

风能

WIND ENERGY

传播专业知识 启迪成长智慧

主办单位：中国电子信息产业发展研究院
赛迪工业和信息化研究院（集团）有限公司
《中国核心期刊（遴选）数据库》收录期刊 中国知网收录期刊

ISSN 1674-9219
CN 11-5942/TK

09



2023年第09期 总第163期 赛迪出版社

P08 专栏

德国之外的得州（Texas）——为何它的风电发展更惊艳？

P34 市场

整机企业积极布局国际市场，呈现几大发展趋势

明阳智能的 “深蓝”征途 P26

深远海，是风能人的“星辰大海”。在挺进“深蓝”的征途中，明阳智能勇立潮头，善事利器，驭揽长风，耕海牧渔……将风电开发的脚步延至更深更久的未来。





打造风光氢储全业态
建设绿色北疆新生态



专业提供风力发电 流体系统解决方案



齿轮箱润滑冷却独立油站



离线精过滤装置



齿轮箱润滑冷却系统



上海敏泰液压股份有限公司

地址：上海市浦东新区空港川沙工业园川大路699号(201299)

电话：+(86) 21-68393909 邮箱：sales@mintaigroup.com

传真：+(86) 21-68393955 网址：www.mintaigroup.com

源自高铁 值得信赖

中车株洲电力机车研究所有限公司(简称中车株洲所)为中国中车一级子公司,是一家以轨道交通为核心业务的技术先导型企业集团。2006年进入风电整机装备领域,致力于全球风能资源的高效开发与利用。中车株洲所将源自高铁的十大核心技术,再创新应用于风电产业,着力打造风电整机、智能运维、综合能源服务三大产品线,持续培育和发展技术创新能力,快速响应智能化运维、综合能源服务、分布式电源建设等增量业务市场,矢志成为国际化的清洁能源、智能化运维整体解决方案提供商和综合能源服务商。



中车株洲所

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

 中国中车
CRRC

绿色动力 驱动未来

东方电气风电股份有限公司是东方电气所属风电产业一体化专业子公司，具备直驱、双馈、半直驱三种主流技术路线风力发电机组及其配套叶片、发电机、电控系统等核心部件研发制造能力，产品涵盖1.5MW—8MW系列陆上和5.0MW—18MW系列海上风力发电机组。

东方风电坚持以技术创新推动产品升级和产业发展，致力于为用户提供整体解决方案和科学化、定制化运维服务方案。在行业内优先推出6.25MW系列陆上、10MW、13MW等级海上风力发电机组，以及具有自主知识产权的为机组全维度赋能的iPACOM风电智慧系统。产品已批量出口芬兰、瑞典、埃塞俄比亚、古巴、俄罗斯、越南、厄瓜多尔等多个国家。

东方风电将持续探索，致力于为用户提供性能优良、智能化水平高的风力发电机组，为人类提供更加清洁高效的能源。



Telephone

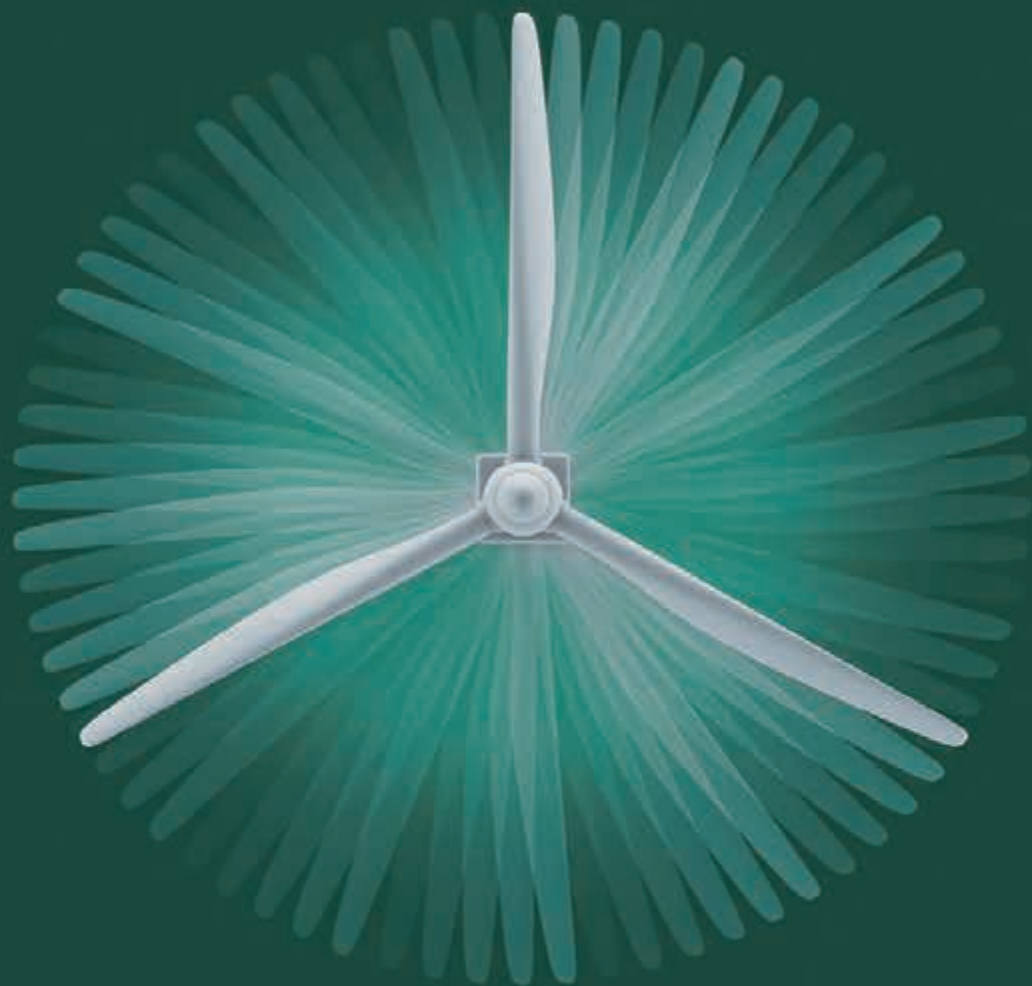
电话(Tel): 0838-2689599
传真(Fax): 0838-2821700



address

四川省德阳市华山路
二段2号

Add: No. 2, 2nd Section of Southern Huashan Road, Deyang, Sichuan Province, P. R. China
Postcode: 618000



麦加芯彩让生活更环保

MEGA P&C Makes Our Life Greener and Better

麦加芯彩

新材料科技(上海)股份有限公司

MEGA P&C Advanced Materials (Shanghai) Co., Ltd.

如需了解更多我们的解决方案, 请联系: 电话: +86 21 59100888 邮箱: zhanghuayong@megacoatings.com 网址: www.megacoatings.com



Nidec
All for dreams

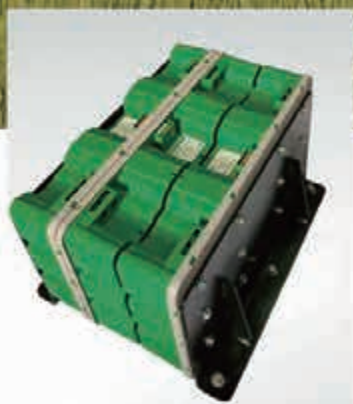
SSB Wind Systems[®]
Be consistent.

SSB变桨系统 经验祝您成功

拥有近30年风电领域的经验，在全球范围内超过50000台风机使用变桨系统，其中在中国累计超过20000台风机上安装使用。



集成式变桨驱动器EPD



SSB超级电容模组



手持高压电容器测试仪BPMM-2H



叶片状态及全场测量系统
Blade Vision

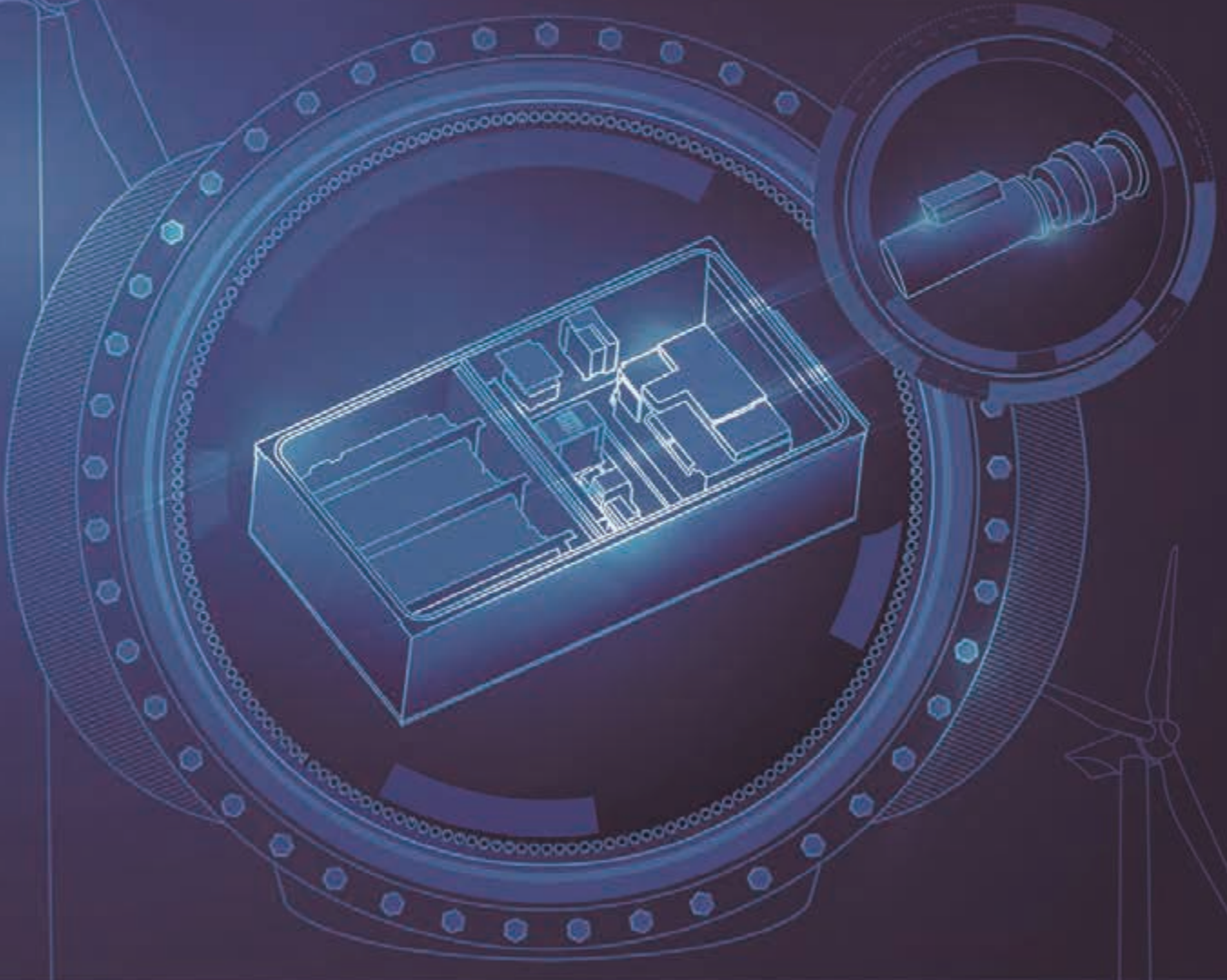
埃斯倍风电科技（青岛）有限公司 www.ssbwindsystems.cn

山东省青岛市即墨区株洲路91号 266101 TEL: +86 532 88702788

数据来源：埃斯倍风电

智慧能源 慧未来

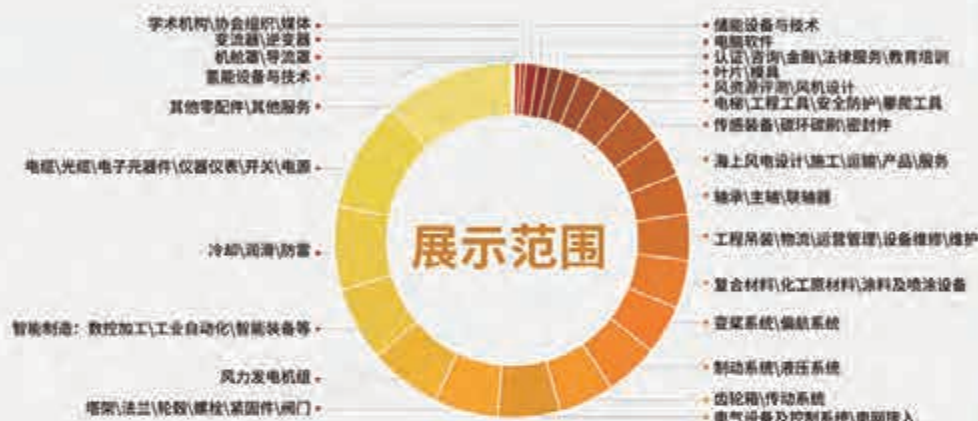
信控互联能源新世界



2023北京国际风能大会暨展览会

CHINA WIND POWER 2023

10月16日 大会开幕式 北京·诺金酒店
 10月17-19日 大会及展览会 北京·中国国际展览中心(顺义馆)



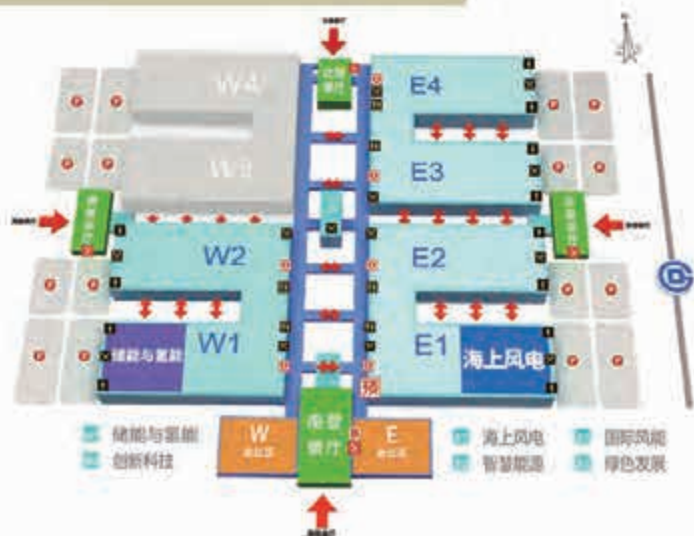
1000+ 参展企业
 13 家整机企业
 3 个国际展团
 100000 专业观众
 80000 平米展览面积
 实现风能产业链全覆盖



扫描二维码
进行观众注册

你不可错过的风能展

You can't afford to miss CWP



六大特色主题展示

智慧能源 海上风电 储能与氢能
 国际风能 绿色发展 创新科技

构筑全球稳定供应链

共建能源转型新未来



CWP2023

向全体风电同仁发出诚意邀请

10月16日 大会开幕式
北京·诺金酒店

10月17-19日 大会及展览会
北京·中国国际展览中心(顺义馆)

咨询电话：010-88558161

了解更多精彩信息



大会官微
CWPBEIJING



CWP小程序
信息一站式服务平台

多场 高峰论坛

涉及风电技术发展前景、产业布局及供应链安全、全球风电发展等议题

百场 专业分论坛

聚焦市场热点、重点领域、关键技术

CWP

中国风电晴雨表

创新
剧场

近 30 场新品发布

20 余家企业认证

多项 技术白皮书发布

品牌企业加油站、创新成果孵化器

100+ 专业媒体宣传报道

引爆行业热搜

引发社会关注

着眼风能发展
放眼零碳未来

CSSC
HAI ZHUANG
WINDPOWER

CSSC 中船海装

海陆并举 向海图强

INTEGRATED PLANNING AND
DEVELOPMENT
ONSHORE AND OFFSHORE



中船海装风电有限公司
CSSC HAIZHUANG WINDPOWER CO.,LTD.



中国国际展览中心（顺义馆）

E1-A03

加快开发海上风电， 打造沿海地区高质量发展引擎

文 | 秦海岩

当下，全球正掀起海上风电开发热潮。我国更是领跑者，装机规模和整体技术实力均居世界前列，海上风电为我国落实双碳目标、保障能源安全、转变经济发展方式提供了重要支撑。

海上风电是我国沿海地区提升发展质量的主要抓手。我国沿海地区经济发达，总能耗高，减排压力大。开发海上风电，实现“电从身边来”，可以确保能源供应安全，推动社会经济绿色、可持续发展。此外，海上风电产业链长，通过产业配套及组合，能够形成万亿级产业集群，成为地方经济新增长极。海上风电与海洋牧场、海水制氢等的融合发展，则有助于实施海洋强国战略、海洋强省战略。

我国海上风电已具备提速发展的条件。我国海上风能资源丰富，近海和深远海150米高度、离岸200公里以内且水深小于100米的海上风能资源技术可开发量为27.8亿千瓦。目前，我国已经建立起一条涵盖项目开发建设、设备制造、技术研发、检测认证、配套服务的海上风电产业链。我国已推出的海上风电机组最大单机容量达到18兆瓦，最长叶片接近130米。我国还是全球最大的风电装备制造基地，生产的风电机组占到全球市场的三分之二以上，发电机、轮毂、机架等铸锻件及叶片、齿轮箱、轴承等关键零部件的产量占到全球市场的70%以上。同时，随着更先进安装和运维船舶的陆续投运，我国海上风电施工安装、运维环节不断得到补强。更为关键的是，我国海上风电的市场竞争力大幅提高，其度电成本已降至0.33元/千瓦时左右，有望在“十四五”末走向全面平价。此外，“三峡引领号”、中国海装“扶摇号”、中海油“海油观澜号”漂浮式机组的安装运行，表明我国海上风电正加快走向“深蓝”，为产业发展打开了更广阔空间。

本期“封面故事”以明阳智能为样本，讲述其在漂浮式海上风电机组及海洋资源融合发展方面的探索。自成立以来，明阳智能始终将海上风电作为自身业务发展的一大支点，并在近些年加紧开拓深远海业务，从参与研发“三峡引领号”“海油观澜号”漂浮式海上风电平台，到自主研发设计全球首台风渔一体化智能装备“明渔一号”，为推动我国深远海风电开发和海洋多产业融合发展作出了积极贡献。

接下来，为更好地推动我国海上风电发展，建议国家和各沿海省份加强统筹规划，集中连片开发，单体规模100万千瓦以上；统一规划、集中建设送出线路，优化登陆点，降低输电成本；简化核准手续及管理流程，统筹协调相关部门参与联动机制，协作进行整体规划，支持已核准项目有序建设；尽快出台深远海海上风电开发建设管理的相关政策。

业界则必须在创新上下功夫。一方面，应加快开发模式与商业模式创新，推动海上风电项目开发与海洋牧场、海水制氢、观光旅游等相结合，实现“海上粮仓+蓝色能源”立体开发；另一方面，应针对关键与共性技术进行攻关，包括风电机组大型化、定制化、智能化开发，大功率齿轮箱和百米级叶片等核心部件技术的持续突破，以漂浮式为代表的海上风电前沿技术研发，高性能替代材料的研发与应用，海上工程装备的专业化研发。

风从海上来，弄潮正当时。大力开发海上风能资源，加快能源结构调整，是我国沿海地区实现高质量发展的必由之路。各方仍需着力提高海上风电经济性，增强产业链韧性，为更大规模开发夯实基础。📌

26 封面故事 Cover Story

明阳智能的“深蓝”征途

深远海，是风能人的“星辰大海”。在挺进“深蓝”的征途中，明阳智能勇立潮头，善事利器，驭揽长风，耕海牧渔……将风电开发的脚步延至更深更久的未来。



08 专栏 Column

德国之外的得州 (Texas) ——为何它的风电发展 更惊艳?

本期专栏文章将聚焦得州，谈谈其风电发展迅速的原因及启示，这涉及当下与风电发展如何进一步提速相关的政策、市场与社会环境问题。

22 对话 Dialogue

风能资源测量与评估 需更精细化

北京瑞科同创能源科技有限公司总经理宋军认为，测风技术在风能资源评估、风电场选址、机组选型与安装、运维管理等风电场全生命周期发挥着至关重要的作用。

42 国际 International

2022年全球陆上风电 度电成本降至0.242 元/千瓦时

具有成本竞争力的可再生能源在解决能源和气候危机方面发挥着关键作用，是各国限制化石燃料造成宏观经济损害的重要支柱。

DRIVING OUR RENEWABLE FUTURE

可 持 续 更 美 好




Goldwind


Goldwind



www.goldwind.com



《风能》杂志在线阅读网站
www.cwea.org.cn

卷首语/ From The Editor

加快开发海上风电，打造沿海地区高质量发展引擎 秦海岩 / 01

专栏/ Column

德国之外的得州（Texas）——为何它的风电发展更惊艳？ 张树伟 / 08-11

乘风/ Windward

十年御风，远景八桂结秋实 王芳 / 12-16

现场/ Presence

龙源蒙东公司代钦塔拉二班组：用心铸造“金牌班组” 任宇，云皓 / 18-19

人物/ Figure

见证中国风电走向世界 叶无极 / 20-21

对话/ Dialogue

风能资源测量与评估需更精细化 22-24

封面故事/ Cover Story

明阳智能的“深蓝”征途 王芳 / 26-33

市场/ Market

整机企业积极布局国际市场，呈现几大发展趋势 赵靓 / 34-36

调研/ Survey

2024年全球可再生能源发电量或将超过煤电 夏云峰 / 38-40

国际/ International

2022年全球陆上风电度电成本降至0.242元/千瓦时 叶无极 / 42-46

产业/ Industry

风电整机“三次物流”精益管理实践 杨兆忠 / 50-54

技术/ Technology

基于湍流度的风电机组动态柔性控制技术 牛成，倪维东，刘建爽，王云涛，张志强 / 56-65

风电叶片摆振疲劳应力集中现象及控制方法研究 史博文，杨海江，李军向，顾育慧，曹建喜，吕路勇 / 66-70

基于三维仿真的大型风电叶片后缘合模泡沫设计及应用 崔志刚，肖韦，尹鹏，刘英杰，王运河，杜雷 / 72-75

台风“马鞍”登陆前引发的台前爬线大风天气分析 张璐，顾晨，王浩，王彩玉，李肖雅 / 76-81

风电机组机舱自由流风速推算方法研究 李建科，王东霞，张黎，张朴，彭浩，刘佳，苟飞 / 82-89

广告目次

广告主	广告内容	页码
明阳智能	形象	封面拉页
敏泰液压	产品	封二
中国中车	形象	扉页 1
东方电气	形象	扉页 2
麦加芯彩	形象	扉页 3
埃斯倍	产品	扉页 4
国能信控	形象	扉页 5
CWP	形象	扉页 6-7
中船海装	形象	卷首语对页
金风科技	形象	目录对页 1
运达股份	形象	目录对页 2
《风能》	产品	版权对页
电气风电	产品	P17
鉴衡认证	服务	P25
《风能》	公益	P37
CWP	产品	P41
哈电风能	形象	P47
南高齿	产品	P55
中科宇能	形象	P71
恩斯克	产品	后彩一
重齿	产品	封三
中际联合	产品	封底



50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

深耕中国风电资源，始终坚持创新驱动



浙江运达风电股份有限公司
地址：浙江省杭州市文二路391号
西溪国际科技大厦A座23F
电话：0571-87397666
网址：www.chinawindey.com





2023年第09期

	顾问	Consultant					
石定寰	史立山	杜祥琬	黄其励	Shi Dinghuan	Shi Lishan	Du Xiangwan	Huang Qili
徐建中	倪维斗	胡文瑞	杨裕生	Xu Jianzhong	Ni Weidou	Hu Wenrui	Yang Yusheng
李宝山	韩文科	朱俊生	贺德馨	Li Baoshan	Han Wenke	Zhu Junsheng	He Dexin
王承煦	朱瑞兆	戴慧珠	马学禄	Wang Chengxu	Zhu Ruizhao	Dai Huizhu	Ma Xuelu
王斯永	吴运东	齐同庆	于午铭	Wang Siyong	Wu Yundong	Qi Tongqing	Yu Wuming
		宫靖远	Gong Jingyuan				
	社长：沈怡然	President: Shen Yiran					
	总编辑：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					
	采编总监：赵靛	Interviewing and Editing Director: Zhao Liang					
	主笔：王芳	Editorial Writer: Wang Fang					
	编辑：时春景 叶无极	Editor: Shi Chunjing Ye Wuji					
	本期责编：夏云峰	Duty Editor: Xia Yunfeng					
	视觉设计：荆莹 赵宇婷	Visual design: Jing Ying Zhao Yuting					
	广告部经理：锁洁	Advertising Manager: Suo Jie					
	发行部经理：锁洁	Distribution Manager: Suo Jie					

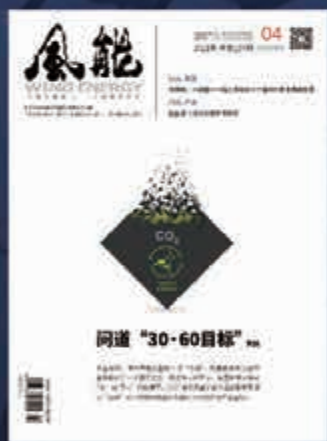
编辑制作：《风能》杂志社	Produced by: Wind Energy Magazine
地址：北京市东城区和平里北街6号 远东文化园26楼3层	Address: 3 Floors, Building 26, Far East Cultural Park No. 6 Hepingli North Street Dongcheng District, Beijing, PRC
邮编：100013	Zip Code: 100013
电话：010-59796665-3615（编辑部）	Tel: 010-59796665-3615（Editorial）
010-59796665-3501（广告部）	010-59796665-3501（Advertising）
010-59796665-3501（发行部）	010-59796665-3501（Distribution）
传真：010-64228215	Fax: 010-64228215
投稿邮箱：gaojian@cwea.org.cn	E-mail: gaojian@cwea.org.cn

创刊年份：	2010年
汉语拼音：	Feng Neng
发行单位：	北京赛迪出版传媒有限公司
国内统一连续出版物号：	CN 11-5942/TK
国际标准连续出版物号：	ISSN 1674-9219
广告发布登记：	京海工商广登字20170178号
印刷：	北京久佳印刷有限责任公司
出版日期：	2023年9月30日
发行范围：	全国发行
定价：	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。

多年过去,有些人有些事留在这个时代



扫一扫, 轻松阅读杂志精华文章

地址: 北京市东城区和平里北街6号远东文化园26楼3层

电话: 010-59796665-3953(编辑部) 010-64405232-3501(广告部)

传真: 010-64228215 邮编: 100013 投稿邮箱: gaojian@cwea.org.cn



德国之外的得州 (Texas) ——为何它的风电发展更惊艳?

文 | 本刊特约评论员 张树伟



张树伟
卓尔德环境研究
(北京) 中心主任
兼德国能源转型
智库高级顾问

德国以风光为代表的可再生能源发展迅速，这是一个为人所熟知的事实印象。不过这个事实，在 2017 年后由于政府政策强度、项目选址、定价机制、商业周期等多方面的因素与约束，其实已经不再那么准确了。有机构的统计¹显示，2014—2017 年，德国风电年新增装机容量维持在 500 万~600 万千瓦，但 2018—2021 年的年均新增装机容量不足 200 万千瓦。与之形成鲜明对比的是，其他欧洲国家的风电新增装机容量扩张实现提速。

大西洋彼岸，有另一个得州——美国得克萨斯州 (Texas)。大部分读者听说它，可能是因为 2021 年年初该州发生过一场持续 5 天的停电事故。

其实，这个州可以被称为“奇葩”的事情还有很多，比如：

得州传统上是西部狂野保守牛仔的形象，信奉美国传统价值与个人自由，即使这种自由可能是反社会的。它是美国共和党的铁杆“庄稼地”。

得州传统上是美国气候变化“怀疑论者”(deniers)的云集之地。相关的议员与政府官员常有惊人言论，如 2021 年年初停电期间到墨西哥度假胜地躲避低温的议员泰德·克鲁兹 (Ted Cruz)²。

得州各项事务保持着相比其他各州更高层次的独立性。假如美国哪天崩溃了，第一个宣布独立的很有可能是这个州。

得州的能源部门不受美国联邦政府监管。得州的电网几乎是一个独立电网，与墨西哥的有限联系远比与美国的其它州要多。

得州的电力市场是美国唯一一个没有各类容量补偿机制的竞争性市场。

然而，恰恰是这个州，在过去 10 年间实现了风电的快速增长。到 2022 年，得州风电累计装机容量突破 3700 万千瓦，风电发电量在总发电量中的占比超过 25%，到今年年末预计会升至 29%³。

在本期专栏文章中，我们聚焦得州，谈谈其风电发展如此迅速的原因及其启示。这涉及在风电完全实现商

1: <https://energyandcleanair.org/publication/winds-not-harnessed-how-a-slowdown-in-germanys-wind-power-development-perpetuated-dependence-on-russia/>

2: <https://www.theguardian.com/environment/planet-oz/2016/feb/11/checking-ted-cruzs-climate-science-denial-clangers>

3: <https://www.bizjournals.com/houston/news/2022/12/09/texas-ercot-grid-wind-solar-natural-gas-generation.html#:~:text=Wind%20power%20generation%20in%20the,8%25%2C%20the%20EIA%20said.>

业化、长期度电成本低于传统能源的当下，与风电发展如何进一步提速相关的政策、市场与社会环境问题。

德国、美国得州与中国浙江的指标比较

要形成对得州情况的把握，将其纳入我们熟悉的参照系往往是必要的。

从表 1 可以直观地看出，与中国浙江省和德国相比，美国得州可以称得上是一个地广人稀的地区，这为其风电与光伏发展奠定了丰富的物理（如

土地资源）基础。而在以反映物质产出与服务数量的 GDP 指标上，若将得州视作国家，其可以在全球排第 9 位，高于加拿大、韩国、澳大利亚等国家实体，人均意义上接近 8 万美元⁴，是非常富裕的地区。

得州的风电发电量占比 10 年间翻了 3 倍，从 8% 上升到 25%（图 1）。天然气的份额尽管存在波动，但总体上保持在 40%~45%。因此，风电份额的增长，对应减少的几乎完全是煤炭的份额——从 2010 年的 40% 下降到 2022 年的 17%。

得州的风电发电量占比 10 年间翻了 3 倍，从 8% 上升到 25%。风电份额的增长，对应减少的几乎完全是煤炭的份额。

表1 指标情况对比(2022年)

指标	中国浙江省	欧洲德国	美国得州
面积 / 万平方公里	10.55	35.75	69.62
人口 / 百万	65.77	84.3	30
GDP/ 万亿美元	1.2	4.06	2.4
电源装机 /GW	130	200	140
风电发电量占比	5%	24.1%	25%

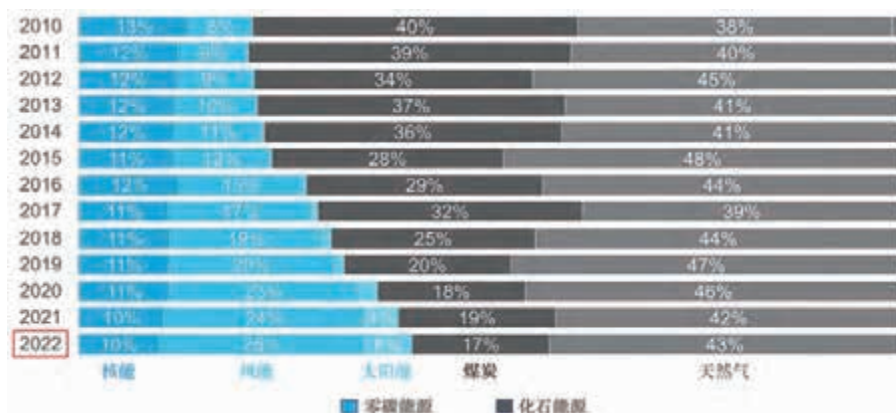


图1 2010—2022年得州发电量构成⁵

4: 美元兑人民币的汇率当前约为7.26。

5: <https://themeritorder.substack.com/p/more-than-40-of-texas-power-was-carbon>



目前州层面没有支持政策

得州拥有巨量发达的石油、天然气工业，这成为它一直是传统化石能源（pro-fossil fuel）州形象的原因。得州鲜有对可再生能源的支持政策，特别是补贴政策。1999年，得州监管机构曾制定过一项规则⁶，类似可再生能源配额制（Renewable Portfolio Standard），计划到2014年年底使可再生能源累计装机容量达到588万千瓦，到2024年年底实现1000万千瓦。然而，到2009年即实现了2024年的装机目标。

目前，除了更小地区服务于区域发展（如农村风电机组工程）的优惠外，州层面没有可以称为“支持”的政策。而这种优惠，相比传统油气行业的优惠，只能算“小巫见大巫”。风电的快速发展，更多的是充分商业化、市场主体自底向上集合显示的一个宏观结果。

发展迅速之必要条件：风电成本快速下降

2015年后，得州的人们——政府官员、电力行业从业者、农场主渐渐发现，风电比其他电源大大便宜了。2017年，《科学美国人》（*Scientific American*）的一篇文章⁷对长期购电协议（PPA）的风电电价（反映长期成本）进行过汇总，普遍在2美分/千瓦小时左右，低于天然气与核电，在得州更是远低于煤电。

这种廉价还体现在土地收益上。

“便宜了”是一个必要条件，可惜远远不充分。基础设施是否配套，能否互相促进而非限制，是一个高度相关的因素。

2023年1月中旬，《经济学人》（*The Economist*）杂志讲述过一个很有细节的故事⁸。得州农场主约翰·戴维斯（John Davis），共和党人，家族经营农场、放牧已经超过140年。当有风电企业提议在其土地上安装风电机组时，起初他断然拒绝了。然而，后来他还是抵不住经济利益的审慎计算。按每英亩的平均回报率计算，养牛的收益为8美元，猎鹿为15美元，而风电高达数百美元。

发展迅速之必要条件：电力系统与市场高度开放

如果上述故事让读者得出结论：发电成本低了，一切都好说，“看不见的手”会驱动人们越来越喜欢风电，那么，这种认识显然是对我们生活世界的高度简化。“便宜了”是一个必要条件，可惜远远不充分。历史上的太多案例表明，经济上更好的技术，只有一部分最终占据市场主流。比如，键盘的字母排列、磁带的存储制式等都是“次优”方案最终成为主流。基础设施是否配套，能否互相促进而非限制，是一个高度相关的因素。

得州的电力市场（ERCOT）高度开放，无疑是最重要的必要条件。只要你是发电的，满足能够充分核实的基本并网要求，就可以参与电力市场。甚至即便不发电，只要你愿意，也能够参与虚拟交易（Virtual Trade），只要你承受损益即可。这样一个信奉最小化干预的州，在目前的形势下反

6: <https://www.puc.texas.gov/agency/ruleslaws/subrules/electric/25.173/25.173ci.aspx>

7: <https://blogs.scientificamerican.com/plugged-in/wind-energy-is-one-of-the-cheapest-sources-of-electricity-and-its-getting-cheaper/>

8: <https://www.economist.com/business/2023/01/12/go-to-texas-to-see-the-anti-green-future-of-clean-energy>

而成为一个积极因素。

如果你了解美国其他中西南部保守州的最新动向，这一点会显得尤为重要。怀俄明州要引入 2035 年禁售电动汽车的立法⁹；俄亥俄州给天然气贴上“绿色能源”标签¹⁰；佛罗里达州计划推动立法¹¹，禁止所谓的“绿色金融”——ESG（环境、社会与治理）因素影响企业融资成本的做法。

发展迅速之必要条件：基础设施电网给力

事实上，在得州的风电快速发展过程中，曾经出现过物理弃风率明显上升（注意：经济补偿是必不可少的）的阶段，2009 年一度达到 16%。美国国家可再生能源实验室（NREL）的案例研究¹²显示，从 2003 年到 2009 年，出现一定程度弃风的天数占到总天数的 45%¹³。

然而，2013 年建设的电网项目，仅投资 70 亿美元，就极大缓解了电网阻塞情况的频繁出现¹⁴。

与此同时，储能系统与其他储能正快速进入。目前，电池容量能力（power capacity）已经超过 30 万千瓦，承担 60% 以上的短期频率调节任务。相应的辅助服务产品处于快速发展中¹⁵。

这根源于一个开放的电力系统，

会激励系统变得越来越灵活，而不是相反。

总结

风电的技术经济已经占优，社会经济与政治经济因素进而变得十分关键。美国得州的情况表明，风电具有了商业竞争力，需要这个市场的进化以使这种竞争力得到充分展现。技术经济问题已经不足为虑，社会经济与政治经济的重要性反而更加凸显。它们甚至比技术经济更加无边界、复杂与纠结。

回到我国，笔者只能感慨“太阳底下没有新鲜事”。尽管美国与我国的社会、政治、经济环境截然不同，但风电发展的良好基础设施条件同样是目前一个重大的挑战，需要业内人士持之以恒的努力。

尤其是关于是否通过分割市场发展风电的问题。分割的市场采用一些固定电价之类的安排，以保证风电的收益。这种安排到底是自愿还是强制，变得无比重要，而国内的讨论仍鲜有涉及这方面。一个必须提出的问题是，如果这种安排是强制的，另一个给消费者提供完全同样功能“电力”产品的市场，为何新的可再生能源发电不能参与？美国得州的例子或许能给我们一些启示。📌

分割的市场采用一些固定电价之类的安排，以保证风电的收益。这种安排到底是自愿还是强制，变得无比重要。

9: <https://thehill.com/homenews/state-watch/3815311-wyoming-lawmakers-propose-ban-on-electric-vehicle-sales/>

10: <https://www.washingtonpost.com/climate-environment/2023/01/17/ohio-natural-gas-green-energy/>

11: <https://www.flgov.com/2023/02/13/governor-ron-desantis-announces-legislation-to-protect-floridians-from-the-woke-esg-financial-scam/>

12: <https://www.nrel.gov/docs/fy10osti/46716.pdf>

13: 值得指出的是，尽管弃风的频率如此之高，但风电年利用小时数仍在 3000 小时左右。

14: <https://www.texastribune.org/2013/10/14/7-billion-crez-project-nears-finish-aiding-wind-po/>

15: Latest information from Nitka Mago @ERCOT, presentation at April 4, 2023, on G-PST/ESIG Webinar Series: Operational Experience with Battery Energy Storage in ERCOT.

乡村振兴

十年耕耘，十年收获。随着广西新能源开发的提速，远景在广西的风电累计装机容量已超过 250 万千瓦，市场占有率达 25%，成为广西市场占有率最高的整机设备厂商。面对广西丰富的风能资源和独特区位优势，从不断提高的设备适应性到产业基地建设，远景将为这方山水增添更多绿意。



十年御风，远景八桂结秋实

本刊 | 王芳

十年来，作为政府和企业的零碳技术伙伴，远景扎根八桂沃土，与广西风能优势有机结合，开发风能资源，投资建设风电场；发挥龙头企业作用，围绕新能源装备制造及利用，建设智慧能源产业基地，协助广西构建绿色能源体系，打造风电全产业链，为当地新能源产业注入强大动力。

六堡茶产地添“风”景

初秋时节，广西苍梧县六堡镇连片的茶山郁郁葱葱。山岭之上，一排身披绿衣的“大风车”轻挥叶片，晨迎朝阳，夕送晚霞，清流白云，山光烂漫，为这方山水输送着绿色能源，也守护着这片绿水青山。

沿着宽阔的水泥道路上山，两侧边坡种植的树木、竹林修葺得整整齐齐，各色的花朵迎风摇曳。这里原来是一处狭窄的防火通道，乱石杂草丛生。风电机组上山后，防火通道被整体拓宽硬化，就连大型救援设备、消防车都能快速通达。行至途中，有凉亭闪现在高处，正好歇脚。眼前茶汤袅袅，四下眺望，虫鸣鸟叫更显幽静。

六堡镇地处瑶山和大桂山余脉，是六堡茶的原产地。六堡茶已经有 1500 多年的种植历史，清嘉庆年间即入中国名茶之列，远销东南亚各国。其制作工艺入选人类非物质文化遗产代表作名录。风电项目建成后，在每年的国际茶博会上，来自全球各地的茶友相聚于此，在领略当地茶文化的同时，欣赏沿途“风车”美景。

据了解，六堡一期 5 万千瓦风电项目，采用了 20

台远景 EN-141/2.5MW 机型，于 2020 年 9 月底并网，2021 年和 2022 年的年利用小时数分别为 2276 小时和



2417 小时，能量可利用率（PBA）超过 98%，时间可利用率（TBA）高于 99.5%。项目年均发出 1.17 亿千瓦时绿色电力，并反哺了当地的绿色产业。

“考虑到当地六堡茶的产业特色，我们在原本白色的塔筒上设计出以绿色为底色的彩绘图案，升压站采用了古风建筑风格，实现工业与旅游产业、生态环境的完美融合。”远景能源中部区域公司常务副总经理、广西代表处总经理许阳向《风能》介绍道。

风电场的建成，带动了沿途茶叶、柑橘等农产品的销售，以及农家乐等第三产业的兴旺，为农民在家门口增加了一项额外收成。建设者、游客的进出，为闭塞的乡村打开了生动局面；当地的茶文化、瑶族节日活动，促进了内外交流与繁荣。苍梧县六堡茶的年产值达 50 多亿元。由绿色“风车”装点的乡村公路，形成了集风力发电、观光旅游、环保示范于一体的风电长廊。



技术创新让风机更友好

站在钦州三娘湾向远处眺望，这里是有着“海上大熊猫”之称的中华白海豚的栖息地，一台台身披白海豚彩绘的远景智能风电机组，在江海交汇处列阵以待，迎风展翅，外观以海浪图案绘制的升压站让人误以为是某个博物馆。在同样采用远景机组的玉林风电场内，船型的升压站已经成为当地中小学生爱国主义教育基地……

在这些环境友好型风电场，叶片的转速看起来并不快，却同样能发出可观的电量，这得益于远景大兆瓦机组的技术进步。作为行业内首创低风速风电机组的企业，远景通过大扭矩齿轮箱技术，扩大了机组发电风速的区间，实现微风启动，进而提升了低风速风电场的发电量。同时，大扭矩齿轮箱的运用大大降低了叶尖速，噪音比传统风电叶片降低 3~5 分贝。

该技术最早运用于远景江阴分散式风电示范性项目。经过验证发现，大扭矩齿轮箱在稳定性、安全性和发电量上皆有保证，并推广至对环境有明确要求的区域。2021 年“国补”退出后，风电机组的安全性、收益率受到业主更多关注。远景智能风电机组此时显现出明显优势，使机组之间可以通讯，提前感知机组内外的风险点，形成对整个风电场的智能风险把控，同时采取相应策略，助力开发企业提高风电利用率、降低度电成本。

此外，针对广西陆上风能资源特点，远景以多种风轮和功率的组合，量身定制适应不同场景的解决方案。西南地区多雷暴，远景机组以高于行业标准的要求，对叶片和机舱罩做了防雷增强设计和测试，最大程度上规避雷击火灾事故风险。面向西南复杂地形，采用分离涡模拟 DES 技术进行微观风况仿真，计算载荷结果与实测数据吻合，计算精度远超行业普遍算法。在建设山地项目时，远景采用安全、成熟、高效的第三代自研单叶片吊装工艺，与常规风轮整体吊相比，机位占地节省 40% 以上，风速窗口扩大到 8~10 米/秒，而吊装效率不减。

扎根广西，深度布局新能源

伴随广西社会经济发展加快，全区用电负荷增长迅速。广西风能资源良好，发展风电成为其实现能源转型和完成可再生能源消纳目标的重要抓手。《广西可再生能源发展



“十四五”规划》提出，重点推进风电规模化发展。《广西战略性新兴产业发展三年行动方案（2021—2023年）》提出，重点打造风电产业链。广西开始以构建新能源占比逐渐提高的新型电力系统为主线，积极打造亿千瓦级清洁能源基地。

早在2021年4月，远景即与钦州市人民政府签订《远景智慧能源产业基地战略合作框架协议》，总投资约50亿元，在钦州港片区投资建设远景智慧能源产业基地，打造集智能风电主机、大型海陆风电机组叶片制造、叶片测试验证中心及其他配套产业，年产能可达500台套，助力广西构建完整的智慧风电产业链。目前，一期风电整机及二期叶片项目均已投产，累计交付百余套智能风电机组产品。今年9月中旬，由该基地生产的广西首套智能风电机组叶片于钦州港发运至广东惠州海上风电场。此外，远景在北海、贵港等多地均布局了智能风电机组、智慧储能等产业基地。

远景钦州智慧能源产业基地落成后，风电上下游产业链已逐步进入钦州港片区，涵盖塔筒、导管架、海缆、变频器、变流器等厂商。该基地成为了钦州的一张名片，受到自治区领导的一致好评。

为了全面参与新能源产业，远景作为国内头部风

电储能的综合能源解决提供商，在钦州灵山县建设了广西首批共享储能项目之一，采用磷酸铁锂电池，容量200MW/400MWh，预计今年10月底全容量并网。

在海上风电方面，广西起步较晚，但加速很快，规划装机容量超过2000万千瓦。其海域所属的北部湾大部分区域多年平均风功率密度达200瓦/平方米，是我国加快推进海上风电集群化开发的重点区域。今年5月，广西首批海上风电示范项目陆续开标，远景接连中标国家电投广西钦州海上风电示范项目和广西投资集团防城港海上风电示范项目，装机容量接近50万千瓦。针对广西海上低风速场景，远景推出EN-226/8.5和EN-252/10.5两款机型，继承积累多年的海上成熟平台，采用经典可靠的传动链布局和第四代先进翼型实现高电量捕获，依托技术创新达到极致模块化工程效率最优，并具有强抗台风能力，已经过充分的市场验证，将分别应用在此次中标的两个项目中。

面向海外市场，广西的区位优势明显，是唯一与东南亚国家既有陆上接壤，又有海上通道的省份。远景将立足钦州智慧能源产业基地，以钦州港为依托，面向东盟，为越南、柬埔寨、老挝等东盟国家新能源发展注入新活力，共建绿色“一带一路”。🚀

X-CALIBER

卓刻平台

瞄准“高收益”
聚焦“高可靠”

助力陆上定制化
解决方案提供



持续迭代优化
开拓紧凑型半直驱新时代



海上成熟经验“移植”至陆上
基于丰富的海上风电样本库开发



海陆关键部件复用
提升可靠性、保障交付能力



上海电气风电集团公众号



班组成员对集电环、碳刷、排碳筒等进行专项检查清理



班组成员在检修试验室对变频器IGBT、偏航变频器、变桨变频器等进行测试及试验维修



班组成员使用红外测温仪进行场内设备节点测温工作

龙源蒙东公司代钦塔拉二班组： 用心铸造“金牌班组”

文 | 任宇，云皓 内蒙古龙源蒙东新能源有限公司

金秋十月，是代钦塔拉苏木的五角枫一年里最美的时刻。它们袅袅婷婷地站在山坡和草原上，有的一树金黄像身披金色的铠甲，有的又一树绯红似一团火，有的集红黄绿于一树，斑驳陆离如一幅水彩画。能够有幸融入这幅动人图景的，除了当地居民、游客，还有不知道已经在此地度过了多少个春夏秋冬的龙源电力蒙东公司兴安盟维保中心代钦塔拉驻地二班的人员。可对这些队员来说，身边的风景不足重，重要的只有那一台台需要他们照顾的风电机组。

一直以来，在公司和维保中心的指导帮助下，代钦塔拉驻地二班紧紧围绕年度目标任务开展工作，从加强班组思想政治教育、狠抓安全生产管理、强化班组建设、落实细化工作责任、紧抓培训、稳健推进各项安全生产任务上下功夫，以隐患排查整治为抓手，不断提高班组人员的综合素质与技能水平。这支平均年龄 34 岁的年轻队伍，积极践行风能人“不畏艰苦，勇于奉献”的精神，接续奋进，勇于创新，担当奉献，追求理想，不断加强自身建设和提

升科学管理水平,细化工作标准,优化工作流程,形成了“严谨、团结、务实、创新”的良好作风,先后获得全国能源化学地质系统“社会主义是干出来的”劳动竞赛“红旗班组”,国家能源集团“金牌班组”“工人先锋号”等荣誉。

安全第一,全员参与

安全,是电力企业发展的生命线。代钦塔拉驻地二班始终将安全放在工作首位,利用班前班后会、安全警示日、事故预想等,持续在班组中宣贯安全理念。

在日常工作中,运检二班认真贯彻“安全第一,预防为主,综合治理”的安全生产方针,全面梳理生产管理漏洞,持续开展安全风险预控、隐患排查、春秋安全大检查等活动,细化措施认真落实,营造出“人人重安全、人人保安全”的良好氛围,使班组安全生产得到了可靠保障。同时,运检二班深入学习新修订的《中华人民共和国安全生产法》,贯彻电力安全规程、二十五项反措等要求,将对理论的学习转变为班组员工的自觉行为,细化责任分工,明晰岗位职责,严肃纠治违章行为,确保班组管理工作有据可依、有章可循。

创新创效,提升效能

代钦塔拉驻地华锐风电机组投运已经超过10年,设备暴露出一些“老毛病”。华锐风电机组设计原厂配置的西门子电源不属于低温型,受内蒙古东部地区恶劣低温环境的影响,经常报出故障。而低温新型的西门子电源与机组电源柜不匹配,无法安装固定,强制装配后存在掉落、撞击等安全隐患。为此,运检二班对西门子电源的功能、设备外形和安装固定部件进行了细致研究与讨论,经过反复试验、修改、观察后,对低温新型西门子电源底座实施技改,使其可以成功应用老机组的机舱柜内。截至目前,技改后的机组未发生电源掉落情况,机组电源低温故障基本消除,大大提高了设备可靠性。

同时,针对机组蓄电池冬季经常报电池电压低等故障情况,运检二班通过反复测算,在保证安全的情况下,研究确定在电池柜内加装加热器,从而实现根据环境温度实时调节电池柜温度,大大降低了冬季电池组故障率,提高了风电机组的可利用率和蓄电池的使用寿命。

设备抢修,风雪无阻


无论是白天,还是黑夜,抑或炎热、寒冷,运检二班始终能够在保证安全的前提下,做到快速消除风电机组故障隐患,全力做好能源保供工作。

2022年冬季突降大雪,A05号风电机组报出变频器故障。起初雪下得并不大,为了保证冬季大风天气时风电机组健康运行、电量应发尽发,运检二班班组长张于立即带领班组成员高春雨前往该风电机组处理故障。在登塔检查确定故障为变频器损坏后,他们当即联系场站配送变频器备件。经过5个多小时的艰苦奋战,两人才将故障处理完成,使风电机组恢复运行并网发电。然而,让他们没有想到的是,在他们埋头维修的这段时间里雪一直没有停!由于地面的积雪没过车辆轮胎一半以上,正常驾驶车辆返回驻地已无可能,无奈之下只得联系驻地人员前来救援。1000米的距离,铲雪车历经1个小时才铲出一条道路。大家返回驻地已是深夜。

深度维护,智能管控

针对风电机组和升压站设备的运行情况,运检二班定期开展设备检查及切换工作,做到每月每台机组至少登机检查一次,及时发现缺陷。对于缺油缺水的风电机组,及时进行补充。由于现场环境恶劣,扬尘天气能见度不足5米,风电机组油冷风扇处堵塞严重,引起齿轮箱高温降容缺陷。针对这一情况,运检二班每个月对油冷风扇散热片进行逐一清理、清洗,彻底消除齿轮箱高温降容缺陷。

通过对风电机组近6个月的十分钟数据和故障记录进行分析,针对性开展维护消缺工作。针对由风速数据异常锁定的风速仪损坏情况,辅助公司技术中心开发出华锐风电机组超声波风速仪诊断装置,实时监测风速仪运行状态,并及时更换异常风速仪5台次,提升发电量110万千瓦时。此外,自主编制齿轮箱油液技改方案,使机组在满负荷运行时齿轮箱油温低于降负荷温度10℃,通过修旧利废节约采购成本70万元。2022年,该班组维护的风电机组中,无故障连续运行200天的占93%,300天的占88%。

兴安盟维保中心代钦塔拉驻地二班始终发扬吃苦耐劳、不畏艰苦的精神,将已有成绩看作新的起点,在保证设备安全和稳定生产的道路上吹响永远的“先锋号”。

见证中国风电走向世界

本刊 | 叶无极



自 2018 年大学毕业后投身风电事业，仅仅 5 年的时间里，胡子辰经历了工作上的两次重大转变，并将自己的足迹留在了中国风电海外发展的第一线。

作为全球领先的新能源解决方案供应商，浙江运达风电股份有限公司（下称“运达股份”）于 2020 年开始，借助陆上风电与风电服务的厚积薄发之势，加速推进“海上 + 海外”的“两海”战略，短短三年多时间，“两海”风电市场业绩便实现历史性突破。

越南宁顺正胜风电场便是其中一例。它是越南首个使用中国品牌风电机组的陆上风电项目，运达股份的技术、工程和运维人员克服新冠肺炎疫情的不利影响，确保了该项目按时投运。此后，又有雅蓓、昆嵩等项目陆续并网。在欧洲，运达股份则是第一个进入塞尔维亚市场的中国风电整机商。

作为中国风电海外建设军团中的一员，一路走来，胡子辰感想颇多。

从国内到海外

大学毕业后就毫不犹豫加入运达

股份的胡子辰，在国内风电项目上工作了两年。其间，运达股份开始执行海外项目。胡子辰认为，这是提升自己的能力的好机会，第一时间参加了内部招聘，并顺利加入海外项目团队。

通常，对于被派往海外工作的人员而言，英语能力是必不可少的。胡子辰早早即开始准备，无论工作多忙，都会抽出时间阅读外语教材。功夫不负有心人，语言能力成为他应聘新职位时的一大优势。“当时的上级领导看到了我的这一点，觉得我有一股冲劲，对自己有更高的要求，对未来有着清晰的规划。”胡子辰向《风能》回忆道。

然而，真正到了项目上胡子辰才发现，能用一门外语进行阅读和如何与客户顺畅交流之间的差别比想象中要大得多。例如，与国外客户对接时，往来邮件都要使用英语，专业术语是一种挑战。在面对面沟通交流中，口音成为另一种挑战。客户并非都来自以英语为母语的国家，说英语时带有浓重口音，理解起来有难度。经过一段时间的磨合，胡子辰逐渐摸清了对方的发音和说话风格，这才消除了交流上的障碍。

此外，需要胡子辰学的新本事还有很多。运达股份首次进行海外项目船上交货（FOB）报关时，没有专门负责该业务的人员。胡子辰等人只得跟着货代，边学边做，一起完成报关。有一次在集港运输途中，需要更换新设备。此时恰巧是春节前夕，新设备必须赶在春运高速封路前发出，否则一旦耽误船期，将造成数十万元的损失。胡子辰顶着巨大压力，第一时间与厂家取得联系，经过多方协调，最终使对方在高速封路前将新设备及时运送了过来。

“流程都是比较容易掌握的，可能做过一次项目后就熟悉了，但是面对一些突发情况，需要协调各个部门，实现通力协作，必须在有一定经验的前提下，找到最佳的解决路径。”胡子辰告诉《风能》。

从运维到交付

如今，从排产、设备采购到物流发运、码头协调与报关、客户沟通，这些任务都落到了胡子辰的肩上。抵达现场后，他还要负责项目部搭建、

租房租车、工器具校验、运行调试、签署预验收证书等一系列工作，甚至会承担翻译风电机组基础的锚栓、锚板的安装说明等临时性工作。

胡子辰解释说，“就运维而言，可能更加看重人员在机组排故方面的技术能力，而机组交付要求对整个流程有清晰的认识，需要我们站在更高层面来提高机组交付效率。”

更重要的是，中国企业在海外市场积累的经验并不多，且每个国家的相关要求不尽相同，如越南对电网有着特殊要求，当地政府和银行对风电机组的要求也不同于国内。在海外建设风电项目，用“摸着石头过河”来形容一点都不为过。

在越南期间，有一个风电项目让胡子辰印象深刻。该项目必须抢在当年核准截止日期前并网，才能享受到越南的补贴电价。胡子辰对此格外上心，一直奋战在项目一线，最终按照计划顺利完成任务。

“如果因为我们的原因导致机组无法按时并网，对业主和我们未来的合作会产生巨大的负面影响。”因此，胡子辰养成了“做着手头的工作，想着下一步工作”的习惯。

运输方式是其中一个主要的风险点。海外项目一般会涉及海运，这意味着要满足合同中确定的交期，海运的船期将是特别重要的因素。货物的尺寸、重量则是另一个需要重点关注的环节。

“比如，货物的尺寸报小了，导致船选小了，无法装下全部货物。此时，只得再找一艘船单独运输余下货物，或者再找一艘大船。如果货物的尺寸报大了，相当于业主要多付海运费。这两种情况都会给业主造成损失。”胡

子辰表示，“这些都对自身工作的严谨性和处理问题的及时性提出了更高要求。更不用说，由于时差、签证的原因，后方的支援无法及时到位，难以在第一时间作出响应。在海外项目上，对风险的预判能力显得尤为重要。”

获得国际客户认可

我国早已将风电列为国家战略性新兴产业之一，在政策引导和市场需求驱动的双重作用下，我国风电产业实现了快速发展，国内风电企业不仅有能力参与国际竞争，且已经取得了领先优势。

多年的海外经历，让胡子辰意识到国内风电企业要想获得国际客户的认可，应当重点做好以下几个环节的工作：

保证风电机组顺利交付。业主非常关心机组的交付进度，甚至有些业主希望能够提前交货。这是因为海外运输的周期较长，客户希望得到整机商的配合，加快项目的前期进度，从而为后续吊装环节留下充足时间。

提升客户体验感。例如，前述塞尔维亚项目的客户是首次涉足风电领域，缺乏相关经验。胡子辰和项目团队成员积极参与业主的项目计划制定，提供吊装经验，帮助他们降低吊车租赁和人员费用，保证了机组吊装顺利进行，如期完成。

在近一年的合作中，胡子辰和他的同事与业主之间的关系，已经超越了一般意义上的客户和供应商关系，变成亦师亦友，互相成就。

后期优质的运维服务。在现场，胡子辰与团队成员通过合理计划，将机组运维安排在小风天进行，始终将保证业主的发电量放在第一位。



胡子辰做事做人的理念，在与国外客户一次次的合作中得到了检验。采访过程中，胡子辰拿出手机，点开了一条添加到收藏栏里的信息。这是他上一次准备离开塞尔维亚时，业主方的项目经理发来的。字里行间，都是对胡子辰团队的肯定。结尾处，身为斯洛文尼亚人的项目经理告诉胡子辰，如果有机会到他的家乡，到时候一起爬山。这句话让胡子辰非常感动，他们已经超越工作上的合作，成为生活中的朋友。

做人如此，做产业亦如此。从全球视角出发，中国风电企业开拓海外市场时要以合作共赢的方式，形成更为广泛的朋友圈，构建一个坚韧、互信的产业链供应链。因为唯有共同进步、互利共赢，才能保障风电产业在全球范围内实现更大规模、更高质量发展。🔗

风能资源测量与评估需更精细化

本刊 | 王芳



受访者：北京瑞科同创能源科技有限公司
总经理兼设计院院长 宋军

风电产业的高质量发展，离不开风能资源数据的测量。如今，从雷达测风、数据分析软件的国产化替代，到海上漂浮式测风、一体化环境监测系统……测风技术不断进步，应用场景更加多元。北京瑞科同创能源科技有限公司（下称“瑞科科技”）在这一领域深耕十余年，公司总经理宋军作为风能资源测量与评估领域的专家，向《风能》解答了业界普遍关心的问题。

Q：风能资源测量是风电项目开发的关键环节，测风技术起到哪些重要作用？有哪些应用场景？

A：随着风电产业高速发展，测风技术在风电领域的重要性进一步凸显，在前期风能资源评估、风电场选址、风电机组选型与安装、运维管理等风电场全生命周期发挥着重要作用。其中，在开发阶段对风能资源进行精确评估，将直接影响风电场的效益，是风电场建设成功与否的关键。

在开发的前期阶段，使用测风塔或测风雷达等能够全面了解风场特性和复杂地形对风能资源的影响。精确的测风数据有助于预测和评估风能资源的可利用性，缩短开发周期，减少人力、财力浪费。

在风电机组选型与安装中，可以基于测风塔数据选择适合的风电机组类型，确保风电机组在各种气候环境下稳定运行，并减少损耗，从而实现最佳的发电效率和经济效益。

在风电场运维管理中，瑞科科技研发的机舱式激光测风雷达，可有效还原机舱前的真实风速，及时调整风电机组的控制策略和运行模式，有效降低机组载荷，提升发电效率。这些数据还能够用于故障预测和风电场性能评估，帮助提高系统的可靠性和负荷预测的准确性。

Q：为了更好地适应市场的发展，瑞科科技在成长过程中以测风为基础拓展出哪些业务领域？接下来，将寻求哪些新突破？

A：测风业务是瑞科科技发展最早的核心业务之一，至今已在全球各地实施完成 3000 多座测风塔。测风项目不仅是瑞科科技集团公司的重要业务板块，也为公司咨询设计、软件服务、后市场服务等业务板块提供了强有力的数据支撑，随着集团的飞速发展，目前已形成“两主两翼”业务体系，覆盖新能源全产业链。

2012 年 4 月，瑞科科技在四川完成首座前期测风塔搭建，开启了 10 余年的测风历程。2013 年 2 月，瑞科科技首个海外测风工程——约旦 100 米测风塔顺利建成。至今，瑞科科技已参与并负责 30 多个国家的百余个海外新能源项目。2015 年 9 月，瑞科科技首座海上测风塔工程在福建福建

成，到今年已累计完成 30 多套海上测风系统。

2017 年 8 月，正式组建专门从事新能源咨询设计的瑞科设计院。如今，瑞科设计院已发展成为国内新能源领域为数不多的民营“三甲”设计院。2019 年 11 月，瑞科科技全资子公司瑞科恒能成立，全面进入新能源后市场服务领域。

2021 年，正式成立瑞科软件公司，主要承担公司现有及规划中的软件技术服务、软件产品代理、信息化建设等工作。瑞科科技的业务覆盖了新能源全产业链，可以提供一站式服务，并成功入选北京市“科技型中小企业”。

2022 年 11 月，瑞科科技参与设计施工的荆州 200 米测风塔顺利竣工，刷新测风塔新高度。2023 年 5 月，瑞科设计院参与的首个高混塔风电项目——河南兰考 150 米混塔项目成功并网。2023 年 8 月，瑞科科技参与的阿拉善百万千瓦风光氢氨一体化项目完成微观选址，是国内为数不多在移动沙丘的沙漠区域中建设的风电项目。

新能源后市场是目前瑞科科技关注的重点。瑞科科技已经搭建起全面系统的新能源后市场业务资源平台，形成了为新能源场站后期服务提供系统解决方案的业务体系，并由新能源资产综合管理服务进一步向新能源资产运营管理服务扩展，逐步涉足辅助电力交易、综合能源管理等领域。

Q：在已实施的业务中，有哪些看似难以完成的项目，是通过瑞科科技的专业技术得以成功实施的？

A：瑞科科技参与的国家电投陕西神木项目通过专业的技术手段和精细化资源评估，项目收益显著提高。国家电投陕西神木项目的原场址，曾被认为不具备开发价值。瑞科科技的团队通过大数据等技术手段重新规划选址，并结合精细化测风方案，做了合理的机组排布。项目投产一年后发电小时数远超业主预期，达到 3000 小时。

国家电投山西繁峙项目也遇到了类似问题，瑞科科技团队通过专业分析最终圆满完成选址工作。国家电投山西繁峙项目的原场址，客户通过几家设计咨询机构都无法提供满足项目容量的机组排布方案。瑞科科技团队凭借过硬的风能资源

勘测实力和丰富的项目经验积累，不断筛选可用区域，巧妙地选择了几道不被看好的山梁，制定出精细化机组排布方案。最终，项目不仅按照原始终容量投运，还为三期提供了可选机位。

瑞科科技参与的国家电投青海尖扎项目，起初的收益效果并不理想，同样是通过瑞科科技团队一步步发现问题、解决问题，最终圆满完成可研工作，团队也得到迅速成长。今年 3 月，瑞科科技开始跟进国家电投青海尖扎项目。当时的场区规划点位于一片四周山体环绕的平地上，经过整场风能资源评估，结合青海电价情况，我们测算的收益效果并不理想。随着跟进的深入，我们发现原场区居然与当地的一个光伏项目场区相冲突。在我们的建议下，场区机位点被移到周围风能资源情况更好的山上。经过踏勘微选，道路、线路的规划，以及项目方案的微调，顺利完成了可研并通过专家评审，获得业主的肯定与称赞。

Q：目前，国内风电企业纷纷加快推进“两海”战略，瑞科科技在海上风电和海外市场中有哪新的机遇？采取了哪些对策？

A：风电产业进入平价时代后，多产业融合立体发展是未来海洋经济开发的主要趋势之一。瑞科科技成立了前沿技术室，投运了全国首个海上漂浮式测光平台，开创了“风、光、水”一体化环境监测系统，利用全国观测网络推出首个全国海上风、光资源图谱，助力我国海上多产业融合立体发展。如今，海上测风等技术已经难以找到可以借鉴的国际经验，缺乏国际标准和规范，未来需要我们在“无人区”中不断开展创新。

今年，瑞科科技成立了国际事业部，陆续设立东南亚、美洲等分公司，带动国内行业上下游企业共同进入国际市场，目前已在南美、中东、东南亚、中亚、北非等地开展业务合作。

Q：在风电领域中，实现软件的国产化还要走哪些路？瑞科科技进行过哪些探索？

A：在测风领域，实现软件的国产化需要考虑以下几方面：首先，国产化软件需要能够接收、

存储和处理来自测风塔、风电机组和其他气象传感器的大量数据。因此，开发高效的数据采集和处理系统是必要的。其次，国产化软件需要基于国内地理和气象特点开发适用的数值模拟和预测模型，以准确预测不同地区的风场变化。再次，利用机器学习和人工智能技术，可以改进风速和风向预测的准确度。这包括数据驱动的方法，如深度学习网络，用于分析历史数据与实时传感器数据，以预测风场的变化。最后，针对漂浮式海上风电机组，需要开发台风预测系统，以支持台风路径预测、机组定位调整策略等。

瑞科科技围绕软件的国产化进行过一系列研究和创新，目前已开发出一款以数据管理为核心的平台。该平台在数据兼容性、数据监控预警、数据质控、数据可视化交互等方面进行了升级改进，同时新增了数据处理、报表报告功能，为用户提供数据接入、数据监控、数据质控、数据处理、数据分析、报表报告的一站式服务。

Q：作为风能专业委员会专家委员和风电行业资深专家，您对测风技术、多能融合开发、源网荷储方面的未来发展趋势有哪些判断和建议？

A：未来，在测风技术方面，雷达测风设备因轻便、可移动，但价格高昂，将多用于在已有测风塔的风电场进行多点短期补充测风。测风雷达分为激光雷达和声雷达。随着技术迭代的加快，测风激光雷达已经在许多方面呈现出不可替代的优势。陆上测风激光雷达具有测量精度高、安装方便等优点。瑞科科技研发的海上漂浮式激光雷达具有很高的抗强风浪能力，抗腐蚀能力也较强，安全性比较高。市场应用的普及，将促使测风激光雷达的成本逐渐降低。未来，风电领域将会更广泛地应用测风激光雷达技术。当前，风电行业正在逐步完善测风激光雷达设备安装和数据处理等相关企业标准。此外，国内激光雷达测风行业的创新步伐不断加快，其成本效益会逐步显现出来。

现阶段，全球能源结构正发生巨大变化，传统能源与新能源之间实现了融合发展。推动新旧能源两者互补、协调、替代，是绿色低碳转型的主要

方向。能源融合发展：一是以绿色低碳发展为核心，在推动新旧能源互补融合的同时，能源会与其他行业深度融合发展；二是产业链内一体化融合，推动能源产业链、价值链上下游的一体化融合发展，形成多侧多能的联动格局；三是要素间相互融合，主要推动产融、产技、产信之间的融合发展；四是跨区域融合，未来有可能会实现跨区域的互动融合，形成有机价值共生体系。

未来，应加快源网荷储一体化和多能互补发展，从而保证电力系统安全稳定高效运行。源网荷储产业链由上游基础资源、中游系统平台、下游电力需求方构成。上游基础资源包括可调负荷、分布式电源和储能设备，中游资源聚合商主要为信息化提供商，下游电力需求方包括电网公司、售电公司等参与者。无论是对于新型电力系统还是储能产业而言，技术创新都是必由之路。未来，应强化核心技术与重大装备创新，包括多能互补技术、电力调度技术、“云大物移智链边”技术、储能技术等创新。新型储能作为建设新型电力系统的支撑技术，以锂电为代表的电化学储能迎来飞速发展。

然而，源网荷储尚处于起步阶段，市场开发不足。首先，尽管新能源在发电结构中的占比不断攀升，但发电结构并未发生实质性变化。其次，源网荷储管理模式仍需完善。现有行业标准规范不统一，发展难度和成本较高，制约了行业发展。同时，源网荷储市场机制依然缺失，经济效益不显著。因此，对于源网荷储而言，未来将会在强化政府引导的基础上，进一步激发市场主体积极参与。

Q：瑞科科技成立了瑞科学院开展行业培训活动，背后的动因和追求的目标是什么？

A：瑞科科技很早就计划成立瑞科学院，想法源自早期风电项目对前期技术评估、技术手段的忽视而造成的大量损失。瑞科科技希望基于自身多年的资源专业积累，提升行业对前期风能资源的重视，促进项目落地，并为行业输送高质量人才。瑞科科技有信心扛起这面行业大旗，引领不同行业角色换位思考，进一步优化产品、市场和服务体系，推动新能源产业高质量发展。🚀

国家海上风电装备公共检测检验与技术服务平台



国家海上风电装备质量监督检验中心



完全满足IEC标准要求的实验风电场，可开展9MW机组研发性测试

国家风电装备检测实验平台



国家能源风能太阳能仿真与检测认证技术重点实验室

集仿真技术、标准研究、检测认证技术研究与实践于一体的国家公共技术服务平台

创造客户价值, 推动产业进步



1 叶片试验

可开展150米叶片全尺寸试验

叶片全尺寸试验
叶片子部件试验
叶片原材料试验



2 整机装备检测

可开展15MW以上整机检测全套设备

机械载荷与振动测量
功率特征测量
电能质量特性测量
高低电压穿越能力测试
激光雷达验证测试
发电机和齿轮箱试验



3 在役机组检验

在役风电设备全生命周期技术服务

技术尽调与设备监造
大部件检查
并网性能测试
风电机组事故分析
海上升压站设计评估认证
保险风控服务



北京鉴衡认证中心有限公司

☎ 010-59796665

🌐 www.cgc.org.cn

📍 北京市东城区和平里北街6号远东科技文化园26号楼三层



明阳智能的“深蓝”征途

深远海，是风能人的“星辰大海”。在挺进“深蓝”的征途中，明阳智能勇立潮头，善事利器，驭揽长风，耕海牧渔……将风电开发的脚步延至更深更久的未来。

本刊 | 王芳





全球 80% 的海上风能资源位于水深超过 60 米的海域。为了获取更多的风能资源，深远海必将是海上风电未来规模化开发的“蓝海”。发展深远海风电，关键在于通过技术迭代或模式创新，降低项目成本，提升收益。在瞭望到桅杆尖头的深远海发展初期，明阳智能聚势谋远，不惧挑战，在漂浮式风电机组与海洋资源融合发展两方面同时发力，引领行业迈向“深蓝”。

明阳智能自主研发的我国首台漂浮式海上风电机组MySE5.5-155

敢为人先，摘取海上风电的“明珠”

深远海水深岸远，地质勘测、水下结构、施工成本大幅增加，固定式风电机组基础不再具有经济性，漂浮式平台成为深远海海上风电开发的主要降本方式。

漂浮式风电被称为“海上风电的明珠”。直到 2009 年，全球第一台漂浮式风电机组在挪威海域

中建成，单机容量为 2.3 兆瓦。然而，漂浮式风电技术至今仍尚未实现大规模商用。

世之奇伟常在险远，非有志者不能至。明阳智能掌舵者审时度势提出了“海平方”战略，以深远海风电机组开发为目标，大力支持漂浮式风电技术，投入研发力量，加强技术储备。

“培养实力，等待机会”，是最基本的赢家法则。2018 年 3 月，三峡集团获得广东省海洋渔业厅海洋专项资金支持的“浮式海上风电平台全耦合动态分析及其装置研发”项目，由明阳智能负责开展项目中的一体化仿真设计技术研究，并开发 MySE 半直驱漂浮式风电机组。

“这就是‘三峡引领号’最初的由来。本来只是技术研发项目，后来做成了样机示范工程。”明阳智能系统研发室漂浮式产品设计平台总工程师王超向《风能》表示。

开弓没有回头箭，明阳智能推动漂浮式风电技术不断更新迭代，始终走在行业前列。2021 年



12月7日，明阳智能自主研发的我国首台漂浮式海上风电机组 MySE5.5-155 成功并网发电。2023年5月20日，我国首座深远海漂浮式风电平台“海油观澜号”在海南文昌海域并网发电，这也是我国首座水深超过百米、离岸距离超过百公里的“双百”深远海漂浮式风电项目。其采用的正是明阳智能拥有完全自主知识产权的 MySE7.25-158 漂浮式海上风电机组。2022年下半年，明阳智能向全球发布了双转子漂浮式海上风电平台“OceanX”，其在漂浮式基座上搭载了两台 MySE8.3-180 机组，将于今年下水安装。

至此，明阳智能在漂浮式风电机组技术上勇闯“无人区”，一路披荆斩棘。机组单机容量从 5.5 兆瓦到 7.25 兆瓦，再到 16.6 兆瓦；水深从 30 米增加到超百米；离岸距离由 28 公里延伸到 136 公里，直至更远。

如果说，“三峡引领号”实现的是从“0”到“1”的突破，“海油观澜号”则是由浅入深，将漂浮式

我国首座深远海漂浮式风电平台“海油观澜号”，搭载明阳智能 MySE7.25-158 机型

机组的设计应用得更加立体丰富。“双机头”机组更是明阳智能全面继承以往技术积累并进一步大胆探索的“集大成者”，通过增加单机容量满足未来批量项目的应用开发，提高漂浮式海上风电的成本竞争力。

王超参与过明阳智能历次漂浮式海上风电机组的设计。他向《风能》解释道，漂浮式海上风电机组并非照搬国外的技术，而是像陆上风电要解决高海拔、低风速的问题一样，面向中国海上风能资源特点设计制造的。其中，台风是一座绕不开的“高峰”。这是欧洲风电专家公认的世界性难题，也是新能源领域的“登月工程”。

“如果没有能够抗击台风的风电机组，海上风电在中国几乎没有未来。在这样的背景下，我们必须去攻关、解决这些挑战，在此过程中成长和发展，最终实现引领。”明阳智能总裁张启应如此强调抗台风技术的重要性。

事实上，明阳智能很早即开始整合全球研发资源，十年磨一剑，先后投入巨大研发精力和财力，积累拥有自主知识产权的抗台风技术。在王超看来，抗台风设计上是一个体系的优化改造，不管是水面上的塔筒、下部浮体，还是叶片、机舱，都要考虑抗台风的要求。通过准确地模拟台风从 360 度冲击承载部件的工况条件，得到不同方向下的运动响应和载荷强度，再对各部件结构补强和优化。“其中，台风状况下，叶根所受的载荷比正常天气下高出 40%~50%。印象最深的是载荷团队与叶片设计团队要不断地迭代优化，有时甚至经过十几轮迭代后，才会最终锁定一个比较理想的设计参数，从而在安全性、可靠性与经济性之间找到一个恰当的平衡点。”

2023年7月17日，台风“泰利”过境，最大瞬时风速达到 71.5 米/秒，相当于 17 级以上风力强度。2023年9月2日，台风“苏拉”强悍登陆，风力等级同样超过 17 级。在数十场强台风的侵袭下，包括两台漂浮式海上风电机组在内的 2000 余台明阳智能机组“任凭风吹雨打，我自岿然不动”，以高可靠性保障了风电场安全稳定运行，完美诠释了明阳智能“抗台第一品牌”的实力。

而明阳智能超紧凑型半直驱技术路线历经十余年、上千台机组的实践积累和迭代升级，在两台已经运行的漂浮式海上风电机组上充分释放效能：体积小，模块化设计，传递效率高，发电性能优异，可将由台风引起的风轮载荷以最短的路径、最直接的结构快速有效地传递至塔架基础。此外，防腐性能、密封设计、传动链技术、混凝土材料，多种技术创新保持行业领先水平。

立体融合开发，打造海上风电“航母”

提升海上风电项目收益的方式主要包括：一是技术迭代，通过提高技术的精细化和跨越式的创新，如漂浮式技术；二是融合模式创新，通过多种应用场景的融合，衍生出一个集水上、水面、水下、海底于一体的立体融合开发新模式，如以海上风电为依托，打造海上风电与海洋牧场、海

2022年1月19日，明阳智能阳江沙扒“海上风电+海洋牧场”融合示范区首次收鱼

水制氢、海洋油气等多产业融合发展模式。

明阳智能海洋能源研究院院长吴迪向《风能》表示，从2021年开始，海上风电“国补”被取消，电价从原来的0.85元/千瓦时腰斩。尽管有部分省份接力了短期的补贴，但沿海电价最高的广东省，电价也只有0.453元/千瓦时。地方政府对海上风电项目实行竞争性配置，最新竞配项目的电价已低于当地煤电基准价。在部分建设条件较差的区域，以现阶段海上风电场建设成本计算，单独开发海上风电项目已趋近盈亏临界点。

客观来说，由于近海海域用海资源有限，海上风电开发与其他海洋产业用海的冲突日益突出。以海上风电为依托的海洋立体融合开发模式，可以充分利用风电机组之间的闲置海域，提高海洋资源集约化开发水平，解决单一海洋资源开发模式面临的瓶颈问题，同时摊销海洋资源综合开发成本，提高海洋资源开发整体收益。

这是明阳智能提高单位用海面积生产效率、



寻找市场增量、耕海图强的长期战略。明阳集团董事长张传卫表示，全力推进海上风电、海水制氢、海洋牧场于一体的海上综合能源产业的建设与投资，创新推动海洋技术与海洋装备、海洋能源和海洋经济的高质量融合发展。2018年，明阳智能专门成立了海洋牧场事业部和氢能事业部，开展“海上风电+”组织架构体系，制定“蓝海战略”，致力于成为海上综合能源解决方案提供商。

言出必行，行之必果。2022年10月，明阳智能自主独立设计并生产制造的、全球最大单体碱性水电解制氢装备在广东成功下线。2023年5月20日，在距离海南文昌136公里处的海面上，由三个橘红色柱状浮体托举的“海油观澜号”徐徐转动，通过一条动态海缆向5公里外的海上油田群电网发出了第一千瓦时的电力。2023年7月，全球首台导管架风电机组+网箱一体化融合装备“明渔一号”，在阳江青洲四海上风电场内投运，其养殖水体为5000立方米（最大可拓展至20000立

方米），可养鱼约15万尾。

中海油为何选择与明阳智能合作？因为海上作业平台用电需求高，一般直接使用开采出的伴生天然气或原油发电，但此类发电机组容量小、效率低、能耗高。漂浮式海上风电机组的加入，为风急浪高的深远海油气开发工作提供了用电保障，可以降低传统能源对环境造成的影响和损害，助力中海油绿色转型。而明阳智能参与的“三峡引领号”的成功运行，可靠的半直驱紧凑型抗台机型，以及积累的台风风速风向、湍流强度、风切变、阵风系数、机组运行状态等海量数据，加上先进的智能化控制策略和专业的台风防御机制，成为双方合作的关键因素。

作为新能源与传统能源结合的示范，“海油观澜号”实现了风电与油田电能的统一控制和管理。在机组侧，加装无延时监测风电机组启停模块，优化起停逻辑，缩小功率波动区间，避免在低风速下切入；在电网侧，根据微电网频率、电压等要

2023年7月，
全球首台导管架
风电机组+
网箱一体化融合
装备“明渔
一号”安装



求做了耐谐波能力的提升及故障穿越，形成主动控制与被动响应双重保障，确保油田微电网运行的安全与稳定，推动了海上风电为海洋油气电网直供电源技术的发展，为深远海海上风电能源管理和就地消纳提供了借鉴。

至2023年6月19日，“海油观澜号”的累计发电量突破100万千瓦时，日均发电5.5万千瓦时。预计一年能够为采油平台提供2200万千瓦时电力，相当于3万中国人一年的用电需求。每年可节省近1000万立方米的燃气，相当于减排2.2万吨二氧化碳。就近提供的电力消纳能够减轻对电网的压力，还可为其他船舶、海工项目供电，提高经济效益。

如果说风电制氢、为油气平台供电属于多能互补的范畴，那么海上风电与海洋牧场融合则属于新能源产业和现代高效农业的跨界融合发展新模式。

海上风电场所发的电力，可以为海洋牧场养殖运营提供充足的清洁能源。海上风电机组之间的海域，以及机组支撑基础构筑拥有类似人工鱼礁的功能，可以为鱼类提供良好栖息环境，拓展渔业空间，提高产量，改善海洋的生态环境，增殖渔业资源，让海洋成为人类获取优质蛋白的“蓝色粮仓”。同时，风电运维船与养殖船融合设计，利用相近的运维频率这一共通性，能够大大降低二者的运维成本。此外，还可实现监控监测的一体化运营管理，包括风浪流、机组状态、网箱状态、支撑基础状态、鱼类生长情况等信息集成于同一个综合监控监测平台上，实现风力发电与渔业养殖的集中化、科学化、智慧化的管理运营新模式。

2022年1月19日，明阳智能在阳江沙扒“海上风电+海洋牧场”融合示范区完成首次收鱼。经过近半年养殖，金鲳鱼已达到商品鱼规格（500克）。经专业品质检测机构检测，与近岸养殖的金鲳鱼相比，试验区养殖的金鲳鱼在粗蛋白、氨基酸、脂肪酸等关键指标上明显更高，农药残留、重金属残留等指标则更低，味道更加鲜美，整体品质接近于野生鱼。

离岸距离远是限制海洋牧场向深远海发展的一个重要因素。因为深远海的海洋环境更加恶劣，

无论是装备安全要求，还是养殖成本，均会大幅提升。明阳智能在海洋工程装备设计、海工结构物安全设计、应对台风恶劣海洋环境等方面的经验累积，恰好为海洋渔业挺进深远海提供了“金刚钻”。试验区安装的抗台型HDPE养殖网箱由明阳智能自主研发，采用抗台风设计理念，框架结构、网衣材料、系泊系统分别做了加强设计。事实证明，网箱经历“狮子山”等多场台风的冲击考验后，安全性和运营状态良好。

“这个风渔融合示范项目主要是验证：一是海上风电场与海洋牧场融合的可行性，风电的噪声、振动、电磁波等干扰因素是否会对鱼类的生长产生影响。二是网箱装备的安全性，以及在台风工况下的可靠性。风浪流会对固定在网箱结构上的网衣形成巨大载荷，是网箱整体受载的主要来源。因此，需要对深远海抗台网箱的网衣载荷、结构强度等进行精确模拟评估和详细计算分析，从而保证网箱装备的安全性。此外，还需从成本上考虑现有技术标准能否满足行业发展需求。风电属于制造领域，是工业产品，而海洋牧场属于农业，二者的融合是跨行业新型产品，需要根据机组不同基础型式、容量大小，在不同海域进行定制化设计。”同时兼任海洋牧场事业部执行总经理的吴迪表示。

试验区养殖的成功，为风渔融合打下良好基础。2023年7月25日，明阳智能自主研发设计的全球首台导管架风电机组+网箱风渔融合一体化装备“明渔一号”在阳江青洲四海上风电场内安装投运。“明渔一号”离岸距离约69公里，水深约47米，按照50年一遇环境条件设计，最高可抵御17级超强台风侵袭。网箱以导管架为支撑平台，不但解决了风渔深度融合设计、抗台风等难题，而且省去了海上施工安装费用。配置高性能网衣系统及智能化养殖系统，实现了深远海渔业养殖的智慧化、无人化管理。此举将实现同一片水域，水下养鱼与水上发电“鱼与熊掌”的兼得。

海洋立体融合开发涉及多个产业，具体如何融合，需要考虑多重因素和条件。“这必须结合国家政策、海域环境条件、地区电力消纳情况等，集成源侧、网侧、储侧、经济侧的各种需求，形成一整

套行之有效的海洋综合能源经济立体方案，包括资源获取、装备设计、施工建设、运维等全产业链条，且是基于场站级融合的解决方案。”吴迪强调。

2022年11月，明阳集团东方CZ9海上风电场示范项目动工。作为海南首个海洋能源立体开发示范项目，将建设成无补贴时代“海上风电+海洋牧场+海水制氢”立体化海洋能源创新开发示范项目，为海上风电多能互补开辟新的路径。

以韧性与闯劲，奔赴风电的“星辰大海”

有专家表示，2025年后国内外主要海上风电项目将位于深远海，水深30~60米、离岸距离30~130公里的项目将成为“十五五”期间的主流。全球风能理事会（GWEC）预测，到2030年全球漂浮式海上风电累计装机容量将达1650万千瓦。中国可再生能源学会风能专业委员会（CWEA）的数据显示，截至2022年年底我国海上风电累计装机容量为3051万千瓦，仅占深远海风能资源技术可开发量的1/10。沿海省份在各自的“十四五”相关规划中提出，要力所能及地推进深远海风电开发布局。

全球范围内的深远海风电市场，变幻出风电产业发展的“星辰大海”。驾驭深远海资源的能力，是抢占市场的先决条件。依靠深耕半直驱技术路线，明阳智能的抗台型漂浮式风电机组及大容量风电机组在海上风电领域形成了强大的竞争力，促使其引领海上风电发展。

明阳智能研发的漂浮式海上风电机组产品荣获了2020全球最佳海上风电机组金奖；12~20兆瓦系列漂浮式海上风电机组将于今年完成研制；深远海柔性直流送出系统及设备，技术达到国际领先水平；抗台型机组出口至同样面临台风问题的日本、越南、菲律宾等地。同时，由于欧洲近海水深较深，对漂浮式海上风电机组的需求更大。明阳智能积极参与欧洲大型漂浮式海上风电机组的设计工作，并与丹麦、德国、挪威、英国等国的多所知名大学，以及国际认证测试机构展开技

术合作、资源协同和供应链体系建设，进行海上风电全球化资源配置和创新。

“创新常常伴随着风险，充满不确定性，因此，国外很多整机厂家出于谨慎考虑，进展相对缓慢。国内企业在借鉴国外技术的基础上，能够快速完成技术积累，形成技术突破。从基础研发到缩尺寸量级试验，再到样机落地，一气呵成。”王超总结道。

张启应表示，“这背后既有政策、技术和产业链的共振效应，也离不开企业对于技术创新的韧性和敢于突破的闯劲。”

全球漂浮式海上风电普遍面临技术、成本、产业链成熟度等方面的挑战。“平价的漂浮式抗台机组是大家共同的目标。如果能做到，漂浮式海上风电必定会快速爆发，其应用场景也将很快发展起来。”王超满怀期待地向《风能》表示。

海洋是高质量发展的战略要地。在明阳集团海上综合能源岛展台上，展示了提供深远海漂浮式海上风电、海洋牧场、海水制氢、波浪发电等海洋经济立体融合开发的整体解决方案，同时也承载着明阳智能为海洋能源技术高端化、产业集群化和应用场景化，打造行业领先范例的美好图景。

“目前，以海上风电为依托的海洋综合能源立体融合开发模式仍处于示范阶段，不过一旦形成规模化开发，将有效提升风电场收益率。”吴迪建议，政策上，需要编制规划，简化审批流程，减免海域使用费用，尽快出台深远海支持政策等；技术上，应实现海洋技术与海洋装备、海洋能源与海洋经济高质量融合发展，合力降低整体开发运营成本等；投资和开发商业模式上，需要多元融合创新。

她进一步表示，海洋综合能源立体融合开发是多个产业链的延伸，必须整合产业上下游各参与方、利益方，打造一个创新型的商业模式。

三十而立，三十而强。明阳智能始终坚持核心技术自主研发，无问西东，向海图强，研发适用于深水区的漂浮式海上风电机组、创新型漂浮式能源岛，引领深远海风电和海洋经济立体融合开发，并将持续打造风光储氢矩阵式全产业链高端装备集群和整体解决方案，助力我国实现碳达峰、碳中和目标，推动全球绿色低碳转型发展。🚀

整机企业积极布局国际市场， 呈现几大发展趋势

本刊 | 赵靓



中国可再生能源学会风能专业委员会(CWEA)统计显示,截至2022年年底,我国风电机组累计出口4224台,出口容量突破1000万千瓦大关,共计1192.9万千瓦。虽然受新冠肺炎疫情的严重影响,2022年我国风电机组新增出口量相比2021年有所下降,但新增出口的国家数量却大幅提升,较2021年增加7个国家。这意味着到2022年,我国风电机组已遍布全球五大洲、49个国家;也意味着,近些年来我国风电机组受到更多新兴市场的认可,实现在国际市场的加速发展。

通过梳理2022—2023年的相关信息可以发现,我国风电整机出口正迎来历史性机遇,呈现几大发展趋势。

赢得发达国家市场认可

2022年,我国有6家整机企业向21个国家出口了风电机组,包括7个发达国家。这些国家中,有6个是我国在2022年前即成功实现出口的市场,包括:金风科技向德国发运5台机组,容量为20.5MW;向希腊发运2台机组,容量为5MW;向西班牙发运2台机组,容量为5MW;向澳大利亚发运16台机组,容量为72MW。远景能源向法

国发运26台机组,容量为66.125MW。明阳智能向意大利发运10台机组,容量为30MW。此外,还有1个国家是在2022年新开拓的,为奥地利,金风科技向其发运3台机组,容量为10.1MW。

如果说2022年我国整机企业在欧洲发达国家市场颇有建树,那么2023年可视为布局亚洲发达国家市场的关键时期。

据了解,2023年3月30日,我国首台出口日本的风电机组在天津港装船。它由明阳智能制造,机型为MySE3.0-135,采用半直驱紧凑型技术路线,搭载抗台风技术。此前的信息显示,明阳智能早在2022年2月就已经与日本EPC公司清水建设签署了协议。该风电项目位于日本富山县下新川郡入善町,共需3台机组,计划于2023年实现投运。

2023年,明阳智能又与韩国风电机组制造商、风力发电企业Unison签署了本地化合作协议,拟投资4000亿韩元(约合人民币20亿元)加强推进韩国和全球业务。据明阳智能的公开信息,这项合作包括新建风电机组机舱装配厂、叶片制造厂,开发与投资陆上及海上风电场等。虽然在国外建厂进行本地化生产并不能够算作整机出口,但可以实现此类合作,充分体现出我国风电整机企业的综合能力,表明其产品技术正在受到全球的广泛认可。

表1 截至2022年年底中国风电机组累计出口国家与容量(来源:CWEA)

国家	累计出口容量/ MW	国家	累计出口容量/ MW	国家	累计出口容量/ MW	国家	累计出口容量/ MW	国家	累计出口容量/ MW
越南	2781.55	巴西	295.5	瑞典	133.5	罗马尼亚	50	白俄罗斯	11.5
澳大利亚	1557.48	巴拿马	270	泰国	122	伊朗	49.5	奥地利	10.1
印度	882.3	塞尔维亚	238.5	乌兹别克斯坦	111.25	黑山共和国	46	荷兰	7.9
美国	758.85	加拿大	210	阿联酋	103.5	西班牙	43.5	波兰	7
哈萨克斯坦	623.76	土耳其	204.05	古巴	87.5	德国	43	芬兰	4.5
巴基斯坦	576.5	墨西哥	160	厄瓜多尔	72.5	菲律宾	40	摩洛哥	4
南非	451	克罗地亚	156	孟加拉国	66	俄罗斯	35	英国	3.75
阿根廷	414.6	乌克兰	144	波黑	54.6	希腊	31.3	丹麦	3.6
埃塞俄比亚	324	法国	142.9	保加利亚	51.5	塞浦路斯	20	玻利维亚	3
智利	321.94	意大利	135.1	肯尼亚	50	斯里兰卡	15	-	-

进入成熟市场的收获期

相比发达国家，我国整机企业进入发展中国家市场的时间更早。他们凭借丰富的适用场景、高效的发电能力、稳定的运行业绩，在不少国家已经站稳脚跟，持续获取订单。

以印度为例，到2022年我国已累计向该国出口风电整机882.3MW。2023年，我国风电整机对印度市场的出口势头更加强劲。5月，全球头部可再生能源投资商麦格里资产管理公司旗下持股公司印度Vibrant能源公司，计划从远景能源订购45台3.3MW风电机组，总容量达到150MW。这是继2023年第一季度连获印度4个风电项目总计1092MW的订单后，远景能源再次获得印度市场认可。6月，远景能源又从Serentica Renewables公司拿下350MW的机组供货合同。

哈萨克斯坦同样是我国整机企业较早进入的一个市场，到2022年已累计向其出口机组623.76MW。2023年3月31日，三一重能哈萨克斯坦阿尔卡雷克48MW风电项目首批机组部件顺利从霍尔果斯口岸启运。项目建设包括由三一

重能打造的10台4.8MW风电机组。一个多月后，国家电投中电国际与哈萨克斯坦能源部、萨姆鲁克·卡泽纳主权财富基金、三一重能又签署了1GW风电+储能的谅解备忘录。

2023年年初，金风科技与巴西圣弗朗西斯科水电公司合作的卡萨诺瓦二期项目正式签约。据了解，卡萨诺瓦项目群于2012年开始建设，共安装180MW海外品牌机组。2014年后，由于找不到合适的解决方案，项目停工5年之久。正是金风科技利用成熟、可靠的技术能力使项目重新焕发生机，牵动双方在卡萨诺瓦二期项目上结缘。

类似案例还有很多，如中国电建中南院在玻利维亚的布局，运达股份在塞尔维亚的布局，明阳智能在菲律宾的布局，都在2023年再度开花结果。

顺利打通“海外+海上”市场

在我国截至2022年年底累计出口的11929MW风电机组中，陆上风电机组有4112台，容量为11439.2MW；海上风电机组有112台，容量为489.8MW。出口海外的海上风电机组虽少，却意味

着部分整机企业已经获得“两海”市场的双重认可。

2022年，运达股份成功获得首个“海上风电+海外市场”项目——越南朔庄海上风电项目的供货合同。

2023年，明阳智能为日本富山县下新川郡入善町海上项目出口3台风电机组，不仅实现了我国风电整机在日本市场中“零的突破”，也成功推动我国风电顺利布局日本海上风电市场。

此外，明阳智能在2023年4月18日对外宣称，该公司已与巴西塞阿拉州政府签署谅解备忘录，携手推进海上风电项目建设。

菲律宾同样对中国海上风电设备与工程能力颇感兴趣。2023年6月，菲律宾参议长苏比瑞表示，当前全球化石燃料等能源的价格上涨，现在比以往任何时候都更需要超越“旧技术”，海上风电正是一条可行之路。中国能源企业在新能源领域拥有丰富的专业知识和发展经验，并享有良好声誉，希望他们未来在菲律宾建设更多的海上风电项目。

据了解，菲律宾能源部此前公布了《可再生能源法》的修改条款，允许外国可再生能源企业掌握百分之百的所有权。菲律宾能源部副部长罗薇娜·格瓦拉指出，目前有许多中国企业在菲律宾发展，但在海上风电建设方面并没有太多中国企业参与。希望《区域全面经济伙伴关系协定》(RCEP)对菲律宾生效后，能有更多中国投资者参与到菲律宾海上风电开发的行列中。

搭上一体化解决方案快车

近年来，不少国家制定了降排减碳、可再生能源开发与利用目标。国际市场，尤其是一些发达国家的绿色能源开发方式，正从单一的风电或光伏项目，向综合能源项目开发与利用转变。中国拥有成熟高效的可再生能源开发与利用技术，以及完备的产业生态链条，能够充分满足国际市场对综合能源项目开发的需求，从而通过一体化解决方案带动风电机组出口。

以摩洛哥为例，近年来该国政府持续加快新能源、海水淡化和氢能领域开发，并制定了可再

生能源发展规划，计划在2030年实现可再生能源发电占比52%；同时规划了海水淡化和氢能领域发展蓝图，加快能源结构转型。

2023年4月12日，中国能建国际建设集团与沙特阿吉兰兄弟公司和摩洛哥盖亚能源公司签署摩洛哥南部大区绿氢项目合作备忘录。这是继签署埃及绿氢项目合作开发备忘录后，中国能建发挥全产业链一体化优势，加强全球第三方市场合作，在海外新能源及“新能源+”市场开发取得的又一重要成果。

据了解，该项目位于摩洛哥南部大区沿海地区，主要包括建设一个年产量140万吨绿氨（约合32万吨绿氢）的生产工厂，以及配套的2GW光伏、4GW风电项目建设和后期运维等。

携手应对欧洲能源危机

近些年，中国风电整机企业布局国际市场的行动，总体而言机遇大于挑战。一方面，有欧洲整机企业的产品出现了一定质量风险，在某种程度上为中国风电整机企业进一步扩大欧洲风电市场份额创造了机会。另一方面，2022年年初爆发的俄乌冲突，导致欧洲出现能源危机，不少国家开始寻求能源的自给自足，结合低碳发展理念，将能源开发方向更多地集中在可再生能源领域。

中国风电拥有完备且极具成本竞争力的全产业链条，且掌握了全球领先的风电技术。与中国风电企业携手开发本国风能资源，以保障能源安全，在一些具备风能开发条件的欧洲国家看来，是在摆脱能源危机的同时实现绿色发展的最优解。

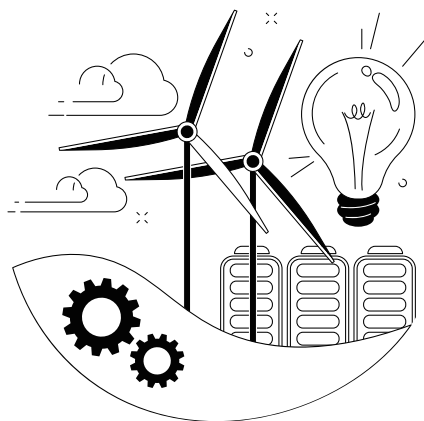
以北马其顿为例，由于该国存在电力不足情况，不得已在2022年9月实施了为期30天的全国电力供应危机状态。北马其顿政府正持续加大对新能源的支持力度，以提高能源供应的稳定性，摆脱能源短缺问题。2023年1月，金风科技成功签约北马其顿43.2MW风电项目。据了解，该项目将使用9台金风科技GW155-4.8MW智能风电机组，是当地单机容量最大和装机规模最大的风电项目。📍



风力发电
转出美好未来

2024年全球可再生能源发电量或将超过煤电

编译 | 夏云峰



日前，国际能源署（IEA）发布《2023年电力市场更新报告》（*Electricity Market Report Update 2023*），展示了2022年全球电力市场的最新数据，以及对2023年和2024年全球电力需求、供应和排放的预测等。报告指出，如果天气条件有利，全球可再生能源发电量最早可能在2024年超过煤电。

2023年全球电力需求增长将放缓

2023年，预计全球电力需求增长将放缓，增长率略低于2%，不及2022年的2.3%和2015—2019年的年均2.4%。这主要是由发达经济体的电力需求下降导致的，这些经济体正在艰难应对全球能源危机和经济增长乏力造成的持续影响。2024年，随着对经济前景预期的改善，全球电力需求有望增长3.3%。

2023年，欧盟的电力需求将连续

第二年下降，降至20年来的最低水平。继2022年下降3%之后，2023年欧盟电力需求的降幅预计再次达到3%，降至2002年的水平，创下该地区有记录以来电力需求的最大降幅。

2023年上半年欧盟电力总需求同比下降6%，这表明欧洲的能源密集型行业尚未从上一年产量的下滑中完全复苏。据估计，2022年欧盟电力需求净减少量中的近三分之二源于能源密集型行业，它们正努力应对能源价格的上涨。尽管能源商品和电力价格已从历史高点回落，但这一趋势会持续到2023年。面对其他国家纷纷出台旨在吸引工业投资的政策给欧洲工业竞争力带来的压力，欧盟正处于十字路口。目前正在进行的政策讨论的结果，可能将决定欧盟能源密集型工业部门的未来。

发达经济体电力需求的大幅下降，与中国、印度等新兴经济体的增长形成鲜明对比。2023年，日本的电力需求预计将下降3%，美国会下降近

2%。相比之下，2023年中国的电力需求有望增长5.3%，2024年将增长5.1%，略低于2015—2019年的年均增长率（5.4%）。展望期内，印度的电力需求年均增长率将达到6.5%，超过2015—2019年的年均增长率（5.2%）。

可再生能源发电量将超过煤电

IEA于2022年12月发布的《2022年可再生能源》（*Renewables 2022*）报告曾预计，到2025年年初，可再生能源发电将取代煤电成为全球最大的电力来源。最新的分析表明，若天气条件有利，这一时刻最早可能在2024年到来，因为全球可再生能源装机容量提速，以及煤电发展停滞不前。2022年，全球煤电发电量增长了1.7%，这得益于许多地区因天然气价格居高不下而减少使用天然气，改用煤炭。然而，预计2023年和2024年全球煤电发电量将略有下降，这是由于亚洲的增长会被美国和欧洲的大幅下降所抵消。

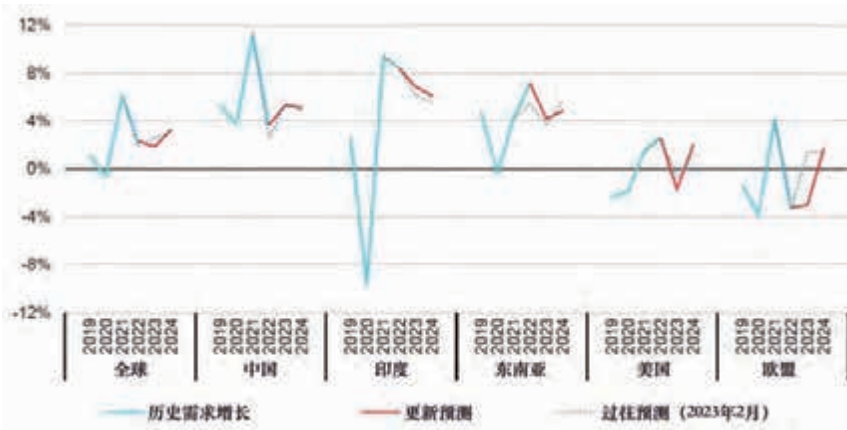


图1 2019—2024年全球及部分地区的电力需求增长率变化

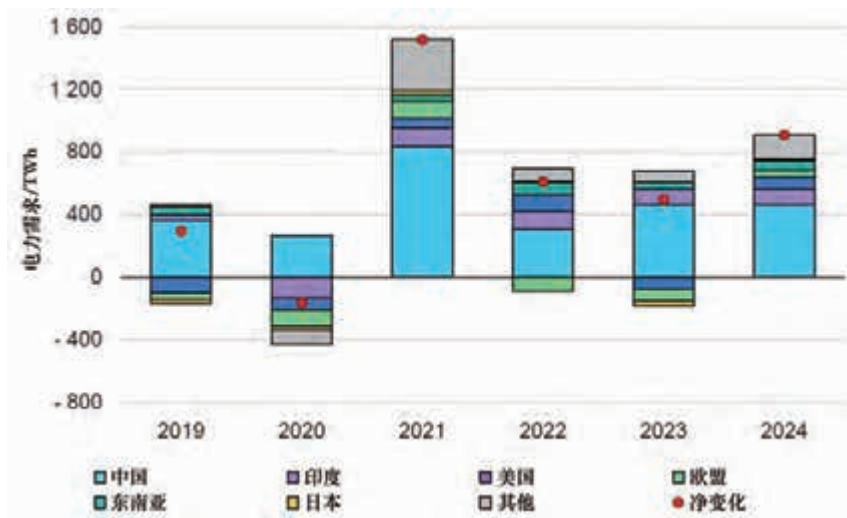


图2 2019—2024年部分地区的电力需求变化

2022年，全球可再生能源发电量增长了7.8%，是过去30年的最大增幅。2023年，考虑到部分地区的水力发电量因反复发生的干旱而减少，全球可再生能源发电量的增长率将略低于7%；2024年会增长11%，这得益于风电和太阳能发电机的持续扩张，以及各地区的水电有望得以恢复。到2024年，可再生能源发电量在全球电力供应中所占的份额将历史首次超过三分之一。随着2023年全球电力需

求增长放缓，可再生能源在2023年和2024年将能够满足全部的新增电力需求。

化石燃料发电量的下降正在成为结构性的。到2024年，全球化石燃料发电量将再度下降，这是六年内的第四次。在2022年增长1%之后，全球化石燃料发电量将在2023年与2024年分别下降0.6%和1.2%。过去，全球化石燃料发电量的下降是较为罕见的，主要发生在重大能源和金融危机

抑制总体电力需求之时，如20世纪70年代的石油危机后期及2009年经济大衰退期间。然而，近年来即使整体电力需求有所增长，全球化石燃料发电量也一直处于停止增长或下降中。

2019年，全球化石燃料发电量出现负增长，因为温和的天气抑制了需求的增长，且有利于可再生能源发电。2020年，受新冠肺炎疫情阻滞经济发展的影响，全球化石燃料发电量大幅下降。2021年，全球化石燃料发电量增长6%，2022年则仅略有增长。预计2023年和2024年全球化石燃料发电量将连续下降，同期可再生能源发电量会继续强劲增长。最近的需求和发电趋势表明，世界正加速走向一个临界点，全球化石燃料发电量将不断下降，因为它会越来越地被清洁能源取代。

电力部门碳排放量将略有下降

在2021年增长7%之后，2022年全球电力部门碳排放量仅增长了1.3%。随着化石燃料发电量的下降，预计2023年和2024年的碳排放量将下降约1%。煤电发电量下降是主要驱动因素，与之相关的二氧化碳总排放量会减少约1.4亿吨。石油紧随其后，共减少1亿吨二氧化碳排放。天然气发电的二氧化碳总排放量变化预计将接近零，因为2023年的小幅增长会被2024年的下降所抵消。

到2024年，全球电力部门碳排放增长将主要发生在中国和印度，因为这两个国家会进一步增加煤炭的使用量。然而，这部分增长有望被其他区域碳排放量的减少所抵消。由于化石燃料发电量将大幅下降，欧盟电力

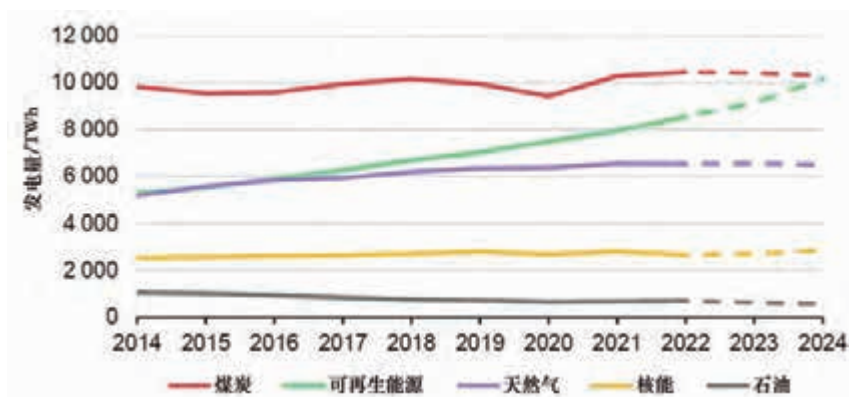


图3 2014—2024年全球各类电源的发电量

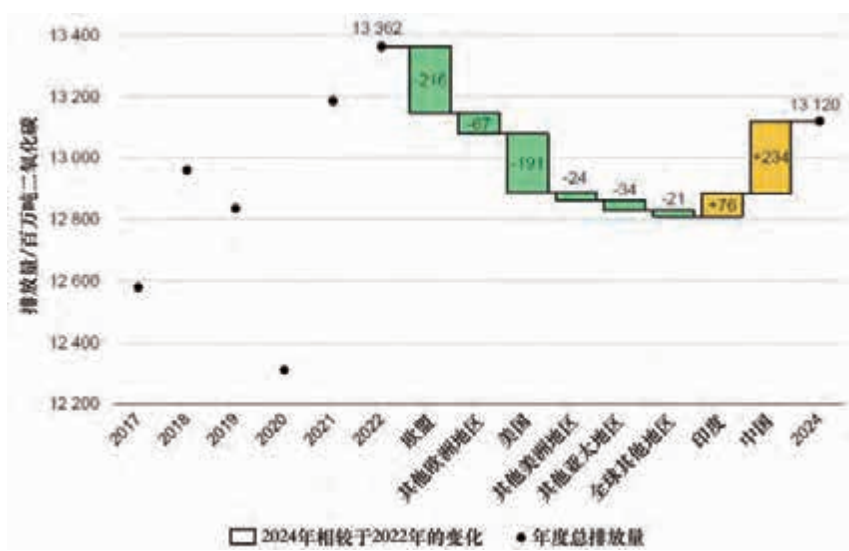


图4 2024年相较于2022年各地区电力部门碳排放量变化

许多地区的批发电价仍在上涨

伴随紧张的市场状况逐步缓解，天然气和煤炭等能源商品的价格从2022年第三季度的历史高点下跌，这导致批发电价从2022年第四季度开始下跌，并一直持续到2023年。尽管如此，与2021年前的水平相比，全球众多地区的电价仍处于上涨中。以欧洲为例，2023年上半年该地区的平均批发电价只有2022年历史峰值的一半，但依然是2019年的两倍多。2023年上半年印度的平均批发电价仍比2019年的水平高出80%，日本则高出30%。相比之下，美国的平均批发电价几乎已经回落至2019年的水平。

2023年夏季，欧洲电力市场的一大特征是批发电价有时降至负值。与2022年同期相比，2023年上半年德国和荷兰等欧洲国家的电价降至零以下的小时数翻了一番。这是由于在需求大幅减少的情况下，可再生能源发电强劲。在其他市场，如可再生能源渗透率非常高的南澳大利亚，这一趋势更加明显。在2022年的近20%时间中，当地批发电力市场的价格都是负值，而德国和荷兰的这一比例不足1%。负电价意味着系统的灵活性不足，发电侧不够灵活，需求侧对价格反应不足，或者没有足够的存储来进行能源套利。负电价由此释放出一种价格信号，要求增加对相关解决方案和技术的投资，以改善系统的灵活性。

在这种情况下，更新监管方案以鼓励柔性负荷运行 (flexible load operation) 就变得至关重要。提高需求侧价格响应能力的途径包括：通过虚拟发电厂增加数字化和聚合需求灵活性；电动汽车的分时电价和智能充电。🔌

行业碳排放减少量会占全球（不含中国和印度）的40%。美国紧随其后，原因在于煤改气的势头强劲，以及可再生能源的增长。出于同样的原因，其他地区的电力部门碳排放量也将下降。虽然极端天气、强烈的经济冲击、政府政策可能会导致个别年份的碳排放量有所上升，但全球电力部门碳排放量整体上会趋于平稳，个别年份碳排放量下降的趋势将变得更加频繁。

尽管到2024年，全球电力部门

的碳排放量将趋于平稳并略有下降，但其排放强度会以更快的速度下降，预计2023年将下降3%，2024年下降4%，是2014—2024年碳排放强度的最大降幅。2022年，燃煤发电量的增加使得欧盟成为唯一一个电力部门碳排放强度同比增长(+7%)的主要地区。然而，随着未来两年化石燃料发电量有望大幅下降，欧盟的电力部门碳排放强度将是大型能源消费地区中下降速度最快的（年均17%）。

CHINA
WINDPOWER
2023 17 - 19 October
Beijing, China



储能与氢能主题馆

2023北京国际风能大会暨展览会

2023年10月17-19日 中国国际展览中心（顺义馆）

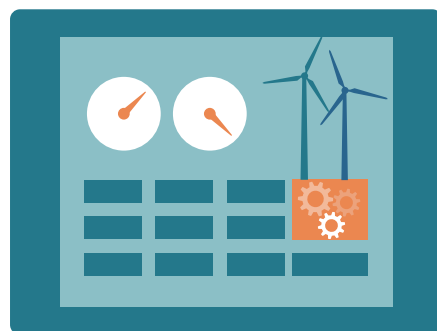
咨询热线 | 010-88558102
010-88558113



官方微信 CWPBEIJING

2022年全球陆上风电度电成本降至0.242元/千瓦时

编译 | 叶无极



国际可再生能源署（IRENA）近日发布的《2022年可再生能源发电成本》（*Renewable Power Generation Costs in 2022*）报告显示，化石燃料价格危机进一步增强了可再生能源的竞争力。在2022年投运的公用事业规模

可再生能源发电项目中，约86%（1.87亿千瓦）的发电成本低于化石燃料发电。2022年，与化石燃料发电相比，全球范围内自2000年以来部署的可再生能源发电装机仅在电力部门就节省了5200亿美元（约合人民币3.8万亿

元）的成本。

2022年，尽管材料和设备成本不断上涨，但全球公用事业规模太阳能光伏、陆上风电、聚光太阳能发电（CSP）、生物质能、地热能新增装机的度电成本均有所下降。其中，陆上

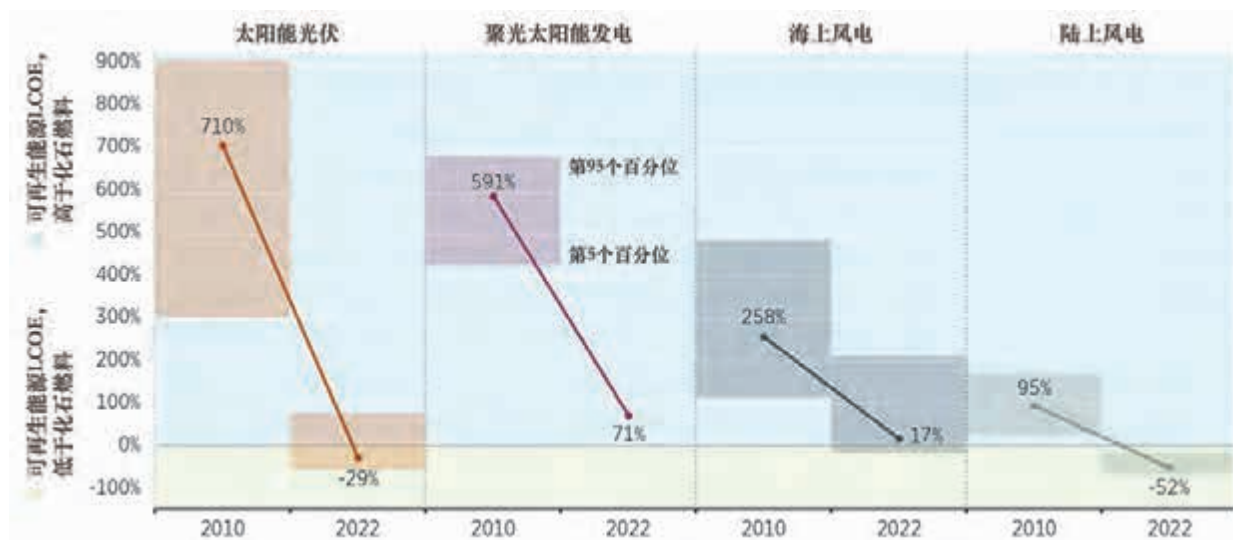


图1 基于度电成本的全球太阳能光伏和风电竞争力变化

风电新增装机的度电成本同比下降了5%，从0.035美元/千瓦时（约合人民币0.257元/千瓦时）降至0.033美元/千瓦时（约合人民币0.242元/千瓦时）；太阳能光伏下降了3%，至0.049美元/千瓦时。

在过去的13至15年中，全球太阳能和风能等可再生能源的发电成本一直在下降，2021—2022年则是过去20年全球可再生能源竞争力提升最快的时期。2010—2022年，即使没有财政支持，太阳能光伏和风电也具有可与化石燃料相比的成本竞争力。2022年，全球陆上风电度电成本为0.033美元/千瓦时，略低于最便宜的化石燃料发电成本的一半。

随着成本的大幅下降，除了环境效益，2022年的化石燃料价格危机提醒人们，可再生能源还可以在保障能源安全的同时，产生巨大的经济效益。

预期的高化石燃料价格将进一步巩固可再生能源发电成为成本最低的新一代发电来源的结构转变，进而削

弱现有的化石燃料发电。可再生能源可以保护消费者免受化石燃料价格冲击，避免实物供应短缺，增强能源安全。

事实上，与关注化石燃料实物供应的能源安全政策不同，可再生能源通过减少对化石燃料的需求和进口，降低了受化石燃料价格内在波动影响的经济成本。如果没有过去20年间可再生能源的部署，2022年化石燃料价格冲击对经济的破坏将会严重得多，许多国家的政府可能无法使用公共资金来加以缓解。简而言之，化石燃料的替代品，如可再生能源和能源效率，在其生命周期内具有稳定的成本，且可以迅速部署，提供了迄今为止最大的能源安全保障。

具有成本竞争力的可再生能源在解决当今能源和气候危机方面发挥着关键作用，通过加速过渡以达到1.5°C的温升要求。可再生能源是各国迅速减少并最终淘汰化石燃料、限制其在实现净零排放过程中造成的宏观经济损害的重要支柱。

过去两年的经验改变了利益相关者对化石燃料市场价格预期的理解，也表明了依赖化石燃料发电的国家的脆弱性。除了节省成本，减少二氧化碳排放和当地空气污染物同样带来了可观的经济效益。

在陆上风电方面，2010—2022年，全球陆上风电累计容量增长了近5倍，从1.78亿千瓦增至8.37亿千瓦。同期，全球陆上风电加权平均总安装成本下降了42%，从2179美元/千瓦降至1274美元/千瓦。

陆上风电成本的降低主要由两个关键因素推动：风电机组成本的下降、风电机组技术进步带来的容量系数增加。

设备制造商通过平台化模式，优化适合各种场址的风电机组配置，分摊了大量风电机组的开发成本。根据风电机组价格指数，2010—2022年，全球（不含中国）的风电机组价格下降了39%~55%，中国风电机组价格的降幅达到64%。

1998—2022年，中国陆上风电

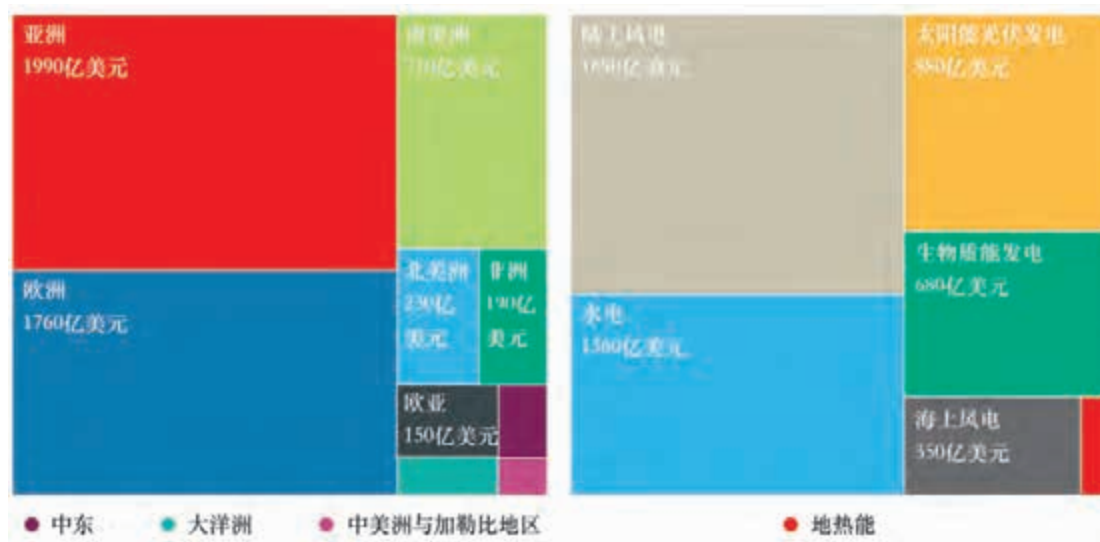


图2 2022年全球电力部门通过可再生能源替代化石燃料节省成本5210亿美元



图3 2021—2022年全球公用事业规模可再生能源新增装机的度电成本变化



图4 2010—2022年全球公用事业规模可再生能源新增装机的度电成本变化

机组的价格下降了 89%，从 2800 美元 / 千瓦降为 320 美元 / 千瓦。2022 年，全球（不含中国）陆上风电机组的平均价格介于 870~1066 美元 / 千瓦，高于 2021 年。尽管如此，大多数

地区（不含中国）2022 年的陆上风电机组价格较 2008 年和 2009 年的峰值，分别下降了 49% 和 64%。

在多数市场中，依靠更先进、更高效的风电机组技术与更大的风轮直

径和轮毂高度，可以获得更多能量输出，带动容量系数上升。事实上，1984—2022 年，全球陆上风电加权平均容量系数增长了 93%。

在中国风电机组成本持续下降的

表1 2010—2022年各类可再生能源的总安装成本、容量系数和度电成本走势

	总安装成本			容量系数			度电成本		
	美元/千瓦			%			美元/千瓦时		
	2010	2022	百分比变化	2010	2022	百分比变化	2010	2022	百分比变化
生物质能	2 904	2 162	-26%	72	72	1%	0.082	0.061	-25%
地热能	2 904	3 478	20%	87	85	-2%	0.053	0.056	6%
水电	1 407	2 881	105%	44	46	4%	0.042	0.061	47%
太阳能光伏	5 124	876	-83%	14	17	23%	0.445	0.049	-89%
聚光太阳能发电	10 082	4 274	-58%	30	36	19%	0.380	0.118	-69%
陆上风电	2 179	1 274	-42%	27	37	35%	0.107	0.033	-69%
海上风电	5 217	3 461	-34%	38	42	10%	0.197	0.081	-59%

表2 2010年与2022年主要地区陆上风电度电成本

	2010			2022		
	第5个百分位	LCOE	第95个百分位	第5个百分位	LCOE	第95个百分位
	美元/千瓦时					
非洲	0.070	0.073	0.096	0.044	0.046	0.051
中美洲与加勒比地区	0.096	0.096	0.096			
欧亚	0.135	0.135	0.135	0.042	0.052	0.071
欧洲	0.090	0.137	0.206	0.029	0.045	0.059
北美洲	0.070	0.109	0.148	0.025	0.029	0.047
大洋洲	0.121	0.136	0.148	0.027	0.033	0.042
亚洲其他地区	0.113	0.155	0.169	0.038	0.055	0.145
南美洲其他地区	0.096	0.112	0.145	0.034	0.053	0.063
巴西	0.116	0.116	0.116	0.017	0.024	0.030
中国	0.071	0.087	0.110	0.024	0.027	0.035
印度	0.060	0.096	0.119	0.032	0.037	0.042

表3 2010年与2020年主要地区海上风电度电成本

	2010			2022		
	第5个百分点	LCOE	第95个百分点	第5个百分点	LCOE	第95个百分点
	美元/千瓦时					
亚洲	0.129	0.190	0.210	0.062	0.085	0.152
中国	0.126	0.189	0.208	0.061	0.077	0.092
日本	0.200	0.200	0.200	0.221	0.221	0.221
韩国	n.a.	n.a.	n.a.	0.141	0.191	0.240
欧洲	0.135	0.200	0.235	0.058	0.074	0.113
比利时	0.238	0.238	0.238	0.087	0.088	0.090
丹麦	0.114	0.114	0.114	0.043	0.043	0.043
德国	0.187	0.189	0.196	0.059	0.078	0.078
荷兰	n.a.	n.a.	n.a.	0.058	0.058	0.058
英国	0.210	0.219	0.227	0.060	0.064	0.067

推动下，2022 年全球风电机组成本较 2021 年下降了 10%。然而，加拿大、法国、德国、印度、日本、土耳其及许多较小的市场，受风电机组价格上涨的影响，其项目成本在 2022 年有所上升。

2022 年，全球陆上风电总安装成本约为 1052~1918 美元 / 千瓦，巴西、中国、印度、瑞典和美国的总安装成本低于全球平均水平。

2022 年，中国再次成为全球陆上风电新增装机容量最多的国家，在全球陆上风电新增装机容量中的份额从 2021 年的 41% 上升到 2022 年的 50%，使得安装成本较高的市场的份额相较于 2021 年有所下降。

2010—2022 年，全球陆上风电度电成本下降了 69%，从 0.107 美元 / 千瓦时降至 0.033 美元 / 千瓦时。如果将中国排除在外，这一时期其他地区

陆上风电的度电成本将与之前持平。

就海上风电而言，2010 年中国和欧洲新投产海上风电项目的度电成本分别为 0.189 美元 / 千瓦时和 0.2 美元 / 千瓦时；2021 年，欧洲新投产海上风电项目的度电成本为 0.056 美元 / 千瓦时，低于同年中国的成本——0.083 美元 / 千瓦时。2010—2022 年，全球新投产海上风电项目的度电成本从 0.197 美元 / 千瓦时下降到 0.081 美元 / 千瓦时，降幅为 59%。

全球海上风电总安装成本和度电成本的降低，总体上是由技术进步与产业日益成熟推动的。全球海上风电加权平均总安装成本从 2021 年的 3052 美元 / 千瓦，增加到 2022 年的 3461 美元 / 千瓦，其中的部分成本上升被新投产项目的容量系数提高所抵消。技术的进步——包括更大的机组、更长的叶片、更高的轮毂高度，以及固定

式机组基础的改善、风电场向深远海发展从而获得更好的风能资源，使得全球海上风电加权平均容量系数得以增加，从 2010 年的 38% 上升到 2017 年的 45%，再到 2022 年的 42%。

海上风电具有规模经济的优势。2010—2022 年，全球海上风电项目的平均装机规模增长了 149%，从 13.6 万千瓦增至 33.9 万千瓦。自 2020 年以来，全球已经有多个海上风电项目的装机规模超过了 100 万千瓦。与此同时，海上风电机组单机容量更大，输出更稳定。

此外，不断积累的开发经验、更广泛的产品标准化、制造业的工业化、区域制造业和服务中心的建立，以及规模经济，都推动着海上风电总安装成本和度电成本的下降。明确的部署政策，同样对这些方面起到了促进作用。📍



哈电风能有限公司

HARBIN ELECTRIC CORPORATION WIND POWER CO., LTD.

绿色能源
系统方案服务商

www.hewp.com.cn



Industry

Technology



风电整机“三次物流”精益管理实践

文 | 杨兆忠

伴随风电机组产品型谱的不断丰富，以及市场开拓力度的不断增强，某公司的市场项目订单量有了较大幅度增加，且未来五年将继续保持增长。为满足“十四五”期间的发展战略需要，亟需进一步提升风电机组产品的产能，而这会导致更大库存空间需求及更高库存资金占用。此外，随着风电机组朝着大型化与定制化的方向快速迭代，零部件尺寸和重量越来越大、品种越来越多，零部件存储空间和库存金额占用均有大幅增长的需求。

目前，部分风电整机商存在物流管理比较粗犷的问题，如缺乏明确的分类分级库存控制策略，导致库存居高不下，缺料频发，物料占用大量的线边空间，找料难，极大影响了工人的装配效率；无法精准控制物料配送时机，造成装配等待等资源浪费。在该物流管理策略下，产能提升困难，无法有效降低制造成本。

为了在大幅提升产能、降低零部件库存面积及资金占用需求的同时，解决此前存在的物流管理问题，某公司启动了“三次物流”精益管理实践工作。本文针对这一实践经验，围绕物流配送管理方式和物流容器、设备开发等方面，对该管理模式包括的一次物流、二次物流、三次物流分别需要采取的有效措施进行了具体阐述，并简要概述了实践效果，以期为行业相关企业提供参考和借鉴。

“三次物流”精益管理模式实践方法

“三次物流”目前在汽车行业应用较为广泛，具体概念如下：(1) 一次物流，又称为入厂物流或采购物流，是连接一级供应商与装配企业之间物料供应的重要活动，是企业生产连续稳定进行的重要保证；(2) 二次物流，又称为厂内物流或生产物流，包含物料的入库、保管、分拣及

配送等活动；(3) 三次物流，又称为成品物流或厂外物流，在风电行业是指机舱或轮毂等半成品（成品为在风电场组装的风电机组）入库后的物流操作活动总称。

风电机组生产涉及的物料较多¹，各类物料因属性各异，不应统一采用相同的仓储及物流管理，而应该根据物料的属性制定相应的物料管理。本文采用了“ABC分类法”²对风电机组物料进行了分类分级管理，根据物料的价值、体积及重量将其分为三个大类和六个小类，具体分类方式如表1所示。

在综合评估风电机组物料的供需关系、供应商地域分布、物料品质水准、运输成本及供应商服务水平后，结合物料分类方式制定了各类物料对应的三次物流，如图1所示。

一、一次物流环节采用“推拉结合”实现物料的有效供给

A类物料一般为重大件（重量在5t以上，占地面积达2m²以上），因须使用行车搬运，存在搬运不便问题。为了降低重大件二次搬运的物流强度，其库位一般设置在工位旁边，即采用线边库存。此外，因A类物料的价值特别高（单价6万元以上），若保留过多的库存会带来库存资金占用极高的问题。为了严格控制重大件的库存，同时降低线边库面积，需要通过综合考量工厂的产能及生产/仓储面积，在工艺布局中明确重大件的线边库位置及最大存储数量。为了减少二次搬运次数，重大件的补料由供应商直送线边库，物料被消耗形成空仓后通过SRM（Supplier Relationship Management）系统向供应商发送补料指令，即形成“空仓拉动”。针对A类物料采用“线边存储、线边消耗”模式导致仓库无法及时获取物料消耗信息的问题，某公司基于MES（Manufacturing Execution System）自主开发了“线边库物料反冲过账”功能，以实时获取物

1: [美]Tony Burton等. 风能技术[M]. 武鑫等. 北京: 科学出版社, 2007.
2: 刘秋平, 刘敏. 物流管理基础[M]. 北京大学出版社, 2007.

表1 风电机组物料分类方式

大类	大类描述	小类	小类描述	项数占比	价值占比	物料举例
A	重大件及贵重件	AA	战略重大件	4%	90.8%	轮毂体、主齿轮箱
		AB	重大件			后机架、机舱罩
		AC	箱装贵重件			主轴承、滑环
B	普通件	BA	战略普通件	36.1%	9.1%	偏航限位开关
		BB	普通件			提升机、网格地板
C	低价值件	C	低价值件	59.9%	0.1%	螺栓、扎带

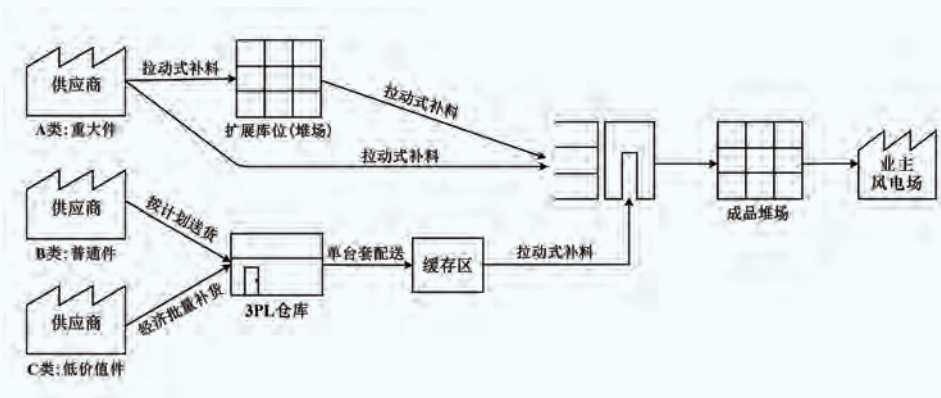


图1 三次物流模式

料的消耗情况。A类物料均为序列号追溯件，在消耗前均需在MES中进行扫码确认，通过MES中定时任务程序调用SAP（System Applications and Products）过账接口进行序列号追溯件的反冲过账，在物料实际消耗完成后，物控员可通过查询“线边库自动过账信息”界面实时核查A类物料的消耗信息，并及时通过SRM系统向供应商下达重大件的补货计划，实现空仓拉动信息的及时传递。此外，战略重大件因供给严重不足，该公司在工艺布局图中设定的最大线边库存数量基础上额外在园区堆场/外租仓库设定了扩展库位用作战略库存的存储库位，战略重大件的空仓拉动信息从线边库向扩展库及供应商逐级传递。

B类物料按“2+1”月滚动排产计划进行备料，即按项目需求备2至3个月物料库存，供应商按计划进行送货。此类物料一般设置有最大库存限额，当物料数量不小于最大库存数量时，不再进行补料。部分供给存在不足的A类

物料为战略普通件，因其体积较小，可预留足够库位进行存储，在不超出全年项目需求的前提下采用了“应收尽收”的库存策略。

C类物料因普遍价值低且体积小，一般设置有安全库存数量。若物料被消耗至低于安全库存这一“低水位”库存水平后自动触发新的采购需求，且一般按经济批量进行采购与物料补给。

二、二次物流环节通过裸件成套配送满足生产配套需求

某公司目前采用固定工位式生产模式装配风电机组产品，配套采用了“单台套裸件配送”的二次物流模式³。B类物料和C类物料均按单台套进行拣选与配送，拣配时去除防护包装以满足裸件上线的需要。B类和C类物料按3天用量提前拣选并配送至缓存区（仓库拣配后发送至工位之前的物料存放区域），生产工位根据装配需求在MES内

3: 罗韦小, 王韬, 姚创柳, 等. 基于精益生产的SPS物流配送应用研究[J]. 装备制造技术, 2020(9): 188-190+197.

通过物料呼叫拉动缓存区进行补料。

为配合单台套裸料配送物流模式的开展，设计了一系列单台套裸料配送物流容器，如图 2 所示。

单台套包装投入使用前，物流为集中配送，装配工需要从堆积的物料中找到其所需的物料，且需要额外拆除物料的外包装，极大地影响了装配作业效率。据统计，装配前的找料和拆包装作业约占装配作业总时长的 33%。单台套包装消除了生产装配工的找料和拆除物料包装等不增值作业，提高了生产装配作业的效率。

某公司还在部分物料的物流容器设计上进行了一次取料的相关改善，如取消了装配过程中轮毂控制柜柜体的翻转作业，实现了物料的一次取料作业（图 3）。

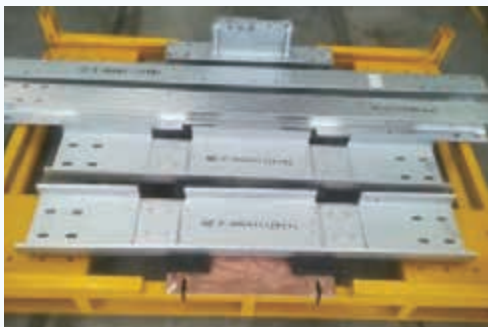
同时，为配合单台套裸件配送物流模式的开展，某公

司利用自主掌握的 MES 开发能力对 MES 物流模块进行了功能重构，开发了“按物料包进行二次分配物料”“单台套拣配的物料单据流管理”等系统功能。单台套拣配单据流转流程如图 4 所示。

此外，在仓库与工位间还引入了“缓存区”这一中间管理层，从而将仓库与工位间的“多对多”信息流与实物流模式转换成缓存区与仓库 / 工位间的“一对多”信息流与实物流模式，可有效管理二次物流的信息集散与传递，方便物控员进行有效的实物齐套检查管理。

三、三次物流环节以力保发货为目标提升产品交付服务水平

为确保按项目需求及时发货，某公司在每个工厂均配备具有一定存储能力的成品重型堆场，用于调节并应对客



(a) 机架物料配送容器



(b) 线缆配送容器



(c) 主传动物料配送容器

图2 单台套配送物流容器



(a) 改善前：柜体需进行翻转



(b) 改善后：实现“一次取料”

图3 轮毂控制柜“一次取料”物流容器改善

户发货需求时间的波动，确保在客户的发货需求确定后第一时间将产品发运至相应风电场。

为确保成品安全、高效地转运至堆场，引进了新型的成品搬运技术。机舱成品采用重载 AGV 直接从生产线搬运至堆场，经过对园区道路和物流门进行改造，确保了载运机舱成品的 AGV 能够从生产线直接到达堆场。轮毂成品的搬运则使用了港口常用的正面吊。某公司与徐工集团合作开发了目前国内最大吨位的风电产品专用正面吊。该吊具专门针对风电机组轮毂总成进行设计，能满足快速搬运轮毂成品的要求且具备防摇摆功能。机舱成品转运方式如图 5 所示，轮毂成品转运方式如图 6 所示。

风电产品具备超重、超长、超宽、超高等超限货物特点，

而超限运输受道路通行能力、道路交通管控及天气等情况影响，存在运输周期长、突发情况多等问题。为确保产品按时发往目标风电场，某公司打造了一套大件设备运输管理系统，对从运输司机到达工厂开始至货物到达风电场完成签收结束的整个过程进行了透明化、可视化的追踪管控，对运输车辆及司机信息、装车过程、装车完成后产品的状态、运输过程中车辆及产品的状态、车辆行驶轨迹、车辆当前所在位置、货物签收情况等成品发运全过程均进行了追踪管理。针对运输途中出现的异常情况(如车辆停滞不前、货物出现损坏等)，该系统也可设定相应的报警机制，确保运输管理部门及时掌握运输过程中出现的异常情况，并启动相应应急处理机制，确保产品及时发往客户现场。

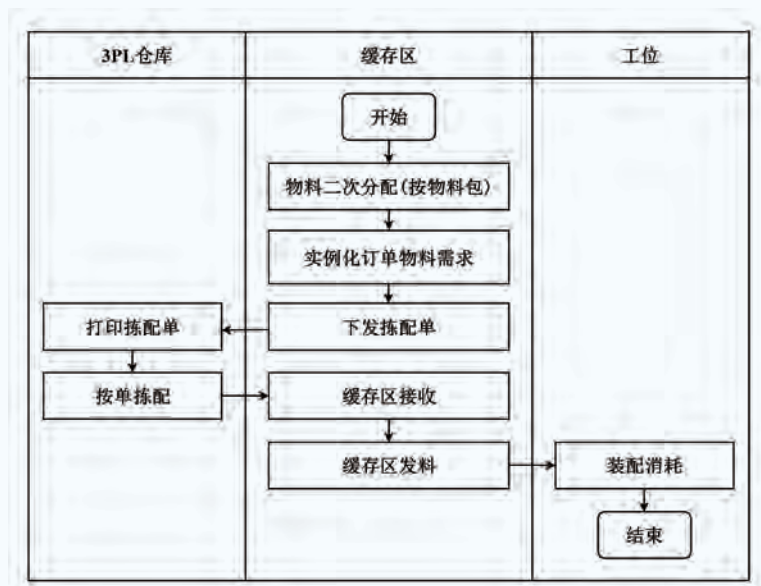


图4 单台套拣配单据流转流程



图5 机舱成品转运方式



图6 轮毂成品转运方式

“三次物流”精益管理模式应用效果

实践结果表明，“三次物流”精益管理模式不仅大幅提升了物流管理水平，还有效降低了制造成本，增加了制造产能，满足市场交付需求。

一、物流管理水平大幅提升

通过将物流逐渐由原来的粗放式管理变革为精益化管理方式，该公司项目实施过程中完成了4项配套管理制度的建设，输出管理文件十余份，初步建成标准化精益物流管理体系。

二、创造出显著的经济效益

在一次物流环节，通过减少重大件的二次搬运，2021年总计节省物流搬运用约31万元；在二次物流环节，通过采用储运一体化循环包装替代木制包装实现包装成本降低约3万元/年；在三次物流环节，通过生产与发货的协同管控机制将成品的二次转运次数降低了65%，当年累计降本108.09万元。

三、配合产线完成年度产能提升目标

“三次物流”精益管理实践配合精益生产线的建设，实现了风电装备产能的大幅提升。通过与精益生产线建设项目的同步开展，某公司将风电装备的月产能由90台提升至140台，产能提升率高达55.6%，全面达成年度产能提升目标。

四、提升了客户满意度

通过整体提升产品交付能力，以及在三次物流环节以力保发货为目标提升产品交付服务水平所开展的一系列管理优化工作，某公司的品牌影响力有了进一步的提升，客户满意度有了明显的提高。

未来展望

未来，随着风电行业的快速发展，某公司将继续借鉴并引入汽车行业这一制造业标杆行业的先进管理经验，进一步完善风电产品的“三次物流”管理模式，并推进整个风电行业供应链的管理模式改善与优化。未来，预计主要开展以下几方面的工作：

一、物流评审体系实践

引入汽车行业广为应用的MMOG/LE (Materials Management Operations Guideline/Logistics

Evaluation, 全球物料管理运作指南/物流评估), 对物流流程管理、物流信息系统应用、各类物料的厂内物流运作、差错率与满意度、物流可追溯性、物流自动化、物流风险管理及应急响应机制、物流可持续发展等进行综合诊断, 借此进一步完善“三次物流”管理模式, 不断夯实物流基础, 逐步消除物流全流程的断点, 提升物流运营管理水平。

二、循环包装推广

目前, 某公司已在二次物流环节推行循环包装器具, 未来会将其推广延伸至一次物流环节, 从供应商发货开始至整机商消耗结束全程采用“运包一体化”的循环包装器具, 通过规范器具尺寸链、开展可折叠化回收设计及统一搬运接口等手段, 实现物流总成本的降低。

三、物流自动化应用

目前, 某公司已具备良好的厂内物流自动化推进基础(如单台套裸件配送和器具化包装管理)。未来, 将逐步导入大件物料配送AGV、单台套物料配送AGV、搬运机械人等物流自动化设施, 通过设施规划和智能物流系统的协同拉通实物流通的价值链, 消灭物流过程中的停顿、浪费、人工搬运、人工确认, 实现逻辑化配送与流通, 做到全过程无断点。

四、数字化物流信息平台整合

此前, 某公司与其他制造型企业类似, 根据不同时期、不同部门的信息化需求引入了ERP、MES、WMS、TMS等软件系统, 但这些系统却难以形成全面且有效的功能覆盖, 系统孤岛依然存在。这些独立的、分散的系统越来越难以满足“大交付、大物流、小生产”运营模式的需求, 亟需进行数字化整合。

未来, 某公司将在进一步梳理物流与供应链管理流程、完善各项物流基础参数及梳理物流数据逻辑关系的基础上, 利用自主掌握的开发能力(SCADA系统自主建设能力、MES自主运维与二次开发能力)和外部资源, 对现有生产与物流信息系统进行数字化整合, 建立推拉结合的以交付为中心的数字化物流管理平台, 实现实物流与信息流的协同。围绕以交付为中心的业务需求, 拉动以物流为载体的价值链, 将智能化生产设施、物流设备、监控设施、人员等嵌入式地布局在整个物流供应链中, 并由此统一设定运营参数和KPI, 打造一套符合“大交付、大物流、小生产”工厂运营模式的数字化物流信息平台。✎

(作者单位: 中车株洲电力机车研究所有限公司)

南高齿



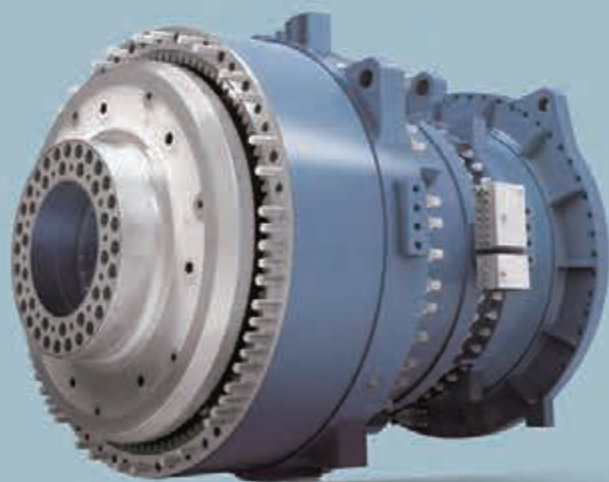
大功率机型平台化高质量发展，覆盖高速齿轮箱、中速齿轮箱及集成传动链。



平台产品：CMG605A
额定功率：13.5-15MW



平台产品：CMG502A
额定功率：9.X-10MW



平台产品：CMG455A
额定功率：8.5-9.XMW

基于湍流度的风电机组动态柔性控制技术

文 | 牛成, 倪维东, 刘建爽, 王云涛, 张志强

目前, 风电机组的控制算法是根据静态仿真计算进行设计, 机组的额定转速、额定功率、变桨转矩等关键控制参数一旦确定就无法更改。由于控制算法没有考虑仿真情况和实际风电机组运行环境的差异, 以及不同机位之间外部环境的差异, 因此, 机组在实际运行时往往无法处于最佳的控制状态, 在某些工况下运行载荷过大。对风电机组进行载荷计算采用的湍流度参数通常是通过 P90 (湍流度计算选取发生概率在 90% 以上的风速数据) 计算得到, 并不能完全涵盖现场实际的湍流分布情况。如果按照该湍流度设计控制参数, 容易导致机组在极端湍流情况下载荷过大, 影响机组安全运行。而如果按照更高的湍流强度进行保守设计, 又会导致机组在某些工况存在过于敏感的控制动作, 造成塔筒、变桨等关键部件载荷过大, 不利于机组的稳定运行。

当前, 关于风电机组的控制算法形成了大量的研究成果。文献¹介绍了一种基于 Bladed 软件线性化模型, 采用免疫记忆粒子群算法整定 PI 参数的变桨控制器自适应方法; 文献²研究了基于不同风速控制区域的风电机组功率控制策略, 对机组功率输出进行控制, 优化机组发电性能, 实现控制动作的平滑过渡; 文献³将灰色预测算法与模糊自适应 PID 相结合实现风电机组变桨优化控制; 文献⁴设计了一种基于转矩阻尼控制器和 RBF 神经网络 PID 整定的智能参数优化方法; 文献⁵采用决策树算法和神经网络算法, 对风

电机组历史风速、风向和偏航数据进行统计分析, 实现对偏航策略的优化; 文献⁶提出了一种考虑变化湍流风速条件的自适应转矩控制策略, 用于提升风电机组发电效率; 文献⁷分析了不同湍流强度对机组载荷的影响, 提出了风电机组载荷设计的主要原则和影响因素。然而, 这些研究采用复杂的先进算法进行控制参数的仿真优化, 追求控制效果的最优, 往往忽略了实际现场风况的多变性、传感器误差、执行器延迟等不确定因素的影响, 从而干扰了算法在实际应用中的效果。

为解决上述问题, 本文设计了三种基于湍流度的风电机组动态柔性控制技术: 自适应变桨 PI 控制技术, 动态额定功率、额定转速控制技术和柔性偏航控制技术。本文提出了一种基于滑窗方法的湍流度实时计算方法, 对基于湍流度的控制技术的设计原理进行了介绍, 并将上述基于湍流度的风电机组动态柔性控制技术应用到某 2MW 风电机组上, 对其进行仿真测试。

湍流度计算方法

湍流是指风速、风向及其垂直分量的迅速扰动或不规律性。湍流产生的原因主要有两个: 一个是当空气流动时, 地形差异 (如山峰) 造成气流与地表“摩擦”或者阻滞; 另一个是空气密度差异和气温变化的热效应引起气流的垂

- 1: 高峰, 王伟, 凌新梅. 基于 Bladed 风电机组变速与变桨距控制器参数优化 [J]. 系统仿真学报, 2016, 28 (7): 1644 - 1660.
- 2: 任海军, 何玉林, 杜静, 等. 变速变桨距风力机功率控制策略 [J]. 电网技术, 2011, 35 (8): 59 - 63.
- 3: 戴文俊, 蒋慧, 胡艳丽. 灰色预测模糊 PID 控制器在风电机组变桨距控制中的应用 [J]. 长春工业大学学报, 2023, 44 (2): 141 - 146.
- 4: 邢作霞, 陈雷, 徐健, 等. 大型变速变距风电机组转矩控制策略研究 [J]. 太阳能学报, 2012, 33 (5): 738 - 744.
- 5: 苏国梁, 李国庆, 李凤俊, 等. 考虑风能随机性趋势的风电机组偏航启动优化研究 [J]. 可再生能源, 2021, 39 (12): 1629 - 1634.
- 6: 周连俊, 殷明慧, 杨炯明, 等. 考虑变化湍流风速条件的风电机组改进自适应转矩控制 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45 (1): 184 - 191.
- 7: 邓英, 周峰, 田德, 等. 不同风湍流模型的风电机组载荷计算研究 [J]. 太阳能学报, 2014, 35 (12): 2395 - 2400.

直流动。湍流强度是脉动风速（瞬时风速与平均风速的差）的均方差与平均风速的比值：

$$I = \frac{\sigma}{v} \quad (1)$$

按照 IEC 61400-1 标准的要求，湍流度为 10min 内风速均方差与平均值的比值。由于 IEC 61400-1 标准并未限定湍流度计算采用的风速来源，因此，在计算湍流度时可采用机舱风速仪测量风速或者激光雷达测量风速。由于湍流度不会瞬时突变，同时为避免过多占用 PLC 计算资源，控制程序可设置 1s 任务，将湍流度计算程序挂载到 1s 任务中执行，即每秒执行一次湍流度计算程序。为保证湍流度计算的实时性，采用如图 1 所示的数据滑窗方法，设置滑窗大小为 10min 数据（1s 任务周期调用程序意味着滑窗大小为 600）。在每个程序执行期间，剔除滑窗内时间序列最早的风速数据，将当前时刻的风速数据加入滑窗，计算滑窗内风速数据的均方差与平均值，进而得到实时的湍流度值。

湍流度具体计算步骤如下：

步骤 1：设置大小为 600 的风速数组 windSpeedList，并初始化为 0，用于保存滑窗内的风速信息。

步骤 2：设置位置计数器 currentPointer，用于记录风速变量在风速数组 windSpeedList 中的位置；设置数值计数器 maxPointCount，用于记录风速数组

windSpeedList 中风速的个数。将两个计数器初始化为 0。

步骤 3：使用测量到的风速循环填充数组 windSpeedList，在每个执行周期内对 currentPointer 和 maxPointCount 的数值累加 1，当 currentPointer 等于 600，将 currentPointer 置为 0；当 maxPointCount 等于 600，不再对 maxPointCount 进行累加。

步骤 4：当 maxPointCount 等于 600，计算风速数组 windSpeedList 中风速平均值和标准差，进而求得湍流强度。

步骤 5：滑窗更新 windSpeedList 中的数值，再执行步骤 3，实时计算机组的湍流强度。

由于机舱瞬时风速存在较大的波动性，计算的湍流强度也存在一定的波动性。为避免湍流度异常波动对控制的干扰，需要对计算的实时湍流度进行低通滤波。常用一阶低通滤波器传递函数如下所示：

$$G(s) = \frac{1}{TS + 1} \quad (2)$$

式中，T 为滤波时间常数；S 是复数变量，表示拉普拉斯变换域中的频率。

使用后向差分离散化，将公式（2）转化为时域表达式，如下所示：

$$y(k) = \frac{T_s}{T_s + T} x(k) + \frac{T_s}{T_s + T} y(k-1) \quad (3)$$

式中， T_s 为控制器采样周期，一般为 0.02s；k 为采样次数；y(k) 为本次输出；y(k-1) 为上次输出；x(k) 为本次输入。

设置滤波时间常数 T 为 10s，实时湍流强度与低通滤波后的湍流强度对比曲线如图 2 所示。从图中可以看出，经过低通滤波的湍流值曲线更加平缓，能够避免湍流度异常波动对控制造成干扰。

基于湍流度的控制技术设计

一、自适应变桨 PI 控制技术设计

风电机组变桨控制采用 PI 控制器，当风速大于额定风速时，机组通过变桨降低风能的捕获，维持发电机转速为额定转速，机组功率维持在额定功率。PI 控制器的传递函数如公式（4）所示：

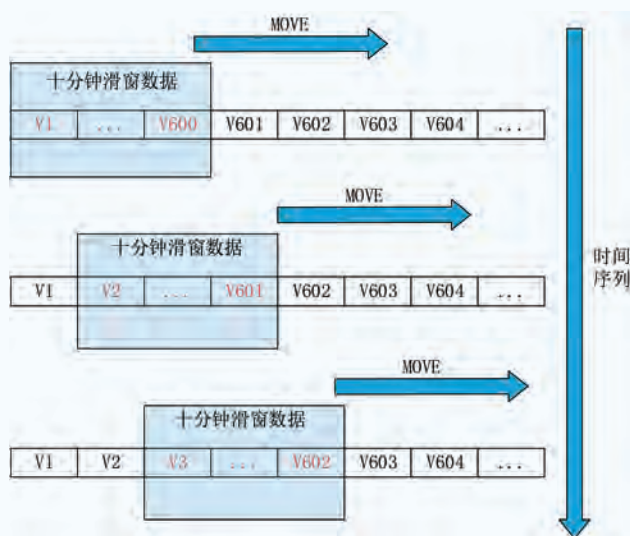


图1 数据滑窗示意

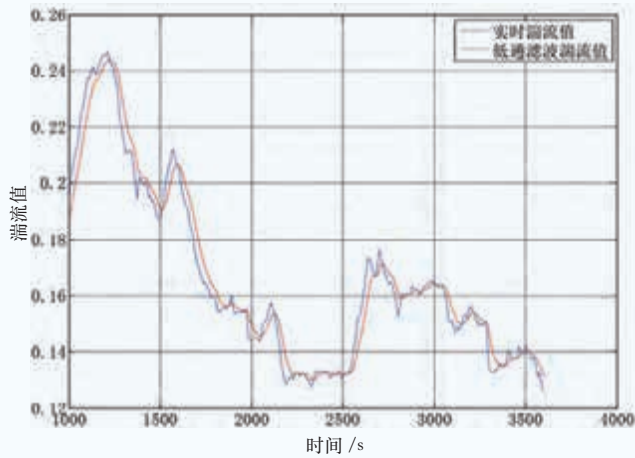


图2 湍流度曲线

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (4)$$

式中， K_p 和 K_i 分别为控制器的 P 参数和 I 参数。

由于气动转矩对变桨角度变化的敏感度在不同变桨角度下不同，风速越大，变桨角度越大，气动转矩对变桨角度的变化越敏感，因此，变桨 PI 参数往往需要在多个风速点进行设计，再根据变桨角度的不同进行线性插值得到不同变桨角度下的 PI 参数。某 2MW 机组在不同风速下气动转矩对变桨角度变化的敏感曲线如图 3 所示。

基于湍流度的自适应变桨 PI 控制技术的实现方法：

1. 设置湍流强度等级

按照实时计算的湍流度数值大小，将湍流分为高湍流、中湍流、低湍流。

湍流值小于基准设计湍流的 80%，为低湍流工况；湍流值大于基准设计湍流的 120%，为高湍流工况；湍流强度在基准设计湍流的 80%~120%，为中湍流工况。不同风速下的湍流强度对比如图 4 所示。

2. 设置变桨 PI 参数

在基准设计变桨 PI 参数的基础上，额外增加两组变桨 PI 参数（表 1）。额外增加的变桨 PI 参数与基准变桨 PI 参数设计方法相同，借助 Matlab Sisotool 工具箱，在不同风速点，通过调整截止频率、相角裕度和增益裕度来对 PI 参数值进行精细设计。此外，可依据机组实际运行情况，根据经验直接在基准设计变桨 PI 参数的基础上进行粗略设计，设置比例系数为 15%，大变桨 PI 参数为基准变桨 PI 参数

的 115%，小变桨 PI 参数为基准变桨 PI 参数的 85%。

在高湍流工况，选用较大的变桨 PI 参数避免机组超速；在低湍流工况，选取较小的变桨 PI 参数，用来降低机组塔架和叶根的疲劳载荷；在中湍流工况，选取基线变桨 PI 参数，用于正常的机组控制。

3. 控制参数平滑处理

在不同湍流度工况切换过程中，对变桨 PI 参数进行平滑化处理，避免变桨 PI 参数跳变对机组造成冲击。

二、动态额定功率、额定转速控制技术设计

主流变速变桨风电机组采用额定功率、额定转速控制技术，机组转速随着风速的升高不断爬升，当到达额定转速，

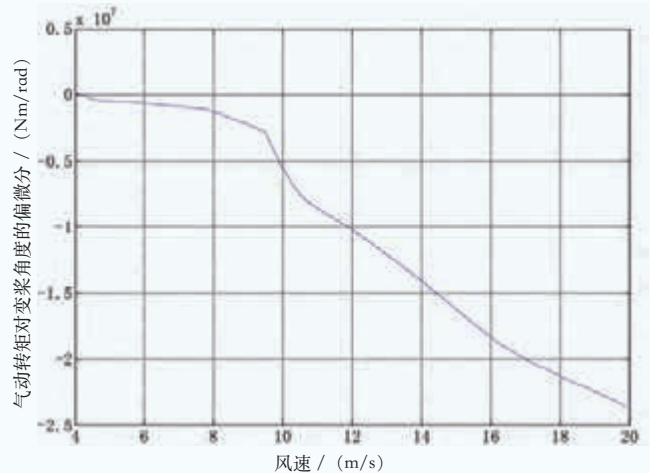


图3 气动转矩敏感性曲线

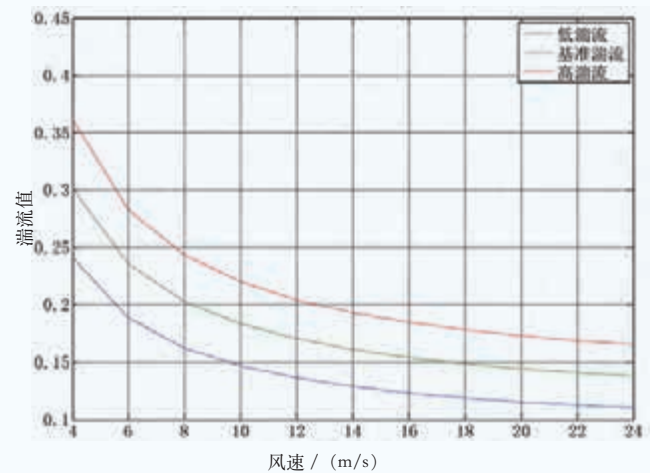


图4 湍流强度对比

表1 变桨PI参数

桨距角 /rad	0.000	0.047	0.145	0.211	0.265	0.314	0.358	1.571
基准 P 参数	0.0126	0.0114	0.0063	0.0054	0.0047	0.0039	0.0033	0.0033
基准 I 参数	0.0012	0.0012	0.0009	0.0009	0.0010	0.0009	0.0007	0.0007
高湍流 P 参数	0.0145	0.0131	0.0073	0.0062	0.0054	0.0044	0.0038	0.0038
高湍流 I 参数	0.0013	0.0013	0.0010	0.0011	0.0011	0.0010	0.0009	0.0009
低湍流 P 参数	0.0107	0.0096	0.0054	0.0046	0.0040	0.0033	0.0028	0.0028
低湍流 I 参数	0.0010	0.0010	0.0008	0.0008	0.0008	0.0007	0.0006	0.0006

表2 动态额定功率、额定转速值

湍流等级	额定功率	额定转速
低湍流	Pr	Wr
中湍流	Pr	Wr
	Pr-Ps	Wr-Ws
	Pr-Ps×2	Wr-Ws×2
	Pr-Ps×3	Wr-Ws×3

0.5×Pr	0.5×Wr	
高湍流	Pr	Wr
	Pr-Ps	Wr-Ws
	Pr-Ps×2	Wr-Ws×2
	Pr-Ps×3	Wr-Ws×3

0.5×Pr	0.5×Wr	

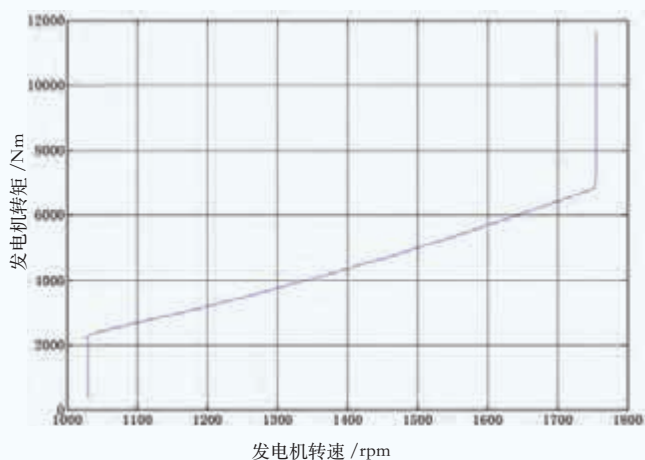


图5 转速-转矩控制曲线

机组通过转矩控制将转速维持在额定值，当风速达到额定风速，机组满发，通过变桨和转矩协同控制保证机组在额定功率和额定转速上下波动。某2MW机组转速-转矩控制曲线如图5所示。

机组额定功率和额定转速为机组的预设参数，一般在机组设计之初就得以确定。然而，风电机组在实际运行的过程中，由于受地形和前方机组的干扰，往往承受超出设计标准的湍流强度。如果仍然按照预设的额定功率和额定转速运行，机组疲劳载荷会增加，影响机组大部件使用寿命。针对该问题，开发基于湍流强度的动态额定功率、额定转速控制技术，其实现方法为：

1. 设置湍流强度等级

将计算得到的实时湍流值从小到大划分为：低湍流、中湍流、高湍流。

设置小于等于基准湍流强度的105%为低湍流；大于基准湍流强度的105%且小于等于基准湍流强度的120%

为中湍流；大于基准湍流强度的120%为高湍流。

2. 设置额定功率和额定转速等级

设置三级额定功率和额定转速的值，分别对应于三级湍流强度：不限制功率转速、轻度限制功率转速、严格限制功率转速。其中，低湍流对应不限制功率转速，此时机组的额定功率和额定转速为机组的基准设计值。

表2为优化后的额定功率、转速。其中，Pr和Wr分别代表机组基准设计额定功率和额定转速；Ps和Ws分别代表功率和转速的优化步长，一般设置为基准值的5%。按照机组实际情况和工程经验选取额定功率与额定转速的最小值，可将其初步设置为基准参数的50%。按照表2设置，仿真计算不同湍流度下，不同额定功率和额定转速的载荷值，选取满足载荷要求的最大额定功率和额定转速值，作为对应湍流强度下的额定功率和额定转速值。

三、柔性偏航控制技术设计

目前的偏航控制策略一般按照风速大小将偏航控制划

分为大风和小风，在不同风速状况下，设置不同的偏航误差启动角度和偏航延迟时间。大风工况下，选用更小的偏航启动角度和更短的偏航延迟时间；小风工况下，增大偏航启动角度和偏航延迟时间。该控制策略使用开环策略进行对风，不考虑机组在偏航过程中的受力情况。

随着机组型号越来越大，大容量机组在偏航过程中容易受到风湍流的干扰，导致其在偏航过程中可能承受较大的冲击载荷，影响机组的安全稳定运行。基于以上原因，提出了柔性偏航控制技术，其实现方法如下：

1. 设置湍流阈值

设置湍流阈值为基准湍流强度的 105%，机组实时计算湍流强度与当前风速对应湍流阈值的比值，当比值小于 1，机组正常偏航；当比值大于 1，机组偏航前，按照设置进行限功率、限转速。机组功率和转速同时满足限制要求后，机组进行偏航。机组偏航结束后，将功率和转速限制值恢复至原来数值。

2. 设置湍流阈值比例 - 功率表和湍流阈值比例 - 转速表

统计机组偏航误差的正态分布曲线，如图 6 所示，按照 3sigma 法则(平均值 ±3 倍标准差)，求取最大偏航误差，将该值作为载荷计算的偏航误差值。

表 3 为特定偏航误差下的功率、转速限制值。其中，Pr 和 Wr 分别代表机组基准设计额定功率和额定转速；Ps 和 Ws 分别代表功率和转速的优化步长，一般设置为基准值的 5%。湍流阈值比例可根据工程经验，粗略按照 5% 的

表3 特定偏航误差下的功率限值和转速限值

湍流阈值比例	限功率值	限转速值	偏航误差
1.05	Pr	Wr	±15deg
	Pr-Ps	Wr-Ws	±15deg
	Pr-Ps×2	Wr-Ws×2	±15deg
	Pr-Ps×3	Wr-Ws×3	±15deg
	±15deg
1.1	0.5×Pr	0.5×Wr	±15deg
	Pr	Wr	±15deg
	Pr-Ps	Wr-Ws	±15deg
	Pr-Ps×2	Wr-Ws×2	±15deg
	Pr-Ps×3	Wr-Ws×3	±15deg
1.15	±15deg
	0.5×Pr	0.5×Wr	±15deg
	Pr	Wr	±15deg
	Pr-Ps	Wr-Ws	±15deg
	Pr-Ps×2	Wr-Ws×2	±15deg
1.2	Pr-Ps×3	Wr-Ws×3	±15deg
	±15deg
	0.5×Pr	0.5×Wr	±15deg
	Pr	Wr	±15deg
	Pr-Ps	Wr-Ws	±15deg

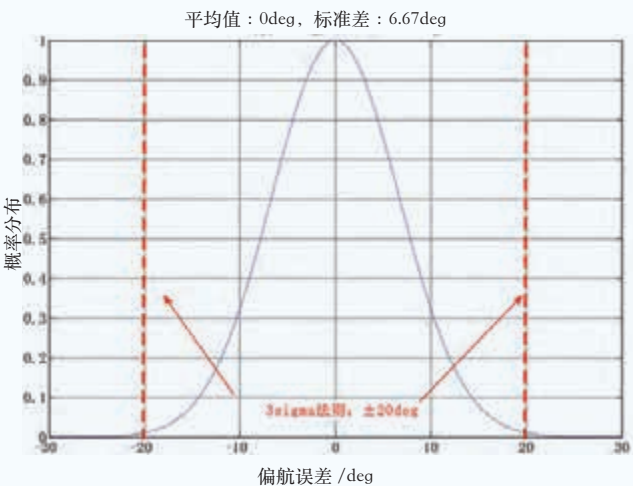


图6 偏航误差正态分布曲线

间隔选取。按照表格设置不同湍流阈值比例下的功率、转速最大值，计算各个工况的载荷，选取载荷满足要求的最大功率、转速值，作为对应湍流阈值比例下机组偏航时的最大功率、转速值，即可得到湍流阈值比例 - 功率表和湍流阈值比例 - 转速表。

基于湍流度的控制技术仿真测试

将上述基于湍流度的风电机组自适应控制策略应用到浙江某风电场 2MW 风电机组（表 4）上，并对其进行仿真测试。测试平台采用风电主控硬件在环测试系统，如图 7 所示。该系统基于 Bladed 风电机组仿真模型仿真实际的风况、传动链、发电机、变流器、变桨系统、电网等系统的工作状态，基于仿真 PLC 输出真实的温度、压力、编码器、

表4 测试机组参数

额定功率	2000kW
发电机额定转速	1755rpm
发电机并网转速	1030rpm
风轮直径	110m
轮毂高度	80m
切入风速	3m/s
切出风速	20m/s
额定风速	9.6m/s
湍流强度	B类
空气密度	1.184kg/m ³

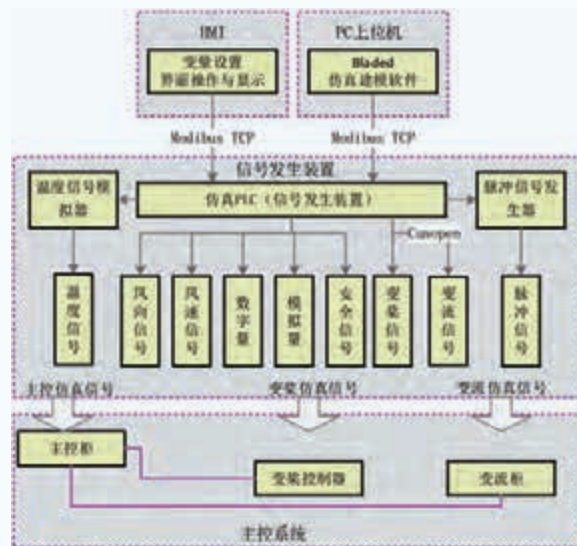
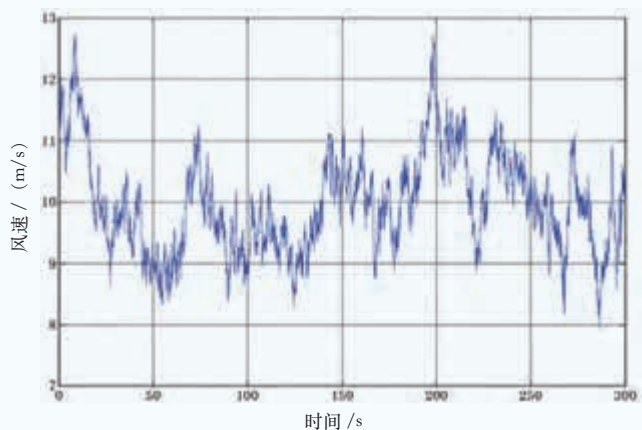
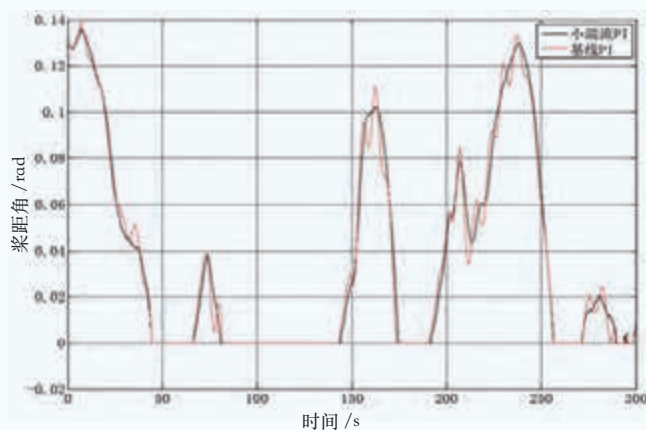


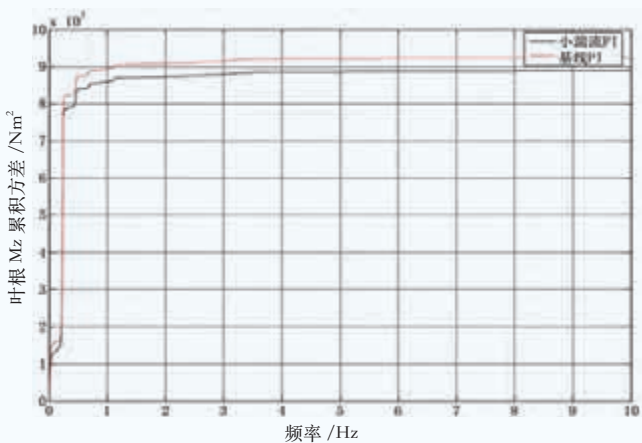
图7 测试平台系统架构



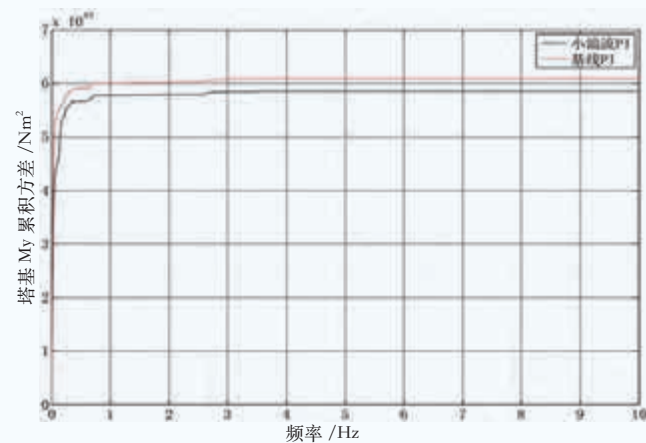
(a) 仿真测试曲线



(b) 变桨动作对比



(c) 叶根Mz累积方差对比



(d) 塔基My累积方差对比

图8 低湍流工况仿真结果

塔架振动、开关量等信号，基于 HMI 人机界面对关键参数进行手动调节和在线监视。

一、自适应变桨 PI 控制技术测试

测试风场基准湍流强度为 B 类。

低湍流： \leq 基准湍流 $\times 80\%$ 。

中湍流： $>$ 基准湍流 $\times 80\%$ 且 \leq 基准湍流 $\times 120\%$ 。

高湍流： $>$ 基准湍流 $\times 120\%$ 。

低湍流工况（基准湍流 $\times 5\%$ ）下，仿真测试使用基线 PI 变桨参数与低湍流 PI 变桨参数的控制效果。仿真结果如图 8 所示，可以明显看出，在小湍流下，继续采用基线 PI 参数会导致变桨动作过于敏感，适当降低变桨 PI 参数可以有效降低机组塔基疲劳载荷和叶根疲劳载荷。

有效降低机组塔基疲劳载荷和叶根疲劳载荷。

高湍流工况（基准湍流 $\times 125\%$ ）下，仿真测试使用基线 PI 变桨参数与高湍流 PI 变桨参数的控制效果。仿真结果如图 9 所示，可以明显看出，在高湍流下，适当增加变桨 PI 参数可以提升机组控制的敏感性，增加对发电机转速的控制，降低机组塔基和叶根的疲劳载荷。

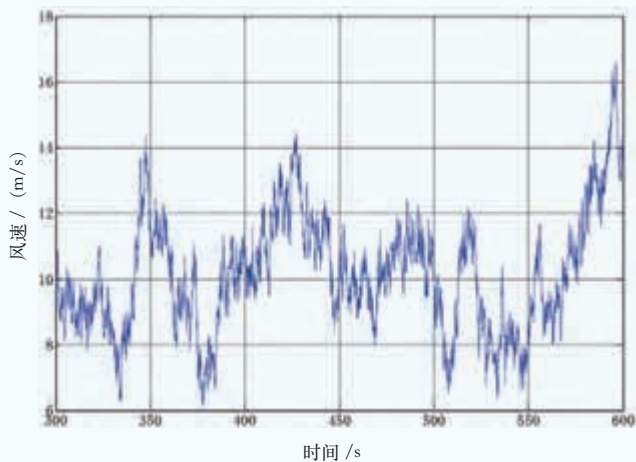
二、动态额定功率、额定转速控制技术测试

机组基准湍流强度为 B 类。

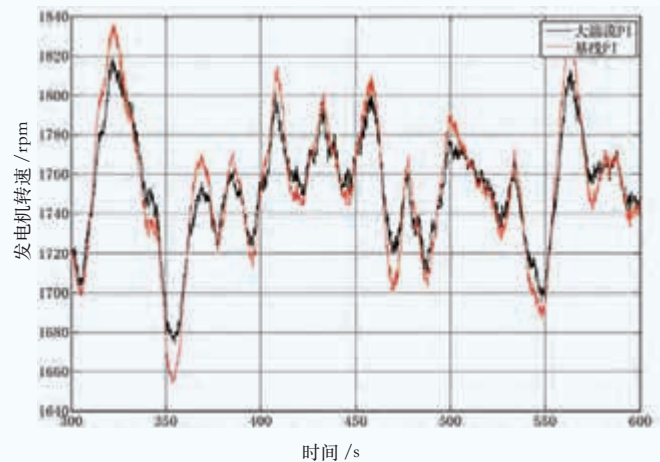
低湍流： \leq 基准湍流 $\times 105\%$ 。

中湍流： $>$ 基准湍流 $\times 105\%$ 且 \leq 基准湍流 $\times 120\%$ 。

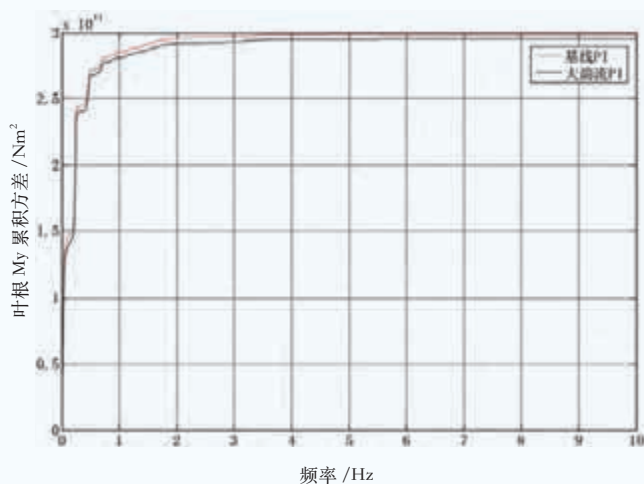
高湍流： $>$ 基准湍流 $\times 120\%$ 。



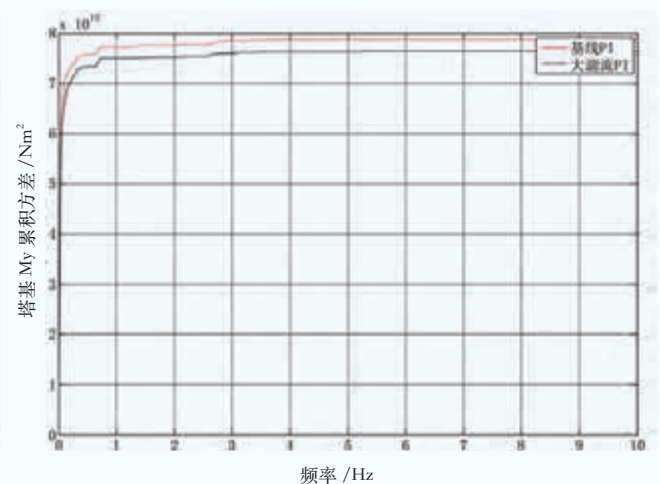
(a) 仿真测试曲线



(b) 发电机转速对比



(c) 叶根My累积方差对比



(d) 塔基My累积方差对比

图9 高湍流工况仿真结果

低湍流对应额定功率值和额定转速值：2000kW、1755rpm；中湍流对应额定功率值和额定转速值：1800kW、1580rpm；高湍流对应额定功率值和额定转速值：1500kW、1320rpm。由仿真测试结果（图 10、图 11）可以看出，随着湍流等级的变大，机组额定功率和额定转速按照设计要求逐渐降低，通过降低机组出力来降低机组疲劳载荷。

三、柔性偏航控制技术测试

设置湍流阈值为基准湍流强度（B类）的105%，设置湍流阈值比例与发电机转速和机组功率的关系如图 12 所示。

在机组偏航前，按照计算的湍流阈值比例获取机组允许的最大发电机转速和功率。当机组实际发电机转速和功率运行在设定值附近时，机组进行偏航，偏航结束后机组

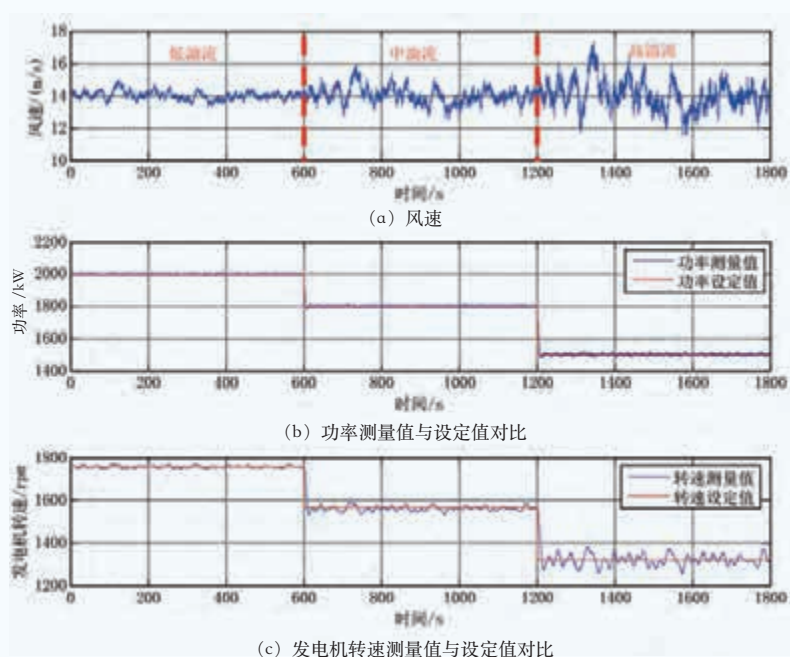


图10 动态额定功率、额定转速限制曲线

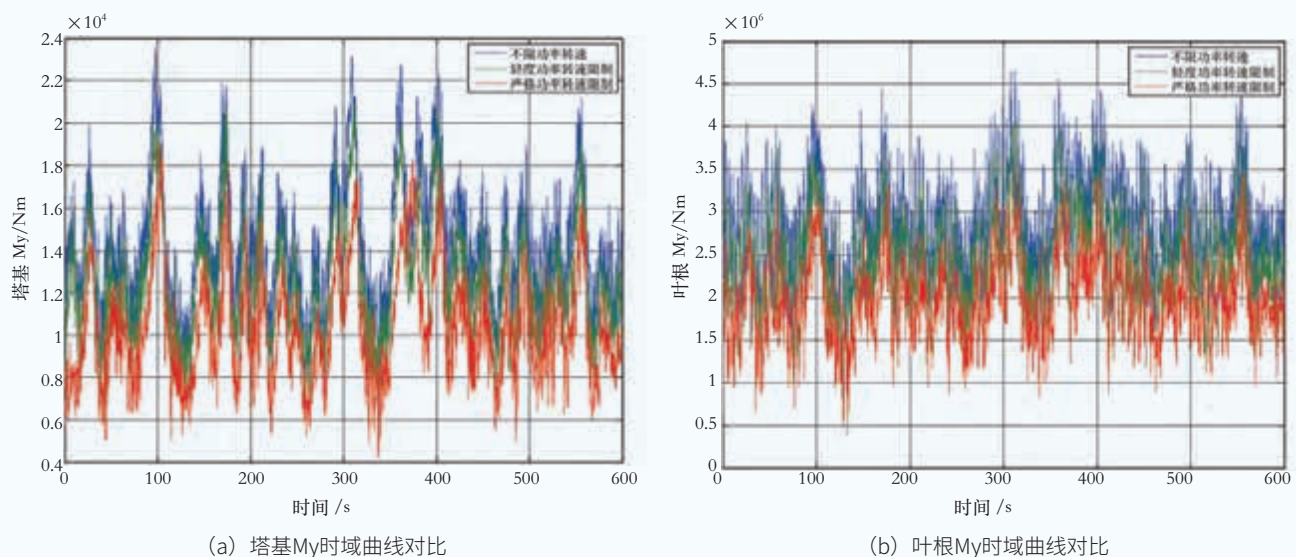


图11 动态额定功率、额定转速控制技术仿真测试结果

恢复原有限制值。

将仿真湍流大小设置为湍流阈值的 1.15 倍，此时功率限定值为 1650kW，转速限定值为 1600rpm，偏航误差设置为 20deg。在该仿真设置下，机组在第 270s 触发偏航指令，在第 280s 完成限制功率和转速，开始按照 1deg/s 速度进行偏航，偏航持续 20s，待偏航结束后，机组转速和功率恢复原设定值。从仿真结果（图 13、图 14）可以看出，限制功率和转速可以大大降低机组偏航轴承载荷，保证机组在

偏航过程中的安全运行。

柔性偏航技术是以降低发电量为代价实现机组载荷的降低，由于它只在湍流较大的偏航过程中对功率进行限制，而偏航过程相对于风电机组正常发电时间占比较少，该技术对机组发电量的降低影响有限。因偏航动作发生和风湍流的不确定性，以下将粗略评估该技术对机组发电量的影响。

假设仿真机组月偏航次数 2000 次，每次偏航误差为 20deg，偏航速率为 0.2deg/s，每年运行时间 8760h，计算得到每年偏航时间约为 666.67h，偏航发生概率为 0.0761。

按照图 12 设置机组不同湍流阈值比例下的功率曲线，按照年平均风速 5.9m/s，威布尔形状因子为 2，即可得到不同湍流阈值比例下的年发电小时数。假设不同湍流阈值比例下偏航发生概率相同，取值为 0.0761，则不同湍流阈值比例下的发电量损失计算公式如下：

$$\text{发电量损失} = (\text{年发电小时数} / 2374.2 - 1) \times 0.0761 \times 100\%$$

表 5 为不同湍流阈值比例下的机组发电量损失。从表中可以看出，当湍流阈值比例在 1.05 以下时，机组不存在发电量损失；随着湍流阈值比例的增加，机组发电量损失逐渐增大，当湍流阈值比例为 1.2 时，机组年发电量损失最大为 1.26%。机组偏航过程中，较大的湍流会引起较

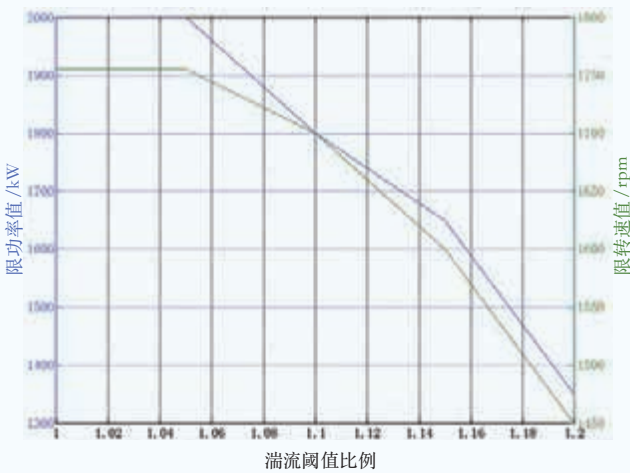


图12 湍流阈值比例-转速-功率限制曲线

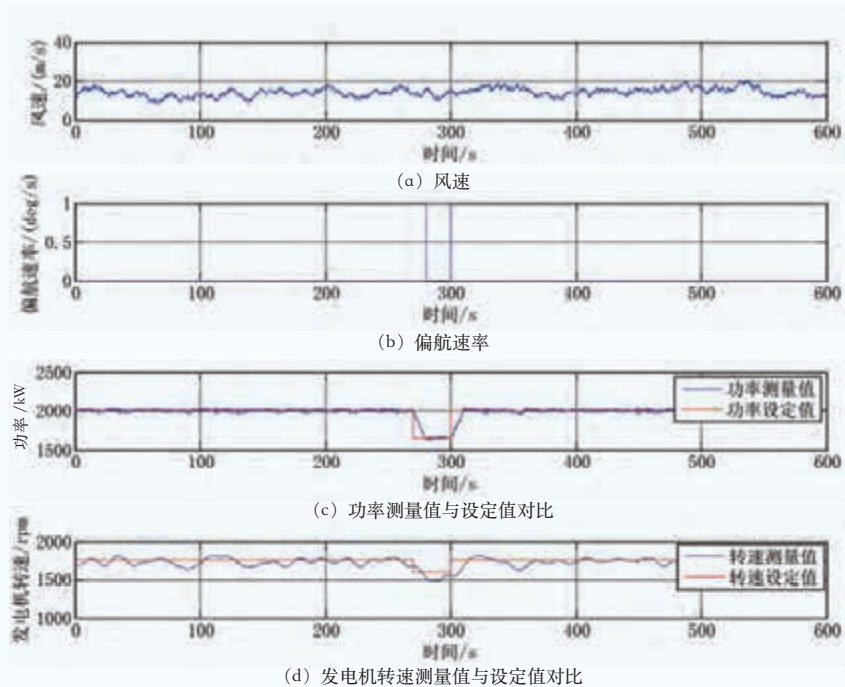


图13 偏航优化过程曲线

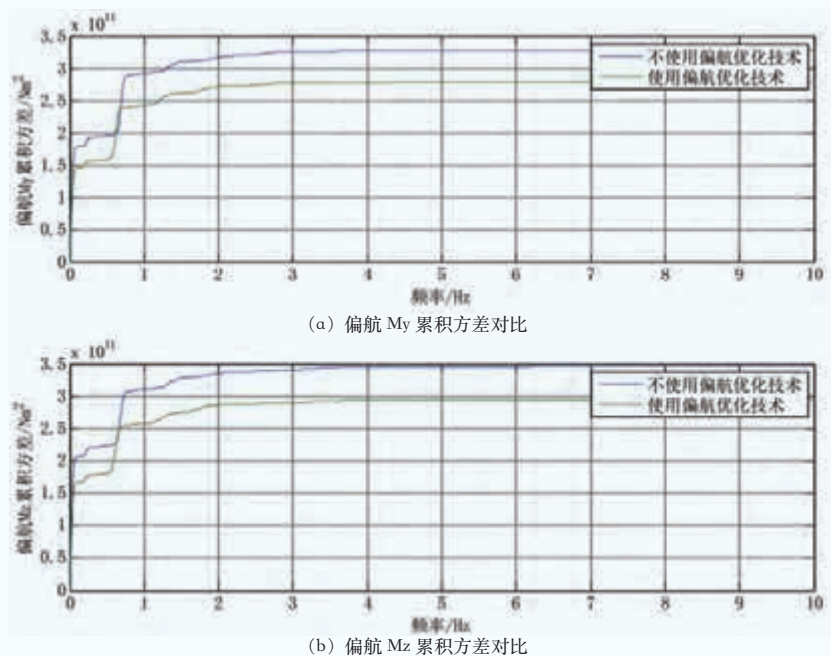


图14 偏航My、Mz累积方差对比

表5 机组发电量损失

湍流阈值比例	年发电小时数	偏航发生概率	发电量损失
1	2374.2	0.0761	0.00%
1.05	2374.2	0.0761	0.00%
1.1	2273.5	0.0761	-0.32%
1.15	2185.9	0.0761	-0.60%
1.2	1981.1	0.0761	-1.26%

大的冲击载荷，导致频繁故障停机，甚至会降低机组运行寿命。采用柔性偏航控制策略虽然会造成一定的发电量损失，但该损失在可接受的范围内。正常情况下，机组大部分时间运行在设计湍流以内的工况（湍流阈值比例在 1.05 以下），且大部分的偏航动作发生在小风工况，即柔性偏航控制技术实际造成的发电量损失要远低于表 5 中的计算值。

结论

本文对自适应变桨 PI 控制技术，动态额定功率、额定转速控制技术和柔性偏航控制技术三种技术的设计方法进

行了介绍，并进行了算法仿真测试。根据测试结果，自适应变桨 PI 控制技术可以很好地平衡机组转速和载荷的控制要求，在保证机组运行安全的情况下降低机组塔基和叶根的疲劳载荷；动态额定功率、额定转速控制技术可以避免机组长时间满负荷运行在高湍流工况，能够降低机组载荷，延长机组寿命；柔性偏航控制技术可以降低大型机组在高湍流工况下的偏航负载，避免机组在偏航过程中出现较大的冲击载荷，提升机组的安全性。总之，基于湍流度的风电机组动态柔性控制技术，可以提升机组在不同湍流工况下的适应性，实现对机组的动态柔性控制，保证机组的安全稳定运行。✎

（作者单位：国电南京自动化股份有限公司）

风电叶片摆振疲劳应力集中现象及控制方法研究

文 | 史博文, 杨海江, 李军向, 顾育慧, 曹建喜, 吕路勇

随着风电行业进入平价时代, 大型化、轻量化和低成本叶片的发展成为降低度电成本的有效手段。纤维增强树脂基复合材料因具有比强度和比刚度高、轻量化, 且经过合理设计后能够显著提高结构效率、降低结构重量等优点被广泛用于风电叶片制造^{1,2}。复合材料性能与铺层结构、生产工艺、生存环境等条件密切相关, 而风电叶片在服役期间会承受复杂交变载荷及严苛环境的考验, 易使材料在运行过程中出现疲劳损伤, 进而导致叶片发生失效。

目前, 关于风电叶片疲劳问题的研究可以分为两类: 复合材料疲劳行为研究、叶片结构疲劳行为研究。针对复合材料已广泛研究了不同结构材料在不同工况下的疲劳行为, 但材料性能并不能完全代表叶片结构性能³。为明确叶片结构疲劳行为, 可以开展全尺寸风电叶片测试。Leeuwen等⁴利用长度为3.4m的风电叶片进行疲劳测试研究, 研究结果表明在测试过程中后缘粘接位置最先出现裂纹, 随后裂纹在层合板中进一步发生扩展, 从而导致叶片发生失效。Jensen等⁵研究了长度为34m的风电叶片在挥舞疲劳测试下的失效模式, 测试结果表明叶片在承受挥舞疲劳载荷时先在外蒙皮位置发生失效, 随

后整体失效。Lee等⁶在对长度为56m的风电叶片进行疲劳试验时发现, 最大弦长位置和叶根之间的几何复杂性是引起叶片出现损伤的根本原因。Marín等⁷通过研究某300kW风电叶片疲劳损伤情况发现叶片表面裂纹、几何过渡不均匀和壳体厚度突变等都会增大疲劳应力的幅值, 加速疲劳损伤的扩展。Pan等⁸在56.5m长叶片摆振疲劳测试中发现最大弦长截面轻木和玻璃钢在厚度过渡处出现分层, 分析表明叶片损伤出现的原因因为后缘棱边处形状过渡不均匀, 从而引起应力集中, 导致结构出现分层。根据以上研究, 叶片损伤、失效等情况多发生于几何过渡不均匀及铺层结构突变位置, 这些位置在叶片受载时会产生明显应力集中现象, 导致叶片易在几何和结构过渡位置出现损伤。

由于当前研究并未较多关注叶片受载时应力集中现象的解决方法, 本文以某70m级叶片为研究对象, 分析了其在摆振疲劳测试过程中因应力集中导致的损伤问题, 并针对性地提出了解决方案; 同时根据结构调整后测试情况, 确定了该款叶片增强层截止点应力集中系数的阈值, 并提出了相似情况下叶片铺层修改方案。

1: 李成良, 杨超, 倪爱清, 等. 复合材料在大型风电叶片上的应用与发展[J]. 复合材料学报, 2023, 40 (3): 1274 - 1284.

2: 赵智垒, 丁永春, 杨中桂, 等. 高性能纤维复合材料在海上风电的应用[J]. 船舶工程, 2022, 44 (S1): 51 - 56.

3: Kensch C W. Fatigue of composites for wind turbines[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28 (10): 1363 - 1374.

4: Leeuwen H V, Delft D V, Heijdra J, et al. Comparing Fatigue Strength From Full Scale Blade Tests With Coupon-Based Predictions[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2006, 124 (4): 1 - 9.

5: Jensen F M, Falzon B G, Ankersen J, et al. Structural testing and numerical simulation of a 34m composite wind turbine blade[J]. Composite Structures, 2006, 76 (1-2): 52 - 61.

6: Lee H G, Park J. Static test until structural collapse after fatigue testing of a full-scale wind turbine blade[J]. Composite Structures, 2016, 136: 251 - 257.

7: Marín J C, Barroso A, París F, et al. Study of fatigue damage in wind turbine blades[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16 (2): 656 - 668.

8: Pan Z J, Wu J Z, Liu J, et al. Fatigue Failure of a Composite Wind Turbine Blade at the Trailing Edge[J]. Defect and Diffusion Forum, 2018, 382: 191 - 195.

疲劳测试方案

叶片疲劳测试试验根据 GB/T 25384—2018 及 IEC 61400-23 测试标准执行。摆振疲劳测试时将 $1 \times E^8$ 设计载荷转换为 400 万测试载荷，叶片安装角为 0° ，以 SS 面朝下、PS 面朝上的姿态安装在试验台上，采用单点共振恒幅加载方式进行测试，叶片姿态如图 1 所示。为避免叶根弯矩过大，将叶片在 $L=65\text{m}$ 位置截断。为使叶片各截面均能达到疲劳测试的目标载荷，在距叶根 $L=45\text{m}$ 位置安装驱动电机用来给叶片施加恒定循环疲劳载荷，电机与夹具工装配重合计 4000kg ，在 $L=22\text{m}$ 位置及 $L=59\text{m}$ 位置分别增加配重，叶片配重数据如表 1 所示。

疲劳损伤分析

一、损伤描述

在静力测试及挥舞疲劳测试结束后，检查并确认叶片无异常情况开始进行摆振疲劳测试。当摆振疲劳测试循环次数达到 56 万次，对叶片外观及内腔进行例行检查时，发现在增强层截止点位置内 / 外蒙皮出现发白损伤（图 2）：

(1) 损伤 A：SS 面前缘外侧弦向发白，损伤面积约 $500\text{mm} \times 10\text{mm}$ ；(2) 损伤 B：PS 面前缘外侧弦向发白，损伤面积约 $600\text{mm} \times 10\text{mm}$ ；(3) 损伤 C：PS 面前缘外侧弦向发白，损伤面积约 $300\text{mm} \times 10\text{mm}$ ；(4) 损伤 D：PS 面前缘外侧弦向发白，损伤面积约 $260\text{mm} \times 5\text{mm}$ ；(5) 损伤 E：PS 面前缘内侧弦向发白，损伤面积约 $160\text{mm} \times 10\text{mm}$ ；(6) 损伤 F：PS 面前缘内侧弦向发白，损伤面积约 $360\text{mm} \times 20\text{mm}$ 。

二、损伤原因分析

通过对比叶片原结构铺层信息发现，出现弦向发白损伤位置均为内外增强层的截止点，主要分布在外增强层第 1—4 层终点，内增强层第 12—13 层终点。发现损伤后，在损伤位置前后粘贴应变片采集损伤位置前后应变，应变片粘贴位置如表 2 所示（1—12 号应变片）。

当叶片以 100% 载荷正常运行时，采集相应位置应变片应变数据。通过对比三轴布增强层截止点前后位置应变，可得该位置应力集中系数如表 3 所示。表中应力集中系数仅为表征增强层截止点位置前后应变变化大小，实际增强层截止点位置应力集中系数更高。

通过对比增强层截止点前后测点位置应变大小，并对

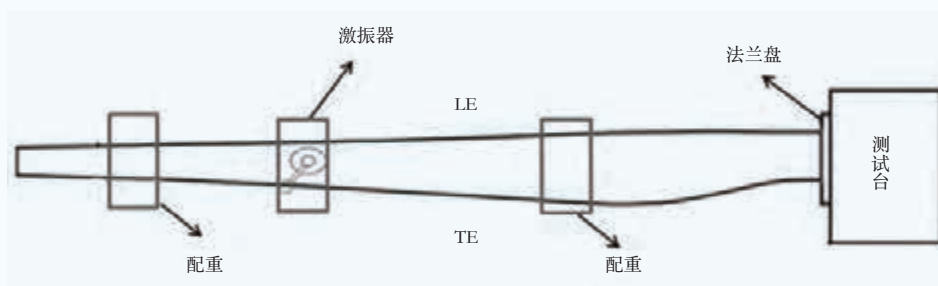


图1 叶片摆振疲劳实验装置

表1 摆振疲劳测试配置

距叶根距离 /m	重量 /kg	备注
45.0	4000	激振器位置
22.0	4000	配重位置
59.0	400	配重位置
65.0	-	切割叶尖位置

照图 2 中增强层截止点位置发白情况可以发现，损伤 A、损伤 B、损伤 C 三个位置弦向发白较为严重，且三处损伤位置应力集中系数分别为 1.21、1.45、1.25，远大于其他损伤位置应力集中系数。

同时，为明确未出现损伤位置增强层截止点前后应变，在损伤 A 对应 PS 面前缘外侧位置及损伤 B 对应 SS 面前缘外侧位置前后增加应变片监控其应变大小，应变片位置见表 2 中 13—16 号应变片，测试结果如表 3 所示。由表可见，未出现损伤位置应力集中系数在 1.06 左右，小于出现发白损伤位置应力集中系数。

由此可见，同为增强层截止点，但并非所有截止点位

置都会出现发白现象。为进一步研究此问题，查阅了测试叶片试制现场留存三轴布截止点位置照片(图 3)。由图可见，三轴布截止点位置存在较多处理不当问题，如布层截止点位置的褶皱、布层边缘的毛边、较多位置存在搭接等问题。这些都会影响布层边缘结构受力情况。

综上，根据损伤情况和损伤位置前后应变大小判断，由于叶片内外增强层所使用的三轴布克重较大，单层厚度较大，三轴布截止点位置铺层过渡不均匀，在生产工艺操作不当的情况下，容易使得靠近芯材面的布层截止点位置在疲劳测试过程中产生不均衡的应力集中现象，从而导致叶片出现损伤。



图2 增强层截止点位置发白情况

表2 应变片位置

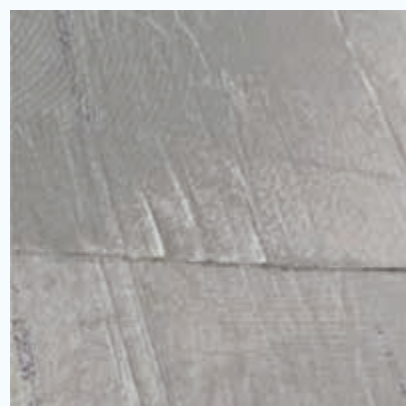
编号	轴向位置	弦向位置			方向	编号	轴向位置	弦向位置			方向
1	损伤 A 靠叶根	距离前缘 合模缝 200mm	SS	外部	0°	9	损伤 E 靠叶根	PS	内部	0°	距离前缘 合模缝 200mm
2	损伤 A 靠叶尖		SS	外部	0°	10	损伤 E 靠叶尖	PS	内部	0°	
3	损伤 B 靠叶根		PS	外部	0°	11	损伤 F 靠叶根	PS	内部	0°	
4	损伤 B 靠叶尖		PS	外部	0°	12	损伤 F 靠叶尖	PS	内部	0°	
5	损伤 C 靠叶根		PS	外部	0°	13	损伤 A' 靠叶根	PS	外部	0°	
6	损伤 C 靠叶尖		PS	外部	0°	14	损伤 A' 靠叶尖	PS	外部	0°	
7	损伤 D 靠叶根		PS	外部	0°	15	损伤 B' 靠叶根	SS	外部	0°	
8	损伤 D 靠叶尖		PS	外部	0°	16	损伤 B' 靠叶尖	SS	外部	0°	

表3 摆振疲劳测试应变

编号	轴向位置	应变 /10 ⁻⁶	应力集中系数	编号	轴向位置	应变 /10 ⁻⁶	应力集中系数
1	损伤 A 靠叶根	1853	1.21	9	损伤 E 靠叶根	1693	1.15
2	损伤 A 靠叶尖	2244		10	损伤 E 靠叶尖	1942	
3	损伤 B 靠叶根	1602	1.45	11	损伤 F 靠叶根	1571	1.13
4	损伤 B 靠叶尖	2327		12	损伤 F 靠叶尖	1783	
5	损伤 C 靠叶根	1533	1.25	13	损伤 A' 靠叶根	1825	1.06
6	损伤 C 靠叶尖	1909		14	损伤 A' 靠叶尖	1931	
7	损伤 D 靠叶根	1599	1.13	15	损伤 B' 靠叶根	1652	1.06
8	损伤 D 靠叶尖	1799		16	损伤 B' 靠叶尖	1750	



(a) 布层截止点毛边



(b) 布层截止点褶皱

图3 三轴布增强层截止点处理不当情况

不同维修方案的摆振疲劳测试分析

在对测试叶片的摆振疲劳损伤情况进行现场排查后，结合应变分析结果，认为引起叶片增强层截止点弦向发白的原因是，靠近芯材位置所使用的三轴布在截止点发生应力集中现象。为降低截止点位置应力集中，本文建议在截止点位置增设双轴布或调整三轴布克重。测试验证的结果表明，以上两种方案均可达到控制截止点位置应力集中的目的。

一、增设双轴布的维修方案

根据三轴布截止点位置结构特点，选择在截止点位置增设双轴布进行维修。对于壳体弦向发白区域，铺层结构需在复原原结构的基础上增加双轴布，在维修时按照维修标准对损伤处的布层进行打磨、手糊、固化等。在对该叶片损伤位置进行维修后继续进行 400 万次摆振疲劳测试，测试过程中未出现发白等异常情况。

测试过程中，在表 2 相同位置粘贴应变片，采集在摆振

表4 增设双轴布维修后增强层截止点应变

编号	轴向位置	应变 /10 ⁻⁶	应力集中系数	编号	轴向位置	应变 /10 ⁻⁶	应力集中系数
1	损伤 A 靠叶根	1508	1.05	7	损伤 D 靠叶根	1174	1.07
2	损伤 A 靠叶尖	1590		8	损伤 D 靠叶尖	1256	
3	损伤 B 靠叶根	1464	1.08	9	损伤 E 靠叶根	1289	1.07
4	损伤 B 靠叶尖	1575		10	损伤 E 靠叶尖	1378	
5	损伤 C 靠叶根	1145	1.08	11	损伤 F 靠叶根	1335	1.07
6	损伤 C 靠叶尖	1236		12	损伤 F 靠叶尖	1432	

表5 小克重三轴布增强层截止点应变

编号	轴向位置	弦向位置			方向	应变 /10 ⁻⁶	应力集中系数
1	外增强层第一层截止点靠叶根	距后缘合模缝 600mm	PS	外部	0°	1509	1.06
2	外增强层第一层截止点靠叶尖	距后缘合模缝 600mm	PS	外部	0°	1600	
3	外增强层第一层截止点靠叶根	距前缘合模缝 200mm	PS	外部	0°	1292	1.08
4	外增强层第一层截止点靠叶尖	距前缘合模缝 200mm	PS	外部	0°	1394	

测试时相应测点位置应变大小，经过维修后增强层截止点前后位置应变如表 4 所示。由表可知，叶片维修位置应变较之前有大幅降低，应力集中系数也较维修前有降低，维修后应力集中系数均维持在 1.08 以下，由此证明维修方案具有一定可行性。

由以上分析验证可得，对于使用单层较厚且克重较大的三轴布风电叶片结构来说，叶片生产现场相关工艺操作不当，可能会导致叶片运行过程中在三轴布截止点位置发生弦向发白损伤，影响叶片疲劳寿命。在叶片设计阶段可以通过在三轴布截止点位置增加克重轻、层厚小的双轴布来减缓截止点位置几何过渡不均匀的情况，同时增加该位置结构刚度，避免叶片在运行过程中因应力集中而导致结构损伤，提高叶片运行稳定性。

二、采用克重较小的三轴布方案

除了上述通过在增强层截止点位置增加双轴布减缓结构过渡来减小应力集中外，还可以将克重较大的三轴布等效替换为克重较小的三轴布，同样可以达到减小应力集中的目的。在另一款采用克重较小的三轴布作为增强层的叶片上进行摆振疲劳测试时，选择在靠近芯材截面增强层截止点前后缘位置粘贴应变片，测试过程中所得应变如表 5 所示。结果表明，将原增强层位置使用的三轴布调整为克重较小的三轴布后，应力集中系数可以控制在 1.08 以下。同时，叶片在摆振疲劳测试运行过程中未出现上述弦向发

白损伤。由此可见，使用克重较小的三轴布作为增强层，可有效减缓截止点位置应力集中。

结论

本文针对某 70m 级叶片在摆振疲劳测试中出现的疲劳损伤情况，分析了引起摆振疲劳测试损伤的原因，并为减小增强层截止点位置应力集中提供了两种行之有效的解决方案。根据文中分析内容，可得以下结论：

(1) 叶片叶根增强层位置所使用的三轴玻纤布因克重较大，单层厚度较大，会使得布层截止点位置铺层过渡不均匀，在生产及工艺处理不当时容易导致在靠近芯材面的布层截止点位置出现不均衡的应力集中，进而导致弦向发白损伤。

(2) 通过在增强层截止点位置增加双轴玻纤布，或者使用更低克重的三轴玻纤布替代现有三轴玻纤布作为增强层进行铺设，可以有效减缓增强层截止点位置应力集中现象，提高叶片运行稳定性。

(3) 在考虑生产及工艺操作不稳定的条件下，可以将 1.08 作为叶片摆振疲劳测试三轴玻纤布增强层截止点位置应力集中系数控制阈值。

[作者单位：史博文，杨海江，李军向，顾育慧：明阳智慧能源集团股份有限公司；曹建喜：中科慧智（北京）科技有限公司；吕路勇：江苏鉴衡检测认证有限公司]

风电叶片系统解决商

自主设计研发 | 全生命周期解决方案 | 五大风电叶片制造基地 | 风电产业多元化发展



售后运维



芯材加工



机舱罩加工



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21-1

电话：010-80706780 邮箱：market@sino-wind.com.cn 网址：www.sino-wind.com.cn

基于三维仿真的大型风电叶片后缘合模泡沫设计及应用

文 | 崔志刚, 肖韦, 尹鹏, 刘英杰, 王运河, 杜雷

在风电叶片生产制造过程中, 合模工序作为最主要的成型工序, 直接影响叶片外轮廓形态、胶粘剂用量、叶片重量等重要指标。随着风电叶片朝着大型化发展, 叶片构件也越复杂, 合模工序难度增加。因此, 如何保证合模工艺设计合理、缩短合模时间、降低现场施工难度, 成为大型风电叶片工艺设计所需要解决的重点问题¹⁻³。

风电叶片是通过胶粘剂将 PS 和 SS 壳体粘接成一体的, 现有大型叶片后缘部分区域通过填充泡沫来控制合模间隙⁴。为保证粘接质量, 粘接区域的胶粘剂要满足粘接宽度和厚度的设计要求。目前, 工艺设计中采用的合模泡沫软件主要是二维 CAD 软件。根据 CAD 设计合模泡沫尺寸的方法有两种⁵⁻⁸: 一种是根据叶片的理论后缘截面, 运用二维 CAD 软件绘制; 另一种是在叶片试制阶段 (FPQ 阶段), 提前将上下壳体预制出来, 通过后缘粘接区域填充芯材 (发泡泡沫等) 或者压制橡皮泥来获取后缘截面的型腔形状, 并在 CAD 软件中将截面临摹出来, 再设计后缘合模泡沫。在开发与设计制造过程中, 二维 CAD 的方法会使得叶片三维模型与工艺设计数据分离, 因而存在开发设计周期长、产品试制成本高、产品质量无法保证等弊端。将三维仿真技术应用在风电叶片的设计中, 可以提高产品的开发速率, 减少模型之间转化带来的数据误差⁹⁻¹¹。传统工业三维软件 (如 Bladedesk、

Fibersim) 中的复合材料模块能够模拟叶片的铺层, 但其在快速、精准建立叶片三维铺层模型, 基于铺层仿真一体协同进行工艺设计和应用上仍存在缺陷, 只能单一获得某个位置的截面¹², 合模泡沫与壳体的整体随型性无法得到保证。

当前, 三维软件 UG 在叶片其他工艺设计模块中得到应用, 分析认为采用该软件能够解决上述软件铺层仿真设计与工艺设计之间不能协同的问题。本文采用该软件进行三维铺层仿真, 运用铺层模拟技术对风电叶片的后缘合模泡沫进行设计研究, 解决 CAD 及传统三维软件设计方案存在的问题, 同时进行工艺应用研究, 验证该设计方法的合理性。

基于三维铺层仿真的后缘合模泡沫设计

株洲时代新材料科技股份有限公司生产的某 91m 叶型首次运用三维铺层仿真软件进行新工艺设计的研究。本文以该叶型为例, 进行基于三维铺层仿真的后缘合模泡沫设计分析。

基于三维铺层仿真软件设计后缘合模泡沫主要分为以下步骤: (1) 层合板厚度数据的确定; (2) 在三维铺层仿真软件中进行叶片铺层仿真; (3) 铺层截面图和后缘合模泡沫截面的输出; (4) 生成供应商加工所需的三维合模泡

- 1: 李香林. 大型风电叶片整体成型工艺设计与优化 [D]. 武汉理工大学, 2019.
- 2: Global Wind Energy Council. global wind statistics 2016. Global Wind Energy Council, 2017.
- 3: 刘波, 贺志佳, 金昊. 风力发电现状与发展趋势 [J]. 东北电力大学学报, 2016 (2): 7 - 13.
- 4: 高克强, 薛忠民, 陈淳, 等. 复合材料风电叶片技术的现状与发展 [J]. 新材料产业, 2010 (12): 4 - 7.
- 5: 刘梅, 刘广, 李江波, 等. 一种风电叶片后缘立面区域填充方法 [P]. CN 110733188 A, 2020.
- 6: 陆健明, 冯学斌, 葛凯, 等. 风电叶片后缘合模 PVC 泡沫设计方法 [P]. CN 108509663 A, 2018.
- 7: 王建博, 张平, 林雄, 等. 一种硬质泡沫在调整风电叶片后缘合模间隙中的应用 [P]. CN 109483917 A, 2019.
- 8: 刘梅, 刘广, 赵亚男, 等. 一种风电叶片后缘填充芯材设计方法 [P]. CN 111561419 A, 2020.
- 9: 赵立岩, 刘妍, 王向东, 等. 面向风电叶片制造工艺研究及创新体系的思考 [J]. 复合材料科学与工程, 2021 (8): 100 - 104.
- 10: 陈家正, 高禹, 张振龙. 基于 CATIA 的复合材料结构优化设计 [J]. 纤维复合材料, 2011 (3): 7 - 9.
- 11: 张富海, 李军向, 陈淳, 等. 基于 CATIA 二次开发的风力机叶片建模技术 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2010 (2): 14 - 16+37.
- 12: 郑舜泽, 张朋. 风电叶片铺层模拟在新产品开发中的应用 [J]. 玻璃纤维, 2022 (4): 31 - 35.

沫实体模型。

一、层合板厚度数据确定

在叶片后缘区域存在上百个布层，层合板的厚度影响后缘合模泡沫的尺寸。在叶片开发设计过程中，理论单层层合板固化后的厚度主要通过以下公式计算：

$$h = M / (\rho \times V \times 1000)$$

式中，h 为单层层合板厚度，mm；M 为玻纤面密度，g/m²；ρ 为玻纤密度，取值 2.6g/cm³；V 为玻纤布的体积分数，根据过往实验，取值 55%。

本文所述的某款叶片的铺层结构以单轴布 UD-1200、双轴布 BX-600/BX800 为主，分别对应的面密度为 1218g/m²、612g/m² 和 812g/m²。根据以上厚度公式，计算得出理论厚度分别对应 0.852mm、0.428mm 和 0.568mm。然而，实际上叶片玻纤铺层层数增加与纤维体积增加，会导致单层层合板厚度降低¹³。因此，需要通过实验测试 20 层层合板的单层厚度数据（与实际叶片层合板单层厚度数据相近）。以上三种布层的厚度取值如表 1 所示。

二、叶片的铺层仿真

以上述叶型为例，首先在三维壳体模型上搭建各类铺层定位线，如前后缘分型线、大梁前后缘线、夹芯定位线等。根据上述不同玻纤种类固化后单层的层合板厚度，在三维铺层仿真软件里模拟玻纤布在叶片型面上的铺层（图 1）。同时，在叶片的主体结构中，夹芯是用来减轻叶片重量的，在模拟完玻纤的铺层后，在三维铺层仿真软件中搭建夹芯。如此，叶片所有的铺层信息都能被三维铺层仿真软件精准模拟仿真。相较于运用二维 CAD 软件花费大量的精力和时间来手动绘制后缘铺层信息，三维铺层仿真软件能更加方便、精准地模拟叶片铺层。

三、铺层截面图与后缘合模泡沫截面输出

根据在三维铺层仿真软件中模拟的铺层信息，在制作泡沫前需截取叶片铺层模拟截面，截取截面越多，间隔越短，所得到的后缘合模泡沫尺寸、轮廓越精准。以半米为间隔，截取叶片铺层模拟截面，在截面图（图 2）中能够清楚看到各类玻纤的铺层情况与夹芯的铺层。

通常将胶粘剂厚度控制在 2 ~ 10mm¹⁴。为了符合粘接质量和设计要求，将胶粘剂厚度设置为 4mm。根据后

缘合模泡沫包裹布的布层厚度和预留的胶粘剂厚度，以及叶片结构的后缘粘接宽度，输出后缘合模泡沫的基本轮廓，如图 3 所示。

四、泡沫实体模型生成

基于三维铺层仿真软件的一体化协同设计能力，通过叶片后缘轮廓和合模泡沫的轮廓引导线，将上述每隔半米

表1 层合板单层厚度

玻纤种类	单层厚度 /mm
UD-1200	0.780
BX-600	0.408
BX-800	0.539



图1 叶片的铺层仿真



图2 铺层截面



图3 后缘合模泡沫截面基本轮廓

13: 陈明锋, 刘玉惠, 范先谋. 不饱和聚酯片状模塑料的模压成型与性能 [J]. 应用化学, 2018 (10): 1222 - 1226.

14: 王运河, 梁自禄, 杜雷, 等. 一种风电叶片后缘合模泡沫设计方法 [P]. CN 114261040 A, 2022.

生成的后缘合模泡沫截面引导成具有与叶片壳体展向随型的三维合模泡沫整体结构。再通过软件的“实体”功能，构建三维后缘合模泡沫的实体模型，如图 4 (a) 所示。根据三维模型，利用五轴设备加工得到尺寸精准且随型的 PET 合模泡沫 [图 4 (b)]。

三维后缘合模泡沫应用

一、随型性验证

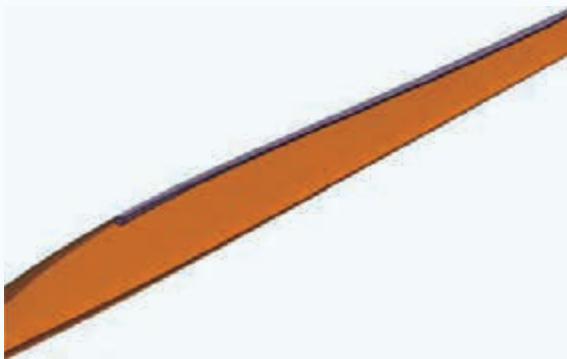
在利用三维铺层仿真软件设计完后缘合模泡沫后，供应商根据泡沫三维模型加工出与壳体随型的泡沫。项目试制阶段得到的后缘合模泡沫的实际生产使用效果表明，生成的后缘合模泡沫在现场使用情况良好，泡沫与壳体铺层基本随型，泡沫之间没有明显的“V”型缝隙。由此可知，基于三维铺层仿真软件设计的后缘合模泡沫，能够符合现场的使用，且能减少二维设计存在的弊端及

缺陷。

二、工艺应用验证

除了随型性，在叶片试制期间的合模间隙数据同样是验证三维铺层仿真软件设计的合理性手段之一。在叶片试制阶段采用铺层灌注一体工艺，待灌注固化后验证叶片的合模间隙。图 5 (a) 是 FPQ 阶段首支叶片后缘合模泡沫区域的合模间隙。从图中可以看出，除了少数合模间隙超过 10mm，其余基本都在合格间隙范围 (2 ~ 10mm) 内。间隙合格率高达 98%，满足株洲时代新材料科技股份有限公司新产品开发工作任务的目标要求 (合模间隙合格率 >80%)，合模间隙在 2 ~ 7mm 的占比也高达 93.8% [图 5 (b)]。以上数据表明基于三维铺层仿真软件设计生成的后缘合模泡沫模型能满足实际生产需求。

将三维仿真方法与主要的传统工艺设计方法(方法 1: 预先填充、压制结构，获得泡沫截面；方法 2: 根据理论后缘截面，进行 CAD 理论设计) 进行比较。由图 6 可知，

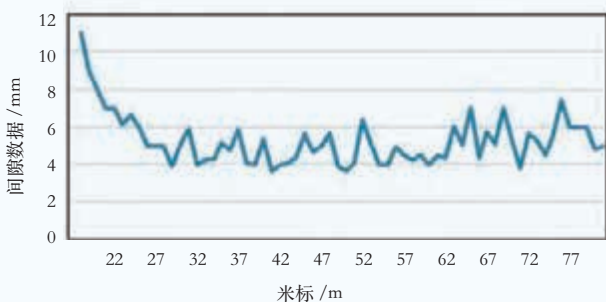


(a) 后缘合模泡沫模型

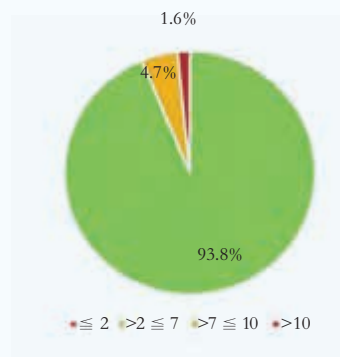


(b) 五轴设备加工的合模泡沫

图4 三维合模泡沫模型与实体泡沫加工



(a) 合模间隙



(b) 合模间隙占比

图5 首支叶片后缘合模泡沫区域合模间隙分析结果

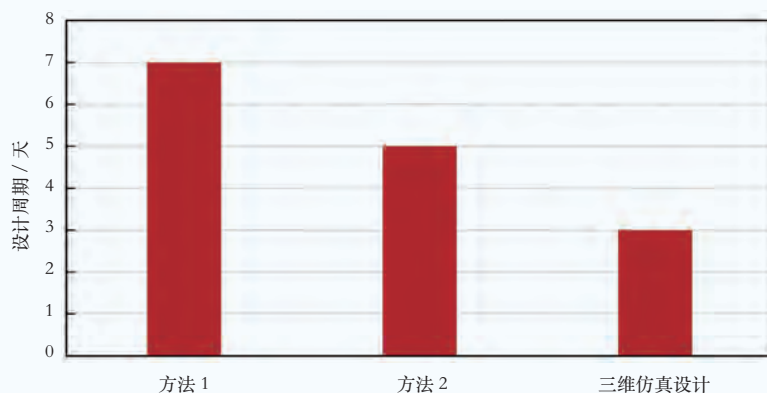


图6 设计周期对比

与传统工艺设计方法相比，三维仿真的设计周期缩短至 3 天。在 FPQ 阶段采用一体灌注成型工艺，单支试制周期大大缩短，减少了占用模具时间，节约了试制成本。

结论

本文基于三维铺层仿真软件，对某 91 米级大型风电叶片的后缘合模泡沫展开设计及应用研究，较传统二维及三维软件，该方法具有以下优点：

(1) 能够快速、精准模拟叶片铺层，节约了新产品设计的时间，设计精度有所提高；基于该软件设计的后缘合模泡沫模型，供应商无需进行二次转换，即可加工出与壳体随型的泡沫。

(2) 采用一体灌注成型的工艺，在后缘合模泡沫区域合模间隙合格率达到到了 98%，起到了控制合模间隙的效果；试制周期也大幅缩短，减少叶片占模时间，起到了控制成本的作用。📍

(作者单位：株洲时代新材料科技股份有限公司)



台风“马鞍”登陆前引发的台前飚线大风天气分析

文 | 张璐, 顾晨, 王浩, 王彩玉, 李肖雅

海上风电是我国加快能源清洁低碳转型、构建新型电力系统的重要战略支撑,也是我国推进科技自立自强、打造原创技术策源地的重点领域¹。据欧洲风能协会预测,2050年全球12%的能源将来自风能,其中的20%来自海上风电²。丰富的资源潜力与较好的消纳能力,决定了我国海上风电将大有可为。然而,由于我国海上自然环境复杂且观测资料匮乏,因此,需要采取有效的手段加强海上灾害天气对我国沿海地区风电场的影响分析³。

台风具有影响范围广、平均风速大、湍流强度高、风向变化快、持续时间长等特点,每年对我国东南沿海海上风电场的影响尤为显著⁴。据统计,近几十年来登陆我国的台风年均均为11个,其中超过半数在华南沿海地区登陆⁵。在台风移动路径前方外围雨带之外数百千米远处,由于台风靠近带来的环流、水汽等背景条件的变化而产生的飚线,通常被称为台前飚线⁶。台前飚线通常出现在热带气旋中心前的300~500km处,以与热带气旋同样的速度移动,持续时间一般为3~9h⁷。统计结果显示,在登陆或临近华南的热带气旋中约有1/4会产生台前飚线⁸。台前飚线作为伴随着台风产生的一种强对流天气,可能会引发暴雨、大风、冰雹等剧烈的灾害性天气,产生的大风影响可能超过台风

本身⁹。而以往的研究较多关注台风主体系统造成的大风和降水天气影响,很少对台风外围环流间接引发的灾害天气进行分析。虽然我国在海上风电领域已具备相对成熟的防灾减灾技术,但对复杂天气和海况条件预判的经验和能力仍然存在不足。由于远海区域无法布设天气雷达,对于海上类似台前飚线这样的强对流天气的实时监测能力和短时预报能力目前依然薄弱。

本文采用漂浮式测风激光雷达实时测风资料、全球格点气象预报数据资料,对2022年两个路径相似的台风登陆前期,沿海的大气动力和热力条件进行分析,旨在对台前飚线发展和维持机制进行初步总结,为提高对由海上台前飚线引发的强对流和大风天气的预判和预警能力打下基础。

台风概况

一、存在台前飚线的台风“马鞍”

2022年8月22日11时,2022年第9号台风“马鞍”生成。8月23日上午,台风“马鞍”由热带风暴级加强为强热带风暴级。8月24日20时,台风“马鞍”由强热带风暴级加强为台风级。与以往南海地区的台风相比,“马鞍”

1: 许维凯. 海上风电发展趋势分析与探讨 [J]. 资源节约与环保, 2023 (1): 140 - 143.

2: 陈明亮, 杨鹏飞, 常璐, 等. 海上漂浮式风机发展调研及分析 [J]. 水电与新能源, 2020, 34 (1): 38 - 43.

3: 宋星林. 台风对海上风电场影响的数值模拟分析 [J]. 海上节能, 2022 (4): 429 - 438.

4: 吴远伟. 台风对沿海风电机组的危害及对策 [J]. 风能, 2015 (2): 88 - 93.

5: LI Y, CHEN L S, ZHANG S J. Statistical characteristics of tropical cyclone making landfalls on China [J]. J Trop Meteor, 2004, 20 (1): 14 - 23.

6: 唐明晖, 姚秀萍, 王强, 等. 不同强度台风相伴的内陆台前飚线对比分析 [J]. 气象, 2017, 43 (8): 912 - 923.

7: 陈联寿, 罗哲贤, 李英. 登陆热带气旋研究的进展 [J]. 气象学报, 2004, 62 (5): 541 - 549.

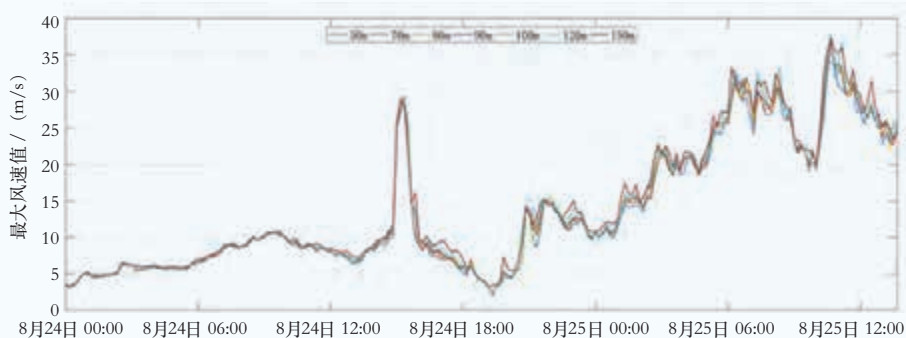
8: MARKOWSKI P M, RICHARDSON Y P. Tornado genesis: Our current understanding, forecasting considerations, and questions to guide future research [J]. Atmos Res, 2009, 93 (1/3): 516 - 525.

9: 刘佳, 沈新勇, 张大林, 等. 台风“麦莎”的强度对台风前部飚线发展过程影响的研究 [J]. 大气科学, 2013, 37 (5): 1025 - 1037.

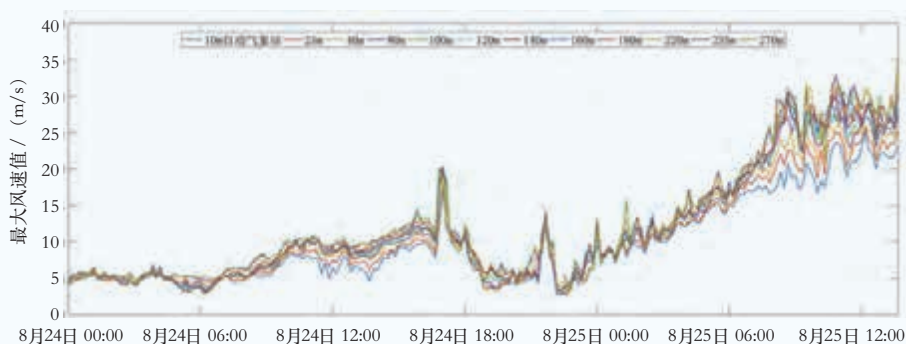
具有两个特点：一是移动速度快。由于副热带高压较强，其南侧风大，引导气流强，“马鞍”移动速度维持在30~35km/h，而一般南海的台风移动速度只有15km/h。二是结构不对称，这一特点反映在风雨影响上。由于台风东侧与副高相邻，以及西南季风的卷入形成很强的气压梯度，因此，“马鞍”带来的大风集中出现在该区域，而西侧和南侧由于台风外围气流与低空偏西风形成切变辐合区，因此，降水集中。据广东省气象台观测，9号台风“马鞍”登陆前，广东沿海多地已受台前爬线影响，出现强对流天气。粤西、珠三角西南部、粤东沿海市县在8月24日白天出现了雷阵雨，局地出现强降雨并伴随8级至11级短时大风。

天气雷达反射率因子数值越大，说明云层越厚，出现雷暴和强降水的概率越大，一般达到40dBZ以上时，出现雷暴的概率很大。通过中央气象台台风网实时发布的、以6min为更新间隔的华南区域天气雷达反射率因子图¹⁰可以看出，8月24日下午，在台风西行的过程中，其西侧环流不断靠近低层西风环流区域，形成明显的对流云区，粤

西沿海及海南北部有片状爬线对流云团形成，而粤南沿海同样有分散的雷暴云生成。结合天气雷达资料，以及近海台风路径上布设的观测设备得到的实时气象数据，来分析这一次台前爬线的发生位置和强度。风速和降雨数据来自阳江和湛江海域上的两部漂浮式测风激光雷达系统，均为10min更新一次，通过北斗卫星回传至数据接收站。当日15:00至16:00，阳江浮标站上安装的自动气象站检测到短时阵性降水，15:00的天气雷达数据显示该位置有分散的雷暴单体生成，漂浮式测风激光雷达观测到的对应时刻低空的阵风达到28m/s[图1(a)]，大风持续的时间为30min左右，显然这并非受到台风主体影响，而是台前一次短时强对流天气造成的阵性大风。湛江浮标站处于台前爬线区，降水从8月24日16:30开始持续至23:00左右。其中，显著降水分散在两个时段，分别是16:40—17:10和21:00—23:00，两次降水都伴随较明显的短时阵性大风。其中，下午时段更为明显，17时前后低空瞬时阵风约为20m/s[图1(b)]。



(a) 阳江漂浮式测风激光雷达10分钟最大风速时序



(b) 湛江漂浮式测风激光雷达10分钟最大风速时序

图1 台风“马鞍”登陆前漂浮式测风激光雷达最大风速变化时序

10: 查阅资料来源：中国气象台官网的华南区域天气雷达拼图，<http://www.nmc.cn/publish/radar/huanan.html>

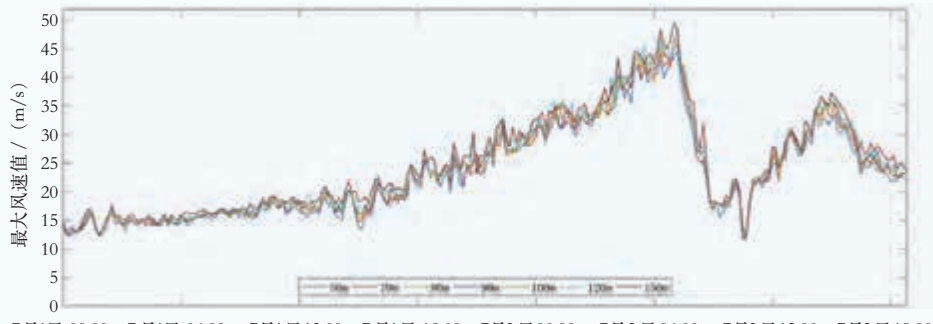
二、相似路径台风“暹芭”

同年的03号台风“暹芭”，与“马鞍”登陆前具有较相似的路径，两者均穿越了南海并在茂名南部海域登陆，登陆时强度均为台风级别。台风“暹芭”登陆前与位于湛江和阳江两部漂浮式测风激光雷达的相对位置同样较相似，但相比之下，台风“暹芭”登陆前中心风眼与阳江漂浮式测风激光雷达的距离更近些。从两部漂浮式测风激光雷达在台风“暹芭”经过期间（2022年7月1—2日）测量到的风速、风向数据可见，由于距离眼区较近，位于阳江的漂浮式测风激光雷达系统测量到了台风眼区过境前后“M”型的风速双峰值变化特征[图2(a)]，最大风速值出现在7月2日07:00，10分钟极值风力达到51m/s（16级）；10:00前后当台风眼经过漂浮式测风激光雷达时，风速最低下降至5m/s（3级），而后随着台风后眼墙经过，风速又逐渐增大，于15:00前后出现第二次风速峰值。由于距离眼区较远，布设于湛江的漂浮式测风激光雷达系统风速变

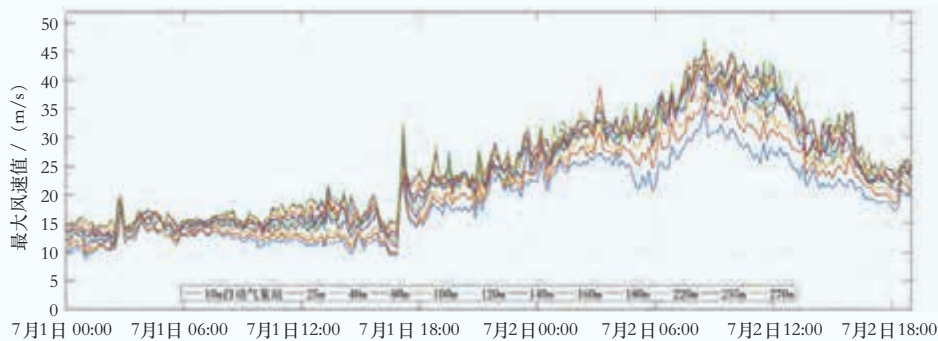
化呈现单峰值特征[图2(b)]，10min瞬时风速最大值47m/s出现在7月2日08:00前后。从风速演变时序图可以看到，在台风登陆的整个过程中，两部漂浮式测风激光雷达的风速呈现逐渐递增的形势，台风登陆前一日两地没有出现局地风速短时增大的现象。

台前爬线大风成因分析

利用美国国家环境预报中心的GFS全球预报系统发布的全球格点再分析气象资料（00:00时实测初始场资料），通过分析两次台风登陆前低层大气的动力和热力条件差异，总结台风“马鞍”登陆前在其前部产生台前爬线，而“暹芭”登陆前没有产生台前爬线的原因。全球格点再分析数据的水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ （经纬度），每日对应有世界时间0、6、12和18时（北京时间8、14、20时和次日2时）4个时间的，以grib2格式存储的全球历



(a) 阳江漂浮式测风激光雷达10分钟最大风速时序



(b) 湛江漂浮式测风激光雷达10分钟最大风速时序

图2 台风“暹芭”登陆前漂浮式测风激光雷达最大风速变化时序

11: 朱乾根. 天气学原理和方法 [M]. 气象出版社, 2007.

12: 文宝安. 水平散度的几种计算方法 [J]. 气象, 1980 (5): 32 - 35.

史格点气象数据文件。本文提取了数据资料中包括华南地区及南海区域低空 700hPa、850hPa 和 925hPa 三个高度的风场资料, 以及地面 CAPE (对流有效位能) 和 CIN (对流抑制能量) 数据。

在大气科学中, 水平散度是描述空气从周围汇合到某一处或从某一处向外流散程度的物理量, 表示气体在单位时间内水平面积的变化率, 单位为 “/s”¹¹。如果面积增大, 散度取正值, 为水平辐散; 如果面积缩小, 散度取负值, 为水平辐合。此外, 在不可压缩流体中, 散度为 0。水平方向有辐散或辐合, 垂直方向就会发生补偿性的收缩和延伸, 即辐合区域对应空气的垂直上升运动, 有利于对流天气的发生; 辐散区域对应空气的下沉运动, 抑制对流天气发生。因此, 可以通过计算水平散度来判断大气中的垂直运动。风速格点上对应的水平散度的计算公式为¹²:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (1)$$

式中, u 是 x 轴方向的风速大小, v 是 y 轴方向的风速大小。一般来说, x 轴表示纬圈切线方向 (自西向东为正), y 轴表示经圈切线方向 (自南向北为正)。

为便于观察分析, 在计算散度值时乘以 -1, 即正值区域表示辐合, 负值区域表示辐散。台风“马鞍”登陆前, 北京时间 8 月 24 日 14:00 时和 20:00 时 925hPa、850hPa 和 700hPa 三个高度层的大气水平辐合辐散情况如图 3 所示。图中红色虚线框内两个红点分别为湛江和阳江漂浮式测风激光雷达所在的海域范围 (右上角红点为阳江站点, 左下角为湛江站点)。计算结果显示, 8 月 24 日下午到晚间时段, 在台风不断接近沿海的过程中, 漂浮式测风激光雷达所处区域的低层大气辐合值是不断增加的, 尤其在 925hPa 和 850hPa 的粤南沿海区域, 辐合值超过 $1 \times 10^{-3}/s$, 说明该区域大气在垂直方向上存在较明显的对流运动。台风“暹芭”登陆前, 与台风“马鞍”接近位置的北京时间 7 月 1 日 02:00 时和 08:00 时 925hPa、850hPa 和 700hPa

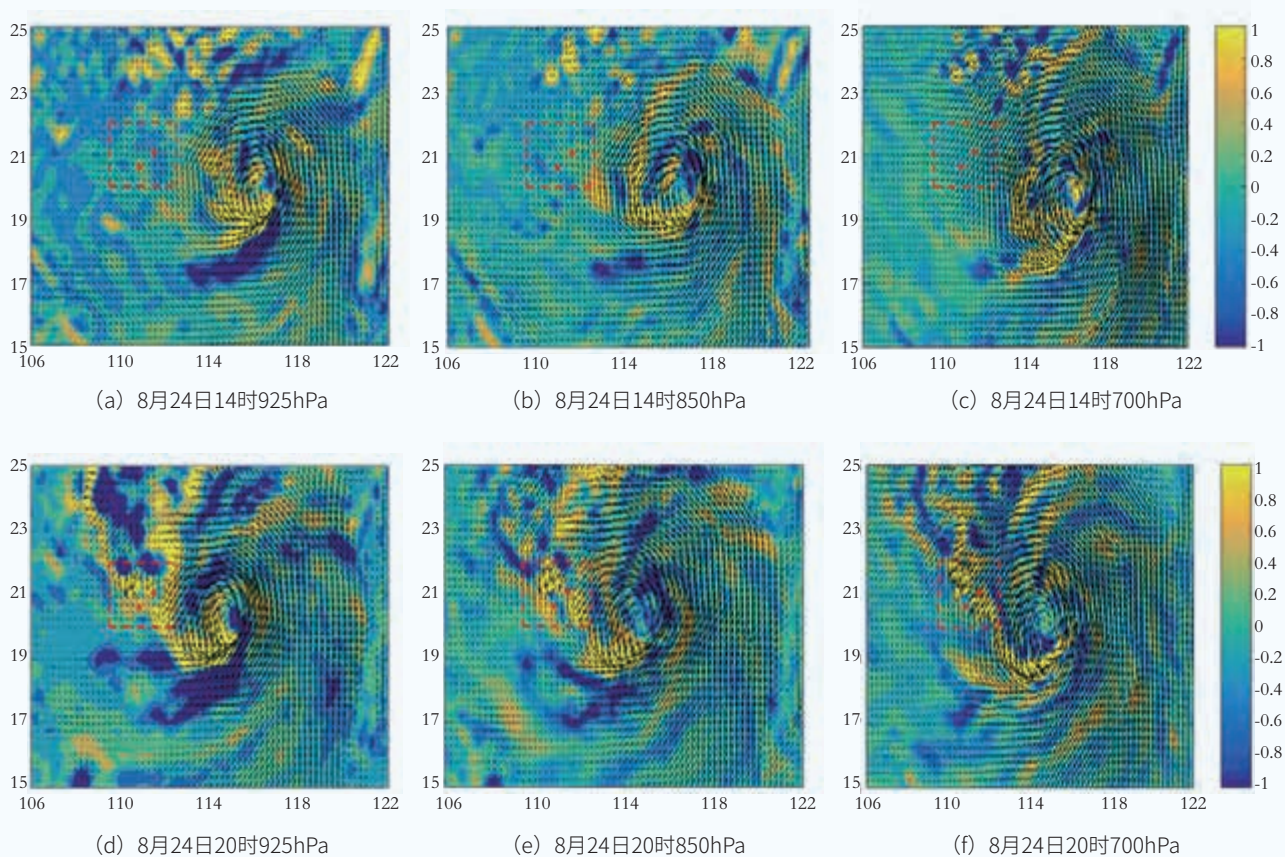


图3 台风“马鞍”登陆前925hPa、850hPa和700hPa三个高度的水平辐合辐散情况

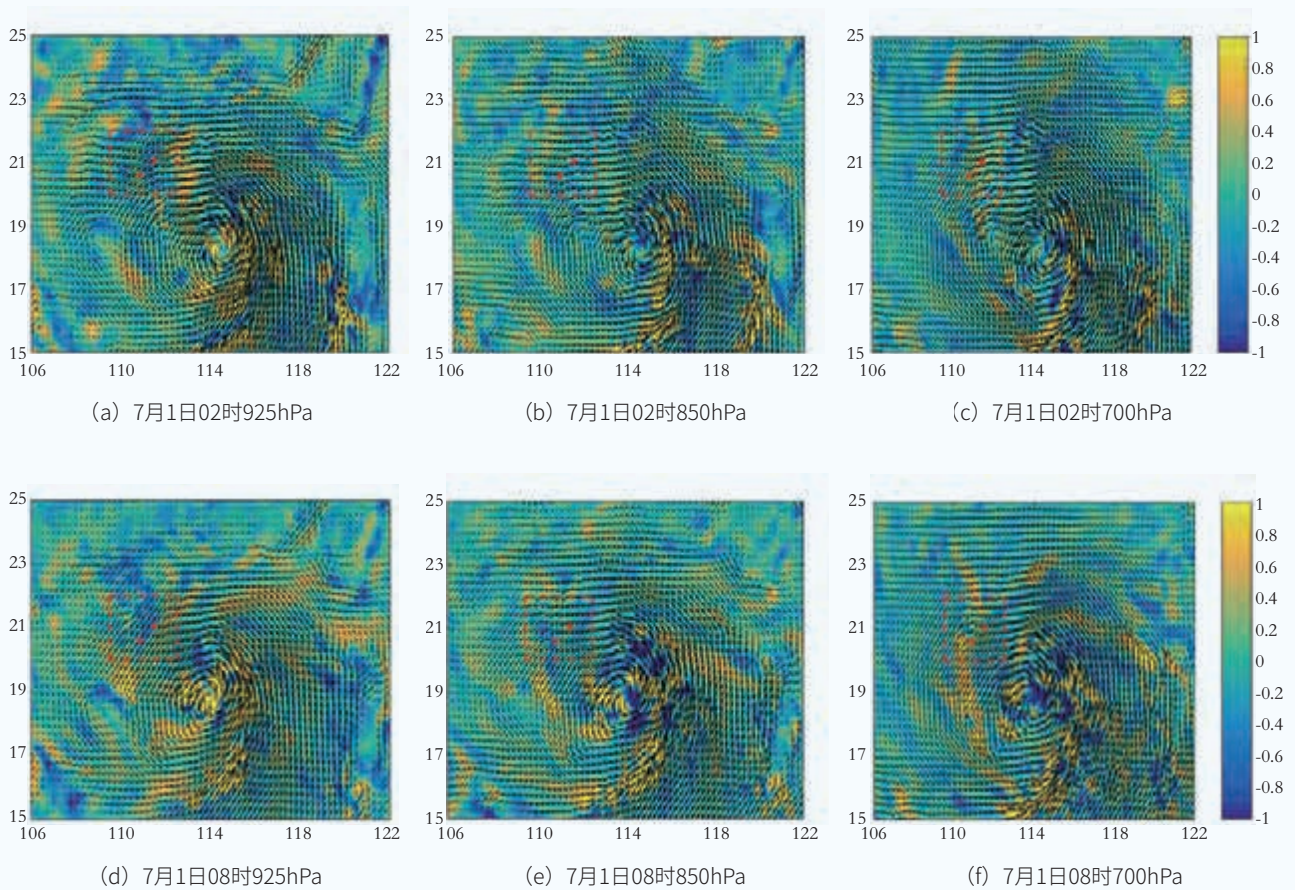


图4 台风“暹芭”登陆前925hPa、850hPa和700hPa三个高度的水平辐合辐散情况

三个高度层的大气水平辐合辐散情况如图4所示。从图中可见，台风“暹芭”在靠近我国粤南沿海期间，红色虚线框区域的水平大气基本为辐散的形势，虽然在08:00时海南岛北部及雷州半岛区域在700hPa高度大气辐合值为正，但范围较小，在850hPa和925hPa两个高度上湛江和阳江漂浮式测风激光雷达所在区域大气辐合值均为负值。这表明台风“暹芭”登陆前该区域的大气辐合对流运动并不强烈。

CAPE和CIN是用来表示整体大气垂直不稳定度大小的物理参数⁵。CAPE是气块在给定环境中绝热上升时正浮力所产生能量的垂直积分，是对流发生潜势和潜在强度的一个重要指标。在温度对数压力图(图5)¹³上，CAPE正比

于气块上升状态曲线A和环境温度层结曲线C从自由对流高度F至对流上限B(也称为平衡高度，即EL)所围成区域的面积，即当超过自由对流高度F后，空气块受到向上的正浮力而得到继续发展。此外，除CAPE，在图5中自由对流高度以下的负浮力区域面积的大小被称为CIN，其意义为阻止气块自地面向上至自由对流高度F的能量大小。有研究指出，天气尺度的抬升不再是对流初始化的最直接的强迫因子，CAPE的累积为对流的发生提供了有利条件，而减弱的CIN和增强的CAPE则为对流的发展提供了有利条件¹⁴。

表1和表2分别为台风“暹芭”和“马鞍”登陆前约24h内，两部漂浮式测风激光雷达所在位置CAPE和CIN

13: 吕美仲. 大气动力学[M]. 气象出版社, 2004.

14: Meng Zhiyong, Zhang Yunji. On the squall lines preceding landfalling tropical cyclones in China[J]. Mon Wea Rev, 2012, 140 (5) : 445 - 470.

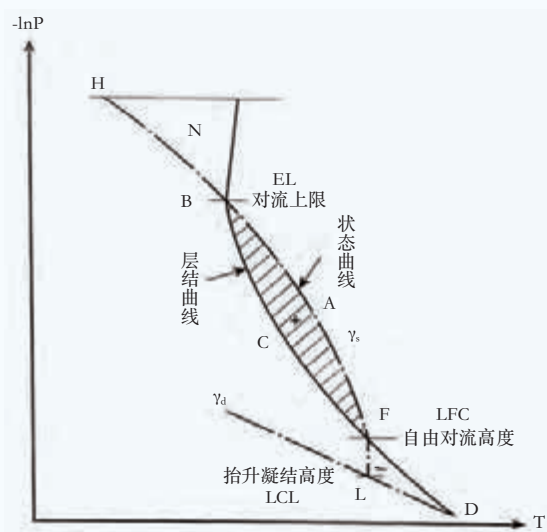


图5 温度对数压力示意

表1 两次台风登陆前CAPE指数变化 (单位: $J \cdot kg^{-1}$)

台风“马鞍”	08/24/00	08/24/06	08/24/12	08/24/18
阳江	2487	3019	249	880
湛江	2009	2765	2284	338
台风“暹芭”	07/01/00	07/01/06	07/01/12	07/01/18
阳江	1007	657	599	829
湛江	875	830	792	380

的数值变化。从表1可见,在台风“马鞍”登陆前一日的08:00时,阳江和湛江两地的CAPE均已超过 $2000J \cdot kg^{-1}$ 。且随着午后的升温,局地的CAPE进一步增加,14:00时阳江和湛江两部漂浮式测风激光雷达所在位置的CAPE分别上升至 $3019J \cdot kg^{-1}$ 和 $2765J \cdot kg^{-1}$ 。到了当日20:00时,阳江的CAPE骤降至 $249J \cdot kg^{-1}$,说明在这段时间内大气CAPE已经快速释放,这往往与强对流天气的发生有密切的关系¹⁵。相比之下,湛江的CAPE是在20:00时后才有明显的降低。表2显示,在8月24日全天,阳江和湛江两部漂浮式测风激光雷达所在位置的CIN均小于0,结合CAPE和CIN分析可知,在台风登陆前一日下午至晚间,粤东南沿海低层大气存在较明显的热力不稳定性,且根据CAPE的变化可以判断强对流天气发生于下午至傍晚时段,而湛江的发生时间相对阳江要晚一些。7月1日,台风“暹芭”登陆前一天,阳江和湛江两部漂浮式测风激光雷达所

表2 两次台风登陆前CIN指数变化 (单位: $J \cdot kg^{-1}$)

台风“马鞍”	08/24/00	08/24/06	08/24/12
阳江	-12.16	-8.06	-89.5
湛江	-18.16	-13.06	-12.5
台风“暹芭”	07/01/00	07/01/06	07/01/12
阳江	-0.2	-5.8	-1.3
湛江	-0.2	0.2	-0.3

在位置的CIN均维持小于0的状态,且08:00时阳江和湛江两地的CAPE也分别达到了 $1007J \cdot kg^{-1}$ 和 $875J \cdot kg^{-1}$,但当日随后的CAPE并没有明显的升高和下降,当天大气CAPE并没有出现快速的释放过程,说明当日的大气对流条件相对较弱。

结论

结合漂浮式测风激光雷达的测风数据,本文通过全球格点气象再分析资料对2022年具有相似路径的03号台风“暹芭”和09号台风“马鞍”登陆前低层大气的动力和热力条件差异进行了分析,得到台风“马鞍”登陆前在其前部产生台前飚线大风天气的原因为:

(1) 动力条件。对比两次台风登陆前一日台风前进方向的低层大气辐散条件可知,台风“马鞍”登陆前漂浮式测风激光雷达所处区域的低层大气辐合增强,空气在垂直方向上存在较明显的对流运动;台风“暹芭”登陆前漂浮式测风激光雷达所处区域的低层大气以辐散为主,垂直方向上对流运动的条件较弱。

(2) 热力条件。相比于台风“暹芭”,台风“马鞍”登陆前漂浮式测风激光雷达所处区域的CAPE和CIN变化明显,更有利于强对流天气的形成和爆发。

根据对该案例的分析结果,在日常的业务中,可以通过实时更新的全球格点气象预报资料场对台前飚线的发生海域进行预判,提升对台前飚线带来灾害性天气的防范和预警能力。✉
(作者单位:张璐,顾晨,王彩玉:上海勘测设计研究院有限公司;王浩:中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院;李肖雅:青岛华航环境科技有限责任公司)

15: 余大勇, 张刚, 陈华敏. 强对流天气分析与预报中的若干基本问题探究 [J]. 科技创新导报, 2022, 19 (3): 4 - 6.

风电机组机舱自由流风速推算方法研究

文 | 李建科, 王东霞, 张黎, 张朴, 彭浩, 刘佳, 苟飞

随着风电平价时代的到来,提升风电开发经济性评估的准确性至关重要。根据项目经验,已建风电场实际运行效益与设计效益可能存在较大差异。开展以风能资源为基础的风电场后评估,可以从多种可见因素中寻找出差异,提高风电场的效益。此外,风电场的后评估有利于进一步优化风电场设计,减少风电场设计阶段可能出现的风险因素。风电机组自由流风速是风电场后评估工作的关键数据资源之一。风电机组一般位于大气层的下垫面,风速一般变化比较大。此外,风电机组测风仪安装在风轮后10m左右,受风轮尾流影响,机舱测量风速一般与风电设备实际吸收的风速相差较大。因此,在风电场后评估工作中,能够准确获得机舱的自由流风速是非常重要的。

风轮和机舱会使风严重畸变。为量化这种畸变,相关国际和国家标准引入了机舱风速传递函数(NTF)。《风力发电机组基于机舱风速计法的功率特性测试》(GB/T 33225—2016)规定了机舱传递函数的测试,以及验证需要经过测试准备和设备、场地标定、测试、数据质量核查、结果推导等严格的程序,无形中带来了较大的技术成本和时间成本,无法满足企业快速、低成本的大量机组后评估需求。沈小军等人¹初步构建了“实测—共享—关联—预测—校验”风电场风参数复合感知架构,比传统风速风向仪测风更准确,比基于机舱激光雷达测风的经济性更高,但算法较复杂,主要应用于风电机组的控制。杨明明²基于卷积神经网络对机舱风速进行了修正,与IEC机舱传递函数相比,多层一维卷积神经网络可有效过滤风电机组尾流和叶片扰动对机舱风速的周期性影响,提高拟合精度,但前提是需要进行一段时间的激光雷达测风。高峰等人³根据IEC标准中NTF确定方法,建立了一种基于测风塔测风数据的机舱风速修正方法,用以绘制更加客观反映机组发电能力和准确进行发电量预测的功率曲线。该方法不仅可以克服

理论修正方法计算偏差大的问题,且在保证获得较高准确度的前提下解决了IEC标准方法中由风速分区太多导致的计算相对繁杂、实用性较差的问题,但该方法需要建立测风塔,有一定的时间周期,也需要增加额外的成本。

为进一步拓展机舱自由流风速的获取方式,本文提出了一种前期不需要采用激光雷达进行风速测量的风电机组机舱自由流风速推算方法。该方法基于多种中尺度风速数据和机舱SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition,即数据采集与监视控制系统)风速数据,采用数学方法计算出自由流风速的初始值,并通过实际功率值反推和修正功率利用系数,得出最终的自由流风速。本文以贵州省某风电场为研究对象,论述了该方法的推算过程,并选取水平轴双馈风电机组1个月的实测数据对推算结果进行了验证。

资料分析

本次研究收集并分析了风电机组位置处同一时刻点的历史多年平均中尺度风速,实时的中尺度风速,机舱风速仪测量的受风轮面尾流影响的历史风速与实时风速数据,并采用激光雷达测量机舱真实自由流风速以进行推算结果验证。

一、LiGa 中尺度风速数据

LiGa 风能资源平台是由中船海装与中国气象局国家气候中心合作开发,基于中尺度风能资源数据的风电场智能选址、风电场气象预报应用平台。该平台包含了全国范围陆上和海上的风能资源气象数据。本文采用了该平台陆上15km分辨率的历史22年时长、时间间隔1h的平均风速及平均空气密度数据。

二、Windnavigator 中尺度风速数据

AWS Windnavigator 的高分辨率数据库来自于其专

1: 沈小军, 周冲成, 付雪姣, 等. 风电场风参数感知方法现状与展望 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(9): 1289—1297.

2: 杨明明. 基于卷积神经网络的机舱风速修正 [J]. 华电技术, 2021, 43(5): 75—79.

3: 高峰, 杨锡运, 王伟, 等. 基于测风塔测风数据的机舱风速修正 [J]. 系统仿真学报, 2016, 28(11): 2790—2797.

利研发的 MesoMap 数值模拟系统，随后经过采用大量实测测风数据进行同化、校验和优化，最终得到了现有的高精度风能资源数据库。

MesoMap 数值模拟系统由两套数值气象模式组成：一套中尺度数值天气预报模式 (Mesoscale Atmospheric Simulation System, MASS)，以及一套小尺度风流模式 (WindMap)。中尺度模式模拟近 15 年周期内代表年的天气状况，其空间分辨率为 2.5km。小尺度模式嵌套在中尺度模式中，对局地风况进行重新模拟，捕捉在 200m 分辨率的小尺度空间内，受地形和地表粗糙度变化影响的局地风况。

气象模式使用了大量不同来源的气象数据和地理信息数据。中尺度模拟的初步条件主要来自于 NCAR/NCEP 的全球再分析数据库 (NNGR) —— 其可提供 6h 步长的 2.5°

全球格点数据。NNGR 与全球上千个气象观测站合作，包括地面站、探空气球、气象卫星和飞机等。地理信息数据包括了地形、地表植被、海表面温度、土壤温度和湿度。

本文采用了 Windnavigator 与 SCADA 测风同时时间段的中尺度间隔 1h 平均风速数据。

三、风电场 SCADA 风速、功率数据

风电场 SCADA 系统是通过对其风电机组状态进行监控，保障风电场安全、可靠、经济运行的有效方式。本文采用了风电机组 SCADA 间隔 1h 平均风速数据和平均功率数据。

四、激光雷达技术参数

为了对分析研究结果进行验证，选取了 Windcube 激光雷达^{4, 5}进行风电机组自由流风速的测量（激光雷达安装和风速测量⁶，均由中国船级社负责），其技术指标如表 1 所示。

表1 激光雷达Windcube技术指标

测量参数		压力测量精度	±1.3hPa
范围	40~300m	电子罗盘	内置
数据采样频率	1Hz	系统运输	
自定义高度层数	12	大小	系统：543mm×552mm×540mm
风速精确度	0.1m/s		外壳：685mm×745mm×685mm
风速测量范围	0~70m/s	重量	系统：45kg，运输外壳：21kg
风向测量精确度	1°	软件 / 数据	
供电参数		输出格式	ASC II
电源	18-32 DC/100~230 VAC 50~60Hz 电源适配器	资料存储	固态硬盘和备用闪存
		数据传输	LAN/USB/3G/ 以太网 / 卫星
功率	45W	标准 windsoft 软件	基于 web 开发，ie 接口登录
环境参数			配置和控制设备
工作温度范围	-45~+50°C		测量数据实时显示
湿度范围	0%~100%RH	数据输出	故障诊断功能
防护等级	IP67		1s/2min/5min/10min 平均水平风速、垂直风速、最大最小值
抗震动	ISTA/FEDEX 6A		风向
安全性	Class 1M IEC / EN 60825-1		标准偏差
认证	CE	信噪比 (SNR)	
PTU 组件 (温湿压传感器参数)		风切变、紊流强度	
温度测量范围	-40~+80°C	GPS 坐标	
温度测量精度	±1°C	温度、湿度、大气压力 (通过 PTU 模块来测量)	
湿度测量范围	0%~100%RH		
压力测量范围	600 ~ 1100hPa		

4: 彭程, 赵长明, 张海洋, 等. 激光测风雷达的双平衡相干探测技术仿真研究 [J]. 航天返回与遥感, 2015, 36 (6): 55 - 63.

5: 张超越. 激光雷达测风重构技术在风电机组的应用研究 [D]. 上海: 上海船舶设备研究所, 2020.

6: 风电场风能资源及机组功率特性评估报告. 中国船级社质量认证公司, 2018.

Windcube 激光雷达采用革新的激光脉冲扫描技术，可同时测量 12 个高度的风能资源数据，包括矢量风速和风向，系统自动记录每秒钟的实时采集数据。

机舱自由流风速推算

选择位于贵州省中部的某座于 2015 年建成投入运行的风电场（图 1）进行机舱自由流风速推算研究。该风电场场区海拔高度在 1490~1620m，地形以山地高原为主，平均气温 12.4℃，属于典型的亚热带温暖湿润的季风气候，受冬夏季风和地形风影响，风向相对集中。

本研究对该风电场 1# 机组自由流风速进行了推算，并

与激光雷达的实测自由流风速数据（2018 年 6 月 1 日至 6 月 30 日 1 个月的测试数据⁶⁾进行对比验证。具体计算过程如图 2 所示。

一、SCADA 风速、功率数据

对测试机组的 SCADA 风速和功率数据进行处理，得到小时平均数据，并按时间整点进行分类存储，见表 2 和表 3（由于数据较多，文中只列出 0 点时刻数据，下同）。

二、中尺度平均风速及平均空气密度

1. 中国海装 LiGa 风能资源平台

下载该风电场附近的历史中尺度风速数据和空气密度数据（网址：<https://hzgliga.com/query>），进行多年平均统计，并按照时间整点进行整理，其中 0:00 的统计数据



图1 风电场风电机组、激光雷达位置和主风向示意（LiGa风能资源平台截图）

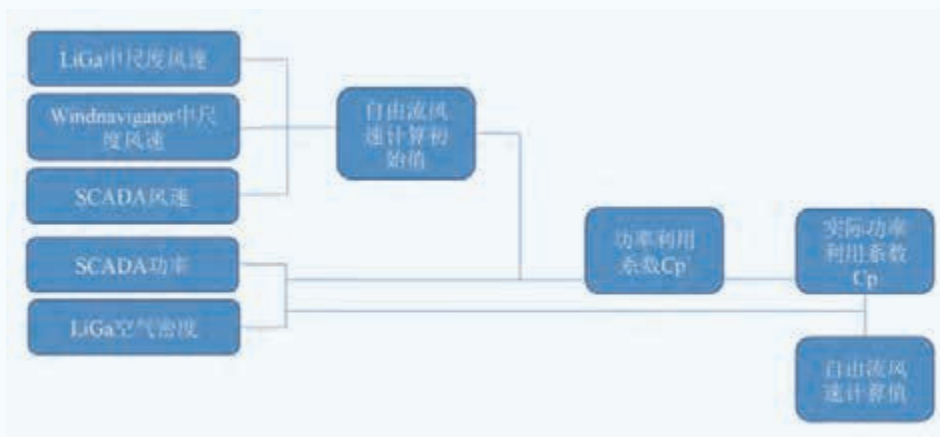


图2 自由流风速计算过程

表2 SCADA采集的0:00小时平均风速

采样时间	SCADA_1h 平均风速 _2018/ (m/s)	SCADA_1h 平均风速 _2017/ (m/s)	SCADA_1h 平均风速 _2016/ (m/s)
6/10:00	2.42	7.46	8.41
6/20:00	2.38	5.37	6.42
6/30:00	2.87	4.34	8.19
6/40:00	2.02	7.87	1.50
6/50:00	3.36	6.43	3.51
6/60:00	4.24	4.83	4.08
6/70:00	4.23	1.71	6.47
6/80:00	4.95	8.32	4.69
6/90:00	5.39	10.55	5.61
6/100:00	3.53	7.98	4.64
6/110:00	4.07	2.39	3.01
6/130:00	3.32	5.28	1.49
6/140:00	5.70	5.28	5.21
6/150:00	3.36	7.48	4.36
6/160:00	4.17	5.64	5.79
6/170:00	5.41	3.84	3.33
6/180:00	6.44	4.78	6.62
6/190:00	6.21	3.17	7.85
6/200:00	4.59	1.60	7.50
6/210:00	5.29	3.21	6.33
6/220:00	2.73	6.23	7.03
6/230:00	3.35	7.33	8.15
6/240:00	5.48	4.90	7.85
6/250:00	7.49	8.52	8.03
6/260:00	7.37	2.98	5.04
6/290:00	2.95	3.60	4.52
6/300:00	5.73	4.79	7.29

表3 SCADA采集的0:00小时平均功率

采样时间	SCADA_1h 平均功率 _2018/kW
2018/6/10:00	0.00
2018/6/20:00	0.00
2018/6/30:00	7.85
2018/6/40:00	1.29
2018/6/50:00	17.03
2018/6/60:00	86.01
2018/6/70:00	142.08
2018/6/80:00	318.78
2018/6/90:00	492.04
2018/6/100:00	104.94
2018/6/110:00	172.07
2018/6/130:00	20.86
2018/6/140:00	511.41
2018/6/150:00	42.99
2018/6/160:00	246.41
2018/6/170:00	397.12
2018/6/180:00	664.01
2018/6/190:00	574.20
2018/6/200:00	219.74
2018/6/210:00	165.39
2018/6/220:00	0.00
2018/6/230:00	21.06
2018/6/240:00	342.28
2018/6/250:00	1165.14
2018/6/260:00	1169.95
2018/6/290:00	0.00
2018/6/300:00	268.09

见表 4。

2. Windnavigator 平台中尺度风速数据

下载该风电场附近的 2018 年风速数据（网址：<https://windnavigator.ul-renewables.com/wsa>），并按照相同时间整点进行整理，其中 0：00 的风速情况见表 5。

三、自由流风速计算初始值

为了更好地找到风速数据之间的规律，按照同月同日

同时刻将中尺度风速、SCADA 风速运用数学方法建立模型。中尺度风速属于自由流风速，根据前期相关分析，中尺度平均风速一般高于实际自由流平均风速，具有正向误差；SCADA 风速是实测数据，但受叶片旋转尾流影响，SCADA 平均风速小于自由流平均风速，存在负偏差³。因此，本文将 5 种不同的风速数据（Windnavigator 平台中尺度风速数据 v1、LiGa 平台中尺度平均风速 v2、

表4 LiGa中尺度0：00平均风速和平均空气密度

时间	多年平均风速 / (m/s)	平均空气密度 / (kg/m ³)
6/1 0：00	6.99	1.020
6/2 0：00	6.19	1.019
6/3 0：00	6.18	1.021
6/4 0：00	6.97	1.020
6/5 0：00	7.00	1.019
6/6 0：00	7.89	1.017
6/7 0：00	6.77	1.018
6/8 0：00	7.71	1.019
6/9 0：00	6.54	1.020
6/10 0：00	6.86	1.024
6/11 0：00	6.54	1.022
6/12 0：00	5.95	1.021
6/13 0：00	6.01	1.022
6/14 0：00	6.69	1.018
6/15 0：00	7.68	1.017
6/16 0：00	7.39	1.015
6/17 0：00	6.75	1.014
6/18 0：00	7.49	1.012
6/19 0：00	7.22	1.012
6/20 0：00	6.82	1.013
6/21 0：00	6.92	1.012
6/22 0：00	7.18	1.0101
6/23 0：00	6.89	1.010
6/24 0：00	7.67	1.010
6/25 0：00	6.51	1.009
6/26 0：00	6.98	1.010
6/27 0：00	5.54	1.011
6/28 0：00	6.86	1.011
6/29 0：00	7.47	1.009
6/30 0：00	7.98	1.007

表5 Windnavigator平台0：00中尺度平均风速

时间	2018 年平均风速 / (m/s)
6/1 0：00	2.81
6/2 0：00	4.74
6/3 0：00	0.9
6/4 0：00	7.65
6/5 0：00	4.16
6/6 0：00	4.27
6/7 0：00	4.41
6/8 0：00	2.33
6/9 0：00	5.94
6/10 0：00	3.77
6/11 0：00	3.4
6/12 0：00	4.92
6/13 0：00	4.02
6/14 0：00	4.52
6/15 0：00	3.07
6/16 0：00	3.87
6/17 0：00	5.34
6/18 0：00	8.13
6/19 0：00	2.26
6/20 0：00	1.36
6/21 0：00	2.82
6/22 0：00	2.05
6/23 0：00	2.32
6/24 0：00	5.42
6/25 0：00	9.4
6/26 0：00	7.67
6/27 0：00	4.58
6/28 0：00	6.62
6/29 0：00	4.02
6/30 0：00	4.52

SCADA 平均风速测风年 v3、SCADA 平均风速 2016 年 v4、SCADA 平均风速 2017 年 v5) 经过多元一次多项式回归计算生成自由流平均风速初始值。各整点的多元一次多项式表达式为：

$$v' = a_1 \times v_1 + a_2 \times v_2 + a_3 \times v_3 + a_4 \times v_4 + a_5 \times v_5 \quad (1)$$

式中, a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 a_5 为系数, 且 $a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = a_5 = 1/6$ 。

根据上述方法计算得到本案例 24 个时刻的风速分析结果, 其中 0:00 的计算结果如表 6 所示。

四、功率利用系数

根据计算出的自由流平均风速初始值 (表 6), 通过公

式 (2)、(3) 计算功率利用系数:

$$p = \frac{1}{2} C_p' \rho A v'^3 \quad (2)$$

$$C_p' = \frac{2p}{\rho A v'^3} \quad (3)$$

式中, p 为功率, 按表 3 进行取值; ρ 为平均空气密度, 按表 4 进行取值; A 为风轮扫风面积, 其值为 9676.89m^2 。

对于反算出的 C_p' , 风速大于 3m/s 时功率为 0 的 C_{pt}' 和超出 0.593 的 C_p' 都根据自由流平均风速初始值采用理

表6 自由流平均风速初始值

时间	计算风速 v' /(m/s)
2018/6/10:00	2.68
2018/6/20:00	2.67
2018/6/30:00	1.93
2018/6/40:00	3.68
2018/6/50:00	3.53
2018/6/60:00	2.79
2018/6/70:00	2.07
2018/6/80:00	5.00
2018/6/90:00	8.02
2018/6/100:00	4.44
2018/6/110:00	2.47
2018/6/130:00	3.83
2018/6/140:00	5.36
2018/6/150:00	3.24
2018/6/160:00	3.39
2018/6/170:00	4.57
2018/6/180:00	5.65
2018/6/190:00	3.83
2018/6/200:00	1.76
2018/6/210:00	3.43
2018/6/220:00	2.14
2018/6/230:00	3.50
2018/6/240:00	4.15
2018/6/250:00	9.42
2018/6/260:00	6.07
2018/6/290:00	1.35
2018/6/300:00	4.30

表7 功率利用系数

时间	C_p	C_p'	C_{pt}
2018/6/10:00	0.11	0.11	0.11
2018/6/20:00	0.11	0.11	0.11
2018/6/30:00	0.11	2.06	0.11
2018/6/40:00	0.05	0.05	0.11
2018/6/50:00	0.11	0.73	0.11
2018/6/60:00	0.30	2.72	0.30
2018/6/70:00	0.30	11.10	0.30
2018/6/80:00	0.37	1.43	0.37
2018/6/90:00	0.17	0.17	0.40
2018/6/100:00	0.28	0.28	0.30
2018/6/110:00	0.30	7.84	0.30
2018/6/130:00	0.11	0.70	0.11
2018/6/140:00	0.40	1.72	0.40
2018/6/150:00	0.11	2.37	0.11
2018/6/160:00	0.37	3.54	0.37
2018/6/170:00	0.40	2.15	0.40
2018/6/180:00	0.40	1.90	0.40
2018/6/190:00	0.40	5.27	0.40
2018/6/200:00	0.37	22.55	0.37
2018/6/210:00	0.30	2.82	0.30
2018/6/220:00	0.11	0.11	0.11
2018/6/230:00	0.11	0.92	0.11
2018/6/240:00	0.37	2.68	0.37
2018/6/250:00	0.41	0.70	0.41
2018/6/260:00	0.41	2.64	0.41
2018/6/290:00	0.11	0.11	0.11
2018/6/300:00	0.37	1.88	0.37

表8 自由流平均风速计算值

时间	计算风速 v/ (m/s)	时间	计算风速 v/ (m/s)
2018/6/1 0: 00	2.68	2018/6/16 0: 00	5.14
2018/6/2 0: 00	2.38	2018/6/17 0: 00	5.87
2018/6/3 0: 00	2.44	2018/6/18 0: 00	6.97
2018/6/4 0: 00	1.75	2018/6/19 0: 00	6.64
2018/6/5 0: 00	3.16	2018/6/20 0: 00	4.95
2018/6/6 0: 00	3.88	2018/6/21 0: 00	4.83
2018/6/7 0: 00	4.58	2018/6/22 0: 00	2.73
2018/6/8 0: 00	5.59	2018/6/23 0: 00	3.40
2018/6/9 0: 00	8.36	2018/6/24 0: 00	5.74
2018/6/10 0: 00	4.26	2018/6/25 0: 00	8.35
2018/6/11 0: 00	4.88	2018/6/26 0: 00	8.36
2018/6/13 0: 00	3.37	2018/6/29 0: 00	2.95
2018/6/14 0: 00	6.38	2018/6/30 0: 00	5.30
2018/6/15 0: 00	4.30		

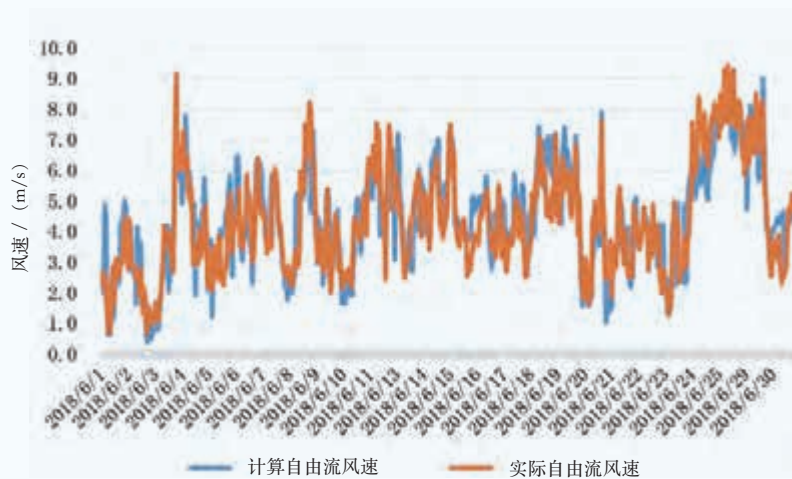


图3 计算自由流风速与实际自由流风速对比

论代替，实际功率利用系数 C_p 计算结果见表 7。

五、实际自由流风速

根据公式 (4) 计算出实际自由流风速 (表 8)：

$$v = \sqrt[3]{2p / C_p \rho A} \quad (4)$$

式中， C_p 按表 7 进行取值。

机舱自由流风速验证

利用激光雷达进行同时期实际自由流风速的测量并进行统计计算。根据计算结果 (图 3、图 4)，自由流风速与实测自由流风速变化趋势一致，在测量时间段内计算自由

表9 计算自由流风速与测量自由流风速相关系数及均方根误差

时间	相关系数	均方根误差 / (m/s)	时间	相关系数	均方根误差 / (m/s)
0: 00	0.883	0.875	13: 00	0.894	0.881
1: 00	0.915	1.091	14: 00	0.896	0.811
2: 00	0.934	0.590	15: 00	0.949	0.674
3: 00	0.865	0.877	16: 00	0.874	0.826
4: 00	0.849	0.908	17: 00	0.925	0.638
5: 00	0.892	0.787	18: 00	0.911	0.730
6: 00	0.925	0.859	19: 00	0.930	0.657
7: 00	0.867	1.145	20: 00	0.860	0.960
8: 00	0.849	0.974	21: 00	0.845	0.900
9: 00	0.910	0.762	22: 00	0.810	0.834
10: 00	0.875	0.928	23: 00	0.860	0.837
11: 00	0.864	0.963	整体 / 平均	0.884	0.853
12: 00	0.840	0.953			

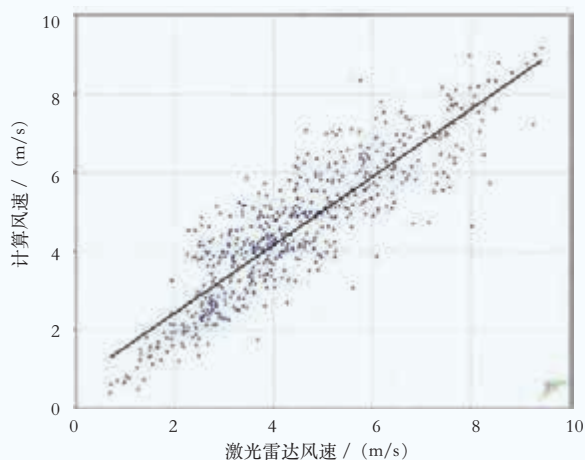


图4 计算自由流风速与实际自由流风速拟合关系

流平均风速值比实测平均风速高约 2.05%。

从相关系数和均方根误差的分布情况（表 9）看，各整点时刻的相关系数均大于 0.8。其中，0 点—12 点时间段的相关系数略高于 13 点—23 点时间段，高约 0.34%；0 点—

12 点时间段的均方根误差平均值比 13 点—23 点时间段高约 11.01%。

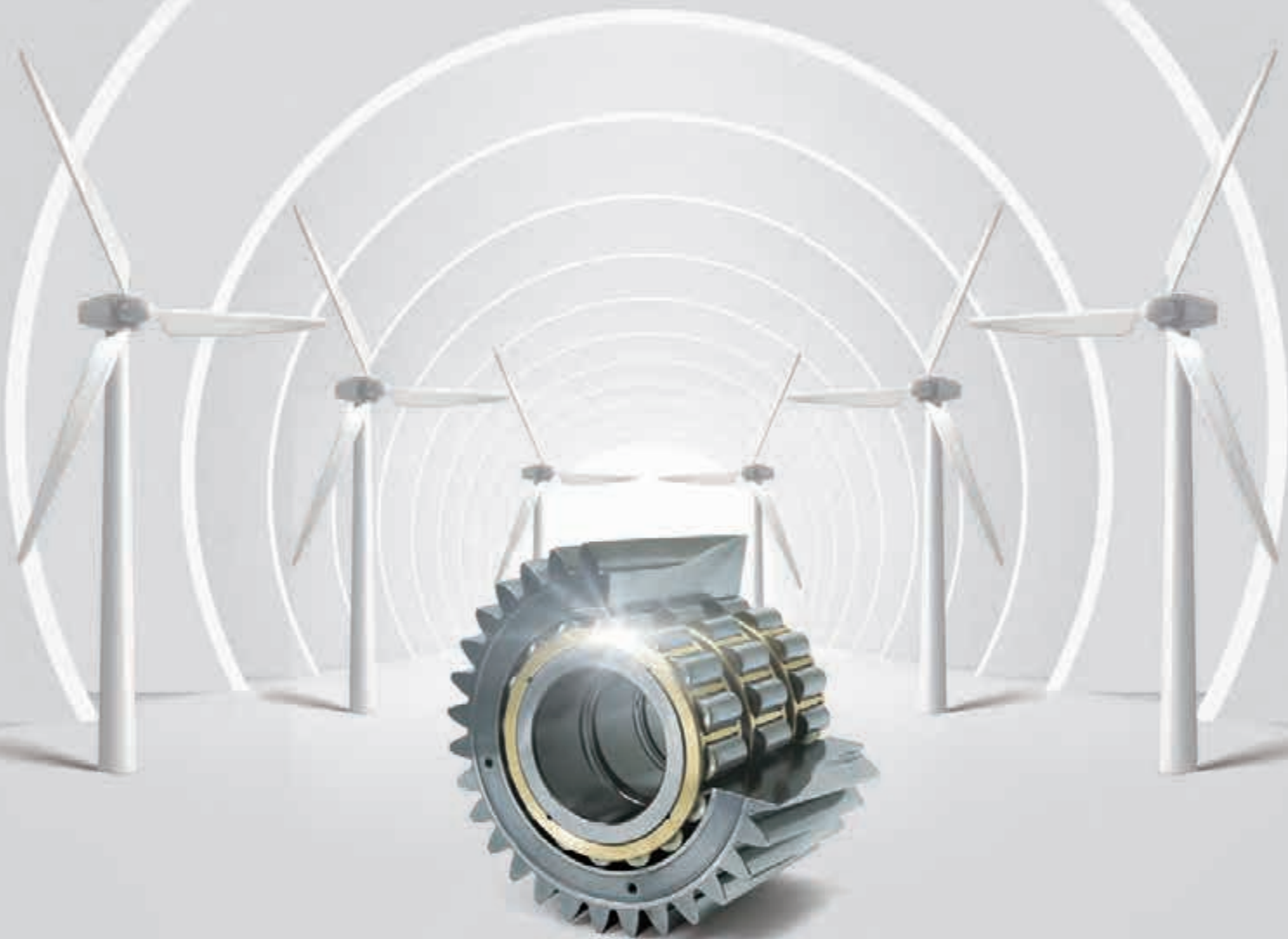
结论

本文提出了一种计算风电机组机舱自由流风速的新方法，主要基于风电机组附近的中尺度数据，结合风电机组 SCADA 的风速和功率数据，使用风能转换公式进行计算得出最终的自由流风速。经过验证，采用该方法在测风 1 个月的时间段确定的自由流风速与测量风速皮尔逊相关系数为 0.884， R^2 为 0.781，均方根误差为 0.853m/s。该方法前期不需要进行激光雷达观测即可采用，能够根据情况作为工程化的机舱自由流风速计算方法，满足快速完成风电场风能资源后评估的需求。此外，本案例机组运行时间较长，采用了多元一次多项式进行自由流风速初始值的计算。如果风电场机组运行时间较短，用于建模的风速种类较少，则本方法的适用性较差。🔗

（作者单位：中船海装风电有限公司）



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



保障风力发电机组稳定可靠运行，将风能转化为电能，年复一年风雨无阻

无外圈轴承 — 风力发电增速机用

齿轮内径面直接作为轴承的滚道使用，从而省略了外圈的设计，

该设计能够有效解决外圈打滑的问题，同时通过轴承特殊配列的设置，还可实现更高的承载能力，

提高该部位的运转可靠性。

NSK微信公众号



CSSC

重庆齿轮箱有限责任公司
CHONGQING GEARBOX CO.,LTD

改变 成就未来



服务电话：023-47231560
销售电话：023-47231563
网址：www.cngpower.cn
邮编：402263
传真：(023) 47231590
地址：重庆江津德感工业园区
电子邮箱：cngpower-fd@chongchi.com



3S LIFT

SAFE | SIMPLE | SPECIALIZED

大载荷 齿轮齿条升降机

—

大风机登塔全新解决方案

展位 | E2-B22

