递交的最新信息</li> <li>* 建立更加主动的参与机制</li> <li>* 按需审核并更新社区参与计划</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 一对一咨询</li> <li>* 房屋开放日</li> <li>* 电话连线</li> <li>* 网站</li> <li>* 社区权益参研社</li> <li>* 现场参观</li> <li>* 社区活动中心</li> <li>* 社区伙伴关系探索</li> </ul>

( 转下页 )

(接上页)

阶段		社区参与的目标	社区参与的关键步骤	社区参与的方法和手段
4	建设阶段	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 通过承认和回应相关问题来减少社区的紧张和忧虑</li> <li>* 通过对社区利益和忧虑问题的公开和响应来获得公众信任</li> <li>* 表明对社区福利的承诺</li> <li>* 避免、减少或修复项目建设带来的负面影响</li> <li>* 寻求建设过程带给社区的机会和利益</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 预先告知社区有关项目时间表、地点等，并保持信息更新</li> <li>* 与社区沟通项目对社区发展的积极贡献</li> <li>* 审核各利益方的确认信息</li> <li>* 实施更积极的参与方法，尤其是投诉管理机制、公开工作框架、报告参与过程和结果</li> <li>* 监督、评估和报道因建设引起的重大影响</li> <li>* 按需审核并更新社区参与计划</li> <li>* 考虑为感兴趣的团体提供参观建设现场的机会（如学校、社区团组等）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 审核各利益方的确认信息</li> <li>* 一对一咨询</li> <li>* 房屋开放日</li> <li>* 电话连线</li> <li>* 网站</li> <li>* 社区权益参研社</li> <li>* 现场参观</li> <li>* 社区活动中心</li> <li>* 社区伙伴</li> <li>* 投诉管理机制</li> </ul>
5	调试和运营阶段	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 成为社区中积极的成员</li> <li>* 通过相关伙伴加强社区合作</li> <li>* 表明对社区福利的承诺</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 建立伙伴与合作关系</li> <li>* 保持现有的社区参与活动</li> <li>* 监督、评估和报道项目业绩</li> <li>* 按需审核并更新社区参与计划</li> <li>* 为社区成员提供项目现场参观机会</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 社区合作伙伴</li> <li>* 社区权益参研社</li> <li>* 投诉管理机制</li> <li>* 房屋开放日</li> <li>* 一对一咨询</li> <li>* 电话连线</li> <li>* 网站</li> <li>* 现场参观</li> <li>* 社区活动中心</li> <li>* 审核各利益方的确认信息</li> <li>* 定期监控成效</li> <li>* 审核社会基线调查</li> </ul>
6	退役阶段	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 减缓公众的压力和忧虑</li> <li>* 给社区创造机会来提出问题、期望和忧虑</li> <li>* 承认并响应任何问题</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 预先告知社区公众有关项目退役计划，并保持信息更新</li> <li>* 收集利益各方信息，并作出回应</li> <li>* 建议合作伙伴在项目退役后如何继续投资</li> <li>* 按需审核并更新社区参与计划</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 社区合作伙伴</li> <li>* 社区权益参研社</li> <li>* 投诉管理机制</li> <li>* 一对一咨询</li> <li>* 电话连线</li> <li>* 网站</li> <li>* 现场参观</li> <li>* 审核社会基线调查</li> </ul>

们也能享受到风电发展带来的福祉，是风电开发投资者们不得不面对的课题。2015年7月，澳大利亚可再生能源目标（RET）法案的通过，让澳大利亚国内外很多风电企业重新看到了可再生能源领域投资的希望，在现实中，社区居民的需求和利益在投资者追求利益最大化的同时往往被忽略，

甚至历史上还存在过风电项目遭到当地社区强烈反对而失败的情况。因此，在澳大利亚风电投资开发、建设运营过程中，社区参与是必不可少的重要一环，当地社区是否支持风电发展可直接决定项目的成败。澳大利亚很多风电企业一直在寻找多种方式来说服当地社区，风电发展会给他们带来好

处，同时他们也在努力实现投资渠道的多样化，在保障当地社区居民权益的同时实现投资利益的最大化。可以看出，与社区建立长期互信的良好关系，努力实现投资者和当地社区利益双赢，已成为澳大利亚风电行业发展壮大的关键因素之一。 (作者单位：乌淖斯风电控股有限公司)

# 第二届机械润滑暨设备健康管理 国际高峰论坛

2017.8.14-16

中国·郑州

国际知名

1

行业专家

世界先进

2

行业企业

汇聚行业

3

先进润滑技术

业内极具规模

4

润滑与设备健康管理研讨会

风电发展在不同阶段有不同的需求与任务，风电教育也要与时俱进。在多元化教育体系初步建立以后，如何根据教育的不同特点选择好教育模式、确定好教育内容、设置好课程、编写好教材以及提高鉴定能力是当前的主要任务。

# 风电工程教育砥砺前行，助推风电产业快速发展（上）

文 | 王华君，岳大为，李洁，张琨

截止到 2016 年底，中国风电累计装机容量达到 1.69 亿千瓦，而 2006 年中国累计风电装机容量才 259.9 万千瓦。10 年间中国风电产业的快速发展有诸多关键因素推动，但风电工程教育人才的助推作用功不可没。

## 风电工程教育发展回顾

中国现代风力发电技术的开发利用起源于 20 世纪 70 年代初，其专业人才多数是通过其他行业如机械、电气等转行或者进行相关的培训而来，最早的科研机构“内蒙古锡盟风能利用研究所”建于 1978 年，主要研制小型风力发电机和风力提水机。而高校的风电科研和教育始于上世纪 80 年代，如沈阳工业大学和兰州理工大学。中国风电领域研究生教育起步早于本

科及职业教育，以大学设立的风电研究机构为主。新疆农业大学成为全国高校中最早开办风电工程方向本科教育的单位之一。学校从 2005 年开始从电气工程专业中设置风电工程方向。2006 年，中国教育部将风能与动力工程专业设置为在少数高校试点的目录外专业，批准华北电力大学率先开设风能与动力工程本科专业。

中国风电工程教育的发展得益于风电行业协会的大力支持和推动，中国可再生能源学会风能专委会名誉主任贺德馨认为：“我们已经初步建立了一个风电教育体系，无论是本科教育、研究生教育还是高等职业教育。风电发展在不同阶段有不同的需求与任务，风电教育也要与时俱进。在多元化教育体系初步建立以后，如何根据教育的不同特点选择好教育模式、确定好教育内

容、设置好课程、编写好教材以及提高鉴定能力是当前的主要任务。”

## 风电产业对人才的需求状况

风电产业是一门涉及电气、机械、控制、计算机技术、通信及电力系统、气象学、流体力学、材料等多学科的新兴行业。风能人才需要具备上述学科与风电工程相关的基本理论知识，并至少深入掌握其中一门学科的理论体系和实践能力。

根据对中国某风能人才招聘网站 11 家中外风电企业，近 6000 招聘岗位 2017 年 4 月份招聘情况统计，风能人才招聘的学历结构较 2009 年有很大变化。

图 2 所示为 2009 年风能人才招聘学历层次情况，中国风电产业刚起



图1 “2013 年风能教育专题研讨会”代表合影

步发展，相应人才培养能力不足，以本科、专科人才为主。

2017 年在风能人才招聘网站上，各风电企业招聘人才学历情况如图 3 所示。

图 4 所示为 2009 年统计风电产业所需人才的专业结构，中国风电产业刚进入起步阶段，风电产业主要以风电设备制造业为主，所需人才专业结构与今天并没有明显不同。图 5 所示为 2017 年风电招聘岗位专业需求分布情况，从中可以看出，在风电产业风电机组研发与制造、风电场运行与维护及变电站值班运行等主要环节中，风电人才主要集中在电气、机械、发电厂运行、机电一体化、自动化、风电、安全工程、计算机、管理及数学与力学等专业。

全球风能理事会（GWEC）发布了《2016 年全球风电发展展望报告》，预测到 2020 年风电累计市场达到 8.79 亿千瓦；到 2030 年风电累计市场达 21.1 亿千瓦；到 2050 年累计市场容量达 58.06 亿千瓦。参考德国风电人才需求状况，按 37 人/万千瓦从业人员标准，到 2020 年全球风电领域就业人数为 325 万人，其中中国有 2 亿千瓦风电装机，就业人数将达 74 万人，其中

的 40%，约 29.6 万人 of 高端技术人才。

## 风电工程教育基本模式

中国的风电工程教育的基本模式

主要有研究生教育、本科生教育、职业（专科）教育及继续教育（非学历教育）。有一部分高校在培养风能研究生人才的基础上，开展风能本科人才的培养，在风电工程领域开展本科和研究生多层次教育，二者相互促进，培养风能人才的规模不断扩大，形成了风能人才教育的主力军。

### 一、风电工程研究生教育

中国风能领域研究生的培养始于 20 世纪 80 年代，早于风电工程本科和职业教育，主要为相关风电研究机构培养高级研究开发人才。较早进行研究生培养的高校主要有重庆大学、沈阳工业大学、浙江大学、新疆大学、河海大学、汕头大学、大连理工大学

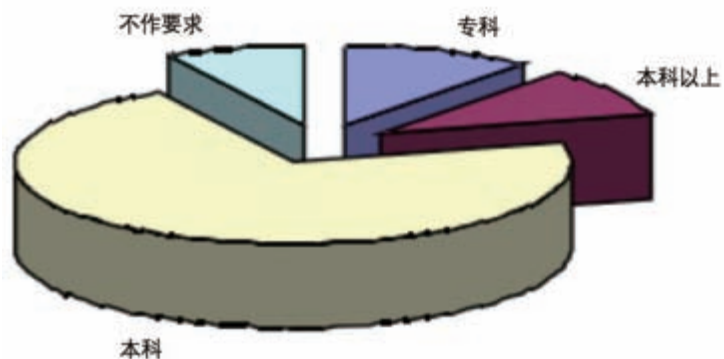


图2 风能科技人才学历层次分布（2009年）

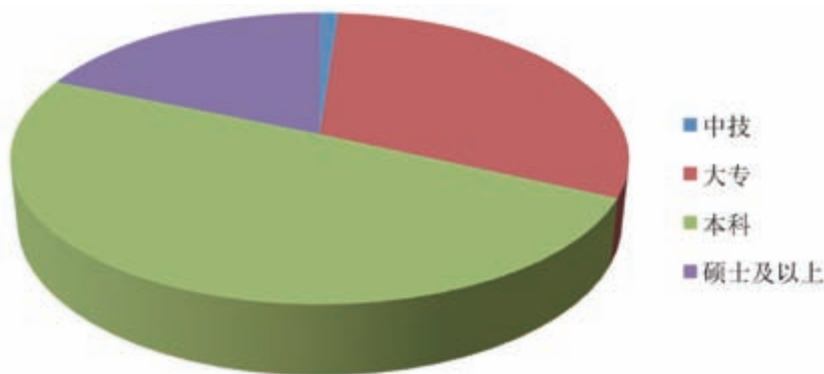


图3 风能科技人才学历层次分布（2017年）



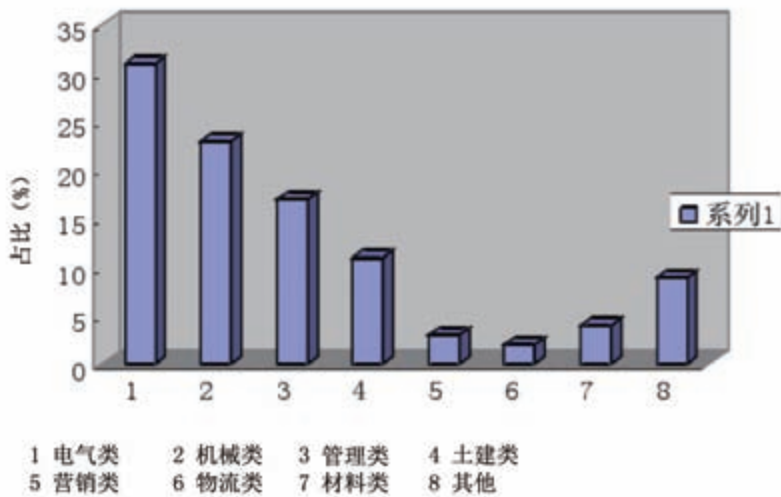


图4 风能科技人才专业结构调查分析图 (2009年统计)

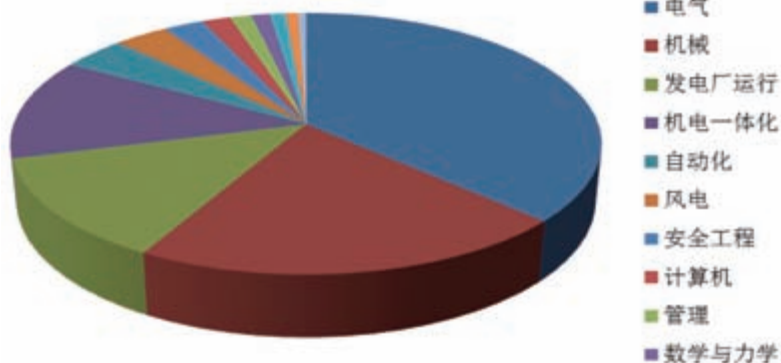


图5 风能产业人才需求专业结构分布 (2017年)

色字体), 占 20.11%; “控制类” 学科专业 2 个 (绿色字体), 占 13.11%; “管理类” 学科专业 3 个 (黑色字体), 占 8.09%。

### 二、风电工程本科生教育

中国开设“风能与动力工程”专业的本科院校有华北电力大学、河海大学、河北工业大学、长沙理工大学、兰州理工大学、内蒙古工业大学、沈阳工业大学等 16 所院校。2006 年, 华北电力大学率先创办了第一个“风能与动力工程”本科专业, 学科性质为工科, 学制 4 年。随后风电工程本科教育逐渐呈现规模化的发展趋势。本科教育逐渐发展成为风电专业人才培养的一个主要途径。

中国风能本科教育从 2006 年开始起步, 2008 年开始在多个高校展开。截止到 2012 年共有 16 所高校设立了“风能与动力工程”专业, 2013 年, 该专业与“新能源科学与工程”专业合并。到目前为止, 有 86 所高校设立了“新能源科学与工程”专业, 其中 29 所高校主要培养风能本科人才。这 29 所高校可划分为两类, 第一类培养专业型风电人才, 主要从“电气与控制”“机械与电气”及“流体机械与电气”等方面知识结构上侧重; 第二类“新能源科学与工程”专业, 培养风能人才为主兼顾光伏发电。还有少数高校 (未统计) 在电气学科设置了风能专业方向, 开设必要的风电专业课、结合相关学科的基础, 基本能够胜任风电电气工程师的专业技术工作。

### 三、风电工程职业教育与非学历教育

风电产业发展速度远远大于人才供给能力, 大型风电整机制造商通过企业内部的非学历教育, 采用现场教

等工科院校。截止到 2016 年底, 中国开展研究生教育的高等院校约 110 多所。根据中国博硕士学位论文数据库检索统计, 较早开展风电工程博硕士研究生教育的学校主要有 37 所。培养风电研究生最早的大学为重庆大学, 培养风电研究生最多的大学为华北电力大学。

风能研究生教育涉及的学科专业面很宽, 且呈现为某个学科为主多学科复合的特点。风能领域博士硕士研

究生, 主要从事与风电工程密切相关的理论问题和工程技术热点问题研究。表 1 统计的为中国高校从事风能研究生教育的相关学科专业分布情况, 研究生撰写的学位论文数量情况直接反映出与风能技术的相关度。


从表 1 中看出, 与风电工程领域相关的学科专业, 主要集中在 4 个“电类”学科专业 (红色字体), 占 57.28%; “机械类”学科专业 6 个 (蓝

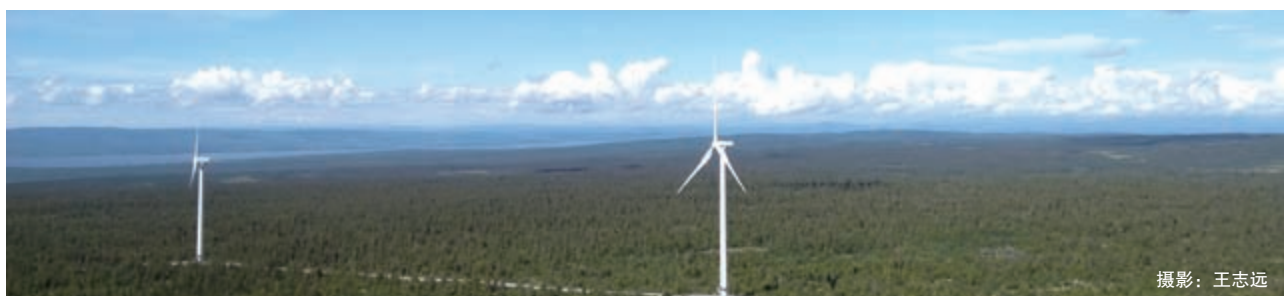
表1 中国高校从事风电研究生教育的主要相关学科专业分布

序号	学科专业名称	论文数量	学位论文分布比重
1	电力系统及其自动化	1740	25.55%
2	电力电子与电力传动	1030	15.13%
3	电气工程	793	11.65%
4	控制理论与控制工程	677	9.94%
5	机械设计及理论	440	6.46%
6	电机与电器	337	4.95%
7	管理科学与工程	278	4.08%
8	机械电子工程	273	4.01%
9	检测技术与自动化装置	225	3.30%
10	控制科学与工程	216	3.17%
11	机械制造及其自动化	213	3.13%
12	企业管理	200	2.94%
13	机械工程	152	2.23%
14	热能工程	94	1.38%
15	技术经济及管理	73	1.07%
16	流体机械及工程	67	0.98%
总计		6808	100%

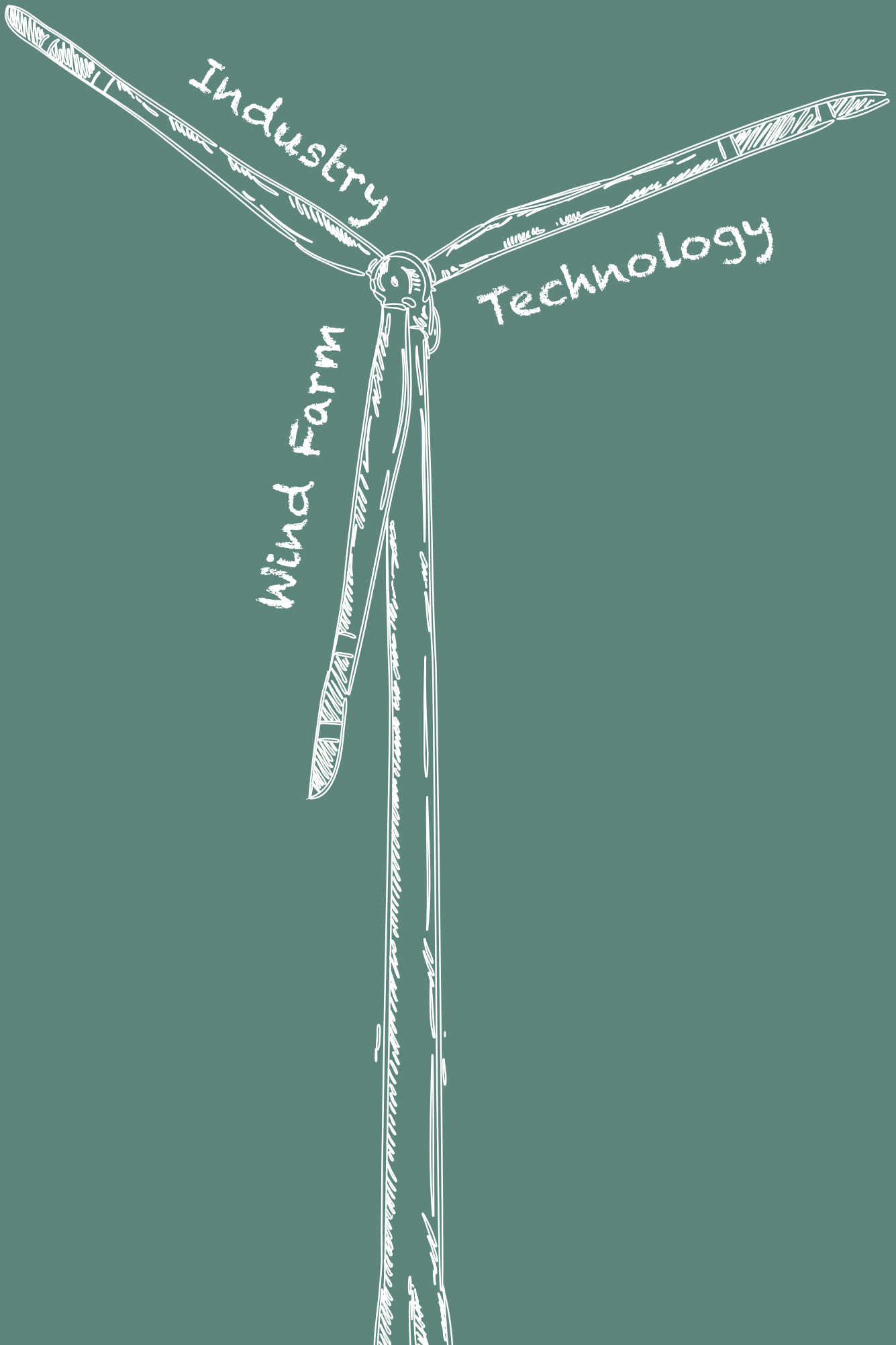
学、专题培训等，对来自于风电相关专业的工程技术人才通过培训和不断进修的方式，提升风电专业知识和工程实践能力，从而其快速地解决了人才不足问题。

风电非学历教育主要为风电企业的内部培训，旨在为公司储备人才以及提升风电企业员工素质。

金风科技股份有限公司等专门成立了自己的大学，形式也有所不同。风电行业发展特点使在职人员素质考核缺乏标准，员工从学历教育到企业实践缺少一个转换过程，员工防范风险意识不强，企业人才合作培养不够；另外，目前企业更多地需要贯通多门综合学科技术、懂得管理的复合型人才。在企业生产实践的基础上，金风大学设立了一个岗位胜任模型，即将企业知识按照一定结构整理出一个总体脉络，并按照不同级别分类标准，梳理各个类型知识细节，最后按岗位序列划分出管理、整机装配、服务、研发等序列，并建立每个岗位的胜任模型。为了突出在职培训的特点，金风大学的在职培训体系强调实践导向、内部培训为主和自主学习三大原则，尤其是自主学习需要通过岗位认证，内部岗位资格认定又与薪酬挂钩，这样也可以激励员工自主学习。（未完待续）（作者单位：河北工业大学新能源科学与工程系）



摄影：王志远



Industry

Technology

Wind Farm

## 产业

SPM750 模块及其附件包装探讨

## 风电场

风电场后评估对运行工作指导作用的研究

## 技术

海上风电机组技术路线分析及对策

风电机组中的轴电流分析

风电机组用高强度紧固件扭矩系数的实测分析

浅谈海上风电防腐技术应用及优化方案

# SPM750模块及其附件包装探讨

文 | 汪静, 李长青

包装是电子产品进入流通领域中必不可少的一道工序,是产品生产过程中的重要组成部分,进行合理包装是保证产品在运输、存储和装卸等流通过程中避免机械物理损伤,确保其质量而采取的的必要措施。

电子产品属于技术密集型产品,随着科技的日益进步,电子元器件由电子管发展到晶体管、集成电路,直到如今的超大规模集成电路。电子零部件的尺寸越来越精细,电路板的走线越来越复杂,越来越细小,因此,电路板或电子整机产品对外界环境的要求也越来越高。其主要原因:一是电路板或电子产品内部构造复杂,零部件生产精密,不能承受外力冲击、磕碰;二是电路板怕潮湿,受潮后,大量水汽会浸入电路板形成水渍,造成短路,或使金属接口氧化;三是怕灰尘、油脂,灰尘、油脂的进入会妨碍电路板接点间的电流传导,污染内部线路,影响内部零件,造成损害;四是怕静电,过大的静电会击伤电子产品内的一些电子元件,造成零部件短路,最终直接损害整个机器;五是怕高温,过热的高温环境不但会使电子产品的外观致损,也会使内部的一些零件性能不稳,直接影响产品的使用功能。

SPM750变流器采用三相电压型交—直—交双向变频器技术,核心控制采用四个DSP+2个CPLD方式进行控

制及数据处理,DSP与DSP之间进行数据通信。同时数据可从变流器模块传送到其他控制器。SPM750变流器具有输入输出功率因数可调、自动软并网和最大功率点跟踪控制等功能。

变流器模块作为风电机组核心部件之一,在运输、存储过程中,需要特别注意模块的包装防护。变流器模块重量约120kg。长×宽×高=970mm×478mm×466mm,为确保模块在运输和存储过程中得到有效的防护,下面将详细介绍模块主体及其附件的包装工艺。

## SPM750 模块主体包装设计

### 一、箱罩和底盘制造

(1) 用含水率在20%以下的干燥新木料制作,木方刨光滑。板厚公差为 $\pm 0.5\text{mm}$ ,木方截面尺寸公差为 $\pm 2\text{mm}$ ,其余尺寸公差为 $\pm 3\text{mm}$ 。

(2) 箱体内部空尺寸为:长1140mm×宽620mm×高550mm。

(3) 箱罩顶板内侧衬1210mm×690mm×0.2mm整张防水膜,防水膜可以是PVC膜、PE膜、防水彩条布或铝塑膜,用射钉枪钉

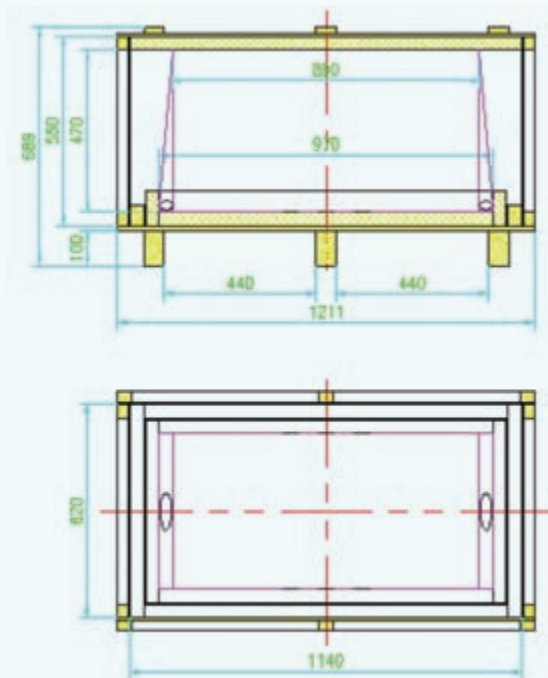


图1 包装箱体

10mm×8mm U形钉，布钉间距100mm左右，要均匀牢固。

(4) 胶合板与木方之间钉1.5英寸铁钉，加4mm×20mm U形钉钉牢固，箱罩的侧板、端板、顶板相互之间钉3英寸铁钉，底盘的底板与滑木之间、挡框木方之间、挡框木方与底板之间都钉3英寸铁钉，布钉间距150mm左右，要均匀，不歪斜，牢固可靠，露出的钉尖打弯入木。

(5) 箱罩四个棱角钉90mm×25mm×0.4mm铁皮加固，间距均匀。

(6) 在箱体的两个侧面印刷LOGO标志，按国家标准 GB191 印刷“向上、易碎、怕雨、堆码三层”储运图示标志。

## 二、防水、防震制作

用0.1mm厚透明PVC薄膜下料，采用热融法压接成袋形，长度公差为±5mm。折叠成A4纸张大小，装入315mm×240mm自封塑料袋，每个包装箱配一个防水袋。

用强力胶将各块珍珠棉板粘合成盒子形状。

## SPM750 主控板包装设计

用9mm厚胶合板制作SPM750主控板防震包装箱，按BZ163-00-00-00明细表下料，下料尺寸偏差为±1mm。将下胶合板用4mm×20mm U形钉钉成箱体和箱盖板，布钉间距40mm左右，要均匀牢固，箱体四角处用2寸铁钉再加固，确保箱体内空尺寸为：长462mm×宽262mm×高75mm。箱盖与箱体用ST3×10木螺钉安装2副2寸合页和1副2寸箱扣，保证盒盖开合自如。在箱盖板正中央印刷LOGO、向上、易碎、怕雨、堆码五层

等储运图示标志。

用泡沫胶将各块珍珠棉板粘接成盒子形状，或者将底盒每块珍珠棉粘贴在箱体内壁。用0.05mm厚透明防静电膜制作，剪一块长1000mm、宽310mm防静电薄膜，对折，采用热融法压接两边，形成袋形，压接宽度为5mm。

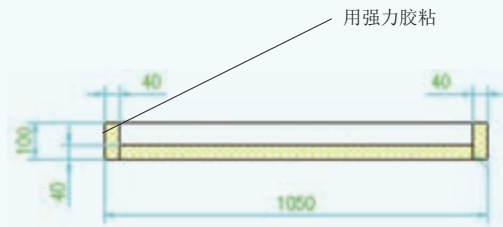


图2 防震珍珠棉板

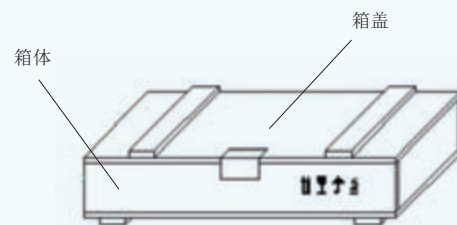
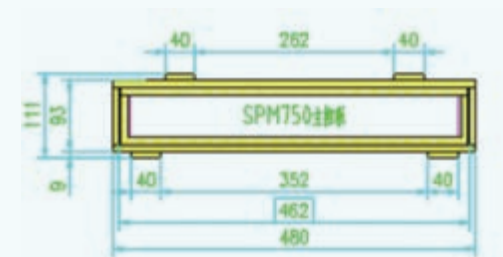


图3 主控板包装盒

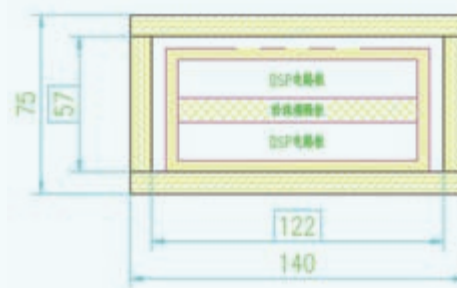


图4 DSP板包装盒

## SPM750 模块 DSP 板包装设计

将两块DSP电路板夹一块珍珠棉防震隔板，对齐，装入防气泡膜包装袋里，放一包20克干燥剂，将袋口折叠，用宽胶带密封袋口，然后平整地放进盒子中。



图5 IGBT炸裂



图6 进出水口

## 不良包装影响分析

案例 1：内蒙古库伦风电场 22# 风电机组返修模块更换完成后，进行手动并网测试，并网瞬间，变流器模块炸裂，经检查，发现模块直流母排正负极短路，母排烧损严重，机侧 A 相 IGBT 炸裂。

案例 2：湖南仰天湖风场 17# 风电机组返修模块更换完成后，现场工程师发现模块在垂直安置完毕后，模块母排上有水迹。经后续检查，确认模块在返修检测完之后，没有将水冷却散热板内的防冻液排干，模块进出水

口没有采取任何的保护措施，因运输过程中颠簸，导致残留水分流到母排表面，并使部分电路受潮。

振动、受潮、静电、密封——这四个因素直接影响电路板的使用。

通过在包装设计中，添加减震材料，如珍珠棉板、泡沫塑料、气泡塑料薄膜、气泡片材、瓦楞纸板衬垫等。

防止电路受潮的方法，一方面要封闭进出水口，另一方面还要放置干燥剂。通过在进、出水口处，添加橡胶堵头的方式，避免残留水分流出。干燥剂选用变色硅胶即可。

通过将电路板放置在防静电袋内，

防静电袋具有独特的三层结构，可形成感应罩效应，以保护内产品与静电场隔离。另外，最里面一层由可消除静电的聚乙烯组成，可以防止在袋内产生静电。这种防静电袋是透明的，从外面就可清楚辨认内部物品表面的电阻值。

由于风电场一般地处偏僻，风沙、杨絮、油污、水汽等，会直接影响到电路板的使用。因此，模块的包装在密封性方面，必须要引起重视。SPM750 模块在包装前，会套防水袋。主控板和 DSP 板通过防静电袋和气泡塑料薄膜包装，能够达到防水、阻氧、避光、防潮的目的。目前，中车风电库房 SPM750 模块备件已采用此款设计，变流器主体及其主控板附件，均已批量应用此包装。对比 2015 年变流器及其附件故障率，2016 年变流器主体故障率下降 16%，主控板及其附件故障率下降 7%，产品质量水平稳步提高。

## 结语

通过对 SPM750 模块、主控板、DSP 板的包装设计，从防震、防潮、防静电、密封的维度，制定对应的处置措施，避免电路在包装、运输过程中，电路板发生碰撞、受潮、污染、静电破坏等问题，进一步提升模块及其电路板的使用效果。◀

（作者单位：中车株洲电力机车研究所有限公司）

**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)





# 风电场后评估对运行工作指导作用的研究

文 | 王靖程, 敖海, 李育文, 姚玲玲, 杨旭

后评估是项目建设的一个重要阶段,通常用于分析项目决策时确定的目标和项目完成后各项指标的差异,为决策者提供参考依据。风电项目的后评估起步较晚,在风电项目大规模建设逐渐完成后,越来越多的风电场存在发电量无法达到预期值、项目投资收益难以确保的问题,引起了各方的广泛关注。

传统的风电场后评估项目多从项目的设备选型与采购、建设规模与发电能力、施工情况、项目投资、运营成本、项目销售及经济效益等方面对风电项目进行评估,评估结论主要作为决策参考,为后续项目的建设积累经验。

为了确定风电场实际运行指标是否达到项目设计时确定的目标,全面、准确地了解全场风电机组运行的经济性、可靠性以及不同风电机组性能之间的差异,为风电场决策者在后续管理和机组维护方面提供理论指导和数据分析依据。本文对某风电场可研数据、测风塔数据和SCADA系统数据进行了全面分析,对机组运行状

况进行了综合评估,结果表明该风电场可行性研究报告中的发电量设计值相对保守,且因设备可利用率低、实际功率曲线未达到设计功率曲线等原因,导致风能资源条件好的机组发电效率反而偏低,最后从机组可利用率和功率曲线两方面针对性地提出了发电量提升建议和相关措施。

## 测风数据分析

某风电场可研报告显示,风电场空气密度为 $1.219\text{kg/m}^3$ ,70m高度风速数据与气象站数据相关性较好,修订后的代表年80m高度年平均风速为6.2m/s,年平均风功率密度为 $181.8\text{W/m}^2$ ,代表年80m高度主风能出现在SE—SSE方向,其次是N方向,主风能和主风向方向基本一致,风电场年等效负荷小时数为1818小时,折减系数选取如表1所示。

2015年该风电场发电量9644.47万千瓦时,上网电量为9289.61万千瓦时,年等效负荷小时数为1548小时,显著低于设计指标。为进一步分析2015年

风电场运行情况,对2015年全场测风数据、机组运行统计数据 and 故障数据进行了收集整理,并开展了分析评估。

风电场测风塔与可研阶段测风塔位置一致,统计2015年全年测风数据,并经过完整性检验和合理性检验后,得到2015年度70m高度年均风速为5.23m/s,年平均风功率密度为 $146.5\text{W/m}^2$ 。根据可研报告的风剪切系数,按0.1推算到80m轮毂高度,则80m高度年均风速为5.33m/s,年平均风功率密度为 $152.6\text{W/m}^2$ ,风能资源情况明显下降。风向测量数据分析表明,风电场主导风向出现在N和SE方向,而风能主导方向则集中在SSE方向,与可研数据基本一致。对各机位2015年10min风速数据进行统计,统计结果与全场风能资源数据分析结果相同,2015年度各机位年均风速均低于可研设计值。

根据风电机组风速和标准功率曲线推算,得到的年等效负荷小时数约为1426小时。风电场实际发电量与理论值相比偏差为7.88%,大于-4.8%—5%的不确定度,因此需进一步进行分析评

表1 风电场发电量折减系数

风电机组利用率	气候因素影响修正	空气密度修正	风电机组功率曲线修正	尾流影响修正	控制和湍流强度影响	盐雾及叶片污染影响	场内能量损耗	综合修正系数
95%	3%	无	95%	5.79%	3%	3%	4%	74.5%

估。

### 折减系数分析

根据风电机组风速和标准功率曲线推算2015年全场风电机组理论发电量为11488.60万千瓦时，实际发电量为9644.47万千瓦时，占理论发电量的83.95%，高于可研报告中给出的77.6%的折减系数（不考虑厂内能量损耗修正）。2015年全场实际上网电量为9289.61万千瓦时，占理论发电量的80.86%，高于可研报告中给出的74.5%的综合修正系数。由此可知，可研报告中的综合修正系数偏低，低估了风电场的发电能力。

对每台风电机组2015年实际可利用率进行统计后可知，2015年全场风电机组实际平均可利用率为95.83%，略高于可研中95%的利用率。同时了解到，2015年风电场未出现因台风、凝冻、暴雪等恶劣天气导致的全场长时间停机现象，因此气候因素影响修正系数为0，低于可研报告中3%的修正系数。

设计阶段采用的是87m风轮直径的风电机组，其额定风速为12m/s，而风电机组实际风轮直径为93m，额定风速为11m/s。根据SCADA系统采集的2015年风电机组功率曲线可以看出，大部分风电机组功率曲线相对标准功率曲线向左偏移，因此风电机组功率曲线修正系数应远高于设计值。

根据2015年度上网电量和实际发电量计算可知，场内能量损耗率为3.68%，低于可研报告中4%的场内能量损耗。

因风电场实际机位与设计机位一致，机组尾流影响、控制和湍流强度影响及叶片污染均按设计值考虑。

综上所述，采用1%的风电机组功率曲线修正系数修正风电机组功率曲

线后，综合修正系数为80.8%，与2015年80.86%的实际综合修正系数接近。按照81%的综合修正系数计算代表年等效负荷小时数，结果为1997小时，由此可知风场的理论发电量提升裕量约为960万千瓦时。

### SCADA数据分析

对2015年每台风电机组的10min平均风速及标准功率曲线进行计算，得到每台风电机组全年的理论发电量，并与实际发电量进行比较，定义风电机组发电效率为实际发电量与理论发电量的比值，结果如表2所示。

可以看出，#4、#30、#23、#29、#19、#20、#12风电机组的发电效率大于90%，#28、#9、#13、#6、#15、

表2 全场风电机组2015年理论发电量与实际发电量比较

风电机组号	理论发电量	实际发电量	风电机组发电效率
#1	447.57	371.10	82.91%
#2	414.98	352.71	84.99%
#3	424.11	342.64	80.79%
#4	338.07	328.69	97.23%
#5	384.94	336.80	87.49%
#6	422.14	324.69	76.91%
#7	434.16	344.65	79.38%
#8	390.61	327.31	83.80%
#9	424.64	317.29	74.72%
#10	387.01	324.06	83.73%
#11	371.91	332.93	89.52%
#12	373.98	337.06	90.13%
#13	416.05	319.93	76.90%
#14	395.01	314.58	79.64%
#15	382.19	296.30	77.53%
#16	361.98	298.21	82.38%
#17	385.24	316.43	82.14%
#18	391.59	304.49	77.76%
#19	331.04	312.28	94.33%
#20	340.68	319.43	93.76%
#21	377.26	318.20	84.35%
#22	382.23	309.70	81.02%
#23	338.36	320.88	94.83%
#24	358.37	312.44	87.18%
#25	374.63	308.26	82.28%
#26	373.16	301.35	80.76%
#27	391.13	319.32	81.64%
#28	414.80	299.51	72.21%
#29	330.97	312.74	94.49%
#30	329.78	320.50	97.19%
平均值	382.95	321.48	84.40%

#18、#7、#14风电机组发电效率小于80%，其余风电机组发电效率在全场平均值附近。因此，将#4、#30、#23、#29、#19、#20、#12划为发电效率优等风电机组，将#28、#9、#13、#6、#15、#18、#7、#14划为发电效率劣等机组，其余风电机组划为发电效率中等机组。为了进一步分析不同类机组发电效率差异的原因，对风电机组2015年可利用率、发电时间、偏航时间、停机次数、切入次数、偏航次数等运行参数进行了统计，并画出各台风电机组发电效率与风功率密度的关系图，如图1所示。

由图1可以看出，风功率密度大的机组，发电效率反而低，发电效率优等组的风电机组平均风功率密度为 $150.72\text{W/m}^2$ ，发电效率劣等组的风电机组平均风功率密度为 $182.69\text{W/m}^2$ ，而发电效率中等风电机组的平均风功率密度为 $173.92\text{W/m}^2$ ，说明发电效率劣等机组的风能资源条件比发电效率优等机组的风能资源条件好，但没有发挥其风能资源的优势条件。

从各项运行统计参数的分析可知，发电效率与可利用率基本成正相关关系，发电效率劣等机组的平均发电时间最短，且平均启动准备时间最长，从而可知设备可靠性是导致发电效率劣等机组发电效率低的主要原因。进一步分析表明，发电效率劣等机组的平均故障时间是发电效率优等机组的1.93倍，是发电效率中等机组的1.85倍，且平均停机次数、平均维护时间、平均维护次数均明显高于发电效率优等和发电效率中等机组。统计各等级故障停机次数可以看出，发电效率优等机组、发电效率中等机组、发电效率劣等机组的全年平均故障次数分别为517次、719次、986次。对全场

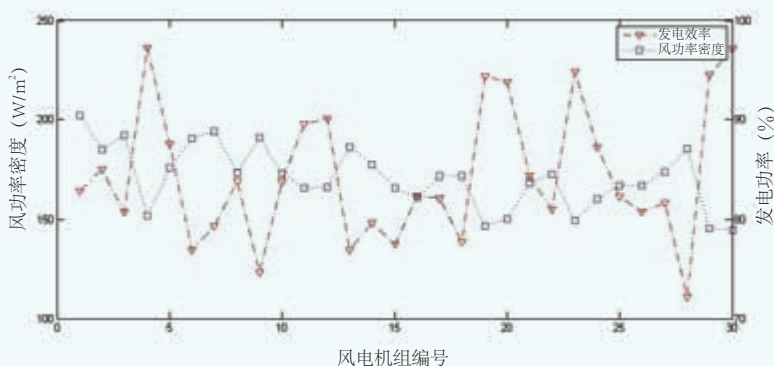


图1 各台风电机组发电效率与风功率密度关系图

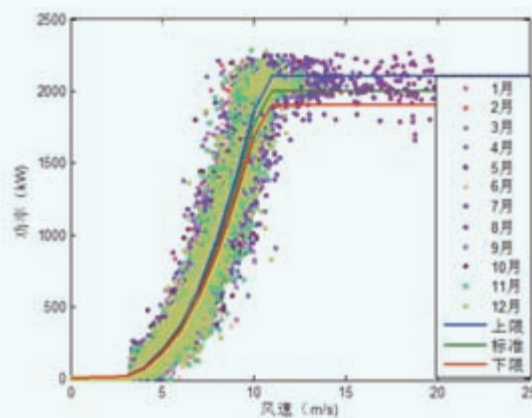


图2 #4风电机组功率曲线

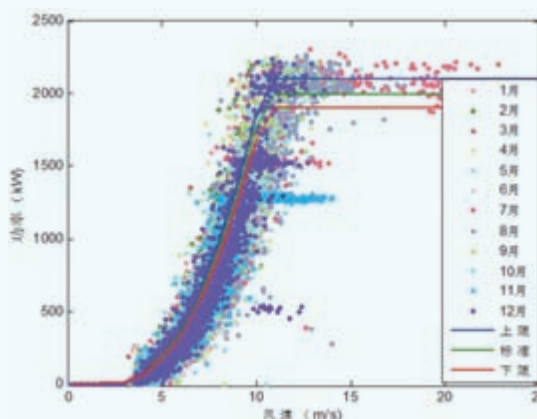


图3 #9风电机组功率曲线

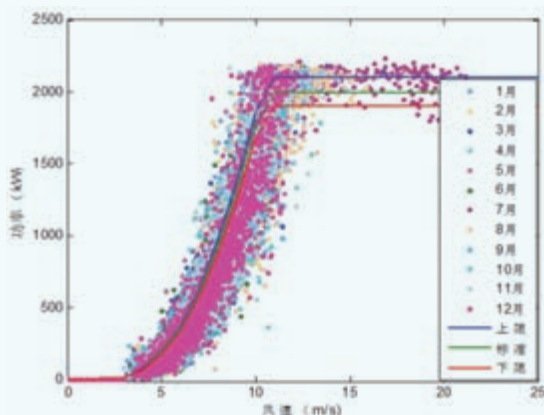


图4 #13风电机组功率曲线

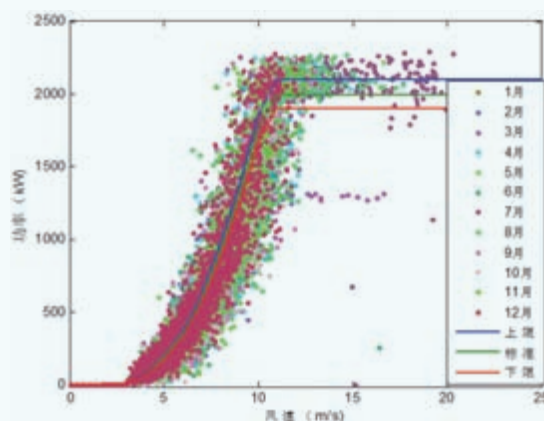


图5 #14风电机组功率曲线

主要故障统计表明，发电效率劣等机组的主要故障与全场机组出现最频繁的故障重合，主要表现为变桨与主控间通信问题、风速风向标故障和变频器系统故障。若消除发电效率劣等机组的主要故障后，每台风电机组平均年发电量可提升约3.36万千瓦时。

将发电效率优等的#4机组与发电效率劣等的#9、#13、#14机组的功率曲线进行对比后发现，优等机组功率曲线明显好于其他机组，如图2—图5

所示。#4风电机组在额定风速以下的功率曲线散点图重心在标准功率曲线附近，机组满发功率略高于标准功率曲线；发电效率劣等机组在额定风速以下的功率曲线散点图重心低于标准功率曲线。其中#9风电机组在11、12月存在限功率，与风电场人员确认为#9风电机组变频器易出现过流超温故障，因此进行手动限功率，影响了机组发电量。

通过对测风数据、折减系数和

SCADA数据的分析可知，该风电场风能资源可利用小时数较高，因此，保证机组运行、提高机组可利用小时数，是提高全场发电量的主要途径。在消缺维护和备品备件供应上，风电场应按照风电机组的风能资源情况设立优先级，优先保证风能资源较好的风电机组维护的及时性。对部分风电机组的主控与变桨系统通信故障、变频器系统故障、风速风向仪故障等频发故障进行集中消缺，以此减少风电机组故障停机时间，提高发电时间和发电量。对功率曲线较差机组，应开展叶片零位校准工作，并加强变流器清灰除尘，减少超温限功率次数。

## 结论

通过对风电场的运行状态进行分析评估，可定量分析风电场的提效潜力。某风电场的后评估工作表明，该风电场存在一定的理论发电量提升裕量，发电效率劣等机组的风能资源条件比发电效率优等机组的风能资源条件好，但没有将风能资源优势转化为电量优势，发电效率劣等风电机组的可利用率较低、实际功率曲线未达到设计功率曲线，导致其发电效率偏低。

开展风电场后评估工作，不仅可以帮助决策者判断风电场现有发电能力和潜在发电量，明确工作重心和方向，而且通过定量计算，有助于风电场运维人员了解运维工作的重点和意义，指导运维工作向更加高效的方向推进。☑

（作者单位：王靖程，李育文，姚玲玲：西安热工研究院有限公司；敖海，杨旭：华能新能源股份有限公司）

# 海上风电机组技术路线分析及对策

文 | 孙成刚，车三宏，邓方林，刘畅

随着风能资源的大规模开发，陆地上经济可开发的风能资源越来越少，全球风电场建设已出现从陆地向近海发展的趋势。与陆地风电相比，海上风电具有风能资源丰富、发电利用小时数高、不占用土地、不消耗水资源和适宜大规模开发的优点。因此，海上风电已经成为未来风电开发的主战场。

但是，海上风电不只是陆上风电的简单延伸，而是一项独立的、高度复杂的技术开发，具有自身特殊的环境条件。海上气候环境恶劣，高温、高湿、高盐雾等因素对风电机组防腐性能提出了更高的要求。同时由于海洋环境的特殊性，海上风电机组维护非常困难，运维成本也远远高于陆上风电场。因此，产品可靠性是决定海上风电产品成功与否的关键，而如何选择一款环境适应性强、可靠性高、运维成本低的风电机组，也就成为了海上风电建设的关键。本文结合机组的应用情况，对风电机组技术路线进行了对比分析，并提出了一些应对措施。

## 风力发电系统的主要类型

目前兆瓦级并网型风力发电系统都采用变速机型，这样可以实现变速恒频发电和最大风能的跟踪。变速型风力发电系统按照有无齿轮箱增速，可分为直驱、半直驱和多级增速型；按照所用功率变换器与发电机容量的大小关系，可分为全功率变流型和部分功率变流型。表 1 列出了目前市场上变速型风力发电系统的主要机型。

### 一、直驱风力发电系统

直驱永磁风力发电系统结构图如图1所示。所采用的永磁同步发电机转子为永磁结构，无需外部提供励磁电源，提高了效率。永磁发电机发出的频率变化的交流电通过交—直—交并网变流器转变为电网频率的交流电，因此变流器的容量与系统的额定容量相同。采用永磁发电机可做到与发电机的直接耦合，省去齿轮箱，即为直接驱动式结

构，大大减小了系统运行噪声，提高了可靠性。由于运行转速低，致使发电机体积增大、成本增加，但由于不使用价格昂贵的齿轮箱，所以系统的总成本有所降低。

### 二、多级增速风力发电系统

多级增速风力发电系统在风力机与发电机之间增加了一个 3 级增速齿轮箱，将风力机的转速提高到了发电机同步转速附近（6 极发电机为 1200r/min），因此发电机的体积可以大大缩小。应用于多级增速风力发电系统的发电机主要包括双馈异步风力发电机、高速永磁同步风力发电机和鼠笼式异步风力发电机三种。

双馈风力发电系统结构示意图如图 2 所示。发电机定子直接接入电网，转子通过一个功率变换器与电网相连，通过控制转子电流的幅值和频率，实现变速恒频发电。由于变

表1 变速型风力发电系统主要机型

类型	齿轮箱类型	发电机类型
直驱	-	永磁同步发电机
半直驱	中速齿轮箱	永磁同步发电机
多级增速型	高速齿轮箱	永磁同步发电机
		双馈异步发电机
		鼠笼异步发电机



图1 直驱永磁风力发电系统

流器接在转子侧，只需要转换转差功率，因此变流器容量相对发电机容量较小，一般为发电机容量的 30%—40%。这就大大降低了变流器的体积、重量和成本。

高速永磁同步发电机的“高速”是相对于直驱永磁的低转速而言的，定子绕组接全功率变流器。它与双馈异步发电机的主要区别在于，其转子采用永磁体励磁，减少了励磁损耗，效率高；省去了滑环系统，故障率降低，可靠性提高。高速永磁风力发电系统结构示意图如图3所示。

鼠笼异步发电机与双馈异步发电机相比，转子采用鼠笼式铜棒结构，省去了滑环系统。发电机最大的特点是结构简单，质量容易实现。由于风速的不断变化，风力机以及转子的转速也随之变化，所以发电机发出的电能频率也是变化的。因此，在定子绕组与电网之间增加一个变流器环节，先整流再逆变就可以把频率变化的电能转换为与电网频率相同的恒频电能送入电网。这种方案实现了变速恒频，具有变速运行范围宽的优点，适用于风速变化较大的环境，而且维护简便。

### 三、半直驱风力发电系统

半直驱风力发电系统只采用一级或两级齿轮增速，例如 1:20 增速齿轮箱。这种技术可以使齿轮箱和发电机的体积都有所减小，是直驱风力发电和多级增速风力发电方案之间的折中选择。图4为半直驱永磁风力发电系统结构示意图。

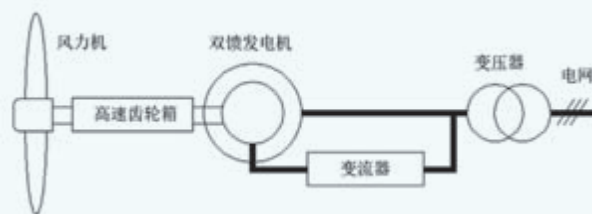


图2 双馈风力发电系统

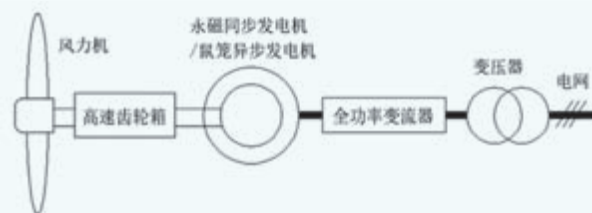


图3 高速永磁/鼠笼异步风力发电系统

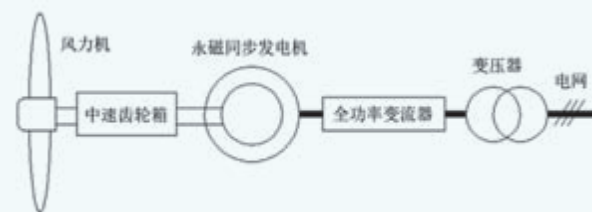


图4 半直驱永磁风力发电系统

## 海上风电机组应用情况

作为陆上风电的先驱，欧洲在海上风电领域也走在前列，海上风电机组的整机厂家主要包括 Siemens—Gamesa、MHI Vestas、Senvion 等，有近 40 款产品可供选择，占整个海上风电机组装机容量的 93%，具有绝对的优势。

基于我国海上风能资源与欧洲的差异，需要开发适合于我国海上风况的抗台风、大叶轮低风速风电机组。表 2 为我国重点企业正在研制的海上大功率风电机组。

从表 2 可以看出，各种技术类型的风电机组在海上风电均有应用。福建福清兴化湾海上风电样机试验风电场首批 14 台风电机组，除双馈异步和鼠笼异步外，其他几种机型均有涉及。

## 海上风电机组技术路线选择

海上风电机组所处的环境及载荷特点与陆上风电机组有

表2 我国重点企业正在研制的海上大功率风电机组

序号	整机厂家	型号	功率	发电机类型	所处阶段
1	金风科技	SWT-6.0-154	6MW	直驱永磁	样机运行
		GW121/3MW	3MW	直驱永磁	产品运行
2	上海电气	W3600	3.6MW	双馈异步	产品运行
		SWT-4.0-130	4MW	鼠笼异步	产品运行
		SWT-6.0-154	6MW	直驱永磁	产品引进
3	远景能源	4MW-136	4MW	鼠笼异步	产品运行
4	明阳风电	SCD6000	6.5MW	半直驱永磁	样机试验
5	海装风电	H127-5MW	5MW	高速永磁	样机试验
		H151-5MW			
6	湘电风能	XD115/128	5MW	直驱永磁	产品运行
7	东方电气	FD140-5000kW	5.5MW	高速永磁	样机试验
8	太原重工		5MW	高速永磁	样机运行
9	运达风电		5MW	鼠笼异步	样机运行
10	联合动力	GD6000	6MW	双馈异步	样机试验
11	华锐风电	SL3000	3MW	双馈异步	产品运行
		SL6000	6MW	双馈异步	样机运行

很大的不同，这也决定了进行海上风电机组的设计时，要充分考虑海上环境，选择适合海上环境的技术路线。表3从系统可靠性、可维护性和备品备件通用性等方面对不同技术路线的主要区别进行了分析。

由表3可知，从系统可靠性角度考虑，高速双馈故障率最高，直驱永磁机械可靠性最高，但发电机需解决轴承及磁钢防腐问题；从可维护性角度考虑，鼠笼异步具有一定的优势，且其备品备件通用性也较好。从近几年我国海上风电装机情况来看，西门子4MW鼠笼异步发电机应用最为广泛。2016年我国风电机组供应商新增海上风电市场占有率显示，西门子4MW鼠笼异步发电机的机组成容量占比为65%，处于市场主导地位。

## 海上风电机组应对策略

### 一、环境适应性设计

海上风电机组运行环境恶劣，对关键部件发电机而言，影响最大的是盐雾腐蚀。因此实现发电机较高的环境适应性，首要是提高防盐雾腐蚀能力，包括紧固件防腐和机械结构件防腐等。

紧固件防腐通过表面处理来实现。表面处理的镀层必须附着牢固，不能在安装和卸下的过程中脱落，对于螺纹紧固件，镀层还需足够薄，使得镀后螺纹仍能旋合。选择表面处理时，也应考虑紧固性能的因素，即安装扭矩—预紧力的一致性。紧固件常见的表面处理工艺有电镀锌、热浸锌、磷化、氧化、达克罗等，其中达克罗工艺不存在氢脆问题，并且扭矩—预紧力一致性能很好，是最适用于高防腐要求的高强度紧固件。

机械结构件防腐需根据不同部件采用相应的防腐措施，同时根据发电机本身在机组所处的环境来确定防腐标准。对于鼠笼异步或部分半直驱永磁风电机组，发电机全部位于机舱内，因此可按C3或C4等级腐蚀环境进行防腐处理；而对于直驱、部分半直驱永磁风电机组，发电机部分部件直接暴露在外部大气，这部分部件则需按C5等级腐蚀环境进行防腐处理。

对于永磁特别是直驱永磁风电机组，还需要特别考虑转子磁极的防腐，目前比较好的永磁体防腐涂层为镍铜环氧。

### 二、可靠性设计

发电机可靠性设计根据各部件的特性、运行环境不同而

不同，主要有机械系统裕度设计、电气绝缘冗余设计等。

机械系统裕度设计主要针对风电机组中比较重要、受载荷较多较复杂的部件，主要包括转轴、轴承等。对于这些部件的安全系数，海上风电机组一般要采取比陆上风电机组略大的值。

电气绝缘冗余设计，包括绝缘系统的寿命、耐热等级和耐压等，需具有一定的设计裕度；同时对一些电气元件，如测温元件及信号线汇集的端子排等，应考虑备用。

### 三、可维护性设计

海上风电机组的维护是指对风电机组进行保养或发生故障后进行维修，使其恢复正常工作能力。机组的可维护性是维护时间的函数，适当的可维护性方案可以减少维护工

表3 各种不同技术路线风电机组的对比分析

技术路线	系统可靠性	可维护性	备品备件通用性
直驱永磁	无齿轮箱，机械可靠性高；发电机轴承载荷大，故障率高；发电机永磁体存在锈蚀可能	日常维护工作量小，维护费用低；大部件不可拆卸，可维护性（可更换性）极差	非标准化设计、通用性差，采购难
半直驱永磁	电机、增速箱连接结构复杂；增速箱双级行星，使用轴承多，可靠性低，效率低；发电机永磁体存在锈蚀可能	增速箱发电机集成安装不可拆，机舱与轮毂不能相通，可维护性差	非标准化设计、通用性差，采购难
高速双馈	齿轮箱增速比大，可靠性低，故障率高；发电机滑环系统故障率高	齿轮箱轴承润滑油更换频繁；发电机等大部件易拆卸，可维护性较好；电刷、滑环增加维护工作量	通用性较好
鼠笼异步	齿轮箱增速比大，可靠性低，故障率高；发电机结构简单，无滑环电刷，可靠性高	齿轮箱轴承润滑油更换频繁；发电机等大部件易拆卸，可维护性较好；无电刷、滑环，发电机维护工作量小	通用性较好
高速永磁	齿轮箱增速比大，可靠性低，故障率高；发电机结构简单，无滑环电刷，可靠性高；发电机永磁体存在锈蚀可能	齿轮箱轴承润滑油更换频繁；发电机等大部件易拆卸，可维护性较好；无电刷、滑环，发电机维护工作量小	通用性较好

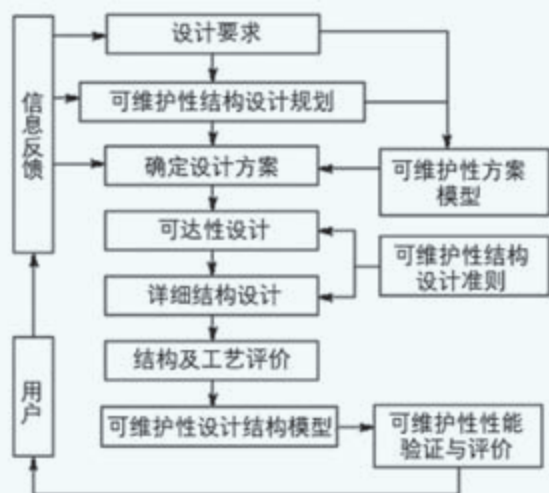


图5 可维护性结构设计流程

时，降低维护工人的技能水平，节约维护设备及维护费用，并提高风电机组的有效性，使之最大限度地发挥工作效率。

对于发电机而言，其可维护性结构设计要求设计时尽量简化结构，采用标准化、模块化设计理念，同时采取防差错措施以及维护安全性措施。可维护性结构设计流程如图5所示。

## 结语

海上风电是未来风电发展的方向，但是海洋恶劣的自然环境条件给海上风电的发展带来了严峻挑战。本文通过对海上风电机组的各种技术路线进行对比分析，结合目前国内外海上风电机组的应用现状，总结了未来海上风电的技术方向，对全面认识海上风电机组特别是关键部件发电机的设计制造质量，提高海上风电产品的高环境适应性、高可靠性、高可维护性具有重要意义。✎

（作者单位：江苏中车电机有限公司）



摄影：何红安



# 风电机组中的轴电流分析

文 | 张富全, 王伟

近年来, 风力发电的发展方兴未艾, 与其他清洁能源共同开启了电力建设的新征程。但风电机组正常运行与否也受到各种因素的制约, 特别是由于风电机组长期处于风沙等极端恶劣环境中, 运行过程中产生的轴电压给风电机组带来巨大隐患, 如不采取有效的抑制或防护措施, 必将在轴承与轴瓦等部件产生有害的电流 (简称为“轴电流”)。例如, 轴电流会导致轴承滚道产生融化性凹点以及凹槽, 增加了轴承的摩擦, 使轴承的使用年限极大缩短 (图 1)。在实际风电场中风电机组每年有 40% 的故障, 这其中有 20% 为轴电流导致的, 并且故障率逐年增加, 不仅给电网的运行带来不利影响, 同时也给工业生产造成严重经济损失。为了减轻影响和损失, 开展轴电流的研究显得尤为重要。

## 轴电流的产生机理与危害

轴电流是风电机组运行中转轴上产生的涡流, 当电机在良好运行情况时, 发电机的轴承和转轴两者间会有一层油膜, 这层油膜起润滑轴承和绝缘的作用, 当轴电压比较低的时候, 润滑油膜可以起到比较好的绝缘作用。但当轴电压因

为电机的故障等原因达到一定值时, 尤其在发电机刚刚启动时, 转轴与轴承两者之间没有产生固定良好的润滑油膜层, 轴电压特别容易击穿油膜形成放电回路, 形成比较大的有害轴电流。轴电流对电机的破坏主要有几种情况:

(1) 电机轴电流会在轴承与转轴两者间频繁地放电与灭弧, 侵蚀轴承, 被熔蚀的轴承合金, 在巨大的挤压力的作用下从轴承金属表面迸发出来, 从而在轴承内表面形成密集的熔蚀凹槽, 许多蚀点的存在必然破坏轴承内表面, 加速轴承不断的损耗, 进而缩短轴承的使用年限。

(2) 轴电流同时也对油膜有一定的电解和加热作用, 将会毁坏转轴与轴承两者间的润滑油膜, 从而引起润滑油碳化, 加快油脂的劣化, 造成油膜润滑功能降低直至消失, 还会导致轴承的温度升高, 使发电机转轴和轴承之间形成程度不等的毁伤。

(3) 因为轴承和转轴两者的合金接触面范围很小, 由于轴电流形成后, 它的密度就会很大, 导致轴承局部温度过高, 引起轴承内表面呈现条状熔蚀伤痕, 严重的甚至可能直接烧坏轴颈和轴瓦。如图 2 所示。

## 等效模型的建立

### 一、共模电压和轴电压

由 PWM 变频驱动供电产生的轴电流按照产生的机理一般可分  $dv/dt$  电流、放电击穿电流和循环型轴电流。前两种为共模电流, 当轴电压在油膜阈值电压承受范围内时, 油

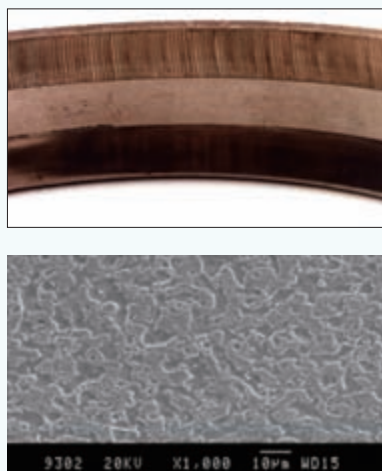
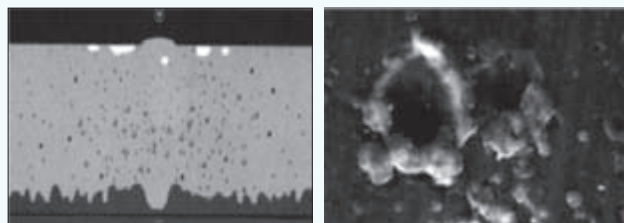


图1 轴承滚道烧伤表面



a 轴承电蚀后表面图

b 电蚀后轴承表面凹坑

图2 轴承电蚀表面

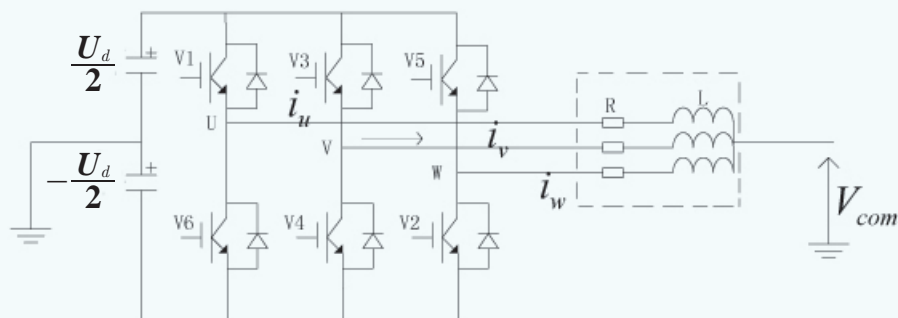


图3 PWM逆变驱动共模电路模型

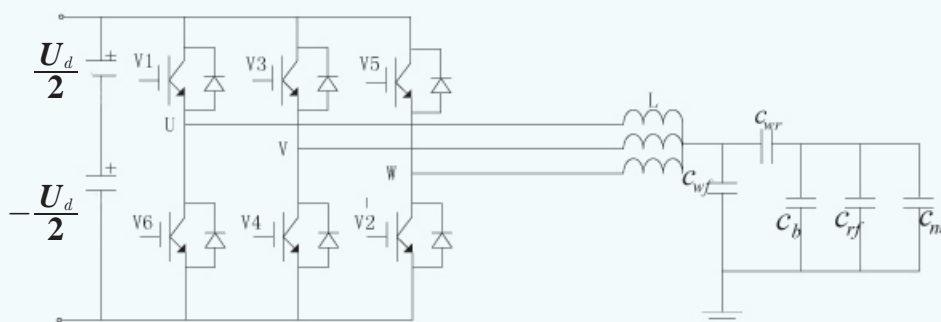


图4 逆变器电路共模模型

膜稳定，轴承的电阻值很大，以兆欧级计。此时轴承充当一个电容， $dv/dt$  电流就是轴承电容的充放电电流，通常这个电流值不会很大，所以对轴承产生不了毁伤。一般认为，磁路不对称，电容电流和单极效应为电机轴电流产生的主要因素。但是在变频驱动供电下电机中轴电压主要受电压不平衡影响，进而电源电压的零序分量产生，并在系统内形成零序电流，轴承为电机零序回路的一部分。如图3所示，设电机外壳接地。

因此分析电路可得：当星型连接时有，

$$u_v + u_w + u_u - 3v_{com} = (R + L \frac{dv}{dt})(i_v + i_w + i_u)$$

因此可以推出共模电压表达式为： $i_u + i_w + i_v = 0$

$$v_{com} = \frac{u_v + u_u + u_w}{3} \quad (1)$$

$v_{com}$  为三相逆变器所连接的三相负载中间点的对地电压， $u_v$ 、 $u_w$ 、 $u_u$  为机组绕组端与地之间电压。当定子绕组接三相对称电源时  $u_w + u_v + u_u = 0$ ，则电机端不会出现共模

电压；然而当电机定子绕组与三相的两电平逆变器连接时，逆变器输出电压  $u_w + u_v + u_u$  的总和通常不为零进而产生共模电压。经过电机中寄生电容的耦合效应，在转子上可以感应出电压，通过其轴承，形成共模电流的流通回路。根据电路的共模模型能够得到轴承对地电压和电机共模电压关系（如图4）。

图4中  $c_{wf}$  是电机定子绕组和铁心的耦合电容； $c_{wr}$  为定子绕组与转子的耦合电容； $c_{rf}$  为转子和定子铁心的耦合电容； $c_b$  为驱动端轴承等效电容； $c_{nb}$  为非驱动端轴承等效电容； $u_n$  是电机定子绕组中间值电压； $v_{com}$  为共模电压； $u_b$  为对地的电压。轴电压大小决定轴承能不能被击穿，以及能否产生有害的放电击穿电流。由图4可以得到  $u_b$  与  $v_{com}$  的约束关系，定义为轴承的分压比，表达式为：

$$Q_{BVR} = \frac{c_{wr}}{c_{wr} + c_b + c_{rf} + c_{nb}} \quad (2)$$

即电机的耦合电容与轴承分压比有着不可分割的关系，那么分析耦合电容对于分析电机的轴电流问题是有必要的。

## 二、电机耦合电容

### (一) 转子与定子绕组耦合电容

通常对转子与定子绕组的等效分析，等效的电容面积为转子—气隙—槽楔—槽绝缘—定子绕组。转子与定子绕组两者间的等效电容有三类不同介质的平板电容，一般把槽绝缘材料相对介电常数定义为 $\xi_1$ ，等效厚度 $l_1$ ；槽楔相对介电常数为 $\xi_2$ ，槽楔等效厚度为 $l_2$ ；空气空隙等效宽度为 $l_3$ 。因此，可以推算出转子到定子绕组的电容为：

$$c_{wr} = \frac{\xi_1 \xi_2}{\xi_1 l_2 + \xi_2 l_1 + \xi_1 \xi_2 l_3} \quad (3)$$

### (二) 定子铁心和转子间电容

当前交流、直流电机电枢的绕组通常设计中，绕组一般都放在开槽定子的铁心中，开槽会影响电机气隙的磁耦合，也会改变电机内能量耦合，从而改变整体耦合电容。为了更好地分析其对电机的影响，假设等效的气隙为 $\vartheta$ ， $k_c$ 是卡氏系数，那么引入 $k_c$ 通常认为开槽会增大电机的有效空

隙，也就是看作增大 $k_c$ 倍。转子与等效的定子间电容一般可以看作两个柱体间电容，两柱体间长度为 $k_c \vartheta$ 。因此通过相应的计算得到：

$$c_{\sigma} = \frac{2\pi\epsilon l n(R_r + k_c \vartheta)}{R_r} \quad (4)$$

电机正常运行中，油膜与轴承内外圈也有等效电容。

### (三) 共模电流通路

当前在 PWM 组成的风电机组发电系统中，通过电机内部的杂散电容构成共模电流回路，当不考虑定子时，等效共模电流通路如图 5 所示。

图中 C1 为转子槽等效的电容，C2 为电机前轴承等效电容，C3 是电机后轴承等效电容。模型左端口为转子变频电流，由于电机气隙一般在 0.5 毫米以上，加上槽口、槽楔等，同时也要经过定子的槽绝缘和槽楔，电容不是很大，而转子绕组直接和转子铁心接触，绝缘厚度只有 0.1 到 0.2 毫米，所以电容比较大。高频电流直接泄漏到转子铁心上，铁心与轴直接接触，再通过轴承套到轴承，轴承绝缘层约 0.2 毫米，由于转子频率在欠同步发电时频率并不高，一般几赫兹到十几赫兹，所以转子绕组感抗也不大，而高频载波一般在 1 千赫兹到 5 千赫兹，这样传递给轴承的轴电流就很大。

基于以上模型的计算和分析，提出一个对电机改造的方案并进行仿真验证了其优良性。

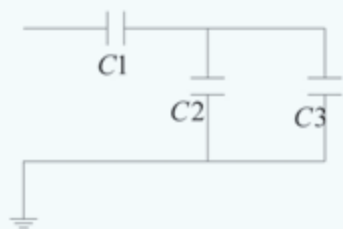


图5 共模电流通路模型

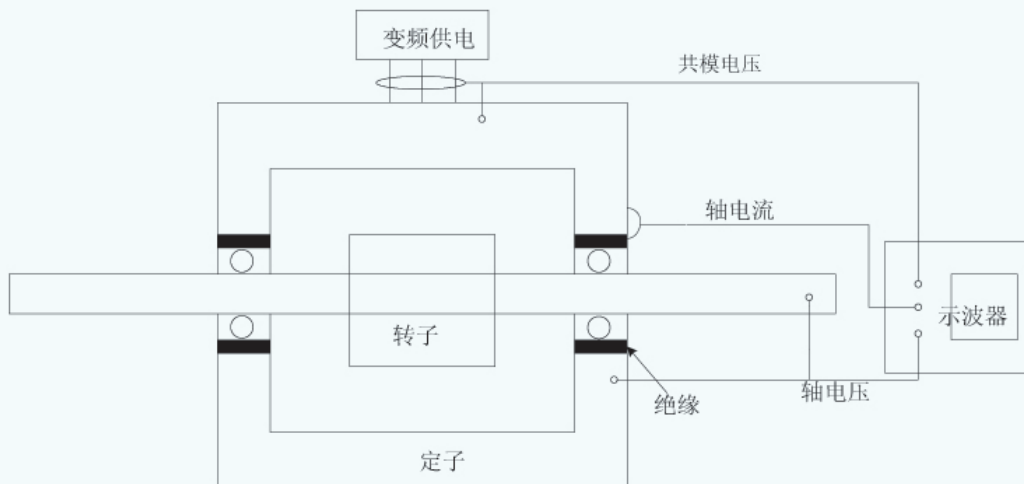


图6 测量方案示意图

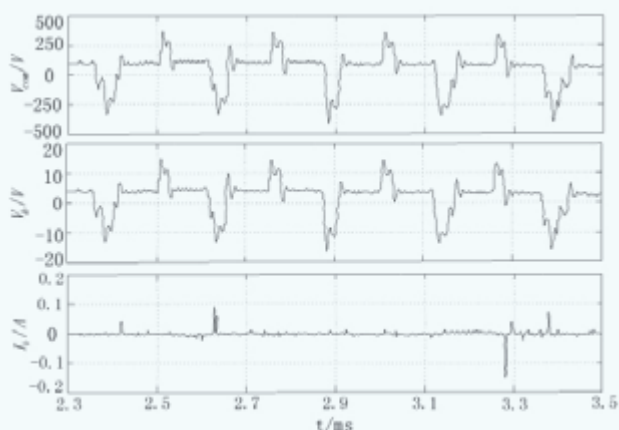
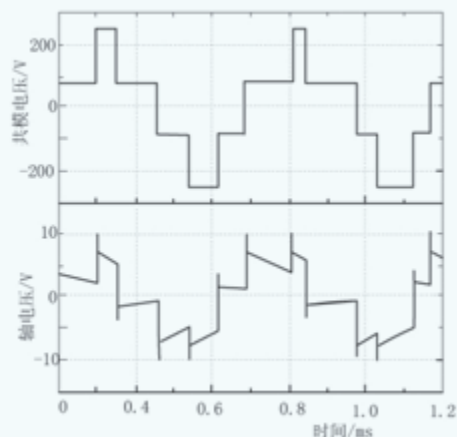
图7 电机空载、 $U_d=500V$ 时 $V_{com}$ 、 $V_b$ 、 $I_b$ 波形图

图8 电压仿真图

## 轴电流的测量

选择一个比较经济容易改造的机型（Y2-136S）进行改进，在机组非驱动侧轴承与外滑道间加入一层阻绝层，厚度约为几毫米，自外侧滑道导出一个铜线，绕过绝缘直接与机组外壳连接，最终能够测量到轴电流。在该试验中把PWM接地作为参考对照，将参考处和驱动电源进行连接，这时测得的电压就是轴承的轴电压，又因为机组驱动PWM部分的直流母线电压大约在500V左右，当系统处于良好的运行状况时，电压最大值为405V。共模电压是运用Tektronix（泰克示波器）探头测量得到的，设备型号为P520A。实验测量示意图，如图6所示。

将PWM变频器驱动系统中直流母线电压 $U_d$ 调至500V，使电机在标准电压下空载运行，可测得共模电压、轴电压、轴电流，其波形如图7所示。

从图7能够看出，机组轴电压和等效共模电压都是四阶波形，且两者波形极为相似，但电压值差异比较显著。分析图7可知，轴电流中包含一部分EDM（放电击穿电流）电流，轴电流的最大值 $\leq 0.15A$ 。依据波形可知当发生放电击穿电流时，轴电流也会变化，其余部分的电机轴电流一般为容性电流，电流值较小。由图7可知，共模电压最大值是780V，轴电压最大值为29V，可推算出轴承分压比约为3.71%。在设定的模型中，运用模块来表述油膜被击穿的情形时，一般认定当大于额定的数值时即出现击穿现象，但这仅仅在理论上可以实现，实际现场这种情形一般不会出现，真实的机组出现轴承拉弧击穿现象与图7相似，与此同时也做了相应的仿真来验证准确性。

## 轴电流仿真

本文结合上文的等效模型，通过计算模型中的相应关键参数，在Matlab/Simulink中建立模型，仿真中以变频器输出的共模电压为激励，监测电压值并输入（MF）模块中，通过开关 $k_1$ 、 $k_2$ 的开与断来模拟轴承油膜承受的阈值击穿和击穿后又恢复的状态。仿真要求：50Hz频率下的运行，PWM控制，2kHz频率载波。

结合图8仿真结果可知，轴电压和共模电压的波形比较接近，容性耦合是产生高频轴电压的重要因素。当 $t=0-0.2ms$ 时轴电压与共模电压均维持在稳定值，当 $t=0.2ms$ 时共模电压增大，轴电压的数值大过轴承油膜击穿阈值电压，发生电容放电，随后轴承油膜恢复绝缘状态，轴承两端电压随着共模电压变化而变化。轴承电流仿真模型清晰描述了变频驱动系统中的寄生耦合现象。

## 结论

本文对轴电流共模模型和寄生电容进行了分析，建立了共模电路模型，得到了电机耦合电容相应公式，由轴承分压比可知，当轴承电容变小、电压相应变大时极易形成破坏性的轴电流；提出的一种电机改造方案，能较好地测量和分析轴电流，值得推广和应用；仿真实验验证了驱动系统存在寄生耦合现象，为以后风电机组中轴电流的研究提供了一定的参考和依据。✎

（作者单位：内蒙古科技大学信息工程学院）

# 风电机组用高强度紧固件扭矩系数的实测分析

文 | 赵少伟, 王洪波, 袁坚, 卢晟, 杨少华

高强度紧固件作为风电机组结构连接的关键部件, 其连接的可靠性直接关系到风电机组的运行安全。扭矩法作为高强度紧固件装配的关键工艺方法, 其利用扭矩值与预紧力的线性关系, 通过直接控制扭矩值来实现螺栓预紧, 操作方法简单、应用广泛。但是, 由于紧固扭矩的 90% 左右被螺纹和支撑面的摩擦扭矩所消耗, 因此, 离散度大, 拧紧系数一般在 1.4 - 3 之间。其中, 扭矩系数  $K$  是直接反映螺栓拧紧过程中的扭矩与轴力之间的系数, 其离散度直接影响拧紧效果。

风电机组用高强度紧固件的扭矩系数评价标准是根据 GB/T1231-2006《钢结构用高强度大六角螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件》的要求, 按批抽取 8 套, 8 套的平均扭矩系数及标准偏差符合规定范围。按照国内使用  $MoS_2$  情况, 如果螺栓表面及垫圈的作用面上都均匀地涂上  $MoS_2$ , 扭矩系数的实测值范围一般在 0.080 - 0.13, 标准偏差  $\leq 0.010$ 。一般地, 各主机厂的标准偏差值  $\leq 0.010$ , 平均扭矩系数是根据不同的紧固工艺设定的。

但在施工过程中, 扭矩系数  $K$  受到诸如紧固件表面涂层、润滑剂型号、涂抹方式、连接结构、紧固次数等不同施工工艺的影响, 因此, 为了精确控制扭矩系数及评价各影响因素, 本文采用试验设计以模拟并试验测量不同施工工艺对扭矩系数的影响, 为风电紧固件扭矩系数设定提供参考。

本文所述试验是采用 CSZ-1500AS 高强螺栓扭矩系数试

验机, 该机采取伺服电机驱动, 精密行星传动, PC 闭环控制, 通过高精度力值、扭矩传感器和旋转编码器等测得螺栓轴力、扭矩以及转角, 可自动采集、记录、处理试验数据, 实时显示试验曲线。试验用紧固件性能等级均为 10.9 级, 表面达克罗处理。

## 不同的涂抹方式对扭矩系数的影响

目前, 风电用高强度紧固件的涂抹方式有全涂抹和半涂抹两种方式。半涂抹是指润滑剂搅拌均匀后, 用刷子仅在螺纹部位均匀涂抹润滑剂; 全涂抹是指润滑剂搅拌均匀后, 用刷子在螺纹部位及垫片支撑面均匀涂抹润滑剂。如图 1 所示。

因此, 本试验对比了相同批次紧固件、不同涂抹方式对扭矩系数的影响。M20、M30、M36 双头螺柱、六角头螺栓分别采用全涂抹、半涂抹方式检测, 试验结果见表 1。

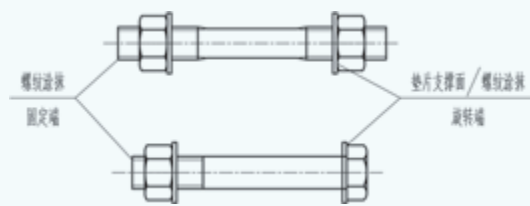


图1 涂抹方式示意图

表1 全涂抹/半涂抹方式的实测值

螺栓	螺母	垫片	涂抹方式	平均扭矩系数	标准偏差
双头螺柱 -M30*345	GB/T6170-M30	Moser 垫圈 S30	全涂抹	0.132	0.0034
双头螺柱 -M30*345	GB/T6170-M30	Moser 垫圈 S30	半涂抹	0.133	0.0045
GB/T5782-M36*350	机体螺母 M36	Moser 垫圈 S36	全涂抹	0.132	0.0098
GB/T5782-M36*350	机体螺母 M36	Moser 垫圈 S36	半涂抹	0.145	0.011
GB/T5782-M30*160	机体螺母 M30	Moser 垫圈 S30	全涂抹	0.147	0.0083
GB/T5782-M30*160	机体螺母 M30	Moser 垫圈 S30	半涂抹	0.155	0.0111

由上述 3 组对比试验结果可知, 采用半涂抹方式测得的扭矩系数、标准偏差较全涂抹方式均偏大, 且有 2 组标准偏差超差。可见, 全涂抹方式更利于扭矩系数的稳定, 因此, 采用力矩法紧固时, 推荐使用全涂抹方式, 以利于保证螺栓组预紧力的较低离散度。

## 不同的润滑剂对扭矩系数的影响

润滑剂是在螺栓装配中应用到螺纹或其他接触面的化学品。润滑剂不仅仅在螺栓安装过程中起到润滑作用, 在螺栓的装配、使用和拆卸过程中都起到重要的作用。目前, 风电行业用润滑剂主要品牌有 MOLYKOTE G-Rapid Plus、ANTI SEIZE PASTE、785EN、MoS<sub>2</sub> 等, 种类繁多。为了验证润滑剂的影响, 结合生产实际, 采用相同批次的紧固件、全涂抹方式对 MOLYKOTE G-Rapid Plus (简称 MLK)、785EN 两种润滑剂进行实测分析, 施拧两次的试验结果如下:

从平均扭矩系数来看, 785EN 较 MLK 的平均扭矩系数偏大, 且 785EN 对紧固次数较敏感, 多次紧固影响较大。从标准偏差来看, 两种润滑剂采用全涂抹均能满足标准偏差  $\leq 0.01$  的要求; 从  $K_{\max}/K_{\min}$  来看, MLK 润滑剂的比值较 785EN 偏大, 其主要原因是由于 785EN 较 MLK 的平均扭矩系数偏大, 在相同浮动范围或标准差时, 其表现出相对变

化量较小。可见, 使用不同的润滑剂对扭矩系数存在明显的差异性, 因此, 选择或更换润滑剂应充分考虑对 K 值的影响。

## 润滑剂搅拌不均匀对扭矩系数的影响

为评价因施工不规范造成的扭矩系数影响, 特将润滑剂搅拌不均匀模拟施工情景。因罐装润滑剂长时间存放, 出现油、脂分离的现象, 如直接打开、未经均匀搅拌就使用, 测试结果如表 3 所示。

由试验数据可知, 785EN 润滑剂搅拌不均匀虽使得扭矩系数略小, 且离散度较大, 但满足扭矩系数要求。但是, 为降低扭矩系数离散度, 仍要求搅拌均匀后涂抹。

## 不同连接结构对扭矩系数的影响

风电机组高强度螺栓连接结构形式主要有 3 种 (图 2): 螺钉连接 a (由螺栓、垫片、机体内螺纹组成)、螺栓连接 b (由螺栓、垫片、螺母组成)、螺柱连接 c (由螺柱、垫片、机体内螺纹组成)。根据施拧部位的不同, 可将力矩法紧固方式分为螺母侧或螺栓头侧紧固两种。拧紧力矩主要消耗在旋转支撑面摩擦、螺纹摩擦、预紧力处, 因此, 对于螺栓连接 b 和螺柱连接 c 采用拧紧螺母侧紧固法时,

表2 MLK与785EN润滑剂的实测值

螺栓	螺母	垫片	润滑剂	紧固次数	$K_{\max}/K_{\min}$	平均扭矩系数	标准偏差
双头螺柱 M30*345	GB/T6170 M30	Moser 垫圈 S30	785EN	1	1.078	0.132	0.0034
			MLK	1	1.115	0.102	0.0039
			785EN	2	1.095	0.152	0.0046
			MLK	2	1.120	0.107	0.0044

表3 润滑剂搅拌不均匀的实测值

螺栓	螺母	垫片	润滑剂状态	紧固次数	最大扭矩系数	最小扭矩系数	平均扭矩系数	标准偏差
GB/T5782 M30*160	GB/T6170 M30	Moser 垫圈 S30	不均匀	1	0.138	0.120	0.131	0.0059
			均匀	1	0.137	0.124	0.132	0.0048
			不均匀	2	0.153	0.131	0.143	0.0060
			均匀	2	0.156	0.144	0.151	0.0039
			不均匀	3	0.164	0.146	0.153	0.0053
			均匀	3	0.167	0.154	0.158	0.0043

可认为其扭矩系数的影响因素相同，均是支撑面（螺母与垫片）、螺纹摩擦、预紧力。因此，将风电机组常用的三种结构简化成螺钉连接a和螺栓连接c两组连接方式，进行拧紧系数对比试验，结果见表4。

通过试验对比分析，不同连接结构存在差异，采用螺钉连接结构 a 较螺栓连接 b、螺柱连接 c 的扭矩系数偏大且离散。半涂抹方式时，还存在标准偏差超差现象。因螺钉连接是螺栓与机体内螺纹连接，在材料上、加工工艺上二者均存在差异，同时，因在模拟机体内螺纹时需要从风电机组其他部件处取材加工成机体螺母，很难及时有效地对螺栓与机体内螺纹进行配套的扭矩系数检测，因此，笔者认为，采用螺栓连接、螺柱连接的标准件连接结构更利于扭矩系数的控制。

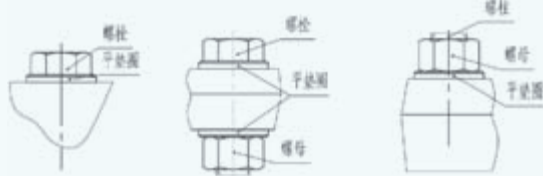


图2 螺栓连接常见结构图

### 不同垫片类型对扭矩系数的影响

风电机组用垫片存在高强度平垫片（DIN6916）与 Moser 垫片两种类型，在成本上后者是前者的 7 倍，因此，为降低成本，评估高强度平垫片与 Moser 垫片可替代性，即采用相同的紧固件对比不同涂抹方式下的扭矩系数差异性。

由表 5 可知，高强度平垫圈较 Moser 垫圈在其他条件一致的情况下，扭矩系数范围、标准差等指标参数基本一致，并在全涂抹方式时其扭矩系数表现较好。

### 不同紧固次数与重复使用对扭矩系数的影响

根据《JG/T5057.4 建筑机械与设备高强度紧固件技术条件》，高强度螺栓可重复使用一次。因此，本试验采用相同的紧固件重复施拧。即完成 8 套试验后重新涂抹润滑剂后，在相同条件下重复施拧。试验结果见表 6、图 3。

由试验数据可得，扭矩系数均随着紧固次数增加而变大。平均扭矩系数对比，第 2 次紧固较第 1 次增加约 14.4%，增幅明显；第 3 次较第 2 次增加约 4.6%，增幅略低。

表4 螺柱连接与螺钉连接的实测值

结构	螺栓	螺母	垫片	涂抹方式	平均扭矩系数	标准偏差
c	螺柱 -M30*345	GB/T6170-M30	Moser 垫圈 S30	全涂抹	0.132	0.0034
	螺柱 -M30*345	GB/T6170-M30	Moser 垫圈 S30	半涂抹	0.133	0.0045
a	螺栓 -M30*160	机体螺母 M30	Moser 垫圈 S30	全涂抹	0.147	0.0083
	螺栓 -M30*160	机体螺母 M30	Moser 垫圈 S30	半涂抹	0.155	0.0111

表5 不同垫片扭矩系数实测值

螺栓	螺母	涂抹方式	垫片	最大扭矩系数	最小扭矩系数	$K_{max}/K_{min}$	平均扭矩系数	标准偏差
GB/T5782 M36*350	机体螺母 M36	半涂抹	Moser	0.157	0.127	1.236	0.145	0.011
			DIN	0.163	0.124	1.315	0.144	0.0148
		全涂抹	Moser	0.147	0.121	1.215	0.132	0.0098
			DIN	0.127	0.115	1.104	0.121	0.0053

表6 扭矩系数与紧固次数实测值

螺栓	螺母	垫片	紧固次数	$K_{max}/K_{min}$	平均扭矩系数	标准偏差
GB/T5782 M30*160	GB/T6170 M30	Moser 垫圈 S30	1	1.105	0.132	0.0048
			2	1.083	0.151	0.0039
			3	1.084	0.158	0.0043

表7 平均扭矩系数与 $K_{\max}/K_{\min}$ 

扭矩系数								$K_{\max}/K_{\min}$	平均扭矩系数	标准偏差
0.094	0.085	0.1	0.092	0.1	0.092	0.081	0.11	1.358	0.094	0.009

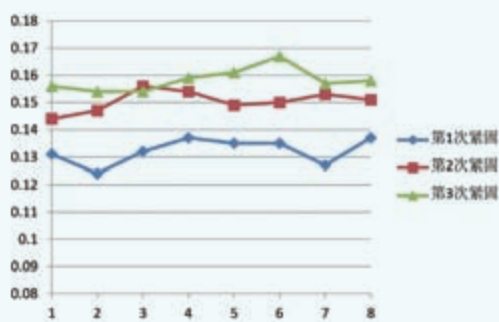


图3 扭矩系数随紧固次数变化图

因此，在实际施工中，对于高强度紧固件重复使用时，需适当调整扭矩系数。

## 紧固工具精度与扭矩系数设定关系

根据紧固扭矩  $T$  与预紧力  $F$ 、扭矩系数  $K$  的经验公式：

$$T = KFd \quad (1)$$

可知，在紧固件规格一定时，为了获得规定范围内的预紧力  $F$ ，需控制紧固扭矩  $T$  和扭矩系数关系。

根据 GB/T16823.2-1997《螺纹紧固件紧固通则》，考虑紧固工具实施紧固的终止点、紧固扭矩的离散度（ $\pm m\%$ ，其中  $m$  为绝对值）等因素，最大扭矩系数（ $K_{\max}$ ）和最小扭矩系数（ $K_{\min}$ ）比值应满足的条件，如下：

$$\frac{K_{\max}}{K_{\min}} \leq \frac{1 - 0.01m}{1 + 0.01m} \cdot Q \quad (2)$$

$$Q = \frac{F_{\max}}{F_{\min}} \quad (3)$$

通常，采用液压扳手紧固 M30 以上紧固件，其精度为  $\pm 3\%$ ，即输出的紧固扭距离散度为  $\pm 3\%$ ，因此， $m$  取值为 3。

$Q$  为拧紧系数，根据 VDI2230 标准，液压扳手紧固的拧紧系数范围为 1.4 - 1.6，如取 1.4，代入上式计算，可得，

$$\frac{K_{\max}}{K_{\min}} \leq \frac{1 - 0.03}{1 + 0.03} \times 1.4 = 1.318$$

因此，在扭矩系数范围设定时，应结合施工工具的精度与设计要求的螺栓组拧紧系数，校核  $K_{\max}/K_{\min}$ ，使其满足要求。

通过对试验数据分析发现，如仅采用平均扭矩系数和标准偏差两个参数作为评价标准，有出现  $K_{\max}/K_{\min}$  超限的可能。以某批次塔筒螺栓 M42\*225 的扭矩系数为例，其平均扭矩系数为 0.094，满足 0.08 - 0.1 的要求，但最大/最小扭矩系数偏差为 1.358 - 1.318，螺栓组紧固时将会出现部分螺栓预紧力超差。

因此，笔者认为，扭矩系数范围不应是扭矩系数平均值的范围，而是要求批次抽样的 8 套连接副扭矩系数均要保证在要求的扭矩系数范围内，且扭矩系数范围的设定应考虑最大/最小扭矩系数比值。

## 结语

风电机组用高强度紧固件扭矩系数因不同的涂抹方式、润滑剂、连接结构、紧固次数等施工工况而出现较大变化。精确控制扭矩系数并对其测量指标（平均扭矩系数、标准偏差、最大/最小扭矩系数比值）有效评价，是获得稳定可靠预紧力的关键。本文通过对试验数据分析对比，可以得出以下结论：

- (1) 全涂抹方式可有效控制标准偏差在 0.01 范围内；
- (2) 不同的润滑剂对扭矩系数影响较大，选型使用时，需充分验证；
- (3) 施工过程要注意润滑剂涂抹均匀；
- (4) 扭矩系数受紧固次数影响较大，如重复使用，需复核扭矩系数；
- (5) 在连接结构上，优选螺栓连接或螺柱连接方式，更有利于控制扭矩系数；
- (6) 在扭矩系数设定时，考虑紧固工具的精度，将  $K_{\max}/K_{\min}$  作为扭矩系数评价指标之一。

（作者单位：中车株洲电力机车研究所有限公司）



# 浅谈海上风电防腐技术应用及优化方案

文 | 王健, 高宏飙, 刘碧燕

海上风电设备处于苛刻的海洋环境中, 受到海水、盐雾的侵蚀以及海浪、潮水的冲刷, 如何保证风电设备实现 20—25 年的使用寿命, 是海上风电防腐技术研究的重要课题。

江苏海上龙源如东风电场始建于 2009 年, 经过近 8 年的生产运行管理, 积累了一定的海上风电防腐技术应用和缺陷整改、方案优化的经验, 可为海上风电场建设中防腐设计及生产运行中防腐维护提供借鉴。

## 目前海上风电防腐设计及存在问题

### 一、海上风电防腐设计

按国际标准组织《钢结构防腐涂装规范》ISO 12944 腐蚀环境分类、《海港工程钢结构防腐蚀技术规范》JTS153-3-2007, 海上风电机组、塔筒处于 C5-M (暴露在海洋大气部分) 或 C5、C4 (塔筒内设备) 腐蚀环境, 风电机组基础处于 Im2 腐蚀环境。采用的防腐设计主要有: 选用耐蚀材料, 腐蚀裕量设计, 防腐涂层, 包覆防腐, 阴极保护 (牺牲阳极、外加电流)。

江苏海上龙源如东风电场位于黄海东岸, 现有 155 台机组, 风电机组基础包括三种类型: 混凝土承台、多管桩及单管桩钢构基础。风电场位于如东烂沙海域, 海水为微混浊咸水, 盐度约 26.2‰, pH8.0, 悬浮物 52—63 mg/L, 溶解氧 10.4 mg/L。海水对混凝土结构弱腐蚀, 对钢结构中等腐蚀, 干湿交替下对钢结构及混凝土中钢筋强腐蚀。

防腐设计方案: 主要分为混凝土承台、钢构基础、塔筒, 共 3 大类方案。具体如下:

**混凝土承台:** 海上试验风电场最早建设了 7 基钢筋混凝土低桩承台基础, 采用加大钢筋外保护层厚度、掺入阻锈剂等防止钢筋锈蚀, 浪花飞溅区和潮差区则采用结构表面硅烷浸渍 (辊涂) 防腐方案。

**钢构基础:** 采用“涂层+牺牲阳极阴极保护”防腐方案, 涂层为“玻璃鳞片环氧漆+脂肪族聚氨酯面漆”, 总干

膜厚度 800  $\mu\text{m}$ 。

**塔筒:** 涂层方案包括两大类, (1) “环氧富锌底漆+厚浆型环氧云铁中间漆/高固态厚膜型聚酰胺固化环氧漆+脂肪族聚氨酯面漆”, 总干膜厚度 320  $\mu\text{m}$ ; (2) 对于少数塔筒, 考虑到底段位置低、可能有海浪飞溅, 采用“改性环氧树脂漆+厚浆型环氧云铁中间漆+改性环氧树脂漆”, 总干膜厚度 660  $\mu\text{m}$ ; 或“聚酰胺固化环氧通用底漆+环氧玻璃鳞片漆”, 总干膜厚度 800  $\mu\text{m}$ 。

### 二、目前存在问题

存在的主要问题表现在: 混凝土承台运行 3—5 年后, 表面陆续出现钢筋锈蚀现象; 钢构基础潮差区海生物生长严重、涂层破坏大, 现场修补难度大、质量难保证; 同时涂层损坏又引发牺牲阳极块消耗大、阴极保护电位正移大, 按现有正移速度推算, 即将到达阴极保护电位临界值  $-0.85\text{mV}$  (铜/硫酸铜参比电极), 远远满足不了海上风电机组基础 25 年使用寿命的要求; 个别塔筒防腐涂层出现粉化。

#### (一) 混凝土承台表面出现早期锈蚀

运行三、四年后出现钢筋混凝土承台表面硅烷涂层破损, 受海水的腐蚀, 混凝土中的钢筋出现锈蚀现象, 如图 1 所示。

钢筋混凝土承台腐蚀电位检测发现, 自然腐蚀电位检测结果在  $-0.695$ — $-0.845\text{V}$  之间 (表 1)。根据标准 ASTM C-876, 腐蚀电位负于  $-0.350\text{V}$  时, 发生腐蚀的概率高于 90%。

(二) 多管桩基础潮差区涂层防腐遭遇挑战、阴极保护有待完善

多管桩基础设计了涂层+牺牲阳极阴极保护。钢构基础潮差区海生物生长严重 (图 2), 海生物脱落加重涂层破坏、钢构腐蚀。潮水涨落使现场涂层修补难度大、质量难保证。潮差区的涂层防腐遭遇挑战。

多管桩的牺牲阳极阴极保护, 则主要存在以下问题:

(1) 试验风电场存在因设计高度偏差、4 台多管桩基础斜撑杆上阳极块长时间裸露在空气中的情况, 无法起到保护作用; (2) 1 台风电机组因基础周围海床冲刷, 低潮位



图1 运行3年的#47承台



图2 #39多管桩基础海生物生长严重

表1 钢筋混凝土承台腐蚀电位

运行年数	机位	腐蚀电位 (V)		检测结论
		高潮位	低潮位	
第3年	#37	-0.740 — -0.750	-0.755 — -0.775	腐蚀概率 90% (依据 ASTM C876)
	#38	-0.765 — -0.770	-0.740 — -0.785	
	#45	-0.785 — -0.800	-0.815 — -0.845	
	#46	-0.750 — -0.760	-0.740 — -0.770	
	#47	-0.750 — -0.760	-0.780 — -0.810	
	#55	-0.715 — -0.730	-0.695 — -0.755	
	#56	-0.805 — -0.810	-0.755 — -0.820	

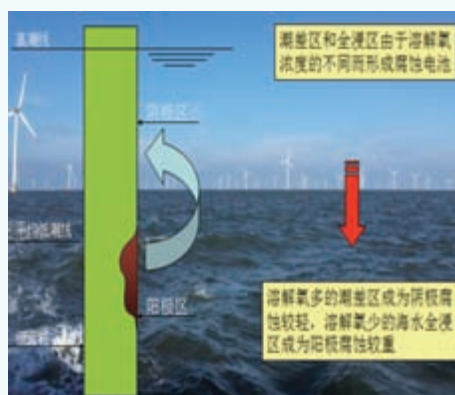


图3 潮差区附近的宏电池腐蚀

期间牺牲阳极块全部裸露（图7），无法起到保护作用；（3）1台多管桩基础的1个阳极块完全溶解、只剩下焊脚；1台风电机组的1个独桩，仅设计1个牺牲阳极块，无冗余，一旦该阳极块掉落则失去保护。

### （三）单管桩基础沉桩期间涂层损坏大、维护困难

单管桩基础主要存在两大问题：一是施工沉桩期间，替打法兰和桩头固定位置涂层损坏大，现场维护困难；二是存在部分单管桩阴极保护电位正移太快的情况，如表2所示，存在即将达到保护临界值的可能，不能满足设计寿命的要求。

### （四）塔筒存在个别机位防腐涂层粉化

通过对运行5年的塔筒进行详细涂层检查，发现个别塔筒外壁出现防腐涂层粉化，判断其程度为1.5—2级，不满足20年防腐要求。

## 问题分析

### 一、海上风电设备腐蚀原理

海上风电设备的腐蚀源：氧气、海水、氯离子、紫外线等。腐蚀类型，多属于金属的电化学腐蚀。腐蚀特点：飞溅区和潮差区干湿交替、浪花冲击，腐蚀速度最大。腐蚀原理：微

表2 部分单管桩阴极保护电位正移太快

序号	机位	对比数据 (V)		
		第1年	第2年	第3年
1	华锐 #2	-0.9571	-0.9256	-0.8703
2	华锐 #3	-0.9571	-0.9260	-0.8831
3	华锐 #4	-0.9636	-0.9334	-0.8742
4	华锐 #7	-0.9605	-0.9400	-0.8931
5	华锐 #8	-0.9620	-0.8986	-0.9076
6	华锐 #9	-0.9602	-0.9876	-0.8913

注：表中为 Cu/饱和 CuSO<sub>4</sub> 溶液参比电极检测数据，对应阴极保护电位正常范围为：-0.85 — -1.10V。

电池和宏电池的共同作用，潮湿环境下的金属表面形成无数个腐蚀微电池，阳极区金属溶解、腐蚀；处于海水环境的风电机组基础，潮差区附近又形成一个宏电池（图3），加速腐蚀。

### 二、目前所存在问题的分析

海上风电设备的防腐设计思路：隔离腐蚀源。例如：防腐涂层、包覆防腐，加热，防盐雾、防潮气；使设备成为阴极，从而不发生腐蚀，即阴极保护。

（一）混凝土承台需提高涂层防腐效果，同时采用阴极

保护。

海洋工程环境中使用的钢筋混凝土，受海水、盐雾的环境影响，因碳化作用降低混凝土的 pH 值，破坏碱性环境；侵蚀性氯离子竞争吸附钢筋表面的活性位，破坏表面的钝化膜，引起钢筋腐蚀。可见，钢筋混凝土承台，一旦涂层破损，易发生腐蚀，需及时采取措施进行腐蚀防护。

措施：隔离腐蚀源，并使基础阴极极化，即防腐涂层修补，同时采用阴极保护防腐。

### (二) 多管桩基础需优化阴极保护

多管桩钢构基础的问题，综合成两点：浪溅潮差区防腐涂层隔离腐蚀源失效；牺牲阳极块掉落，或者由于设计、环境变化原因，导致牺牲阳极块露出水面以上，阻碍了牺牲阳极块阴极保护防腐作用的发挥。

对于有 1 个牺牲阳极块全部溶解的情况，初步分析为潮水浸蚀、牺牲阳极块本身有瑕疵导致的焊脚位置阳极块加速溶解、阳极块与焊脚彻底脱离而掉落，并排除涂层大面积剥落、牺牲阳极块批量质量问题、杂散电流等原因引起阳极块过早消耗的可能性。

### (三) 单管桩基础采用浪溅区包覆防腐

主要存在牺牲阳极块保护电位正偏移太快的情况。可采取增加安装牺牲阳极块，或采用浪溅区包覆防腐作为补充措施。

### (四) 塔筒面漆选型不低于脂肪族聚氨酯

资料显示：少数机位的底段塔筒面漆设计，由于侧重于考虑海水飞溅效应，而忽视了紫外线对环氧树脂油漆的加速老化、粉化作用，忽视了脂肪族聚氨酯面漆对环氧中间漆的保护作用，导致个别机位底段塔筒出现涂层粉化。

## 优化方案

为保证海上风电设备安全，需对目前存在的防腐涂层、阴极保护应用中的问题进行整改和优化。具体如下：针对混凝土承台表层生锈情况，对混凝土承台涂层进行整体维护，同时进行技改，增加牺牲阳极阴极保护；针对多管桩潮差区涂层破损多、修补难度大的问题，采用包覆防腐方案进行施工，并增加安装牺牲阳极块；对单管桩基础，采用浪溅潮差区包覆防腐；增加安装牺牲阳极块；同时进行阴极保护远程监控和外加电流阴极保护系统应用研究，并采用 BEASY 软件模拟电位分布，优化牺牲阳极、辅助阳极的布置，确保保护电位均匀，避免出现过保护或欠保护。

## 一、混凝土承台

### (一) 涂层整体维护

混凝土承台涂层整体维护：进行整体打磨（除海生物、除锈）、高压淡水冲洗。吹干后，采用“特奈麦克 / TNEMEC Series 201+ 气相二氧化硅”环氧水性改性砂浆腻子抹平小孔 + 环氧玻璃鳞片涂料底漆 350 μm + 环氧玻璃鳞片涂料中间漆 400 μm + 脂肪族聚氨酯面漆 60 μm 的防腐涂料喷涂工艺（图 4）。

### (二) 阴极保护技改

针对混凝土承台无阴极保护设计、本体出现早期腐蚀的情况，进行技改增加牺牲阳极块。选用牺牲阳极块型号：A21I-7（表 3）。

材料要求：牺牲阳极块符合《铝—锌—铟系合金牺牲阳极》（GB/T 4948-2002）要求；制作厂家资质、牺牲阳极块进场验收程序、化学组成和电化学性能符合规范要求，并确认原材料不是回收铝。

施工要求：应满足阳极块浸没在海水中，保证阳极块与混凝土承台实现电连接、且不破坏混凝土本体，牺牲阳极块与混凝土承台接触电阻小于 0.01 欧姆。

安装和运行效果如图 5 所示。

## 二、多管桩

### (一) 浪溅潮差区技改增加包覆防腐

针对浪溅潮差区防腐涂层破损多、修补难度大的情

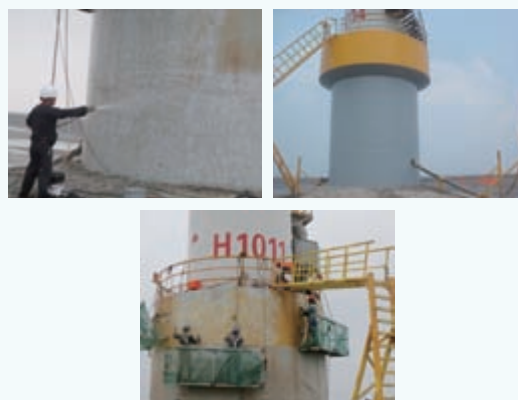


图4 混凝土承台涂层整体维护（打磨、冲洗、喷涂）

表3 牺牲阳极块型号、规格

型号	规格 /mm	净重 /kg
A21I-7	800 × ( 200+280 ) × 150	76.0
A21I-3	1500 × ( 170+200 ) × 180	122.0

况,采用包覆防腐方案施工(图6),保证浪溅潮差区的防腐效果。

### (二) 阴极保护整改优化

多管桩基础整改包括两方面:因设计缺陷、在水面以上的牺牲阳极块,进行下移安装;对于因地形、地貌变化导致阳极块露出水面的,独桩设计只有一个阳极块,以及阳极块掉落的,采取增加安装牺牲阳极块的措施进行整改。

## 三、单管桩

### (一) 浪溅潮差区技改增加包覆防腐

浪溅潮差区采用涂层+包覆防腐方案。包覆防腐系统由四层紧密相连的保护层组成,即防蚀膏、防蚀带、聚乙烯泡沫和玻璃钢或者增强玻璃钢防蚀保护罩(图8)。其中防蚀膏和防蚀带添加有抗腐蚀材料,具有优良的保护性、粘附性、与水和空气隔绝性;加上坚硬的固体玻璃钢保护罩,可以达到更好的保护效果(图9)。

### (二) 阴极保护远程监控及外加电流阴极保护应用研究

按《港工设施牺牲阳极保护设计和安装》(GJB 156A-2008)及《海港工程钢结构防腐蚀技术规范》(JTS 153-3-

2007)规定:阴极保护系统电位检测应一年一次。海上风电通达性差,人工检测工作量大、安全风险大,为此进行阴极保护远程监控及外加电流阴极保护应用研究。研究后发现:远程监测数据与人工测试数据吻合性较好,可大力提高工作效率和自动化程度。

外加电流阴极保护研究,在直径5.6m单管桩上进行,保护面积约800m<sup>2</sup>。系统主要由恒电位仪、辅助阳极、参比电极、阳极屏蔽涂料、海洋工程专用电缆、监测系统等组成。系统安装前,需确认其认证证书、材料质量证明书、检测及试验报告。系统安装后,保护电位达到规范要求范围。

调试期间,为避免过保护,将设定值由-1.019~-0.994V(图10)调整为-0.9538~-0.9622V(铜/饱和硫酸铜参比电极)。

## 四、塔筒

为提高塔筒防腐寿命,主要着手于底漆、中间漆、面漆的选型。

塔筒外表面防腐借鉴西门子风电机组C5-M环境防腐方案:采用热喷锌取代富锌底漆。中间漆采用环氧云铁中间漆。面漆要求耐太阳暴晒,抗紫外线,抵御褪色、变色、龟裂、粉化和剥落的能力强,以维持涂层防锈性能,选用



图5 牺牲阳极块安装(左)、运行保护(右)



图6 多管桩基础包覆前后对比



左:低潮位牺牲阳极块裸露 右:阳极块安装后  
图7 牺牲阳极块增加安装前后

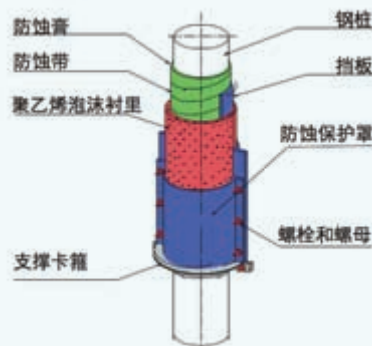


图8 钢桩包覆层修复技术示意图



图9 单管桩基础包覆防腐效果

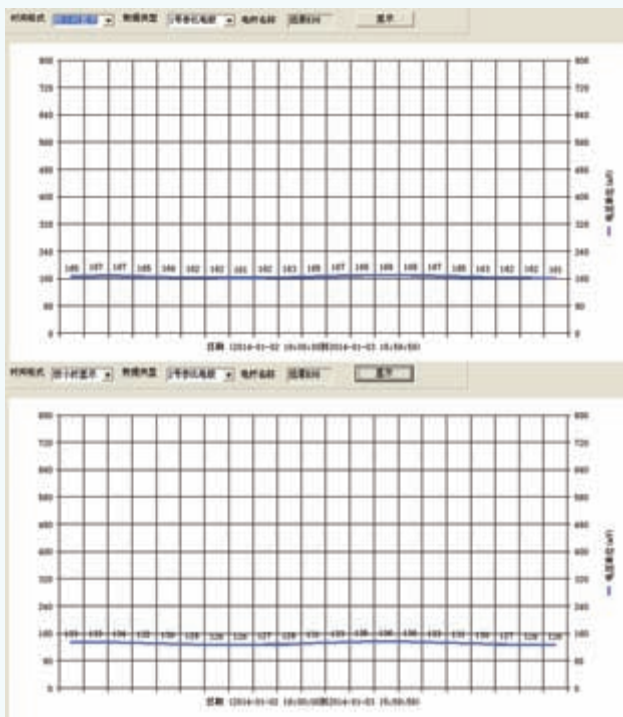


图10 外加电流系统监控数据（锌参比电极）

聚氨酯面漆或者4F氟碳涂料。

### 优化效果

通过整改、优化，从阴极保护电位检测数据看，海上风电机组基础的保护状态都得到明显改善。混凝土承台安装牺牲阳极块后，已处于正常阴极保护状态（表4）；多管桩在包覆施工后，克服了涂层修补难度大的问题（图6）；单管桩在包覆防腐施工后，阴极保护电位已经基本稳定不再正偏移（表5）。

#### 一、混凝土承台

通过涂层整体维护和安装牺牲阳极块后，混凝土承台表面腐蚀得到有效控制，承台也在阴极保护电位正常范围（表4）。

由表可见，安装牺牲阳极块后，混凝土承台检测电位明显负移，除1台低潮位期间电位稍偏正，其余都受到良好的阴极保护。

#### 二、多管桩基础

整改后保护电位均合格。以独桩为例，高潮位期间保

表4 阴极保护电位

机位	阴极保护电位（V）		检测结论
	高潮位	低潮位	
#38	-0.8462 — -0.8715	-0.7522 — -0.9203	偏正
#37	-0.8563 — -1.0106	-0.7965 — -1.0061	良好
#45	-0.9267 — -0.9772	-0.8905 — -1.0287	
#46	-0.8851 — -0.9041	-0.7808 — -1.0944	
#47	-0.9102 — -0.9231	-0.8615 — -1.0813	
#55	-0.8867 — -0.9702	-0.8412 — -1.0582	
#56	-0.8892 — -0.9169	-0.8553 — -1.0826	

表5 包覆前后单管桩基础阴极保护电位对比

序号	机位	对比数据	
		2014年	2015年
1	华锐 #2	-0.8703	-0.8861
2	华锐 #3	-0.8831	-0.8775
3	华锐 #4	-0.8742	-0.8775
4	华锐 #7	-0.8931	-0.8987
5	华锐 #8	-0.9076	-0.9580
6	华锐 #9	-0.8913	-0.8969

护电位为 -1.0097 — -1.0264V。

#### 三、单管桩基础

数据显示：自从对单管桩进行包覆防腐后，阴极保护电位已基本稳定无正移（表5）。显示包覆对基础防腐效果良好，包覆与阴极保护相结合，能有效保证基础安全。

### 结论

综上所述，海上风电防腐技术应用及优化方案，主要需要注意以下几点：

（1）对于浪溅潮差区防腐涂层破损修补难度大的问题，包覆防腐是一个很好的解决方法。

（2）海上风电混凝土承台和钢构基础，都宜在水下采取阴极保护防腐方案。有条件的，建议对浪溅潮差区采用包覆防腐。

（3）随着海上风电场规模的扩大、离岸距离的增加，应考虑远程监控项目及外加电流阴极保护等自动化程度高的阴极保护技术的研究和推广应用。

（作者单位：江苏海上龙源风力发电有限公司）

# 给梦想一个机会



期待你的加入.....

## 诚聘英才

北京鉴衡认证中心有限公司 (China General Certification Center, 英文简称“CGC”) 成立于2003年, 致力于为太阳能、风能等可再生能源和节能环保、碳减排以及家用电器等领域, 提供技术开发、标准制定、认证、检测、审核、项目评价以及产业和政策研究等服务的第三方机构。其中, 鉴衡风电设备认证证书已被几十个国家的风电项目招标采购, 认证结果得到多家银行及保险机构的采信。

### 为有识之士提供以下岗位:

风资源评估工程师 | 载荷评估工程师 | 机械结构评估工程师 | 控制工程师 | 电气工程师

风电机组测试工程师 | 叶片认证工程师 | 部件认证工程师 | 项目经理 | 销售经理

联系方式: 请发邮件至[hr@cgc.org.cn](mailto:hr@cgc.org.cn), 或拨打010-59796665





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)



# NRG Systems™



## 我们是NRG系统公司

可能看起来不一样了，但我们仍旧是您熟悉和信任的同一家公司。

我们仍然致力于为地球的可持续发展提供智能技术的设计和和生产，具体包括：

- **SymphoniePRO®** - 用于风资源评估的安全，用户友好型的数据记录仪
  - 先进的风速计和传感器，以低成本提供卓越的精度
  - 适用于任何天气的，性能可靠的Hybrid™XT风机控制解决方案
- 每个环节，我们都紧密地和您在一起

欲了解更多信息，请访问  
[nrgsystems.com](http://nrgsystems.com)



# NRG Systems



# 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