

# 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

10

2017年 总第92期 赛迪出版物



P12. 专栏

系统“调峰能力与辅助服务”是啥意思

P66. 技术

风电机组机舱变频器更换专用工具设计

## P22

# 海上风电：金风十年求索路

自2007年我国第一台海上风电试验样机(金风科技GW70/1500)在渤海湾矗立,至今已整10年。对于海上风电,新疆金风科技股份有限公司(下称“金风科技”)多年来虽甚少发声,但相关研究和实践却从未止步。十年磨一剑。2017年,金风科技将携带全新的海上风电解决方案重装启幕,对推动我国海上风电开发,他们很有信心。



ISSN 1674-9219



人民币25.00元

# 下一个十年 我们再起航

文 | 秦海岩



当下，数字化已经成为工业生产的核心特征之一，这在属于技术密集型行业的风电中表现得尤为突出。随着“互联网+”与风电的深度融合，大数据、云计算等数字化技术被广泛应用于制造、开发、运维环节，极大地提升了机组的发电效率和可靠性，运维转向预防性则让无人值班、少人值守正在成为现实。而随着下一阶段我国风电开发重心向中东南部的低风速以及海上地区转移，面对更加复杂的风况条件、更加分散的项目以及更短的运维时间窗口期，业内还必须加大对风电开发中数字化技术创新力度。

基于此，今年的北京国际风能大会将主题定为了“风能的数字化时代”，希望为业界提供一个思想碰撞、坐而论道的平台，让与会者充分展示各自在风电数字化应用方面取得的最新成果，共同寻找依托数字化技术手段实现风电高质量、可持续发展的路径。

今年恰逢北京国际风能大会举办十周年，这让此次大会在极富时代感的同时，也多了一份历史厚重感。十年来，大会的规模迅速扩大，影响力得到质的提升。参会和参展人次已经由最初的1.5万增加到3.7万，展馆面积也从1.6万平方米扩大至5.3万平方米，600多家国内外顶级整机、零部件和配套服务企业齐聚一堂，全方位展示了整个产业链的最新发展成果。丹麦、荷兰、英国、德国等国外展团的加盟，使大会更显十足国际范儿，它也成为了与德国汉堡国际风能展、美国国际风能展齐名的全球三大风能展之一。十年来，每届大会紧扣行业发展的时代脉搏，围绕政策、市场、技术等主题，邀请国内外重量级政府部门、行业组织、研究机构和产业界的代表进行深入探讨，形成一批重要共识和成果，为此后的发展指明了方向。

北京国际风能大会历来被视为行业发展的“晴雨表”，它的成功折射出我国风能产业的飞速发展。十年来，凭借全体风电人勇于开拓和创新的精神，我们在风电发展上取得举世瞩目的成就，不仅壮大了规模，新增装机和累计装机双双跃居世界第一，发展的质量也得到大幅提升，一条完整的产业链条已然成型，技术创新能力走在世界前列，风电设备远销至近30个国家和地区，产业布局不断得以优化，低风速风电开发成为一道独特的亮丽风景线。

当然，面对这些成就，我们仍然不能盲目自信。弃风限电、不实误解等问题依然困扰着行业，电价下调带来的降本压力、海上风电亟待强力重启也是我们必须直面的。好在我们有负责任的管理者，相继下发《海上风电开发建设管理办法》《关于有序放开发用电计划的通知》等文件，并组织开展了绿色电力证书认购交易和平价上网示范，力求通过创新体制机制，加速风电发展，助推成本下降。业界也在进一步强化创新力度，做精做细，不断突破管理和技术极限，迈上效益的新高度。这些都让我们有足够的理由对我国风电的未来发展充满期待。

十年间，我们走出了一条从风电弱国到风电大国，再到风电强国的波澜壮阔之路。站在新的历史起点上，全体同仁还需要再接再厉，用我们的创新精神和实干作风，在下一个十年为实现100%可再生能源而奋斗，继续书写属于中国风电人的精彩。✦

22

封面故事 Cover Story

## 海上风电： 金风十年求索路

自2007年我国第一台海上风电试验样机（金风科技GW70/1500）在渤海湾矗立，至今已整10年。对于海上风电，新疆金风科技股份有限公司（下称“金风科技”）多年来虽甚少发声，但相关研究和实践却从未止步。十年磨一剑。2017年，金风科技将携带全新的海上风电解决方案重装启幕，对推动我国海上风电开发，他们很有信心。



12 专栏 Column

## 系统“调峰能力与辅助服务”是啥意思

18 对话 Dialogue

## 品质与安全永远是 运达风电坚守的底线

专访浙江运达风电股份有限公司董事长杨震宇。



## 历史回眸

2008年10月29日—31日，以“世界风能，赢在中国”为主题的2008北京国际风能大会暨展览会召开。会议由中国资源综合利用协会可再生能源专业委员会、中国可再生能源学会风能专业委员会联合全球风能理事会共同主办，共吸引了249家参展企业、1500名国内外参会代表以及12000名专业观众。3天时间里，除了举办多场精彩纷呈

的论坛，为行业提供了交流和展示的平台，展览会也在同期开馆，16000平方米的展馆中，国内外主流整机企业纷纷亮相，展示先进技术设备，同时还有200多家零部件配套企业参展，全景式展示了完整的风能产业链。值得一提的是，此次大会暨展览会也是全球风能理事会的第四届全球风能大会，是该活动首次在发展中国举办。





# 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391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 下一个十年 我们再起航  
/ 秦海岩

## 08 风向/ Direction

### 专栏/ Column

- 12 系统“调峰能力与辅助服务”是啥意思  
/ 张树伟

### 现场/ Presence

- 16 我和风机在戈壁 / 林劲松

### 对话/ Dialogue

- 18 品质与安全永远是运达风电坚守的底线

### 封面故事/ Cover Story

- 22 海上风电：金风十年求索路  
/ 曹宏源

### 公司/ Company

- 30 中复连众：对海上风电叶片的十年执着  
/ 夏云峰

### 调研/ Survey

- 32 风力发电机组偏航系统专利分析  
/ 张人天，卫红

### 海上风电/ Offshore Wind Power

- 38 政策是左右美国海上风电发展走向的关键 / Herman K. Trabish

### 国际/ International

- 42 美国风电价格持续走低 凸显强劲竞争优势 / 张雪伟

### 公开课/ Open Class

- 46 引入企业专家授课 提升硕士教学质量  
/ 谢源

### 产业/ Industry

- 50 风电机组功率曲线与发电量浅析  
/ 王明军

## 风电场/ Wind Farm

- 56 风电场35kV开关柜典型故障与防范措施  
/ 靳现林，雷启龙，周建国

## 技术/ Technology

- 60 风力发电机组空-水-空冷却系统影响因素分析 / 王丁会，李锦辉，夏静

- 66 风电机组机舱变频器更换专用工具设计  
/ 丛智慧，安利强，王鹏

- 70 基于ANSYS Workbench的风电机组导管架基础过渡段结构优化 / 彭恒，朱荣华，田振亚，王晓宇，崔靓亮，李凤

- 74 聚α-烯烃齿轮油老化趋势及其再生处埋研究 / 唐金伟，李焯峰，刘永洛，王娟，常治军，肖秀媛，冯丽萍

### 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	三一重能
扉页 3	三一重能
扉页 4	德国倍福
扉页 5	恩斯克
扉页 6	望江工业
扉页 7	埃斯倍
扉页 8	赢创工业
扉页 9	锐奥德
扉页 10	麦加涂料
扉页 11	金风科技
扉页 12	贺德克
扉页 13	CWP2018
扉页 14	中国海装
扉页 15	DNVGL
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
P21	伊莱特
P41	歌美飒
P45	NRG
P55	斯维奇
P65	穆格
后彩七	奥特科技
后彩六	鉴衡认证
后彩五	科凯前卫
后彩四	浩亭
后彩三	中科宇能
后彩二	华豹涂料
后彩一	敏泰液压
封三	鉴衡认证
封底	罗特艾德



# 2017北京国际风能大会暨展览会

YUE NENG.SMARTER WIND ENERGY AND SOLAR

更智慧的风能、太阳能来自岳能

岳能科技和你有个 **约**



**新模式 新服务 新生态**

创建能源智慧运营新模式

提供云中心与大数据新服务

打造能源垂直领域新生态

2017年10月17日-10月19日

中国国际展览中心（新馆）W3馆A01展位



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



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10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：夏云峰

**Duty Editor:** Xia Yunfeng

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。



# 信息化齿轮箱

实时数据收集

定向技术服务

主动智能服务

云端深度处理

设备系统管理

移动互联平台

安全性能保障



CHINA  
WINDPOWER  
2017 17-19 October  
Beijing, China

欢迎莅临南高齿展位  
W2-C12

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

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

**NGC**





### 国家发展改革委：火电要为清洁能源上网腾出空间

近日，国家发展改革委印发《关于做好煤电油气运保障工作的通知》，其中要求多措并举做好电力稳发稳供：

一是落实稳定发电责任。各地要认真执行优先发电计划，密切跟踪并及时公开进度，切实促进清洁能源多发满发，优先上网。发电企业要分析供需形势，提前做好燃料采购、运力衔接和

储存，千方百计扩大场存能力、提高存储水平；做好设备维护和检修，稳定发电出力，兑现直接交易合同。

二是优化电网运行方式。电网企业要在保证安全的条件下优化火电机组运行方式，为清洁能源上网腾出空间；充分发挥北京、广州电力交易平台作用，进一步加大跨区送受电规模；积极开展发电权交易，实现清洁能源机组与火电机组间利益调节，

鼓励同一集团内实行跨省区发电权交易。

三是增强系统调节能力。各地要加大火电机组灵活性改造力度，扩大热电联产耦合规模，增强系统消纳可再生能源能力；要建立利益调节机制，切实落实《可再生能源调峰机组优先发电试行的办法》，再加快认定一批调峰机组，提高火电机组参与调峰积极性；鼓励清洁能源机组与煤电机组、自备电厂开展发电权交易，引导参与调峰。

### 12部委联合发文力求为风电企业减负

日前，国家发展改革委、财政部等12部委发布《关于减轻可再生能源领域涉企税费负担的通知（征求意见稿）》，其中规定，风电场进场及检修道路占用耕地，按2元/平方米的税额征收耕地占用税。

《通知》要求各地强化风电机组超大部件运输管理服务能力建设，缩短大件运输许可办理时间，规范运输管理。并鼓励发挥保险的风险转移作用，加强风电设备质量保险体系建设，推动以风电设备质量保险替代风电设备质量保证金。

《通知》还明确提出，各地不得向可再生能源投资企业收取没有法律依据的费用，不得将应由各级政府承担投资责任的社会公益事业投资转嫁给可再生能源投资企业或者向其分摊，不应强行要求可再生能源企业提取收益扶贫。已经收取资源出让费（或有偿配置项目）的地方政府，应在该通知发出一年内完成清退。国家将建立可再生能源开发利用法规政策执行监测评价机制，对监测评价不合格的地方，停止安排国家组织或支持的新的可再生能源开发利用项目。

### 我国第二季度清洁能源投资额同比增长243.5%

普华永道日前发布的《中国清洁能源及技术行业2017年第二季度投资研究报告》显示，2017年第二季度，中国清洁能源及技术行业投资增势明显，投资金额刷新近三年以来的单季度峰值。该季度共发生51起PE/VC投资事件，披露投资金额13.61亿美元，投资案例数同比上涨45.7%，投资金额同比增长243.5%。从投资案例数来看，中国清洁能源及技术行业投资二级行业仍然以环保为主，发生23起投资事件，比重占45.1%；新材料领域占比从

第一季度的14.3%上升为第二季度的27.5%，上涨了十三个百分点。从投资金额上看，新能源行业以9.382亿美元一家独大，占比高达68.9%。

《报告》显示，2017年第二季度，中国清洁能源及技术行业并购案例共计33起，披露并购金额9.24亿美元，其中跨国并购仅有1起，其他32起均为境内并购。环保和新能源行业并购案例数占据主导地位，分别完成18起和14起并购案例，占比分别为54.5%和42.4%。尽管新材

料行业仅完成1起并购案例，但以3.926亿美元的并购金额，占到全行业总并购金额的42.5%，位居榜首。





## 河北“十三五”期间将加快建设两大千万千瓦级风电基地

近日，河北省人民政府印发《河北省“十三五”能源发展规划》，其中确定的“十三五”风电以及光伏发电发展目标分别为2080万千瓦、1500万千瓦。

《规划》将大力发展绿色电力列为重点任务之一，提出：一方面，积极开发风电。坚持基地建设与分散开发相结合，充分利用各类风能资源，合理优化布局，扩大装机规模。加快建设张家口、承德千万千瓦级风电基地，有序推进唐山、沧州海上风电建设，积极布局发展低风速风电项目。

另一方面，大力发展光电。推广先进技术装备，

创新开发利用模式，提升就地消纳能力，加快发展村级电站和居民屋顶等多能互补分布式光电，因地制宜发展农光、渔光、牧光等规模化集中电站，稳步推进光热发电示范工程。

《规划》还要求大力推广利用非化石能源：一是完善体制机制。结合电力体制改革，实施可再生能源配额制及竞争性配置机制，落实可再生电力全额保障性收购制度，鼓励可再生电力参与市场直接交易。

二是建设示范工程。加快建设张家口市可再生能源示范区，实施崇礼零碳奥运专区、奥运光伏廊道、风光储输一体化等示

范工程，建设低碳城镇和绿色能源县、乡、村，建立不同特色的非化石能源利用区。

三是提高消纳能力。加快建设张家口、承德市可再生能源电力就地消纳和面向京津冀外送通道。加快智能电网建设，提升电网调峰能力，促进可再生电力就地消纳。

四是拓宽利用途径。鼓励发展风电供热、风电制氢等利用工程，积极推进发展太阳能集热，推广民用太阳能热水、农业太阳能集热供汽工业园，支持建设农村生物质能供热、供汽和燃料工程。

## 风电成为黑龙江第二大电源

今年8月，黑龙江省风电的多项数据创历史新高，已成为该省第二大电源。

国网黑龙江省电力有限公司的数据显示，8月，全省风电发电量达8.4亿千瓦时，创历年8月风电发电量最高水平，是2015年同期的2.2倍，是2016年同期的1.4倍。8月29日，全省风电最大日发电量达到7988万千瓦时，超过当日全省发电量的1/3；8月24日—31日，风电发电量为4.6亿千瓦时，占同期全省发电量的24.7%；最大发电电力达417万千瓦，占当时全省发电电力的40%，均为历年8月的最高水平。

近两年，黑龙江省全力推动风电快速发展和充分利用。截至2017年7月末，该省风电装机达567.6万千瓦，占全省总装机容量的20%，已成为第二大电源。2015年，风电发电量为72亿千瓦时，同比增长0.5%，占全省发电量8%；2016年风电发电量为87.6亿千瓦时，同比增长21.7%，占全省发电量9.5%；2017年1月—7月，风电发电量为58.7亿千瓦时，同比增长21.6%；8月，完成风电送华北交易电量6900万千瓦时，同比增长42.3%。

## 我国单体容量最大的海上风电项目有望今年年底开工

日前，中广核阳江南鹏岛40万千瓦海上风电项目获得广东省发展改革委核准批复，这是中国迄今为止一次性核准的单体容量最大的海上风电项目，有望于今年年底开工建设。

据了解，该项目位于广东省阳江市阳东区东平镇南侧海域，是中广核在广东省

获得核准的首个海上风电项目。总装机容量为40万千瓦，拟采用5兆瓦级以上风电机组，配套建设一座海上220千伏升压站、35千伏集电海缆、220千伏登陆海缆及一座陆上控制中心，总投资约80亿元人民币。

项目建成投产后，预计年上网电量约10.3亿千

瓦时，与同等规模的燃煤电厂相比，每年可节约标煤约32.1万吨、减少灰渣约2.12万吨、减排二氧化碳约64.86万吨，对于推动广东省海上风电开发，优化广东清洁能源结构、推进粤西地区特别是阳江市的产业升级，加快区域经济社会发展具有重大意义。



## 全球最大风电运营商更名为“国家能源投资集团”

9月21日，北京市工商行政管理局正式下发核准告知书，“神华集团有限责任公司”于9月17日被核准变更为“国家能源投资集团有限责任公司”；同时变更以该企业为核心企业组建的企业集团名称为“国家能源投资集团”。

此前，经报国务院批

准，中国国电集团公司与神华集团有限责任公司合并重组为国家能源投资集团有限责任公司。

重组后，国家能源投资集团有限责任公司总资产达到1.8万亿元，可再生能源占比达到23%，风电装机容量总量达3300万千瓦，成为全球最大的风电运营商。



## 西门子—歌美飒赢得其在中国市场的最大订单

日前，西门子—歌美飒宣布，在中国赢得了一份30万千瓦风电机组的供货合同，这是该公司在中国市场拿到的最大订单。

据悉，西门子—歌美飒将为锡林浩特风电场提供150台G114-2.0 MW机组，并将为风电场提供长期运维服务。第一台机组计划

于2018年第二季度安装，整个风电场将于2018年年底并网发电。

西门子—歌美飒亚太区总裁Álvaro Bilbao强调：“此合同的签署证明了西门子—歌美飒在中国市场的策略的成功。截止到现在，西门子—歌美飒在中国的装机量已经超过了460万千瓦。”

## SANY 三一重能2.5兆瓦风电机组平台将批量装机

今年10月，三一重能与欧洲研发机构合作开发的2.5兆瓦平台产品（SE13125和SE12125）将在大唐新能源张北大河风电场吊装两台样机。年底，

该机型会在宁乡观音阁二期风电场实现批量装机。

三一重能的2.5兆瓦平台产品适用于低风速、超低风速风电开发。在年平均风速5米/秒的情况下，

SE13125、SE13122年利用小时数分别能够达到2000小时、2200小时。

并且在同等装机容量下，通过部署SE13125机组，机位点将减少20%，能够有

效解决南方征地难题。针对低风速复杂地形，三一重能可以借助混合塔筒技术以及排布方案，为业主提供更具竞争力的解决方案。

## 数据

15603 万千瓦

9月21日，国家能源局发布1—8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165664万千瓦，其中，风电累计装机容量为15603万千瓦。

3.49 亿千瓦时

湖南省统计局9月13日公布的数据显示，8月，该省规模以上工业发电量为130.86亿千瓦时，同比增长6.8%。其中，风电发电量达到3.49亿千瓦时，同比增长48%。

19.8%

9月11日，欧洲单日风电发电量在总发电量中的占比再创新高，达到19.8%。同一天，另一项纪录也被打破——欧洲海上风电的出力达到1148.4万千瓦。





## 国际热点

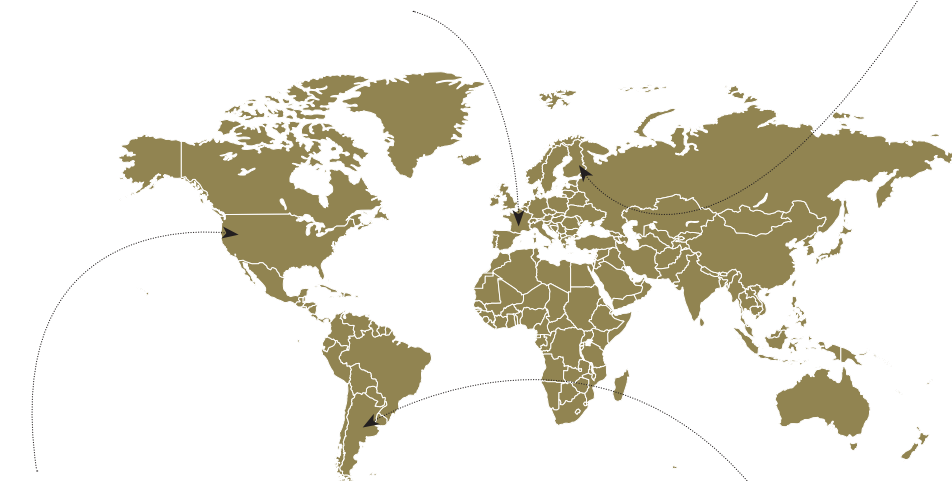


## 法国

WindEurope 组织的相关负责人 9 月 20 日表示，受利好政策刺激，预计到 2030 年，在法国的全部电力装机中，可再生能源装机将占 25% 以上，超越英国和西班牙，位居欧洲第二。埃马纽埃尔·马克龙总统计划在其第一任期举行一轮可再生能源招标，装机规模达到 2600 万千瓦。

## 芬兰

9 月 17 日，芬兰西南部商业与环境发展中心官员马尔库·阿尔姆向媒体表示，按照目前的投资速度，从 2018 年开始，该国可再生能源的使用比例将超过化石能源。2016 年，可再生能源在芬兰能源消费中占 34%，而该国设定的目标是到 2030 年使这一比例提高到 50%。



## 美国

近日，美国第一个海上风电项目——布鲁克岛海上风电场的开发商 Deepwater Wind 宣布将在部分风电机组基础平台上安装追踪设施，用于收集附近鸟类和蝙蝠迁徙的飞行数据，为美国鱼类和野生动物管理局、罗德岛大学和马萨诸塞大学的动物保护研究提供支持。

## 阿根廷

作为 2016 年启动的“RenovAR”创新计划的一部分，阿根廷政府日前进行了一轮 120 万千瓦的可再生能源项目招标，其中包括 55 万千瓦的风电项目和 45 万千瓦光伏发电项目。这一次招标还设定了价格上限，风电和光伏分别对应 56.25 美元 / 兆瓦时、57.04 美元 / 兆瓦时。

## 1000 万千瓦

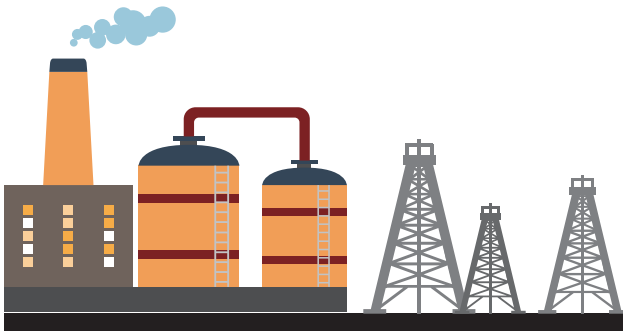
根据日本通商产业省的能源规划，2030 年，该国海上风电装机将达到 1000 万千瓦。2018 年，日本政府计划向国会提出一项新的法律草案，为海上风电项目设立统一标准。

## 100 万千瓦

日前，德国启动陆上风电第三轮招标，总装机容量为 100 万千瓦。虽然竞争已经促使前两次招标的中标价不断降低，但此次招标仍然设定了 70 欧元 / 兆瓦时（约合人民币 0.55 元 / 千瓦时）的价格上限。

## 0.51 元 / 千瓦时

日前，由东能源在英国建设的 Hornsea 2 和 Moray 海上风电项目的电价合同拍出了 57.5 英镑 / 兆瓦时（约合人民币 0.51 元 / 千瓦时）的成交价，已经低于核电和天然气发电。



# 系统“调峰能力与辅助服务”是啥意思

文 | 本刊特约评论员 张树伟

在前几期的专栏中，我们讨论了电力需求不旺、电源与电网不协调、外送能力不足，以及外送“打捆”之于弃风问题的相关性，指出这些说法存在评价体系价值标准不清楚（是否扩大外送，解决电网阻塞缺乏成本效益分析；“又大又粗”的高压点对网基荷送电，严重影响整个系统运行的灵活性，却整天拿“大容量”当卖点），与讨论的问题不相干（需求不旺与供给端的有效竞争不搭界），或者远不够解释高弃风率（如存在网络阻塞，长期需要扩容）的问题。在本期专栏中，我们讨论所谓的“系统调峰能力不足”的意思与含义。

## 事实

- 系统的调峰，可以通俗理解为调频之外的向上与向下的出力变化（15分钟到小时级都是存在的），以保持系统的实时平衡。向上的调峰，在目前系统容量

基于“显示偏好”的最小出力，往往比测算出的技术性最小出力要准确得多。

严重过剩的背景下，容量不成问题；调节速率问题则可以在很大程度上通过开机组合短期计划来解决。系统所需的调节灵活性（需求、可再生能源）可以通过很多方式（火电调节、需求响应等）得到满足。

- 向下的调峰涉及最小出力问题，这方面的讨论仍旧是非常不透明的。如果系统所有的机组都实现了最小出力，那么证明系统存在严重的供大于求，价格需要大幅跌落，以将尽可能多的出力挤出。电价不断下降到低于燃料成本的程度（比如0.1元/千瓦时—0.15元/千瓦时），灵活的煤电就宁愿尽可能地停机，而不愿意留在序列里承担亏钱的损失了。那么剩下的，就是的确“往下调不了”或者不够灵活参与下一阶段市场的那部分。这种基于“显示偏好”的最小出力，往往比测算出的技术性最小出力要准确得多（见图1）。

- 热电厂保持供热所需要的同时，维持的发电功率往往是一个向下调节的障碍。东北冬季供暖期的调峰问题是一个常被提起并用来证明“调峰困难”的实例。图2是吉林电网冬季典型日24小时运行的情况。但是令人费解的是，为何火电最小技术出力在24小时内都保持一条直线？从常识来讲，即使要照顾供暖需求，白天与黑夜的供暖功率都不需要一样。为何中午12时和晚上10时的火电出力都没有变化？供热的需求并不构成这种变化的刚性约束。何况，在一定范围内热电比的变化以及彻底的热电解耦，已经是丹麦等国的一个基本运行事实（见图3）。

- 2016年，《东北电力辅助服务市场专项改革试点方案》《东北电力辅助服务市场运营规则（试行）》陆续颁布，从2017年开始实施。后一个文件“发明”了火电深度调峰的概念，将火电调节到大约50%（存在一些细节变化，比如春节降至40%）以下定义为“有偿调峰服务”。这一服务的成本，由负荷率高于深度调峰

基准的火电厂、风电场、核电厂共同分摊。火电压低出力客观上存在额外成本，包括但不限于更低的热效率、机组损耗加剧等。只是不清楚这些基准到底是如何确定的？为何 50% 上下一个 1% 的变化性质如此不同（向上似乎是免费的）？为何这种服务的需求方是所有的其他出力仍旧高的机组？参与了有钱拿，不参与还得给钱，参与了也不影响年发电量。如果补偿足够大，火电是否都会参与，作为“调峰”机组？从完全没有平衡责任，到“大锅饭”一起承担平衡责任，这个市场从无到有的过程是否涉嫌过度“生造”？

• 在竞争性电力市场（特别是分散式市场中），承担平衡责任的往往是所有参与者（起码是传统发电机组）。平衡辅助服务价格的确定是基于市场，而不是成本<sup>1</sup>。也就是说，无论是发电商，还是用户，都有保证自我平衡的义务（否则意味着产生了辅助服务）。调度负责各种计划（比如日前）与实时偏差的处理（机组出力误差、需求预测误差、应急事件等），是参与平衡市场的少部分机组和系统备用资源的“调度者”。这部分机组往往只占整体装机的 5%—10%。比如德国的 4 个系统运营商（TSO），定期招标一次、二次、三次（对应于 15 分钟以上，到几小时的调节，大致相当于我国的调峰）系统调节的资源，这部分资源的总量大概为 500 万千瓦—600 万千瓦（最大负荷 8500 万千瓦左右），近年来还有所下降。

• 因此，在竞争性市场，机组（或者机组组合在一起）享受“平衡服务”，其原因必然是自身的实际出力相比较自己的承诺，产生了额外导致系统不平衡的“偏差”。这一偏差的弥补（由调度统一管理），如果意味着额外的平衡成本（偏差也有好

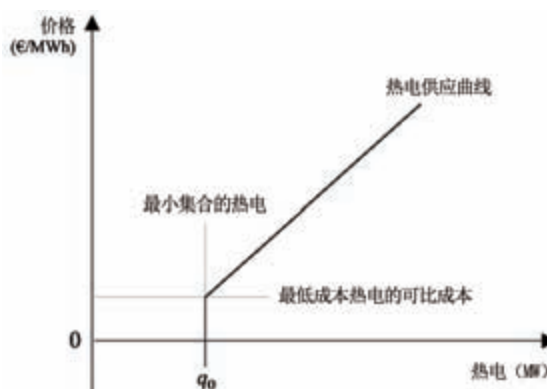


图1 基于显示偏好的机组最小出力示意图

来源：Lion Hirth. Minimal Thermal Generation in Power Systems – Inferring Private Cost Parameters from Observed Firm Behavior, 2015。

注：图中横坐标是化石能源电厂的出力，纵坐标是市场的价格；市场价格不断下降，逐渐失去利润空间的电厂被挤出市场，火电出力减少；市场价格下降到最廉价的火电厂的边际成本之下，如果火电厂仍保持在线，表示其在技术上已经无法调节，属于“最小出力”水平。

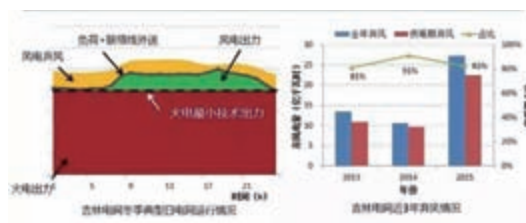


图2 吉林电网冬季典型日24小时运行曲线

来源：郭剑波.我国新能源并网消纳现状及对策，中国工程院“可再生能源协调发展与高效利用”工程前言技术研讨会，2017年5月23日。

坏之分，与总的偏差符号相反的偏差有助于系统平衡，见图4），需要由引发偏差的机组承担，而系统运行者需要各种备用去应对这种不平衡。在可再生能源发展的初期，往往是出于积累经验的需要而免除它的这一责任。但是目前，越来越多的新建风电与大型光伏项目已经开始直接参与市场，并且承担平衡责任。预测的准确率不高，出现大的出力偏差，往往意味着极高

从完全没有平衡责任，到“大锅饭”一起承担平衡责任，这个市场从无到有的过程是否涉嫌过度“生造”？

1: 辅助服务有很多类型，三次平衡调节仅是其中的一类，其他的可以包括电压支持、黑启动等。市场与成本为基础（market-based和cost-based）在长期是没有区别的，但是短期往往存在巨大的区别。市场通常是边际成本定价或者双边撮合（pay as bid）的，而成本定价往往是长期平均成本定价。





的收益损失<sup>2</sup>，甚至是亏损。

• 在我国，调度与参与者之间的责任界面区分不明显。调度往往具有无限的责任，而参与者是否在交易后实现了自我平衡，缺乏相应的基准与高分辨率去判断。具有无限责任的同时，也具有无限的权力，可以在相当大程度上决定机组的出力（比如火电机组，50%以内是义务，50%以外给补偿），往往成为了所有机组的“指挥官”。

### 逻辑

• 系统即使存在调峰能力不足（比如供热机组已经到达最小出力，系统仍存在过量的有功出力），那么这一问题的代价需要由风电去部分甚至全部承担，这其中存在着逻辑跳跃。为什么不是那些调不

在我国，调度与参与者之间的责任界面区分不明显。调度往往具有无限的责任，而参与者是否在交易后实现了自我平衡，缺乏相应的基准与高分辨率去判断。

下的承担成本，而是风电（也包括所有其他的发电机组）承担成本。它们为何“享受”了调峰服务的认定依据不清楚。

• 波动性电源进入系统，将具有区别于旧有可控基荷机组的强烈再分配效应。风电与光伏将持续地改变剩余负荷曲线的形状，所以，即使未来有足够的电力需求增长，其他机组的利用水平也会大大折扣，以至于在可再生能源出力大过总负荷之后，基荷机组完全消失，市场份额缩小。这是可再生能源出力特性的特点，也是市场竞争的结果和系统成本最小化的必然要求。如果将它认定为是可再生能源“享受”了原有机组提供的任何服务，那么往往意味着原来的市场是既有机组“让出来”的，而不是竞争机制下的结果。

• 从以上分析可以看出，目前国内

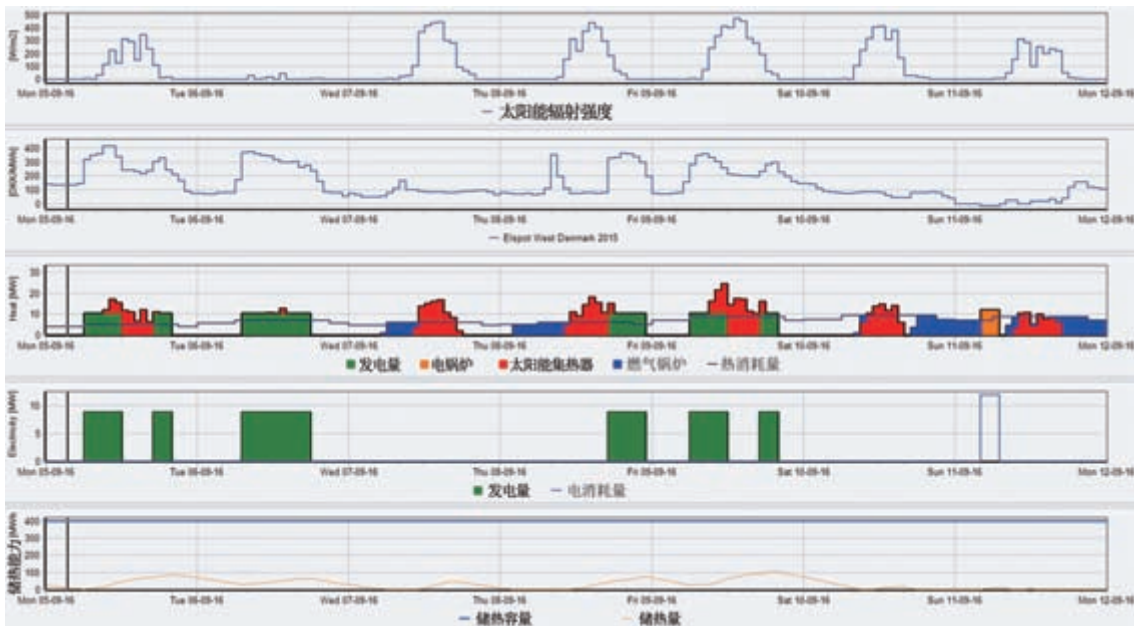


图3 丹麦某热电厂2016年九月的一周运行出力变化

注：从上到下依次是太阳能热水器的出力、电力市场价格、热生产与消费、电力生产与消费，以及储热罐的储热容量变化。这一电厂将在电价高的时候发电，余热储存；电价极低的时候用电生热并储热。逐小时地变化。

来源：EMD International A/S网站。

2：目前，由于风电、光伏进入系统的merit-order效应，美国与欧洲电力市场价格不断下降，发电商从批发市场获得的利润日益微薄。核电、风电一次出力偏差的影响，可能就相当于一周、甚至一个月的利润（与美国New England监管机构Ronald Coutu先生的谈话，2017年4月16日）。

对调峰问题的讨论暗含着“先来后到”、计划性市场份额，而非“有效率竞争”的价值观；充斥着“技术性”系统视角的平衡实现与系统安全，而非以市场为基础的解决思路；对于“谁的问题，又是谁来承担成本”的责任划分与成本分摊是一笔糊涂账。这与调度过度地追求对发电的完全可控（而不是承诺与实际出力的一致性）、调度自由量裁权与调度尺度过大、所有机组缺乏短期自我平衡责任密切相关。

· 退一步来讲，即使认为机组深度调峰是一种“服务”，那么对这一服务的享受者也需要进一步认定，而不是像很多媒体报道的那样，“一步到位”地部分乃至全部落到可再生能源头上，这同样存在逻辑跳跃。调峰本身就是模糊的，回避了竞争市场份额的问题。

· 没有系统调度数据，也就说不清楚机组减少出力或者完全停机调峰，到底（在多大程度上）是因为可再生能源的接入，还是要维持一定水平的供热出力或者调节裕度，以满足系统可靠性要求。

## 含义

竞争性电力市场中，平衡的责任往往是分散到每一个个体，调度需要处理的只是偏差部分与系统实时平衡，系统开机组合计划往往是竞争性分散决策的。而我国调度（5级体系）往往具有无限的责任与权力，具有集中统一所有计划的职能，要求所有机组“完全可控、可调”。这与可再生能源波动剧烈、无法完全准确预测的出力特点产生了明显的冲突。在我国，目前关于系统的调峰能力，仍旧在相当程度是一种系统如何保持平衡的技术性讨论，而涉及相关参与者自身的损益如何划分更是一个找不到足够需求方的政治性分摊。

系统调峰能力，特别是向下调节能力在某些时段存在不足是可能的，在欧美也

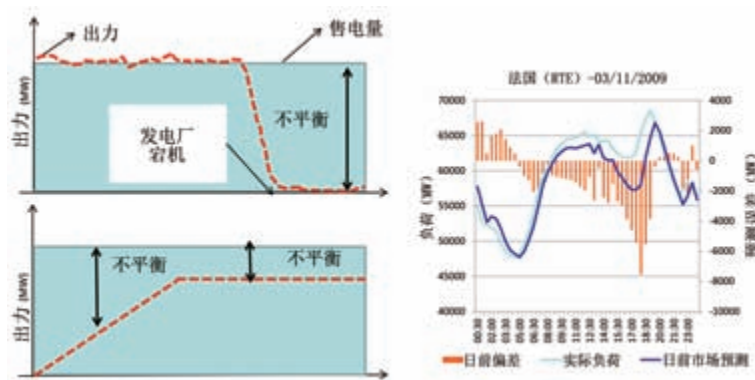


图4 系统平衡服务与机组的偏差(实时—日前)

来源: Jean-Michel Glachant. Electricity market regulation: lessons learnt (by me) - a 20 years journey...

是存在的。但是在欧美，这一不足的代价承担者不是风电发电商，而往往是那些无法做到深度减少出力的传统煤电与核电机组。这也符合基本的经济逻辑——系统成本最小化，可变成本几乎为零的可再生能源永远需要优先调度，而其他的去满足剩余负荷（Residual Load）。无法深度调峰是煤电的烦恼与问题。它留在系统中少数几个时段亏钱是不得已的选择，这仍旧好过停机错过大部分的挣钱机会。

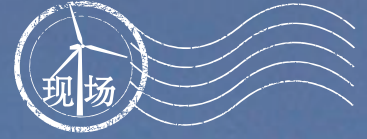
深度调峰作为一种辅助服务类型，在逻辑上是费解的，是基于给定的计划小时数（市场份额）与“基荷偏好”的安排，排斥发电竞争性安排与竞争市场份额的体现。这与未来系统的“低利用率、轻资产、价格波动剧烈”的特点格格不入，也缺乏风电享受了“调峰辅助服务”的明确认定依据与参考基准。

调度运行数据的及时公开是对以上问题形成共识性诊断的数据基础与前提，笔者也随时准备根据充足的事实与数据基础调整自己的认知。这是一项非常迫切的任务，是可能的调度方式改变与系统偏差平衡成本更公平分摊的前提。 [作者单位：卓尔德（北京）环境研究中心（Draworld）]

可变成本几乎为零的可再生能源永远需要优先调度，而其他的去满足剩余负荷。无法深度调峰是煤电的烦恼与问题。

# 我和风机在戈壁

图文 | 林劲松







炎热的夏季

从风机里出来

咸咸的汗不停地淌着

滴落在炽热的沙土地上

在空旷的戈壁滩

风机叶片旋转发出的呼呼声

打破戈壁滩亘古不变的千年沉寂

丝绸之路，西部古道

绿色能源让荒凉的戈壁焕发出勃勃的生机

风机在狂风中倔强地耸立

一排排的银色

自成一一道风景

伟岸的机身和御风而转的叶片

以一种优雅方式告诉世人它的存在

沉寂千年的戈壁滩

古老的传说又有了新的命题

青春的部落，在炫目的阳光下

与风机一道扎根在西部的土地

夏季一过

就是收获的季节

风沙的洗礼使风电人更为执着与刚毅 

(作者单位：东方电气风电有限公司)



受访嘉宾：  
杨震宇，浙江运达风电  
股份有限公司董事长。

# 品质与安全永远是 运达风电坚守的底线

本刊 | 夏云峰

在我国风电行业发展迈入新阶段的大背景下，运达风电积极向高端服务型制造企业转型，力图以创新设计研发为源头，推动企业立足制造、融入服务，站在更高的高度为客户提供定制化的产品、服务及全生命周期资产管理。在此过程中，品质与安全则是这家企业始终坚守的底线。

**《风能》：您如何看待目前风电发展的整体形势？运达风电提出向高端服务型制造企业转型，这是基于什么样的考虑？**

**杨震宇：**随着越来越多国家在应对全球气候变暖、走绿色环保可持续发展之路等议题上达成一致，英、法、德等欧洲国家陆续出台关闭火电厂的行动计划，可再生能源市场迎来发展的“黄金时代”。

再看国内，自十八大以来，习近平总书记一直将“环境保护、生态保护”牵挂心头，今天的中国正在利用更加低碳的能源大力调整原有能源结构。风电作为其中的代表，装机规模已经傲立于世界之巅。虽然风电的发展过程也存在一些曲折，但市场整体健康发展的势头没有改变。

目前，整个电力市场处于“深化改革”的关键期，在风电市场发展趋于平稳的大背景下，行业正面临新一轮挑战。

对此，我们清晰地意识到只有向高端服务型制造企业转型，才能不断地向产业“微笑曲线”的两端延伸。运达风电所倡导的服务型制造企业，是以创新设计研发为源头，立足制造，融入服务，深化信息技术的应用，站在更高的高度为客户提供定制化的产品、服务乃至资产管理，为客户解决风电场资产管理链上的各类问题。我们将充分利用现有的风力发电系统国家重点实验室、博士后科研工作站和院士专家工作站的技术研发优势，并依托“互联网+工业”模式，向高端服务型制造企业转型，实现企业的可持续发展。

在此过程中，我们会一如既往地为客户创造更多价值作为自己前进的方向，以实现平价上网作为追求的目标，兑现更好地服务于能源绿色发展，

献人类清洁绿电，还自然碧水蓝天的企业使命。

**《风能》：平价上网是大势所趋，这需要产业链各个环节协作降本。运达风电通过哪些措施来降低机组价格？运达风电的产品和服务对于客户的降本增效有哪些价值点？**

**杨震宇：**风电平价上网的背后，行业面临的成本压力不容忽视，需要各个环节共同努力。机组降低成本非一朝一夕之功，特别是随着行业竞争日趋激烈，更应打好“组合拳”，妥善处理好管理和创新的关系，才能真正实现这一目标。

管理上，要加强管理，细化管控措施，例如精确的库存管理、精益的生产管理、智能的物流系统等，降低生产、采购、物流、运维等环节的成本。

在创新上，一是持之以恒地对产品和工艺、方案进行优化，通过公司内部创新机制进一步优化产品设计，降低度电成本；二是发挥创新引领作用，技术部门从关键部件入手，联合供应商、采购、运维等部门共同对机组平台一体化、模块化等方面进行创新；三是加大对材料的研究力度，提升现有材料的各项性能指标，从而推进机组轻量化设计；此外，我们还运用大数据技术对风电场全生命周期各环节的成本进行优化，利用超算平台优化运维服务模式，提高机组可利用率，缩短备件时间，减少停机时间，为客户创造最大的经济效益。

**《风能》：质量是决定企业在日益激烈的市场竞争能否胜出的关键，运达风电通过哪些措施来保证产品和服务的质量？**

**杨震宇：**质量体现着人类的劳动创造和智慧结



晶，体现着人类对美好生活的向往。当下，中国高度重视质量建设，不断提升产品与服务质量，努力为世界提供优质的产品与服务。

运达风电作为一家负责任的国有企业，绝不会以牺牲产品或服务 quality 来换取价格下降。在这里，我可以郑重承诺，品质与安全永远是运达风电坚守的底线。

我们在这方面做了大量工作：一是通过不断加强公司质量管理部门的职能，以全面质量管理为抓手，对产品与服务的质量进行全过程、全方位、全时段监控与管理，实现质量体系互联互通；二是构建完善的供应链质量管控团队，协助部件厂家建立和梳理部件设计、制造、质控等各个环节的质量保证措施，持续优化部件的质量控制标准，并联合制定部件质量提升计划，确保关键部件的质量；三是严格遵循“端对端”交付管理体系，从合同签订开始，严格把控每个项目的产品、服务质量；四是凭借运达风电丰富的运维经验和高效的运维模式，确保在产品生命周期内提供高质量的服务。

#### 《风能》：在使机组和运维更加智能化方面做了哪些工作？

杨震宇：风电机组智能化已成为行业发展的趋势。运达风电运用传感器融合、多智能体协同控制、大数据挖掘分析等先进技术，实现机组的自感知、自学习、自适应、故障预警与智能诊断，不断提升机组可靠性和发电能力。目前，运达智能机组可以通过对运行数据的收集、整理和分析，综合计算给出更加适应风电场环境特点的控制算法和运行模式。

运达风电还将物联网、云计算等新一代信息技术与风电行业相结合，开创了“智慧风电”的战略蓝图，其中最重要的一环就是风电场智能管理系统，该系统具备智能监控、智能预警、智能故障诊断、智能运维管理等功能，能够实现风电场无人值守或者少人值守，从而为智慧风电场探索出一条设计先进、运营精细、产品性能持续优化的解决之道。

作为能源互联网的关键环节，未来的智慧风电将具有更高的环境适应性与电网适应性。随着云计算、大数据、“互联网+”等技术的发展，我们还将不断加大对风电机组智能化领域的研究，为最终构

建全球能源互联网提供有力支持。

#### 《风能》：下一步，运达风电在风电市场上的业务布局重点有哪些？

杨震宇：针对市场的新形势，我们将继续坚持公司“十三五”规划提出的“一主两翼”发展战略，并进一步加大推进力度。

“一主”，即风电机组的整机设计研发、生产、销售。随着中东南部低风速风电开发日渐成熟，我们将加大低风速机组的研发力度，使更多更低风速地区的开发成为可能。此外，开拓海外市场也是运达风电未来发展的必由之路。国内市场竞争已经非常激烈，国际化将必然成为我们战略转型的重点方向。目前，运达风电处于“走出去”的最好时机，我们重点关注“一带一路”沿线国家的市场潜力，积极寻找合作契机，深度整合资源，把握好国家的外交、产业政策，努力获得金融体系的支持。未来，根据不同市场的特点，我们将有针对性地采取“借船出海”“拼船出海”，甚至是“自己造船出海”的策略，推动运达风电“走出去”，参与国际市场竞争。

“两翼”之一为风能资源开发。我们将进一步增加风能资源的储备，并结合政策与市场环境，做好风能资源开发布局，合理有序开展风电场投资工作。“两翼”之二为后市场服务。我们将积极参与风电场技术改造与提效升级工作，把后市场服务打造成运达风电的特色业务之一。我们认为，随着出质保机组数量不断累积，风电场技术改造和机组升级的空间会越来越大，而运达风电作为以技术见长的企业，也会在这一领域迎来更为广阔的发展机遇。

总之，作为一家有40年风电机组研发和制造历史的企业，运达风电在这一领域积累了丰富经验，也积淀下了深厚的技术和人才优势，并以稳健的发展、良好的产品和服务、“一切以客户为中心”的价值理念和积极向上的企业风貌，为自己赢得了市场口碑，在业界有了一定的影响力。未来，我们将坚守自己的企业精神和发展内核，积极发挥技术和人才优势，在风电领域精耕细作，推动以科技创新为核心的全面创新，朝着“做优、做强、做好、做久”的方向不断努力，力争成为风电行业的“百年老店”，为我国的新能源产业发展做出积极贡献。☑



为您昂贵风机系统  
提供更高安全保障

## 山东伊莱特 大兆瓦风电法兰专家



西班牙合资，伊莱特股份在全球风电法兰市场具有领导性地位，我们的整体锻造法兰解决方案已成功应用于金风6MW、维斯塔斯8MW等诸多大兆瓦风机，以及江苏如东海上风电场、福建平海湾风电场，江苏蒋家沙风电场等多个大型海上风电项目。

2017年我们即将投产的直径16米，高度3米超强轧环机将为全球风电设计者释放更多想象。

山东伊莱特重工股份有限公司  
地址：山东省济南市章丘区济王路9001号  
公司热线：400 0860 566  
邮箱：inifo@iraetaforging.com  
网站：iraetaforging.cn



扫码关注官方微信







金风科技江苏响水近海三峡风电场项目吊装现场



封面  
故事

# 海上风电： 金风十年求索路

自 2007 年我国第一台海上风电试验样机（金风科技 GW70/1500）在渤海湾矗立，至今已整 10 年。对于海上风电，新疆金风科技股份有限公司（下称“金风科技”）多年来虽甚少发声，但相关研究和实践却从未止步。十年磨一剑。2017 年，金风科技将携带全新的海上风电解决方案重装启幕，对推动我国海上风电开发，他们很有信心。

---

本刊 | 曹宏源

---

## 十年蛰伏求华变

“风电是一场长跑，能否笑到最后，静气与耐心极为重要。”这是在金风科技耳熟能详的一句话，也是他们的经营理念。

作为国内风电行业的龙头企业，金风科技素来以发展稳健著称。对于海上风电的开发，金风科技有着自己的态度：积极但谨慎，跟进但不冒进。

金风科技董事长武钢对此的解释是，海上风电的开发有很多风险因素，整机厂进入海上风电领域需要有丰富的陆上风电设备研发、制造、运维经验的积累作为支撑。因为机组一旦出海，对设备的可靠性要求非常高，施工成本也比陆上高得多，一旦出现设备质量问题，维修成本可能使得整个项目回报打水漂。机组设备的高可靠性是需要成熟的研发和不断试验来实现的，冒进带来的损失是对社会资源的浪费。

2007年，金风科技1.5兆瓦试验样机在渤海湾矗立起来，这被业内认为是我国海上风电的开端，也是中国第一台在海洋环境中运行的直驱永磁风电机组。

现任金风科技研发中心副总经理兼江苏金风科技有限公司总经理的陈小海作为首任项目经理，参与了项目建设的全过程。“这个项目由于没有先例可供借鉴，我们采用GW70/1500风电机组，并用亚洲最大的‘蓝疆’号5000吨级起吊船安装建设，虽然前期并网比较顺利，但由于当时对海洋环境并不十分了解，大家都预计到机组试验运行可能会出现一些问题，比如潮湿盐雾、后期运维等。”陈小海坦言。

事实上，出现的问题远比想象的复杂。海洋环境对风电机组带来的考验与陆上相比完全不是一个量级，潮气、盐雾、恶劣的气候条件……每一项都给运维团队正常工作带来严峻的考验。

“风电机组第一次面对海洋环境虽然出现了诸多问题和挑战，但给我们带来的经验是十

分宝贵的。我们的研发工程师逐一研究分析技术难点，并将研究成果全部用到了海上风电的技术方案改进中，成为金风科技新一代海上风电产品平台重要的实践积累和技术积淀。”金风科技执行副总裁吴凯接受《风能》杂志记者采访时如是说。

2012年开始，江苏如东成为了国内海上整装风电的试验场，共有国内外10个整机厂家的15种机型汇聚于此，金风科技再次参与其中。

“相对于2007年的试水，江苏如东100兆瓦潮间带项目，我们完成了很多技术迭代与优化，比如将电机由开式改成了闭式，对各金属器件进行了优化防腐处理，但下海后再次出现了意想不到的困难。在满功率运行状况下，塔内温度超过塔外，湿气进入塔内后冷凝对变压器正常运行影响极大。”陈小海介绍说。

对金风科技来讲，如东试验项目出现的问题必须逐一解决，否则就无法在海上风电开发领域内走得更远。为此，金风科技不仅投入近千万元研发资金用于技术攻关，同时把几乎全部一线研发人员投入到机组改进中，一年半后，这些问题被逐一攻克。

金风科技改进后的2.5兆瓦潮间带机组添加了环境控制系统，可以实现机组和塔架内温度及湿度双控制，并过滤掉空气中的盐分，保证塔内环境的纯净度，解决了变流器、控制柜等局部环境的优化问题。此外，针对螺栓、防雷模块等零件部分，都进行了防腐处理，有的模块还将陆上机组采用的铝制材料，改成了不锈钢材质，以提高防腐等级。

最终该机组凭借着优异表现，获得了项目业主——龙源电力方面的肯定。数据显示，在这批试验机组中，2014年利用小时数最高的是金风科技的2.5兆瓦机组，达到2867小时。

在此基础上，2015年，金风科技又携其3兆瓦机型，中标了三峡江苏响水近海风电项目。金风科技相关技术负责人表示，这款3兆瓦机型是基于2.5兆瓦平台开发的，这背后则



有金风科技 2 万余台直驱机组平台的运行业绩和技术积累作为支撑，这些成功的经验是保障 3 兆瓦机型可靠性的基石。再加上金风科技充分了解了中国海上的环境特点，对 3 兆瓦机型进行了有针对性的海上适应性设计，该机型将能够很好地适应海上的运行环境。

## 可靠性与经济性的选择题

当下，虽然开发海上风电受到了行业内外的关注，但是对于风电整机企业来讲，如何跨越经济性与可靠性两大门槛，是摆在面前的最大挑战。

“可以讲海上风电和陆上风电完全不同，甚至可以说是两个行业。陆上风电就是机组 + 电网 + 一般性电力工程；海上风电则有两个特

性，第一，它是风电项目，第二，它是海洋工程。”吴凯表达了他的看法。

的确，在目前海上风电开发成本普遍超过陆上风电两倍以上，风电整机企业还面临着如何克服海洋恶劣环境等方面的诸多技术挑战，企业又该如何选择呢？

“只有产品质量足够可靠，后期运行中才会充分体现其经济性。”国家“千人计划”专家、金风科技总工程师翟恩地认为，可靠性是海上风电的立足之本，风电机组设计之初不能只考虑质保期内出现的可能情况，还必须考虑机组全生命周期内的运维次数和大部件更换可能性，并可以此倒推项目建完后的盈利水平。因此，金风科技坚定不移地把风电机组质量做好，并斥巨资在江苏大丰专门设立了机组试验中心，以此提高产品的可靠性。

自发展初期，金风科技就确定了永磁直驱

▲  
2007年我国第一台海上风电试验样机（金风科技GW70/1500）在渤海湾矗立



的技术路线。近二十年的探索与坚持，让金风科技在陆上积累了两万余台机组运行的成熟经验。从海上风电的发展趋势来看，大容量、大风轮直径、永磁直驱技术路线已得到各厂商的普遍认同，“实践证明，永磁直驱技术这条路线是海上风电发展的正确方向。”翟恩地补充道。

相关测算显示，由于永磁直驱技术减少了传动链，特别适合海上的复杂环境，机组可靠性比其他技术路线提升 20% 以上，发电量可以提高 3%—5%。

不仅如此，金风科技还率先提出了机组“免维护”的理念，即相关新机型可靠性将达到一年免维护的水平。“目前海上风电机组的关键部位，诸如叶片、电机、轴承等如果发生损坏，更换的成本一次就至少需要 800 万元，成本实在太高。”相关负责人介绍说。

为此，金风科技建立了专门的海上质量管控标准和体系，实现对关键工序和关键零部件的全过程质量管控，严把供货商产品质量关。记者了解到，此前，金风科技已经建立了较完备的零部件供应商体系和评价标准，并将供货商分为 A、B、C 三级。针对海上风电产品，

金风科技明确提出，零部件必须由 A 级，即产品质量控制最好的企业供货，产品一律采用优等品（不允许产品有一处缺陷），保证产品质量最优。

为了让供应商切实了解海上风电的复杂性和特殊性，金风科技多次组织零部件供应商召开专题研讨会，针对提升零部件质量进行深度交流探讨。并组织相关企业负责人和管理人员深入金风科技海上项目现场，亲身体验海上作业的艰辛。多数供应商均表示对提升机组零部件质量及可靠性有了更清晰的认识，将全力支持并高度重视金风科技的海上项目。

不仅如此，产品设计伊始，金风科技的研发团队还着重进行了冗余设计，保证产品的一个部件发生损坏，不会影响设备正常运转。“目前金风科技围绕新产品设计了两套电机绕组，确保一套出了问题，另一套可以替代工作，功率模块也备份了两组，并可以实现远距离检测和遥控动作。”相关产品设计师透露，下一步，“免维护”将能够实现机组故障的自诊断、自修复，并配备工业机器人进行相关操作。

近年来，金风科技积极推动大数据、物联



网等信息技术的应用，并打造了国内领先的风电数据库系统及大数据分析处理平台，正为金风科技全球超过近 2.7 万台机组、近千座风电场提供技术支持，而未来的海上风电机组也将全面应用这些技术。

通过这些新技术的应用，每台机组像人一样有了“神经系统”，而作为“中枢神经”的中心控制系统可以随时了解每台机组的“喜怒哀乐”，最终目的是提高发电效率和降低成本，给客户带来价值和高收益回报。

“当前，互联网对整个行业的影响非常大，有人说互联网注重客户体验，质量不是最重要的，我不太认同这个观点，我认为质量永远都是能给客户带来最好体验的关键要素。一方面，我们要苦练内功，把产品质量做好。另一方面要充分利用互联网带来的变化，提高可再生能源的使用效率。”武钢此前在接受媒体采访时明确表达了他的看法。

## 探寻市场化开发新路径

我国拥有近 18000 公里的海岸线，可利用海域面积 300 多万平方公里，海上风能资源十分丰富。国家能源主管部门明确提出，加快海上风电项目建设，对促进沿海地区治理大气雾霾、调整能源结构和转变经济发展方式具有重要意义，先后出台了《全国海上风电开发建设方案（2014-2016）》《海上风电开发建设管理办法》等文件，支持开发海上风电。

根据“十三五”规划的相关要求，到 2020 年，全国海上风电开工建设规模将达到 1000 万千瓦，力争累计并网容量达到 500 万千瓦以上。

国家能源局相关负责人曾公开表示，“十二五”规划提出的 500 万千瓦海上风电发展目标没有实现，已经说明海上风电的实施难度。“十三五”海上风电发展的政策思路是积极稳妥推进，绝不催熟。这也需要企业明确思路，找到症结，推动海上风电进入快速发展轨

道，形成健康完善的产业体系，为未来发展打下基础。

“‘十二五’期间，金风科技等企业通过相关项目的开展，增进了对海上风能资源特性和情况的了解，技术也有了长足的进步。”中国可再生能源学会风能专业委员会秘书长秦海岩认为，未来随着企业对研发投入的加大，机组研制、施工技术将逐步成熟，技术路线也将逐步统一，500 万千瓦规划的实施将带动海上风电市场的发展，同时将开发成本降下来，从而保证“十四五”期间能够大规模发展海上风电。

对于全行业来讲，探索出一条适合我国海上风电开发的市场化机制，减少因项目驱动产生的开发风险是当前的一道新课题。

记者了解到，金风科技近年来在参与海外市场开发的过程中，也接触到了很多国外的新理念和做法。比如，国外项目竞标时，机组发电量都是由独立的第三方机构进行评估，而不同评估机构的标准和判断都有所区别，这就对企业产品提出了更高要求。此外，国外业主为减少项目开发的风险，会力推保险评估、银行融资等机构的介入，实现协同优化，加之相关完善的法律法规体系。“这都是目前国内风电开发所欠缺的。”吴凯强调说。

“我们希望并力推行业能够建立起相关的市场化机制，以减少项目开发的风险性，推动产业快速健康发展。”吴凯表示，“金风科技是行业内为数不多的长期预备质量拨备的企业，可以承担任何由产品本身或不可抗力带来的风险。”

价格将是决定海上风电能否市场化发展的关键性因素，国家为扶持其发展，对近海风电项目确定了 0.85 元/千瓦时的上网电价，但早日实现平价上网则是行业企业的追求目标。

“目前，在海上风电项目的成本结构中，机组占整个项目成本的 35% 左右，塔架基础和安装成本分别占 25% 和 10% 左右，其他（含升压站、海缆、陆上集控中心、项目管理等）占 30% 左右。”翟恩地告诉《风能》杂志记者，未来要使海上风电有竞争力，产品的技术进步和规模化开发会推动成本的快速下降。机组研



▲ 金风科技江苏响水近海三峡风电场项目

发和商业化正朝着大容量方向迈进，金风科技2015年已研制出6兆瓦海上风电样机，并在江苏大丰进行了近两年的测试，运行表现非常不错。我国也正在重点研究8MW—10MW陆/海上风电机组关键技术。未来随着大容量机组投入市场，在风电场总容量一定的情况下，所需安装的机组台数会减少，使得塔架基础和安装的造价都会降低，并且运维成本也会下降，进而推动整个风电场成本的下降。且随着开发日益走向深海，机组的利用效率可获得大幅提升，经济性优势将愈加明显。

中国可再生能源学会风能专业委员会的数据也显示，2016年我国海上风电规划和建设

速度明显加速，全年海上风电新增装机（吊装量）154台，容量达59万千瓦，比上年增长64%，为历年之最；累计装机量达163万千瓦，已居全球第三位。



### 个性化解决方案的实践

我国漫长的海岸线使得各地区风能资源和海况各有特点，总体可分为三类：江苏以北地区90米高度处的平均风速7米/秒左右，被认为是Ⅲ类风资源区，机组冬季还将面临覆冰的挑战；浙江、广东等地为Ⅱ类风资源区，平





均风速超过 7 米 / 秒，但在夏季，台风等自然灾害易发；福建地区的平均风速可达 9 米 / 秒，被认为是 I 类风资源区，但海床多为岩石，基础施工难度较大。

“不同地区自然特征不同，这就要求整机企业必须提供个性化、定制化的解决方案。”翟恩地认为，综合已开展的项目经验，福建地区的机组年利用小时数可达 3500—4000 小时，但施工造价较北方地区略高。江苏地区的机组年利用小时数可达 2500—2700 小时，造价成本约为陆上机组的两倍左右。

据了解，金风科技将携带新一代 GW6.X 海上平台及整体解决方案亮相今年 10 月举行

的 2017 北京国际风能大会暨展览会，其中一款名为 6.45—171 的海上风电机组将被重点推出。“这款机组继承了金风科技产品的优良‘基因’，继续采用成熟的永磁直驱外转子技术，在一年多的试验周期内，上百位研发人员进行了 200 多项的实验验证，保障零部件、单系统、系统联合及整机等全方位最优。为了适应不同的海况，还配置了 154 米、164 米不同规格的风轮直径，可以在不同风区状况下稳定运行。”陈小海介绍说。“从研发初期我们就遵循着整机产品一体化设计、塔架基础一体化设计、运输安装一体化设计、运行维护一体化设计的四个一体化设计理念，提升产品的可靠性和稳定性，最大化降低全生命周期的投资成本。”陈小海告诉记者，比如 6.X—171 机型单桩基础一体化设计解决方案能够使得机型与单桩基础实现更好协调，缩短了安装时间，并使得风能利用率更高，实现业主在江苏及其以北地区发电收益的最大化。

据悉，在海上风电一体化运维解决方案中，金风科技一方面通过开发海上风电场专用运维设备，如：应急生存舱、机组部件维护工装、基础平台吊机、风电专用双体运维船舶等提高人员和物资的可达性，从而提升运维效率。另一方面通过开发海上运维调度管理软件系统，将故障维护、定检维护、预警维护等作业有机结合，根据水文气象预报、交通、人员、备件及工具、机组运行状态信息进行智能分析，自动生成并发送运维工单，同时对当天出海任务进行智能监控，从而实现海上风电场的故障维护向预警性维护、预防性维护过渡，有效降低运维成本，提高业主发电量，提升风电场发电收益。

对于金风科技来讲，海上风电开发带来的挑战，就好比马拉松跑到 30 公里，达到生理极限的时候，既是挑战自身综合素质和意志力的阶段，也是与竞争对手拉开距离，追赶前方的关键时刻。突破海上风电产品的关键技术，实现中国在风电高端制造行业的全球引领，这也是金风人的使命，他们将坚定不移地跑下去。🏃‍♂️



# 中复连众： 对海上风电叶片的十年执着

本刊 | 夏云峰

十年光阴，说长不长，说短不短。对企业而言，十年的大浪淘沙，足以将很多参与者淹没在历史的滚滚洪流中，但它也能让那些富有创新和执着精神的参与者成长为行业翘楚。连云港中复连众复合材料集团有限公司（简称“中复连众”）无疑属于后者。十年来，这家企业从零起步，在兆瓦级风电叶片市场中不断开疆辟土，具备年产万支叶片的产能，产品出口至德国、日本、巴西等 20 多个国家。

其中，对海上风电叶片市场的开拓成了上述历程的缩影。数据显示，自 2008 年试制第一款产品以来，这家公司已经累计向客户交付近 150 套海上风电叶片，装机容量超过 50 万千瓦，涵盖 5 个系列、9 种型号，市场占有率达到 30.5%，是名副其实的行业“老大”。

规模看似不大，但中复连众管理层更看重的，则是隐藏在数字背后的意义。“通过十年的摸索，一方面，使我们对盐雾腐蚀等海上叶片所需要解决的问题有了深入认识，在设计端为未来的开发提前做了准备；另一方面，让我们在海上叶片的售后服务上积累了更多经验。”中复连众副总经理梁颖表示。

回头来看，一步步走来其实十分不易。

一切得从 2008 年说起。彼时，为了配合 2010 年的

上海世博会，上海东海大桥海上风电项目的建设被提上日程。后来广为流传的桥段是，业主最初计划采用国外机型，但由于价格和交货时间的原因，华锐风电最终成为供应方。

此时，国内海上风电叶片研发尚处于探索阶段。而东海大桥项目采用的是单机容量 3.0MW 的机组，叶片长度创造国内之最——44 米，设计、制造的难度可想而知。经过慎重考虑，华锐风电选择由中复连众承接生产任务。

“接到任务时，可谓是喜忧参半。喜的是华锐风电将这一具有划时代意义的工作交给我们，也是基于信任和对实力的认可。”中复连众副总工程师、叶片研发部经理黄辉秀回忆道，“忧的是，时间紧迫，更主要的是缺乏经验。”

在这种情况下，考虑到气动结构是影响叶片性能的关键因素，这项设计能力又无法短期内掌握，中复连众决定从德国专业叶片设计公司引入相关设计。但在生产工艺和模具上则坚持自主设计，并组织技术骨干进行技术攻关。

黄辉秀解释，“之所以如此选择，主要是因为通过生产其他叶片，我们在这方面已经具备了一定实力。当然，其中也有为后期实现完全自主设计、制造做铺垫的考虑。”

2010 年 2 月 27 日，东海大桥风电场的所有机组吊装工作全部完成。中复连众提供的 26 套叶片顺利投运，

占全场的近八成份额。

黄辉秀表示，从后来的反馈来看，这批产品的整体性能达到了设计要求。

但他也坦言，“诸多不足被暴露出来，比如欠缺结构设计能力。同时，我们在海上特殊环境对叶片影响的理解上也不够全面，设计防腐时，仅在叶片前缘上增加了特殊防护涂层，导致部分叶尖前缘后来出现腐蚀现象。”

这也让中复连众找准了下一步的发力点。

东海大桥项目结束后，一个以这批技术人员为班底的研发团队正式组建，对海上风电叶片展开大量深入研究。

黄辉秀认为，这一步给中复连众带来了两大转变。一是在对海上风电叶片的认识上，由最初认为只需要前缘防护到后来对防雷、疲劳测试、防腐等方面有了全面理解。二是在新产品研发上，由最初完全靠国外设计公司，到后来能够联合国内外专业设计公司、高校、客户共同研发。

依托这些研究成果，2011年，该公司自主研发实践取得阶段性成果——LZ62-5.0型叶片在连云港工厂下线，并成功应用于当时国内单机容量最大的5MW机组中。

随着业务开展的深入，中复连众十分注重创新生产工艺，在碳纤维应用、全尺寸测试技术等方面取得多项专利。

众所周知，材料是影响叶片性能的关键因素之一。在应用传统材料的同时，研发团队还引入了新型材料碳纤维。

黄辉秀向记者解释，这主要是基于它所具有的优势：与玻璃纤维相比，碳纤维可以提供更高的强度和模量；在相同风能资源输入的条件下，碳纤维叶片比玻璃纤维产品轻20%左右，其他部件的疲劳载荷也随之降低；应用碳纤维还能够减少叶片的预弯，从而降低生产难度。

“目前，碳纤维广泛应用于叶片的主要障碍还是价格偏高，整机厂不会主动消化这部分成本，所以我们还要在降本上想办法。”他补充道。

为了配合碳纤维的应用，研发团队运用真空灌注工艺成型技术，解决了因碳纤维材料灌注性能较差，易出现大梁的干斑、包死，以及碳纤维大厚度制品灌注表面出现的凹凸不平问题，确保了工艺的稳定性和产品的质量。

2014年3月，中复连众开发了当时我国最长的6MW碳纤维叶片——LZ75-6.0，长度达到75米。次年，应用于6MW机组的68米碳纤维叶片也在连云港工厂下线，创造了叶片根部直径之最。

完善工装则是该公司做的另一项重点工作。伴随叶片规格的大型化，模具的尺寸和自重都在大幅增加。对此，

中复连众开发出带自动控制液压翻转的新型模具，并成功应用于生产中，解决了大型叶片的模具设计、制造难题。

“我们还设计出大型叶片腹板整体安装工装，提升了安装精度和效率；技术人员则根据工艺要求，开发了模具分段、分区域温度控制系统，并完成可移动在线配胶、涂胶设备开发，提高了设备利用率和生产效率。”黄辉秀进一步介绍道。

此外，中复连众在提升叶片测试能力上也下了很大功夫。研发团队在2015年设计开发了12MW级超大型叶片全尺寸结构试验平台，并针对大型叶片疲劳加载存在的载荷小、精度低问题，研发出新型的加载设备和技术。

在梁颖看来，这些都表明，中复连众已经具备海上风电叶片设计、制造、测试和服务能力，但这方面的价值此前一直未能很好地体现出来。

他说，“十二五”期间虽然组织过几轮海上风电特许经营招标，但多数项目都因为种种原因延迟执行，导致工厂的模具处于半闲置状态。“我们只能采取‘以陆上为主、海上为辅’的经营策略。”

好在这种状况有望很快得以扭转。目前，业内普遍预期，海上风电将会成为我国风电开发的下一个重点方向之一，项目开发的速度明显加快。

这让中复连众看到了曙光，并迅速做出战略部署：一方面，将开发更长的叶片；另一方面，与整机企业合作开发质量更可靠、成本更优的新工艺。此外，还将加大对连云港工厂的生产布局，建设一个现代化海上叶片生产工厂。

记者了解到，目前这些战略正在逐步实施中。

2016年，中复连众成功申报江苏省海上风电叶片设计与制造技术重点实验室项目，计划在更高水平上组织国内外资源对海上风电叶片进行前沿研究。

一批最新的产品也相继下线。比如于今年推出的LZ68-4.0叶片，其独特之处在于，它是该公司第一批采用后缘预制方法生产的产品。

梁颖认为，凭借这种领先一步的竞争优势，中复连众的叶片在国内最新开发的一批重点项目中得以广泛应用。“比如在福建福清兴化湾海上风电试验风电场中，我们就为中国海装、太原重工等企业的机组提供了叶片配套。”

“我们的目标很明确，就是要充分释放前期技术积累的价值，不断加大技术创新的投入，并凭借叶片型号全、生产灵活等优势，继续做行业的‘领头羊’和技术的引领者。”他表示。✎



偏航系统的专利申请发展大致经历了 4 个时期，于 2012 年左右到达顶峰，后又有所回落。在全部专利申请中，以中国、美国所占的份额最大。但是在全球专利申请中，大部分来自国外企业。在对中国的专利申请中，大部分也来自国外公司。

# 风力发电机组偏航系统专利分析

文 | 张人天, 卫红\*

偏航系统是风力发电机组特有的伺服系统，是风力发电机组的主要组成部分之一。偏航系统驱动机舱围绕塔架中心线旋转，其主要作用有：一是与机组控制系统配合，转动机舱使风轮扫掠面与风向保持垂直，使风轮始终处于迎风状态，充分利用风能，以保证风力发电机组具有最大的发电能力；二是当机舱处于正确位置时，在风向不变的情况下，提供必要的锁紧力矩，使机舱定位，以保证风力发电机组的安全运行；三是由于风电机组可能持续地向一个方向偏航，机组悬垂部分的电缆有可能产生过度的绞绞而使电缆断裂、失效，因此，偏航系统的另一个作用是在电缆达到设计缠绕值时能自动解除缠绕。

偏航系统主要分为两大类：被动迎风偏航系统和主动迎风系统。前者多用于小型的独立风力发电系统，由

尾舵控制，风向改变时，被动对风。后者则多用于大型并网型风力发电系统，由位于下风向的风向标发出的信号进行主动对风控制。

偏航系统大致由偏航轴承、偏航驱动装置、偏航制动器、偏航计数器和组缆保护装置等几部分组成。

本文从全球专利申请态势、中国专利申请态势两方面对偏航系统的专利进行分析。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）。

## 偏航系统全球专利申请态势分析

为分析偏航系统全球专利申请态势，本节重点关注全球专利申请趋势、

全球专利申请的国家/地区分布、重要申请人专利申请量排名及申请趋势分析等几个方面。

### 一、申请趋势

从图 1 可以看出，全球风力发电机组偏航系统专利申请量的发展可以分为以下 4 个阶段：

#### （一）技术积累期（2000 年之前）

与偏航系统相关的专利申请量在 2000 年之前一直维持在一个相对稳定的水平，这一时期的总申请量为 148 项，并且每年申请量都不大，只有 1980 年、1981 年、1996 年、1999 年四年的申请量超过 10 项，其余年份的申请量均为个位数，可以称这段时期为技术积累期。这段时期专利的首次申请大部分是在美、德、法、英等国专利局以及世界知识产权组织、欧洲专利局等提出的，可见最初的技术积累大多存在于美、德、英、法等传

\*等同第一作者。

统工业发达国家。

## （二）低速增长期（2000年—2007年）

2000年至2007年，该领域专利申请量进入了一个低速增长的阶段。其中，2000年的申请量为13项，2007年则为90项，平均年增长率为31.8%，可以称这段时期为低速增长期。在该时期内，专利的首次申请主要指向世界知识产权组织、美国、日本、中国、德国、欧洲专利局、韩国等（按照申请量大小排列）。值得一提的是，在该阶段，指向日本和中国的专利申请增长最为迅速，在总申请量上占据了第三、第四的位置。其中，指向中国的申请量与德国持平，均为35项。同时，申请量排名大幅下降的有英、法等国。由此可以看出，由于技术的发展和新兴市场的崛起，专利申请重点在全球范围内得以重新分配。

## （三）高速增长期（2008年—2012年）

从2008年开始，至2012年结束，该领域的专利申请量迎来了一次飞速发展的时期，短短5年时间专利申请量就达到了1203项，超过所有其他年份申请量的总和，因此称该段时期为高速增长期。在该时期，指向中国、韩国的专利申请量增长最为迅速。中国为318项，排名第一，大幅领先其他国家和地区；韩国为146项，排名第四。位列申请量第二、第三、第五的依次为世界知识产权组织（214项）、美国（201项）、欧洲专利局（96项）。可见，以中、韩为代表的亚洲新兴市场成为了全球专利布局的重点区域。

## （四）稳定期（2013年之后）

经历了前一阶段的高速发展，随后，该领域的专利申请量进入了一个

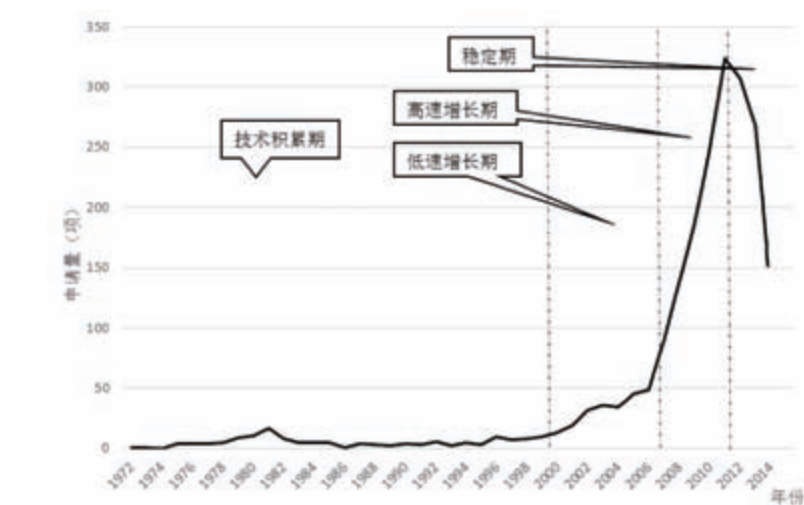


图1 偏航系统全球专利申请趋势

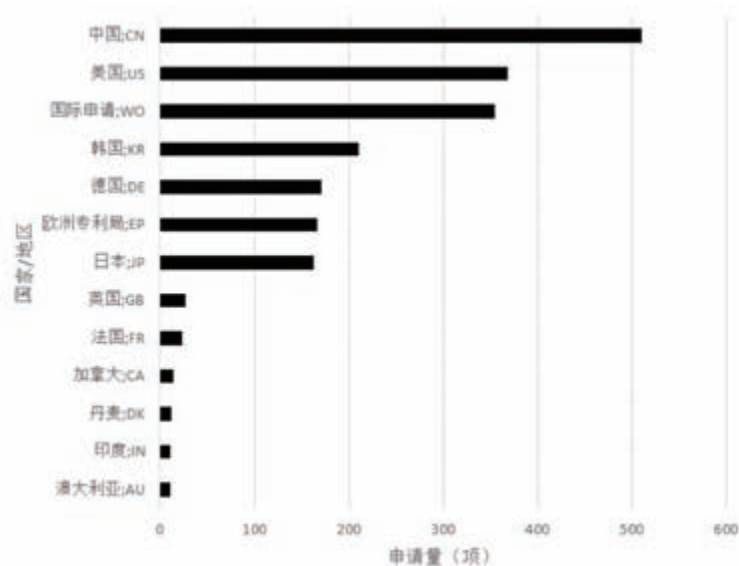


图2 偏航系统全球专利申请地域分布

相对稳定的发展时期。2013年的申请量有所回落，在全球范围内有268项，相较于处于顶峰的2012年（307项）稍有回落。2014年和2015年申请的专利尚未全部公开，不具有参考价值，因此，不予考虑。但是根据2014年的公开数据可以预见，2014年和2015年的专利申请量不会再有类似前一阶

段的大幅增长。因此，可以称2013年至今的时期为稳定期。

## 二、全球专利申请国家/地区分布

从图2中可以看出，中国作为潜力巨大的新兴市场，吸引了各方面充分的关注，在该领域中指向中国的专利申请有510项，位列第一。除中国外，申请量超过100项的分别有美国

(368项)、世界知识产权组织(355项)、韩国(210项)、德国(171项)、欧洲专利局(166项)和日本(163项)。在该项专利申请指向国的申请量排名中,亚洲占据三席,已经与欧美传统工业强国有了分庭抗礼之势。

### 三、重要申请人专利申请量对比

图3的数据取自偏航技术领域申请量在20项以上的重要申请人,且仅统计第一申请人,共15名。排名第一的是来自美国的通用电气,这也是排名中仅有的美国企业,但其申请量远多于其他申请人。排名第二的是韩国三星重工株式会社。此外,还有另一个韩国申请人——现代重工株式会社在总排名中位列第十四。来自日本的申请人有4位,分别为三菱重工株式会社、纳博特斯克株式会社、富士重工株式会社和日立集团,分别第四、第七、第八、第十位。另外,还有来自丹麦的维斯塔斯、德国的西门子和法国的阿尔斯通入围前五强。

在重要申请人中,除上述提到的国外企业,其余5位均是来自中国的企业,分别为上海翌威科技、广东东兴风盈、国电联合动力、华锐风电和金风科技。对比图2可以看出,虽然在本领域中指向中国的总申请量要超过其他国家,但国内企业的贡献并不是十分突出。由此可以推断在中国的专利申请中,国外企业来华申请和国内的个人申请占据了较大比重。这一方面说明了国外大企业对中国这个巨大新兴市场的重视,另一方面也说明了国内存在大量、片面、不成系统的个人申请。实际上,分析国内的专利申请结构可知,个人申请大部分是申请质量和含量均有限的实用新型专利申请。因此,国内企业对于专利

布局的意识和行动需要加强,并设法在国外重要企业已经形成或者即将形成的专利壁垒中寻求出路。

### 四、重要申请人专利申请趋势分析

图4是偏航领域中申请量最大的5个申请人在全球的专利申请态势对比。这5个全部是国外申请人,按顺序依次为通用电气、维斯塔斯、三星重工、三菱重工、西门子。申请量最大的年份均分布于2009年以后,并且在达到最大申请量后又有了明显的回落,这与整个行业在全球的发展有关。

这几个申请人中,通用电气、维斯塔斯、三菱重工和西门子等都是属于风力发电领域传统的强势群体,唯有三星重工并非属于这个阵营,但其在偏航、变桨和控制领域的专利申请量均榜上有名且申请量居于前列,经过互联网检索,获得如下信息:

为了减轻新船订单下滑带来的影响,三星重工正计划进军到2020年市值将达到740亿美元的风力发电市

场生产风力发电机组。目前,三星重工正在为建风力发电机组生产厂选址。据三星重工预测,到2010年建风力发电机组厂将具备年产200台2.5兆瓦和5兆瓦风力发电机组的能力。根据三星重工的计划,到2015年,该公司将实现年产风力发电机组500台,年销售额3万亿韩元,该公司的风力发电机组产量还有可能增长到1600台。三星重工还计划进入包括中国和印度在内的海外风力发电市场。在由于经济衰退导致全球减少对船舶需求的情况下,三星重工将与现代重工联手扩大其经营范围。

该信息早在2009年6月9日就被发布,可见在这之前,三星重工已有进军风力发电市场的计划,并且依托三星集团的优势产业,比如电子产业、芯片制造、控制算法等方面,使得三星重工在偏航、变桨以及控制方面的专利申请量一举超过了一部分本行业传统企业。

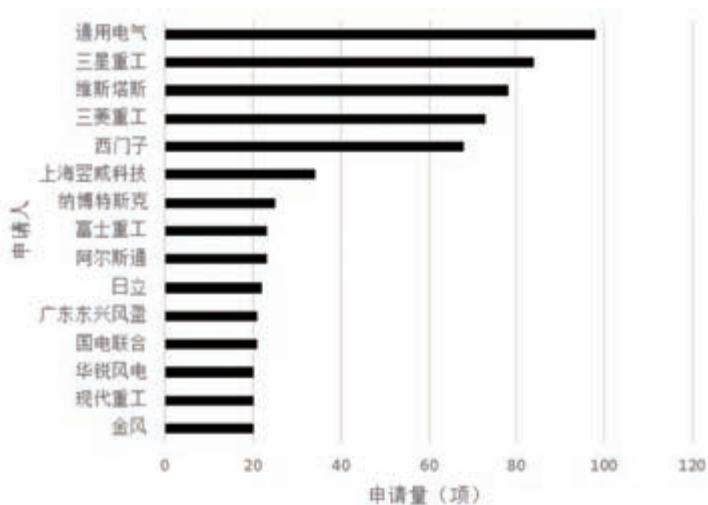


图3 偏航系统重要申请人全球申请量排名



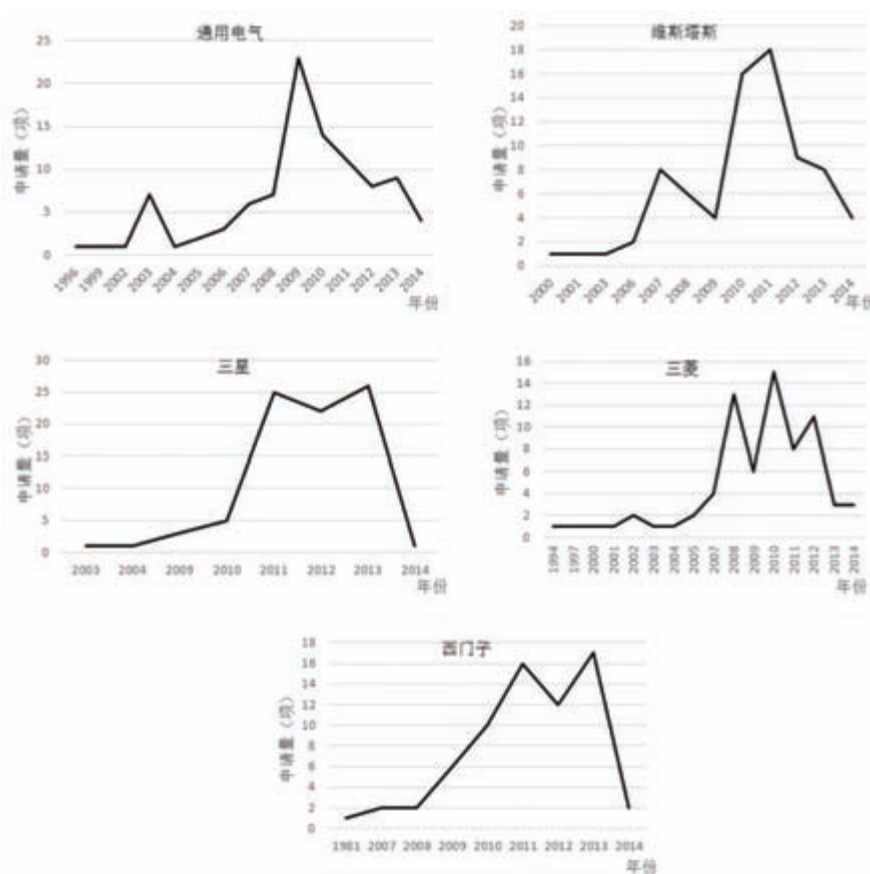


图4 五大公司在偏航领域专利申请态势对比

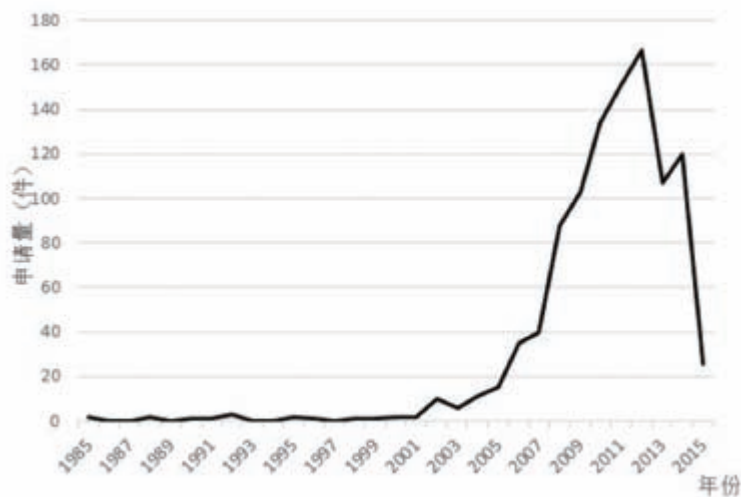


图5 偏航系统中国专利申请态势

## 偏航系统中国专利申请态势分析

为分析偏航系统中国专利申请态势，本节重点研究了偏航领域的中国专利申请趋势、中国专利申请类型、重要申请人申请量排名、技术结构对比这4个方面。

### 一、申请趋势

如图5所示，在中华人民共和国国家知识产权局成立的当年就有了涉及偏航系统的专利申请。从总体来看，中国与全球的偏航系统专利申请量变化趋势比较类似，均是在2000年以前的各年申请量比较少，并且比较稳定，各年之间的申请量变化不大。从2000年至2007年迎来一个低速增长的时期，2007年至2012年之间增长迅猛，而2012年以后才有了明显的回落。因此，也可以将中国偏航系统专利申请量的发展分为技术积累期、低速增长期、高速增长期和稳定期这几个时期。

同样，2014年之后提交的专利申请尚未完全公开，因此，该部分申请量数据也不具有参考价值。2012年之后的申请量下降现象，则是与“三北”地区大规模弃风限电有关。按照国家能源局政策，在电网接纳能力不足、风电场建设工期不匹配等主要问题解决以前，原则上不再扩大风电建设规模，因此，各大厂商从设计研发到生产制造上都进行了适应性调整，表现在专利申请上，就是申请量的一定程度下降。

### 二、中国专利申请类型

从图6来看，由于本领域的申请人中，国外申请人所占的比重较大，并且很多专利申请涉及控制方法策略等方面，因此，发明专利的申请量要



图6 偏航系统中国专利申请态势

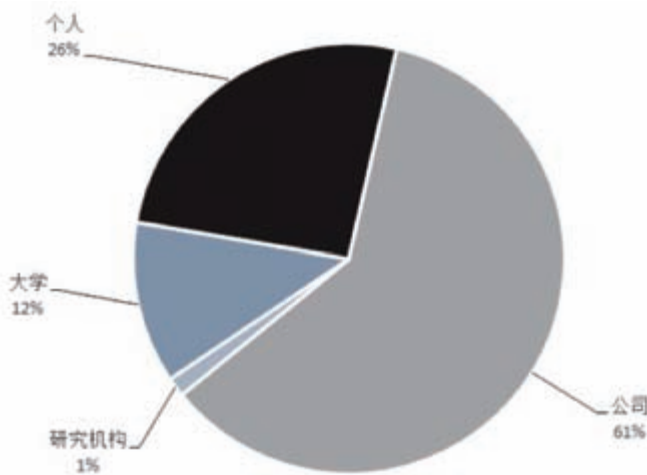


图7 中国的偏航系统专利申请人类型

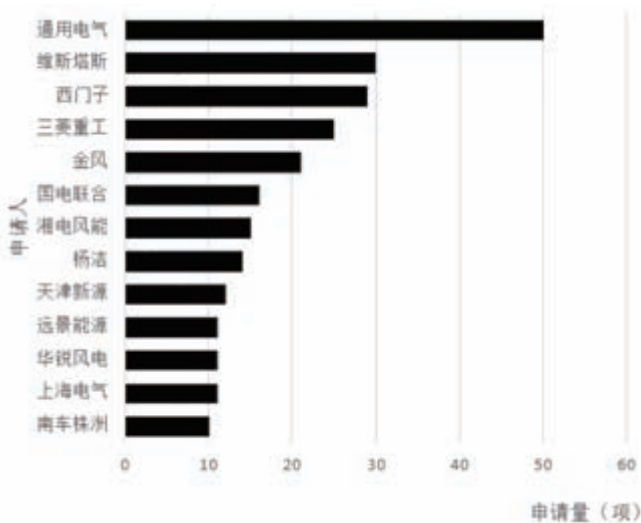


图8 偏航系统重要申请人申请量排序

远大于实用新型专利申请量。另外，在发明专利申请中，有 1/5 左右的是进入中国国家阶段的 PCT 申请。在实用新型中，PCT 申请量有 2 件。

由图 7 可知，本领域的申请人中，公司 / 企业占了 61%，个人占 26%，而高校和科研机构加起来仅占 13%。在企业的申请中，超过半数来自于通用电气、维斯塔斯，西门子和三菱重工这几个本领域国际知名企业。

### 三、重要申请人申请量排名

在本领域的重要申请人中，前 4 位均来自国外，其中专利申请量最大的是通用电气，申请量为 50 件，其次是维斯塔斯（30 件）、西门子（29 件）和三菱重工（25 件）。而在国内，本领域知名企业金风科技的申请量为 21 件，排名第五，随后是国电联合和湘电风能。另外，杨洁是申请量最大的个人，申请的全部是关于液压偏航系统的结构和制动系统结构，如图 8 所示。

如前所述，三星重工早有进军风电产业的计划，并于 2009 年之前就表现在实际行动上，在偏航领域的全球专利申请量仅次于通用电气，成为第二大户。但通过对中国国内的数据分析可知，三星重工并未开始就本领域在中国进行大规模专利布局，因此，国内申请人可适当参考其在国外的专利申请并进行改进，试探性地在控制策略、算法电子元器件、控制系统结构等方面进行防御性的专利布局。

### 四、通用电气、金风科技和维斯塔斯在偏航领域专利申请技术结构对比

图 9 展示了 3 家重要企业在偏航领域专利申请的技术结构对比。可以看出，通用电气侧重于偏航系统结构和控制策略方面，金风科技侧重于信号采集和控制策略，维斯塔斯侧重于

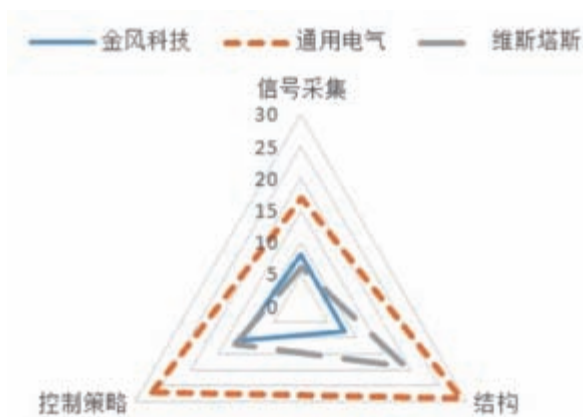


图9 通用电气、金风科技和维斯塔斯在偏航领域专利申请技术结构对比

偏航系统结构。金风科技作为目前国内装机容量以及专利申请量最大的企业，在偏航领域与国外著名企业之间的主要差距在于偏航系统结构方面。通过浏览相关文献发现，维斯塔斯和通用电气对偏航系统结构方面的改进，主要集中于力矩控制、调速性能、润滑性能、与控制系统更好的匹配等方面，因此，这些方面国内企业尚有发展的空间。

但是，由于前述国际巨头，尤其是通用电气在本领域发展历时已久，

专利布局已经相当严密，其在国外的申请有很多都有中文同族专利存在，因此，想要突破其专利壁垒也并非易事，需要适当关注其早期在国外申请、并且已经失效的专利。

### 小结

与偏航系统相关的技术发展，按专利申请量增加的趋势来划分大致经历4个时期，申请量增长速度也是由慢至快，并于2012年左右到达顶峰，

后又有所回落。在全部专利申请中，以中国、美国所占的份额最大，中国排名第一。但是在全球专利申请中，大部分是国外企业的申请。在重要申请人的申请量排名中，中国企业占据了五席，但其申请量仍然相对较少，与通用电气、维斯塔斯、三菱重工等国际巨头相比，还是有很大的差距。

在技术方面，被动偏航这种方式虽然目前还应用于不少小型风电机组，也存在相应的专利申请，但随着风电机组越来越大，被动偏航在驱动力等方面显然已满足不了要求，其申请量也是越来越小。近几年来，关于偏航系统的专利申请大多是关于主动偏航的。主动偏航中，关于电动和液压驱动方式的改进也是齐头并进。另外，随着计算机、控制技术的发展，智能偏航出现并获得非常重要的位置，各大公司均有相应的专利申请。

在对中国的专利申请中，大部分来自国外公司，国内企业在专利布局上仍然无法与之相抗衡，因此，需要后者关注国外已过期或即将过期专利技术，在此基础上进行研发改进，在重重壁垒中寻求出路。☒（作者单位：国家知识产权局专利局机械部）



摄影：王忠伟



自从布鲁克岛示范项目投运以来，美国海上风电市场引发了广泛关注。现在的问题已经不再是该产业能否会迎来蓬勃发展，而是在何时、以何种方式爆发。为此，需要美国联邦政府和州政府制定清晰的政策框架，并将其落到实处。

# 政策是左右美国海上风电发展走向的关键

文 | Herman K. Trabish

编译 | 夏云峰

当下，在美国开发海上风电项目仍然困难重重。但对于业界来说，问题已经不再是产业能否迎来蓬勃发展，而是在何时、以何种方式爆发。

美国能源部（DOE）此前刚刚发布的一份年度海上风电市场报告显示，截至 2016 年年底，全球共投运了 111 座海上风电场，总装机 1291.3 万千瓦。虽然其中只有一座装机容量为 3 万千瓦的项目位于美国海域，但全球最大的几家开发企业已经开始布局该国市场。

截至 2016 年底，美国处于规划阶段的项目数为 28 个，装机量达到 2413.4 万千瓦。

有两大关键因素预示着美国海上风电产业将迎来发展。第一个原因是全球海上风电招标的中标价正在大幅降低，2017 年—2019 年期间实现商

业化运营的项目的中标价大约为 0.2 美元 / 千瓦时（约合人民币 1.3 元 / 千瓦时），而对于将在 2024 年—2025 年期间实现商业化运营的项目而言，这一价格会降至 0.065 美元 / 千瓦时。

在西门子—歌美飒美洲地区海上风电业务负责人 Jason Folsom 看来，随着成本的下降，在美国东海岸开发海上风电项目已经变得十分具有吸引力。“这里风速很好，工况条件不复杂，并且它还靠近人口集中区，电价也比较高。”

第二个原因则与各州出台的新政策有关。“马萨诸塞州已经批准了总装机为 160 万千瓦的海上风电项目开发规划，纽约州、新泽西州和马里兰州的目标分别为 240 万千瓦、110 万千瓦和 40 万千瓦。”特拉华大学的海上

风电特别倡议（Special Initiative on Offshore Wind, SIOW）项目负责人 Stephanie McClellan 表示，“这接近于目前全球海上风电累计装机容量的一半。”

## 爆发式发展？

2016 年，由于欧洲增长乏力，全球海上风电的新增装机降到了 118.8 万千瓦。但是美国能源部基于目前的建设情况预计，2017 年，这一数据有望突破 400 万千瓦，从而打破 2015 年创造的 391.7 万千瓦纪录。

虽然规划的 2413.5 万千瓦项目都尚未进入建设环节，但上述报告指出，受多重利好因素的刺激，“经过多年的控制性详细规划和租赁尝试，人们对

美国海上风电市场发展的信心已经得到提振。”

首先,美国第一个海上风电场——3万千瓦布鲁克岛示范项目的投运,很大程度上推动了该国的海上风电产业发展。该风电场位于罗德岛附近海域,由 Deepwater Wind 公司开发,共安装了 5 台机组。它的开发依托的是本土供应链体系,这也引起了政策制定者的注意。

其次,美国能源部在 2016 年发布的一份报告中指出,浮式海上风电的成本将会沿着固定式海上风电成本的发展轨迹下降,“十年内,前者的电价将会低于 0.1 美元/千瓦时,具有与传统发电形式竞争的能力”。

此外,2016 年,海上风电特别倡议项目的研究人员还分析了马萨诸塞州承诺在 2020 年—2030 年建设装机容量为 200 万千瓦的海上风电项目所带来的影响。他们在报告中总结道,规模经济可以促使项目的开发成本“远低于新英格兰地区此前的成交价”。

在布鲁克岛,发电企业与电力公用事业公司签订的购电协议(PPA)价格为 0.244 美元/千瓦时。SIOW 的研究发现,在马萨诸塞州开发 200 万千瓦项目的推动下,到 2030 年,海上风电电价可以降低到 0.108 美元/千瓦时,按照新英格兰地区的批发电价,这一价格将十分具有竞争力。

2016 年,美国能源部在另一份报告中将该国海上技术可开发的风能资源量提高到了 20.58 亿千瓦,每年可发电 7.2 万亿千瓦时,这接近于美国 2014 年全社会用电量的两倍。

最后,在各项技术进步的推动下,海上风电场的发电效率显著提升。2015 年,海上风电机组的平均单机

容量只有 3.4MW,次年则提高到了 4.7MW。此类风电场的容量因数也超过了天然气发电厂。美国能源部预计,到 2020 年,海上风电机组的平均单机容量将达到 7.0MW。

这些因素促使那些资本雄厚并有丰富经验的海上风电开发商都一致看好美国市场。目前,东能源、挪威的 Statoil ASA 和 Iberdrola-Avangrid 公司都正在积极布局这一市场。

## “我们需要政策落地”

McClellan 指出,虽然一些州已经在政策层面做出承诺,但“我们需要将其落地,从而实现市场的有序发展”。

“一旦投资者认为市场前景明朗,他们将会对技术创新和供应链优化进行投资。”她补充道,“如同欧洲那样,竞争能够驱使成本下降,东能源中标的一些项目已经可以做到零补贴。”

东能源新闻发言人 Lauren Burm 对此表示认同。她在一份发给媒体的邮件中表示,该公司 20 年的海上风电项目建设经验表明,规模化是有效降低开发成本的重要途径之一。美国东海岸的条件可以与北欧相媲美,能够形成一个不断成长的市场,从而推动成本持续下降。

为此,“我们需要保持合理的开发规模和形成一个持续的项目建设规划,以此培育完善和成熟的供应链体系。”她在邮件中写道,这离不开对海上风电开发和再生能源发展目标的承诺。

McClellan 认为这一幕正在马萨诸塞州上演。该州提出 160 万千瓦开发目标之后,有两家主要电力公用事业公司已经发布了征求建议书

(Requests for Proposals, RFPs)。

电力公用事业公司发言人 Amie O’ Hearn 表示,竞标的截止日期是 12 月 20 日。

EverSource 公司发言人 Albert Lara 宣称,虽然其 RFP 尚处于前期阶段,但它已经与东能源成立合资公司——Bay State Wind,并在开发一个项目。

2020 年前,该项目的装机可以达到 200 万千瓦,从而使 Eversource 公司在完成法定义务的道路上迈出重要一步。

在纽约州,政策能否落地存在着更不大的确定性。虽然州长 Cuomo 提出到 2030 年开发 240 万千瓦的海上风电项目,但这并没有被提升到法规层面,形成清晰的落实路径。而制定明确的实施机制,可以推动各州可再生能源目标的落地,并成为受管制公用事业企业必须遵守的硬性要求。对于部件制造商而言,它则是一项州层面的激励措施。

批准装机容量为 9 万千瓦的 South Fork 项目,则是纽约州在海上风电开发上向前迈出的重要一步。但是其他项目的开发,则需要等待该州能源研究和开发署公布海上风电总体规划的最终版本。

“总体规划将建立起采购机制,明确由谁来采购,并设定采购的时间框架。”McClellan 表示,“可能将由一个公共服务委员会来批准和实施这三个关键决定。”

这个规划有望在今年年底出台。与此同时,该州还在与美国内政部海洋能源管理局(BOEM)一起划定可用于租赁的新海域。StatOil 公司已经获得了最近由 BOEM 划定的唯一一块

海域。

Folsom 对纽约州将会大力发展海上风电充满了信心。“监管阶段总是存在各种风险，但是发展海上风电是该州实现 2030 年使可再生能源占比达到 50% 目标的唯一途径。因为陆上风电的输电受限，太阳能资源量潜力也不足。”

McClellan 认为，新泽西州虽然在 2010 年以法律条文形式确立了 110 万千瓦的开发目标，但后期执行乏力。“公用事业委员会未能将这一计划真正落实下去。”

到今年秋天，该州州长 Christie 的任期将结束。参加选举的共和党候选人希望将上述指标提高到 350 万千瓦，而民主党候选人则承诺会支持海上风电开发。“除非他们就职，否则永远不可能清楚他们会怎么做。但是可以明确的是，在新泽西州建设海上风电项目的唯一障碍就是政治。”

2013 年，马里兰州的一项法律明确提出实施海上风电可再生能源信用 (ORECs) 政策，但直到今年，该州公共服务委员会才向 Skipjack Offshore Energy 和 U.S. Wind 两家企业的项目授予了第一批 ORECs。这两家公司将会以约 0.13 美元 / 千瓦时的海上风电可再生能源信用价格在马里兰州海域建立一座装机容量为 36.8 万千瓦的项目。

## 漂浮式技术和新市场

美国西海岸大陆架的水深变化十分剧烈，这使得可以应用于东海岸大陆架浅水区的固定式基础无法适用于这一区域。在加利福尼亚州开发海上风电场，将需要漂浮式基础。

目前，在美国海域只有缅因大学开发的 6MW Aqua Ventus 风电场应用了此类技术，主要进行相关技术的测试。

到 2016 年底，全球共有总装机为 290.5 万千瓦的 26 个漂浮式项目处于规划、核准和施工阶段，比上一年扩大 3 倍。其中的 11 个项目即将或者正在施工中，装机容量为 22.9 万千瓦。美国的加利福尼亚州和夏威夷州也在规划开发这类项目，

Folsom 认为，漂浮式基础技术的平准化成本将会“沿着固定式基础技术的成本下降曲线降低”。

她补充道，与纽约州一样，加利福尼亚州也需要通过发展海上风电来兑现到 2030 年使可再生能源占比达到 50% 的承诺。“到 2025 年，该州必须建设一定规模的漂浮式海上风电项目。”

公用事业公司 PG&E 的发言人 Denny Boyles 表示，他们已经“意识到开发企业对海上风电表现出了浓厚兴趣”，但“目前不会再签署新的可再生能源配额制 (RPS) 项目合同”。如果这种情况有所改变，PG&E 公司将会“拥抱包括海上风电在内的所有技术”。

Folsom 认为，夏威夷可以成为一个不错的海上风电市场，因为该地区的电价较高。但与此同时，当地的市场狭小，所以，西门子在美国首先瞄准的是加利福尼亚州。

夏威夷电力公司 (HECO) 发言人 Peter Rosegg 表示，在其最新的长期规划中，发展海上风电被视作满足可再生能源需求的有力途径。“我们还注意到有两家开发商主动提出了 3 个海上风电租赁请求。”

Folsom 和 McClellan 均认为，夏威夷和加利福尼亚州都在选址上面临着挑战。但一旦支持性政策能够促使市场走向成熟和驱动成本下降，那么，所有海域的海上风电都会迎来大规模发展。

McClellan 再次强调了各州应该落实政策，从而促进海上风电的发展。“这个是一个循环往复的过程。”她说，“政策可以带动产业，实现港口、船只、供应链的完善以及人工技能的提升，推动成本下降。这又会导致新政策的出台，从而进入下一轮发展和成本下降周期。” (编译自 Utility Dive 网站)



摄影：胡国佳



2017中国风能展  
Siemens Gamesa  
在W3-B09 期待您的光临

# G126-2.5 MW

## 从低风速风场获取更多能量

G126-2.5 MW风机是歌美飒从低风速风场获取能量的全新技术革新产品。G126-2.5 MW风机将直径126米的全新叶轮与2.5 MW发电机相结合，使该机型具有一流的容量因子，并通过增加20%\*的发电量降低了度电成本。

G126-2.5 MW风机是歌美飒低风速产品序列演化的产品，由歌美飒从23年的风电从业经验与2.0-2.5 MW机型超过23 GW的装机中总结出的专业知识所支撑。

G126-2.5 MW风机的加入使得歌美飒成为全球风电领域内十分可靠且极具灵活性的合作伙伴。

\*与G114-2.0 MW相比

[gamesacorp.com/siemensgamesa](http://gamesacorp.com/siemensgamesa)



**SIEMENS Gamesa**  
RENEWABLE ENERGY

美国能源部（DOE）最新发布的 2016 年度《风能技术市场报告》显示，该国风电市场整体走势强劲，成本优势进一步凸显。加上输电成本及其他相关成本，美国风电价格仅为 12 美分 / 千瓦时，即使没有生产税抵免，也是一种极具竞争力的电源。

# 美国风电价格持续走低 凸显强劲竞争优势

编译 | 张雪伟

作为风电价格较低的国家，美国在这条路上越走越顺。美国能源部（DOE）发布的 2016 年度《风能技术市场报告》（Wind Technologies Market Report），以大量数据从多个方面追踪了美国风电成本、市场表现及增长趋势。美国风电市场整体走势强劲，成本优势进一步凸显。

2016 年，美国风电新增装机容量 820.3 万千瓦，累计装机容量达到 8214.3 万千瓦。其中，中部地区新增装机容量在全美占比近 90%，延续了 2015 年以来的绝对主力地位。德克萨斯州更是以 261.1 万千瓦的新增装机容量连续第三年在全美各州中居首。

位于罗德岛海域附近的布鲁克岛（Block Island）的美国首个海上风电项目于 2016 年投入运行，这成为该国风电史上里程碑式的事件。

## 风电价格持续走低

该报告的数据显示，在长达 20 年的时间里，美国风电价格持续走低，与天然气发电等传统电力类型相比，显示出越来越显著的优势。其中，得益于平均施工成本低廉、平均容量因数（Capacity Factor）较高等有利条

件，美国中部地区的风电价格走低趋势尤为明显，也成为美国风电价格最低的地区。

风电的采购通常通过购电协议（Power Purchase Agreement，简称 PPA）来完成，在这种以长期合同大量采购的方式中，风电价格仅为天然气发电价格的一半。近年来，风电的



图1 美国地理分区及各地区风速

PPA 价格低至 20 美元/兆瓦时，即 2 美分/千瓦时（约合人民币 0.13 元/千瓦时）。整体来说，风力发电成本仅为 2 美分/千瓦时—4 美分/千瓦时，再加上输电成本及其他相关成本，美国风电消费者平均需支付 12 美分/千瓦时。

但是要注意的是，购电协议的风电价格是统包价格（all-in price），其

中包含了美国风能生产税抵免（Wind Production Tax Credit）之类的补贴，该项抵免政策给予运营商 18 美元/兆瓦时—23 美元/兆瓦时的税收补贴。若排除生产税抵免，美国中部地区的度电成本（LCOE）不到 50 美元/兆瓦时（5 美分/千瓦时）。

相较而言，美国能源信息管理局（the Energy Information

Administration）估计，联合循环天然气发电站的度电成本最低约为 54 美元/兆瓦时（5.4 美分/千瓦时）。所以，即使没有美国风能生产税抵免的作用，风电依旧是一种极具竞争力的电源。

## 风电机组性能提高

近年来，在美国历年全部新增装机中，风电的占比不断提高。2016 年，风电占比为 27%。不过它仍然不及太阳能光伏和天然气发电，屈居第三。为了在与太阳能光伏及天然气发电的激烈竞争中领先一步，美国风电产业势必会自我升级。例如，风电整机商制造了单机容量更大的风电机组，使其在风速较低的地区仍能最大限度提升发电效能。

产业数据显示，2016 年，美国新增风电机组的平均风轮直径变得更大，从而可以使机组捕获更多风能；轮毂也变得更高，机组得以在更高处获取更佳的风能资源。这一年，新吊装机组的平均风轮直径达到 108 米，比过去 5 年的平均值增长了 13%；新吊装机组的平均轮毂高度为 83 米，比过去 5 年的平均值提高了 1%。机组的平均单机容量也随之增加，2016 年新增风电机组的平均单机容量为 2.15 兆瓦，比过去 5 年的平均值提高了 11%。

风电机组的这些设计改进不仅增加了机组发电量，也增加了机组容量因数。2014 年和 2015 年吊装的风电机组的平均容量因数超过 40%，这意味着如果一年 365 天每天 24 小时都刮风的话，机组将会发出其理论最大发电量的 40%。

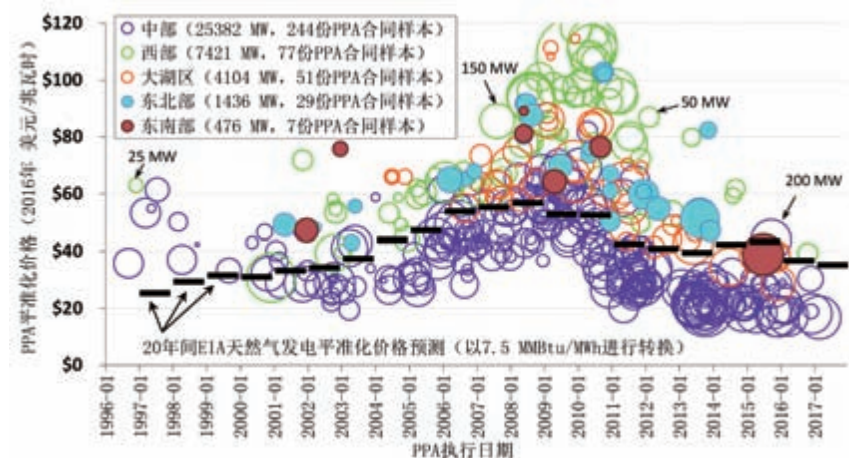


图2 美国各地区的PPA价格

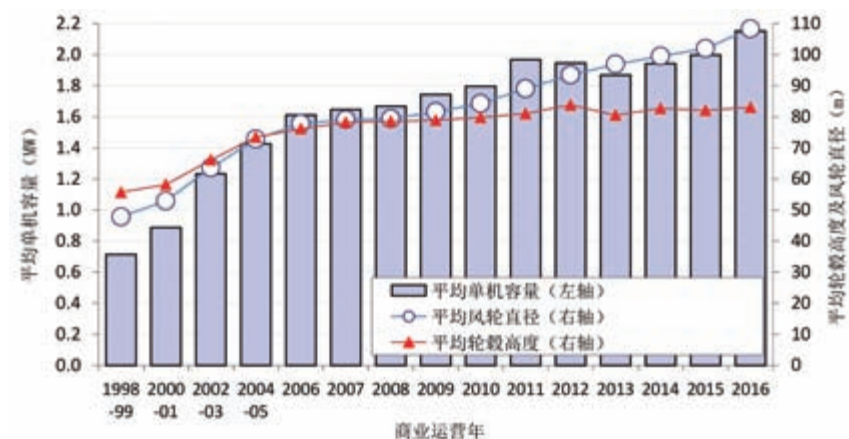


图3 历年风电机组的平均单机容量、平均风轮直径、平均轮毂高度



## 风电波动性的相关成本微乎其微

尽管美国风电在价格方面已经凸显出了绝对的竞争优势，却依旧避不开这些问题：由于风电存在波动性所带来的并网成本怎么算？比如储能成本，不会摊到消费者头上吗？

实际上，对于像风电这样的可变电源（Variable Source of Electricity）并入电网到底需要花费多少成本，并没有一个简单的答案。若有的话，那就是“要看情况”。该报告从风电渗透率和弃风限电率的变化入手，带领

读者一窥风电并网成本真相。

图4的数据显示2008年至2016年间美国7家独立电网运营商（ISOs）的风电渗透率和弃风限电率情况。

在这7家电网运营商中，它们的风电渗透率显著升高，而弃风限电率下降了。但这并不意味着风电并网的成本不大。弃风限电率之所以下降，一个很重要的原因是自2009年弃风限电率达到高峰之后，很多地区为将风电输送到负荷中心投资了大规模输电线路。

以德州电力管理委员会（ERCOT）

所管理的地区为例。当地公用事业企业在输电线路投资70亿美元将风能资源丰富的西德州与美国东部、中部城市连接起来，使得德州的发电余量可以输送到有电力需求的地区进行消纳，ERCOT所管理的地区弃风限电率也就自然降低了。当然，所有在输电线路上的投资成本都会分摊到消费者群体当中，ERCOT的这些成本也不例外。但是，数十亿元的投资成本分摊到成千上万的消费者身上，在每个人身上所产生的成本就微乎其微了。

美国风电的超低廉价格推动了更多风电场建设。接下来，风电并网还将会是美国电网运营商要面临的挑战。当然，到目前为止，他们在这方面已经做得很成功。同时，决策和监管部门应该认识到，由于未来风电装机容量会越来越大，需要新增输电能力以及升级电网来接纳风电。以最低的投资进行最大容量的可再生能源并网不是一项轻松的任务，但是随着可再生能源逐渐摆脱“替代能源”的标签而变成美国供电的主力，投资新建更多输电线路将变得越来越关键。（编译自科学美国人网站）

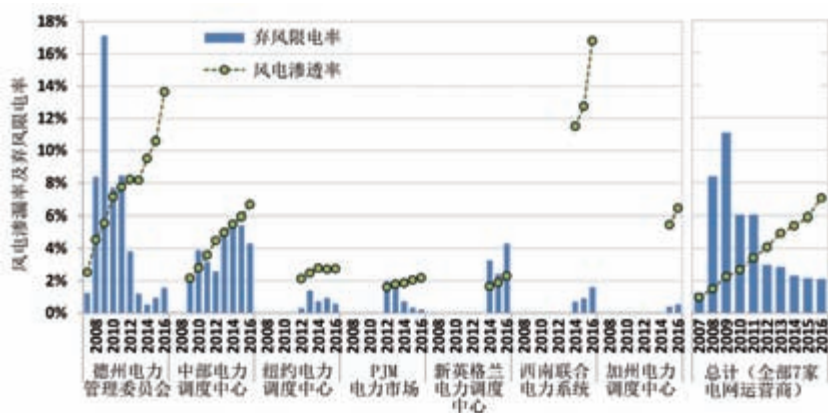
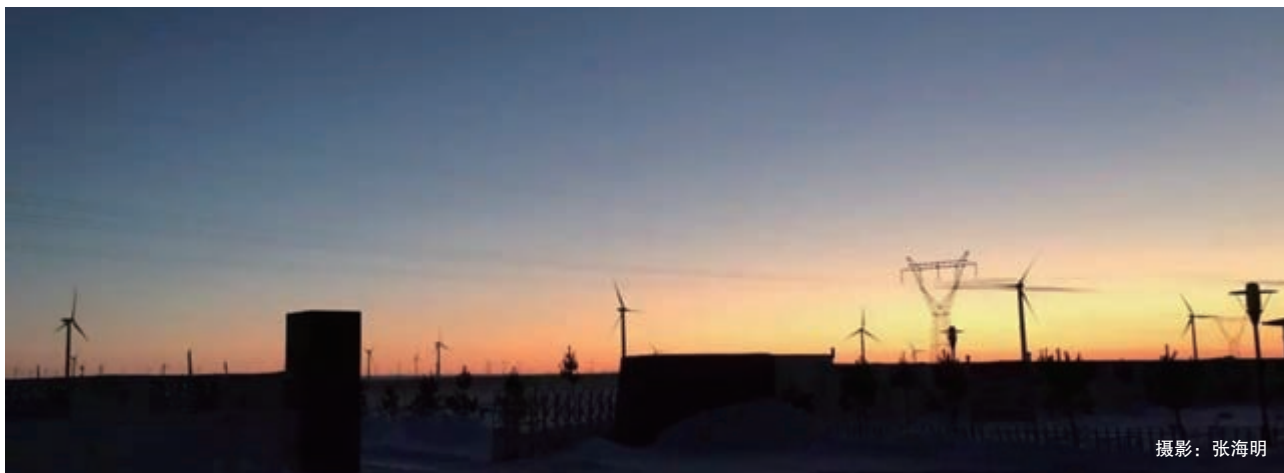


图4 ISOs的弃风限电率及风电渗透率



摄影：张海明

# 来认识我们极灵活的数据记录仪!



4G / LTE通讯功能即将推出

来自NRG Systems的新款SymphoniePRO®数据记录仪将已广为使用和熟知的Symphonie产品线提升到全新水平。现在您可以选择16通道或26通道的接线板，同时SymphoniePRO记录仪也可以根据您的项目需求做更优化的测量。

成功的测量需要高品质的产品。  
请联系经授权的NRG Systems经销商或欢迎莅临10月17-19日在北京举行的“2017-中国国际风能大会”展位，了解更多信息。

[cn.nrgsystems.com](http://cn.nrgsystems.com)



  
**NRG**Systems.

上海电机学院从 2012 年开始招收电气工程硕士（风电方向）专业学位研究生，目前已拥有校内研究生导师 46 名，企业研究生导师 101 名。引入企业专家从行业需求的角度进行授课，在电气工程专业硕士研究生的培养过程中获得了很好的效果。

# 引入企业专家授课 提升硕士教学质量

文 | 谢源

专业学位（Professional Degree）是相对于学术型学位（Academic Degree）而言的学位类型，其目的是培养具有扎实理论基础、并适应特定行业或职业实际工作需要的应用型高层次专门人才。上海电机学院是“服务国家特殊需求人才培养项目”——学士学位授予单位开展培养硕士专业学位研究生试点工作单位，从 2012 年开始招收电气工程硕士（风电方向）专业学位研究生，目前已拥有校内研究生导师 46 名，企业研究生导师 101 名。

## 引入企业专家授课对专业学位研究生的培养至关重要

考虑到国家和上海风电产业发展对大量高端工程技术人才的迫切需要，同时结合当时学校与上海电气集团密不可分的关系，上海电机学院在申请“服务国家特殊需求人才培养项目”时，选择将风力发电作为国家特殊需求行业。在申请该项目时，上海电气风电设备有限公司的 6 位教授级高级工程

师被聘为企业研究生导师。

根据培养方案的要求，学校给每一位硕士研究生安排了两位导师：一位是校内指导老师，全程负责研究生的指导工作；另一位是企业指导老师，负责指导和安排研究生在企业实习期间的工作。按照方案，硕士研究生培养实行学分制：学校与企业共同完成课程教学、工程实践、毕业论文指导等工作。在此过程中，采用校内理论教学、企业实践教学和学位论文相结合的两段式培养方式，培养年限一般不低于 2.5 年，其中企业学习 1 年。

硕士研究生学位论文完成时间不少于 1 年，包括论文开题、中期检查、毕业答辩等环节。学位论文的指导实施“双导师制”，由学校和企业导师共同指导；学位论文以工程实践为导向，以技术创新为评价标准；学位论文的选题是企业的生产实际问题，或具有明确的生产背景和应用价值的研究课题；学位论文的研究工作要对企业的生产和发展有一定的实际应用价值。

研究生必须在第三学期末进行开

题答辩，在第四学期的最后三周内进行论文阶段中期答辩检查。1 位校内专家和 1 位校外专家评审通过后，该研究生才能参加答辩。开题、中期、毕业三个答辩环节，答辩委员会至少由 5 位专家组成，其中必须包含 1 位具有相关专业领域知识的企业专家。

从培养方案来看，引入企业专家和企业指导老师对专业学位研究生的培养是至关重要的。项目获批的 6 年来，一大批与风力发电有关的企业专家已逐年被学校聘为企业研究生导师。截至 2017 年 8 月底，企业研究生导师数量已增加到 101 名，所有企业导师都具有高级工程师职称。

## 企业专家进课堂

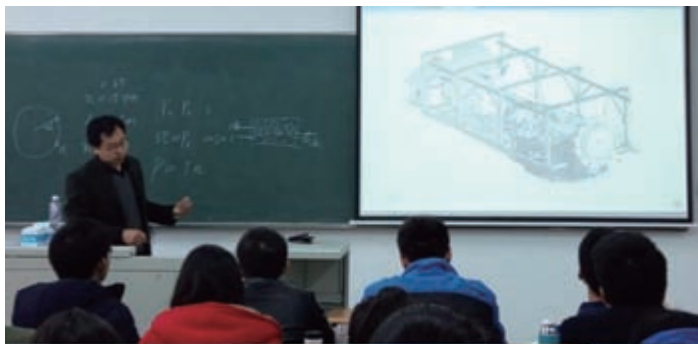
在电气工程专业硕士研究生的培养方案中，开设了相当数量的风力发电技术课程，培养学生掌握风力发电技术的基本原理与工程应用。表 1 给出了培养方案中与风力发电技术相关的课程基本信息。在风力发电技术课程



教学实施过程中,既注重基础理论知识介绍,又注重培养学生具备风电工程技术能力。表1中的课程由硕士指导教师主讲,鼓励把企业专家“请进来”,在研究生课堂进行教学工作,与校内授课教师共同完成课程教学工作,使研究生的理论与实践水平同步提升。

授课教师可根据教学计划的安排,在授课课时内,邀请企业专家来校讲授实践应用部分内容,授课教师全程参与并协助企业专家授课过程。企业专家讲授的实践应用知识须与课程教学大纲相符,从而充分体现企业实践与理论知识的结合。

从2016年开始,上海电机学院鼓励硕士研究生课程授课教师开展企业专家进课堂的教学方法,2年来,这项工作得到很好开展,



由授课教师联系具有深厚行业背景的企业高级工程师到课堂中与研究生面对面交流,并和校内教师共同制定教学计划。表2是开展企业专家进课堂教学方法的课程清单,其中企业专家承担的教学任务大约占总课时的1/4左右。

虽然企业专家进课堂的教学方法在上海电机学院的应用时间不长,目前只有2届研究生的部分课程参与,但

是从授课情况和课后反馈来看,该教学方法非常符合硕士研究生的培养。企业专家从工程的角度讲解了风力发电行业最新的技术,使研究生可以了解国内外风力发电行业的前沿知识。

## 企业专家进实验室

根据电气工程专业硕士研究生的培养方案要求,结合绝大部分研究生在本科阶段没有系统学习风力发电技术知识的现状,在研究生课程中开设实验环节就显得不可或缺。近年来,上海电机学院在风力发电领域与部分风电企业开展了深度合作,联合申请风力发电科研项目,合作开发了风力发电装置。因此,部分研究生授课教师把企业专家请到实验室,由后者手把手指导研究生实际操作风力发电装置,学习风力发电设备的开发和调试技能,这比校内授课教师指导得更为透彻和扎实。

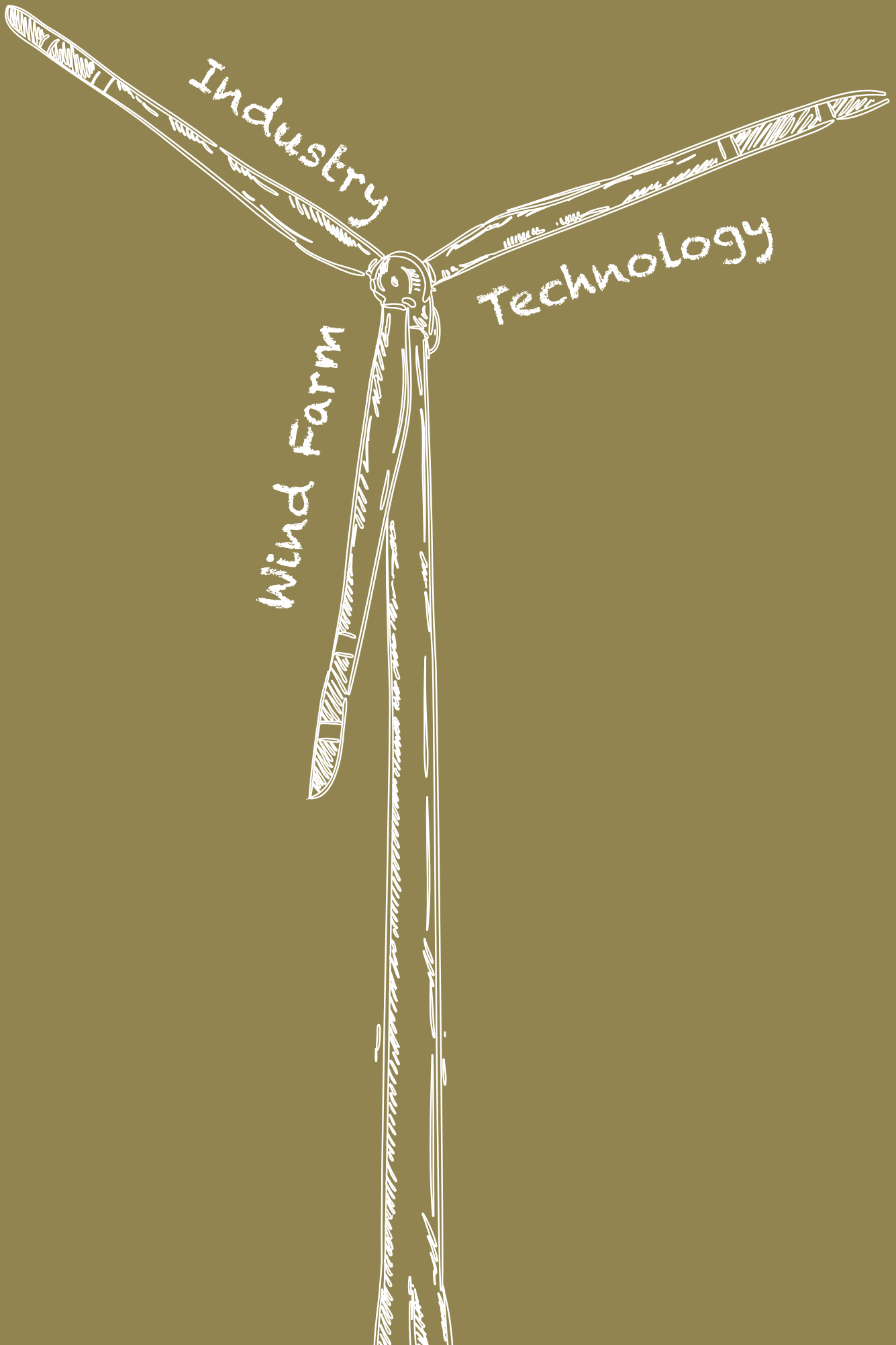
可以说,通过几年的实践,上海电机学院已经让企业专家团队更深入和全面地融入到专业学位硕士的培养过程中,这对电气工程专业硕士研究生的成长,起到了积极的促进作用。☞(致谢:本文由上海电机学院研究生教研教改项目A1-0225-17-003-13和课程建设项目A1-0225-17-003-08资助。)(作者单位:上海电机学院)

表1 培养方案中与风力发电技术相关的课程

课程名称	学分	学时	必/选修
现代电力电子技术	2	36	必修
风力发电机原理与应用	2	36	选修
风力发电机组控制与并网技术	2	36	选修
风电设备状态检测与故障诊断	2	36	选修
电能质量控制	2	36	选修
智能控制	2	36	选修
电机理论与电机设计	2	36	选修
电力电子系统建模与仿真	2	36	选修
电气设备在线监测技术	2	36	选修
工程项目管理	2	36	选修

表2 开展企业专家进课堂教学方法的课程清单

课程名称	专家职称	专家人数	专家背景	必/选修
现代电力电子技术	高级工程师	2	许继电气、蔚来汽车	必修
现代智能电网技术	高级工程师	2	上海电气自动化所、上海电气风电公司	必修
电力电子系统建模与仿真	高级工程师	2	蔚来汽车、上海电气风电公司	选修
风力发电机组控制与并网技术	高级工程师	1	上海电气风电公司	选修
智能控制	高级工程师	2	新华控制	选修



Industry

Technology

Wind Farm

## 产业

风电机组功率曲线与发电量浅析

## 风电场

风电场 35kV 开关柜典型故障与防范措施

## 技术

风力发电机组空—水—空冷却系统影响因素分析

风电机组机舱变频器更换专用工具设计

基于 ANSYS Workbench 的风电机组导管架基础过渡段结构优化

聚  $\alpha$ -烯烃齿轮油老化趋势及其再生处理研究



# 风电机组功率曲线与发电量浅析

文 | 王明军

在设计评估或设计认证时，国内大部分整机制造商并未对机组功率曲线进行现场测试。理论功率曲线大都通过设计仿真获得，但由于现场风况、传动链阻尼、系统测风等因素的影响，机组的实际功率曲线与理论功率曲线会出现差异。在同一风电场，同种机型的不同机组也会因风况差别造成机组的运行功率曲线和发电量的不同。

宁夏某风电场有国产机组和进口机组两种机型，它们之间的平均年发电量存在差别，进口机组的单机平均年发电量高出约 10%，风电场业主则认为：功率曲线问题是造成国产机组发电量低的根本原因。因此，国产机组逾期（5 年）不能出保，在国产机组生产厂家给业主赔付了高额的发电量损失后，机组才最终得以出保。本文对该风电场两种机型部分机组的运行功率曲线和发电量数据进行比较，结合塔筒高度、机组布局等因素进行分析，找出国产机组发电量低的根本原因。

## 风电机组功率曲线

### 一、功率曲线的定义

功率曲线是风电机组的重要运行性能指标。所谓功率曲线就是以风速  $v_i$  为横坐标、以有功功率  $P_i$  为纵坐标的一系列规格化数据描述  $v_i$  和  $P_i$  关系的特性曲线。

在标准空气密度 ( $\rho = 1.225\text{kg/m}^3$ ) 条件下，风电机组的输出功率与风速的关系曲线称为该风电机组的标准功率曲线。通常情况下，风电机组出厂时，制造商会向用户提供标准功率曲线。然而，由于风电场机组的实际运行条件与设计条件不同，势必导致机组的实际功率曲线与标准功率曲线不一致。

针对风电机组功率特性的测试与评估，我国制定了国家标准 GB/T 18451.2-2012《风力发电机组功率特性试验》。由于风速、风向变化的不确定性，特别是山区地形的复杂性，使得测试风电机组功率曲线，仍然存在较多的困难。目前相关的测试方法和标准仍在不断完善中。

### 二、实际运行功率曲线的形成及影响因素

风电机组的实际运行功率曲线不仅反映机组性能，还反映了机组的实际工作状态（如风速、风向传感器是否存在事故，主控参数设置，叶片状态等）和实际工作条件（如是否限电、湍流强度大小等），会随风况条件的不同而产生差异，从而决定了风电场机组实际运行形成功率曲线的多样性与复杂性。因此，在通过风电场的机组运行功率曲线考察机组性能时，有着严格的限制条件及规定，存在诸多困难。

从实践来讲，在通常情况下，反

映机组性能的实际运行功率曲线，其形成需要一个较为漫长的时间过程。因客观条件的限制，机组在较短的时间内，不能形成较为完整、准确反映其性能的功率曲线。GB/T18709-2002《风电场风能资源测量方法》规定，风电场风能资源测量时，测量数据的采集应满足连续性和完整性的要求。现场测量应连续进行，不应少于 1 年；现场采集的测量数据完整率应达到 98% 以上。采集数据的时间间隔不宜超过 1 个月。

根据国家标准 GB/T18709-2002《风电场风能资源测量方法》和 GB/T18710-2002《风电场风能资源评估方法和评估技术规定》（发改能源[2003]1403 号）中要求：“现场测量收集数据应至少连续进行一年，并保证采集的有效数据完整率达到 90% 以上”。同理，在考察风电场机组的实际运行功率曲线时，不仅要考察每台机位的湍流强度等风况条件和地形条件，还需考虑数据的有效性和完整率。不反映机组性能的数据，应予以删除。在风电场限电或其他条件下限功率生成的功率曲线数据，不能作为考核机组性能的有效数据、计入机组功率曲线的统计之中。因此，目前因长时间限电，我国不少风电场难以达到测试机组功率曲线的连续性和完整率要求。

由于风电机组的实际运行功率曲线受到风电场风况和形成条件的影响,风电机组在不同工况和条件下形成的功率曲线是不同的。一台性能优异的风电机组,在风况较差的条件下,形成的功率曲线完全可能达不到理论值,发电量低于其他同类型风电机组。

根据负载的性质,负载的大小以及风电机组安装现场的风速、风向、地形等情况的不同,风电机组的功率曲线是一组而不是一条。也就是说,同一台机组会因条件(如时间、季节、位置、限负荷等)的改变形成一系列不同的功率曲线。同时,机组的传感器精度、机组控制器种类与质量、控制参数、风速传递函数以及功率曲线生成软件的差异等也会造成机组实际运行功率曲线的不同。

因此,在机组传感器精度、机组控制器(主控)硬件、主控控制参数、风速传递函数和功率曲线形成软件相同的情况下,利用较长时间形成较为完整的功率曲线,可以对比不同机组的实际运行效率。在综合考虑功率曲线数诸多影响因素的前提下,可以把风电场不同机组形成的功率曲线进行比较,并能大致考察出机组的实际性能。

### 三、机组运行功率曲线与发电量

功率曲线是风电机组发电效率的一种表述,从这个意义上讲,功率曲线优劣会直接影响到机组的发电量。然而,机组发电量除受到机组功率曲线影响外,还受到湍流强度、机组之间的尾流、塔筒高度、机组布局、当地的年平均风速、当地的可利用风速和机组利用率等诸多因素的影响。标准功率曲线优劣仅是机组发电量高低的必要条件,而与风电场机组实际发电量的高低没有必然联系。

单机年发电量为年平均等级风速(有效风速范围内)的风速小时数乘以此风速等级的风电机组输出功率的总和。其计算公式为:

$$G = \sum N_i W_i$$

式中, $G$ 为发电量,kWh; $N_i$ 为相应风速等级出现的全年的累计小时数, $h$ ; $W_i$ 为风电机组此等风速下对应的输出功率,kW。

因此,可以根据机组功率曲线和该机位风频计算出风电机组的年发电量。但是,计算所采用的风电机组功率表或功率曲线图必须是厂家提供的,并由权威机构测定的风电机组功率表或功率曲线图。另一方面,也可以通过机组的年发电量和该机位的风频计算出风电场机组的实际运行功率曲线。

## 实例分析

宁夏某风电场共有风轮直径均为77米的1.5MW风电机组33台,其中

国产机组11台,进口机组22台,2008年投运。风电场建造在戈壁,少有植被,地势较为平坦,如图1所示,机组分布在110kV升压站的一侧,整个风电场呈不规则的块状分布。风电场周围没有高大建筑物,没有森林树木,也没有较明显土丘之类的障碍物或其他风电场。

该风电场四季温差大、干旱少雨,风向季节性明显,秋冬以北风和偏西风为主,春夏以东南风和偏南风为主,但没有明显的主风方向。风速较低时,风向变化频繁;风速较高时,风向较为稳定。风速也有较明显的季节性,一般春季最大,冬夏季次之,秋季最小。

下面对国产、进口两种机型中,年、月利用率在98%以上的国产2#、进口21#和进口28#三台机组的实际运行功率曲线与发电量进行比较和分析。

### 一、两种机型机组的功率曲线比较

两种机型均采用ALSTOM变频器 and 国外厂家生产的直流变桨系统;机组的风向标、风速仪、机组控制器

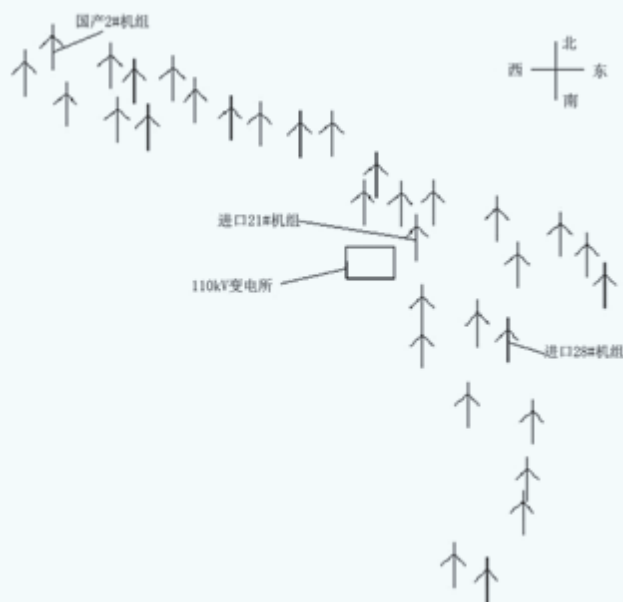


图1 整个风电场33台机组分布图及变电所位置

(WP3100) 和后台软件 (Gateway) 均来自丹麦 Mita 控制器厂家。

如表 1 所示, 比较国产 2# 与进口 21# 两台机组的功率曲线运行数据发现, 在风速低于 13 米/秒时, 国产 2# 机组形成的功率曲线优于进口 21# 机组。然而, 从两台机组的发电量统计来看, 不少时段国产 2# 机组的年发电量却比进口 21# 机组低。由此看来, 机组年发电量的高低, 不完全由功率曲线决定。

在同一风电场的风电机组, 因机位不同, 风况存在差异。通过实际运行功率曲线比较机组性能, 存在一定的不足和局限性。但仅从机组运行生成的功率曲线来看, 国产机组的运行效率并不比进口机组差, 且普遍优于

进口机组。

### 二、两种机型机组的平均年发电量的分析与比较

此风电场 22 台进口机组平均年发电量比 11 台国产机组的平均年发电高出约 10%。但是, 并非所有国产机组的发电量均低于进口机组, 国产 2# 机组年发电量就高于进口 28# 机组。

如图 1 所示, 2# 机组布置在风电场的西北角上, 在多个方向上可以降低或不受其他机组尾流的影响; 28# 则处于风电场众多机组中间偏南的位置, 在多个风向上, 均或多或少地要受到其他机组尾流的影响。

如表 2 所示, 21、22、24、25、26、27、28、31、3、4 日, 这 10 天, 国产 2# 机组的日发电量比进口 28# 机

组低, 而其余 20 天国产 2# 机组的日发电量均高于进口 28# 机组。国产 2# 机组 30 日的总发电量为 187796 kWh, 进口 28# 机组为 164213 kWh, 国产 2# 机组高于进口 28# 机组。机组的日发电量有时差别巨大, 27、3、4 日进口 28# 机组的日发电量远超过国产 2# 机组, 均是国产 2# 机组的 2.5 倍以上; 而 30、2、7、8、9、15、17 日国产 2# 机组高出进口 28# 机组很多, 其中 30 日和 17 日的国产 2# 机组的发电量是进口 28# 机组的 2 倍左右。

如图 2、图 3 所示, 比较国产 2# 机组与进口 28# 机组在 12 个月的年发电量可知, 2、5、6、7、9 这几个月, 国产 2# 机组发电量低于进口机组, 其余月份均高于进口 28# 机组。8 月的

表1 国产2#与进口21#机组的运行功率曲线比较

风速 (m/s)	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75	7.25	7.75	8.25	8.75	9.25
国产 2# (kW)	66	134	164	187	255	288	341	394	444	529	612	703	799
进口 21# (kW)	17	37	60	88	122	160	205	257	316	382	456	538	627

风速 (m/s)	9.75	10.25	10.75	11.25	11.75	12.25	12.75	13.25	13.75	14.25	14.75	15.25	15.75
国产 2# (kW)	893	988	1093	1202	1332	1446	1502	1522	1526	1526	1527	1529	1529
进口 21# (kW)	723	823	930	1043	1160	1284	1407	1488	1530	1548	1555	1557	1557

表2 国产2#机组与进口28#机组30日的发电量比较

日期	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2
国产 2# (kWh)	288	6636	12173	4587	7660	9689	362	127	606	0	65	2035	1888	9740	2224
进口 28# (kWh)	220	5905	14349	4930	6160	9693	606	175	1545	1	55	1009	1972	6947	1685

日期	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
国产 2# (kWh)	1391	154	561	14728	3812	16666	14174	23034	14656	24675	2563	2962	1572	3226	5542
进口 28# (kWh)	3688	2702	469	11617	2404	10768	9803	22633	11242	22283	2382	2580	886	3072	2432

注: 表中的数据取自 2010 年 10 月 19 日至 2010 年 11 月 17 日



发电量差别最为明显, 国产 2# 机组的发电量为 164429 kWh, 进口 28# 机组仅为 87545 kWh, 约为国产 2# 机组的一半。2# 机组的年发电量为 2755920 kWh, 28# 机组为 2674012 kWh, 国产 2# 机组略高于进口 28# 机组。

下面就造成两种机型的机组平均年发电量差别的原因进行分析和探讨。

### (一) 塔筒高度

塔筒高度是造成国产机组发电量低的关键因素, 进口机组的轮毂中心高度为 85 米, 而国产机组的轮毂中心高度为 70 米。由于塔筒高度不同, 造成了两种机型机组的发电量差别。在近地层中, 风速随高度有显著变化。但由于地面粗糙度不同, 风速随高度的变化也就不同。大气低层常用指数公式表示风速和高度与地面粗糙度的变化关系:

$$V_h = V_0 \left( \frac{X_h}{X_0} \right)^\alpha$$

式中,  $V_h$  为在高度  $X_h$  处的风速;  $V_0$  为在高度  $X_0$  处的风速;  $\alpha$  为指数, 它与地面粗糙度有关。我国常用的  $\alpha$  值分为三类: 0.12、0.16、0.20。在三种地面粗糙度下, 两种塔筒高度在轮毂中心高度处所对应的风速  $V_h/V_0$  之比分别为 102.36%、103.16%、103.96%, 又因风能与风速的三次方成正比, 则在同样风轮直径、同样机组效率情况下, 进口机组的单机平均年发电量应比国产机组的单机平均年发电量分别高出 7.24%、9.77%、12.36%。即因塔筒高度不同, 进口机组的单机平均年发电量高出国产机组应在 7.24% 到 12.36% 之间。

从以上分析可知, 两种机型塔筒高度的不同是造成单机平均年发电量差别的主要原因。

### (二) 机位布局及不同塔筒高度机组混合安装

如果风电机组串列布置是指下游风电机组风轮旋转轴线与上游风电机组风轮旋转轴线重合的情况。机组之间的距离为  $X$ , 风轮直径为  $D$ , 当  $X/D = 4$  时, 计算得到的最大风轮功率系数为没有尾流影响的 45% 左右; 当  $X/D = 6$  时, 为 65% 左右; 当  $X/D = 8$  时, 为 75% 左右; 而当  $X/D = 16$  时, 为 97% 左右, 尾流影响基本可以忽略。

该风电场地势较平缓, 不同机位

的海拔高度基本一致, 机组风轮直径均为 77 米, 机位之间距离大都不足 500 米。即  $X$  与  $D$  之比大都小于 6.5, 且不同塔筒高度混合安装, 这样, 将对机组的发电量产生重要影响。由表 2 和图 2、图 3 中的机组运行数据可知, 随着风电场风向的变化, 上游机组尾流的影响也不断变化, 从而造成了国产 2# 与进口 28# 两机组之间的日发电量和月发电量差别的不断变化。

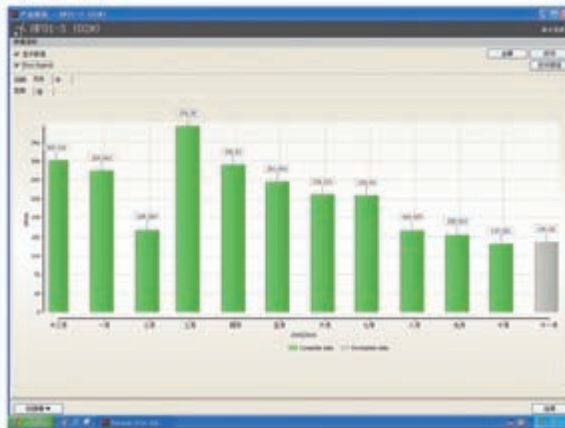


图2 国产2#机组2009年12月至2010年11月的月发电量统计



图3 进口28#机组2009年12月至2010年11月的月发电量统计

究其原因：首先，上游机组吸收能量，造成下游国产机组发电量低；其次，尾流效应造成能量损失；第三，当上游机组为高塔筒的进口机组，下游为低塔筒的国产机组时，与下游为相同塔筒高度的进口机组相比，受上游机组尾流影响增加，下游国产机组的发电量损失更多；相反，当国产机组处于上游，进口机组处于下游时，因上游机组塔筒高度较低，则尾流对下游高塔筒机组的影响减弱，进口机组发电量损失相对较小。

在该风电场，有的国产机组安装在塔筒较高的多台进口机组中间，势必造成国产机组的发电量损失更大；部分国产机组虽安装在风电场的最外侧，但因该风电场没有明显的主风方向，当风向变化、国产机组处于进口机组下游时，会加剧国产机组的发电量损失。

正是上述原因造成了 2# 机组与 28# 机组日发电量和年发电量的差距。进口 28# 机组安装在众多机组当中，在各个方向上都或多或少地受到上游机组尾流的影响，有 20 天的日发电量均低于国产 2# 机组；当 2# 机组不受或很少受到上游机组尾流影响，而 28# 机组受上游机组的尾流影响严重时，如 30、2、7、8、9、15、17 日，2# 机组的日发电量高出 28# 机组很多，其中 30 日和 17 日的日发电量差距最大，为 28# 机组的 2 倍左右；然而，当 28# 机组受尾流影响较小，2# 机组受上游机

组尾流影响严重时，在 27、3、4 日 28# 机组的日发电量则是 2# 机组的 2.5 倍以上。28# 机组机位受到上游机组尾流的严重影响，致使 28# 机组发电量大大降低，与此同时，2# 机组则因少受或不受上游机组尾流的影响，由此带来的发电量损失较小，造成了 8 月份 28# 机组的月发电量仅为 2# 机组的一半左右。从全年来看，由于上游机组尾流作用，低塔筒的 2# 机组年发电量高于高塔筒的 28# 机组。比较 2# 与 28# 机组发电量还可以看出，随着风向的变化，每天、每月上游机组尾流对两台机组的影响会随之变化，两台机组之间的相对发电量也发生变化。风电场的风向每年都有差别，风电场各机组之间的相对年发电量高低也会因此而发生变化。

因此，该风电场把不同塔筒高度机组混合安装后，因上游机组的尾流影响，使得国产机组的发电量损失加剧，而进口机组发电量损失相对较小。进一步加剧了两种机型之间的年发电量差别。

（三）国产机组的利用率略低于进口机组

该风电场的国产机组，其机架、叶片、齿轮箱和发电机等部件均是国内生产，单台机组的采购成本比进口机组大约低 400 万元。由于机组国产化、国产整机厂家的维修和风电场管理水平等因素的影响，国产机组的利用率略为偏低。

考虑了塔筒高度、机组布局以及机组利用率等对机组年发电量的影响后，进口机组的单机平均年发电量应比国产机组高 10% 左右，这与该风电场多年的实际发电量统计完全吻合，因此，国产机组与进口机组的实际运行效率基本一致，国产机组不存在功率曲线问题。

## 结论

两种机型的塔筒高度不同、不同塔筒高度机组混合安装以及机组利用率等造成了进口机组的单机平均年发电量高出国产机组约 10%；而非机组功率曲线问题引起。

由本文分析可知，风电机组性能及功率曲线优劣，与机组发电量高低没有必然的联系。风电场的机组运行功率曲线受气候、地形等各种外界影响因素较多，难以简单地通过现场机组运行功率曲线对机组性能实施较为准确地评估。然而，机组发电量除受机组功率曲线的影响外，还受到其他各种外界因素的影响，尤其是受上游机组的尾流影响不容低估。因此，我们在风电机组设计和风电场微观选址时，应注重塔筒高度的选择和机组布置的合理性等，以提高发电量、延长机组的部件寿命，避免不必要的经济损失。❏

（作者单位：东方电气风电有限公司）





**THE SWITCH**  
A YASKAWA COMPANY

## 风电视界

你是否已经决定你的下一个风机的设计会达到更高的功率？

十几年前，斯维奇先进的、基于永磁技术的传动系统就已推动了风电的发展。我们拥有成熟的供应链。制造10 MW级别的发电机是我们驾轻就熟的日常工作。我们的变流器能够满足全新的并网标准。我们亦能轻松满足你升级至更大功率的需求。

准备好和我们一起开启风电的下一个新视界了吗？

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



# 风电场35kV开关柜典型故障与防范措施

文 | 靳现林, 雷启龙, 周建国

35kV开关柜是风电场的重要设备, 具有结构紧凑、体积小、可靠性高、环境适应性强、噪声小等特点, 但风电场在设备选型、安装和运行过程中, 受低价中标、工艺不规范、运维不到位等的影响, 相关设备质量常常得不到有效保证。在某些风电场, 其优点不仅不能体现, 反而成为故障频发的主设备之一。35kV开关柜故障常常给风电场带来重大损失, 影响恶劣。本文在分析多起典型故障的基础上, 对故障暴露的缺陷进行了分类整理, 指出在空气绝缘距离检测、辅助绝缘设置、工程验收和运行管理等方面的工作重点。此外, 本文还介绍了针对上述缺陷的整改方案。相关风电场改造后开关柜的稳定运行证明这些措施和方案是可行和有效的。

## 35kV开关柜典型故障

### 一、电缆室铜排相间短路

运行中, 某风电场#2主变保护A柜纵联差动保护动作, 35kV母线差动保护动作, #2主变高压侧202开关、低压侧302开关跳闸。故障后检查发现302开关柜有少量烟雾冒出, 且后柜门被崩开。进一步检查发现302开关下口与主变低压侧进线CT之间的铜排发生了三相短路。该型开关柜在CT进线铜

排的相与相之间增设了辅助绝缘, 设置的方式是在A、B相和B、C相之间增添竖向布置的SMC绝缘板; 同时, 为固定绝缘板, 在垂直于绝缘板的方向安装了一根横截面为矩形的贯穿水平梁。水平梁的材质是SMC, 绝缘板通过直角绝缘件和塑料螺栓固定在水平梁上。故障中, 距离短路点较近的绝缘隔板及水平支撑梁、CT及开关下口触头盒均被严重烧伤(图1)。在图1中辅助绝缘板已拆除, 水平支撑梁未拆除。

通过查看故障波形文件和勘察故障设备, 最终确定故障主要是由于辅助绝缘设置不合理, 引发相间短路造成的。绝缘板在设计和安装上存在以下缺陷:

(一) 用于绝缘的SMC板, 每块均由2块小板拼接而成, 拼接采用打孔

并螺栓连接的方式。这种方式的缺陷是, 绝缘板打孔处积尘受潮后容易发生击穿短路。

(二) 贯穿的水平绝缘支撑梁为矩形, 其上部水平面与裸导体之间的空气绝缘净距较小(约120mm), 水平断面在积灰后容易产生放电现象, 为发生短路创造了条件。

(三) 绝缘板安装采用现场切割加工的方式, 切割形成的断面未做清洁和保护处理, 松散和吸潮导致性能严重下降。

### 二、柜内母排对柜体放电

运行中, 某风电场#8集电线328开关柜母线室内发生短路故障。故障起始为C相接地, 200ms后发展为三相短路; 发生三相短路0.7s后主变低压侧后备保护动作, 主变低压侧301开关断开, 故障被切除。故障造成35kV II



图1 故障后的电缆室

段母线停运近两天，损失严重。故障的直接原因是该开关柜母线室内三相母排对柜体的距离过小，不满足国家能源局《防止电力生产事故的二十五项重点要求》中规定的最小距离（300mm），引起母线对开关柜柜体放电，导致故障发生。

发生故障的风电场35kV系统中性点为接地变减小电阻型式，电阻10s耐受电流400A。在单相接地发生后，柜内电弧容易稳定燃烧，使单相故障迅速发展为相间故障。故障录波数据显示，在单相接地故障发生后，未及接地变零序保护动作，故障就直接发展为三相短路。由于该风电场35kV母线保护尚未投入，最终由主变低压侧后备保护将故障切除。

本次故障暴露的缺陷主要有：

（一）为提高绝缘能力，该型开关柜在母线室内安装了水平布置的绝缘板，但绝缘板的安装细节处理不够规范。绝缘板与裸露带电体之间的距离过小（不足60mm），而且绝缘板为水平布置，极易积灰，从而导致放电。故障后，现场排查时发现无故障开关柜内积灰严重（图2）；故障开关柜内拆下的绝缘板有多处放电痕迹（图3）。

（二）母排连接处的绝缘包盒安装不规范。母排相与相之间包盒的开口方向正对，其加强辅助绝缘的作用被严重削弱；有些包盒的开口方向直接朝向柜体边角等易发生尖端放电的位置，而包盒开口只是通过几个暗扣闭合，存在内外贯穿的气隙，无法起到弥补空气绝缘距离不足的作用。这些缺陷大大降低了包盒的使用效果，使之形同虚设。

（三）过高估计了包盒和热缩套母排的绝缘能力，把辅助绝缘等同于

绝缘件看待，未在辅助绝缘板和母排热缩套之间保留足够的安全距离，导致发生放电现象（图4），在潮湿或盐雾天气下，放电尤其严重。

（四）开关柜内部空间利用不合理。该开关柜为标准1.4米柜体，

但内部空间划分不合理，母线室整体偏小，加上母排规格较大，导致母排与柜体之间的空气绝缘距离最小在275mm左右，而且距离偏小的点一般在母排螺栓、母排边缘和柜体边角、螺栓顶部之间，这些位置极易发生尖



图2 母线室水平绝缘板积灰严重



图3 绝缘板上放电痕迹



图4 母线室放电点

端放电。

### 三、穿箱套管击穿

某风电场#2接地变332开关柜内1只C相穿墙套管损坏，发生单相接地，持续6s后引发母线室内相间短路，故障最后由35kV母线差动保护动作切除，造成#2主变和所带风电机组停运46小时，损失电量56万千瓦时。事后检查，确认故障的直接原因是C相套管击穿，之后发展为AC相短路（图5）。

该风电场35kV系统中性点为接地变加消弧线圈的型式，发生单相接地后，可以通过消弧线圈的投入降低故障点电流，使风电场继续运行一段时间，为紧急处理故障赢得时间。而此次故障在短时间内发展为三相短路的原因是故障相电压升高后，因母排对柜体的距离偏小，引起母线对柜体放电而直接发展为三相故障。

故障暴露的缺陷与第二部分所述故障暴露缺陷基本相同。除此以外，穿箱套管屏蔽线（图6）未与母排连接是引起故障的主要原因。

### 四、断路器静触头放电

正常运行中，巡视发现35kV配电室内PT柜有明显放电声响，且声音异常，偶尔有连续的吱吱声。紧急停电后检查PT柜，发现B、C相静触头盒处有明显的放电点。拆下触头盒后进一步检查，发现因潮气和盐雾比较大，在触头盒内部有多处生长有白色须发状物质。通过上述现象判断此次放电主要是湿度较大造成触头盒绝缘性能下降导致。更换新触头盒后，放电声音未立即消除，运行一段时间后减弱直至消失。究其原因，主要是停电检修期间，母线室湿度增大，运行一段时间后导体发热，相对湿度下降，放电声音才最终消除。

此次缺陷暴露了开关柜的一个设

计问题。开关柜的顶盖板处只有网状格栅，极易进入灰尘，对长期运行不利。整改措施是在顶盖板处另覆一块实心铝板，以提高柜体的防护能力。

### 五、进线电缆与过电压保护器产生表面电晕

风电场运行人员进行例行夜间巡视时发现无功补偿装置311开关柜后有电晕现象。经检查确认，电晕发生位置在C相进线电缆三指套位置与B相过电压保护器之间，其产生原因主要是由于C相电缆与B相过电压保护器距离较近造成的表面电晕。现场采用在C相电缆处加装35kV绝缘护套的方式临时处理，电晕现象得以消除（图7）。

除此以外，在例行安全检查和验收中，曾多次发现避雷器或过电压保护器的接引线因固定不牢固或固定位置不对导致相间距离过近的缺陷。该类缺陷如不及时消除，在运行中极易因过压或长期放电等因素导致短路的发生。

## 缺陷整改与防范措施

针对上述故障暴露的各类缺陷，制订了以下几方面的缺陷整改方案和防范措施：

#### 一、空气绝缘距离

根据DL/T 404-2007《3.6kV~40.5kV交流金属封闭开关设备和控制设备》（以下简称DL/T 404-2007），纯以空气作为绝缘介质的金属封闭开关和控制设备，相间和相对地的最小空气间隙规定如下：相间和相对地不小于300mm，带电体至门不小于330mm；当使用地点海拔超过1000m，则每增加100m，空气绝缘净距增加1%。

对空气绝缘距离不足这一类缺陷

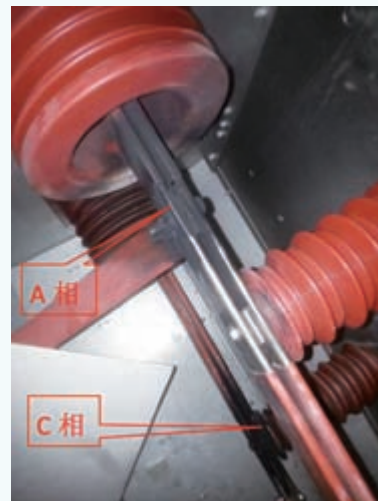


图5 故障后母线室



图6 穿箱套管及屏蔽线



图7 电晕放电



的防范，重点在设计制造和出厂验收环节，必须确保柜内各相间和相对地的距离满足上述要求。在测量和验收的过程中，尤其要注意导体端部和柜体螺丝端部、角铁外沿等薄弱环节之间的距离。

对已经运行的不满足空气绝缘距离的设备，可通过设置辅助绝缘的方式解决。对不满足要求而又不宜设置辅助绝缘的母线室，采取如下处理措施：（1）将各风电场原开关柜内所有母线上使用的35kV绝缘热缩套管更换为瑞侃（BBIT max 36kV）绝缘热缩套管；（2）母排搭接处（含紧固螺栓），拆除原有的35kV绝缘包盒，改用瑞侃热缩胶带（型号HVBT，单层耐压17.5kV），手工缠三层后用喷灯对其加热缩紧；（3）将母线铜排的剪切面打磨成圆角并去除毛边。

## 二、辅助绝缘设置要求

从前文提及的几次典型故障可以看出，辅助绝缘的设置不当也是引发开关柜故障的主要因素。对40.5kV开关柜，DL/T 404-2007中规定：以空气和绝缘板组成的复合绝缘作为绝缘介质的金属封闭开关设备和控制设备，带电体与绝缘板之间的最小空气间隙应不小于60mm。结合故障的经验教训，对运行条件比较恶劣的风电场，尤其灰尘、湿度、盐雾等比较严重的地区，针对辅助绝缘的设置，在缺陷整改的过程中重点明确了以下几项要求：

（一）柜中绝缘板水平支撑架必须与导体包括有绝缘热缩套的导体保持不小于300mm的空气净距，并满足当地海拔要求。

（二）对开关柜母线室和电缆室绝缘隔板的整改要求：将厚度为5mm

的SMC 35kV绝缘隔板更换为8mm；取消水平布置的绝缘隔板；将贯穿ABC三相的水平支撑横梁取消，直接从柜体上制作支架固定绝缘隔板；开关柜母线室内空气绝缘净距不足300mm的，使用8mm厚的SMC绝缘隔板加强绝缘。

（三）原绝缘隔板采用两块拼接形式的，统一改为使用整块绝缘板。

（四）所有的绝缘隔板均加工成圆角，并在切割面上浸渍H级绝缘漆（型号为ET-90N的改性耐热不饱和聚酯树脂），以防吸潮。

35kV开关柜内均不同程度地存在辅助绝缘措施，为防止SMC绝缘板积尘受潮，引起爬电击穿。在采购和验收环节，为防范缺陷的产生，还应明确如下技术要求：

（一）竖立布置的绝缘板与裸导体空气绝缘净距应大于60mm。

（二）绝缘板水平面与裸导体之间要有不小于300mm空气绝缘净距。

（三）固定绝缘板的SMC绝缘横梁，与裸导体之间要有不小于300mm空气绝缘净距。如不能满足300mm要求，需改为其他固定方式，例如在绝缘板上下部做固定支架。

（四）应采用整张绝缘板。如采用两块绝缘板拼接，则与裸导体小于300mm范围内不得有接缝、螺栓孔、水平断面等不利情况。

（五）不应在裸导体下方及两侧小于300mm范围内布置水平或倾斜的绝缘板。

（六）绝缘板厚度应满足机械强度要求，一般不小于5mm。

## 三、其他要求

针对35kV开关柜故障暴露的问题，在其验收和运行环节，还应做好

以下几方面的检查：

（一）关注接地刀闸软铜线的固定限位方式及所用材料的耐用性，其限位方式和材质不因接地刀闸的拉合而受到影响；接地刀闸在断开后，软铜线与带电体应有不小于300mm空气绝缘净距。

（二）手车开关室的上下静触头插口活动挡板应避免使用金属材料，推荐使用满足机械强度要求的SMC绝缘板，其目的主要是避免因金属活动挡板与手车开关触头绝缘臂之间的局部放电引发故障。

（三）绝缘包盒安装要规范，不同相包盒的开口方向应朝向同一侧，不能正对，并且不宜直接朝向螺栓、角铁边角等位置。

（四）避雷器接线固定要牢固，与绝缘挡板的距离不应小于60mm，与其他相也需要保持足够的安全距离。

（五）有条件的风电场宜安装除湿机，改善运行环境。

（六）穿箱套管屏蔽线必须与母排可靠连接。

## 结语

35kV开关柜是风电场的重要设备，为防范故障的发生，在制造和验收环节应重点从空气绝缘距离测量、辅助绝缘设置、活动部件各工作位安全距离是否满足要求等易发生故障的位置进行重点检查。同时，还应根据国家能源局《防止电力生产事故的二十五项重点要求》的相关规定，开展开关柜的局放检测等工作，才能及时发现缺陷，提高运行可靠性。☑

（作者单位：国华能源投资有限公司）

# 风力发电机组空-水-空冷却系统影响因素分析

文 | 王丁会, 李锦辉, 夏静

冷却系统作为风力发电的重要组成部分, 其优劣直接关系到风力发电机组能否长期安全、高效地运行, 同时影响着风电机组单机容量的增加。

风力发电机冷却形式通常包括直接空冷、空-空冷却、空-水冷却、空-水-空冷却及蒸发冷却等形式。对于海上机组, 考虑防腐、绝缘等要求, 不适宜采用直接空冷; 随着机组单机容量的不断增加, 空-空冷却结构占用机舱空间过大, 使用逐渐受限; 空-水冷却水路在大容量机组上布置结构复杂、困难, 存在定子散热易出现温度分布不均等问题, 因而大容量海上机组不宜采用该冷却形式; 空-水-空冷却形式可实现紧凑式布局, 减小机舱占用空间, 同时减小机舱为冷却系统设置的开孔, 确保机舱的相对密封性。本文以空-水-空冷却系统为研究对象, 建立两级冷却系统计算程序, 分析各个影响因素参数对系统散热量及系统阻力的影响情况。

## 风电机组空-水-空冷却系统原理

空-水-空冷却系统由两级空-水板翅散热器构成, 系统原理如图 1 所示, 一级空-水散热器布置于发电机支架结构上 (本文以布置于支架形式为例, 实际工程应用中根据机舱和发电机整体布局进行设计), 发电机内部循环空气为初级冷却介质, 与发电机定子及转子完成热交换后在循环风扇作用下与热端空-水散热器中的冷却液进行热交换, 冷却液为次级冷却介质, 完成热交换后, 初级冷却介质再次回到发电机内, 次级冷却介质在泵组作用下, 进入机舱外 (或机舱尾部) 的冷端空-水散热器中, 与作为最终冷却介质的环境空气进行热交换, 之后在泵组作用下次级冷却介质再次进入机舱内热端空-水散热器中, 由此初级冷

却介质在发电机内形成闭路冷却循环, 次级冷却介质在管路系统中形成闭路冷却循环, 最终冷却介质与机舱外 (机舱尾部) 的空-水散热器内形成开路冷却循环, 因该系统采用两级循环, 所以换热效果受到环境温度、发电机回风温度、散热器入口流速、冷却液流量等因素影响。

## 数学模型推导

板翅换热器关键在于计算散热量及系统阻力, 其直接关系到系统能否满足散热要求及泵、循环风扇的选型, 其

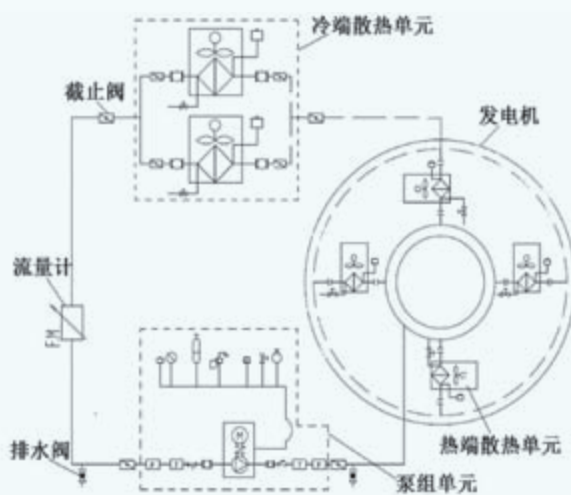


图1 风电机组空-水-空冷却系统图

中传热因子和阻力因子直接影响着换热效果及系统阻力的大小,下文给出了相关因子及参数的计算式:

### 一、散热量计算式

对于散热量的计算,采用经典的牛顿冷却公式为基本计算式:

$$Q = \alpha F_0 \eta_0 (t_1 - t_w) \quad (1)$$

式中:  $Q$ —热流量,  $W$ ;  $\alpha$ —换热系数,  $W / (m^2 \cdot K)$ ;  $F_0$ —传热面积(包括一次、二次传热面积),  $m^2$ ;  $t_1$ —流体温度,  $^{\circ}C$ ;  $t_w$ —壁面温度,  $^{\circ}C$ ;

### 二、流动阻力计算式

板—翅式散热器流通通道阻力主要由进散热器的阻力、散热器芯体的中心阻力、出散热器的阻力等组成,其中中心阻力是流动阻力的主要组成部分,通过该值进行系数修正,其计算式如下:

$$\Delta P = 4f \frac{L}{D_e} \frac{g_f^2}{2\rho_m} \quad (2)$$

式中:  $\Delta P$ —流动阻力,  $Pa$ ;  $f$ —摩擦因子;  $L$ —流道长度,  $m$ ;  $D_e$ —当量直径,  $m$ ;  $g_f$ —单位面积质量流量,  $kg / (m^2 \cdot s)$ ;  $\rho_m$ —密度,  $kg/m^3$ ;

### 三、关键因子及计算式

对于传热因子  $j$  及摩擦因子  $f$  都为雷诺数  $Re$  的函数,有国内学者给出了平直翅片、锯齿翅片、多孔翅片等翅片的传热因子  $j$ 、摩擦因子  $f$  随雷诺数  $Re$  变化的曲线,并根据图中曲线啮合了相关函数,国外学者给出传热因子  $j$ 、摩擦因子  $f$  相关计算关联式,如下式所示:

$$j = \begin{cases} 0.53Re^{-0.5} \left(\frac{1}{D_e}\right)^{-0.15} \left(\frac{s}{H-t}\right)^{-0.14}, Re \leq 1500 \\ 0.21Re^{-0.4} \left(\frac{1}{D_e}\right)^{-0.24} \left(\frac{t}{D_e}\right)^{-0.02}, Re > 1500 \end{cases} \quad (4)$$

$$f = \begin{cases} 8.12Re^{-0.74} \left(\frac{1}{D_e}\right)^{-0.41} \left(\frac{s}{H-t}\right)^{-0.02}, Re \leq 1500 \\ 1.12Re^{-0.36} \left(\frac{1}{D_e}\right)^{-0.65} \left(\frac{t}{D_e}\right)^{-0.17}, Re > 1500 \end{cases}$$

其中可推导得到(5)和(6)式:

$$j = \frac{Nu}{RePr^{\frac{1}{3}}} = StPr^{2/3} \quad (5)$$

$$St = \frac{\alpha}{C_p g_f} \quad (6)$$

式中:  $l$ —翅片长度,  $m$ ;  $s$ —翅片间距,  $m$ ;  $H$ —翅片高度,  $m$ ;  $t$ —翅片厚度,  $m$ ;  $Nu$ —努塞尔数;  $Re$ —雷诺数;  $St$ —斯坦顿数;  $C_p$ —定压比热,  $kJ / (kg \cdot K)$ ;  $De$ —当量直径,  $m$ 。

## 程序计算逻辑流程说明

空—水—空冷却系统采用两级冷却,其中环境空气参与热交换的板—翅换热器称为冷端散热单元,发电机内热空气参与热交换的板—翅式散热器称为热端散热单元。通过编制程序实现冷端散热单元与热端散热单元协同作用下系统散热量与系统阻力的计算,其逻辑如图2所示,其具体计算思路如下所述:

首先,环境温度  $T_{wkr}$  及发电机回风温度  $T_{nkr}$  为初始值,根据板—翅式散热器既定的结构及尺寸,得到散热器当量直径  $D_e$ 、有效散热面积  $A$  及通道截面积  $S$  等,并假设系统散热量为  $Q$  (冷端散热单元为  $Q'_w$  及热端散热单元为  $Q'_n$ ),根据假设散热量及假定散热器出口温度  $T'_{kc}$ ,进行迭代可得假设散热量所对应理论的散热器出口温度  $T_{kc}$ ;

其次,冷端散热单元及热端散热单元分别根据初始条件及假设条件计算得到理论散热量  $Q_w$  及  $Q_n$ ,理论上二者最终计算值相等,且外端散热单元冷却液入口温度值  $T_{wyr}$  与热端散热单元冷却液出口温度值  $T_{nyc}$  相等,以此三项为迭代对象进行计算,直至满足残差要求停止计算;

最后,根据计算收敛结果,计算最终系统阻力  $\Delta P$ ,并输出系统实际散热量。

需要说明的是,所假设的散热量  $Q'$  及输入的空气流速  $V$  在初始计算时,如设置值偏差过大,会使得对数平均温差出现不满足传热理论的情况,因而需要判断其合理性以确定是否需要重新赋值。

## 板—翅式散热器物理尺寸及基准参数

鉴于风电机组往往处于风沙及颗粒物较多的恶劣环境中,为防止柳絮、颗粒物等造成翅片堵塞,引起散热效果恶化等情况,设置板—翅式散热器为平板式结构。为便于分析各因素对散热量及系统阻力造成的影响,本文选用散热器的翅片物理结构尺寸参数如表1所示,通过改变其他影响因素来计算系统散热量及系统阻力的变化情况。

在进行各因素对比过程中需设置基准参数,通过改变其他影响因素来分析其变化对散热量的影响,其基准参数如表2所示,其中所述冷却液为含50%体积容量的乙二醇溶液,程序编制其物理属性随特征温度呈函数关系,不同影响因素参数的取值如表3所示,在分析各影响参数变化时,基准参数不变。



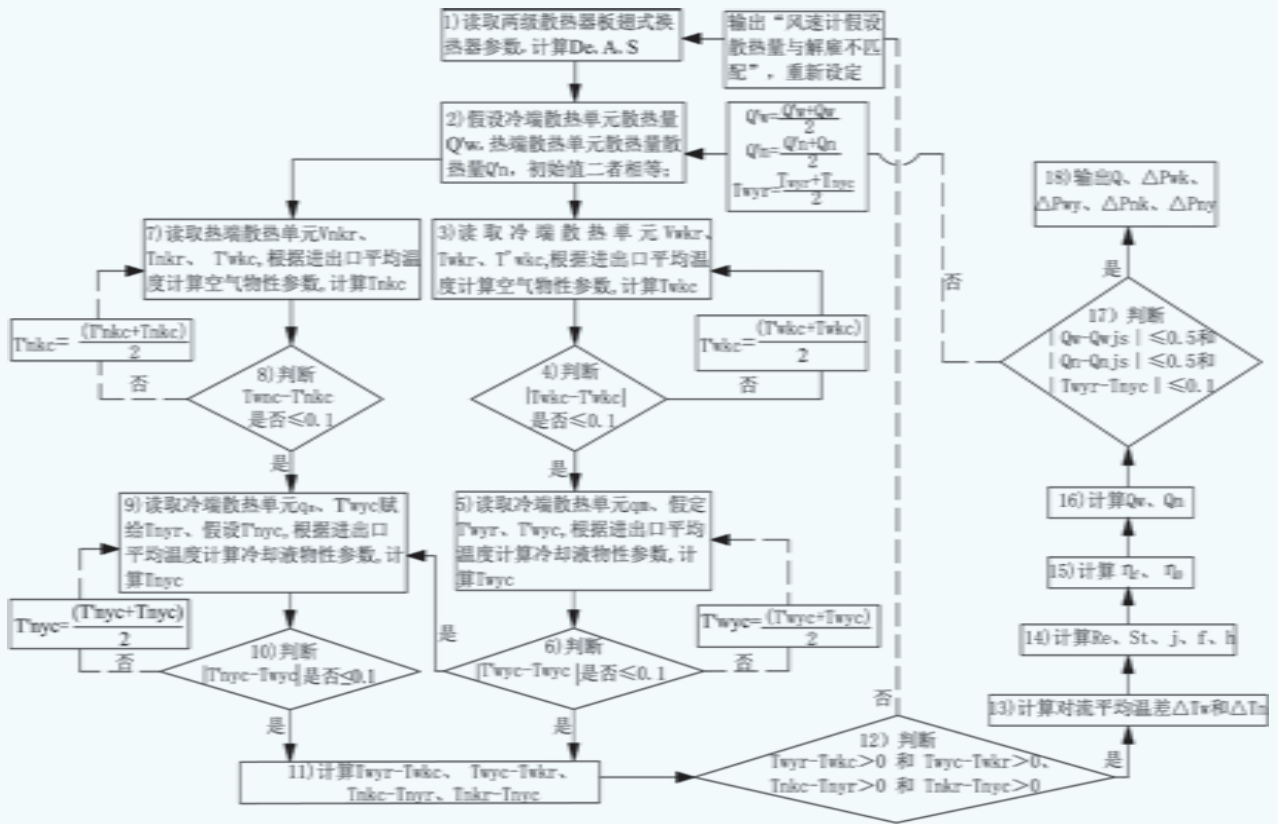


图2 计算逻辑流程图

表1 翅片物理尺寸

名称	翅片高 (mm)	翅片厚 (mm)	翅片间距 (mm)	翅片有效宽度 (mm)	翅片有效长度 (mm)	散热器高 (mm)
冷端散热单元空气侧通道	10.3	0.17	2	2500	140	1000
冷端散热单元冷却液侧通道	2	0.2	2.5	140	2500	140
热端散热单元空气侧通道	10.3	0.17	2	1800	94	1500
热端散热单元冷却液侧通道	2	0.2	2.5	94	1800	1500

表2 基准参数

名称	空气入口温度 (°C)	入口流速 (m/s)	冷却液流量 (L/min)
冷端散热单元	40	5	100
热端散热单元	75	3	100

表3 变工况参数值

序号	T <sub>wkr</sub> (°C)	V <sub>wkr</sub> (m/s)	T <sub>nkr</sub> (°C)	V <sub>nkr</sub> (m/s)	Q <sub>v</sub> (L/min)
1	15	3	65	2	40
2	20	4	70	2.5	60
3	25	5	75	3	80
4	35	6	80	4	100
5	40	7	85	5	150
6	45	8	90	6	200
7	50	9	95	7	300

根据等效热路建立简化传热过程热阻分析图,如图3所示,在传热过程热阻分析图中,空-水-空冷却系统中不考虑散热器导热热阻(因翅片薄,且铝具有良好的导热性能,其热阻数量级相对于两侧流体对流换热热阻数量级小),其主要热阻由冷端散热单元环境空气与散热器翅片的对流换热热阻  $R_1$ 、冷端散热单元换热翅片与冷却液的对流换热热阻  $R_2$ 、热端散热单元发电机回风与散热器翅片的对流换热热阻  $R_3$ 、热端散热单元换热翅片与冷却液的对流换热热阻  $R_4$  构成,其中  $h$  为所对应的对流换热系数,由此易知散热量  $Q = (T_{nkr} - T_{wkr}) / (R_1 + R_2 + R_3 + R_4)$ 。

## 影响因素分析

### 一、环境温度及发电机回风温度影响分析

由图4可知系统散热量与环境温度大致表现为线性关系,随环境温度升高系统散热量下降,可见环境温度对系统散热量影响较为明显。结合图3进行分析,在发电机回风温度  $T_{nkr}$  不变情况下,随环境温度  $T_{wkr}$  的不断提高,热阻两侧温差  $(T_{nkr} - T_{wkr})$  减小,因而散热量出现线性下降趋势,同时由图4知,冷端散热单元入口流速未变,但空气侧阻力随环境温度升高略有下降趋势,其主要原因为随着环境温度升高,空气密度下降及粘度升高,但密度下降趋势明显于粘度升高趋势,导致空气侧阻力出现降低趋势;同理如图5所示,系统散热量随着发电机回风温度升高而近似线性增加,根据上述分析,不难得知,在环境温度不变情况下,随着发电机回风温度升高,热阻两侧温差增加,因而出现系统散热量随回风温度升高出现线性增加情况,同样,随着回风温度的升高,热端散热单元空气侧阻力也出现略微下降趋势,其原因与上述相同。需要注意的是,考虑到绕组温度限制要求及冷却风扇工作温度,应严格控制回风温度过高。

### 二、冷端散热单元空气侧入口流速影响分析

由图6知,随着冷端散热单元环境空气入口流速的增加,系统散热量起初受到较大影响,而随着流速的进一步增加,系统散热量增加幅度不断减小,其主要原因为随着入口流速的增加,空气侧与翅片间对流换热系数  $h_1$  不断提高,导致该侧热阻  $R_1$  下降,当流速增加到一定程度,  $R_1$  对于热路的影响处于非关键控制因素,因而进一步提高入口流速,散热量并未线性提高,但从图6中可知,随着环境入口流速的增加,冷端散热单元空气侧阻力呈快速增加



图3 传热过程热阻分析图

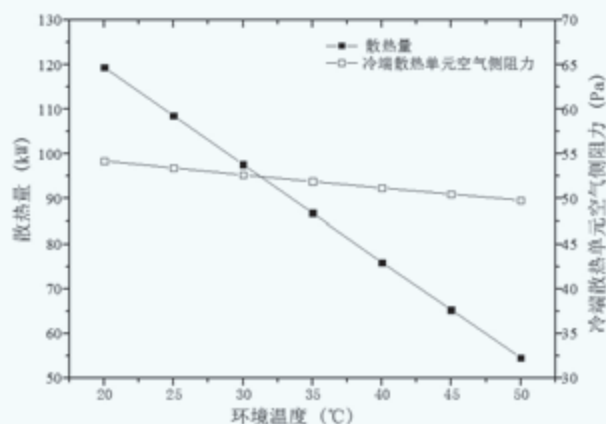


图4 环境温度与系统散热量及冷端散热器空气侧阻力关系图

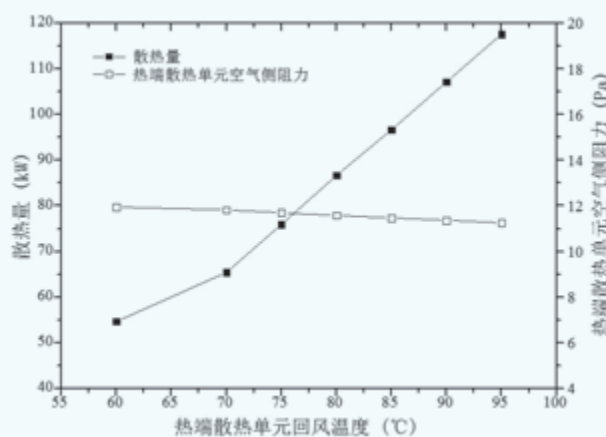


图5 回风温度与系统散热量及热端散热器空气侧阻力关系图

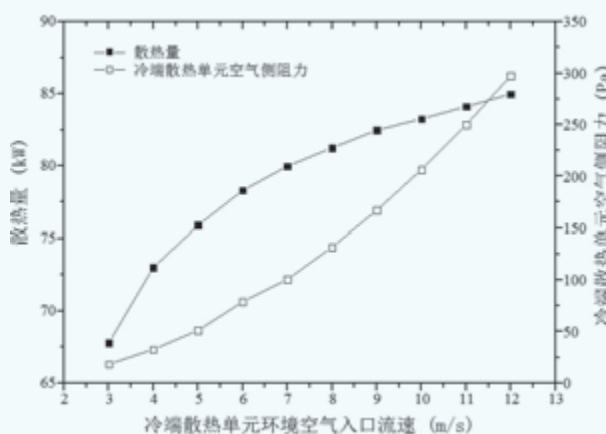


图6 冷端散热单元空气侧入口流速与散热量及空气侧阻力关系图

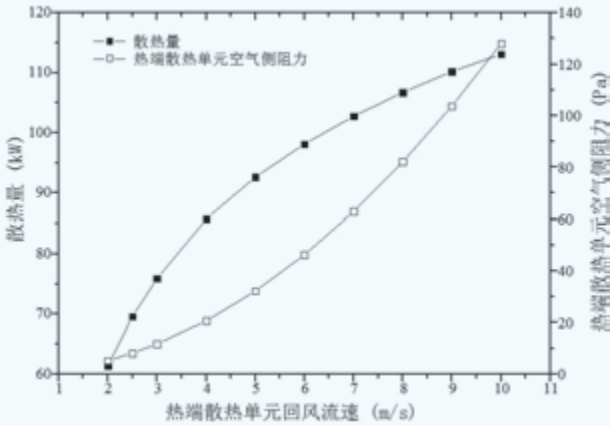


图7 热端散热单元空气侧入口流速与散热量及空气侧阻力关系图

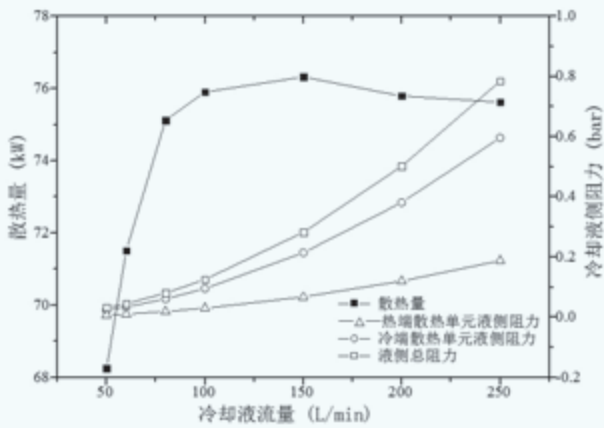


图8 冷却液流量变化对系统散热量及系统阻力影响图

趋势，其主要原因为空气侧翅片结构及尺寸未改变，其阻力系数可近似不变，由式(2)知阻力增加与入口流速成平方关系，因而冷端散热单元空气侧阻力随着入口流速的增加出现快速增加趋势，其对冷却风扇选型及冷却系统能耗影响较大。

### 三、热端散热单元发电机回风流速影响分析

由图7知，随着热端散热单元回风，散热器入口流速增加，其出现与图6相似的变化规律，表明随热端散热单元回风流速增加，热端散热单元风侧对流换热系数 $h_4$ 不断提高，其热阻 $R_4$ 下降，达到一定值后，成为热路非关键控制因素，对系统散热量影响不断减小，而该侧阻力变化规律与图6中所述一致。设计过程中，循环风量的增加可有效增加系统散热量，但散热量与流量增加非线性关系，在考虑风量增加引起散热量增加同时，还应考虑风侧阻力的

快速增加，相应的风量对应过高的压头会超出合适结构风扇的性能范围之外。

### 四、冷却液流量影响因素分析

由图8知，随着冷却液流量的增加，起初系统散热量显著变化，随着冷却液流量增加到一定程度，系统散热量几乎不再变化。同样结合热阻分析图，相对空气与翅片间的对流换热系数，冷却液与翅片间的对流换热系数通常是前者的10—100倍，冷却液流量较低时，对流换热系数 $h_3$ 及 $h_4$ 相对不高，因而 $R_2$ 、 $R_3$ 仍然在整个热阻中占有一定比例，而随着流速增加，冷却液侧对流换热系数增加要显著高于空气侧，因而热阻 $R_2$ 、 $R_3$ 快速降低，显著低于 $R_1$ 及 $R_4$ ，因而其对散热量影响出现图8中所示趋势情况；由图8知，冷却液在冷端散热单元内及热端散热单元内的阻力急剧增加，其主要原因类似于空气侧阻力随流量的变化，散热器翅片结构未变，近似阻力系数恒定，阻力与流量成平方关系，因而出现图中变化趋势，其直接影响着泵组的优化选型。

## 结论

空—水—空冷却系统更加适用于大容量机组的散热，而通过分析其影响因素，可优化散热系统的选型，避免系统选型匹配不合理，造成风扇及泵组的选型过大或过小，造成系统能耗过高或不能满足系统散热要求，通过上述分析可得知：

(1) 环境温度对空—水—空冷却系统散热量影响十分明显，应根据环境温度对风电场所处地域进行等级划分，所设计冷却系统满足当地最高温度工况并保留一定富余量即可，无需选取过高的环境温度作为输入参数进行冷却系统设计，可优化散热器结构选型及布局；

(2) 随冷端散热单元及热端散热单元空气流速的增加，系统散热量逐渐趋缓，而空气侧阻力出现快速攀升，考虑到冷却系统循环风扇选型冷却系统整体功耗及系统噪音，曲线上散热量趋缓拐点处应作为冷却风扇选型参考依据；

(3) 与风量影响趋势相似，随着冷却系统冷却液流量的增加，散热量在某一点处不再随着流量的增加而进一步提高，泵组作为冷却系统重要的动力组件，该拐点为确定系统流量的重要依据，进而可根据流量得出系统阻力，进一步可结合流量及系统阻力进行泵组的选型。

(作者单位：北京金风科创风电设备有限公司)



# 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

# 风电机组机舱变频器更换 专用工具设计\*

文 | 丛智慧, 安利强, 王鹏

机舱内部变频器是风电机组维护的重要内容, 其更换与维修需要专业化设备。风电机组变频器安装在风力发电机组机舱内部, 为减少占有空间, 风电机组机舱内部各设备的排布非常紧凑, 变频器损坏后更换时受到空间与设备重量的限制。由于变频器重量较大, 更换工作需要人员数量较多, 一般需要 4 人左右, 另外由于机舱内部空间狭小, 不利于多人操作, 而且存在人员伤害及设备损坏等安全隐患。目前国内外没有用于风电机组机舱内部变频器更换的专用装置, 急需开发此类专用装置。在机舱内部, 由于机舱空间狭小, 装备主要靠人员携带上下, 因此对机舱内部主要维护设备提出了更高的要求, 要求设备使用方便、可人工操作、重量轻。通过设计专业化的维护设备, 可以提高风力发电机组维护效率。

场合, 拥有比直线轴承更高的额定负载, 同时可以承受一定的弯矩, 可在高负载的情况下实现高精度的直线运动。直线导轨具有自动调心能力, 其自动调心能力来自于圆弧沟槽的 DF 组合, 即工作时有安装面的偏差也能够被线轨滑块内部所吸收, 产生自动调心能力的效果, 从而得到更高精度稳定的平滑运动。直线导轨所有方向都有高刚性, 运用四列式圆弧沟槽, 配合四列钢珠, 钢珠与圆弧沟槽的接触角度为  $45^\circ$ , 使钢珠达到理想的两点接触, 因此导轨可承受来自上下和左右方向的负荷。

### 三、工作平台设计

工作平台的组成为支承钢架, 直线型导轨及滑块; 当

## 结构设计

### 一、总体结构

风电机组变频器更换专用工具最大起升高度 711mm, 载重 200kg, 由工作平台、升降机构、底座组成, 见图 1。工作平台由直线型导轨、滑块、支承钢架组成, 用于进入变频器底部间隙并将其水平移入或移出。升降机构由八根内外交错的剪叉杆、液压装置、结构钢架组成, 用于将工作平台举升和降落至所需高度。底座采用矩形框架结构, 其上部设有带孔钢板和带滑道钢板, 其下部安装具备刹车功能的万向脚轮, 用于保证各个部件稳定工作。

### 二、导轨及滑块设计

根据需要选择直线导轨, 直线导轨用于直线往复运动

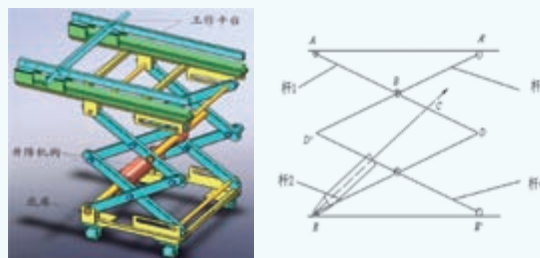


图1 专用工具结构示意图

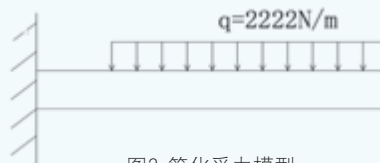


图2 简化受力模型

\* 国家自然科学基金: 风力机风轮结构振动及稳定性的概率分析方法研究 (51675179)

工作时由于滑块提供支反力和弯矩、直线型导轨可简化为悬臂梁模型,重物自重  $W = 200 \times 10 = 2000\text{N}$ , 每根承重管承重  $Q = 1000\text{N}$ , 当变频器压在钢管上时, 可简化为均布载荷  $q = 2222\text{N/m}$ , 简化受力模型如图 2 所示。

根据矩形钢管标准 (GB/T3094-2000), 选择矩形钢管的截面宽  $b = 16\text{mm}$ , 高  $h = 32\text{mm}$ , 壁厚  $s = 2\text{mm}$ , 材料为 Q235A 型。弯曲应力对钢管的影响远大于剪切应力对材料的影响, 故按照弯曲应力对材料进行强度校核, 弯矩图如图 3 所示。

此矩形钢管的抗弯截面系数:

$$W_{z1} = \frac{b_1 h_1^3 - (b_1 - 2s_1)(h_1 - 2s_1)^3}{6h_1} \quad (1)$$

式中,  $b_1$  为工作平台所用钢管矩形截面的短边长度,  $h_1$  为工作平台所用钢管矩形截面的长边长度,  $s_1$  为工作平台所用钢管厚度。

最大弯曲应力:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_{z1}} \quad (2)$$

许用应力:

$$[\sigma] = \frac{\sigma}{n} \quad (3)$$

由式 (1) 及式 (2) 可得  $\sigma_{\max} = 202.41\text{MPa}$ 。其中  $M_{\max}$  为最大弯矩, 由图 3 可知其值为  $275\text{N} \cdot \text{m}$ ;  $\sigma$  为 Q235A 型钢的屈服极限, 其值为  $235\text{MPa}$ ;  $n$  为安全系数, 取 1。  $\sigma_{\max} < [\sigma]$ , 故工作平台所用钢管的设计满足强度要求。

为使两根承重钢管在移动时能共同运动, 在两根承重钢管内侧的外壁焊有同样截面, 同样长度矩形钢管, 为方便操作人员在任意一侧推拉承重钢管, 在两根承重钢管外侧的外壁焊有外径  $17\text{mm}$ , 壁厚  $2.5\text{mm}$  的 20 号钢管作为直推拉手柄 (滚花工艺处理), 其长度为  $100\text{mm}$ 。

#### 四、结构钢架设计

结构钢架主要作用分为两部分, 首先, 其下部与剪叉杆的支座固定并为上滑轮提供可以滑动的空间; 其次, 其上部作为直线导轨的底座, 为导轨提供稳定性。为减轻设备重量, 按照直线导轨的宽度来设计结构钢架, 根据矩形钢管标准 (GB/T3094-2000), 选用 2 根截面边长为  $20\text{mm}$ , 壁厚为  $1\text{mm}$ ,  $700\text{mm}$  长的 Q235A 型方管。结构钢架作以下焊接处理:

(1) 为便于和直线型导轨配合, 在钢管上方焊有长  $700\text{mm}$ , 宽  $60\text{mm}$ , 厚  $5\text{mm}$  的矩形钢板。

(2) 钢管上方焊有一截面尺寸为  $60\text{mm} \times 200\text{mm}$  的  $5\text{mm}$  厚的矩形钢板。

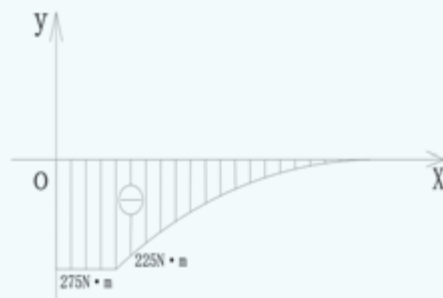


图3 钢管受力弯矩图

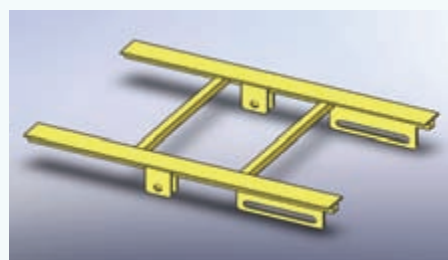


图4 结构钢架

(3) 由于变频器的深度为  $460\text{mm}$ , 下支承结构的宽度为  $400\text{mm}$ , 为保证将变频器移出、放在装置上时不发生偏心, 上述矩形钢板的边缘与钢管的边缘距离为  $30\text{mm}$ 。

(4) 为保证两根上支承钢管可以共同竖直向上运动, 在两根上支承钢管的内侧焊有边长  $20\text{mm}$ , 壁厚  $1\text{mm}$ , 长度  $400\text{mm}$  的正方形截面钢管, 此两根钢管的外侧面分别距  $700\text{mm}$  长的钢管的两个端面  $280\text{mm}$ 。结构钢架如图 4 所示。

#### 五、剪叉杆设计

剪叉杆的数量较多, 是升降系统的主要结构件。内侧剪叉杆是由前后剪叉杆和横轴焊接成的 U 形框架, 外侧剪叉杆是由前后剪叉杆和地轴焊接成的 U 型框架, 剪叉杆的长度根据最大起升高度要求确定, 采用矩形截面的钢管, 截面大小根据受力分析确定。同层内、外剪叉杆在中心转动联接成剪叉, 异层两端分别铰接; 两侧剪叉杆的上、下端分别与上支承结构和下支承结构成转动和滑动联接。液压缸的耳环与地轴成转动联接, 液压柱塞的耳环与横轴也成转动联接。上支承结构上方与直线导轨连接, 滑块与工作平台固定连接。

##### (一) 剪叉杆长度确定

剪叉杆的长度与起升高度有关, 起升高度越高, 剪叉杆的长度越长。当工作平台达到最大高度时, 则每根剪叉



杆的两端轴孔距离：

$$l_1 = \frac{h/2}{\sin\beta} \quad (4)$$

式中， $h$  为起升总高度，711mm； $\beta$  为剪叉杆与水平面的最大夹角，60°。为留出连接轴的安装空间，取剪叉杆的总长  $l = 500\text{mm}$ 。

(二) 剪叉杆强度校核

经分析，当  $\alpha = 30^\circ$  时，剪叉杆 1 受力最大，受力分析及等效图如图 5 所示。

根据以上条件画弯矩图，如图 6 所示。

变频器、滑动机构和承重钢结构的重量总和：

$$W = (m_{\text{滑动机构}} + m_{\text{变频器}} + m_{\text{承重钢管}})g = 2454.8\text{N}$$

液压缸推力  $P$  与  $W$  的关系值公式为：

$$P = \frac{2l\cos\alpha}{a\sin(\theta + \alpha) + l\sin(\theta - \alpha)}W \quad (5)$$

对 D 点做力矩分析：

$$F_{Ax}l\sin\alpha + \frac{W}{4}l\cos\alpha + \frac{W}{2}\frac{l}{2}\cos\alpha = \frac{P}{2}a\sin(\alpha + \theta) \quad (6)$$

A、B、C、D 点所受合力分别为：

$$R_A = F_{Ax}\sin\alpha + \frac{W}{4}\cos\alpha \quad (7)$$

$$R_B = \frac{W}{2}\cos\alpha \quad (8)$$

$$R_C = \frac{P}{2}\sin(\alpha + \theta) \quad (9)$$

$$R_D = R_C - R_A - R_B \quad (10)$$

其中  $l$  为剪叉杆两端轴孔距离，420mm； $\alpha$  为剪叉杆与水平面夹角，30°； $\theta$  为液压柱塞与水平面夹角，45°； $a$  为剪叉杆上横轴孔距最近端轴孔的距离，125mm。

由弯矩图可知，杆 1 的最大弯矩在 C 点。经计算当  $\alpha = 30^\circ$  时， $R_C$  有最大值，即拥有最大弯矩：

$$M_{max} = -\left(\frac{2}{3}R_A + \frac{1}{6}R_B\right)l \quad (11)$$

此时也拥有最大的轴向力，CD 段受到的轴向压力为：

$$T_{CD} = T_A + T_B + T_C \quad (12)$$

剪叉杆均选用矩形截面钢管，根据矩形钢管标准 (GB/T3094-2000)，选择边长为 40mm × 20mm，壁厚为 3mm 的 Q235A 型矩形截面钢管。剪叉杆的横截面积：

$$A_2 = h_2b_2 - (h_2 - 2s_2) \times (b_2 - 2s_2) \quad (13)$$

剪叉杆的抗弯截面系数：

$$W_{z2} = \frac{b_2h_2^3 - (b_2 - 2s_2)(h_2 - 2s_2)^3}{6h_2} \quad (14)$$

其中  $b_2$  为剪叉杆所用钢管截面的短边长度 20mm， $h_2$

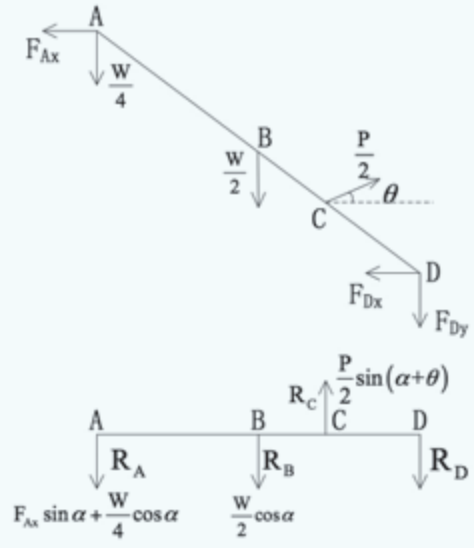


图5 剪叉杆1受力分析及等效图

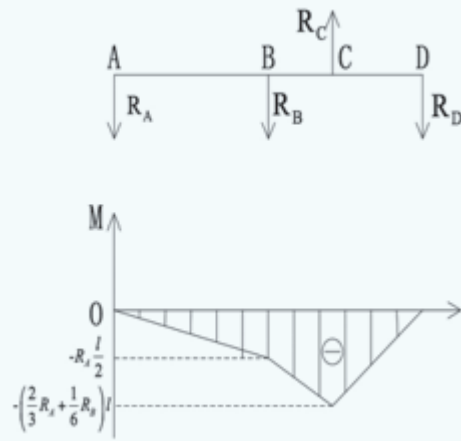


图6 剪叉杆1受力弯矩图

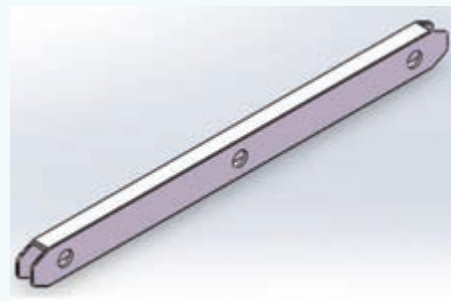


图7 剪叉杆外形图

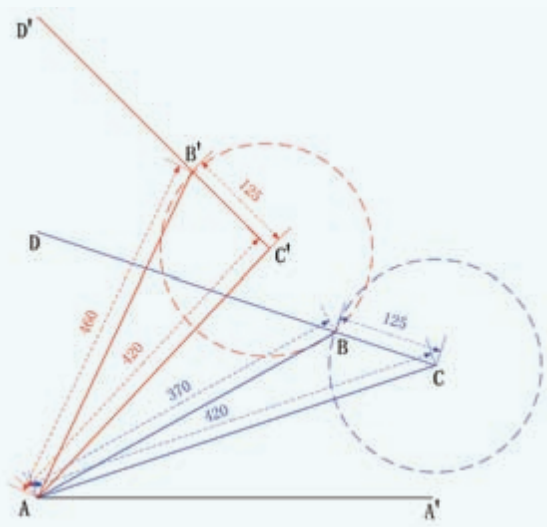


图8 运动分析图

为剪叉杆所用钢管截面长边长度 40mm,  $s_2$  为剪叉杆所用钢管壁厚 3mm。则该状态下的工作应力公式为：

$$\sigma_2 = \frac{M_{max}}{W_{z2}} + \frac{T_{CD}}{A_2} \quad (15)$$

其值为 146.17MPa, 小于 Q235A 型钢的许用应力。故截面为 40mm×20mm, 壁厚为 3mm 的矩形截面钢管满足强度要求。因此剪叉杆选用 8 根 Q235A 型, 截面边长为 40mm×20mm, 壁厚为 3mm 的矩形截面钢管, 每根剪叉杆两端轴孔距离为 420mm, 剪叉杆的总长度为 500mm。其外形如图 7 所示。

## 整体稳定性分析

为保证工作稳定性, 防止侧翻和颠覆, 此专用工具配有两根钢管, 最大伸出长度为 450mm。工作时将其插入下支承结构的 400mm 长的钢管中, 与工作平台平行伸入装有变频器的箱柜中, 使其顶在箱柜内的一表面上, 以使重心始终落在支承范围内, 防止装置发生倾覆。装置升到最高

位置时, 剪叉杆所受轴向载荷最大, 计算表明, 该值小于临界值。所以, 工作时的整机稳定性能满足设计要求。

## 动力系统选择

为使工作平台实现上升、下降运动, 并考虑变频器箱柜前的操作环境, 选用体积小、惯性小、重量轻的液压传动系统作为此装置的动力系统。液压传动系统操纵控制简便, 容易实现过载保护, 并且元件表面自行润滑、磨损小、具有较长的使用寿命。

本设计的液压传动系统主要由液压缸和液压泵组成。液压缸是将液压能转变为机械能的、做直线往复运动(或摆动运动)的液压执行元件。其结构简单、工作可靠, 实现往复运动时, 可免去减速装置, 并且没有传动间隙, 运动平稳, 因此在各种机械的液压系统中得到广泛应用。液压缸输出力与活塞有效面积及其两边的压差成正比; 液压缸主要由缸筒和缸盖、活塞和活塞杆、密封装置、缓冲装置与排气装置组成。

图 8 为工作台在最低处和最高处时的升降机构示意图。AC、AC' 为剪叉杆 2 的两个状态; CD、C'D' 为剪叉杆 1 的两个状态; 圆 C 与 CD、圆 C' 与 C'D' 的交点为剪叉杆 1 上的横轴孔的位置; AB 为液压缸的起始状态, AB' 为液压缸的伸长状态, 则液压缸的行程为  $AB' - AB = 90\text{mm}$ 。

## 结论

本文设计了一种风力发电机组机舱内变频器的更换专用工具, 体积重量适用于风力发电机组机舱中的狭小空间, 且结构简单、运行平稳、性能完善。在风电机组变频器维护时采用此装置可实现单人操作, 节约人力物力, 减少维护时间, 极大提高工作效率, 因而有广阔的应用前景及较好的经济效益。✎

[作者单位: 丛智慧: 大唐(赤峰)新能源有限公司; 安利强, 王鹏: 华北电力大学机械工程系]

# 基于ANSYS Workbench的风电机组 导管架基础过渡段结构优化

文 | 彭恒, 朱荣华, 田振亚, 王晓宇, 崔靓亮, 李凤

随着我国陆上风电的开发日趋饱和, 海上风电场的开发力度已逐步加大, 海上风电场的开发将逐渐由近海走向远海, 水深也日益加大。相比于陆上风电场的开发, 海上风电场开发成本要高出许多, 其中海上风电机组基础的建造占有很大的比重。目前的海上风电机组基础主要形式有高桩承台、三桩及多桩基础、单桩基础、导管架基础等。

对于高桩承台基础, 为一混凝土承台通过多根钢管桩支撑, 其钢管桩数量往往比较多, 需要在海上现场浇筑混凝土承台, 该技术在国内外应用比较成熟, 但由于受海上施工窗口期的影响施工周期往往很长, 欧洲风电场一般不采用。对于单桩基础, 由于直径较大, 对打桩设备要求高, 且相比于导管架的大跨度, 抗倾覆性能没有导管架好。

导管架基础在油气平台上应用广泛, 由于其跨度大、承载性能好、打桩数量少、海上施工周期短, 在欧洲风电场已得到了较为普遍的应用, 本文将应用较为广泛的四桩导管架过渡段为例对导管架过渡段进行结构分析与优化。

## 导管架结构介绍

典型的四桩导管架基础如图1所示, 导管架上部的过渡段向上承受风电机组通过塔筒传递过来的载荷, 向下将载荷传递给下部的钢结构。过渡段起着传递载荷的作用。较为典型的过渡段结构中间为一大直径的钢筒, 通过四根变截面的锥形斜撑与四个导管相连。主要的载荷由中间的大直径钢筒通过四个变截面斜撑传递至导管架四个导管上。由于过渡段是传递载荷的关键部位, 实际中会对过渡段圆筒进行加强, 主要的加强方式为在法兰和圆筒与四个斜撑的连接点之间焊接一环形的加强环。

本文将对导管架过渡段的三种结构方式进行静力学分析, 选取其中结构形式最好的做疲劳分析, 如图2所示。

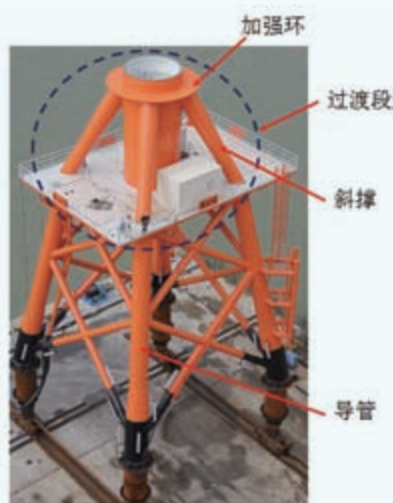


图1 导管架基础

- (1) 导管架过渡段上无加强环;
- (2) 导管架过渡段上有加强环, 但加强环位于斜撑与圆筒连接点之上;
- (3) 导管架过渡段上有加强环, 且加强环位于斜撑与圆筒连接点处, 加强环与圆筒和四个斜撑同时相连。

## 计算方法

### 一、静力学计算

本文主要分析对象为导管架上部的过渡段结构, 因此实际计算中不考虑导管架的风、浪、流载荷。仅考虑极限状态时由风电机组传递过来的载荷, 即将风电机组塔筒下法兰处载荷施加在过渡段圆筒上表面处。根据DNV规范(DNV-OS-J101)选取载荷系数1.35。本文以某风电场5MW风电机组极限载荷为例将其施加在过渡段圆筒上表面。同时为简化计算, 便于比较, 直接将导管架四个导管



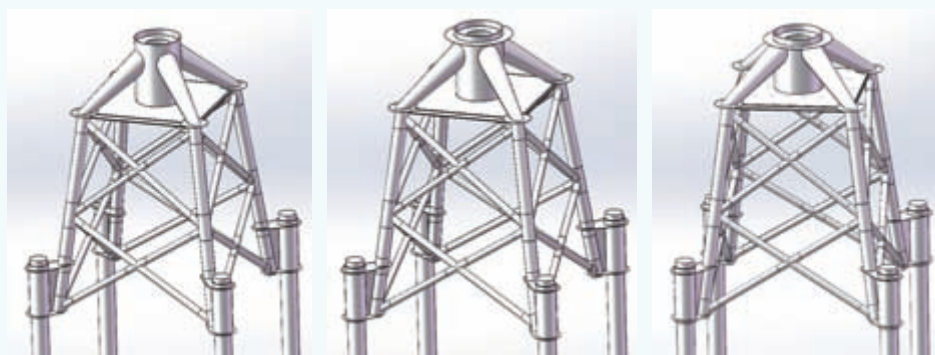
的底端约束，如图3所示。

计算软件采用ANSYS Workbench模块先做整体计算，再将导管架过渡段处局部模型独立出来单独进行网格细化，通过建立子模型的方式进行局部细化计算，子模型计

算时从整体模型提取各个分界面处的位移载荷施加到子模型相应的分割面上，如图4、图5所示。

## 二、疲劳计算

根据DNV规范，采用线性疲劳损伤理论Miner准则：



方案一

方案二

方案三

图2 导管架过渡段结构

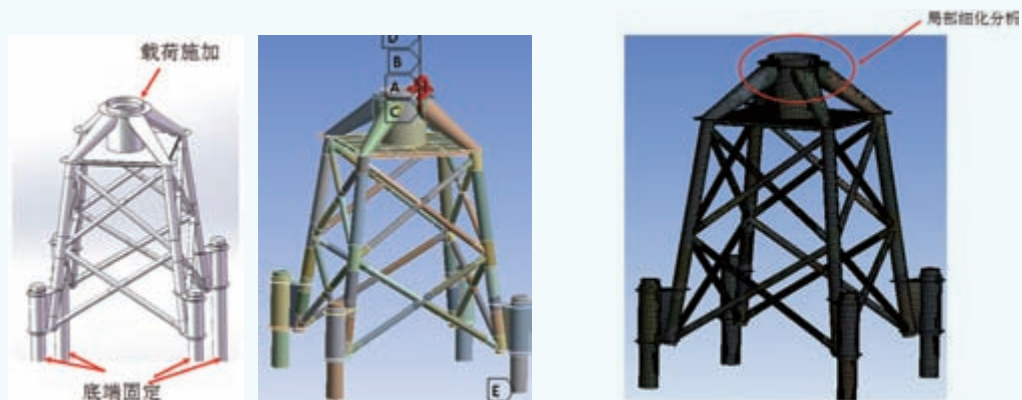
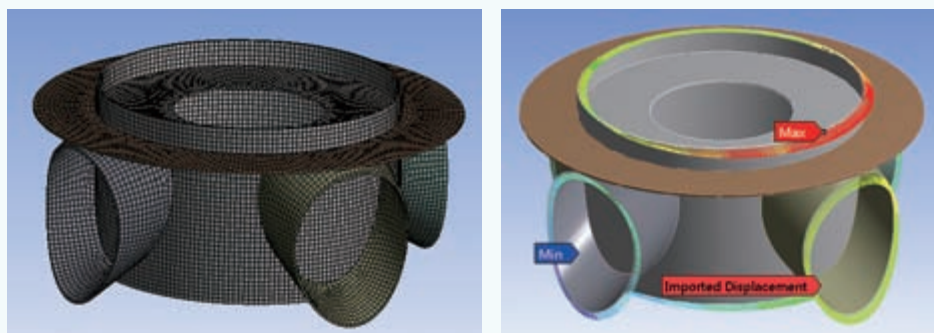


图3 载荷与约束

图4 导管架整体有限元模型



子模型细化网格

子模型施加位移载荷

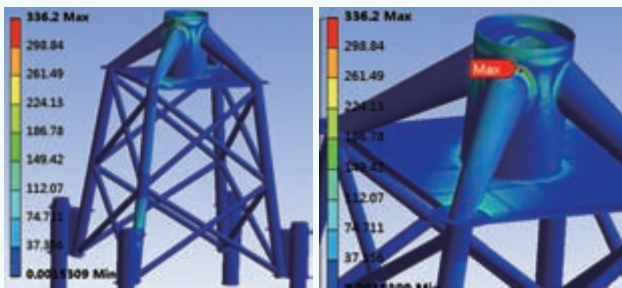
图5 导管架局部网格细化后的子模型

表1  $\log_{10}(k_1)$ 取值

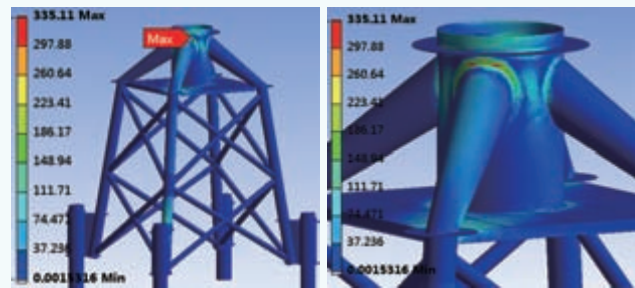
曲线类别	$\log_{10}(k_1)$ S(ksi)	$\log_{10}(k_1)$ S(MPa)	m
焊接节点	9.95	12.48	3 ( $N < 10^7$ )
	11.92	16.13	5 ( $N > 10^7$ )
铸造节点	11.8	15.17	4 ( $N < 10^7$ )
	13.0	17.21	5 ( $N > 10^7$ )

表2 各方案的最大应力

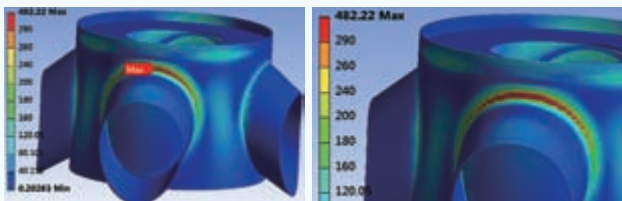
曲线类别	整体计算最大应力 (MPa)	过渡段局部细化最大应力 (MPa)
方案一	336	482
方案二	335	479
方案三	217	237



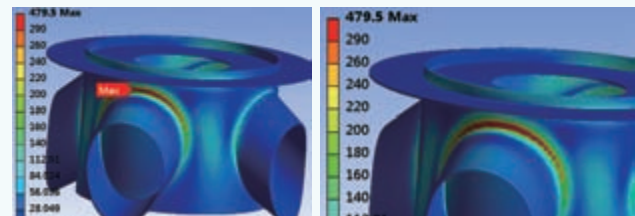
(a) 整体模型应力分布



(a) 整体模型应力分布



(b) 子模型应力分布



(b) 子模型应力分布

图6 方案一过渡段应力分布

图7 方案二过渡段应力分布

$$D_c = \sum_{i=1}^I \frac{n_{c,i}}{N_{c,i}} \quad (1)$$

式中,  $D_c$ : 疲劳损伤特征值;  $I$ : 应力幅的数量;  $n_{c,i}$ : 第*i*个应力幅对应的应力循环次数;  $N_{c,i}$ : 第*i*个应力幅对应的疲劳极限次数。

设计疲劳损伤 $D_D$ 须考虑一定的疲劳安全系数DEF:

$$D_D = DEF \cdot D_c \quad (2)$$

根据DNV规范, 对于处于大气区的导管架过渡段, 取DEF=2.0, 当疲劳损伤 $D_D$ 小于1时, 表面疲劳强度符合要求。

本文将采用等效疲劳载荷的方式进行疲劳校核。根据API RP 2A-WSD规范, 对于连接节点处焊缝的S-N曲线满足如下公式:

$$\log_{10}(N) = \log_{10}k_1 - m \log_{10}S \quad (3)$$

上式中S为应力幅, N为应力幅S对应的最大循环次数,

m为S-N曲线的斜率。 $\log_{10}k_1$ 为一常数, 其值按表1选取。

本文将通过给定的 $10^7$ 次循环所对应的等效疲劳载荷计算出相对应的等效疲劳应力幅, 再根据应力幅和S-N曲线公式得到等效疲劳载荷相应的循环次数, 从而计算出疲劳损伤。

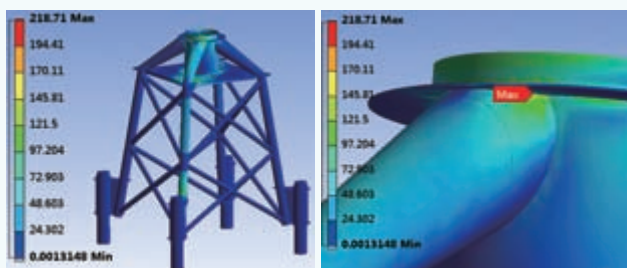
## 计算与分析

### 一、静力学计算结果

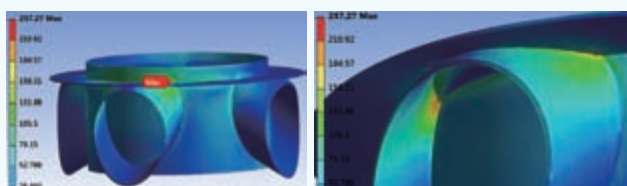
三种过渡段方案的静力学计算结果如表2所示, 其应力分布如图6至图8所示。

根据比较可知:

(一) 在通过子模型进一步细化网格计算后, 三种方案子模型计算的最大应力比整体模型最大应力均有所提



(a) 整体模型应力分布



(b) 子模型应力分布

图8 方案三过渡段应力分布



图9 疲劳载荷下限值对应的过渡段应力分布

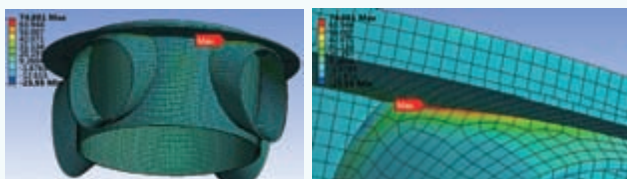


图10 疲劳载荷上限值对应的过渡段应力分布

高。三种方案的主支撑圆筒与斜撑连接处均存在不同程度的应力集中。

(二) 三种方案下, 方案一和方案二应力集中区域比

较大, 且应力值较高, 而方案三应力集中区域较小, 且应力值较低。

(三) 由于应力集中的存在, 方案二虽然有加强环, 但其最大应力减少并不多, 方案三通过将加强环与斜撑相连接极大减少了应力分布。

可见加强环的位置对改善斜撑与主支撑圆筒连接处的应力集中有很大关系, 通过将加强环下移并切掉一部分斜撑, 使得加强环同时与斜撑和主支撑圆筒相连, 大大增加了局部受力面, 使得该节点处载荷的分布更分散, 减小了局部应力集中。

## 二、疲劳计算

将风电机组疲劳载荷上限值和下限值分别施加于导管架顶端, 得出两种工况下的最大应力值, 两种工况下各点的应力差值的最大值即为最大的疲劳应力幅值。实际计算中发现该最大应力幅值出现在应力最大的地方——斜撑与主支撑过渡连接处。如图9、图10所示, 对应于同一点的上下限应力值分别为74.8MPa和46.7MPa, 则其疲劳应力幅值为:  $s=74.8-46.7=28.1\text{MPa}$ 。

由式(3), 取 $m=5$ ,  $\log_{10}k_1=16.13$ , 则计算可得:  $N=10^{8.26}$ 。

该疲劳载荷对应的疲劳损伤为:  $D_c=107/108.26=0.05$ 。

根据DNV-OS-J101规范, 取 $DEF=2.0$ 。由式(2),  $D_D=2 \times 0.05=0.1 < 1$ , 满足要求。

## 结论

本文通过利用ANSYS Workbench中子模型细化计算的功能, 在对导管架基础整体受力分析的基础上提取出过渡段关键部分的结构, 建立子模型, 通过对子模型进一步的细化网格, 优化有限元模型, 得到了较为精确的计算结果, 同时通过三种过渡段结构方案的比较, 证明了加强环的位置对整体加强效果的影响, 其中当采用方案三的结构时其应力分布更合理, 应力集中更小。同时也依据API规范对该方案进行了初步的疲劳校核, 得到了比较好的结果。实际应用中广东珠海桂山项目导管架基础过渡段结构的加强方案即为方案三的形式, 本文恰好也证明了该结构的合理性。☑

(作者单位: 广东明阳风电产业集团有限公司)



# 聚 $\alpha$ -烯烃齿轮油老化趋势及其再生处理研究

文 | 唐金伟, 李焱峰, 刘永洛, 王娟, 常治军, 肖秀媛, 冯丽萍

风力发电机组的主齿轮箱主要采用聚 $\alpha$ 烯烃 (PAO) 全合成齿轮油作为润滑介质。PAO 合成油的化学结构与矿物油最接近, 长链分子结构单一, 其侧链的长度 (C8 - C10) 整齐, 具有良好的黏温特性和低温流动性。主齿箱中 PAO 齿轮油占到风电机组用油量的 3/4, 是风力发电机组的关键润滑点, 其油质的好坏将直接影响到齿轮箱是否能够安全和平稳的运行。风力发电机组多安装在偏远、空旷、多风地区, 齿轮箱的工作环境温差大、沿海湿度大, 加上较大的扭力负荷及负荷的不恒定性, 导致齿轮油在运行中容易劣化变质。目前, 国内外还没有风电机组齿轮油再生处理技术的相关报道, 而国内有大批风电机组已经或将要超出质保期, 风电场面临大量风电机组齿轮油的更换、废旧齿轮油处理以及更换新油所需的巨额费用等问题。因此, 对于运行中齿轮油油质的老化趋势以及油质老化后可否通过再生处理技术延长其使用寿命, 已成为了行业内关注的热点问题。本文主要针对上述问题, 对运行 PAO 齿轮油老化程度与各个指标的变化关系进行了研究, 并对某风电场投运三年后退出运行的 PAO 齿轮油进行再生处理试验。

## 试验方法

### 一、PAO 齿轮油的老化试验

为了研究风电用齿轮油随着老化程度的加深, 油液各个指标的变化趋势, 选用某风电场运行中的 PAO 齿轮油为研究对象, 分别对其进行了 3 天 (72h)、8 天 (192h)、15 天 (360h)、30 天 (720h) 开口杯老化试验 (试验方法: DL 429.6-91), 并对老化前后油的主要相关指标, 依照 GB 5903-2011《工业闭式齿轮油》中要求的试验方法进行了测试。采用 EQUINOX55 红外光谱仪对老化过程中 PAO 齿轮油进行红外光谱分析, 扫描范围为  $500\text{cm}^{-1}$  到  $4000\text{cm}^{-1}$ , 扫描速

率为  $0.1\text{ cm}^{-1}$ 。

### 二、再生试验

PAO 型齿轮油质再生处理试验采用接触法, 即将一定量的微孔硅铝吸附剂加入试油中, 在  $60^\circ\text{C}$  恒温水浴下搅拌 0.5h - 1h, 使吸附剂与试油充分接触以达到最佳吸附效果, 吸附完成后将油与吸附剂的混合物过滤分离, 并对再生后的齿轮油补加一定量的抗氧抗磨复合添加剂, 依照 GB 5903-2011《工业闭式齿轮油》中要求的试验方法进行了测试。

## 结果与讨论

### 一、聚 $\alpha$ -烯烃齿轮油老化趋势

对某风电场运行中 PAO 齿轮油进行了 3 天 (72h)、8 天 (192h)、15 天 (360h)、30 天 (720h) 开口杯老化试验, 并对老化前后油的主要相关指标进行了化验测试, 结果见图 1 和表 1。从图 1 可以看出, 随着老化时间的增加, 油液的颜色由棕黄色迅速加深, 到第 15 天已经变为棕黑色。油液

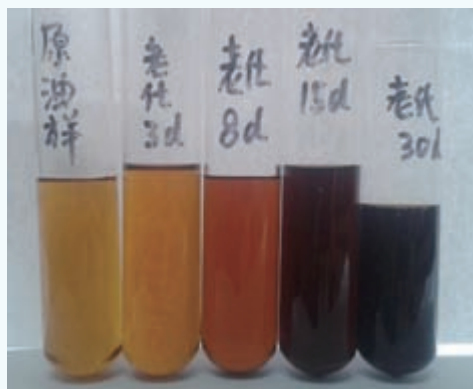


图1 齿轮油开口杯老化前和老化3天、8天、15天、30天后的油样照片

颜色的加深主要是由于齿轮油中的基础油及油中的极压抗磨剂和胺类抗氧化剂，在氧气、高温、铜丝催化剂环境下，氧化生成了显色的大分子老化产物。

从表 1 中可以看出，随着齿轮油老化时间的增加，油液的各项指标中变化最为明显的为颜色、酸值、油泥。由于油液中抗氧化剂的存在，油液的酸值在老化初期增加速度较慢，在老化 192h 后，随着抗氧化剂的消耗，酸值增长速度逐渐加速，同时，在油泥析出试验中，油泥的析出量也在 192h 以后，由原油样的“痕迹”，逐渐表现为有明显析出。这是由于随着开口杯老化试验的持续，油液、氧气、铜丝，在 150℃ 的环境温度下，油液中的添加剂和基础油聚  $\alpha$ - 烯烃，发生氧化反应生成大量极性老化产物，其中包括大量羧酸类物质，宏观上表现为酸值持续增大，同时老化产物之间也发生着复杂的缩合、交联反应，生成了大分子油泥。齿轮油发生劣化后，生成的这些羧酸类分子在有水分存在的情况下，齿轮箱中的金属部件就会发生微点蚀，严重影响金属部件的结构强度，同时这些腐蚀产物也会引起油液颗粒度不合格，部分硬质颗粒会加剧齿面磨损，从而影响齿轮油的润滑性能，若油质长时间得不到净化处理，甚至会发生卡齿、断齿故障，严重影响风电机组的安全平稳运行。该 PAO 齿轮油在经过 30 天的开口杯老化后油液的倾点、黏度指数基本没有发生变化，只有油的运动黏度在缓慢增加，这说明油液具有稳定的低温流动性和黏温特性，随着

老化程度的加深，油中逐渐产生了大分子老化产物，使油液的运动黏度趋于增大。

旋转氧弹是评价油液高温抗氧化性能的一项重要化学指标，其特点是高温、高压、纯氧的快速破坏性试验，当油液中的抗氧化剂大量消耗或者油液本身已严重劣化时，氧弹中的氧气压力会快速降低。图 2 为齿轮油的酸值和旋转氧弹随着老化时间增加的变化趋势。从图 2 中可以看出，齿轮油在老化初期表现出了较好的抗氧化性能，200h 以后油液的酸值呈现出迅速增加，旋转氧弹值呈快速减小的趋势。这是由于在老化初期 PAO 合成齿轮油中的抗氧化剂与油液老化形成的 R· 或 ROO· 基团、过氧化物相互作用，形成了稳定的化合物，中断了氧化的链锁反应，从而大大减缓了油液的老化速度。随着抗氧化剂的消耗，其浓度逐渐降低，油液的抗氧化

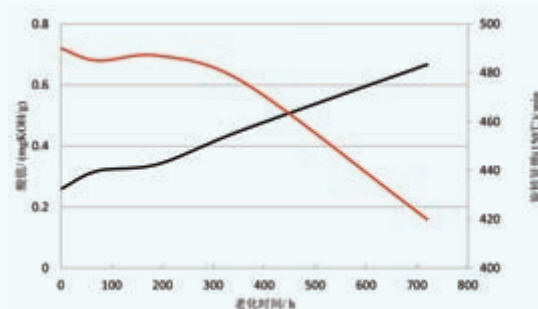


图2 齿轮油酸值和旋转氧弹随着老化时间增加的变化趋势

表1 齿轮油开口杯老化前后主要油质指标分析试验结果

性能	试验结果					试验方法	
	原油样	开口杯老化后					
		3 天	8 天	15 天	30 天		
外观	棕黄、透明	棕黄、透明	棕黄、透明	棕红	棕黑	目测	
酸值, mgKOH/g	0.259	0.318	0.341	0.454	0.667	GB/T 264	
倾点, °C	-31	-32	-33	-33	-32	GB/T 3535	
运动黏度 (40°C), mm <sup>2</sup> /s	325.55	327.14	329.81	334.81	337.65	GB/T 265	
运动黏度 (100°C), mm <sup>2</sup> /s	34.45	34.94	35.06	35.50	35.60	GB/T 265	
黏度指数	124	125	125	122	124	GB/T 1995	
泡沫倾向, ml/ml	程序 I (24°C)	430/20	540/60	610/440	510/0	640/0	GB/T 12579
	程序 II (93.5°C)	210/0	310/0	190/0	50/0	210/0	
	程序 III (后 24°C)	90/0	250/0	430/20	220/0	280/0	
旋转氧弹 (150°C), min	490	-	487	-	420	SH/T 0193	
油泥析出	无	有 - 不明显	有 - 不明显	有 - 明显	有 - 明显	DL 429.7-91	
铜片腐蚀 (100°C /3h), 级	1a	1a	1a	1b	1b	GB/T 5096	
Timken OK 值, N(Lbf)	311.4(65)	-	311.4(65)	-	289.1(60)	GB/T 11144	

性能也随之降低，表现为酸值迅速增大，旋转氧弹值也急剧减小。

为了考察齿轮油老化前后，其分子结构的变化，对齿轮油老化前和老化 8 天、30 天后油液进行的红外光谱检测结果见图 3，可以看出，油液随着老化时间的增加，处于 1740  $\text{cm}^{-1}$  位置的 C=O 伸缩振动峰、1180 $\text{cm}^{-1}$  位置的 C-O 吸收峰和 3414  $\text{cm}^{-1}$  位置的 -OH 伸缩振动峰的强度都在增强，表明开口杯老化过程中逐渐有羧酸类物质生成。这些酸性大分子会与油液中的添加剂相互反应生成显色大分子物质，老化生成的大分子会进一步交联形成油泥，进而增加油液的运动黏度（如表 1 所示），当油泥的浓度超过一定值时，其会在温度较低的金属表面析出，形成肉眼可见的油泥。

通过对某风电场 320# 全合成齿轮油进行老化趋势测试表明，齿轮油的各项指标在老化初期劣化速度缓慢，表现出了良好化学稳定性，然而，在老化 192h 后，油液的酸值、颜色、运动黏度、油泥指标的劣化速度加快。在整个老化试验进行的 30 天内，齿轮油的倾点、黏度指数和 Timken OK 值变化不大，表明了风电齿轮油具有稳定的低温流动性、黏温特性和较好极压抗磨性能。

### 二、运行中聚 $\alpha$ -烯烃齿轮油的再生处理试验

为了考察 PAO 齿轮油老化后是否可通过再生处理技术延

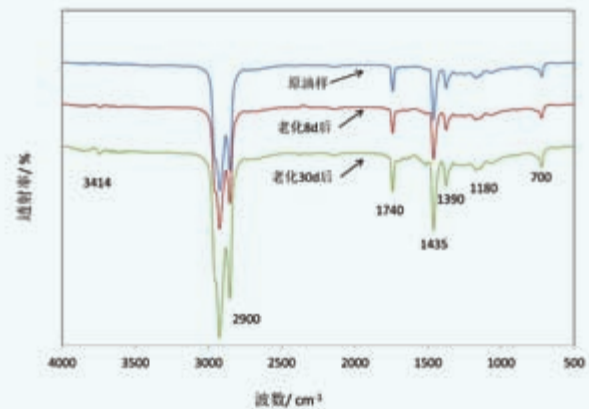


图3 齿轮油开口杯老化前和老化8天、30天后的红外光谱

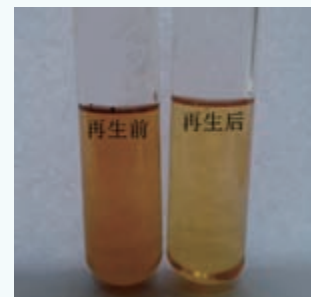


图4 齿轮油8%强极性吸附剂再生处理前后照片

表2 运行PAO齿轮油再生处理前后试验结果

性能		试验结果		质量指标	检验方法
		处理前	处理后		
酸值, mgKOH/g		0.523	0.442	报告	GB/T 264
运动黏度 (40℃), $\text{mm}^2/\text{s}$		298.08	298.88	288 - 352	GB/T 265
运动黏度 (100℃), $\text{mm}^2/\text{s}$		33.29	33.57	报告	GB/T 265
黏度指数		126	126	$\geq 90$	GB/T 1995
水分, mg/L		208	74	报告	GB/T 7600
洁净度 (NAS 1638), 级		8	3	报告	DL/T 432
泡沫倾向, ml/ml	程序 I (24℃)	60/0	10/0	$\leq 50/0$	GB/T 12579
	程序 II (93.5℃)	470/0	30/0	$\leq 50/0$	
	程序 III (后 24℃)	110/0	10/0	$\leq 50/0$	
旋转氧弹 (150℃), min		214	382	报告	SH/T 0193
Timken OK 值, N(Lbf)		244.6(55)	289.1(65)	$>267(60)$	GB/T 11144
油泥析出		有	无	报告	DL 429.7-91
铜片腐蚀 (100℃ /3h), 级		1b	1b	$\leq 1$	GB/T 5096
四球机试验	烧结负荷 ( $P_D$ ), kg	200	315	$\geq 250$	GB/T 3142
	综合磨损指数, kgf	52.0	52.4	$\geq 45$	
	磨斑直径 (196N, 60min, 54℃, 1800 r/min), mm	0.40	0.31	$\leq 0.35$	



长其使用寿命,对某公司在金风 750 型风电机组上投运 3 年后退出运行的美孚 SHC XMP 320 全合成 PAO 齿轮油进行了再生处理试验,处理前后油液的外观和油质化验结果分别见图 4 和表 2。从图 4 可以看出,PAO 齿轮油经过再生处理后,油液的颜色由棕黄变为浅黄,表明再生处理可以去除油液中部分显色的氧化产物。从表 2 可以看出,经过处理后油的酸值、水分和泡沫倾向指标得到大幅降低,说明油液中的大部分酸性老化产物、水分和油中容易起泡的表面活性剂类物质可以被具有强极性的吸附剂吸附去除;洁净度等级、旋转氧弹、Timken OK 值和四球机磨损试验得到了很大的提高,同时油泥也被除去,表明再生处理试验中的过滤环节能有效滤除油液中的颗粒杂质,提高油液的清洁度水平,同时能吸附除去油中的老化产物—油泥,有效地提高油液的抗氧化性能和极压抗磨性能,并对油液的运动黏度和铜片腐蚀没有负面影响,处理后的齿轮油可以满足 GB/T5903-2011《工业闭式齿轮油》中 L-CKD 的质量指标要求。

## 结论

通过对某风电场 PAO 齿轮油进行老化试验,结果表明:齿轮油的各项指标在老化试验初期劣化速度缓慢,表现出了良好化学稳定性,然而,在老化 192h 后,油液的酸值、颜色、运动黏度、油泥指标的劣化速度加快。在为期 30 天的老化试验期间,齿轮油的倾点、黏度指数和 Timken OK 值变化不大,表明风电齿轮油本身具有稳定的低温流动性、良好的黏温特性和极压抗磨性能。对某风电场投运 3 年后退出运行的齿轮油进行再生处理试验,表明风电齿轮油可以通过再生处理使油的酸值、水分、洁净度、泡沫倾向、旋转氧弹、Timken OK 值、油泥和四球机试验指标得到恢复,使其达到 GB 5903-2011《工业闭式齿轮油》中 L-CKD 的技术要求,达到了延长风电齿轮油使用寿命的目的。☑

(作者单位:西安热工研究院有限公司)



摄影:刘富卿



# 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)





# 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)



欢迎莅临科凯前卫展位W2-B11

# 能源

现在就登录浩亭电子目录  
[www.eCatalogue.HARTING.com.cn](http://www.eCatalogue.HARTING.com.cn)



Pushing Performance

滑环耦合器



Han® HPR



M12 PushPull 推拉式连接器



Han-Eco® Outdoor 户外连接器



Ha-VIS eCon 以太网交换机



霍尔效应电流传感器



Han® EMC



## 浩亭给你更多动力

系统间的快速交换对确保发电厂的高度可用性尤其重要，通过浩亭公司齐全的连接器和广泛的应用方案就能达成这一切。浩亭的产品范围从大电流组件至工业以太网交换机，以及用于能源工业的控制和数据传输。

如需更多信息，请致电+86 21 63862200或发送邮件至cn@HARTING.com联系我们。



欢迎关注  
浩亭微信



# 2MW-121/131型 低风速系列化风电叶片

- ◆ 具有自主知识产权的全系列叶片设计
- ◆ 高效的低风速叶片研发平台
- ◆ 保证叶片风能捕获的同时有效控制载荷
- ◆ 高效的叶片三维结构设计方法
- ◆ 严格的原材料控制流程和稳定的产品质量

叶片型号	SW2000-59.5	SW2000-64
叶片设计适用的风区	S	S
额定风速[m/s]	8.8	8.1
C <sub>p</sub>	0.485	0.487
叶片预弯[m]	3	3.5
叶片节圆直径[mm]	2300	2300
螺栓型号	M36×64/92	M36×92

中科宇能科技发展有限公司

地址：北京经济技术开发区地盛北街1号北工大软件园

电话Tel：+86-10 80706780

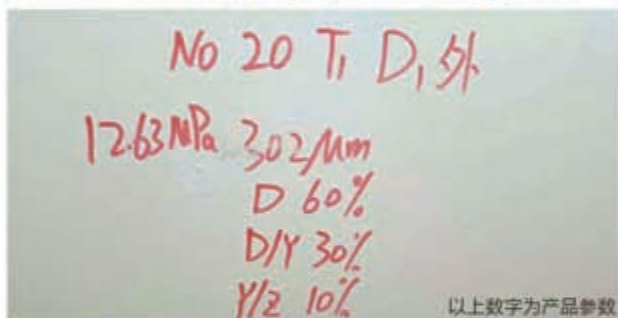
网址Web：www.sino-wind.com.cn





# 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。

上海敏泰液压股份有限公司自2006年进入风电市场, 已经为风力发电机组提供了近3万套产品, 积累了丰富的设计、生产和售后服务经验。秉承“一流产品源于一流的技术”的企业宗旨, 打造了一支专业化、标准化、规范化快速响应的风场服务技术团队, 为客户提供优质、系统化的运行维护服务。

为您提供风力发电流体系统解决方案



GRS系列风场齿轮箱换油装置



液压站



水冷却系统



齿轮箱润滑系统



换热器



旁路精过滤装置



可替换进口、  
国产滤芯备件



压力开关  
传感器



油液污染  
颗粒检测仪

## 风电场售后服务

风电机组润滑、水冷却系统、液压系统检修、保养、维护  
可提供风场配套系统附件、维护及替换等其他客户相关服务

24小时热线电话: **400-720-1580**

地址: 上海浦东新区空港川沙工业园川大路699号 邮编: 201299 电话: +(86)21-68393909  
传真: +(86)21-68393955 网址: [www.mintaigroup.com](http://www.mintaigroup.com) Email: [sales@mintaigroup.com](mailto:sales@mintaigroup.com)

※上海市高新技术企业 ※ISO9001质量体系认证 ※ISO14001环境体系认证 ※GB/T28001职业健康安全体系认证