# 風能
# 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
CN11-5942/TK
04
2025年第04期 总第182期 赛迪出版物

P08. 专栏
电力市场中“价值”与“价格”的偏离和协同

P54. 国际
专家解读欧盟《外国补贴条例》（FSR）审查

## 王海波：和展能源先做“小而美” P36

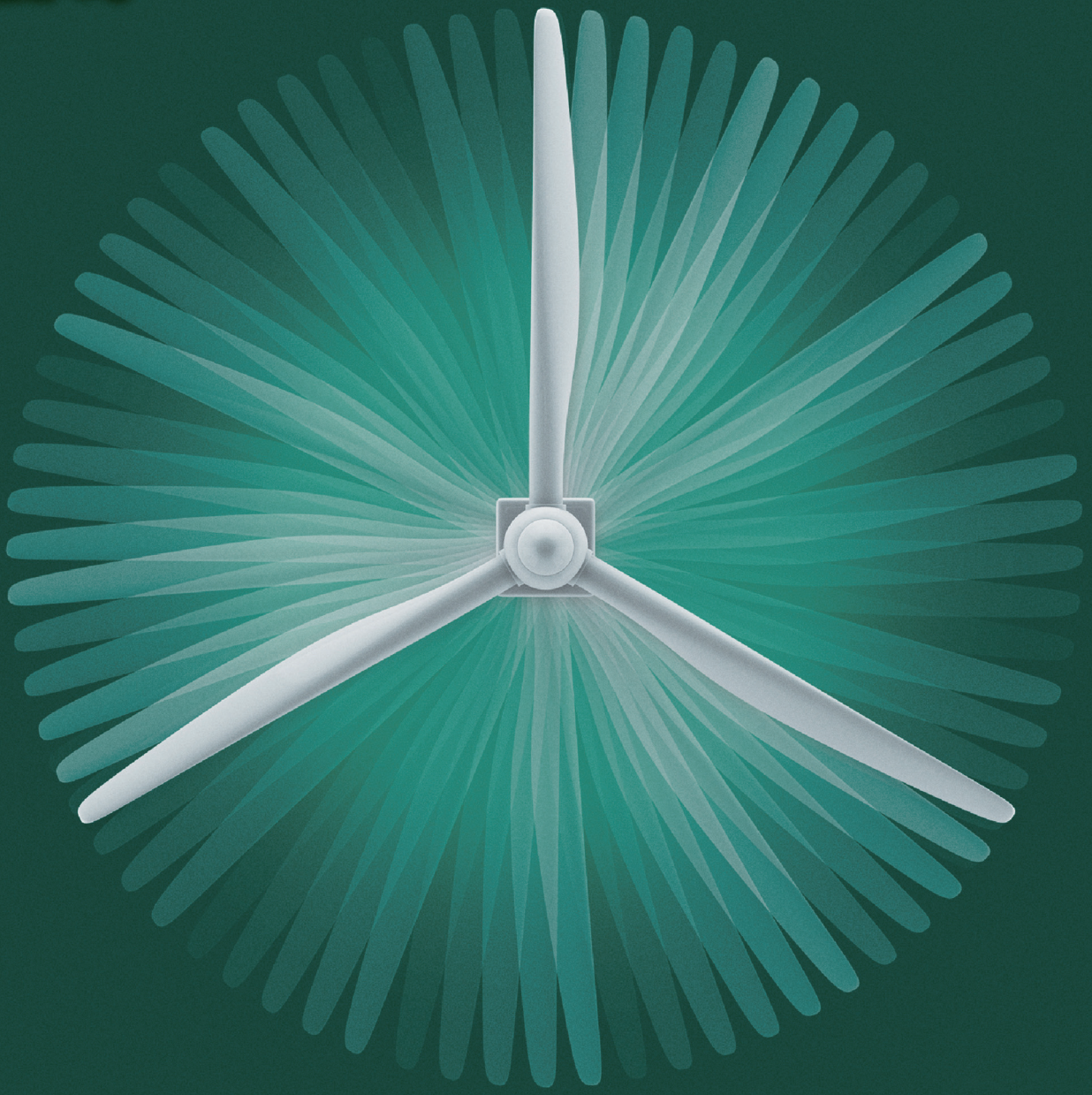
在电价突变的开发环节保持现有节奏，在竞争激烈的混塔市场谨慎扩张，王海波更希望将和展能源打造成一个“小而美”的公司。

ISSN 1674-9219
04

广告

DEC
东方电气
DONGFANG ELECTRIC
Shape the Future
with Green Power
绿色动力
驱动未来
H25000 / H20000 / H18000 / H14300 / H12500 / H10000
H10000 / H8350 / H6700 / H6250 / G5560 / G5000
东方电气风电股份有限公司
DONGFANG ELECTRIC WIND POWER CO., LTD.
地址：四川省德阳市华山南路二段2号
Telephone
电话(Tel) | 0838-2689599
传真(Fax) | 0838-2821700
address
Add: No. 2, 2nd Section of Southern Huashan Road, Deyang, Sichuan Province, P.R. China
Postcode
618000
广告

MEGAP&C®



# 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.
603062.SH
上交所股票代码 / SSE Stock Code

如需了解更多解决方案,请联系
+86 21 59100888
zhanghuayong@megacoatings.com
megacoatings.com

广告

# 风能人，为爱一路同行！

北京新阳光慈善基金会
New Sunshine Charity Foundation

儿童舒缓治疗专项基金
Pediatric Palliative Care Special Fund

了解我们　支持我们　加入我们

## 风能人 · 儿童舒缓治疗活动中心

是在风能行业的支持下建立的、为血液肿瘤儿童及其家庭提供人文关怀服务的专业公益机构，旨在通过专业的舒缓疗愈服务，帮助孩子们身心双重康复；同时为家属进行心理疏导和护理培训，用全方位的关怀支持患儿和家庭渡过人生艰难时刻。

公益广告

CHINA WINDPOWER 2025 20-22 October Beijing, China

# 2025北京国际风能大会暨展览会

CHINA WIND POWER

**10月20-22日　北京·中国国际展览中心（顺义馆）**

## 不可错过的风能展

| 120000+ | 1000+ | 200+ | 120000+ |
|---|---|---|---|
| 平方米展示面积 | 家参展企业 | 场次论坛活动 | 人次专业观众 |

### 同期举办

氢能装备与燃料电池产业展览会（CWP HFC）

海上风电工程及装备展览会（CWP Offshore）

新型储能大会暨展览会（NES+）

**欢迎加入全球风电盛会**

关注我们了解更多

扫码预定展位

CCiD赛迪会展　北京赛迪会展有限公司

010-88558111　010-88558100

info@chinawind.org.cn　www.chinawind.org.cn

广告

数据来源：展会内部数据

# 落实“136号文件”，促进新能源高质量发展

文 | 秦海岩

日前，《国家发展改革委 国家能源局关于深化新能源上网电价市场化改革 促进新能源高质量发展的通知》（下称“136 号文件”）印发，这是新形势下推动新能源高质量发展，实现能源转型、碳达峰碳中和目标的重要基础性制度。

“136 号文件”的出台，是在电力市场化改革不断深化过程中，统一各地政策和市场规则，确保新能源高质量发展的“及时雨”。2006 年可再生能源法生效以来，可再生能源发电量收购原则不断发生变化，可再生能源发电量参与电力市场的比例正逐年提升。新能源项目投资收益的不确定性风险加大，导致投资积极性降低。如果不完善相关政策，将会影响新能源装机规模的持续增长，不利于双碳目标的落实。

新能源全电量参与现货市场是建设统一电力市场体系的基础。随着新能源装机和发电量占比的不断提高，新能源全电量参与市场，避免市场割裂，才能实现市场的完整性，进而建立统一的电力市场，真正让市场机制发挥应有的作用。同时，新能源在电力系统中的装机规模和发电量大幅增加，对电力系统的灵活性提出了更高要求。电力系统内并不缺乏灵活性资源，而是缺少调动这些灵活性资源的市场机制。通过市场化机制可以解决高比例新能源并网面临的电力系统调节能力问题，有利于消纳新能源电力。

新能源可持续发展价格结算机制是降低新能源发电项目市场不确定性风险，稳定项目收益预期，保障企业投资积极性，更好支撑新能源发展规划目标实现的重要机制。可持续发展价格结算机制，即机制电价政策，是为新能源引入的新的电价机制，实质是一种差价结算机制。对纳入机制范围内的电量，按照“机制电价”与“市场交易均价”的价差进行结算。当“市场交易均价”低于“机制电价”时，给予差价补偿；高于“机制电价”时，扣除差价。通过这种“多退少补”的结算方式，提高新能源项目投资收益的预期，降低市场不确定性风险。

政策执行效果取决于地方具体实施方案。“136 号文件”给出了“可持续发展价格结算机制”的基本原则和实施框架。然而，纳入机制的新能源“电量规模”“电价水平（机制电价）”“执行期限”“差价结算方式”“退出规则”等具体实施的细则，需要地方价格主管部门、能源主管部门、电力运行主管部门等通过出台实施方案，予以具体明确。该机制与新能源技术、产业发展、电力市场、电力系统等方面相关，又涉及地方政府不同部门、发电企业、电网企业、终端用户等众多不同诉求的利益主体，需要统一思想，统一目标，统筹协调，才能实现政策初衷，起到促进新能源发展的作用，保持新能源装机的持续增长，不断提高新能源的发电量占比，而不是背道而驰，造成新能源发展受阻，影响双碳目标的实现。

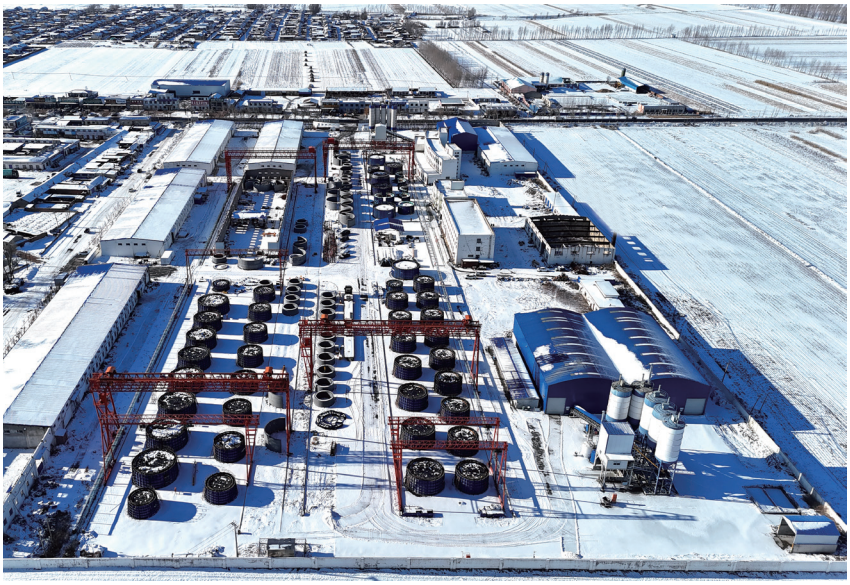
各部门协同是“136 号文件”实现预期目标的基础。“136 号文件”在保障措施中提出要强化政策协同。新能源市场化改革，牵涉各省级价格主管部门、能源主管部门、电力运行主管部门，涉及电力市场规则的具体设计制定、新能源发展规划目标的落实、新能源产业的健康发展、我国能源转型和能源安全，以及党中央、国务院双碳目标的实现，影响不可谓不大。但不同部门有着各自的视角和政策目标，关注的方面不尽相同，在政策落实过程中难免产生冲突和矛盾。如果缺乏协同，各自为政，难免会导致政策偏离目标。因此，各省级政府应该统一组织，成立由各个部门共同参与的细则起草和落实工作组，才能使这项意义重大、影响深远的政策实现初衷，促进新能源健康持续发展。

風能 WIND ENERGY
2025年第04期

36 封面故事 Cover Story

## 王海波：和展能源先做“小而美”

在电价突变的开发环节保持现有节奏，在竞争激烈的混塔市场谨慎扩张，王海波更希望将和展能源打造成一个“小而美”的公司。



08 专栏 Column

## 电力市场中“价值”与“价格”的偏离和协同

研究电力市场中“价值”与“价格”的内涵、关系，探索实现两者合理匹配的有效策略，对推动电力市场可持续发展、优化能源资源配置、保障能源安全具有重要意义。

14 对话 Dialogue

## 陈棋：以科技创新为支点，加速培育风电新质生产力

运达股份董事长陈棋认为，未来，风电将肩负支撑能源系统转型升级和实现碳中和的重任，预计未来五年，新增装机容量将超5亿千瓦。

54 国际 International

## 专家解读欧盟《外国补贴条例》（FSR）审查

为帮助中国风电企业尽早着手、主动应对，笔者邀请到普华永道专门协助企业应对欧盟 FSR 审查的专家们来帮助解读该政策，并提供一些建议的应对思路。

E 能源新说

经济正在经历重大结构性转型，并在科技领域涌现出具有革命性潜力的突破。人工智能的全球发展将消耗大量能源，能源消耗问题不可忽视。全球经济的复杂性和分裂趋势无法避免，但我们可以通过创新的国际合作框架，重新平衡限制与开放性。中国对开放多边体系的持续支持，以及新兴经济体的崛起，将在未来构建新的全球秩序中发挥重要作用。

——诺贝尔经济学奖得主 迈克尔·斯宾塞（Michael Spence）

Goldwind
Goldwind
可持续　更美好
Driving Our Renewable Future
金风科技全球风电装机超过1.28亿千瓦
Goldwind's Global Cumulative Installed Wind Power Capacity Exceeding 128 GW

广告

# 目次 CONTENTS

风能 WIND ENERGY
2025年第04期

《风能》杂志在线阅读网站
www.cwea.org.cn

**卷首语 / From The Editor**
落实“136号文件”，促进新能源高质量发展 …… 秦海岩 / 01

**专栏 / Column**
电力市场中“价值”与“价格”的偏离和协同 …… 陈皓勇 / 08–12

**对话 / Dialogue**
陈棋：以科技创新为支点，加速培育风电新质生产力 …… 14–17

**乘风 / Windward**
风电绘就彩云之南新画卷 …… 王芳 / 18–23

**考据 / Textual Criticism**
探究古籍中的大风车（上） …… 蔡丰波 / 24–30

**人物 / Figure**
去玄学、求科学的“风水先生”
——记瑞科科技西南分公司总经理巫强的成长故事 …… 时春景 / 32–34

**封面故事 / Cover Story**
王海波：和展能源先做“小而美” …… 赵靓，薛辰 / 36–42

**市场 / Market**
2024年中国陆上风电下线机型统计 …… 赵靓 / 44–47

**调研 / Survey**
2024年欧洲新增风电装机16.4 GW …… 夏云峰 / 48–52

**国际 / International**
专家解读欧盟《外国补贴条例》（FSR）审查 …… 王征，胡正伟，相鹏翔 / 54–57

**产业 / Industry**
基于财务数据进行风电项目降本增效的方法探索 …… 刘颖，高文强，张娇梅 / 60–65

**技术 / Technology**
分段式复合材料风电叶片连接强度构型设计和有限元分析 …… 刘鹏飞 / 66–74
风电叶片气热除冰系统承载机架有限元分析与优化设计 …… 刘志龙，唐典雅，何兆伟，王伏林，周国文，杨肖 / 76–83
基于全过程视频监控技术的风电叶片陆上运输风险管控方案 …… 周月红，楼昱昉，冯暄，袁一帆，刘国锋，杨帅 / 84–89
风电机组高速轴刹车测温系统研究及应用 … 许力伟，宋建秀，何志强，叶伟，王家华 / 90–95
风电机组高强度螺栓连接牙型啮合特性规律研究 …… 周卫星，廖建敏，张锋，甄妮 / 96–99

**广告目次**



| 广告主 | 广告内容 | 页码 |
|---|---|---|
| 兴蓝风电 | 形象 | 封二 |
| 东方风电 | 形象 | 扉页 1 |
| 麦加芯彩 | 形象 | 扉页 2 |
| 公益广告 | 公益 | 扉页 3 |
| CWP 2025 | 形象 | 卷首语对页 |
| 金风科技 | 形象 | 目录对页 1 |
| 鉴衡认证 | 服务 | 目录对页 2 |
| 《风能》杂志 | 产品 | 版权对页 |
| 运达股份 | 形象 | P13 |
| 盘古智能 | 产品 | P31 |
| 赛米控 | 产品 | P35 |
| 伊莱特 | 形象 | P43 |
| 南高齿 | 服务 | P53 |
| 敏泰液压 | 产品 | P75 |
| CWP- 氢能 | 形象 | 后彩一 |
| 重齿 | 服务 | 封三 |
| 嘉实多 | 形象 | 封底 |

鉴衡认证
CHINA GENERAL CERTIFICATION

国家海上风电装备公共检测检验与技术服务平台

完全满足IEC标准要求的实验风电场，可开展10MW机组研发性测试

集仿真技术，标准研究，检测认证技术研究和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

广告

**主管：**工业和信息化部　**主办：**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　**出版：**北京赛迪出版传媒有限公司

# 风能
WIND ENERGY

2025年第04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　靓　**Interviewing and Editing Drirector:** 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：**叶无极　**Duty Editor:** Ye Wuji
**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　**Address:** 3 Floors, Building 26, Far East Cultural Park
远东文化园26楼3层　No. 6 Hepingli North Street Dongcheng District, Beijing, PRC
**邮编：**100013　**Zip Code:** 100013
**电话：**010-59796665-3615（编辑部）　**Tel:** 010-59796665-3615（Editorial）
010-59796665-3501（广告部）　010-59796665-3501（Advertising）
010-59796665-3501（发行部）　010-59796665-3501（Distribution）
**传真：**010-64228215　**Fax:** 010-64228215
**投稿邮箱：**gaojian@cwea.org.cn　**E-mail:** gaojian@cwea.org.cn

**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：**天津久佳精控印刷有限公司
**出版日期：**2025年4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。

风能 WIND ENERGY 杂志

# 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

广告

# 电力市场中“价值”与“价格”的偏离和协同

文 | 陈皓勇

陈皓勇
华南理工大学电力经济与电力市场研究所所长、发展中世界工程技术院（AETDEW）院士

在现代经济体系中，电力作为关键的基础能源，对社会生产和民众生活起着不可替代的支撑作用。电力市场的健康、稳定发展，不仅关系到能源行业的兴衰，更与整个国民经济的稳定运行以及社会的和谐发展紧密相连。近日，挪威执政联盟因在欧盟能源政策上的分歧而解体，主要原因是中间党与工党在是否采纳欧盟清洁能源方案上存在严重分歧。俄乌冲突爆发后，随着挪威与周边国家的几条互联线路相继投产，电力出口量大幅增加，电价在短期内出现剧烈波动且明显上涨，给国内用户带来了沉重打击。民众对政府优先考虑出口获利却忽视保障民生的做法极为不满。在我国，2024 年 11 月 29 日，由国家能源局统筹、中国电力企业联合会联合多家单位共同编制的《全国统一电力市场发展规划蓝皮书》在北京发布，提出将分“三步走”推动统一电力市场建设，这是首次明确全国统一电力市场发展“路线图”和“时间表”。在电价机制方面，也提出了建立健全市场化电价机制、深化完善市场化电价机制、形成适应全国统一电力市场的电价机制的三阶段发展目标。2025 年 1 月 27 日，国家发展改革委、国家能源局联合印发《关于深化新能源上网电价市场化改革 促进新能源高质量发展的通知》（发改价格〔2025〕136 号），旨在通过市场化手段优化新能源上网电价机制。在电力市场的诸多要素中，“价值”与“价格”占据核心地位，它们的辩证运动共同塑造着电力市场的运行轨迹。深入研究电力市场中“价值”与“价格”的内涵、关系及影响因素，探索实现两者合理匹配的有效策略，对推动电力市场的可持续发展、优化能源资源配置、保障能源安全供应具有重要的理论和实践意义。

## 理解电能“价值”与“价格”的理论基础

### 一、价值论的内涵与核心观点

价值论，作为哲学领域中探讨价值本质、构成、标准和评价的重要学说，为理解电力市场中的价值提供了理论基石。从哲学视角看，价值是客体满足主体需求的程度体现，是主体对客体意义的主观评判。在电力市场中，电能作为特殊商品，其价值体现在满足社会生产和居民生活对电力的

需求上。例如，工业生产依赖稳定的电力供应维持设备运转，居民生活中的照明、取暖、家电使用等都离不开电能，电能满足这些需求的能力构成了其价值的核心部分。

不同哲学流派的价值论观点为深入理解电力价值提供了多元视角。主观价值论强调价值源于主体的主观感受和需求，在电力市场中表现为用户对电力可靠性、供电质量等方面的主观评价影响着电能价值认知。若某地区企业因电力供应不稳定而频繁遭受生产损失，该地区企业对电能价值的评估会更多考虑可靠性因素。客观价值论则认为价值是客体本身所固有的属性，电能的生产和传输需要投入资源、技术和人力，这些客观因素决定了电能具有内在价值，如建设发电站、铺设输电线路所需的成本应在电能价值中有所体现。

**二、经济学中价值与价格的关系阐释**

在经济学理论体系中，价值与价格是既相互区别又紧密联系的概念。价值是商品的内在本质属性，不同经济学派对商品价值有不同的认识和定义。马克思主义政治经济学认为，商品价值由生产商品的社会必要劳动时间决定，它反映了商品生产过程中所耗费的社会资源量。新古典经济学派认为商品的价值取决于其边际效用，即消费者从最后 1 单位商品中获得的满足程度。价格则是价值的货币表现形式，是商品在市场交换过程中所体现的货币量。在理想的市场环境下，价格围绕价值波动，而供求关系是影响价格波动的关键因素，如图 1 所示。在电力市场中，当电力市场供大于求时，如在水电丰沛季节，部分水电资源丰富地区的电力供应充足，电价往往会有所下降；反之，当电力需求旺盛而供应紧张时，如夏季高温时期空调用电大增导致电力负荷高峰，电价可能会上升。然而，价格波动并非毫无限制，而始终应以价值为中心，价格和价值的关系影响着市场运行、资源配置以及社会公平性。当市场价格长期高于商品的实际价值，将导致资源错配、市场泡沫和需求萎缩；如果商品的价格长期低于其实际价值，将导致供给减少、市场短缺、投资不足。这是价值规律在电力市场中的体现。

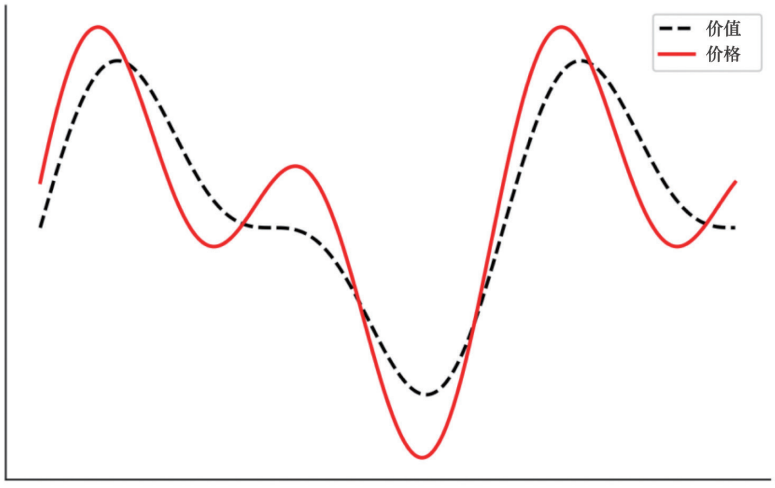



图1 价格围绕价值上下波动

## 电力市场中电能价值的独特性与构成要素

**一、电能价值的物理与经济双重属性**

电能具有区别于一般商品的独特物理属性，这深刻影响着其价值构成。电能的生产、传输和消费具有瞬间同步性，无法大规模存储，这使得电力系统的运行必须时刻保持发电与用电的平衡。这种特性决定了电能价值不仅取决于生产环节的投入，还与电力系统的实时运行状态密切相关。例如，在用电高峰时段，为保障电力供应，可能需要启动成本较高的调峰电源，此时电能的价值会相应增加，因为维持系统稳定运行的难度和成本都有所提高。

从经济属性看，电能价值与电力行业的产业链紧密相连。电力行业涵盖发电、输电、配电和售电等多个环节，每个环节的成本和效益都对电能价值产生影响。发电环节的一次能源成本、设备投资和运营成本，输电环节的线路建设、损耗和维护成本，配售电环节的网络建设和运营成本等，这些成本层层叠加，共同构成了电能在经济层面的价值基础。

电能的定价应以对电能价值规律的深入分析为基础，并建立基于电力系统优化规划、优化运行原理的电能成本分析数学模型，它是一个大规模

的复杂系统优化问题。电能成本问题的研究可分为短期成本分析与长期成本分析，其理论基础是微观经济学有关生产成本的理论和相关的数学优化理论，特别是数学优化中的对偶优化原理与有限资源影子价格密切相关。

**二、电能价值的多元构成要素**

1. 容量价值

容量价值是电能价值的重要组成部分，它反映了电力系统为满足用户用电需求而具备的发电和输电能力。电力系统需要具备一定的备用容量，以应对突发的电力需求增长、设备故障等情况。例如，在夏季用电高峰，为防止部分发电机组故障导致电力供应不足，系统会预留一定比例的备用发电容量。这些备用容量的建设、维护和储备成本都体现在电能的容量价值中。同时，随着经济发展和电力需求的增长，对电力系统容量的要求也在不断提高，投资建设新的发电和输电设施以增加容量，进一步提升了电能的容量价值。

2. 电量价值

电量价值既反映发电成本，也体现用户消费电能所获得的实际价值。对于工业用户来说，消耗的电量用于驱动生产设备，转化为产品价值；对于居民用户，电量用于满足日常生活的各种用电需求，提升生活品质。电量价值的计算通常基于电能的生产成本和市场供求关系。在理想电力市场中，出清电价（此时价格恰好等于价值）应与电力系统中的电能边际生产成本和电力用户的电能边际效用相等。在发电成本相对稳定的情况下，单位电量产值越高，电量价值越高。例如，在制造业发达地区，单位电量产值高，该地区的电量价值相对也较高。

3. 可靠性价值

在现代社会，电力供应的可靠性至关重要。对于企业而言，可靠的电力供应是保障生产连续性、避免生产损失的关键；对于居民生活，稳定的电力供应关系到生活的舒适度和便利性。电能的可靠性价值体现在减少停电时间、降低停电频率以及提高供电质量等方面。为提高电力供应可靠性，电力企业需要在设备维护、电网升级、应急管理等方面投入大量资源，这些成本都反映在电能的可靠性价值中。例如，一些对供电可靠性要求极高的高新技术企业，愿意为获得更可靠的电力供应支付更高的价格，体现了电能可靠性价值的市场认可。

4. 灵活性价值

随着新能源在电力系统中的占比不断提高，电能的灵活性价值日益凸显。新能源发电具有随机性、波动性特点，使得电力系统的供需平衡面临挑战。为应对这种情况，电力系统需要具备更强的灵活性，能够快速调整常规机组发电出力以适应新能源发电的变化。具备快速启停、灵活调节能力的发电设备，如燃气轮机发电、抽水蓄能电站等，其提供的电能具有更高的灵活性价值。此外，需求侧响应措施，如引导用户在电力负荷低谷时段增加用电、高峰时段减少用电，也能提升电能的灵活性价值。

5. 环境价值

在全球应对气候变化、推动能源绿色转型的背景下，电能的环境价值（或外部性）成为重要考量因素。传统化石能源发电会产生大量温室气体排放，对环境造成负面影响，具有负的环境价值，即负外部性。而可再生能源发电，如太阳能、风能、水能发电等，具有清洁、低碳的特点，几乎不产生温室气体排放，具有正的环境价值，即正外部性。因此，来自可再生能源的电能具有更高的环境价值。政府和社会通过制定相关政策，如可再生能源补贴、绿证交易、碳排放交易机制等，将电能的环境价值纳入市场体系。

## 电力市场价格形成机制及其影响因素

**一、我国电力行业价格形成机制的沿革**

电力行业传统上是垄断行业，一般采用基于会计学的定价理论与方法，着眼于账面上的平衡，因而与一般商品定价没有本质区别，即会计成本（折旧、营运、税收）加上利润。由于它是基于平均成本的概念，因此是静态平衡和“向后看”的。另一方面，由于电力产品是国家重要的基础性资源，并非普通商品，因此，电价除了商品属性，还有复杂的社会属性，体现国家的产业发展导向，由此形成了一系列所谓的政策性电价，包括：煤电价格联动电价、发电上网标杆电价、用户分类与目录电价、基金及附加、还本付息电价、脱硫电价、城乡用电同网同价、高耗能产业差别电价、可再生能源发电上网电价、居民用电阶梯电价等。

从 20 世纪 70 年代起，各国都开始酝酿电力市场改革。区别于会计学成本定价模式，市场化的电价取决于经济学成本与经济学效益，一般基于经济学中的“边际”概念，需要采用数学优化模型计算出来。从 2002 年《国务院关于印发电力体制改革方案的通知》（国发〔2002〕5 号）印发起，我

国开始着手进行电力体制改革并建立合理的电价形成机制，将电价划分为上网电价、输电电价、配电电价和终端销售电价，从会计学成本定价逐渐向经济学成本定价过渡，逐渐形成了发电、输配、售电的三环节电价。

2015 年 3 月 15 日，《中共中央国务院关于进一步深化电力体制改革的若干意见》（中发〔2015〕9 号），旨在打破电网“统购统销”的经营模式，建立发电方（供给方）和用电方（需求方）的直接交易关系，将“有序推进电价改革，理顺电价形成机制”作为改革重点任务。发电企业和电力用户（或售电公司）可以通过多种方式开展批发交易，形成电能量批发价格。售电公司和其代理的电力用户之间形成电能量零售价格。对于输配电价部分，价格核定的原则是“准许成本 + 合理收益”。此外，还需加上辅助服务费用分摊。因此，在新一轮电改建立的电价体系中，用户终端电价的形成机制是：

用户终端电价 = 市场电能量交易电价 + 输配电价 + 辅助服务费用 + 政府性基金及附加。

**二、影响电力市场价格的外部因素**

1. 能源政策

能源政策对电力市场价格有着深远影响。政府通过制定能源发展战略、产业政策和补贴政策等，引导电力行业的发展方向，进而影响电价。例如，为推动可再生能源发展，政府实施可再生能源补贴政策，对风电、光伏发电等给予一定补贴，降低了可再生能源发电的成本，使其在市场竞争中更具价格优势，间接影响了电力市场的整体价格水平。此外，能源结构调整政策也会改变电力市场的供需格局，进而影响电价。如果政府大力鼓励发展新能源，减少对传统化石能源发电的依赖，随着新能源发电占比的增加，电力市场的价格结构可能会发生变化，电价的稳定性和波动性同样会受到影响。

2. 宏观经济形势

宏观经济形势与电力市场价格密切相关。在经济增长时期，工业生产扩张、居民消费增加，对电力的需求大幅上升，推动电价上涨。例如，在一些新兴经济体快速发展阶段，大量基础设施建设和制造业扩张使得电力需求迅猛增长，导致电力供应紧张，电价随之攀升。相反，在经济衰退时期，工业生产放缓、居民消费减少，电力需求下降，电价往往会面临下行压力。此外，宏观经济形势还会影响能源价格，如国际油价、天然气价格的波动会传导至电力行业。当油价上涨时，以燃油为燃料的发电成本增加，可能带动整体电价上升；天然气价格变化也会影响燃气发电成本，进而影响电力市场价格。

3. 技术与产业进步

技术与产业进步是推动电力市场价格变化的重要因素。一方面，技术进步降低了电力生产和传输成本，促进电价下降。例如，随着太阳能、风能发电技术的不断进步，光伏发电和风电的成本持续降低。过去 10 年间，光伏发电成本下降了 80% 以上，风电成本下降了 40% 左右，使得新能源发电在价格上逐渐具备与传统能源发电竞争的能力，推动了电力市场整体价格的下降。另一方面，新技术的应用提高了电力系统的运行效率和可靠性，也会影响电价。智能电网技术的发展实现了对电力系统的精准调度和管理，提高了供电可靠性，虽然短期内可能会增加部分投资成本，但从长期来看，有助于降低电力成本，稳定电价。同时，储能技术的突破，如锂离子电池储能技术的发展，提高了电力系统的灵活性，平抑了电力供需波动，对电价的稳定性产生积极影响。

## 电力市场中“价值”与“价格”的背离与协同策略

**一、价值与价格背离的表现及原因分析**

1. 价格无法准确反映容量价值

在一些电力市场中，容量价值未能在价格中得到充分体现。由于容量投资具有前期成本高、回报周期长的特点，发电企业在进行容量投资决策时面临较大风险。而现有的电力市场价格机制可能无法及时、足额地补偿容量投资成本，导致发电企业缺乏投资积极性，影响电力系统的容量储备。例如，在部分地区的电力市场中，短期的电价波动主要由电量供需关系决定，发电企业在低负荷时期可能面临电价过低的情况，无法收回容量投资成本，这使得他们在考虑新建发电容量时更加谨慎，长期来看可能威胁到电力系统的安全稳定供应。

2. 价格对电能可靠性和灵活性价值反映不足

电能的可靠性和灵活性价值在电力市场价格中常常被低估。提高电力供应的可靠性和灵活性需要电力企业在设备升级、技术研发和运行管理等方面投入大量成本。例如，建设备用电源、增强电网的抗灾能力及采用先进的负荷管理技术等都增加了供电成本。然而，现行的电价体系往往没有充分考虑这些因素，用户在支付电费

时，并没有为获得更高的可靠性和灵活性电力支付费用。这导致电力企业在提升电能可靠性和灵活性方面的动力不足，影响了电力服务质量的提升。

3. 可再生能源电能价值与价格的不匹配

可再生能源发电具有显著的环境价值和长期的能源战略价值，但在当前电力市场中，其价值与价格存在不匹配现象。一方面，由于可再生能源发电的间歇性和波动性特点，在并网过程中需要额外的调节成本，如建设储能设施、增加备用发电容量等，这些成本使得可再生能源发电的实际成本较高。另一方面，尽管政府通过补贴等政策支持可再生能源发展，但补贴政策的稳定性和持续性存在一定问题，且补贴资金的来源和分配机制有待完善。此外，电力市场中对可再生能源电能的价格发现机制不够健全，导致其价格无法充分反映环境价值和长期战略价值，影响了可再生能源发电企业的经济效益和投资积极性。

**二、促进价值与价格协同的策略与措施**

1. 完善电价形成机制

建立科学合理的电价形成机制是促进电力市场“价值”与“价格”协同的关键。在发电侧，对于容量价值，可以引入容量市场机制，通过容量补偿机制或容量拍卖等方式，使发电企业的容量投资成本得到合理补偿。对于电能量价值，深入研究基于连续时间商品模型的电力市场定价理论，并在此基础上探索新的交易品种和交易方式。在输电和配电环节，研究基于绩效的监管方式，激励电网企业提高运行效率、降低成本，同时合理反映输电和配电服务的价值。对于可靠性和灵活性价值，构建新型辅助服务市场，将可靠性和灵活性服务进行量化定价，使提供这些服务的市场主体能够获得相应的经济回报。

2. 强化市场监管与政策引导

加强电力市场监管是确保价格合理反映价值的重要保障。监管机构应加强对电力市场交易行为的监督，防止市场操纵和不正当竞争行为，维护市场公平竞争秩序。例如，对发电企业的报价行为进行监测和分析，一旦发现价格异常波动或不合理报价，及时进行调查和处理。同时，政府应制定科学合理的能源政策，引导电力市场健康发展。加大对可再生能源发展的支持力度，完善补贴政策，确保补贴资金的稳定来源和合理分配。通过制定可再生能源配额制等政策，明确电力市场中可再生能源发电的占比要求，推动可再生能源的消纳，使可再生能源电能的价值在市场中得到更好的体现。

3. 推动电力市场与其他市场的融合

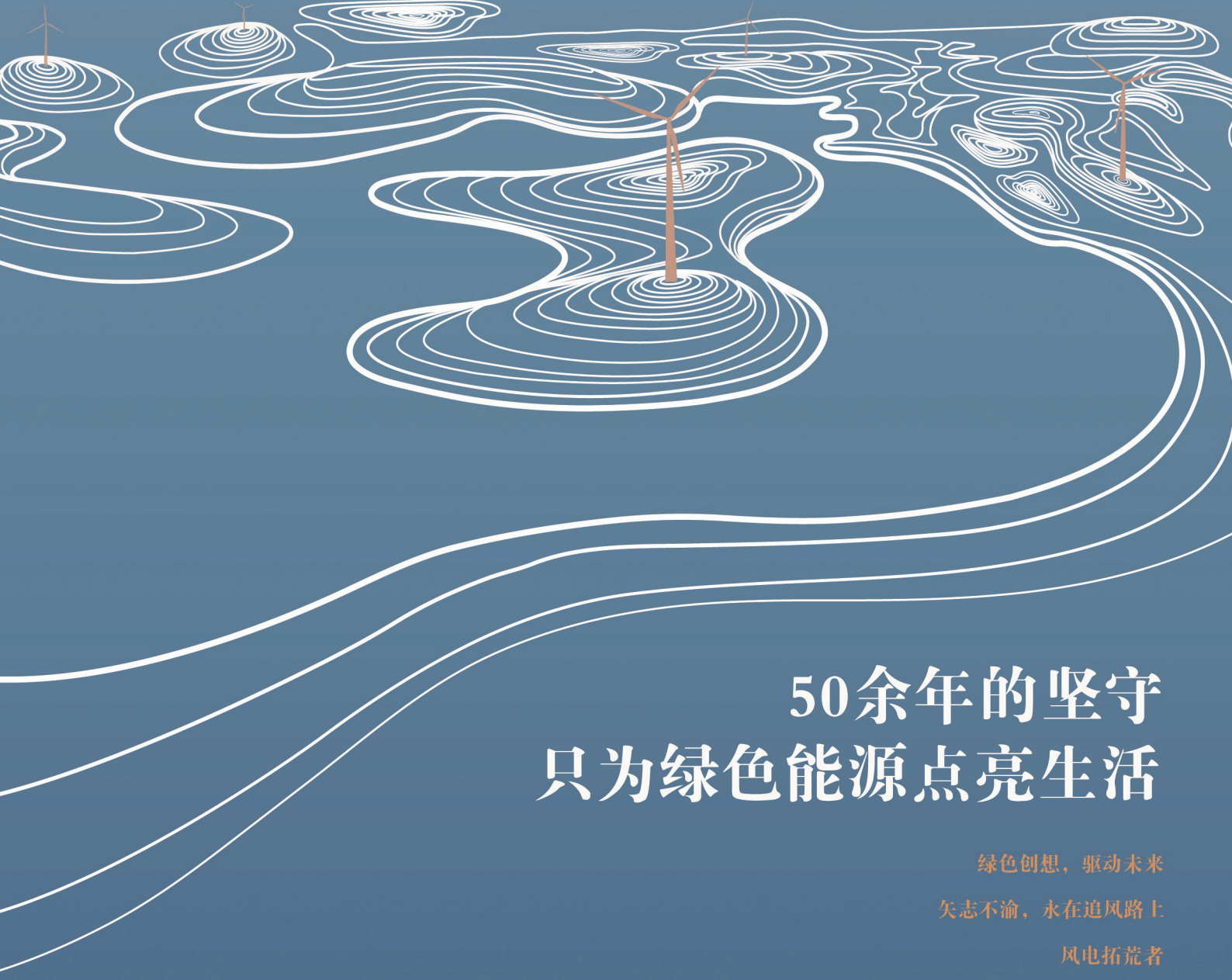
促进电力市场与其他相关市场的融合，有助于实现电力“价值”与“价格”的协同。电力市场与碳排放市场的融合，通过碳排放交易机制，将电力生产过程中的碳排放成本内部化，使高碳排放的化石能源发电成本上升，而低碳排放的可再生能源发电更具价格优势。例如，欧盟的碳排放交易体系对电力行业的碳排放进行严格管控，促使发电企业减少化石能源发电，增加可再生能源发电比例，推动了电力市场的低碳转型。电力市场与绿证交易市场的融合，绿证作为可再生能源发电的一种权益证明，新能源发电企业出售绿证可获得额外收入，增加发电收益，激励企业加大对新能源发电项目的投入，助力清洁能源发展。

## 结论

在电力市场的复杂体系中，“价值”与“价格”是相互影响的核心要素，其辩证运动决定了电力市场是否能稳健运行。本文从理论层面解析了价值论的内涵和经济学中价值与价格的关系，为理解电力市场中电能的价值和价格奠定了基础。电能价值因其独特的物理和经济属性，由容量价值、电量价值、可靠性价值、灵活性价值和环境价值等多元要素构成，这些价值要素共同塑造了电能在不同应用场景下的价值体系。

电力市场价格受到电能边际成本、平均成本和价格形成机制等多种因素的影响，同时能源政策、宏观经济形势和技术进步等外部因素也在不断改变着价格的走势。当前电力市场中“价值”与“价格”存在诸多背离现象，如价格对容量价值、可靠性和灵活性价值以及可再生能源电能价值的反映不足等，这些问题制约了电力市场的健康发展和能源资源的优化配置，严重的情况下还会导致能源结构失衡甚至电力市场事故。

为实现电力市场“价值”与“价格”的协同，需要深入理解价格与价值的区别与联系，尊重社会主义市场经济条件下的电能价值规律，开展面向新型电力系统的电能价值规律研究。从完善电价形成机制、强化市场监管与政策引导以及推动电力市场与其他市场的融合等方面着手，加强监管方式创新、市场机制创新、商业模式创新，让市场在电力资源配置中起决定性作用。



# 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

深谙中国风电资源，始终坚持创新驱动

运达股份 WINDEY

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

数据来源：公司内部数据

广告

【“对话企业领导人”系列专访】

2025 年，是“十四五”和“十五五”的承上启下之年。“十四五”期间，中国风电保持高质量跃升发展，技术和模式创新不断取得突破，装机规模更是迎来 5 亿 kW 的里程碑，风电开发利用空间持续拓宽。面向“十五五”，在国家加紧落实碳达峰碳中和目标的背景下，中国风电产业有望实现提速发展，但一系列挑战横亘于前，亟须业界群策群力，合力扫清阻碍。

为此，《风能》杂志特别策划“对话企业领导人”系列专访，邀请专家、风电企业负责人，厘清当前的发展形势，携手突破瓶颈，推动产业高质量跃升发展。

# 陈棋：以科技创新为支点，加速培育风电新质生产力

本刊 | 王芳

运达能源科技集团股份有限公司（下称“运达股份”），是国内最早从事风电技术研究与产品开发的大型国有控股上市公司，是全球领先的智慧能源技术解决方案供应商，拥有国家企业技术中心、浙江省海上风电技术重点实验室、博士后科研工作站、院士专家工作站、省级重点企业研究院等多个高能级创新平台，承担国家“六五”至“十四五”超过 20 项重点科技攻关课题，填补大型化、轻量化、智能化、电网友好性、环境适应性等风电领域多项国内技术空白，构建了新能源开发运营、新能源建设、风电装备制造、储能装备制造、综合能源服务、新能源消纳全产业链生态体系。本期“对话”邀请运达股份董事长陈棋共同探讨，新形势下风电行业如何增强在技术、服务、市场上的竞争力。

陈棋认为：

当前，在全球减碳行动和中国双碳目标的浪潮下，国内风电行业正经历一场前所未有的变革，累计装机规模突破 5 亿 kW 大关，连续 14 年位居全球第一。与此同时，中国风电技术正在勇攀创新发展的“珠穆朗玛峰”，加速在“无人区”中探索前进，引领着全球风电技术与产业的迭代升级。

未来，作为构建中国新型电力系统的主体能源，风电将成为新质生产力发展的底色，肩负支撑能源系统转型升级和全社会实现碳中和的重任，预计 2025—2030 年，年均新增装机容量将超过 1 亿 kW。

## Part 1：
## 领跑“十四五”，中国风电重塑全球能源版图

**Q：2025 年是“十四五”规划的收官之年。您如何看待风电行业取得的成绩？作为中国最早从事风电技术研究和产品制造的企业，运达股份为行业作出了哪些贡献？**

A：“十四五”是逐梦第二个百年征程的关键五年，更是能源绿色革命的攻坚时期。5 年来，中国风电产业实现了从规模扩张到创新引领的跨越式发展：超大型风电机组研发、生产和应用处于世界领先地位，风电整机、叶片、发电机、齿轮箱等零部件国产化率突破 95%，陆上风电度电成本下探至 0.15~0.3 元 /kWh，海上风电度电成本下探至 0.25~0.4 元 /kWh，沙戈荒、大基地、超高海拔、深远海等多元应用场景不断拓展。这场技术革命的背后，是涵盖整机设计、核心部件的完整创新体系支撑，更是支撑结构、变流系统、传动系统、控制系统、输变电系统等关键技术的集群式突破，这场绿色变革正以中国智慧重塑世界能源格局。

作为中国风电领域的拓荒者、创新者、引领者，运达股份在大容量、长叶片、高塔架、电网友好性等领域不断填补全球风电技术空白，累计 10 余款产品被认定为“国内首台（套）装备”“浙江省装备制造业重点领域首台（套）产品”以及“浙江制造精品”，获得国家级、省部级等科技奖项 60 余项，主导制定国际、国内标准 290 余项。作为国家级制造业重点产业链链主企业，运达股份助力全球客户向新能源融合升级与低碳绿色转型，参与建设全球最大的乌兰察布源网荷储示范项目，以及多个新能源大基地项目，正在交付中东地区最大的 IPP（独立发电商模式）陆上风电项目，中标欧洲单体容量最大的陆上风电项目，率先将中国风电技术、标准以及解决方案输出至海外；牵头打造温州洞头、甘肃酒泉、湖南永州、云南楚雄、内蒙古阿拉善等 20 余个零碳产业基地，以“中国智造”为全球能源绿色转型注入“运达力量”，以新能源产业带动地方经济的高质量绿色发展。

## PART 2：
## 破局“无人区”，技术升级摆脱“内卷”

**Q：中国风电技术已经进入“无人区”，风电机组技术在设计、材料创新、控制系统等方面有哪些关键技术有待突破？能否通过技术升级来摆脱行业的“内卷”？运达股份在风电技术前沿开展了哪些研究？**

A：中国风电技术进入“无人区”后，其发展正从规模扩张转向系统化创新。风电机组设计主要聚焦于叶片气动设计和载荷设计优化、高集成传动链一体化结构设计优化、漂浮式基础动态耦合设计等；材料创新主要聚焦于碳玻混杂复合材料叶片的轻量化与抗疲劳性能优化、超高性能混凝土、抗疲劳性及耐腐蚀性高性能合金材料等；控制系统主要聚焦于构网型智能协同升级，通过智能控制全栈解决方案实现弱电网下的稳定支撑，并融合边缘计算与 AI 算法提升动态响应精度。同时，更要构建全生命周期可靠性验证体系，强化大型化风电机组在复杂工况下的结构安全边界。

针对现阶段行业出现的“内卷”现象，惟有以科技创新为支点加速培育新质生产力：一方面，将风电技术底层逻辑弄懂、钻深、吃透，推动建立起更严苛、更符合实际工况、更适合大容量风电机组全生命周期安全边界的标准体系、规范体系、设计体系和验证体系，强化大型化风电机组在复杂工况下的结构安全边界；另一方面，将价值创造延伸至绿能（氢氨醇）耦合、源网荷储一体化等新场景，最终以技术创新驱动质量溢价，重构产业生态。

近年来，运达股份坚持将技术创新作为“第一生产力”，全力构建新能源全产业链纵深发展新生态，持续锻造技术创新引领产业发展的能力：攻克构网型双馈风电机组暂 / 稳态主动支撑技术，率先通过构网型风电机组弱电网及故障穿越现场实测；率先完成全球单机容量最大、风轮直径最大的陆上风电机组 WD230-10 MW 并网，10 MW 机型累计获得大基地订单容量超 1000 万 kW；突破漂浮式海上机组一体化耦合技术，率先下线全球单机容量最大的漂浮式海上风电机组——16-18 MW“海

鹰”平台；推出全球首台搭载 10.5 kV/1800 V 电气系统的新一代中压双馈 10.X 系列平台机组；率先以 AI 大模型深度赋能风电产业全链条的智能应用场景；深度探索风电与氢氨醇等领域的创新融合，成功签约河北邯郸绿色甲醇制备示范区项目，斩获全国首张绿色甲醇 ISCC 体系的全生命周期碳减排国际认证。

## PART 3：
## 跨圈融合：从装备制造到能源生态重构

**Q：自建风电场，自研零部件，探索扩大储能、风电制氢，在应用端帮助高载能企业降低碳排放，建设零碳园区等等，整机企业不断“跨圈”，您认为这是短期行为，还是会形成未来风电发展的新生态？会对风电技术研发方向产生怎样的影响？**

A：在双碳目标深入推进与全球能源结构转型背景下，整机企业的“跨圈”行为是深度融入新型电力系统、重构能源生态的必然选择。在市场与政策驱动下，行业已从单纯追求装机规模的粗放发展，转向以“绿电替代”与“绿能替代”为核心的全链条价值创造。整机企业向部件、储能、风电场开发、新能源消纳等上下游延伸，从短期看是为应对行业“内卷”、消纳瓶颈等现实挑战的主动突围。从长期来看，这是风电从“补充能源”向“主力能源”转型的关键跃迁，本质上是通过技术穿透与场景拓展，构建“发 - 储 - 用”一体化的新能源全生命周期解决方案能力，必将重塑未来企业的发展轨迹，更会推动风电技术的演进方向。

当前，风电整机企业的跨界布局已成为行业常态，多元化发展正推动技术研发向多源系统集成与数智化升级两大核心领域聚焦。

随着风电、光伏等可再生能源的大规模开发利用，源网侧从单一能源过渡为基于复杂多能流网络协同的大时空尺度优化配置，多能互补技术成为关键突破口。企业通过研发部件 - 风电 - 储能 - 氢能协同运行技术，实现不同能源形态的高效转换与动态调控，例如，基于实时风电出力与氢能需求优化系统参数，提升整体能源利用效率。同时，针对零碳园区场景，智能微电网能量管理系统（EMS）的开发要求，企业整合分布式电源预测、负荷调控及故障管理等技术，构建具备自主平衡能力的能源网络，为园区电力供需平衡和优化调度提供底层支撑。

数智化转型则贯穿产业链全环节。从风电场选址的 AI 资源评估，到设备运行的智能预警维护，再到风电、氢能等生产、消纳过程的精准控制，大数据与人工智能技术正推动全生命周期数字化管理体系的形成。这种技术渗透不仅提升了能源系统的经济性，还通过优化资源配置强化了环境效益。

通过打破传统能源边界、融合数智化能力，整机企业正推动技术向综合化、高效化方向迭代，为构建新型电力系统与零碳未来奠定基础。这一进程将持续塑造行业格局，引领风电技术进入更深度集成与智能协同的新阶段。

## PART 4：
## 海上风电：技术-成本-效率的三角博弈

**Q：目前，各省份距离规划的“十四五”海上风电装机目标还有约一半的任务，您认为 2025 年海上风电市场会出现哪些新的竞争态势？**

A：海上风电开发需要满足生态保护区等限制，以及面临与航道、渔业、海底电缆等各种活动的用海竞争，开发建设周期往往较长，这是导致距离海上风电装机目标仍差一半的主要原因。随着“十四五”规划收官之年的到来，海上风电项目开工建设进度将逐步提速，如江苏、浙江、山东、广东等省份多个海上风电项目均已列入各省重大项目建设清单，2025—2026 年海上风电项目并网容量有望超过 2000 万 kW。

同时，随着近海场址资源开发趋紧，深远海风电开发将逐步成为海上装机主力军。当前，沿海各省份正加速推进深远海风电规划，国内多个百万千瓦级深远海风电大基地项目正稳步推进。这场挺进“深蓝”的角逐，本质是针对深远海开发的技术、成本、效率以及产业链整合等方面能

力的较量——高效可靠的大型化风电机组、漂浮式平台解决方案、海上风电柔性直流送出等前沿技术突破，全产业链资源系统整合能力、深远海多元化场景开发能力，以及全生命周期度电成本控制能力，将成为企业“分水岭”。

**Q：运达股份在海上风电将有哪些新的布局？在海上风电技术研发方面想实现哪些行业领先的重点突破？**

A：当前，运达股份正加速拓展海上风电战略版图，倾力打造 9 MW 海鹞平台以及 16-18 MW 海鹰平台系列海上风电机组，并在浙江宁波象山、辽宁大连庄河、越南富春新恩等多个项目上实现了海上风电机组批量化交付与稳定运行；在浙江、辽宁大连等地布局海上风电开发项目，累计获得海上风电项目资源超 120 万 kW。同时，运达股份积极发挥国家级制造业重点产业链链主企业优势，参股浙江省海洋风电发展有限公司，并依托浙江温州洞头、辽宁大连太平湾、广东湛江海上风电总装基地，谋划协同产业链上下游合作伙伴，布局打造海上风电全产业链集聚高地。

剑指海上风电市场，运达股份将聚焦突破 10.X MW 级中压双馈机组的电气系统，力图攻克高电压环境下的安全性与可靠性瓶颈，推动双馈技术路线在海上规模化应用；持续对自研“海鹰”漂浮式平台进行迭代，攻克复杂入流条件下的超大型风电机组的高效高稳定设计，推动 20 MW 级深远海漂浮式海上风电机组研发，实现超大型深远海风电机组和超大规模海上风电集群的智能控制示范应用；自主研发的智能预警系统深度融合大数据与物联网技术，实现机组全生命周期健康管理，为深远海风电的“少人化”运维提供解决方案；探索氢醇消纳等跨界融合示范项目，通过多能协同开发延伸海上风电的价值链；借力政企协同与区域产业联盟，推动设计、施工、运维的全链条降本增效，进一步实现规模化、集约化开发，以促进海上风电全产业链融合与协同发展，全面提升公司在海上风电领域的综合竞争力。

## PART 5：
## “出海”新范式，全链条竞争力穿透全球壁垒

**Q：与国内相反，海外风电机组交付价格远高于国内，市场需求快速提振，国内风电机组有哪些优势？企业如何利用成熟的产品、服务及风电场开发经验，掌控议价权，提高市场竞争力，扩大收益？**

A：2024 年，中国风电企业“出海”订单已呈现增长态势，风电机组新增出口容量超过 500 万 kW，同比增长 41.7%。目前，中国风电供应链稳定性与成本控制能力“领跑”全球风电产业，风电整机、叶片、发电机、齿轮箱等装备产能全球占比超 70%，单位 kW 风电机组均价远低于海外风电装备企业；风电企业在机组设计优化、智能控制算法及数字化运维等领域形成创新成果集群，“沙戈荒”大基地、源网荷储、深远海、独立分散式等全应用场景构网型解决方案水平领先全球，大容量、长叶片、高塔架等产品大型化发展趋势引领着全球发展；高效的物流网络与基建水平保障了海外订单的快速响应能力。乘风出海，踏浪前行，能源低碳转型浪潮之下，中国风电企业正以“技术 + 成本 + 交付”的三重优势，重塑全球风电整机市场格局。

未来，在全球化竞争的浪潮中，中国风电企业若要在海外市场掌握议价权，需构建从产品到生态的全链条竞争力。一方面，将国内多元化应用场景下所积累的先进经验、先进方案、先进技术、标准体系输出海外，加快形成“中国技术 + 中国标准 + 中国装备 + 中国建设”全链条“走出去”的格局，与海外新兴国家开展能力建设、项目对接和技术产品输出等方面的交流互动，共建国家间相关政策法规体系，为中国持续深化能源领域绿色低碳发展争取更多同行伙伴。另一方面，发挥中国风电产业链和供应链优势，积极与海外国家建立能源转型合作伙伴关系，共同规划和建设能源项目，拓展本土能源转型市场，支撑当地能源安全，降低用电用能成本，以清洁经济的风电拉动当地工业经济发展。

中国风电“出海”的终极目标绝非简单的设备出口，而是以技术为锚、服务为链、生态为网，在全球能源变革中书写新的价值坐标。

# 乡村振兴

在云岭大地的群山之巅，借助风电机组的力量，呼啸的山风正转化为源源不断的绿色电能，不仅改写了云南的能源版图，更成为推动边疆地区乡村振兴的“绿色引擎”。中国大唐集团深耕云南二十余载，以风电开发为笔，以山川为卷，绘就出一幅生态保护、经济发展与民生改善协同共进的新时代画卷。

# 风电绘就彩云之南新画卷

本刊 | 王芳

在“彩云之南”的崇山峻岭间，一座座白色“风车”迎风转动，不仅为千家万户送去清洁电力，更成为带动当地经济发展、改善民生的重要引擎。作为能源央企，中国大唐集团积极响应国家双碳战略和乡村振兴政策，在云南建设了 25 个风电项目，走出一条“绿电开发 + 乡村振兴”的特色发展之路。

## 高原风电点亮绿色发展之路

近年来，云南省大力推进绿色能源强省建设，先后出台《云南省“十四五”能源发展规划》《云南省新能源发展规划》等政策，提出打造世界一流“绿色能源牌”。中国大唐集团紧抓政策机遇，在云南布局多个风电项目。

在滇中寻甸县海拔 3300 m 的巨龙梁山脉上，15 台智能风电机组巍然

矗立。这是中国大唐集团在滇建设的一期 10 万 kW 风电项目，安装了金风科技 6.45 MW、6.7 MW，风轮直径均为 191 m 的智能风电机组，2024 年发电量突破 4.1 亿 kWh，等效利用小时数超过 4100 h，创造了高原山地风电的效能新纪录。

“巨龙梁项目体现了中国风电的工程水平，更展现出中国风电产品的质量与效率。”中国大唐云南滇中新能源事业部高本山风电场场长祝瑞波向《风能》介绍。据悉，该项目二期工程正在加紧建设中，将安装单机容量为 11.1 MW、风轮直径为 221 m 的新一代风电机组，进一步巩固云南在风电技术领域的领先地位。

2023 年年底，在文山壮族苗族自治州丘北县，随着中国大唐集团建设的锦屏西风电项目最后一台风电机组并网发电，标志着总装机 110.3 万 kW、国内规模最大的高原山地风电基地建成。基地分三期建设，共安装 310 台风电机组，年发电量可达 26 亿 kWh，相当于节约标准煤 81 万 t，减排二氧化碳 217 万 t，可满足 108 万户家庭一年的用电需求，有效缓解云南省能源供需“紧平衡”。

“这个项目不仅为云南电网提供了稳定的清洁能源，更重要的是带动了当地经济发展。”文山州能源局相关负责人表示。据了解，项目建设期间累计为当地创造就业岗位 1000 余个；投入乡村振兴帮扶资金 400 余万元；投入改善基础设施资金 1.63 亿元，改善了周边 10 余个村寨的基础设施条件，防火通道、村级道路、产业道路建设获得文山州政府高度肯定；智慧风电场也换上民族彩绘，带动当地旅游产业发展。

## 生态保护与经济发展双赢

在风电项目建设过程中，中国大唐集团始终坚持“在保护中开发、在开发中保护”的理念。以丘北县羊雄

山风电场为例，66 台风电机组与 10 万亩草场和谐共生，成为当地一道独特的风景线。

羊雄山风电场位于平均海拔 2300 m 的丘北县舍得彝族乡。在建设过程中，特别注意避让生态红线，施工后立即在风电机组基础周边种植耐旱植被。修复高原草场 3000 余亩，使项目区植被覆盖率提升至 95%。如今，这里不仅成为重要的清洁能源生产基地，还吸引不少游客前来观光，带动了当地旅游业发展。

在洱源县，中国大唐集团建设的罗平山风电场已经安全运行 15 年，累计发电近 19 亿 kWh，累计减排二氧化碳 148 万 t，相当于种植了约 8 万亩森林。这个云南省最早的风电场之一，在运维期间主动参与当地的脱贫攻坚工作，为地方捐款捐物，选派驻村干部，慰问弱势群体，并通过定期举办“企业开放日”等活动，向周边村民普及绿色能源知识。

## 风电建设带动乡村全面振兴

中国大唐集团在云南的风电项目不仅提供了绿色电力，更重要的是改善了当地基础设施，创造出就业机会，带动产业发展。

昭通永善县集高原、高寒、高海拔于一身，老路梁子风电项目建设过程充满艰辛。“这里最低气温能达到零下 20 ℃，施工条件非常艰苦。”项目负责人回忆道。然而，这个项目仅用 56 天完成全部基础浇筑工作，并为当地升级、改造了 112 处乡村道路，彻底改变了周边村民的出行条件。

“以前孩子上学要走 3 个多小时的山路，现在只要 1 个多小时就能到学校。”白云村村民高兴地说。更让村民欣喜的是，这些道路还打通了农产品外销的通道，村里的枇杷、花椒等特产现在都能方便地运往市场。“去年我家种的 5 亩枇杷，通过新修的路直接运到县城，多卖了近万元。”参与风电项目施工的中寨村村民表示。

在富宁县阿用乡，20 万 kW 风电项目的建设直接带动了当地就业。项目推进过程中，建设者们帮助村里修缮了被雨水冲毁的道路和涵洞，新建了饮用水池，解决了困扰村民多年的用水难题。“以前旱季要去 3 公里外挑水，现在家门口就有自来水，真是太方便了。”村民们感慨道。

在丘北县，风电项目还创新采用“村企合作”模式，让村集体分享项目收益，真正实现了“开发一方资源、带动一方经济、造福一方百姓”。

## 创新模式助力可持续发展

随着国家“千乡万村驭风行动”的推进，中国大唐集团积极探索乡村振兴新路径。近期中标的马关县 2 万 kW 风电项目，将采用“自发自用、余电上网”的模式，让清洁能源直接惠及当地群众。

“我们正在研发更适合乡村环境的风电机组，噪音更低、占地更少。”中国大唐云南发电公司相关负责人表示。在怒江州兰坪县，风电项目收益被用于支持当地“污水革命”和垃圾处理，村容村貌焕然一新。现在村里有了垃圾集中收集点，污水也有了处理设施，

中国大唐云南发电公司青年志愿者看望慰问贫困家庭

生活环境比以前好多了。

在文山州丘北县，当地政府与中国大唐集团合作，将风电开发与乡村旅游相结合。“我们设计了具有民族特色的彩绘风电机组，打造出集风电观光、高山草场、云海景观于一体的旅游线路。”丘北县文旅局负责人介绍说。这一创新举措不仅提升了风电项目的附加值，还为当地村民创造出新的收入来源。

“我在景区摆了个小吃摊，旺季时一天能赚五六百元。”舍得乡村民王大姐说。据统计，仅锦屏西风电项目周边，就新增了 20 余家农家乐和民宿，为 200 余人创造出就业岗位。

云南省能源局相关负责人表示：“中国大唐在云南的风电项目，不仅为全省能源结构调整作出了重要贡献，更探索出一条新能源开发与乡村振兴相结合的新路子。”数据显示，截至 2024 年，中国大唐集团在云南的风电装机规模达 236 万 kW。

## 未来展望：多能互补助力高质量发展

2024 年，中国大唐云南发电公司新增投产新能源超过 100 万 kW。展望未来，中国大唐集团将继续加大在云南的能源投资力度，重点推进“水风光储”多能互补基地建设，2025 年计划新增投产新能源 100 万 kW 以上，推动多个储能项目开发建设。

“我们正在探索将清洁能源相结合，构建更加稳定、高效的能源供应体系。”中国大唐云南发电公司相关负责人表示。云南省发展改革委相关负责人指出：“中国大唐集团的风电项目不仅提供了清洁能源，更重要的是通过产业链延伸，带动了当地装备制造、施工安装、运维服务等相关产业发展。”目前，已有多家风电配套企业落户云南，创造了大量就业机会。

在人才培养方面，中国大唐集团与云南多所高校合作，开设新能源专业，为当地培养技术人才。“我在中国大唐集团风电项目实习后，毕业后直接留在这里工作，月薪有 8000 多元。”毕业于昆明理工大学的新入职员工说。

据统计，中国大唐集团在云南的风电项目所在地累计投入乡村振兴资金超过 3 亿元，修建产业道路超过 300 km，提供就业岗位上万个。随着乡村振兴战略的深入推进，中国大唐集团将继续创新帮扶模式，将更多风电收益用于支持当地教育、医疗等民生事业。

在这片神奇的红土地上，绿色能源正在书写着高质量发展的新篇章。从巍峨的高山到广袤的草场，从偏远的村寨到繁华的城镇，中国大唐集团的风电项目不仅点亮了万家灯火，更照亮了乡村振兴的希望之路。

# 探究古籍中的大风车（上）

文 | 蔡丰波

“风车”一词有多种含义，如：用于分离谷粒和秕糠[1]的农具，也称风扇车、飏[2]扇车等；玩具风车，用纸和秫秸制作。本文探究的风车，是指利用风能作为动力驱动风轮旋转，将风能转换为机械能，再利用机械能做功的装置。在中国古籍中，风车并没有统一的称谓，需要根据上下文的描述进行分析推断。

中华文明源远流长，仅保留至今的汉文古籍就有数百万部。所谓探究古籍中的大风车，不可能查阅全部的古代文献资料。笔者仅根据所能查阅到的极为有限的典籍资料，对古代大风车的相关文献进行摘录分析，以期为读者了解我国大风车的历史和文化提供一定参考。

## 水车的兴起和发展

在中国古代，大风车的用途主要是给水车提供动力，用于农田灌溉或排涝。中国古代大风车的出现和发展与水车密不可分，了解古代水车的发展和应用情况，有助于对古籍中记载的风车、水车做出正确的分析判断。因此，本文对大风车的探究以古代水车的发展和应用为线索。

不同于风车的概念，古代水车特指用来提水的一类机械装置，如翻车、筒车等。翻车也称龙骨车、踏车。利用水车提水，需要借助外力，最早是依靠人力，后来出现水力驱动、畜力驱动的水车，再后来出现了风力水车。

对于与风车的概念相对应的、利用水力驱动做功的机械，古时一般是根据其具体用途来命名，如用于磨面的称为水磨或水硙[3]，用于碾米的称为水碾，用于鼓风的称为水排。泛泛地说，这些也可统称为水车。

据南朝宋历史学家范晔（398—445年）编撰的《后汉书》（列传·第二十一卷·杜诗）记载，杜诗于建武[4]七年担任南阳太守时制作了水排。杜诗（生卒年不详）是东汉官员，水利学家、发明家。建武七年，即公元31年。水排是一种水力驱动的鼓风机，用于冶炼。杜诗制作的水排是中国古籍中有记载的最早的水力机械。

据《后汉书》（列传·第六十八卷·宦官·张让传）记载，汉灵帝[5]大兴土木修缮南宫玉堂时，让宦官毕岚制造

1: 秕糠：bǐ kāng，瘪谷和谷皮。
2: 飏：yáng，同“扬”。
3: 硙：wèi，磨。
4: 建武：东汉皇帝刘秀（公元前5年—公元57年）的年号。
5: 汉灵帝：刘宏（157—189年），公元168年至公元189年在位，谥号“孝灵帝”。

了翻车用于道路洒水。另据《后汉书》（帝纪卷第八 · 孝灵帝）记载，复修玉堂殿的时间是在汉灵帝中平三年。因此，推断毕岚制造翻车是在中平三年，也就是公元 186 年。毕岚作为宦官，不可能在短时间内亲自发明翻车，只能说明这种翻车在当时民间早有应用。不过，“毕岚造翻车”则是中国古籍中关于翻车的最早记载。

三国时期，魏国人马钧（生卒年不详）于魏明帝年间（226—239 年）在前人的基础上，对翻车进行了改良，使之在农业排水灌溉中得以大规模推广使用。西晋历史学家陈寿（233—297 年）所著《三国志》（魏书 · 二十九卷）记载：“（马钧）居京师，都城内有地可以为园，患无水以溉之，乃作翻车，令童儿转之，而灌水自覆，更入更出，其巧百倍于常。”其中，“令童儿转之，而灌水自覆”，表明这是一种人力翻车；“其巧百倍于常”，表明这种翻车是在原有基础上进行过改良。

唐代历史学家李延寿（生卒年不详）所著《北史 · 卷四十四 · 列传第三十二 · 崔光 崔亮》记载：“亮在雍州，读《杜预传》，见其为八磨，嘉其有济时用，遂教人为碾。及为仆射[6]，奏于张方桥东堰谷水，造硙磨数十区。”这则文献记载了北魏名臣崔亮（460—521 年）从读杜预的传记中获得灵感，教人制作出水碾，并制造了水硙和水磨。杜预（222—285 年）是魏晋时人，他发明的“八磨”即水转连磨。

自东汉以来，各种水力机械和提水机械不断发展进步，在农业和手工业生产中发挥了巨大作用。元代农学家、机械学家王祯（生卒年不详）撰写的《农书》初刊于元皇庆癸丑年，即公元 1313 年，书中图文并茂地描述了多种农用机械的构造和用途。其中，水力驱动的机械有水排、连机碓、水转连磨、水碾、水磨、水轮大纺车等。提水机械有人力脚踏翻车，靠水力驱动的水转筒车（图 1）、水转翻车、水转高车，靠兽力驱动的牛转翻车、驴转筒车，靠人力或兽力驱动的高转筒车等。遗憾的是，在王祯《农书》中并未见到任何关于大风车的记载。

上述提水机械和水力机械，其结构和工作原理在《农书》《天工开物》等古籍中都有图文介绍，感兴趣的读者也可在互联网查阅相关资料，本文不再赘述。不过，了解这些机械结构和工作原理，对于理解古籍文献中的有关文字描述非常有帮助。下面摘录几首诗与读者分享：

《水轮咏》（宋 · 梅尧臣）：“孤轮运寒水，无乃农者营。随流转自速，

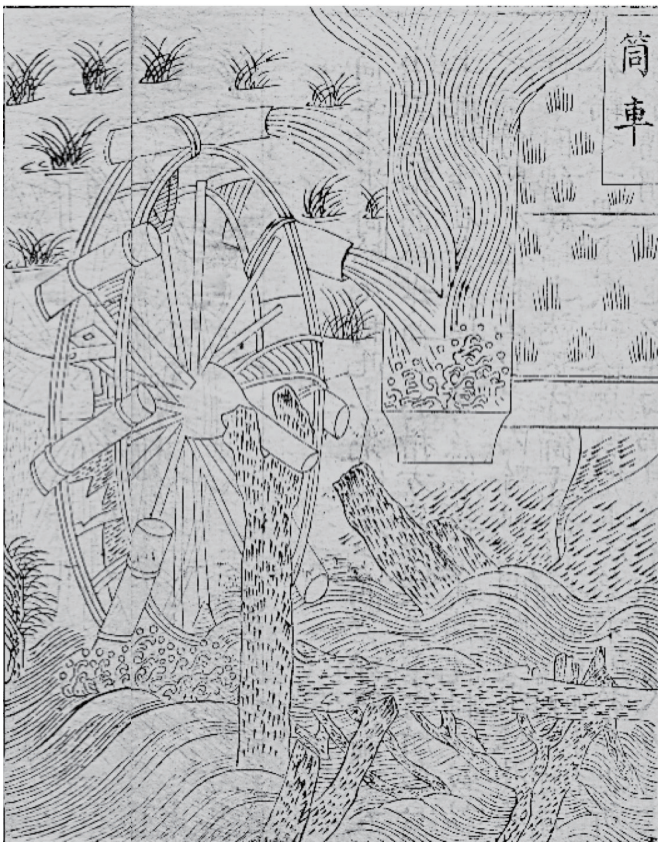



图1 《农书》插图：水转筒车

6: 仆射：pú yè，官职名称。

居高还复倾。利才畎浍[7]间，功欲霖雨并。不学假混沌，亡机抱瓮罂[8]。”这首诗写的应是水转筒车。

《无锡道中赋水车》（宋·苏轼）：“翻翻联联衔尾鸦，荦[9]荦确确蜕骨蛇。分畦翠浪走云阵，刺水绿针抽稻牙。洞庭五月欲飞沙，鼍[10]鸣窟中如打衙。天公不见老翁泣，唤取阿香[11]推雷车。”这首诗描写的应是翻车（图 2），或称龙骨车。

《近村》（宋·陆游）：“去去柴车十里中，竹林密处路才通。渐闻水碓知村近，遥望禾囷[12]喜岁丰。渔艇往来春浪碧，人家高下夕阳红。百钱又向旗亭醉，自笑吾生亦未穷。”这首诗写到了水碓。

《水车》（宋·沈辽）：“山田绕山脚，江水何可作。车轮十丈围，飞湍半天落。雁翅插修筧[13]，随流得深酌。升降岂无势，长江怒相薄。有如万夫力，讙[14]呼倾众壑。曾不舍昼夜，美源终未涸。人间有机事，由来生巧恶。善彼汉阴老，忘怀抱纯朴。”这首诗写的应是水转筒车。

《牛挽水车图》（元·同恕）：“初解耕縻[15]汗喘长，却来挽转水车忙。西风穲稏[16]三千顷，背上吴儿且莫狂。”这首诗写的是牛转水车。

图2《农书》插图：翻车

## 古代盛行的水车

虽然在元代王祯撰写的《农书》中记载了多种用于提水的水车，但古代最为盛行、文献记载最多的主要是筒车和翻车，这两种水车一直流传至今。

筒车主要依赖于水力驱动，适用于水流较快的江、河、溪水中，借助水的动力，以水转车，以车提水。水转筒车不需要借助人力，可长期工作且相对结实耐用，水轮既是动力部件，也是做功部件。根据水面与农田的落差，可制作不同直径的水轮，从而将水提到较高的地方。明代进士陆容（1436—1497 年）在其编撰的《菽园杂记》中对水转筒车有详细介绍，其中一句：“其制约水面至岸高若干尺，如其度为轮。”意思是水轮直径要根据水面至岸的高度设计制作。即水转筒车基本上是定制化的，适用于特定场地，不便于更换工作位置。

翻车适用于平原地区。自汉代一直到近现代，人力都是翻车的主要动

7: 畎浍：quǎn kuài，田间水沟。
8: 罂：yīng，小口大肚的容器。这句诗及后文其他引用文献中的“抱瓮”“汉阴老”“汉阴”“机心”等，均出自“抱瓮灌畦”的典故。
9: 荦：luò，荦荦确确，嶙峋的样子，骨节突露状。
10: 鼍：tuó，扬子鳄。
11: 阿香：传说中推雷车的女神。
12: 囷：qūn，谷仓。
13: 筧：guǎn，同“管”。
14: 讙：huān，喧哗。
15: 縻：mí，牛缰绳。
16: 穲稏：bà yà，稻摇动状。

力。尽管古代已有畜力、水力和风力翻车，但都没有完全取代人力翻车。原因是人力翻车最为方便、可靠，哪里需要就搬到哪里，随时需要随时可用，用完后可以搬回家里保存。北宋的王安石（1021—1086 年）在其创作的《后元丰行》一诗中写道：“水秧绵绵复多稌[17]，龙骨长干挂梁栭[18]。”大意是，田里的水稻秧苗长得很茂密，龙骨车长期闲置，干挂在房檐下。

牛转翻车（牛转龙骨车）在宋代已非常盛行。南宋诗人陆游（1125—1210 年）的《入蜀记》记载：“八日，雨霁，极凉，如深秋。遇顺风，舟人始张帆。过合路，居人繁伙，卖鲊[19]者尤众。道旁多军中牧马。运河水泛溢，高于近村地至数尺。两岸皆车出积水，妇人儿童竭作，亦或用牛。妇人足踏水车，手犹绩麻[20]不置。”

这种“足踏水车”便是人力翻车。踩踏水车的工作虽然很辛苦，但妇女和儿童都可以胜任，甚至妇女可以一边踩踏水车一边搓麻线。“亦或用牛”，说明这种水车可以依靠人力，也可以用牛拖曳。这段文字还证明，宋代的牛转翻车并非固定在某处使用，而是可搬运到所需要的场地安装使用，它的便捷性与人力翻车相同，这可能也是牛转翻车能够得到广泛应用的重要原因。

元代王祯撰写的《农书》和明代宋应星（1587—约 1666 年）撰写的《天工开物》中都有牛转翻车的绘图（图 3 和图 4）。然而，相比于这些绘图，宋代已盛行的牛转翻车实际上“看起来”要简单得多，也更易于搬运、安装和使用。得出这一结论的理由源于宋代（佚名）名画《柳荫云碓图》。《柳荫云碓图》现存于故宫博物院，读者可从“故宫名画记”网站检索查看其影印件，在公开网络上也可搜索到作品图片。《柳荫云碓图》描绘的实际是牛转翻车（图 5），虽然图中龙骨车部分描绘不完整，但其他结构描绘得非常清晰。宋代牛转翻车的结构大致如下：

地面安置低矮木制支架，中间垂直于地面竖立一根短粗木轴，木轴上安装一个水平大轮盘，大轮盘边缘有轮齿。旁边有一根平置在地面上的木轴，木轴的一端有齿轮与大轮盘的轮齿相铰接，木轴的另一端与龙骨车相

图3《农书》插图：牛转翻车

图4《天工开物》插图：牛转翻车

17: 稌：tú，稻子。
18: 栭：lǔ，屋檐。
19: 鲊：zhǎ，腌制的鱼。
20: 绩麻：搓麻线。

连接。牛位于大轮盘外侧，迈过地面上的传动木轴，像拉磨一样拉动大转盘旋转。大轮盘通过木轴带动龙骨车运转提水。

结合从宋代名画中看到的牛转翻车结构，再发挥一下想象力：如果在原来用牛转动的大轮盘上，安装上几扇风帆，不就是于 1957 年上映的电影《柳堡的故事》中的垂直轴大风车（图 6）了吗？

幸运的是，这种想象在明末清初顾炎武（1613—1682 年）所著的《天下郡国利病书》中得到了确认。《天下郡国利病书》成书于康熙元年，即 1662 年。书中有关于松江府[21] 水车的记载：

“高乡[22] 之车，深八寸，广七寸，曰‘水龙’。凡一车用三人至六人，日灌田二十亩。有不用人而以牛运者，其制为大盘，如车轮而大，周施牙以运轴而转之，力省而倍功。有并牛不用而以风运者，其制如牛车，施帆于轮，乘风旋转，田器之巧极于是。然不可常用，大风起亦败车。”

这种“水龙”即龙骨车，可以依靠人力，也可以不用人而用牛，还可以不用牛而用风。“其制如牛车”，风车的形式如牛转轮盘一样，在轮盘上安装风帆，乘风旋转。这段文字似乎也证明了龙骨车从人力驱动到畜力驱动再到风力驱动的发展过程。

在牛转翻车盛行的宋代，如果宋人将“牛车”改为“风车”，无论是设计思想，还是制造能力，都是不难做到的。风力水车之所以在典籍中出现得较晚，应该与民间应用较少有关，“不可常用，大风起亦败车”。

## 明代典籍中的大风车

明代晚期出版的多部科技著作中出现了关于大风车的记载，说明此时大风车在民间已有较为成熟的应用。虽然有的著作中写到了风力磨面机械，如风碓、风磨，但记载较多的仍是风力水车，说明风车的应用重点是为水车提供动力。现将几部著名典籍中有关大风车的内容介绍如下。

《天工开物》是明代科学家宋应星

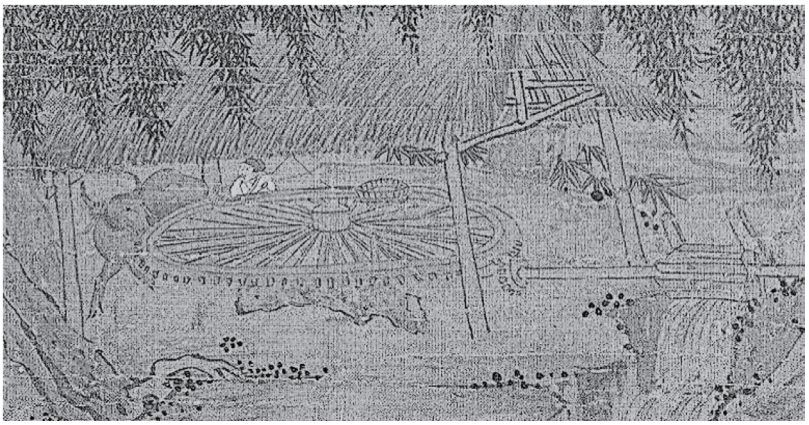


图5《柳荫云碓图》局部（经调光调色处理）

图6 电影《柳堡的故事》中的风力翻车画面

21: 松江府：今属上海市。
22: 高乡：地势较高的地区。

撰写的中国历史上著名的科技百科全书。书中宋应星自序的落款时间是“崇祯丁丑孟夏月”，据此推断这部书于1637年首次刊印。《天工开物》（乃粒第一卷·水利）介绍了龙骨车的多种使用方法，“或以牛力转盘[23]”，“或聚数人踏转[24]”，尺寸较小的龙骨车可“一人两手疾转[25]”。继而写道：

“扬郡[26]以风帆数扇，俟[27]风转车，风息则止。此车为救潦[28]，欲去泽水，以便栽种。盖去水非取水也，不适济旱。用桔槔[29]辘轳，功劳又甚细已。”

从书中上下文判断，当时在扬郡有一种利用风力驱动的龙骨车。这种风车使用风帆结构的风轮，有风时可运转提水，无风时则不能工作。这种风力龙骨车只适用于排涝，若配合桔槔和辘轳使用，则能将水排得更彻底（图7）。

扬郡的大风车“以风帆数扇，俟风转车”，再结合顾炎武所述的“其制如牛车，施帆于轮，乘风旋转”，基本可以判断，明代扬郡的大风车与近现代在江苏、天津等地所使用的风帆式垂直轴大风车基本一致。遗憾的是《天工开物》中没有绘制风力翻车的插图。

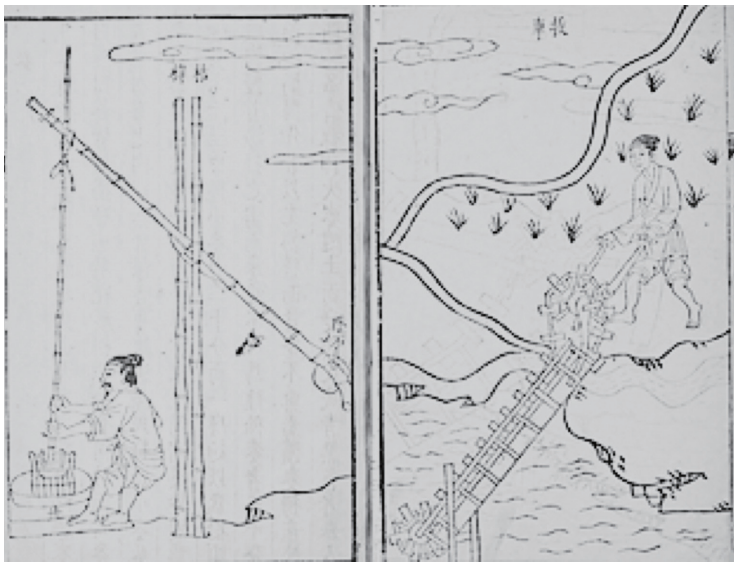


图7《天工开物》插图：桔槔和拔车

《泰西水法》是一部介绍西方农田水利科学的著作，由意大利传教士熊三拔（1575—1620年）口授、明末科学家徐光启记录。熊三拔于1606年来到中国，在中国传教约15年。徐光启为《泰西水法》作序，落款时间是“万历壬子春月”，据此推断《泰西水法》首次刊印时间是1612年。

《泰西水法》是介绍西方取水和蓄水之法的著作，并非介绍大风车的书籍，但在《泰西水法》（卷一·龙尾车记）中有一段文字叙述，反映了当时中国使用大风车的情况：

“东汉以来，盛资龙骨。龙骨之制，日灌水田二十亩，以四三人之力，旱岁倍焉，高地倍焉，驾马牛则功倍，费亦倍焉。溪涧长流而用水，大泽平旷而用风，此不劳人力，自转矣。枝节一萎[30]，全车悉败焉。然而南土水田，支分櫛[31]比，国计民生，于焉是赖，即兹器所在，不为无功已。独其人终岁勤动，尚忧衣食，乃至圩[32]土旱灾，赤地千里。欲拯斯患，应有进焉。今作龙尾车，物省而不烦，用力少而得水多。”

这段文字介绍了龙骨车自古以来所发挥的重要价值，以及其存在的弊端。其中有几句描述了龙骨车借助水力驱动或风力驱动的情况：有溪涧等长年流动的水就用水驱动，大的平原水流缓慢就用风驱动，这样不费人力，自行转

23: 即牛转翻车。
24: 即踏车，或称翻车。
25: 即拔车，一种小型人力翻车，轮轴上装有曲柄，双手转动曲柄提水。
26: 泛指现在的扬州一带。
27: 俟：sì，等待。
28: 潦：lào，同“涝”。
29: 桔槔：jié gāo，古代利用杠杆原理制造的一种原始的汲水工具。
30: 萎：cuò，挫折、折断。
31: 櫛：zhì，梳子，篦子。
32: 圩：dàng，高田。

动。但是只要有一处出现折断，整个风车就全坏了。这说明，在《泰西水法》于 1612 年刊印之前，中国人就有利用风力驱动龙骨车提水的传统了。

《远西奇器图说录最》由西方传教士邓玉函（1576—1630 年）口授、明代科学家王徵[33]（1571—1644 年）翻译并绘图。根据序言落款时间“天启七年”判断该书成书于 1627 年。《远西奇器图说录最》被誉为中国第一本有关西方力学和机械学的编译著作。在这本著作的后半部分，介绍了多种西方的机械设计图，其中包括风力机械。

其中有一幅用于汲取井水的风力机械图（图 8），运用了水平轴设计，图说：“井中水，不能上，先作风车以代人畜。风车有轴，即在井上以转井中取水之庠[34]者也。”然后介绍了井下取水的设计方法。书中有王徵绘制的插图。这种安装在井口的风车，其水平木轴如同辘轳一样，通过锁链与井中的取水庠斗连接，风车有 4 个木质桨叶。

书中还介绍了多种利用风力磨面的装置，主要特征包括：建造二层支架或二层房屋建筑，上层安装垂直轴大风车，叶片采用方木板或方布框，风轮型式多样，旋转木轴连通到房屋

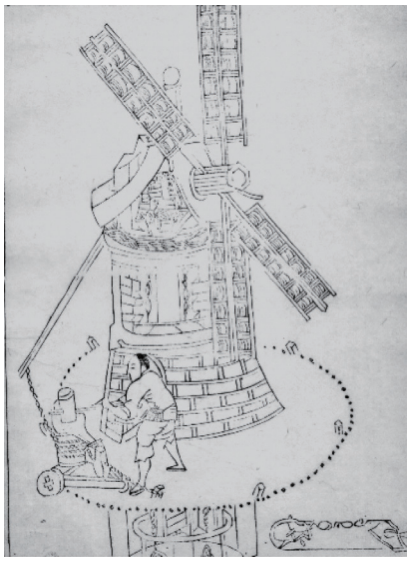


图8《远西奇器图说录最》插图

或支架的下面一层，木轴通过大小齿轮组成的齿轮副与石磨相连接。大风吹动风轮旋转时，带动石磨磨面。

《农政全书》是明末著名科学家和政治家徐光启所著，书稿内容大约完成于 1628 年以前，在徐光启去世后由其门人于 1639 年出版。书中水利部分介绍了多种用水之法，下面摘录《农政全书》（卷之十六）中两段文字，以了解大风车在当时的应用情况：

“溪涧傍田而卑于田，急则激之，缓则车升之。激者，因水流之湍急，用龙骨翻车、龙尾车、筒车之属，以水力转器，以器转水，升入于田也。车升者，水流既缓，不能转器，则以人力、畜力、风力运转其器，以器转水入于田也。”

“掘土深丈以上而得水者，为井以汲之。此法北土甚多，特以灌畦种菜。近河南及真定诸府大作井以灌田，旱年甚获其利，宜广推行之也。井有石井、砖井、木井、柳井、苇井、竹井、土井，则视土脉之虚实纵横及地产所有也。其起法有桔槔，有辘轳，有龙骨木斗，有恒升筒，用人用畜。高山旷野，或用风轮也。”

《农政全书》还收录了元代王祯在《农书》中介绍的灌溉之法，徐光启对书中的部分内容作出了评论。例如，对于水转翻车，徐光启认为：“水势太猛，龙骨板一受龃龉[35]即决裂不堪，与今风水车同病。若长流水中，不如筒车为稳。平流用风，不佞[36]别有一法。”大意是，在水势太猛的地方，用水转翻车容易损坏，这与当时的风力水车存在相同的问题。长时间用于流动的水中，用水转筒车比水转翻车更稳定。在水流平缓的地方用风力驱动，是很精巧的办法。（未完待续）

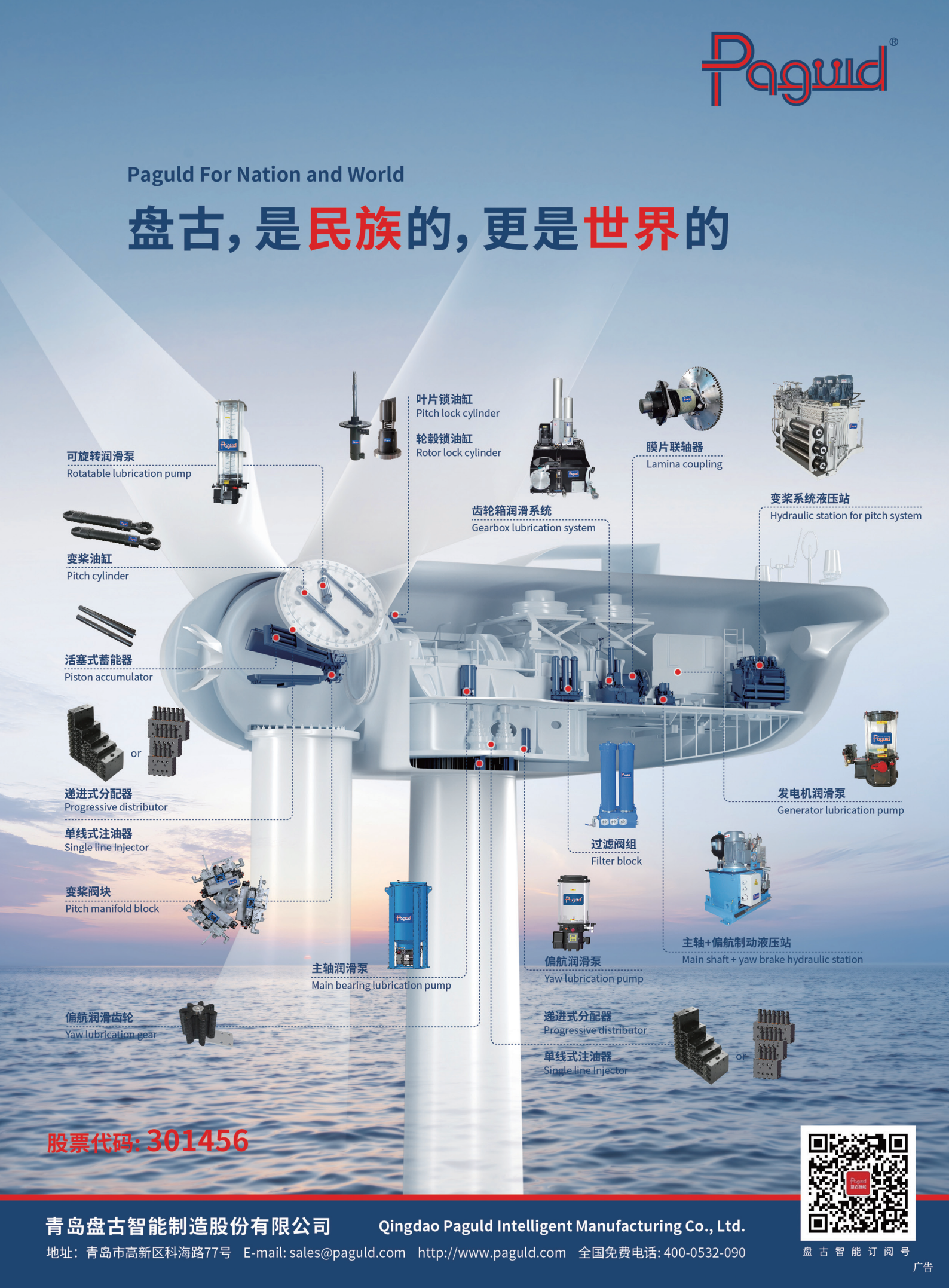
摄影：张永林

33: 徵：zhǐ或zhēng，用作人名时读zhēng，同“征”。
34: 庠：hù，取水用的农具。
35: 龃龉：jǔ yǔ，咬合不齐。
36: 佞：nìng，不佞，表示谦称。

Paguld®

Paguld For Nation and World

# 盘古，是民族的，更是世界的




**股票代码: 301456**


**青岛盘古智能制造股份有限公司** Qingdao Paguld Intelligent Manufacturing Co., Ltd.

地址：青岛市高新区科海路77号 E-mail: sales@paguld.com http://www.paguld.com 全国免费电话: 400-0532-090


盘古智能订阅号

广告

# 去玄学、求科学的“风水先生”

## ——记瑞科科技西南分公司总经理巫强的成长故事

本刊 | 时春景

2025 年春节上映的电影《哪吒之魔童闹海》里憨态可掬的土拨鼠形象，让很多初次见到的人惊喜。对于巫强来说，它们却是旧相识，因为早在十年前他便与这个萌态十足的物种有了第一次亲密接触。再次从银幕上看到它，巫强的记忆之门瞬间打开，那个有些紧张又有些慌乱的新风能人踏勘的故事跃然脑海。

走不同的路，看不一样的风景，是埋在巫强心里的一颗“种子”。2014 年，虽还在读大四，但已在北京瑞科同创科技股份有限公司（下称“瑞科科技”）就职多年的学长带来的一纸校园招聘简章，像一阵春雨，唤醒了巫强心底那颗沉睡的“种子”，“招聘简章里写着‘会经常出差去全国各地’，因为我本身比较喜欢户外，所以当时觉得这个挺有意思。”就这样，他成为了瑞科科技的一员。

虽然择业的初衷是往外跑，但入职后巫强也能够坐得住。

初来乍到，兰州大学气象专业的学业背景虽然符合岗位要求，但一切仍得从头学起，风电项目的规划选址，包括评估方法、软件操作、工具运用……打破专业壁垒是当务之急！周一到周五，巫强忙于跟随师傅处理各种项目。周末，瑞科科技聘请公司内部或者行业优秀的前辈来授课，持续近半年的培训课程，巫强无一落下。对于培训所学内容，巫强会在项目中亲自实践操作。此外，下班后的时间被他用来研读规范。渐渐地，从基础理论到项目应用，深谙“师傅领进门，修行在个人”的巫强，将风能资源评估所需的知识悉数收入囊中。“虽然当时是第一次来北京，但也不会利用周末的时间出去游玩，唯一的念头就是快速进入这个行业。”虽然心怀“江湖之远”，但对于彼时的巫强来说，首都深厚历史文化底蕴的诱惑远不及专业知识的汲取来得重要。

“如果想要做到出类拔萃，那一定得自己多下功夫，然后多主动去找一些参与项目的机会，让自己得到锻炼。”看到了他的用心，公司领导将当时尚未毕业仍是实习生身份的巫强独自派

往了位于甘南的某个规划选址的项目。

“我坐了一晚上火车，因为事出紧急，没有太多时间准备，但偏又买到了卧铺，坐也坐不起来，只能在逼仄狭小的空间里躺着打开电脑，临时完成场区规划。”这段有些局促的开端似乎给项目的进程投下了一丝阴影。果然到场后，理论储备充足、现场经验为零的背景，让巫强处理起实际问题来缺乏随机应变的能力。经历了两天迷茫期，巫强随后调整心态，积极向师傅请教，同时从公司获得了充分的资源支持，有惊无险地完成了任务。

这个项目是巫强的第一个出差项目，也就是在这个项目现场，碧空如洗的天空下，静穆的草地从山脚铺展到无穷的远方，突然乌泱泱一群土拨鼠闯入视野，“远远看去，它们屁股一翘一翘地在那儿跑，看起来很可爱，我们走近之后，它们就钻到洞里面去了。”

甘南美丽的风景和这场动人的邂逅，坚定了巫强选择风电行业的信心。随着项目参与量的增多，巫强能够更加得心应手地处理各类项目。“处理的项目多了，有一定经验后，就能够预判到现场之后会遇到哪些问题，也知道怎么去寻找资源，以及怎么去协调资源处理。”

到 2010 年后，南方风电建设的大幕开始徐徐展开，复杂环境带来了新的风能资源评估挑战，贵州的凝冻问题便是其中之一。

“贵州海拔高，湿度大，会有较长时间的冰冻，导致测风塔数据问题非常多，参考性不足。然而，当时整个行业在冰冻地区的项目开发经验不多，因此，大家没有什么处理思路。”2015 年 3 月，瑞科科技参与了贵州某风电项目的风能资源评估工作，负责处理测风塔数据的正是巫强。“除了瑞科科技，当时客户请了很多设计院。我们看过他们的方案，也不是说特别经得起推敲。”为了找到一个最具代表性，也最能够客观评价当地发电水平，且能够得到佐证的方法，巫强花了很多时间研究数据之间的规律，“因为数据缺失严重，且地形复杂导致测风塔之间的相关性并不是很好，我们用了很多种数据源，包括各种外部的数据源，以及风电场内不同测风塔的数据源，然后分不同的时段、不同的扇区，找最好的相关性，对数据进行补全。在这个项目上，我光处理数据就用了一个星期。那段时间，我天天都在磨数据，而且反复用了很多办法。”在师傅的协助引导下，一个星期后，巫强终于得到了一个受客户认可的结果。

“公司领导每天都会来问处理情况，我的师傅一天也会问很多次。”由于是疑难问题，该项目获得了全公司的一致关注。而之所以能够啃下这块“硬骨头”，是因为巫强不遗余力地投入，“我当时晚上会处理数据到很晚，想着当天晚上如果不把结果做出来的话，就不会睡觉。因为带着这个问题，我根本睡不着。”此外，还源于他细致的做事风格，“处理完数据我会自己检查很多遍，而不是做完直接交给领导，让领导挑出一大堆毛病。”

“大家用的软件和模型几乎大同小异，如果想有差异，就一定要结合自己的理论知识，用不同的方法，并且舍得花精力用多种方法佐证，不能只是一味进行傻瓜式操作。”通过这个项目，巫强对于风能资源评估准确性的提高有了更深刻的认识，该项目对他未来把关其他项目的技术方案同样大有裨益。

入职半年，通过全身心的钻研技术，巫强掌握了项目处理的方法学和实践论，积累了大量的项目经验，为此后各类项目处理打下了坚实基础。一方面是家庭的牵绊，另一方面是公司的发展策略，从 2015 年年底开始，巫强的工作重心转到了西南地区。此时的他，不仅能够游刃有余地参与各种复杂山地项目的风能资源评估，还可以对以前没有遇到的特殊项目提出新的解决方案。

其间，巫强参与了四川攀西地区的多个复杂山地风电项目。2015 年年底，瑞科科技携手多家国有设计院，以及多家整机企业，为业主提供风能资源评估方案的复核。当时业主已完成前期测风，但鉴于其他项目部分点位出现过发电量不佳的先例，业主决定做进一步评估，以消除低效机组。“按理说，测风肯定要满一年，但当时项目的道路已经修好，施工队伍也已经到场。施工人员就在现场等着，只能是我们抢时间，用两三个月的时间去精细化测量，测完后再去评估。”全面负责该项目技术工作的巫强，在公司领导的全力支持下，结合项目实际情况提出了一种全新方案。“考虑到测风塔的代表性不足，我们提出了雷达补测的方式，根据经验去选择分析点。例如，在测风塔范围覆盖不到，或存在背风、窝风的山脊增设雷达设备。这有点像‘风水先生’，但我们又不会拍板说这个地方风一定好，或者一定不好，我们所做出的评判都是基于科学的方法。”

这种医生把脉、对症下药式的评估方案得到了业主的认可，通过项目投产后做的后评估，发电效果也得到了进一步验证。由巫强深度参与的

多个风电项目的年均利用小时数都在4000 h 以上。“也是因为第一个项目得到了比较好的验证效果，之后每个项目客户都会邀请我们来做。通过这种技术方案的推广，我们帮助业内很多其他客户解决了比较多的问题。”

多年西南区域复杂项目的历练，进一步丰富了巫强的经验。技术工作之外，巫强在公司的支持下，着手市场开拓，尝试以创业的思维做事，在广泛参与项目技术风险评判的同时，向管理赛道积极迈进。

2020 年双碳目标提出后，西南区域开拓的步伐逐渐加快。几年来，在公司资源的支持下，巫强不断补足管理所需知识，在遇到问题、解决问题的过程中学习，“大到政策环境下的市场策略、业务类型和布局，中到团队搭建、项目执行，小到办公室的选择，行政类工作的开展，对于管理者来说，都需要去思考、总结。”随着管理经验的逐渐加深，巫强实现项目开拓、商务谈判、合同履约全过程闭环。在以安逸为外人道的成都，亲自组建团队，深入激发团队潜力，带领团队以精确到秒的精细化时间规划方式，保持冲锋的态势，积极开拓西南区域市场。团队规模从最初的几个人快速增长为超百人，涵盖了市场营销、设计履约、软件服务、后市场服务等各类专业，区域年产值达上亿元。同时，他带领着西南区域的团队率先实现独立运营，成立了西南分公司。作为分公司的排头兵，巫强对团队提出了更高的要求，“不能想着天天在办公室里就把事情做了，我们一定得走出去，多与客户沟通，多向行业前辈学习，多参与行业会议及项目。”

近年来，依托瑞科科技开拓海外市场的战略部署，以国内西南地区为业务基本盘，停不下脚步的巫强又将目光瞄准了东南亚及南亚市场。“很多国家都没有较为成熟的新能源项目管理办法，我们到很多国家开发的项目都是它们的第一个风电项目，去国外开拓业务，其实是摸着石头过河。”开拓国外市场意味着要面临政治、市场、语言、工作理念和方法、项目成本预估不准确、履约经验不丰富等诸多因素挑战，“像我们在缅甸和菲律宾开发项目时，开展现场工作过程中需要找当地人持枪保护。又比如，去年孟加拉国暴乱的时候，我们有员工困在当地，只能要求他们待在酒店，并且必须每天早晚及时通报状态。”但巫强依然决定带领团队“走出去”，而事实证明其选择是正确的，“我们对于法律法规，包括人员出国的安全保障，都已经有了比较丰富的经验积累，现在海外一年也能实现几千万元的产值。”

在瑞科科技工作十余年，已从技术工程师荣升为区域负责人的巫强，多次获得瑞科科技优秀员工、优秀团队负责人、金牌经理人等荣誉，代表公司出席行业协会技术论坛并发表主题演讲。一边是仗剑走天涯的夙愿，大漠孤烟，江南烟雨，苍茫山海，随着瑞科科技发展的步伐，巫强几乎领略了祖国各地的风土人情；一边是新能源规划的责任，从国内到海外，他在让风电、太阳能造福一方水土的路上越走越远。某种意义上，鱼和熊掌，巫强实现了兼得。

2kV SiC 技术亮点

# 覆盖您的需求

## 创新封装充分发挥碳化硅的性能

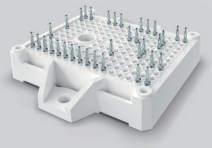
SEMIKRON DANFOSS

赛米控丹佛斯推出了一系列功率模块和智能功率模块，采用了更新一代技术的 2kV SiC。SEMITOP E2、SEMITRANS 3 和 SEMITRANS 20 助您灵活开发变换器。SKiiP 4 SiC 集成了功率模块、驱动电路、电流传感器和散热器。**无论您选择哪种解决方案，都能覆盖您的需求。**

**超越标准封装的卓越性能**

**SEMITOP® E2**

2kV SiC
100kW 至 215kW



**更新一代的技术结合经典封装**

**SEMITRANS® 3**

2kV SiC
200kW 至 400kW

**工业标准功率模块高功率密度**

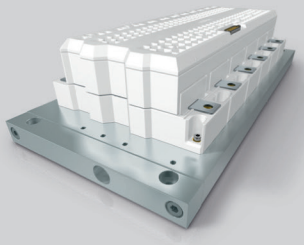
**SEMITRANS® 20**

2kV SiC
500kW 至 2MW

**缩短上市时间智能功率模块**

**SKiiP® 4 SiC**

配备 2kV SiC 芯片
500kW 至 2MW



SiC Silicon Carbide

AC DC

semikron-danfoss.com

广告

# 王海波：和展能源先做“小而美”

在电价突变的开发环节保持现有节奏，在竞争激烈的混塔市场谨慎扩张，王海波更希望将和展能源打造成一个“小而美”的公司。

本刊 | 赵靓，薛辰

可以说，和展能源是“风电老兵”王海波通过创业方式，实现与承载梦想的重要载体。针对公司的未来，这位被业内誉为“账算得很细”的董事长，为和展能源选择了理智且明晰的发展途径与节奏，将企业资源集中于两大优势领域。

“现在和展能源的账面金额有 10 亿元，如果只是想要盈利比较容易，比如，不使用贷款就可收购一座风电场，每年都有可观的利润。”王海波向《风能》表示：“简单盈利不是我们的目标，达到更高的资本金收益率才是目标，这就需要企业发展‘小而美’。”

在王海波看来，和展能源没有必要去做超出行业能力范围的事情，因此，即便在风电全面入市和混塔市场迅速“内卷”的重要变化阶段，和展能源仍在按照既有节奏发展。

王海波解释道：“我们企业不大，有两个赛道已经足够深挖，赛道再多就会出问题。做大已经经历过，现在做某个领域的‘小而美’挺好。”

## 全面入市，对有能力的公司是好事

2025 年 1 月 27 日，《国家发展改革委 国家能源局关于深化新能源上网电价市场化改革促进新能源高质量发展的通知》印发，推动新能源上网电量全面进入电力市场，通过市场交易形成价格。

风电开发是和展能源的两大业务板块之一。对于电价政策的变化，王海波的理解显得颇为积极。在他看来，2015 年后我国风电项目开发的金融属性不断增强，行业门槛持续降低，非技术成本逐渐增多，导致风电场已演化为一种固定收益产品。

“电价是固定的，发电小时数由整机企业担保，运维风险由运维企业担保，折旧也是固定值，开发一个风电项目基本是稳赚不赔。金融机构甚至会提供全额融资，项目的超额价值使持有批文的企业一夜暴富，很多跨界企业进入，加剧了竞争，也使持有项目的发电企业产生大量非技术成本。”王海波解释说。

在风电全面入市后，由于电价存在很大不确定性，对项目投资收益的估算难度增加，从而降低风电开发的金融属性。虽然短期内贷款难度会有所提升，但长期来看，这对专业而勤奋的企业更为有利，从而造就更健康的风电市场。

“只有专业且愿意学习成长的风电开发企业，才能对入市后的项目投资收益水平做出精准判断，预计只有不到一半的开发企业具备这样的能力。”王海波认为：“金融属性会回归技术，回归发电能力，回归降本增效。”

对于风电全面入市可能产生的影响，王海波淡然面对，认为风电入市并不可怕。他举例说，十多年前他的团队曾与某央企合作开发澳大利亚的某个风电项目，出于风控要求的考虑，这家央企希望通过与当地电网公司签订长协电价再进行开发决策，但长协电价远低于现货电价，一旦签订协议，收益率会大幅降低。在某种程度上，这种长协电价是为小型开发企业设计的，在帮助开发企业融资的同时，电网获得很低的电价。

“我们两家企业的规模都这么大，还能为了融资签订长协电价？”王海波回忆说：“最终按照 75%+25% 的股比合资建设了这个项目，采用电力现货交易，仅用 3 年时间就收回了成本。”

因此，对于风电全面入市而言，王海波认为行业应当从容面对，对于长期在风电行业中耕耘的企业和风能人来说，“我们看一下未来 5~10 年的趋势就行了，一两年的事看了也没用，影响情绪与决策，练好内功更重要。”

当然，王海波认为企业仍需积极提升自身能力，以应对风电全面入市后的挑战：

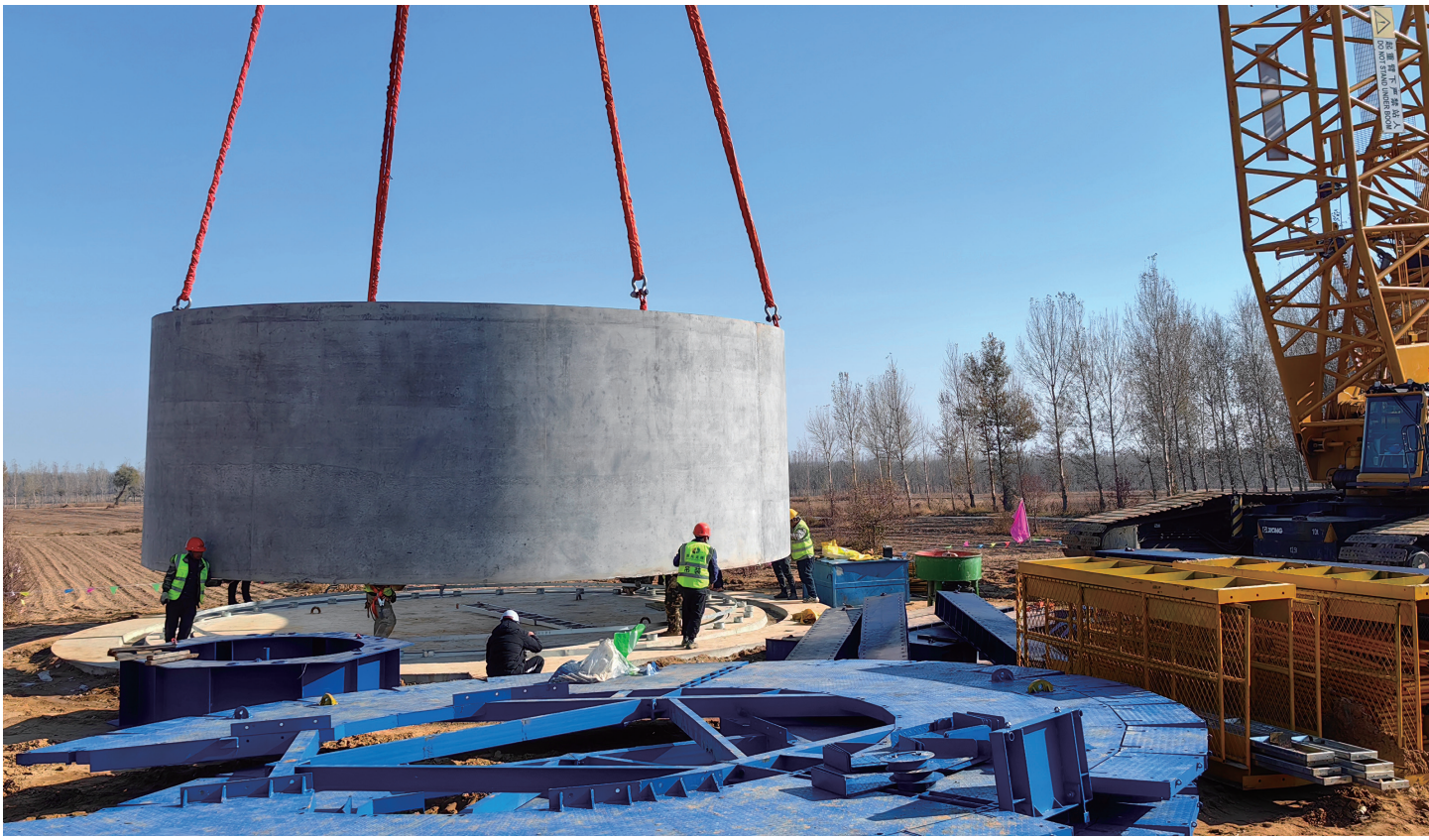
一方面，在技术可行性分析选型优化上找价值。就像房地产一样，房子是用来住的，不是用来炒的。风电是用来发电的，也不是用来炒的。一些风能资源普通或发电收益难以达标的项目，以前能赚钱，但在全面入市后就可能存在风险。这意味着风电“躺着赚钱”的时代已经过去，市场的“紧箍咒”将卡得更紧，仍仅凭拼关系或拼胆大，不注重技术或能力提升的企业，将很难在市场中生存。企业只有在管理能力上不断提升，去适应市场化所驱动的市场规律，努力创造价值，才能适应新的时代。

例如，在项目机组选型时，企业应注重设备性能，要研究如何通过技术可行性分析选型与优化，来提高项目发电能力，避免采用发电能力虚标的产品等。

另一方面，企业应善于创造新的场景。在王海波看来，风电规模化发展过程中，风能资源的质量将呈现不断下降的趋势，电价也会持续下降。只有当风电技术进步的速度抵消两者下降的速度，新增规模才能保持稳定。如果技术进步速度大于前者，新增规模就会增大。

“现在是国内单一发电卖电的市场，如果能打开新的应用场景，市场规模将进一步叠加增大。”王海波表示：“现在已经有一些头部整机企业在尝试创造新的‘风电 +’场景，如制氢氨醇、制铁合金等。如果企业自己不去主动创造或缺乏能力去创造新的场景，就可能影响到自身发展。”

“因此，市场是创造出来的，政策的影响对没有能力的企业是坏事，对有能力的企业是好事。正如那句话：悲观的人永远正确，乐观



的人永远成功。”

## 专注一体化开发，主动拥抱未来

王海波深谙风电开发之道，毕竟他过去创立的企业曾创造出比行业平均年发电量高10%，利润率高 50% 的业绩。然而，风电开发存在细分领域，掌舵和展能源后，“账算得很细”并追求利润率的王海波，将公司这项业务的注意力主要放在“创造新场景”上，尤其是“源网荷储一体化”（下称“一体化”）市场。

在王海波看来，一体化市场早被公认为未来电力系统发展的重要方向，但对风电开发企业而言，却存在一个难以逾越的鸿沟。

传统风电开发企业与负荷企业合作的模式，通常采用合同能源管理（EMC）的方式，意味着开发企业投资的风电项目电量只能全部卖给负荷企业。换句话说，是负荷企业本应该自投电厂，但因为各种原因交给了风电开发企业去投建，相当于请负荷企业做了技改降本。

“虽然风电开发企业希望能与负荷企业合作，但现实中，一些大的负荷企业完全可以自己进行开发。具备较好的组织能力与资金实力，建立风电开发能力最快只需要半年时间。”王海波表示：“因为风电开发行业已经非常成熟，分工明确，资源分析、工程造价找设计院，风电机组找整机企业。”

王海波以一家煤化工企业举例解释，该公司依靠自身能力完成了当时国内单体容量最大的 175 万 kW 陆上风电项目建设，实现了 60%~70% 的电力自主消纳。令王海波佩服的是，该项目的造价水平、建设周期甚至远优于一些传统风电企业。

还有一些能够实现 EMC 合作模式的一体化项目，也难以如理论上那么赚钱。“在一

体化项目中风电开发企业如果效益很好，那么负荷企业可能会觉得吃亏，一旦其缺乏契约精神，开发企业就会非常被动。”王海波向《风能》举例说。

因此，传统风电开发企业必须以市场化的思维去主动拥抱新的领域，懂得创造需求，持续产生价值。“行业要做点难事，因为已经到了改革的‘深水区’，大家这时候需要创新，也需要智慧。”

例如，由于风电具有波动性，而负荷企业希望电力是稳定的，和展能源就需要通过自身经验与能力，提供一个帮助负荷企业尽可能高比例使用风电的解决方案，从而将两者的特点与需求链接在一起。“基于负荷企业全年 8760 h 的运营模型，我们会重新评估生产策略的经济性，并提供最佳方案。我们会建议采取分阶段实施策略：首先设定 60% 风电占比的初级目标，逐步提升至 80%~90%，最终达到 90%~100% 的目标可能需要 10 年的周期来实现。”王海波透露。这成为其所在公司为合作方创造价值的重要方式之一。

另一种方式体现在合作模式的灵活性上。“我们愿意躬身入局，愿意深度参与。有些项目可以自己做，有些项目可以参股。对方有意当大股东，我们就当二股东。电源侧可以各投 30%，不用再那么纠结。在股权相近时，电价高低都不用讨论，或是随行就市，在市场平均现货价格上打个折扣。这样负荷企业的心态也就好了，因为风险共担，不会存在智商税。”王海波坦言。

还有一种场景是某些区域的风能资源较好，但当地经济发展却难以享受到低电价的红利。此类地区的传统招商模式是，利用自身较好的风能资源，引入风电机组的总装厂，以拉动当地装备制造业发展。而在王海波看来，既然这类地区能够将风电度电成本做到更有竞争力，完全可以将超额利润以更低电价的方式提供给用电企业，从而提高企业在当地投资的积极性，使用电企业与地方招商都享受到绿电的红利。

“往往风越大的地方经济越差。因为受气候环境与区位条件限制，这些地区难以吸引到企业投资。”王海波认为：“和展能源可以与地方政府合作建立低电价区。我们先行投资风电项目，再以市场化的方式将更便宜且绿色环保的风电，定向卖给周边特定的企业，从而使风能资源较好的区域更具投资吸引力。”

在王海波看来，这样的风电开发模式已“此风电非彼风电”：“我们现在干的是风电 3.0。风电 1.0 是有补贴时的风电，2.0 是平价时的风电，3.0 是一体化发展的风电。”

## 混塔创造新的价值，可做的有很多

开发企业设计制造混塔，我国虽有先例，但在业内普遍的认知下，两者之间的联系似乎间接了些。毕竟，开发与部件制造分属风电产

业链条的两个环节，两者间存在一定技术壁垒。然而，王海波却坚定不移地将混塔作为和展能源的两大业务板块之一，同样源自于他将“创造市场”与“创造价值”摆在了企业发展战略的首位。

“我们只要做创造价值的事情，就是自洽的，吸引力就出来了，利润也会出现。”王海波表示：“就像一体化开发一样，混塔能够创造一块新的市场。虽然其技术含量没有主机高，但对行业的价值很大。此外，从事开发的时间久了，会与装备制造脱节，我们不想丢掉对装备制造的认知。”

王海波的团队曾在内蒙古测过风，120 m 轮毂处的风速达到 6 m/s 左右，300 m 处达到了 9 m/s。另一项数据是，采用 200 m 高的混塔比采用传统 140 m 塔架，可增加发电小时数 400 h。若仅凭优化风电机组性能来增加 400 h 发电小时数，是非常困难的。

此外，由于混塔成本的下降，其价值正被进一步凸显。“以前我们认为在风切变达到 0.16 的地区可以用混塔，那是基于当时的混塔价格。如今根据项目特点和区域风能资源状况，都有不同程度下降。”

在王海波看来，油气企业向地下打越来越深的井，是为了找到更多的油气资源；而利用混塔将风电机组托举于更高的高度，则是为了找到更多的风能资源，两者并无实质区别，都是通过技术进步创造市场空间。

并且，除了风切变较大地区采用混塔能有效提升项目发电能力外，随着机组大型化发展，风轮直径越来越大，也需要混塔确保机组安全。因为目前风电机组的叶片长度已经达到了 120 m，叶尖离地高度至少需要 20 m，塔架高度需要达到 140 m，经济性突出的混塔成为必然选择。

由于看好风电混塔产业发展，2023 年开始大量建筑工程企业进入这一市场，似乎给传统风电企业带来一定冲击。在谈及混塔市场竞争愈演愈烈的问题时，王海波却极为淡定。

“我认为这是好事。这些从工程领域进来的企业，带来了混塔市场规模的增长，大家各显神通把市场推动起来。”王海波坦言：“同时作为进入风电更早一些的企业，以往总是从塔架视角看待混塔。而这些新的同行，很多是做桥梁预构件的，也有做大型管桩的，他们做了一辈子混凝土，传统风电企业有需要向他们学习的地方。”

但王海波同时指出，面对愈演愈烈的市场竞争，和展能源有自己的节奏，不会乱了阵脚。

一是精耕细作。只进行利润正常的合作，而不是什么样的订单都接，没有利润就没有质量的底气。

二是谨慎扩张。“我们产能爬坡的速度是有限的，因为培养优秀的一线管理人员需要时间，所以每年有增长即可，交付量增长太快容易出问题。”

三是关注客户痛点。“混塔市场现在正处在一个‘草莽时代’，比较缺少高质量的产能，并且混塔的生产质量、运输方式、交付速度、安装方法等还有大量可供优化的空间，我们正进行技术攻关。”

然而，上述一切布局的基础是产品质量的把控。为了做好混塔质量，和展能源采用了建筑行业的标准，设计图纸不仅会送至专业的建筑工程设计机构进行校核，还会邀请国家级的勘察设计大师进行评估，最终通过鉴衡认证中心认证后再到市场上销售。

王海波向《风能》举例，最近和展能源内部在讨论混塔产品成本与质量的相关问题时，有管理人员提出工厂在制作混塔时采用的浆料有浪费，建议设置一个定额标准。但王海波认为需要谨慎看待这一问题。因为一旦为浆料设置了定额，有可能会导致某些塔片在制作过程中出现用料不足的情况。

“作为跨界者，我认为我们的管理制度还是要多向建筑行业和混凝土行业去学习，因为他们碰到这样的事情很多，绝不能拍脑袋自以为是。”王海波坦言：“有些成本是不能省的，一个小制度的出台可能就会导致一批混塔倒塔。在风电行业品牌与口碑比利润更重要，出一次质量问题名声就臭了。”

伊莱特股份
IRAETA

# 全球清洁能源关键部件供应商

伊莱特在全球清洁能源占有重要的市场地位，可提供风电塔筒法兰、桩法兰，偏航、变桨、齿轮箱锻件，安装船用回转支承、替打环、送桩器锻件，以及浮式风电系泊锚链等各类产品。在海上风电领域，伊莱特拥有多个15-25MW机型的制造业绩;并牵头起草了《风力发电系统风力发电机组环形锻件技术规范》等多个国家、行业的制定标准。目前已经建立了绿色循环的全产业链模式，使用低碳钢来降低碳排放。

# Global supplier of key components for clean energy

Iraeta holds a significant position in the global clean energy market, supplying a wide range of products such as tower flanges and pile flanges for wind turbines, as well as yaw, pitch, and gearbox forgings. The company also provides forgings for installation vessels, including slewing bearings, anvil rings, and pile drivers, alongside mooring anchor chains for floating offshore wind systems. In the offshore wind sector, Iraeta boasts a proven track record, manufacturing components for multiple 15-25 MW turbine models. Additionally, it has taken a leading role in drafting key national and industry standards, such as the "Wind Power Generation System Technical Specification for Wind Turbine Ring Forgings." Embracing a green, circular economy model, Iraeta leverages low-carbon steel to minimize its carbon footprint across a fully integrated supply chain.

伊莱特能源装备股份有限公司 / Iraeta Energy Equipment Co., Ltd.
山东省济南市章丘区济王路4177号 / 4177 Jiwang Rd,Zhangqiu,Jinan,China
www.iraeta.cn / www.iraeta.com
+86-531-83808858
sale2@iraeta.com

广告

# 2024年中国陆上风电下线机型统计

本刊 | 赵靓

据《风能》统计，2024 年中国宣布下线的陆上风电机型有 8 款，由 6 家整机企业推出。这些新下线的机型中，最大单机容量达到 15 MW，比 2023 年提升 4 MW；平均单机容量达到 9.87 MW，比 2023 年提升 0.87 MW。可见，目前风电整机企业在陆上风电机组大型化上具有较强共识，下线的产品基本保持步调一致。

与 2024 年新下线的海上风电机型最大单机容量提升 30% 相比，陆上风电机型最大单机容量提升更为明显，达到 36%。然而，陆上新下线机型的平均单机容量提升幅度，相比 2023 年并没有如此之大，这是因为下线 15 MW 级陆上机型的厂家不多，仅有三一重能。

2024 年，是中国陆上新机型普及 10 MW 容量的一年。多家企业在年初开始对 10 MW 级风电机组样机进行吊装或测试，为年度大容量陆上机组项目的招标提供了更为丰富的选项。

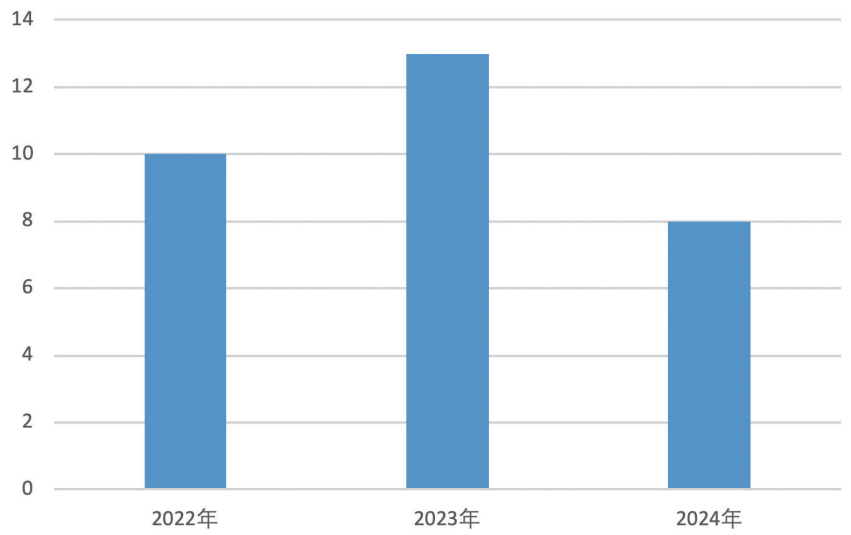



图1 2022—2024年中国宣布下线的陆上风电机型数量

表1 2022—2024年中国宣布下线的陆上风电机型

| 下线时间 | 整机企业 | 单机容量/MW | 风轮直径/m | 技术路线 |
|---|---|---|---|---|
| 2022 年 | 金风科技 | 5 | 191 | 中速永磁（半直驱、混合） |
| | 东方风电 | 5.5 | 183 | 双馈 |
| | 运达股份 | 6.25 | 190 | 双馈 |
| | 中车株洲所 | 6.25 | 185 | 双馈 |
| | 远景能源 | 6.7 | 192 | 双馈 |
| | 中船海装 | 6.X | 185 | 双馈 |
| | 中船海装 | 6.X | 193 | 双馈 |
| | 明阳智能 | 7.15 | 216 | 双馈 |
| | 哈电风能 | 7.X | 187 | 永磁直驱 |
| | 三一重能 | 7.X | 210 | 双馈 |
| 2023 年 | 金风科技 | 6.X | 204 | 中速永磁（半直驱、混合） |
| | 中船海装 | 7.X | 202 | 双馈 |
| | 三一重能 | 8 | 204 | 双馈 |
| | 明阳智能 | 8.5 | 216 | 双馈 |
| | 三一重能 | 8.5~11 | 230 | 双馈 |
| | 运达股份 | 8.X | 200 | 双馈 |
| | 运达股份 | 9.1 | 215 | 双馈 |
| | 远景能源 | 10 | 220 | 双馈 |
| | 中船海装 | 10 | 220~230 | 双馈 |
| | 明阳智能 | 10 | 233 | 双馈 |
| | 运达股份 | 10 | 220~250 | 双馈 |
| | 金风科技 | 10.X | 230 | 双馈 |
| | 明阳智能 | 11 | 233 | 双馈 |
| 2024 年 | 运达股份 | 5.X~7.X | 190~220 | 双馈 |
| | 运达股份 | 8.X | 200~230 | 双馈 |
| | 中车株洲所 | 10 | 230 | 双馈 |
| | 华锐风电 | 10.X | 230 | 双馈 |

（转下页）

（接上页）

| 下线时间 | 整机企业 | 单机容量/MW | 风轮直径/m | 技术路线 |
|---|---|---|---|---|
| 2024 年 | 电气风电 | 10 | 230 | 双馈 |
| | 联合动力 | 10 | 236 | 双馈 |
| | 运达股份 | 10 | 200~230 | 双馈 |
| | 三一重能 | 15 | 270 | 双馈 |

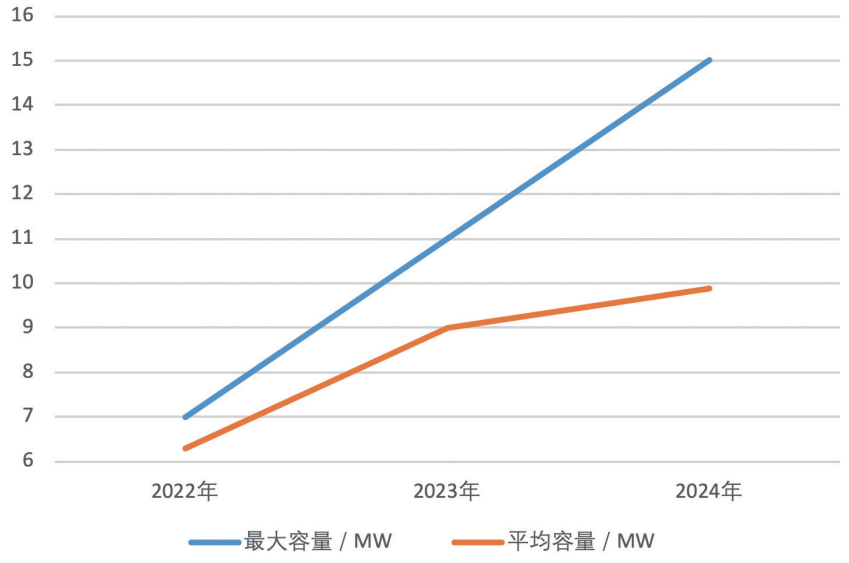



图2 2022—2024年中国宣布下线的陆上风电机型单机容量发展趋势

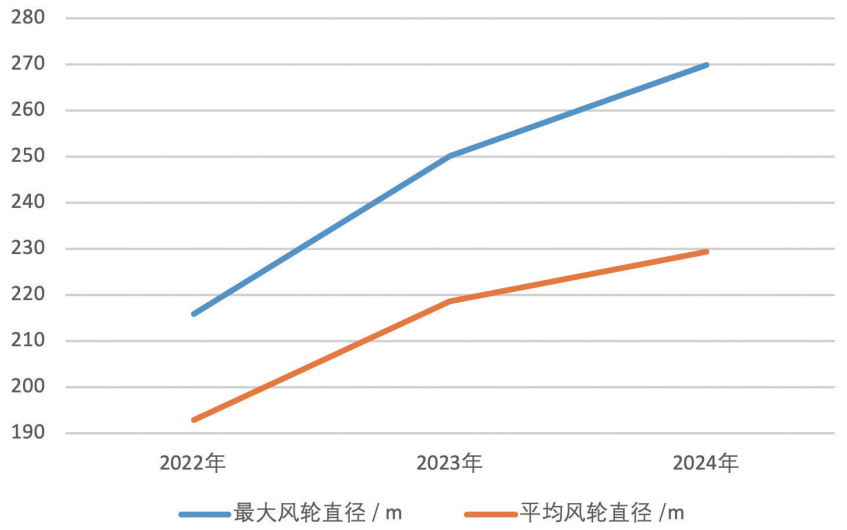



图3 2022—2024年中国宣布下线的陆上风电机型风轮直径发展趋势

1 月 24 日，运达股份 WD230-10 MW 风电机组在张北国家实验风电场成功完成样机吊装，并展开测试。该机型成为由鉴衡认证中心开展测试的陆上最大风轮直径机型。3 天后，中车株洲所 10 MWD230 陆上风电机组在张北试验风电场完成吊装。当天，联合动力海陆共平台 10 MW-236 风电机组在山东吊装，再次刷新全球陆上风电机组最大风轮直径纪录。3 月，华锐风电 10.X/230 陆上机组在张北试验基地完成吊装。该机型采用了 10 MW 级陆上大功率整机产品平台，单机容量可覆盖 8~11.5 MW，风轮直径可覆盖 230~250 m。

在 2024 年北京国际风能大会暨展览会（CWP 2024）前夕，三一重能宣布其陆上 15 MW 样机下线，2024 年 11 月成功实现满功率运行，刷新全球陆上风电机组运行纪录。此外，运达股份开展的 16 MW“沙戈荒”大功率风电机组相关研究项目，也纳入了内蒙古自治区低碳能源领域“揭榜挂帅”科技计划，成为新能源领域的创新重大示范工程。借助海陆共用策略，三一重能与运达股份的产品研发工作将中国陆上大型风电机组的主流容量，直接由 10~11 MW 拉升至 15~16 MW，实现跨越式提升。

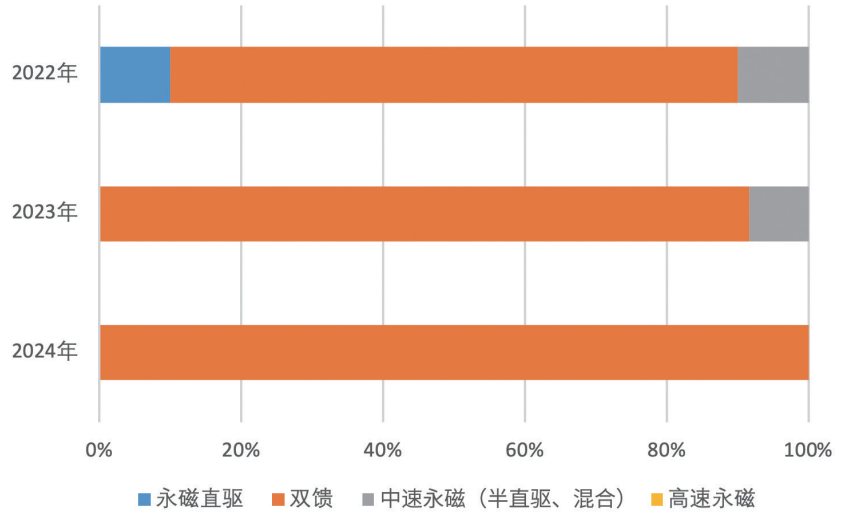



图4 2022—2024年中国宣布下线的陆上风电机型技术路线发展趋势

在叶片与风轮直径方面，2024年下线的最大陆上风电叶片达到了110~130 m级，有力支持了陆上风电机组大型化发展。

搭配适度的容量与较大直径的风轮，使2024年的中高风速机型的捕风能力获得了进一步提升。例如，运达股份下线的8.X MW+230 m机型，联合动力下线的10 MW+236 m机型等。三一重能下线可搭载270 m风轮直径的15 MW机型，则创造了最大叶片陆上机型纪录。

此外，在2024年，一些整机企业不再追求陆上机型的大风轮，开始针对陆上中高风速市场，推出单机容量和风轮直径适中的产品，在确保高风速发电能力的同时，提升机组可靠性。

与2024年下线的海上机型全部采用中速永磁（半直驱、混合）技术路线不同的是，这一年下线的陆上机型全部采用了双馈技术路线，甚至三一重能的15 MW机型也不例外。在2022年还有宣布下线的永磁直驱技术路线陆上产品，以及2023年还有下线的中速永磁（半直驱、混合）技术路线陆上产品，到2024年已无新进展。

# 2024年欧洲新增风电装机16.4 GW

编译 | 夏云峰

近日，欧洲风能协会（Wind Europe）发布的《欧洲风能：2024年统计与2025—2030年展望》（*Wind energy in Europe*：*2024 Statistics and the outlook for 2025-2030*）报告显示，2024年欧洲风电新增装机容量为16.4 GW，累计装机容量达到285 GW。

## 2024年发展情况

### 一、装机情况

2024年，欧洲新增风电装机16.4 GW，包括陆上风电的13.8 GW和海上风电的2.6 GW。

共有7个国家的风电新增装机容量超过1 GW，与2023年持平。其中，德国最多，为4.0 GW，占欧洲的25%，高于2023年的3.8 GW。其他国家包括：英国（1.9 GW）、法国（1.7 GW）、芬兰（1.4 GW）、土耳其（1.3 GW）、西班牙（1.2 GW）、瑞典（1.0 GW）。紧随其后的是波兰（805 MW）、意大利（685 MW）、立陶宛（522 MW）、爱尔兰（333 MW）、爱沙尼亚（330 MW）、荷兰（161 MW）、奥地利（160 MW）。

是年，欧洲陆上风电新增装机容量低于预期，仅为13.8 GW。这主要是由于各种原因影响项目开发，包括德国一条主要高速公路部分关闭，以及西班牙加利西亚地区的几个风电项目开发陷入停滞。德国是唯一一个陆上风电新增装机容量超过3 GW的欧洲国家，达到3.3 GW。超过1 GW的国家包括：芬兰（1.4 GW）、土耳其（1.3 GW）、西班牙（1.2 GW）、法国（1.1 GW）、瑞典（1.0 GW），超过500 MW的国家包括：波兰（805 MW）、英国（739 MW）、意大利（685 MW）、立陶宛（522 MW）。紧随其后的是爱尔兰（333 MW）、爱沙尼亚（330 MW）、荷兰（161 MW）、奥地利（160 MW）。

全年，欧洲海上风电新增装机容量为2.6 GW，占欧洲风电全部新增装机容量的16%，低于2023年的3.7 GW。其中，英国为1178 MW，德国为730 MW，法国为658 MW。

2024年，欧盟二十七国的风电新增装机容量为12.9 GW，占欧洲全部风电新增装机容量的79%。这低于2023年的装机规模——16.1 GW。为实现到2030年使欧盟可再生能源占比达到42.5%的目标，2025—2030年的风电年均新增装机容量需要达到36 GW。

2024年，非欧盟国家新增风电装机3.5 GW，高于2023年的2.3 GW。其中，英国最多，为1.9 GW；其次是土耳其（1.3 GW）、塞尔维亚（111 MW）、波斯尼亚和黑塞哥维那（109 MW）和乌克兰（45 MW）。

全年，欧洲共有1.33 GW风电装机容量退役，包括德国的712 MW、西班牙的435 MW、意大利的76 MW、荷兰的57 MW、奥地利的20 MW、

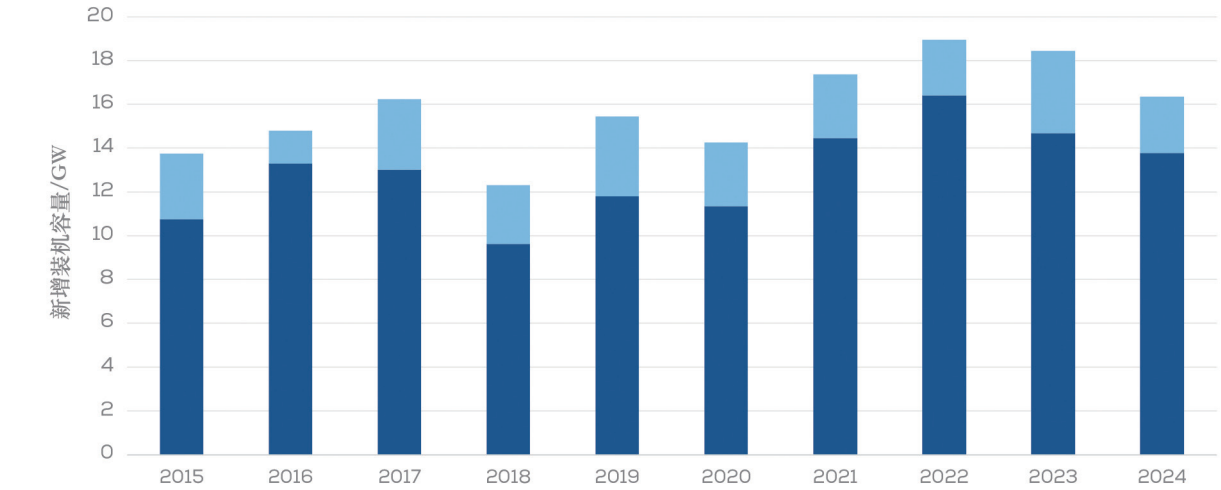



图1 2015—2024年欧洲风电新增装机容量走势

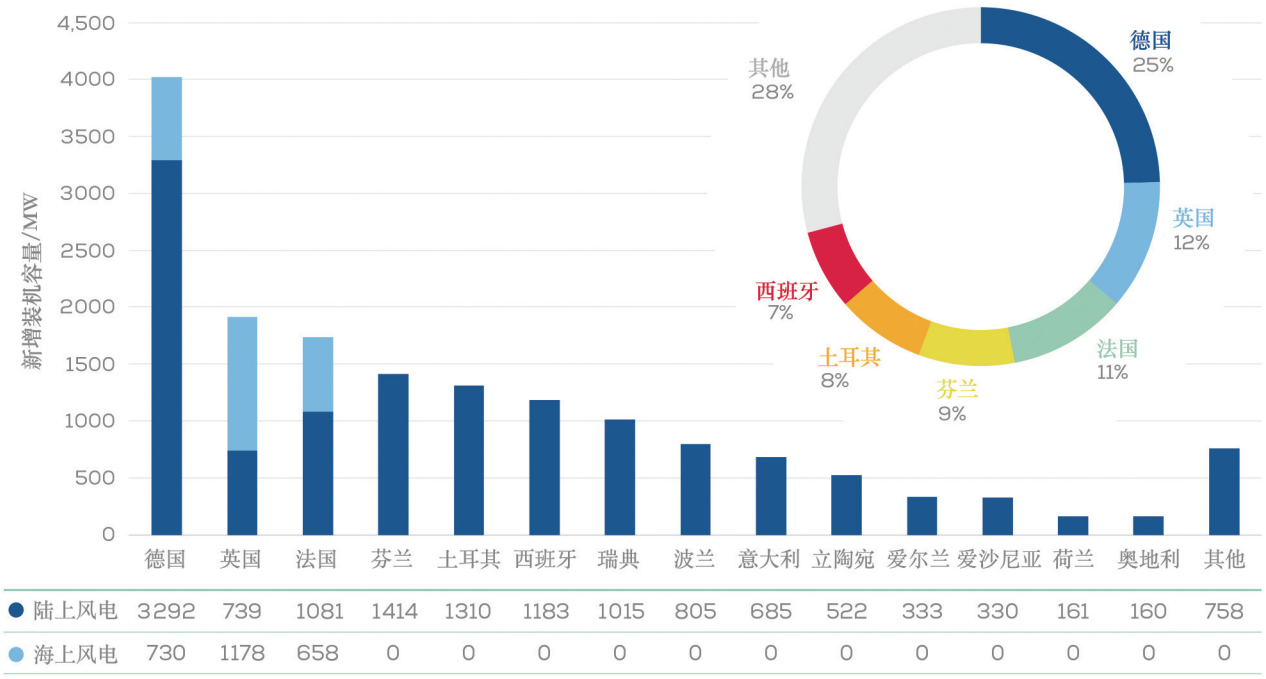



图2 2024年欧洲各国风电新增装机容量

瑞典的 18 MW、法国的 13 MW 和英国的 1 MW。因此，欧洲风电年度净新增装机容量为 15 GW。

截至 2024 年年底，欧洲风电累计装机容量达到 285 GW。其中，陆上风电为 248 GW，占 87%；海上风

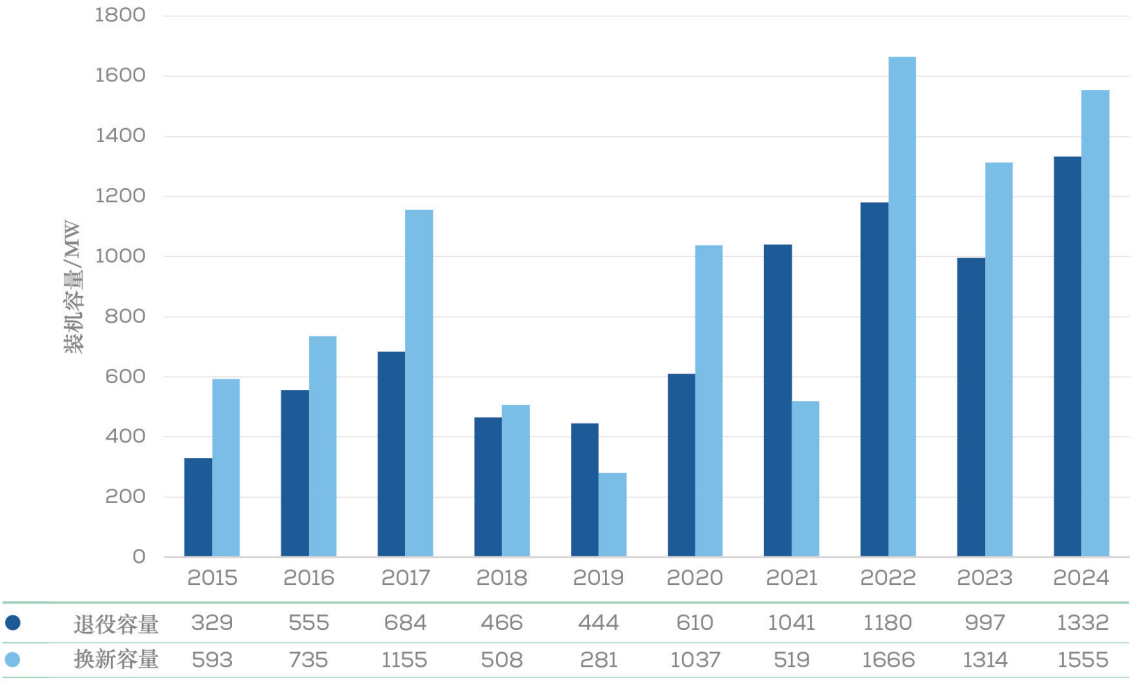



图3 2015—2024年欧洲退役和换新的风电装机容量

电为 37 GW，占 13%。

欧盟二十七国的风电累计装机容量为 231 GW，包括陆上风电的 210 GW，以及海上风电的 21 GW。

在各国中，德国风电累计装机容量最大，为 72.7 GW。英国为 31.6 GW，超过西班牙跃居第二。加上西班牙（31.2 GW）、法国（24.4 GW）、瑞典（17.2 GW）、土耳其（13.8 GW），排名前六的国家合计占欧洲风电累计装机容量的 2/3。意大利、荷兰和波兰均突破 10 GW，分别达到 12.9 GW、11.7 GW 和 10.2 GW。超过 5 GW 的国家包括芬兰（8.4 GW）、丹麦（7.6 GW）、葡萄牙（6 GW）、比利时（5.6 GW）、希腊（5.4 GW）和挪威（5.2 GW）。另有 3 个国家超过了 3 GW，分别是爱尔兰（4.9 GW）、奥地利（4 GW）和罗马尼亚（3.2 GW）。

## 二、技术趋势

2024 年，欧洲新安装陆上风电机组的平均单机容量为 4.6 MW，高于 2023 年的 4.5 MW，较 2015 年的 2.5 MW 增长 84%。在各国中，立陶宛和罗马尼亚新安装陆上风电机组的平均单机容量最大，达到 6.3 MW，其次是瑞典（6.2 MW）、爱沙尼亚和芬兰（均为 6.0 MW）。

2024 年，欧洲新安装海上风电机组的平均单机容量为 10.1 MW，高于 2023 年的 9.7 MW，是 2015 年（4.2 MW）的 2.4 倍。英国新安装海上风电机组的平均单机容量最大，为 12.7 MW；法国最小，为 7.6 MW；德国为 10.0 MW。

## 三、发电量

2024 年，欧盟风电发电量为 475 TWh，满足了该地区 19% 的电力需求（陆上风电为 16.6%，海上风电为 2.5%）。

有 20 个国家的风电发电量占比超过 10%，其中的 17 个为欧盟国家，此外还包括英国、土耳其和挪威。

在各国中，丹麦的风电发电量占比最高，为 56%；其次是爱尔兰，为 33%。瑞典的风电发电量占比从 2023 年的 26% 跃升至 2024 年的 31%，超过西班牙（25%）、荷兰（29%）、英国（30%）和德国（30%），位居欧洲第三。凭借强劲的开发建设活动及有利的风力条件，爱沙尼亚、芬兰和立陶宛的风电发电量均大幅增加。其中，立陶宛的风电发电量占比从 2023 年的 21% 增加

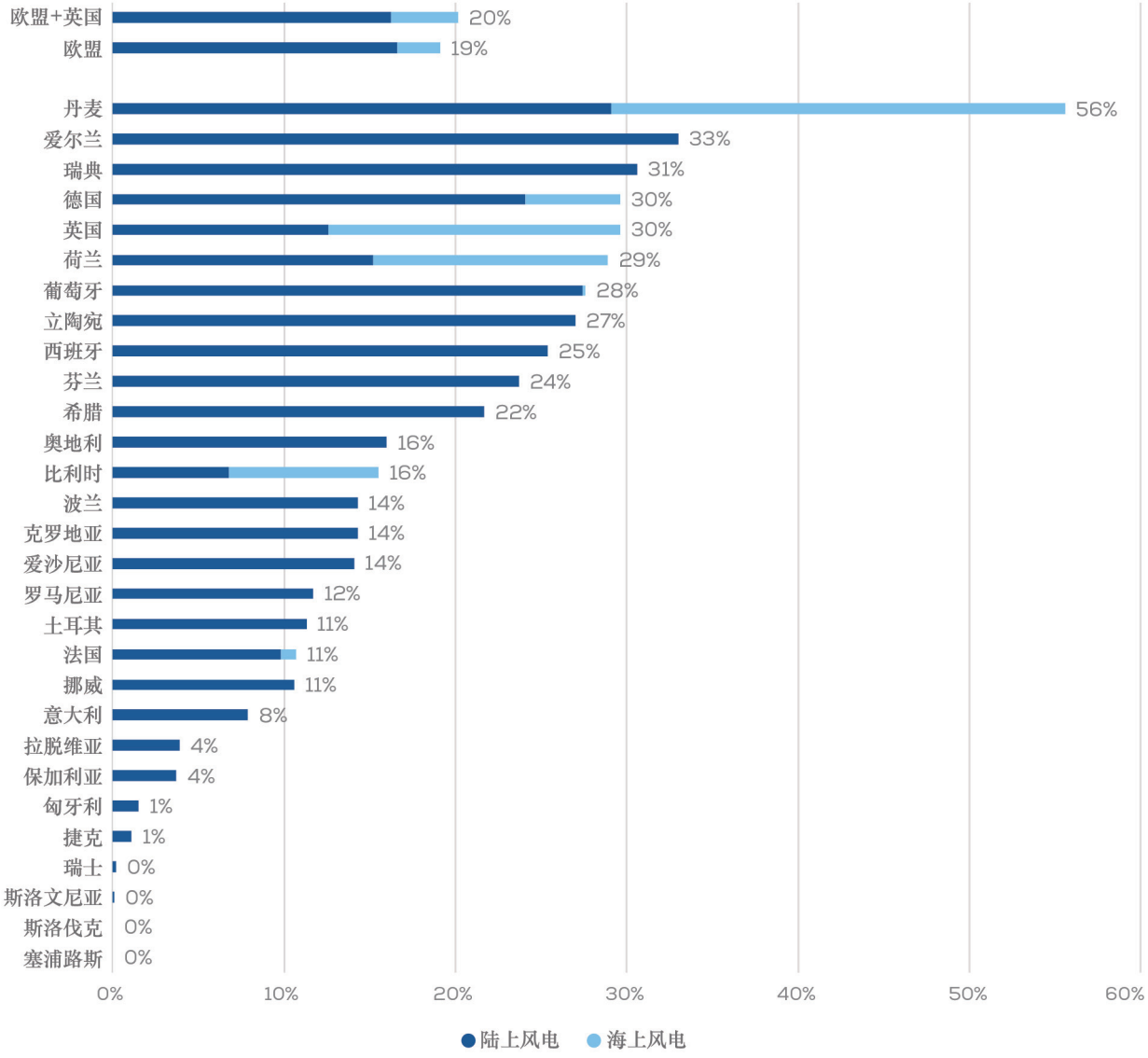



图4 2024年欧洲地区风电发电量所满足的电力需求比例

到 2024 年的 27%；芬兰从 18% 增至 24%；爱沙尼亚从 10% 增长到 14%。

英国是风电发电量占比最高的非欧盟国家，达到 30%，在欧洲排名第五。紧随其后的是荷兰（29%）、葡萄牙（28%）和立陶宛（27%）。

**四、招投标**

2024 年，在欧洲 12 个国家组织的风电项目招标中，共有 36.8 GW 的装机容量中标。其中，陆上风电为 17 GW，海上风电为 19.9 GW。这比 2023 年中标的装机容量（27.3 GW）高出 35%，创下历史新高。德国中标的装机容量最多，为 19 GW；其次是英国（6.3 GW）和荷兰（4.1 GW）。

全年，欧洲各国计划的陆上风电招标容量超过了 20.6 GW，最终的中标容量占 83%。此外，有 7 个国家计划招标至少 23.3 GW 的海上风电装机容量，最终的中标容量占 85%。

**五、投融资**

2024 年，欧洲风电项目获得的投资额为 330 亿欧元（约合人民币 2587.37 亿元），将为 19.9 GW 的风

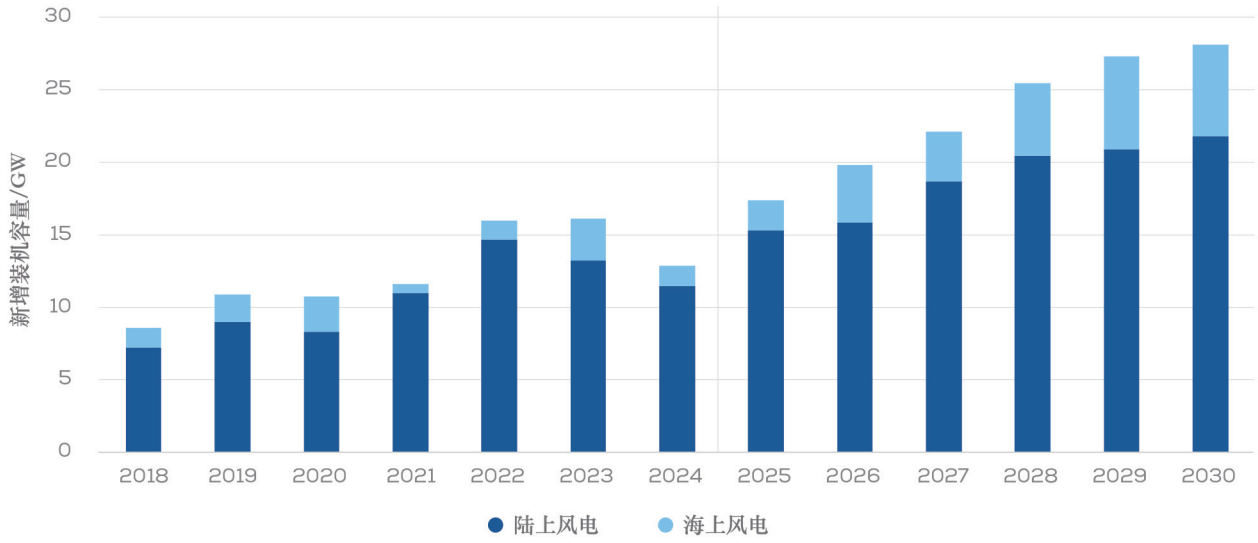



图5 2025—2030年欧洲风电新增装机容量预测

电项目提供资金。

全年，欧洲共有 17.3 GW 的陆上风电项目获得了融资，金额为 247 亿欧元。这是自 2016 年（19.5 GW）以来，欧洲陆上风电项目获得融资额最多的一年。其中，欧盟陆上风电项目的融资额约 190 亿欧元，将为 13.1 GW 项目提供资金。仅德国和西班牙就获得了近一半的资金。

此外，还有 4 个海上风电项目（约 2.6 GW）获得融资，金额为 79 亿欧元，较 2023 年下降了近 80%。这些项目全部来自欧盟国家，其中的 3 个位于德国，另一个位于荷兰。

## 2025—2030年展望

综合考虑欧盟法规、国家政策、已签署的购电协议（PPA）、项目开发时间表，以及风电拍卖和招标计划等方面的最新发展，预计 2025—2030 年欧洲风电新增装机容量为 187 GW，年均新增 31 GW。其中，欧盟将新增风电装机 140 GW，年均新增 23 GW。到 2030 年，欧洲风电累计装机容量将达到 450 GW。

2025—2030 年，欧洲陆上风电有望新增装机 140 GW，将占欧洲全部风电新增装机容量的近 75%，占欧盟的 81%。到 2030 年，欧洲陆上风电累计装机容量将达到 366 GW。

同期，欧盟将新增陆上风电装机 113 GW，占欧洲全部陆上风电新增装机容量的 81%。到 2030 年，欧盟陆上风电累计装机容量预计达到 304 GW。

欧洲为发展海上风电制定了雄心勃勃的计划，这是由于其先天条件优越——水深较浅、风能资源丰富，尤其是在北海和波罗的海。欧洲是全球海上风电开发的领导者之一，拥有强大的供应链和长期的良好发展表现。

欧洲各国政府已经认识到大力发展海上风电的益处，并在 2021 年年初将欧洲海上风电发展目标设定为到 2030 年达到 114 GW，后于 2022 年 9 月将这一目标提高到 158 GW。

自此之后，许多国家下调了 2030 年发展目标，因为他们意识到，建立海上风电政治框架、升级电网以及发展本地供应链需要时间，这使得完成上述目标成为一项重大挑战。

尽管欧洲不太可能如希望的那样快速开发海上风电，以实现 2030 年目标，但市场仍处于发展中。到 2030 年，预计欧洲海上风电累计装机容量会达到 84 GW。

届时，欧洲年度风电换新容量将从 2025 年的 1.4 GW 增加到 5.6 GW，2025—2030 年的换新容量达到 20.7 GW。

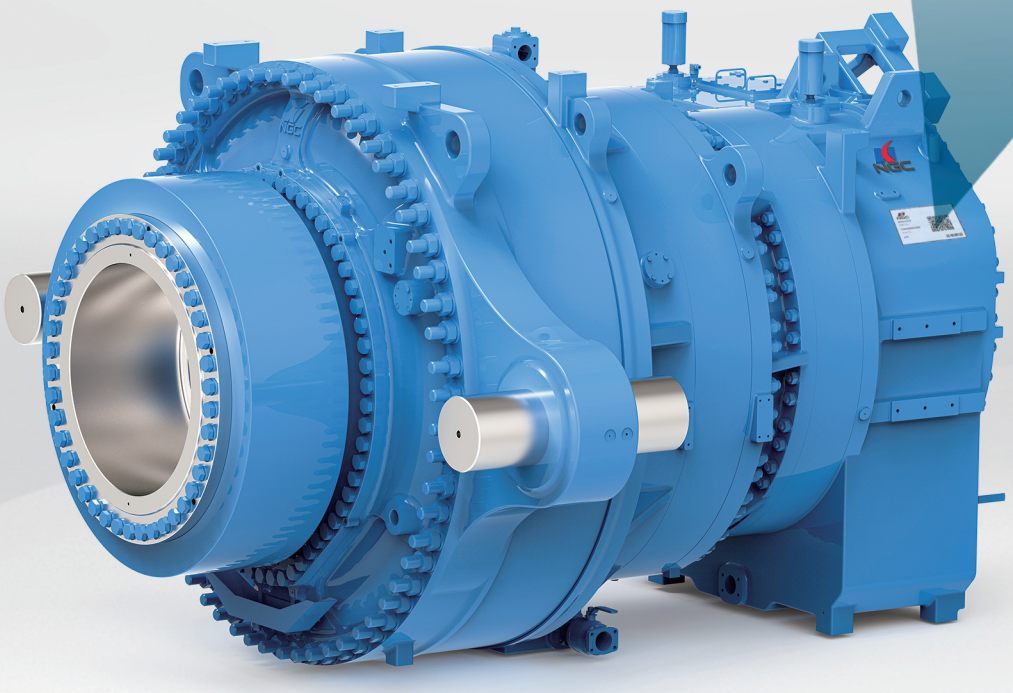
在此期间，欧洲将有超过 22 GW 的老旧风电场退役。

NGC | 南高齿

为人类文明传递进步动力

# 扫码服务

**服务内容：故障报修、技术支持、齿轮箱培训**



## 2025南高齿齿轮箱运维技术培训

**咨询方式:请扫如上“南齿服务二维码”或liu.zhaohui@NGCtransmission.com**

广告

王征（Jane），英国特许公认会计师协会资深会员（FCCA）、英国皇家特许管理会计师（CIMA）、全球特许管理会计师（CGMA）、会计与金融学硕士（MSc）。常驻英国二十余年，熟识中西文化差异及欧洲工作文化。曾担任英国会计师事务所及不同商业领域的企业财务主管和职业经理人等高管职位。工作经历涵盖财务金融咨询服务；协助中资企业在英上市；欧洲、非洲市场开拓；大型基建项目的国际投标、投资并购、投后管理及资产优化等。

近六年来任职于国内一家知名能源类央企海外分支机构，负责英国的可再生能源平台。主要专注于海外可再生能源的市场开拓和绿地项目开发，尤其是英国风电的投资并购及项目管理。

# 专家解读欧盟《外国补贴条例》(FSR)审查

文 | 王征，胡正伟，相鹏翔

在国际经济形势日渐复杂多变的大环境下，全球贸易格局在全球化自由贸易和区域贸易保护主义间不断拉扯演变。关税和政策监管已成为区域和国家间贸易投资竞争的重要工具，利用政策工具强制执法对跨国企业在异地的贸易、投资和经营带来了空前的挑战和机遇。

以《欧盟第2022/2560关于扭曲内部市场的外国补贴条例》（下称《外国补贴条例》，*Foreign Subsidies Regulation*，*FSR*）为例，自欧盟于2023年7月12日起实施该条例以来，其建立的审查机制（FSR审查）已显示出明显的目标指向，涵盖钢铁、铝业、化工、陶瓷、通讯设备、半导体、轨道、可再生能源和电动汽车等领域。2023年10月12日，该条例规定的申报义务正式生效。2023年10月24日，欧盟委员会发布的“欧洲风电行动计划”提及，为确保风电行业能够在公平的竞争环境中发展，将关注外国风电制造企业的不公平贸易行为，并将继续利用贸易协定来促进外国市场的准入，同时推动采用欧盟和国际标准。2024年4月9日，欧盟委员会宣布欧盟正在依据该条例对西班牙、希腊、法国、罗马尼亚和保加利亚5个国家的中国风电机组供应商开展FSR审查。部分中国风电企业陆续收到欧盟委员会的调查问卷，被迫应对。目前，欧盟对中国风电企业的FSR审查仍在进行中。

受该条例影响，中国风电企业在大幅增加管理成本的基础上，仍需面对极高的不确定性，直接影响到企业在欧洲的业务规划和发展。对于拟投资欧洲和拟将供应链扩展到欧洲的中国企业而言，如何应对欧盟FSR审查更成为必须面对并解决的挑战之一。在欧盟宣布对中国风电机组制造企业开展FSR审查一年之际，为帮助中国风电企业尽早着手、主动应对、有效规避，笔者邀请到普华永道（PwC）专门协助企业应对欧盟FSR审查的专家们来帮助解读该政策，并抛砖引玉，提供一些应对思路。

## 《外国补贴条例》的背景及内容简介

该条例是欧盟针对外国政府补贴对欧盟市场公平竞争潜在影响的新型监管工具。其核心逻辑是：若企业在欧盟市场活动（如并购、公共采购、商业运营）中受益于外国补贴并造成“扭曲效应”，欧盟有权调查并采取补救措施（如罚款、禁止交易、退回补贴等）。依此规定，如果参与欧盟交易的经营者在签署协议、公开竞标或收购目标公司控制权之前的过去3年内，从非欧盟国家的国有实体处获得财务资助满足一定的金额门槛，则必须进行申报。如果欧盟委员会在审查中判定相关财务资助可能引发欧盟内部的竞争扭曲，就有权力阻止该公司继续并购交易或参与公共采购。其目的是确认从事上述交易的外国企业没有从外国政府取得会扭曲欧盟市场的国家财务资助。

这里所提的“财务资助”的定义非常宽泛。遵循世界贸易组织（WTO）框架下《补贴与反补贴措施协议》中的定义，财务资助包括政府资金或债务转移，如注资、赠款、贷款、债务担保、财政激励、抵消经营亏损、补偿公共部门施加的财政负担、债务豁免、债转股或债务的重新安排；对本应征收的收入进行豁免，包括免税或在没有适当报酬的情况下授予特殊或专有权利；外国政府向企业提供商品、服务或向企业购买商品和服务等。此外，条例明确规定如下几类同样属于极易对欧盟内部市场产生扭曲的外国财务资助：

（1）向濒临倒闭的企业提供补贴；

（2）对债务或负债的无限制担保；

（3）不符合经合组织安排的出口

融资措施；

（4）直接促进经营者集中交易的补贴；

（5）为提交具有不正当优势的投标而提供的补贴。

特别强调一点，该补贴必须针对特定的产业或企业，如适用于所有行业，则一般不会引起欧盟委员会的关注。此外，基于已有的审查案例，欧盟委员会对投标企业的审查会穿透至集团合并层面，计算其旗下所有关联企业受到的财务资助总和。

欧盟《外国补贴条例》审查主要有 3 种机制，包括经营者集中行为的事前审查机制、公共采购审查机制、依职权调查机制。

1. 经营者集中行为的事前审查（并购交易审查）

如果经营者集中的目标公司或参与集中的一方 / 合营企业位于欧盟境内，在欧盟的营业额达到 5 亿欧元（约合人民币 40.1 亿元），并且在过去 3 年内获得财务资助合计超过 5000 万欧元，那么在进行交易前有义务向欧盟进行申报。

调查结束后，欧盟委员会给出无条件批准、有条件批准或禁止交易的结果。

2. 公共采购审查

如果参与公共采购项目的金额达到 2.5 亿欧元，并且参与投标的经营者、主要供应商、主要分包商在 3 年期间累计获得不少于 400 万欧元的财务资助，那么参与投标的经营主体必须向作为采购方的公共机构告知经营者、主要供应商或分包商在过去 3 年获得的外国政府补贴情况。

调查结束后，欧盟委员会给出不反对、附条件批准、禁止授予参与竞标合同或要求更改条件的结果。

3. 依职权调查

除上述触发强制申报义务的情况，欧盟委员会还会从各种渠道（包括成员国、自然人、法人或协会等）搜集并分析各类在欧盟有经济活动的企业的相关信息，据此认定这些经济活动是否存在外国补贴，以及这些补贴是否会扭曲欧盟内部市场。这一审查范围囊括除前两类强制申报场景之外的其他经济活动，通常分为两个阶段进行。如果欧盟委员会经过初步审查认为有充分的证据表明经营者获得的外国补贴会扭曲欧盟内部市场，则进入深度调查阶段。在实质性分析中，欧盟委员会会综合考察外国补贴对市场的不利影响，并在两种影响之间进行权衡。

调查结束后，欧盟委员会给出无反对意见、返还政府补贴、实施救济性措施或承诺等结果。

若企业违反了该条例的要求，未能依法申报，或在未获批准的情况下实施并购交易或推进公共采购项目，企业将会面临最高金额为前一年全球总营业额 10% 的罚款；对于提供不正确或误导性信息、拒绝配合调查或不回复欧盟委员会问题等的相关企业，将面临最高金额为前一年全球总营业额 1% 的罚款。此外，欧盟委员会还有权做出禁止或附加限制性条件（如剥离资产、降低产能、退还补贴等）的决定。

## 企业应对难点及思路建议

中国加入 WTO 已经超过 20 年，中国政府、企业、第三方服务机构等相关各方对于 WTO 框架下反补贴调查的流程都相当熟悉，有一套比较成熟的应对方法。然而，有别于 WTO 框架下的反补贴调查，新实施的 FSR 审查基于欧盟自创的《外国补贴条例》政策体系，与全球范围内被普遍接受的国际多边协定在法律体系、执法机构、调查标的、范围、方式和内容等方面有着显著差异。FSR 审查由欧盟委员会竞争总司专门负责，审查外延远大于跨境商品贸易，亦可采取“黎明突袭”等比较极端的审查方式，调查内容不仅包含历史数据，还涵盖项目的预计成本规模和构成等信息，若被禁止交易或禁止准入对企业“走出去”战略的冲击远大于反补贴调查。

鉴于以上原因，很多企业对《外国补贴条例》的复杂性尚未形成充分认知并做好相应准备。众多已经遇到 FSR 审查或预判可能会遇到 FSR 审查的中国企业表示，很难提前预判欧盟的调查流程和重点调查方向，因此对 FSR 审查普遍表示非常担心。从过去 1 年多的实际案例中，普华永道的专家们总结出如下几条中国企业在应对 FSR 审查时面对的难点。

1. 缺乏适用指引

欧盟《外国补贴条例》是一套相对较新的政策，且在不断地自我更新完善中。根据欧盟的时间表，详细的适用指引预计要到 2026 年年初才会公布。目前，欧盟发起调查的依据、采用的调查流程、对扭曲的认定等方面尚未形成统一标准。企业一方面对法规不熟悉，另一方面也较难从法规的文本中解读出大量有指导意义的信息。

2. 审查对象孤立

传统的反倾销、反补贴调查的对象是整个行业，容易受到相关行业协会的重点关注，被调查企业也可以在行业协会的统一协调下抱团取暖。而 FSR 审查的对象不是特定行业内的所有企业，而是针对在欧盟国家有经济活动的单个企业。因此，被调查企业很难从行业协会等组织取得系统性支持，更多情况下需要独立应对调查。

3. 法律地位不平等

欧盟在法案中给予其执法部门极大的自由裁量权，而该法案又并非基于任何多边协定的框架制定，被调查企业几乎不可能取得法律上的平等地位。例如，在一个欧盟委员会基于《外国补贴条例》对中国企业在欧洲的主体发起“黎明突袭”案例中，中国企业向欧盟法院提起了上诉，但最终仍然被欧盟法院裁定驳回。

4. 申报数据复杂

FSR 审查过程中企业要整理申报的数据范围很广泛，企业需在短时间内完整收集各个主体的大量数据，并且要根据法案设定的金额门槛进行筛选、汇总。据观察，大部分企业很难在欧盟要求的时限内整理出准确、完整的申报数据。

5. 很难进行全面统筹规划

FSR 审查采取层层递进的方式来对企业进行提问，很难预估后续问题的提问角度和方式。企业面对的第一轮询问可能看起来比较简单，似乎不需要提供非常详细的信息即可以完成。部分企业容易被第一轮询问中看似简单的问题所“蒙蔽”，以为只需要简单进行应对便可以顺利通过 FSR 审查。在收到后续轮次问题后，企业才意识到 FSR 审查不是一个简单的工作，而是一项需要自上而下进行通盘考虑的系统工程，但已经递交了第一轮预沟通回复的企业此时回旋的余地可能已经不大。

考虑到《外国补贴条例》涵盖的宽泛外延和上述应对工作的难点，建议企业首先要对 FSR 审查的复杂性有充分认识，再主动出击建立一套有效的应对思路，同时内部协同各个相关职能部门密切配合。根据普华永道专家们的观察，应对 FSR 审查比较成功的企业在战略和战术层面都有一定的经验可以借鉴。

在战略层面上，首先，考虑成立由管理层亲自领导的专班，由各个相关职能部门负责人共同参与，多部门协同构建一个应对 FSR 的系统性策略，涵盖预防阶段、应对阶段、长期策略，变被动应对为主动规划。其次，在必要时引入有经验的外部专家，借助其对前沿市场的政策解读和实战经验制定明确合理的阶段性应对策略和具体行动项。此外，在选择欧洲的目标国别市场时，也可以考虑是否有可能避开欧盟《外国补贴条例》管辖的国家，如脱欧后的英国。

在战术层面上，企业可采取的具体行动项包括但不限于：

1. 预防阶段：筛查与合规重构

建立补贴数据库，根据 FSR 定义的外国补贴梳理集团层面及关联方过去 3 年内的历史信息，如税收优惠、低息贷款、政府补贴等，并持续年度滚动更新，以避免调查开始后再仓促应对。

设计交易构架，选择并购资金来源，降低与补贴相关的直接关联性，或在投标前剥离可能被认定为补贴的资金来源（如地方政府专项补助）。

预判参与并购和公共采购时面临申报义务的风险，提前进行规划，完善相关合同条款。

提升企业内部各相关部门（财务、税务、法务、业务等团队）对 FSR 审查的认知，组织针对性培训，协助相关人员全面理解相关要求，以及调查的应对方法。

2. 应对阶段：主动申报与抗辩

在触发申报义务或面临 FSR 审查时，企业应当尽快制定并落实应对策略，必要时尽早寻求有经验的外部专家的协助，进行初步的扭曲性分析。

审慎起草回复文件，并从企业没有取得会对欧盟市场产生扭曲的补贴，或者即使有此类补贴，这些补贴也会对欧盟市场产生正面影响等角度进行抗辩，如：

（1）证明补贴未导致扭曲（如研发补贴用于提升技术而非低价竞争）；

（2）利用“平衡测试”强调补贴符合欧盟公共利益（如支持碳中和目标）。

如有条件，聘请独立第三方协助，根据 FSR 问卷（如需披露补贴类型、金额、用途等）预判风险点。

关注补救措施谈判：若无法避免处罚，可协商部分剥离非核心资产或承诺限制补贴使用范围。

在长期策略方面，可围绕去敏感化与规则博弈，如分散出口市场，保持市场化运营与财务透明，深度参与欧盟产业合作，推动规则对话或互认机制等。

综上所述，FSR 标志着欧盟从传统贸易资助转向对外国资本的全方位监管。虽然该条例如同其他投资安全法案一样，面向所有非欧盟国家和地区，但鉴于中国在全球产业链上的关键位置，不得不说中国企业将面临更为严峻的挑战。尤其是该政策赋予欧盟委员会更大的自由裁量权，令其有权在没有发生触发申报义务的交易中依职权来开展调查。对于在欧洲有经济活动或拟进军欧洲的中国企业，特别是在风电、核电、储能等部分敏感度较高行业的投资人和产业链企业而言，更应密切关注相关的政策发展。

与此同时，如果企业可以做到主动规划，以“合规重构”为核心，从交易设计、资金溯源到抗辩策略全方位构建预警与行业协作机制，并提前筛查风险、灵活调整商业模式、深度融入欧盟产业链，也不失为一个机会将不可避免的合规成本转化为行业“出海”欧洲的竞争优势。（感谢普华永道合伙人及团队的专业洞见及无私分享。）

Industry
Technology

## 产业 | 60

基于财务数据进行风电项目降本增效的方法探索

## 技术 | 66

分段式复合材料风电叶片连接强度构型设计和有限元分析

风电叶片气热除冰系统承载机架有限元分析与优化设计

基于全过程视频监控技术的风电叶片陆上运输风险管控方案

风电机组高速轴刹车测温系统研究及应用

风电机组高强度螺栓连接牙型啮合特性规律研究

# 基于财务数据进行风电项目降本增效的方法探索

文 | 刘颖，高文强，张娇梅

在全球能源结构深刻转型的大背景下，风电作为可再生能源的重要组成部分，其项目的经济性和效率性已成为行业内外普遍关注的热点。然而，随着风电项目规模的持续扩大和市场竞争的不断加剧，如何确保风电项目的盈利能力，成为企业实现可持续发展的重大课题。尤其是在风电项目全生命周期中，成本控制和效率提升成为企业实现可持续发展的关键。财务数据作为企业运营状况的直接反映，能够为风电项目的成本分析和效益优化提供重要依据。通过对风电项目财务数据的深度挖掘与细致分析，探寻风电项目降本增效的有效途径具有重要意义。

本文以财务数据为核心，结合风电项目全生命周期的成本构成和效益驱动因素，构建了一套基于财务数据的降本增效分析框架。具体而言，先将某一区域（省份、地区）风电项目按照并网运行时长与装机总容量进行分类，确保同类项目之间具备可比性。随后，通过计算各项财务指标（如度电成本和度电利润）的平均值，将风电公司划分为四个象限，分析导致度电成本高且度电利润低的主要原因。同时，结合售电单价和年满发小时数等关键指标，进一步划分象限，研究各风电公司在这两个维度上的表现差异。通过对比同类型项目的分布情况，识别出成本与效益的差距，并深入分析具体原因。

## 基于财务数据进行风电项目降本增效的分析方法

鉴于各公司财务数据细分标准的多样性，为确保后续横向与纵向对比的准确性和可操作性，本文特选定以下指标进行深入分析，如表 1 所示。

本文采用的分析方法基于各风电项目过去五年（不含本年度）的历史年度数据，通过多维度对比分析，揭示风电项目成本与效益的关键影响因素。具体分析流程（图 1）如下：

表1 分析指标统计

| | | | |
|---|---|---|---|
| 基础信息 | 风电项目名称 | | - |
| | 项目装机总容量 | | - |
| | 并网运行时长 | | - |
| | 项目总投资额 | | - |
| | 是否出质保 | | - |
| | 是否自行运维 | | - |
| 生产数据 | 平均风速 | | - |
| | 发电量 | | 机组发电机侧电量总和 |
| | 上网电量 | | 结算单显示上网电量 |
| | 场用电及线损率 | | 上网电量与发电量差异占发电量的比值 |
| 财务数据 | 营业收入 | 优先电收入 | 在享有优先发电权方面所取得的收入 |
| | | 市场电收入 | 电力市场中自由竞价交易所取得的收入 |
| | | 两个细则考核奖罚 | 负数表示受的罚款，正数表示获得奖励 |
| | | 辅助服务费 | 以负数表示 |
| | | 其他 | - |
| | 营业成本 | 水费 | - |
| | | 材料费 | - |
| | | 人工成本 | - |
| | | 折旧费 | - |
| | | 修理费 | - |
| | | 购电费 | - |
| | | 生产运行及委托运营费 | - |
| | | 研发费 | - |
| | | 物业费 | - |
| | | 财产保险费 | - |
| | | 低值易耗品摊销 | - |
| | | 其他 | - |
| | 利润总额 | 利润总额 | 营业收入与营业成本的差值 |

项目分类：首先依据风电项目的装机总容量及并网运行时长进行分类。要求同类项目的装机总容量相近（差距小于 10 MW），并网运行时长在同一时间段内（如 1~5 年、5~10 年、10~15 年等）。

度电利润与成本分析：基于财务数据与生产数据，计算各风电项目的平均度电成本和平均度电利润，绘制项目分布图，识别出典型项目。

售电单价与年满发小时数分析：计算各风电项目的售电单价和年满发小时数，绘制项目分布图，分析典型项目在这两个维度上的表现差异，发现潜在问题。

综合指标对比分析：在以上三个步骤的基础上，深入分析典型项目的各类财务指标与生产指标，不仅进行同类型风电项目间的横向对比，还开展项目自身的纵向历史对比，深入挖掘导致差异的根本原因。

降本增效策略建议：基于上述分析结果，结合典型项目的实际问题，为风电项目的降本增效提出针对性的优化建议。

在分析各类财务指标时，本文主要采用以下两种方法：趋势分析法和比较分析法。对于项目自身的纵向历史对比，主要运用趋势分析法。该方法通过对连续多期财务报表中的相同指标或比率进行对比，分析其增减变动的方向、数额和幅度，从而揭示企业财务状况和经营成果的变动趋势。对于同类型风电项目间的横向对比，则采用比较分析法。该方法侧重于将同一时期的财务报表数据与同类企业或行业平均水平进行对比，揭示企业在财务状况和经营成果上的差异。

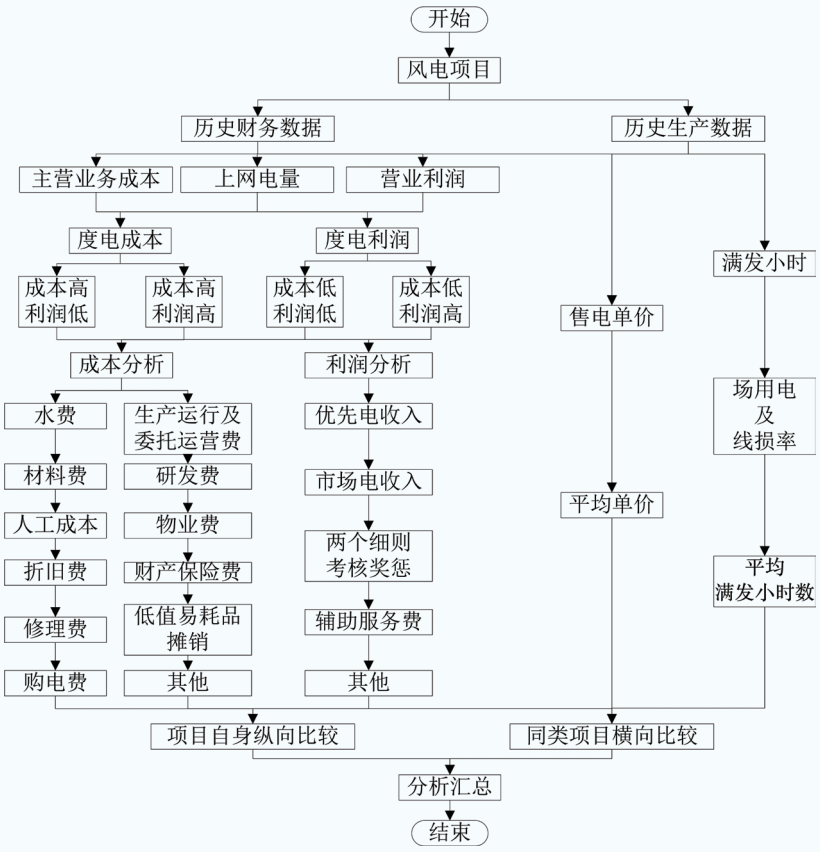



图1 分析流程

值得注意的是，本分析方法的应用场景主要聚焦于某一特定区域（如省份或地区）内的多个海上或陆上风电项目。一方面，当仅针对极少数风电项目实施该分析方法时，尽管能够初步揭示这些项目在度电成本、利润、售电单价以及年满发小时数等方面的分布情况，但由于样本数量有限，可能难以搜集到足够多的同类型风电项目来进行有效的对比分析。另一方面，由于海上风电项目和陆上风电项目在前期投资、中期建设以及后期运行维护等多个环节均存在显著差异，将影响分析结果的合理性和准确性。

## 实例分析

为验证上述方法的分析效果，本文选取了华北某省 27 个陆上风电项目 2020 年至 2024 年的历史数据进行实例分析。这些风电项目涵盖不同的装机容量、并网时长和运行环境，具有较强的代表性。各风电项目的基本信息详见表 2。

对以上风电项目依据装机总容量及并网运行时长进行分类，分类结果如下：

第一类项目（项目容量在 55 至 65 MW 之间，并网运

表2 分析风电项目基础信息统计

| 序号 | 项目名称 | 项目装机总容量 /MW | 并网时间 | 总投资额 / 万元 | 是否出质保 | 是否自运维 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | RC 一期 | 46.5 | 2007-07 | 45951.13 | 是 | 是 |
| 2 | RC 二期 | 49.5 | 2010-09 | 42134.63 | 是 | 是 |
| 3 | RC 三期 | 49.5 | 2010-12 | 41008.55 | 是 | 是 |
| 4 | RC 四期 | 49.5 | 2015-12 | 37170.84 | 是 | 是 |
| 5 | RC 五期 | 49.5 | 2015-12 | 35120.16 | 是 | 是 |
| 6 | QX 一期 | 50 | 2015-01 | 41129.3 | 是 | 是 |
| 7 | QX 二期 | 50 | 2015-01 | 35557.72 | 是 | 是 |
| 8 | LJ 一期 | 49.5 | 2010-09 | 53938.5 | 是 | 是 |
| 9 | GR 一期 | 49.5 | 2012-02 | 42670.95 | 是 | 是 |
| 10 | GR 二期 | 50 | 2013-04 | 36214.98 | 是 | 是 |
| 11 | HK 一期 | 49.5 | 2011-06 | 43699.32 | 是 | 是 |
| 12 | XH 一期 | 49.5 | 2015-09 | 46190.28 | 是 | 是 |
| 13 | XH 二期 | 49.5 | 2015-03 | 34745.59 | 是 | 是 |
| 14 | XH 三期 | 49.5 | 2015-03 | 34377.38 | 是 | 是 |
| 15 | ZH 一期 | 50 | 2009-08 | 60523.97 | 是 | 是 |

（转下页）

（接上页）

| 序号 | 项目名称 | 项目装机总容量 /MW | 并网时间 | 总投资额 / 万元 | 是否出质保 | 是否自运维 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 16 | ZH 二期 | 49.5 | 2010-10 | 46518.17 | 是 | 是 |
| 17 | HJ 一期 | 64 | 2017-12 | 43694.63 | 是 | 是 |
| 18 | HJ 二期 | 62 | 2018-10 | 37404.39 | 是 | 是 |
| 19 | JN 一期 | 49.5 | 2012-04 | 35983.13 | 是 | 是 |
| 20 | ZC 一期 | 48.5 | 2015-01 | 43093.98 | 是 | 是 |
| 21 | ZC 二期 | 49.5 | 2012-02 | 32585.88 | 是 | 是 |
| 22 | ZC 三期 | 55 | 2015-06 | 31524.27 | 是 | 是 |
| 23 | ZC 四期 | 49.5 | 2013-07 | 33339.04 | 是 | 是 |
| 24 | SQ 一期 | 50 | 2017-12 | 34324.37 | 是 | 是 |
| 25 | SQ 二期 | 50 | 2017-12 | 29631.43 | 是 | 是 |
| 26 | LQ 一期 | 52.7 | 2016-07 | 34046.09 | 是 | 是 |
| 27 | JS 一期 | 57 | 2016-05 | 40132.94 | 是 | 是 |

行时长在 6 至 10 年之间）：HJ 一期、HJ 二期以及 JS 一期；

第二类项目（项目容量在 46 至 55 MW 之间，并网运行时长在 6 至 10 年之间）：LQ 一期、QX 一期、QX 二期、RC 四期、RC 五期、SQ 一期、SQ 二期、XH 一期、XH 二期、XH 三期、ZC 一期以及 ZC 三期；

第三类项目（项目容量在 46 至 55 MW 之间，并网运行时长在 11 至 15 年之间）：GR 一期、GR 二期、HK 一期、JN 一期、LJ 一期、RC 一期、RC 二期、RC 三期、ZH 一期、ZH 二期、ZC 二期以及 ZC 四期。

首先，计算各风电项目的度电利润、度电成本、售电单价及年满发小时数，并求得相应平均值。基于这些计算结果，分别绘制度电利润与度电成本分布图（图 2）以及售电单价与年满发小时数分布图（图 3）。

根据图 2：本次分析的 27 个风电项目，其度电成本区间在 0.15~0.45 元 /kWh 之间，平均值为 0.19 元 /kWh；度电利润则在 0.05~0.35 元 /kWh 之间，平均值为 0.26 元 /kWh。这些项目在图表上呈现出从左上方至右下方的分布。对比第一类项目与第二类项目可知，在相同的并网运行时长下，容量较大的项目度电成本相对较低，体现出规模效应带来的成本优势。对比第二类项目与第三类项目可知，在相同项目容量的情况下，并网时间较长的项目度电成本则相对较高，凸显出长期运营对成本结构的负面影响。

根据图 3：本次分析的 27 个风电项目，其年满发小时数介于 1600 至 2300 h 之间，主要集中于 1700~1900 h，平均值为 1850 h。在售电单价方面值得注意的是有两个属于第一类项目的风电项目，售电单价相对较低，而其余 25 个风电项目的售电单价则较为集中地分布在 500~550 元 /MWh。

通过对图 2、图 3 的分析，归纳总结出风电项目存在

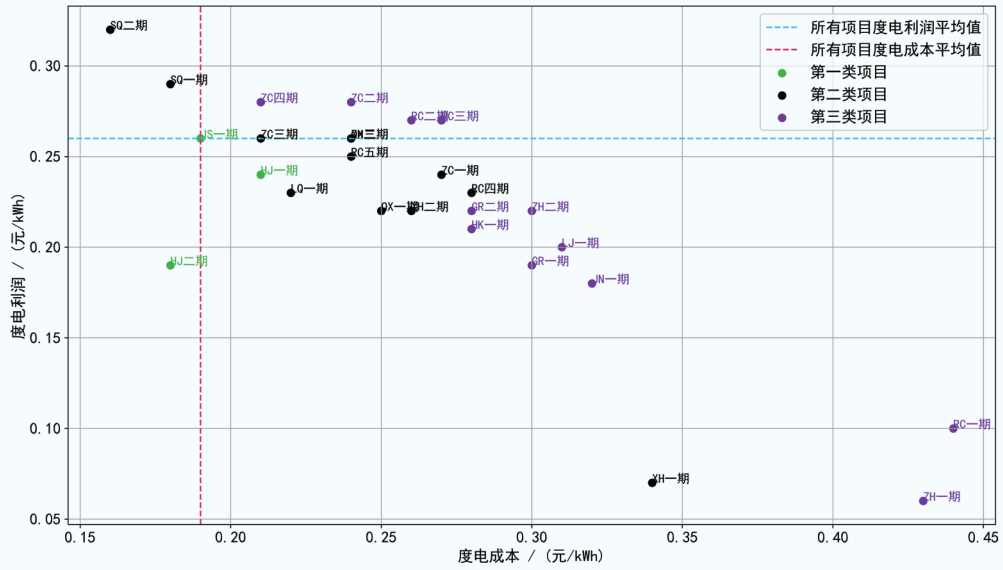



图2 各风电项目度电成本-度电利润分布

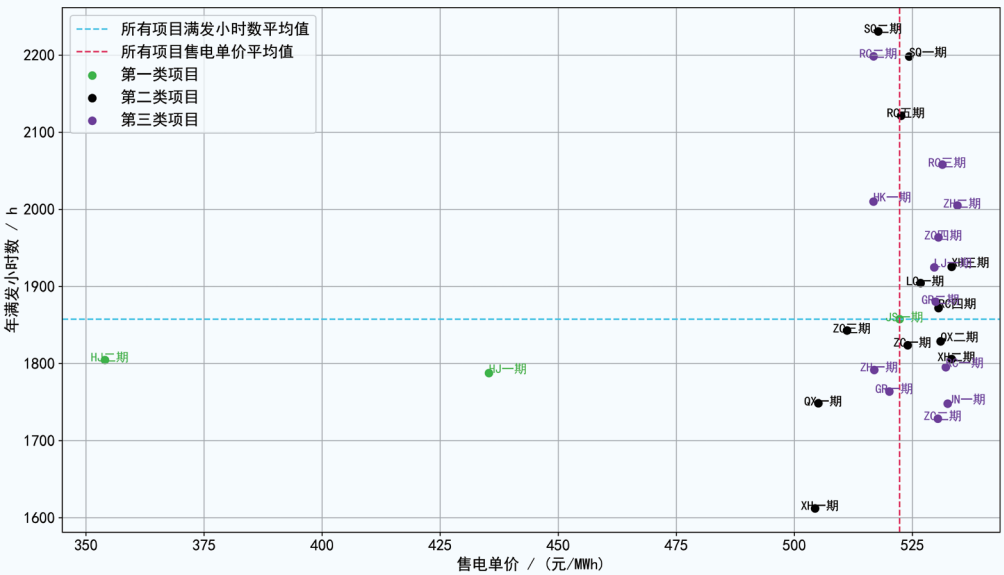



图3 各风电项目售电单价-年满发小时数分布

的主要问题如下：

（1）XH 一期（第二类项目）存在度电成本过高、度电利润过低以及年满发小时数偏低的问题；

（2）RC 一期与 ZH 一期（均为第三类项目）存在度电成本过高与度电利润过低的问题；

（3）HJ 一期与 HJ 二期（均为第一类项目）售电单价相较于同类项目明显偏低。

针对上述三大核心问题，本文从各细分财务维度进行

深入剖析，发现：

XH 一期风电项目的年均折旧费比同类项目高出近 300 万元，进一步深挖原因是该项目的总投资额比同类项目高出近 1 亿元，年均材料费以及修理费总共比同类项目高出近 100 万元，其根本原因为该项目使用的机型故障较多，同时因为该项目的年平均机组故障损失发电量在同类型风电项目中较高且 2020 年电网故障损失发电量过高，所以导致该项目的年均主营业务收入比同类项目少近 1000 万元。

RC 一期风电项目的年均主营业务收入比同类项目少近 300 万元，年均人工成本比同类项目高出近 500 万元，年均材料费以及修理费总共比同类项目高出近 300 万元，其根本原因为该项目使用的机型故障较多且出现批量性的主轴承故障。

ZH 一期风电项目的年均主营业务收入比同类项目少近 300 万元，年均折旧费比同类项目高出近 700 万元，进一步深挖原因是该项目的总投资额比同类项目高出近 1.5 亿元，年均材料费以及修理费总共比同类项目高出近150万元，其根本原因为该项目使用的机型老旧、故障较多。

HJ 一期以及 HJ 二期风电项目的年均售电单价明显低于同类型近 170 元 / MWh，通过调查得知这两个项目的售电量尚未收到售电补贴。

基于上述分析结果，本文最终针对所提及的风电项目指出亟待解决的关键风险点，并就如何优化陆上风电项目的运营与管理提出一系列具有实用性的综合建议。具体而言，在风电项目的初期规划阶段，企业应高度重视并合理规划总投资额，确保资金的有效利用，从而避免项目进入运营期后因折旧费用过高而带来的经济压力。对于在役的老旧机组，企业应给予充分的关注。这些机组由于运行时间较长，故障频发且故障时长较长，对项目的整体运营效率和经济效益产生了不利影响。因此，企业应适时对这些机组进行评估，并根据评估结果进行必要的改造或升级，以降低故障率、提高运行可靠性和发电效率。此外，在人力成本方面，应合理安排用工，避免过度的人力投入导致的成本增加。最后在售电补贴方面，应积极与相关部门沟通协调，确保售电补贴能够及时到位。

## 结论

风电项目降本增效对于提升能源效率和经济效益至关重要，然而在实际执行过程中，企业往往面临诸多挑战，难以明确有效的切入点。本文通过构建财务数据与生产参数多维度交叉验证的量化分析框架，创新性地建立了可复制的风电项目经济性评估模型，为行业降本增效提供了兼具理论与实践价值的解决方案，同时揭示的售电补贴延迟等问题为政府优化政策执行机制提供了数据支撑。研究成果不仅为企业精准定位成本痛点、提升风电项目利用率提供了量化决策依据，助力可再生能源行业突破“高投资低回报”困局，未来还可延伸至海上风电及智能预测领域，为双碳目标下的能源结构转型贡献微观层面的方法论支持与战略实践路径。

**（作者单位：国华能源投资有限公司）**

摄影：李回力

# 分段式复合材料风电叶片连接强度构型设计和有限元分析*

文 | 刘鹏飞

风电叶片是风电装备中的重要结构部件，是直接将风能转化为机械能的结构。该结构采用高强度、低密度、可设计性强的玻璃纤维或碳纤维增强环氧树脂等复合材料，基于叶素动量理论设计成细长的、薄的、柔性的叶片翼型，然后通过复合材料预浸料铺层、真空树脂传递、粘接固化等工艺制造而成，包括蒙皮铺层、腹板铺层及蒙皮 / 腹板粘接等结构形式。由于叶片发电量与叶片长度平方成正比，目前叶片朝着大型化、轻量化、低成本的方向发展。然而，叶片大型化给运输、安装、制造工艺带来巨大挑战。分段连接与模块化设计是解决大型叶片制造和运输困难的方案之一，主要包括紧固件连接（如销钉连接、螺栓 / 螺柱连接等）和粘接，因此，开展分段叶片结构设计与分析是一项重要工作，对于减少运输成本、提升制造效率具有重要价值。

自从 1982 年德国首次提出叶片分段设计的思想以来 [1]，国内外开展了诸多叶片分段连接设计研究，该技术主要产生于企业，包括德国风能与海洋能研究中心和 Enercon 公司、西班牙风电公司 Gamesa 和 Nabrawind、丹麦 LM 公司（已被 GE 可再生能源公司收购）、英国 Blade dynamics 公司（已被 GE 可再生能源公司收购）、希腊可再生能源中心等。2015 年，GE 可再生能源公司启动了 Cypress 分段叶片项目，采用模块化叶片设计和制造技术，分段构型主要采用粘接连接，增重少，成本低，改进了现场粘接工艺，确保粘接质量，研制的碳纤维复合材料 Cypress 分段叶片于 2019 年在荷兰投入运行 [2]，达到高性能、可靠性和高效益。目前，GE 可再生能源公司制定了比较成熟的分段叶片模块化研发路线。相比之下，我国在这一领域起步较晚，目前取得的主要成果是武汉理工大学与中国科学院工程热物理研究所合作开展的纯紧固件分段叶片连接方案 [3]，但重量较重，商业价值不高。目前国内还未有投入运行的分段叶片。经检索，GE 可再生能源公司主要有 8 项以分段叶片粘接为主、紧固件为辅的连接方案专利，分为嵌入式粘接、斜粘接、梯形粘接、支撑粘接、蒙皮和腹板凸凹形粘接、开挖式连接、盒型凸凹连接以及紧固件 / 粘接混合连接等，但由于涉及商业机密，不清楚国外公司采取的具体连接方案。

紧固件连接和粘接各具优缺点。紧固件连接的优点是便于检查质量，安全可靠，强度分散性小，能传递大载荷，同时便于装卸，对零件连接表面的准备及处理要求不高，受环境影响较小，但开孔引起应力集中降低了连接效率，增加紧固件重量，局部刚度可能会有较大变化。相比之下，粘接连接重量轻，运维成本低，商业价值更高，无钻孔引起的应力集中，连接效率高，适宜连接异形、异质、薄壁、复杂的零件，同时能获得光滑气动外形，有利于缩短生产周期、减少场地需求、降低叶片运输和现场吊装难度，但粘接界面强度一般偏弱，且受粘接剂类型、粘接结构形式、粘接层厚度、载荷类型以及缺陷等因素的影响。

本文在课题组前期开展的 59.5 m 叶片流固耦合数值分析 [4] 基础上，充分调研分析国内外大尺寸分段叶片研究成果，兼顾叶片连接强度、重量和经济价值，提出一个以斜粘接

* 基金项目：浙江省公益性技术应用研究项目（编号：LGG22E050018）、国家自然科学基金面上项目（编号：52475171）

1: Hald H, Kensche WC. Development and tests of a light-mass GRP rotor blade for the DFVLR 100kW WeC [R]. Wind Power 85, San Francisco, CA, 1985.

2: https://news.bjx.com.cn/html/20180926/930307.shtml.

3: 秦志文，杨科，王继辉，等 . 分段式风电叶片研究进展和发展趋势 [J]. 玻璃钢 / 复合材料，2017（1）：101 — 108.

4: 刘锦薇，刘鹏飞，徐栋 . 流固耦合作用下复合材料海上风电叶片损伤性能研究 [J]. 风能，2021（10）：56 — 63.

为主、预埋螺柱套 / 双头螺柱为辅的分段叶片混合连接方案。采用有限元软件 HYPERMESH 和 ABAQUS 建立分段叶片网格模型，其中分段位置距离叶片根部 18 m。考虑气动载荷、重力和螺柱预紧力等，采用双线性内聚力模型[5]（已嵌入 ABAQUS 软件作为预测界面失效的模型模块）和有限厚度内聚力单元预测粘接层的损伤特性，研究分段叶片在额定风速 10 m/s 下的应力、应变、位移和损伤行为，探讨粘合层渐进损伤失效和刚度退化特性，为发展分段叶片设计计算方法、研制轻量化和高强度分段叶片提供理论与技术支撑。

## 分段叶片连接构型设计

本文设计了一种 59.5 m、2 MW 分段叶片的连接构型，采用了斜粘接 / 预埋螺柱套和双头螺柱混合连接构型，如图 1 所示。分段叶片连接构型的横截面如图 2 所示。所有气动外形截面和其他尺寸，除了分段连接区域外，均与全尺寸叶片相同。表 1 列出了蒙皮和腹板的材料参数，以及粘合层参数。蒙皮和腹板均采用玻璃纤维 / 环氧树脂复合材料。分段叶片由 1 个斜粘接层、10 个双头螺柱、10 个螺柱套、10 个光套和 10 个螺母组成。每个螺柱套和光套预埋在蒙皮中，双头螺柱的一侧连接螺柱套，另一侧连接螺母。42CrMo 钢紧固件的杨氏模量和泊松比分别为 210 GPa 和 0.3，等效塑性应变 - 塑性硬化应力数据见表 2。

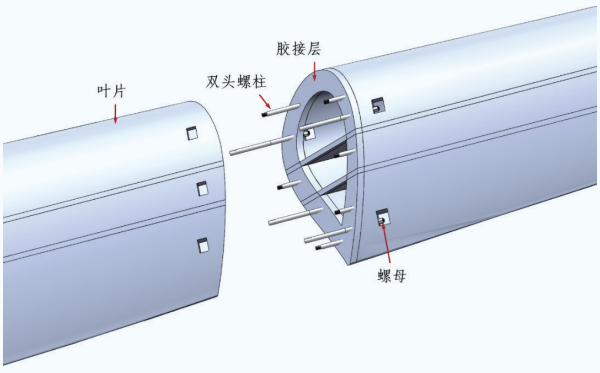



图1 分段叶片连接构型设计

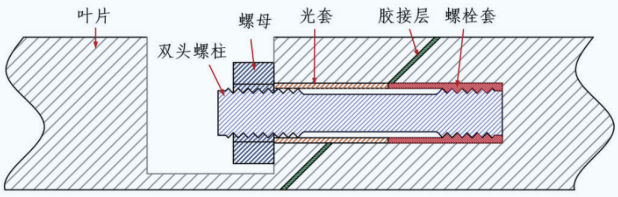



图2 分段叶片连接构型横截面

表1 蒙皮和腹板的材料力学参数以及粘合层参数[4, 6]

| 参数 | 值 |
|---|---|
| 蒙皮和腹板的纵向杨氏模量 | 55 GPa |
| 蒙皮和腹板的横向杨氏模量 | 9500 MPa |
| 蒙皮和腹板的纵向剪切模量 | 5500 MPa |
| 蒙皮和腹板的横向剪切模量 | 3000 MPa |
| 蒙皮和腹板的纵向泊松比 | 0.33 |
| 蒙皮和腹板的横向泊松比 | 0.3 |
| 粘合层失效的展开型断裂韧性 | 0.5 N/mm |
| 粘合层失效的剪切型断裂韧性 | 2.0 N/mm |
| 粘接层结合强度 | 5 MPa |

表2 42CrMo钢等效塑性应变-塑性硬化应力数据

| 等效塑性应变 | 塑性硬化应力 /MPa |
|---|---|
| 0 | 930 |
| 0.012 | 995 |
| 0.0245 | 1040 |
| 0.0359 | 1073 |
| 0.0515 | 1109 |

5: Turon A, Camanho PP, Costa J, Dávila CG. A damage model for the simulation of delamination in advanced composites under variable-mode loading[J]. Mechanics of Materials, 2006, 38(11): 1072-1089.
6: Liu PF, Liu JW. Finite element analysis of competitive damage mechanisms of composite scarf adhesive joints by considering thickness effect[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2022, 119, 103347.

本文提出的分段叶片连接构型有几个优点：（1）紧固件确保叶片保持连续的气动力学性能；（2）钻孔交替布置，尽量减少对叶片强度的损害；（3）预埋金属套筒提高了紧固件的性能；（4）粘合层的引入减少了紧固件的数量。本文工作是研究叶片在分段区域的连接强度，载荷包括气动压力、重力和螺柱预紧力。

螺柱预紧力计算公式为 [7]：

$$F_p = \frac{0.9\times0.9\times0.9}{1.2} A_e f_u \qquad (1)$$

式中，螺柱有效截面积 $A_e$=1728 mm$^2$，10.9 级螺柱材料拉伸强度 $f_u$=1126 MPa。

课题组曾开展了 59.5 m 叶片在流固耦合作用下的应力和损伤性能有限元分析 [4]，结果表明叶片蒙皮的主应力主要集中在叶根和翼型之间的过渡区域，以及距离叶尖三分之一处。叶片中部区域（16~25 m）的最大主应力分布相对均匀，没有明显的应力集中或应变不连续性。从叶根到叶尖的位移呈现非线性增长。当接近叶根时，位移减小。因此，可以利用沿叶片翼展方向的最大主应力和位移分布来确定分段位置。通过整合上述分析并考虑分段位置对连接强度的影响，确定最佳分段点距离叶根 18 m。此外，制造难度也是决定分段位置的关键因素，具有较大横截面尺寸的分段区域提供了更大的操作空间。

## 分段叶片几何模型和有限元模型

蒙皮从内表面到外表面的铺层为 $[0°/45°/90°/-45°]_{12}$+[0°/45°]，腹板铺层为 $[0°/45°/90°/-45°]_5$。叶片前缘的厚度较薄，最大为 160 mm，最小为 80 mm。为简化分析，蒙皮每层厚度设为 3.2 mm。首先，为整个蒙皮设置最初的 25 层；然后，为较厚的叶片根部和中部区域设置新的 25 层；最后，腹板设置为 20 层。

课题组曾开展了斜粘接试样脱粘断裂实验和损伤有限元分析 [6]，表明粘接角显著影响粘合层的损伤性能：较小的粘接角主要导致剪切断裂，而增大粘接角导致显著的混合展开 / 剪切断裂。课题组开展的斜粘接角度为 10°、30°和 45°的玻璃纤维 / 环氧树脂试样断裂试验结果表明，过大或过小的粘接角度对于分段设计都是不利的。过小粘接角度的粘合层面积太小，抵抗裂纹扩展的能力较弱，而过大粘接角度将导致粘接层更大破坏，10°、30°和 45°粘接角试样达到最终强度时的刚度退化分别为 0.134、0.156 和 0.245。因此，采用 SOLIDWORKS 软件，将叶片模型分为两部分，在距离叶片根部 18 m 的位置设置一个倾斜 30° 的切割平面，有限厚度的粘合层设置在两个叶片段之间。此外，在分段区域内的蒙皮上交替设置 10 个孔，用于安装 M42 mm（公称直径）×1000 mm（长度）的螺柱。根据式（1），螺柱预紧力为 1.82e6 N。为简化计算，忽略分段区域内表面的不连续性，并假设该区域分段叶片的空气流体动力学呈现平滑过渡。分段叶片的几何模型，包括蒙皮、腹板、10 个螺柱、10 个螺母和 1 个粘合层，如图 3 所示。

分段叶片的网格模型采用 HYPERMESH 软件剖分，采用四面体实体单元剖分获得蒙皮、腹板、螺母、螺柱套和螺柱单元。随后将网格模型导入 ABAQUS 软件，采用双线性内聚力模型和有限厚度六面体内聚力单元，以预测粘合层损伤。值得注意的是，理论上，内聚力强度不必等于

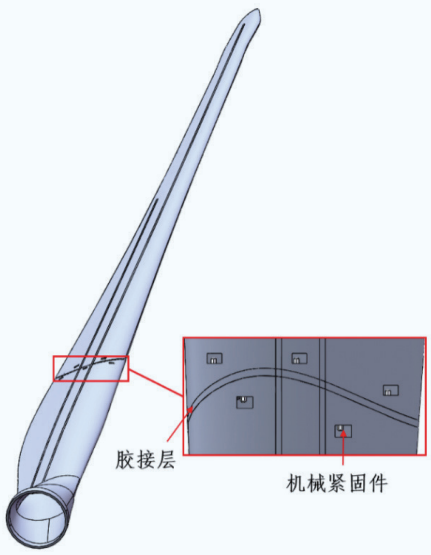



图3 分段叶片几何模型

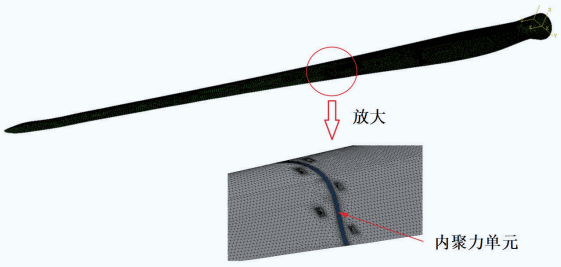
7: 张耀春，周绪红 . 钢结构设计原理 [M]. 高等教育出版社，2004.

真实粘合强度。因此，ABAQUS 中使用的内聚力单元的默认厚度是 1.0 mm，而不是真实厚度。建立有限厚度内聚力单元是为了方便预处理和后处理可视化。本文选择法向和切向内聚力强度 5 MPa（根据课题组开展的斜粘接试样脱粘实验，其为环氧树脂接头的真实粘合强度），以及更高内聚力强度 30 MPa（接近于完美粘接）。内聚力单元的法向和切向脱粘断裂韧性分别设置为 0.5 N/mm 和 2.0 N/mm。

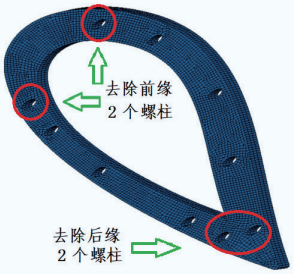
固定约束应用于叶片根部的外表面。在叶片段 / 粘合层、螺柱 / 螺母、螺母 / 蒙皮段和螺柱 / 螺柱套（或光套）的接触面上施加 TIE 约束，以简化接触关系，位置公差为 20 mm。分段叶片的网格模型如图 4 所示。所有单元的总数为 473624，包括 14840 个线性六面体 C3D8I 单元、8558 个线性四面体 C3D4 单元和 450226 个二次四面体 C3D10M 单元，以及 10065 个 COH3D8 内聚力单元。有限元模型中的平均网格边长 0.2 m，仅约为叶片翼展方向长度的 3/1000。特别是，在 10 个螺柱、螺母和叶片分段连接区域进行了充分网格细化，以保证有限元数值结果不受网格尺寸的影响。

从紧固件减重考虑，可以去除前缘或后缘 2 个螺柱和螺母，后文通过有限元分析比较去除螺柱和螺母前后蒙皮最大主应力、螺柱和螺母 Mises 应力以及粘合层刚度退化特性。

叶片气动载荷如图 5 所示，基于叶素动量理论计算的额定风速 10 m/s 下叶片沿翼展方向的压力分布如图 6 所示，采用 ABAQUS 软件中的场输入气动压力。对每个螺柱的截面施加 1.82e6 N 的预紧力。有限元分析分为 3 个载荷步：(1) 螺柱预紧力（Preload）和固定（Fix），(2) 重力载荷，(3)

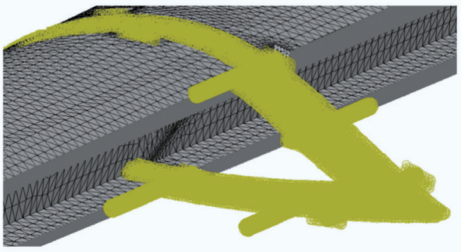



（a）分段叶片网格单元




（b）粘合层内聚力网格单元

（c）螺柱和螺母网格单元



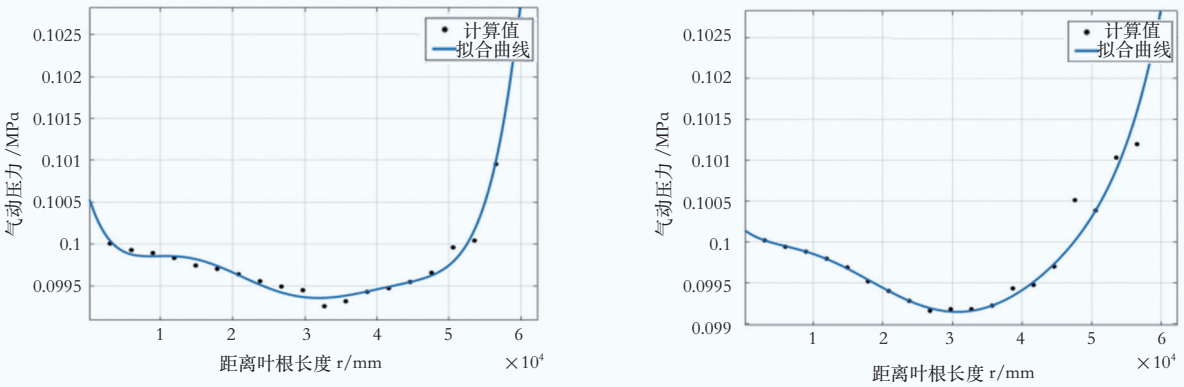
（d）施加TIE约束简化接触关系

图4 分段叶片有限元网格模型

（a）压力面（下表面）

（b）吸力面（上表面）

图5 叶片气动压力




（a）压力面　　（b）吸力面

图6 额定风速10 m/s下叶片沿翼展方向的压力分布

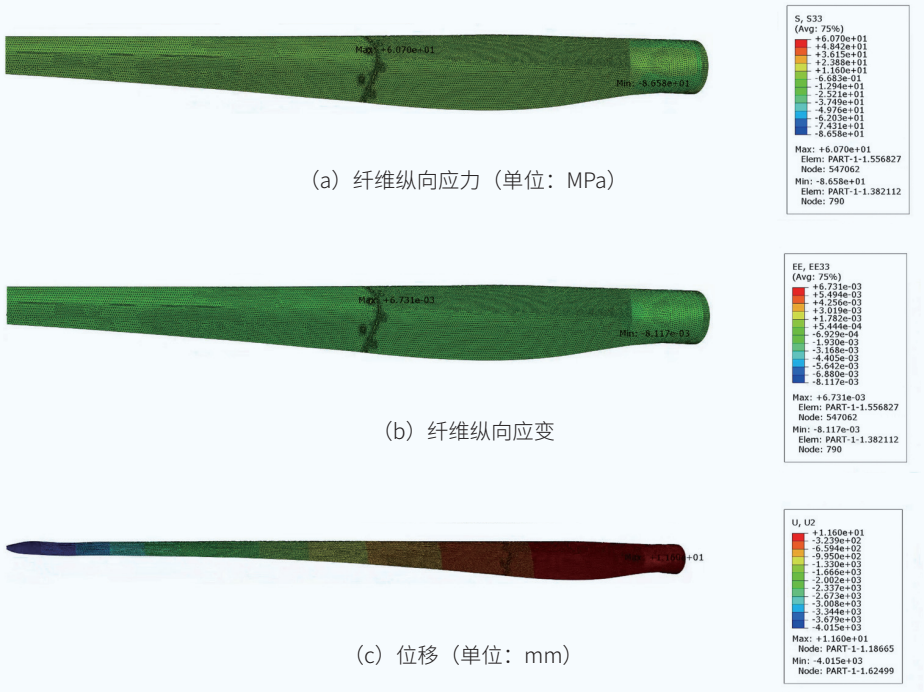
（a）纤维纵向应力（单位：MPa）

（b）纤维纵向应变

（c）位移（单位：mm）

图7 风速10 m/s和内聚力强度5 MPa时，分段叶片在重力方向上的纤维纵向应力和应变及位移分布

气动压力。蒙皮、腹板和粘合层的密度设置为 1200 kg/m$^3$，而金属密度为 7800 kg/m$^3$。隐式有限元分析遇到的主要难点是数值收敛性，主要是由各种 TIE 约束关系引起的，本文采用粘性规划来解决收敛性问题。采用高性能计算机，计算纤维纵向应力和应变的分布、分段叶片在重力方向上的位移以及粘合层损伤和刚度退化特性。




（a）纤维纵向应力（单位：MPa）

（b）纤维纵向应变

（c）位移（单位：mm）

图8 风速10 m/s和内聚力强度30 MPa时，分段叶片在重力方向上的纤维纵向应力和应变及位移分布

## 结果与讨论

图 7 和 8 分别示意了额定风速 10 m/s、内聚力强度分别为 5 MPa 和 30 MPa 时的纤维纵向应力和应变的分布，以及分段叶片在重力方向上的位移。最大纤维纵向应力达到约 60 MPa，主要出现在叶片根部附近，该区域以快速几何过渡为特征，与全尺寸叶片的数值结果[4]一致。但由于紧固件连接处的应力集中效应，该值高于相应的全尺寸叶片的最大纤维纵向应力值 46 MPa。因此，可以推断出纤维和基体损伤都在增加。尽管引入了蒙皮钻孔的紧固件，但由于粘接层的协同承载作用，最大纵向纤维应力的增加仍然较小。同样，最大纵向纤维应变反映了应力模式，在相同位置约 8.1e-3。此外，重力方向上的位移在叶尖达到峰值，约为 4.0 m。相比之下，全尺寸叶片的最大叶尖位移约为 2.8 m。这说明在增加重量的同时，尽管气动轮廓基本保持不变，但紧固件导致位移增加。然而，同时应用粘接技术可减轻重量，提高连接强度。此外，提高内聚力强度对蒙皮应力、应变和位移的影响很小。

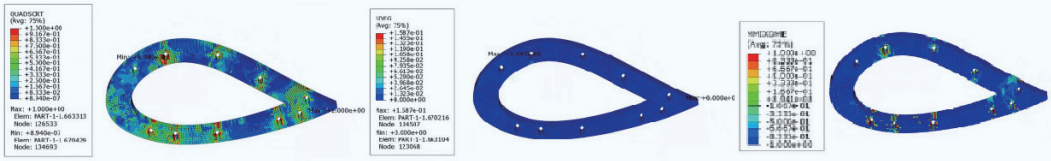
内聚力模型中，采用二次牵引力组合 QUADSCRT=$(T_1/T_1^0)^2+(T_2/T_2^0)^2+(T_3/T_3^0)^2>1$（$T_i$(i=1,2,3) 是内聚牵引力，$T_i^0$(i=1,2,3) 是内聚力强度）作为两个叶片段之间粘合层的初始损伤失效标准。当 QUADSCRT<1.0 时不会发生损伤，QUADSCRT>1.0 时出现初始损伤。同时，引入 SDEG（stiffness degradation）作为描述内聚力单元刚度退化的指标。此外，分段叶片可能出现的两种脱粘断裂模式，包括模式 I 展开和模式 II 剪切模式，结果由 ABAQUS 软件中的场变量 MMIXDME 显示：

$$\begin{cases} m_1 = \dfrac{G_1}{G_T} = \dfrac{G_1}{G_1+G_2+G_3} \\ MMIXDME = 1 - m_1 \end{cases} \tag{2}$$

式中，$G_i$ (i=1, 2, 3) 代表两种断裂模式下的能量释放率。当 MMIXDME 值在 0 到 0.5 之间时发生拉伸损伤，在 0.5 到 1 之间时发生剪切损伤，为 -1 时不发生损伤。

图 9 分别示意了在 5 MPa、30 MPa 内聚力强度下的 QUADSCRT、SDEG 和 MMIXDME 分布。在内聚力强度为 5 MPa 时，大多数内聚单元都出现明显的初始损伤，而在内聚力强度为 30 MPa 时，损伤单元的数量明显减少。

（a）内聚力为5 MPa



（b）内聚力为30 MPa

图9 不同内聚力强度下QUADSCRT、SDEG和MMIXDME分布

除数值分析，粘接接头的结合强度还取决于各种因素，包括粘接材料、层厚和制备工艺等。在低内聚力强度 5 MPa 下，可清楚地观察到混合展开 / 剪切断裂模式，但在较高的内聚力强度 30 MPa 下，剪切断裂模式占主导地位。此外，随着内聚力强度的增加，受损区域的范围减小。在 30 MPa 的内聚力强度下，损伤主要集中在孔周围。正确选择粘合剂材料和控制粘合层厚度是提高两个叶片段之间粘合强度的关键因素。鉴于目前许多粘合剂材料，如环氧树脂和不饱和聚酯，都是脆性的，强度偏低。因此，未来有必要引入具有更高强度的延展性粘合剂。尽管在内聚力强度为 5 MPa 时，几乎整个粘合层都出现了初始损伤，但粘合层的刚度退化并不严重。这表明内聚力强度不会显著降低，粘合层仍保持了足够的承载能力。

施加预紧力后的紧固件 Mises 应力分布如图 10 所示，其与预紧力的大小直接相关，并集中在叶片蒙皮与紧固件孔接触的连接区域，最大值达到 939 MPa，略高于屈服强度 930 MPa，但仍低于极限强度 1109 MPa，且产生的塑性应变较小，存在一定的强度裕度。在这种情况下，粘接层的引入一定程度上减轻了应力集中，同时也降低了整体应力水平和重量。

如图 4（b）所示，为优化减轻重量，将前缘、后缘附近的螺柱和螺母分别去掉 2 个，进一步开展 10 m/s 额定风速和内聚力强度 5 MPa 下的分段叶片有限元分析。图 11

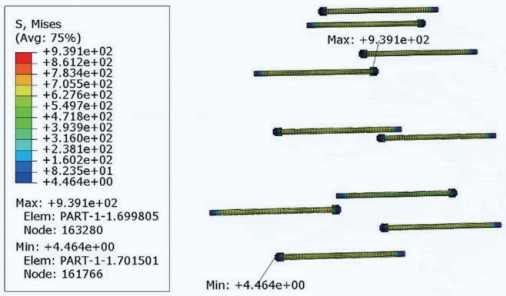
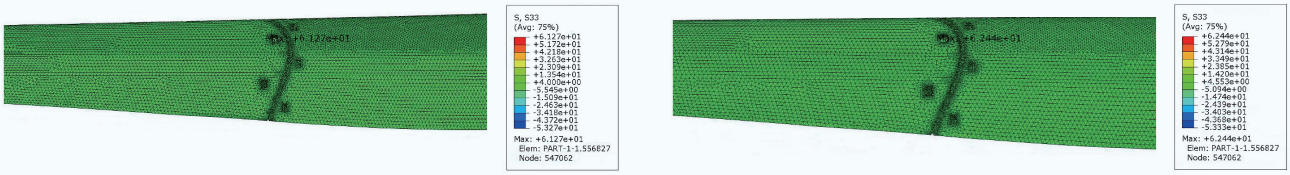


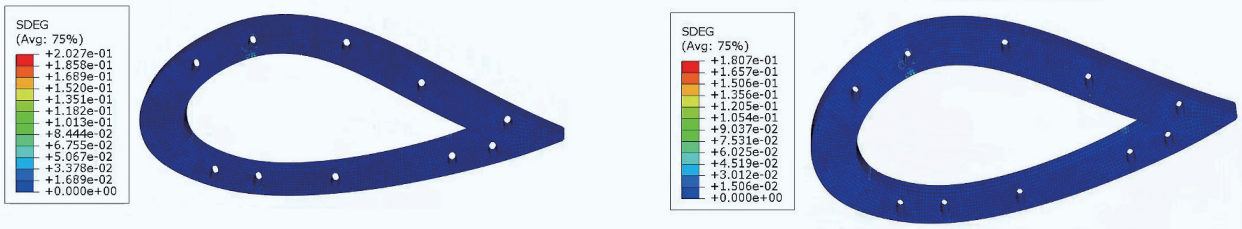

图10 风速10 m/s、内聚力强度5 MPa时紧固件Mises应力分布（单位：MPa）

示意了两种情况下的蒙皮最大主应力分布结果。相比于 10 个螺柱和螺母的 60 MPa 最大主应力， 去除 2 个螺柱和螺母后的蒙皮最大主应力增加不大，分别达到 61 MPa 和 62 MPa。图 12 示意了两种情况下的粘合层刚度退化（SDEG）结果。去掉前缘附近的 2 个螺柱和螺母后，粘合层的刚度退化由 0.166 增大到 0.2，剩余的螺柱和螺母最大 Mises 应力 940.5 MPa，几乎等同于上述 10 个螺柱和螺母下的 939 MPa；去掉后缘附近的 2 个螺柱和螺母后，粘合层的刚度退化增大到 0.18，剩余的螺柱和螺母最大 Mises 应力也是 940.5 MPa。考虑前缘直接承受迎风压力，因此在前缘布置紧固件更加重要。此外，考虑到去除螺柱后粘合层的刚度




（a）前缘　　（b）后缘

图11 去除前缘或后缘2个螺柱和螺母后的蒙皮最大主应力结果




（a）前缘　　（b）后缘

图12 去除前缘或后缘2个螺柱和螺母后的粘合层刚度退化结果

退化增加，因此适当减小螺柱和螺母的数量对于减重和保持粘接强度具有重要意义。若引入临界刚度退化 SDEG 系数（如 0.25），则选择螺柱和螺母的数量、位置以及规格存在一个优化的问题。

最后，由于叶片上的压力为分布载荷，本研究并不试图确定分段叶片的极限强度。然而，随着风速的进一步增加（例如，25 m/s 时的机组停机风速），粘合层内聚力单元的刚度退化仍然不高（约 0.2），叶片蒙皮的应力和应变没有显著变化。这表明所设计的分段连接结构具有较高的承载能力。然而，需要对分段叶片进行加载实验测试，以充分验证当前的分段设计构型。图 13 示意了课题组最近设计和制备并开展的 2.9 m 缩比型分段叶片的强度破坏试验（采用加力器和砝码加载）以及声发射传感器测试。分段叶片中未设置腹板，中间填充物为泡沫，前缘与后缘设置加强板并通两根钢管，分段线中点距离固定端 0.88 m，采用四段绳子下挂测力计，并以在下端加装砝码的方式作为加载，四段绳中心点距离叶根固定端 1.91 m，绳子、托盘与测力计总重量为 1.0 kg，加载至分段叶片完全脱胶断裂。表 3

图13 课题组开展的2.9 m缩比型分段叶片和全尺寸叶片的强度破坏试验以及声发射传感器测试

列出了全尺寸叶片和分段叶片的对比结果，表明分段叶片与全尺寸叶片所能承载的载荷差距不大。

目前，课题组正在结合声发射信号特征以及机器学习算法，进一步研究分段叶片的失效机理和强度，验证提出

表3 两种叶片的承载能力结果对比

| 全尺寸叶片 | | 分段叶片 | |
|---|---|---|---|
| 加载重量 /kg | 加载点离地距离 /cm | 加载重量 /kg | 加载点离地距离 /cm |
| 0 | 89.5 | 0 | 87.0 |
| 5 | 89.0 | 5 | 86.0 |
| 10 | 88.1 | 10 | 85.1 |
| 15 | 87.2 | 15 | 84.2 |
| 20 | 86.4 | 20 | 83.5 |
| 25 | 86.0 | 25 | 83.0 |
| 30 | 85.0 | 30 | 82.0 |
| 35 | 84.3 | 35 | 82.0 |
| 40 | 83.6 | 40 | 80.5 |
| 45 | 82.1 | 45 | 80.0 |
| 50 | 81.4 | 50 | 78.5 |
| 55 | 81.0 | | |
| 60 | 80.0 | | |
| 65 | 78.4 | | |
| 70 | 78.0 | | |

的分段构型设计的合理性。

## 结论

考虑到质量、强度和成本等因素，本文设计了一种59.5 m 风电机组叶片分段连接构型，在其距离叶根 18 m 的位置，引入斜粘接 / 预埋螺柱套和双头螺柱混合连接构型。考虑气动载荷、重力和螺柱预紧力，通过引入双线性内聚力模型来预测分段叶片的粘合层失效，开展了分段叶片有限元分析，考察了纤维纵向应力和应变、重力方向位移、粘合层的损伤和刚度退化特性以及螺柱和螺母紧固件的 Mises 应力。根据有限元分析结果，得出以下 3 点结论：

（1）提高内聚力强度对纤维纵向应力、应变和重力方向位移的影响很小。尽管在内聚力强度为 5 MPa 时，几乎整个粘合层都发生了初始失效，但刚度退化较小。此外，将内聚力强度从 5 MPa 提高到 30 MPa，可显著减少粘合层失效面积，失效集中在紧固件孔附近的区域。

（2）在真实内聚力强度 5 MPa 时，粘合层的破坏模式表现为混合展开 / 剪切断裂，而在高内聚力强度 30 MPa 时，剪切断裂模式占主导地位。这表明混合断裂模式在分段叶片的承载过程中起着重要作用。

（3）相比于后缘，紧固件集中安装在分段叶片前缘附近对于提升结构连接强度更加重要。减小螺柱和螺母的数量对于分段叶片减重非常重要，尽管其对蒙皮最大主应力以及剩余紧固件的最大 Mises 应力影响不大，但也导致了粘合层的承载和刚度退化增加。因此，实际设计分段叶片时，必须充分考虑粘合层和紧固件之间的协同承载，适当优化减少紧固件的数量。此外，考虑到紧固件的强度提升有限，提升粘合层的强度是提升分段叶片连接强度的一个重要因素，选择延展性的粘接剂以及优化粘接厚度、粘接工艺也是今后的重要工作。

本文开展了 59.5 m 叶片分段结构设计选型和有限元应力和失效分析，建模分析的难度和计算的成本比较大。今后为了充分解决叶片分段设计的问题（两段甚至多段），需要为不同尺寸的叶片建立参数化和模块化分段设计计算方法。

**（作者单位：浙江大学海洋学院）**

# 上海敏泰液压股份有限公司
Mintai Hydraulics Shanghai Co., Ltd.

# 专业提供风力发电
# 流体系统解决方案

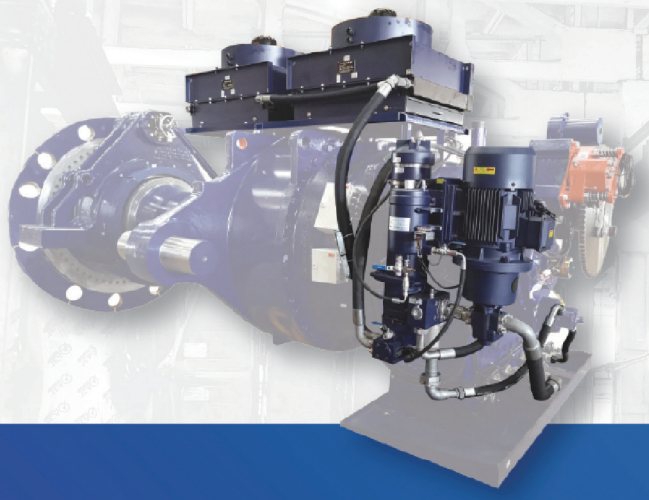
公司自2006年进入风电市场，已经为风力发电机组提供了9万余套产品，积累了丰富的设计、生产和售后服务经验。以安全可靠的产品运行及高效快捷的售后服务，与全球多家风机制造商及齿轮箱制造商结成战略合作伙伴，为中国及世界的清洁能源事业贡献力量。

主轴、偏航刹车液压系统

变流器、发电机水冷系统

离线精过滤装置

各类滤芯备件



齿轮箱润滑冷却系统

地址：上海市浦东新区川大路699号　邮编：201299
电话：021-68393909　E-mail:sales@mintaigroup.com　Web：www.mintaigroup.com

数据来源：公司内部数据

广告

# 风电叶片气热除冰系统承载机架有限元分析与优化设计

文 | 刘志龙，唐典雅，何兆伟，王伏林，周国文，杨肖

为加快构建现代能源体系，推进能源结构低碳化转型，我国正大力发展可再生能源。《“十四五”现代能源体系规划》明确要求加快发展风电产业，全面推进风电大规模开发和高质量发展。受风能资源和人口分布等因素影响，国内风电场主要分布在“三北”地区和中东南部山区，这些地区高湿寒冷的气候使得风电场在冬季会频繁发生覆冰灾害，尤以风电机组叶片覆冰危害最大，影响风电机组安全、稳定运行，长时间覆冰还会导致停机，造成巨大的经济损失[1-3]。针对叶片覆冰，国内外学者提出了涂层防冰、机械除冰、内腔气热除冰、表面电加热除冰等方法，其中内腔气热除冰方法因其良好的防冰、除冰效果和较高的热量传导效率，得到了广泛的应用[4-6]。

内腔气热除冰方法通过在叶片根部空腔内安装鼓风机与加热器，将加热后的热风经导风管道输送到叶尖区域，形成热流循环，使叶片表面被加热到 0℃以上，防止或缓解叶片结冰，达到除冰效果[7, 8]。内腔气热除冰方法中鼓风机、加热器和控制柜采用机架承载，机架底部与叶片粘结连接。工作中，机架会受到加热系统及其自身的重力和旋转离心力、鼓风机的风压推力和激励载荷作用，易发生弯曲变形和连接处屈服；当鼓风机激励载荷的频率接近机架固有频率时，还会发生共振，影响焊缝等薄弱部位疲劳强度，导致焊接处疲劳失效，影响加热系统的使用寿命和可靠性[9]。因此，本文提出内腔气热除冰系统新布置方案，设计其承载机架，利用有限元分析方法，开展对加热系统承载机架的强度校核和模态分析，根据有限元分析结果对机架结构进行优化，从而设计出兼具轻量化、可靠性、安全性和稳定性的加热系统承载机架，并设计拉力实验进行机架安全性验证。

## 除冰系统机架设计

### 一、除冰系统布置方案

内腔气热除冰系统（包括鼓风机、加热器和机架）原布置方案如图 1 所示，鼓风机和加热器承载机架通过手糊玻纤布粘结在风电机组叶片内腔壁，承载机架结构如图 2 所示，导风管道通过手糊玻纤布与叶片腹板粘结，其存在的最大问题是安装时间过长。机架底板与导风管道的粘结平面呈近 90°交错，两粘结位置不能同时进行玻纤布手糊操作，需等机架底板位置玻纤布完全固化后，才能对腹板上的导风管道进行固定。由于机架底部手糊玻纤布的固化时

1: 朱蓉，王阳，向洋，等 . 中国风能资源气候特征和开发潜力研究 [J]. 太阳能学报，2021，42（6）：409 — 418.
2: 倪一帆，张作贵，符锐 . 风力发电机叶片覆冰机理及防冻除冰技术的研究进展 [J]. 发电设备，2023，37（4）：223 — 229.
3: 曾琦，陈正洪 . 近年来气象灾害对风电场影响的研究进展 [J]. 气象科技进展，2019，9（2）：49 — 55.
4: 何翼，石怀憬，丁志强 . 基于 S7-1200 的风电叶片混合除冰控制系统的设计 [J]. 工业仪表与自动化装置，2022（3）：69 — 74.
5: 胡琴，王欢，舒立春，等 . 覆冰条件下风力发电机叶片防 / 除冰方法综述 [J]. 电工技术学报，2024，39（17）：5482 — 5496.
6: Xu B, Lu F, Song G B. Experimental Study on Anti-Icing and Deicing for Model Wind Turbine Blades with Continuous Carbon Fiber Sheets[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2018, 32(1).
7: 赵斌，廖静，任延杰，等 . 风力机叶片覆冰机理与防除冰技术研究进展 [J]. 排灌机械工程学报，2023，41（12）：1237 — 1245.
8: 李郝，张朝锋 . 叶片气热除冰技术经济适用性分析 [J]. 风能，2019（9）：72 — 77.
9: Farid M Y, Mat R D, Samsubaha M F, et al. Study of Axial Vibration of a Motor-Compressor System Using Operational Modal Analysis[J]. Sound & Vibration 2023, 57(1): 119-131.

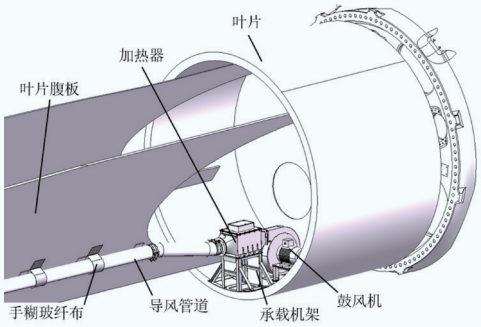



图1 加热系统原布置方式

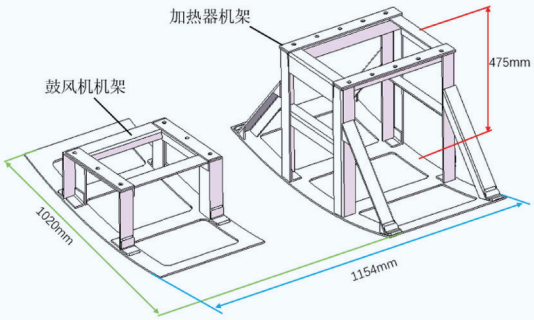



图2 原除冰系统承载机架

间约 6 h，因此，加热系统导风管道的安装需滞后 6 h，相当于安装工作时间需 1 天以上。安装时间的延长，使机组停机时间也相应变长，不但损失了发电量，还增加了人工成本。

针对原布置方案缺陷，考虑除冰效率与加热系统安装时间要求，设计新布置方案，使机架底部与导风管道粘结位置保持在同方向不同水平位置，两部分的玻纤布固化可在同时段进行。将机架高度增加，使鼓风机、加热器与导风管道组成的热风输送路径沿直线布置，保证热流通畅，提高加热效率。除冰加热系统（包括鼓风机、加热器和叶根柜、机架）新布置方式如图 3 所示。

**二、承载机架设计**

根据加热系统新布置方案，设计除冰系统新型承载机架。机架采用焊接角钢结构，由鼓风机机架和加热器机架两部分组成；机架材料选用 Q235B；为方便在塔筒和叶片根部的运输与安装，机架采用分体式结构，上下两部分通过螺栓连接。机架三维模型如图 4 所示。

## 除冰系统机架结构分析

**一、机架有限元建模**

为保证模拟出机架各角钢连接处的实际焊接情况，采用共节点方法对机架焊接位置进行网格划分。由于机架各连接部位存在拐角等结构突变，仿真中会出现应力奇异现象。对机架网格进行无关性验证，发现人为排除应力奇异位置后机架最大应力水平随网格细化变化较小，最大变形数值同样变化较小，最终确定机架模型中单元数量为 549097 个，节点数量为 1219116 个。当机架运动到最大载荷位置（即

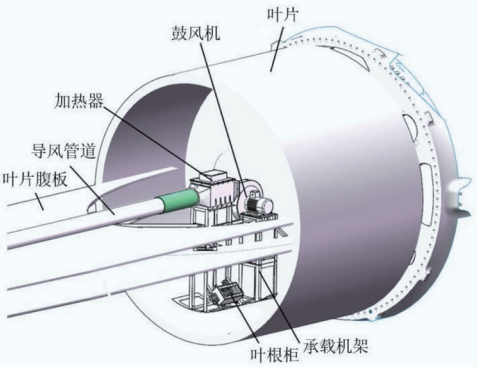



图3 加热系统新布置方式

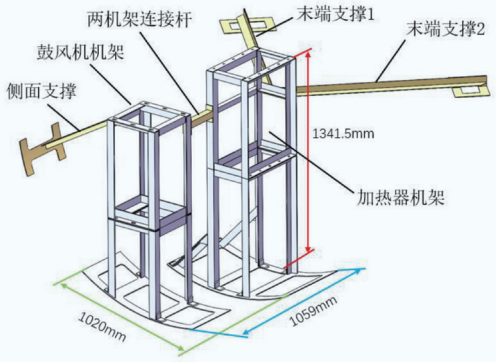



图4 内腔气热除冰系统承载机架

叶片旋转至最底端）时，处于最危险状态，如图 5 所示，此刻，加热系统和机架随叶片转动所受离心力和重力在同一方向。加热系统各部分参数见表 1。根据表 1 数据计算出有限元分析施加载荷，如表 2 所示，其中机架自身的离心力通过施加向心加速度实现，重力通过重力加速度实现。机架所受加热系统载荷施加在加热系统与机架连接螺栓孔位置。

鼓风机机架和加热器机架分体部分的对应连接螺栓孔设置绑定接触，实际工况下机架底部和各支撑末端连接板采用手糊玻纤布粘结安装，故分析时各粘结平面设置为全约束。

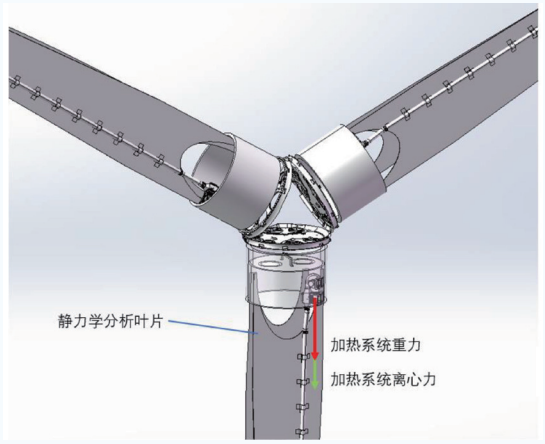



图5 机架最危险位置处叶片状态

表1 加热系统参数

| 项目 | 技术参数 |
|---|---|
| 鼓风机重量 $m_{风}$/kg | 60 |
| 鼓风机转动半径 $r_{风}$/m | 4.5 |
| 加热器重量 $m_{加}$/kg | 45 |
| 加热器转动半径 $r_{加}$/m | 5 |
| 叶根柜重量 $m_{叶}$/kg | 11 |
| 叶根柜转动半径 $r_{叶}$/m | 5 |
| 叶片转速 ω/（r/min） | 18 |
| 机架平均转动半径 $r_{支}$/m | 4.75 |

表2 机架载荷计算

| | | |
|---|---|---|
| 鼓风机 | 离心力：$F_1=m_{风}\omega^2r_{风}=960$ N | 加载合力：$F_{风}=F_1+G_1=1548$ N |
| | 重力：$G_1=m_{风}g=588$ N | |
| 加热器 | 离心力：$F_2=m_{加}\omega^2r_{加}=800$ N | 加载合力：$F_{加}=F_2+G_2=1241$ N |
| | 重力：$G_2=m_{加}g=441$ N | |
| 叶根柜 | 离心力：$F_3=m_{叶}\omega^2r_{叶}=195.42$ N | 加载合力：$F_{叶}=F_3+G_3=303.2$ N |
| | 重力：$G_3=m_{叶}g=107.8$ N | |
| 机架 | 向心加速度：$a=\omega^2r_{支}=16.878$ m/s$^2$ | |

## 二、静力学分析结果分析

机架静力学分析结果如图 6 所示，从图 6（a）可看出，机架刚性较好；机架的最大变形位置为鼓风机机架侧面支撑侧顶点位置，最大变形量为 0.68048 mm，相比于机架高度 1341.5 mm，该数值较小，不会对加热系统装配造成影响；机架与侧面支撑连接位置处云图为红色，相比机架其他位置变形较大，说明侧面支撑对鼓风机机架的变形限制作用较小。从图 6（b）可看出，机架的应力最大值为 129.1 MPa，主要集中在鼓风机机架与加热器机架的连接杆支撑位置，其他位置应力大部分都低于 50 MPa，究其原因是两机架仅靠一连接杆连接，导致连接处应力严重集中。

根据《风力发电机组 设计要求》（GB/T 18451.1—2022），不利载荷工况下安全系数取 1.35，机架材料为 Q235B 钢，屈服强度为 235 MPa，许用应力为 174 MPa，由机架最大应力为 129.1 MPa 可知，其能够满足力学强度要求。

## 三、模态分析

除冰加热系统运行时，鼓风机会带来较大振动。为避免共振问题，需对新机架进行模态分析，确定机架的固有频率和振型。采用有限元方法对结构优化后机架进行模态分析，分析时暂不考虑阻尼效应。由振动理论可知，结构低阶振型对振动特性的影响远高于高阶振型[10, 11]。机架前六阶振型云图如图 7 所示，振动频率和振动特性如表 3 所示。

10: 高建军，刘志扬，顾伟，等 . 谷物联合收割机底盘机架模态分析与优化 [J]. 机械设计与研究，2023，39（3）：199 — 205.
11: 李照阳，戴跃洪，胡杰俊，等 . 主动航天服关节助力外骨骼结构设计及优化 [J]. 中国空间科学技术，2021，41（5）：75 — 84.

机架的三阶、四阶振型均出现在末端支撑，且最大变形量远超其他振型，究其原因是末端支撑的支撑点靠近机架顶部，支撑在加热系统加载方向，受力较大，且支撑空间过大，支撑过于单薄，导致振动幅值较大。

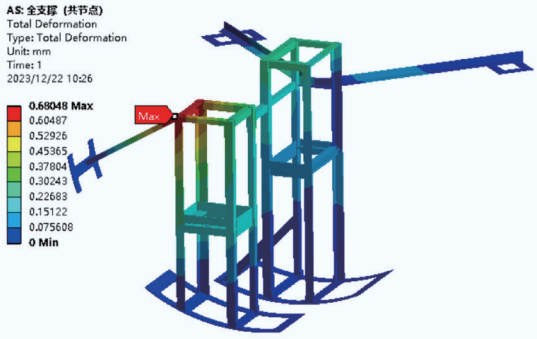
鼓风机内部电机额定转速激振频率为 50~70 Hz，机架一阶固有频率 78.37 Hz，在电机激振频率的 ±20% 区间（40~84 Hz）[12] 之内，表明机架抗振性能较差，究其原因是机架过高，底部连接对顶端的约束不足。尤其鼓风机机架与电机直接相连，受电机振动影响最大，长时间工作，易出现螺栓松动等危害。

## 结构优化分析

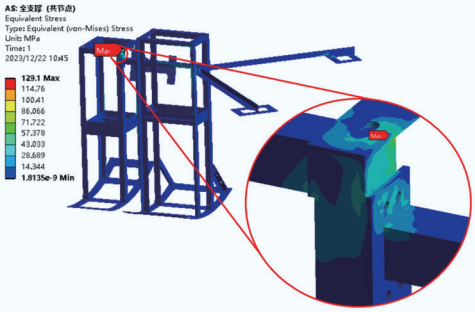
### 一、结构优化方案

由静力学分析和模态分析可知，机架过高导致其抗振性能较差。因此，在不影响加热系统除冰效率的基础上，降低机架高度，减轻机架重量，可改善其抗振性能。同时，机架结构强度和刚度存在较大应力裕度，超出设计要求，可适当降低。根据有限元分析结果发现机架存在以下不足：

（1）侧面支撑实际支撑作用较小，且与机架底部不在同一水平方向，不便于机架安装。

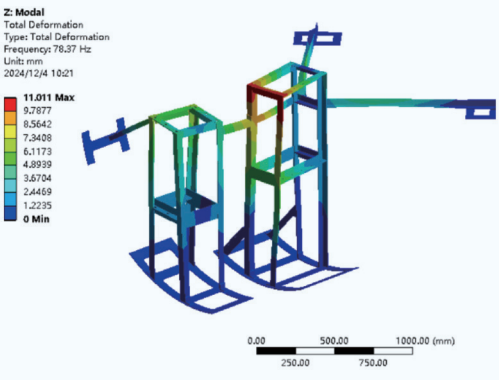



（a）变形量云图

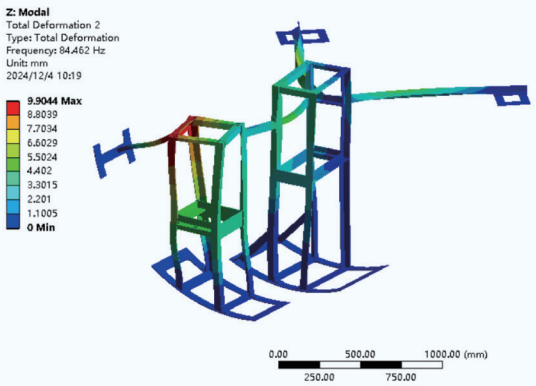



（b）等效应力云图

图6 机架静力学分析结果

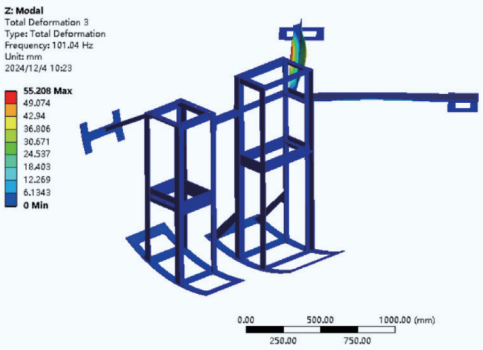



（a）一阶振型（78.37 Hz）

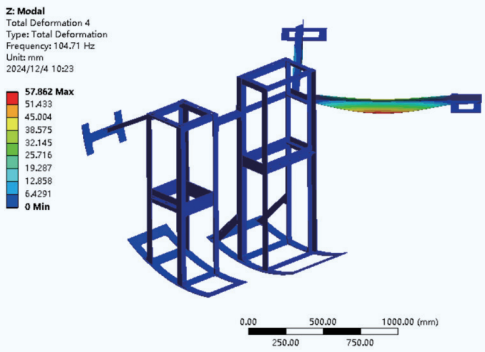



（b）二阶振型（84.462 Hz）

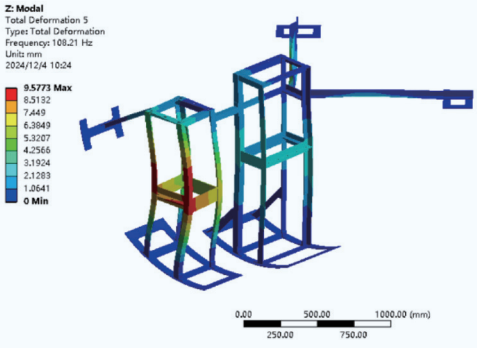
12: 高文英，林静，李宝筏，等 . 秸秆深埋还田机振动特性分析与结构优化 [J]. 吉林大学学报（工学版），2022，52（4）：970 — 980.



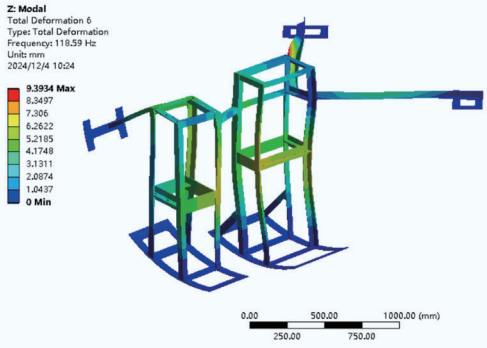

（c）三阶振型（101.04 Hz）




（d）四阶振型（104.71 Hz）




（e）五阶振型（108.21 Hz）




（f）六阶振型（118.59 Hz）

图7 机架前六阶振型云图

表3 前六阶振动频率和振动特性

| 阶次 | 频率 /Hz | 振动特性 |
|---|---|---|
| 1 | 78.37 | 机架整体沿 Y 向摆动 |
| 2 | 84.462 | 鼓风机机架沿 X 向摆动 |
| 3 | 101.04 | 末端支撑 1 沿自身支撑方向的扭转 |
| 4 | 104.71 | 末端支撑 2 沿自身支撑方向的扭转 |
| 5 | 108.21 | 鼓风机机架沿 Y 向摆动 |
| 6 | 118.59 | 鼓风机机架沿 Z 轴扭转、加热器机架沿 Y 向摆动 |

（2）两机架连接处应力集中情况严重，易使机架应力集中处焊缝发生疲劳失效。

（3）末端支撑抗振动性能较差，振动幅值较大，机架整体结构不够紧凑，占用空间过大，叶片根部空间有限，不便于后续维护工作开展。

（4）机架整体过高，抗振动性能较差。

围绕上述问题，进一步开展机架结构优化：

（1）为降低机架高度，去除鼓风机机架上半部分，将鼓风机和加热器的热风路径变为倾斜 30°布置，对加热器机架结构进行更改，降低加热器机架高度并将加热器固定面倾斜 30°，且在上半部分增加角钢支撑，使得上半部分为三角形平面结构，提高稳定性和承载能力，优化后新机架如图 8 所示。

（2）去掉末端支撑和侧面支撑，使机架结构更加紧凑，提高机架抗振动性能。

（3）由于鼓风机上半部分机架被去除，机架高度降低后两机架连接杆的支撑作用较小，因此可移除两机架连接杆，减少鼓风机振动的传递，提高机架整体抗振动能力。

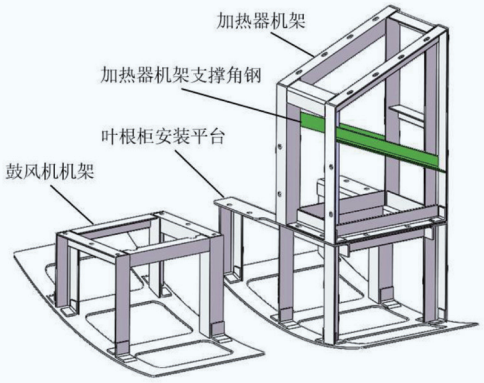



图8 新机架三维模型

优化后新机架质量为 55 kg，相比于原机架质量降低了 32.92%，质量降低后叶片的负载减小，极大降低了叶片损坏的风险。

**二、模态分析**

针对优化后新机架进行模态分析，校核其抗振动性能，避免共振。新机架前六阶固有频率如表 4 所示，机架优化后一阶固有频率为 116.49 Hz，相较于优化前升高了 48.64%，抗振动能力显著提高，前六阶固有频率均高于电机激振频率的 ±20% 区间（40~84 Hz），振动性能稳定，在工作状态中不会发生共振现象。

## 新机架拉力实验验证

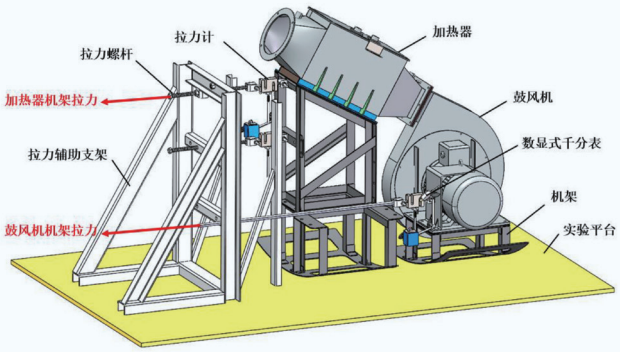
**一、新机架拉力实验**

开展新机架拉力实验，模拟机架实际工况下变形情况，保证其使用安全性。实验原理及现场布置如图 9 所示。机架底部和拉力辅助支架均与实验平台焊接，通过转动拉力螺杆减少机架与拉力辅助支架距离，则拉力螺杆会施加给机架水平拉力。实验中同时对鼓风机重心位置、加热器机架顶部位置施加水平拉力，拉力数据采用 AILIGU 艾力固拉力计测量，采用数显式千分表分别测量加热器机架和鼓风机机架顶端变形。为判断实验中机架是否出现明显塑性变形，实验前通过载荷预加载消除螺栓和焊接导致的残余应力，实验拉力释放后读取机架变形回零情况。

由于加热器与鼓风机相互连接，两者之间存在内力作用，实验加载时，任意一个机架的拉力调整都会引起连接处的内力变化，导致另一机架的实际拉力改变，使得两机架的拉力数值难以独立控制，故设计交替加载实验，对两机架分别施加线性增长的拉力值，并单独记录每次控制后的拉力数据。实验过程如下：先施加加热器机架拉力至 1000 N，保持拉力稳定，测得加热器机架变形量，为表 5 中第一组数据，而后施加鼓风机机架拉力至 1000 N，由于鼓风机与加热器连接处内力耦合影响，加热器机架处拉力

表4 新机架前六阶振动频率

| 阶次 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 频率 /Hz | 116.49 | 123.51 | 149.11 | 288.13 | 323.19 | 329.44 |




（a）拉力实验原理

（b）拉力实验现场布置

图9 新机架拉力实验

有所减小（减少至表 6 中 768 N），记录此时两机架拉力和变形量数据，为表 6 中第一组数据；再施加加热器机架拉力至 2000 N，同样鼓风机机架处拉力减小（减少至表 5 中 620 N），记录此时两机架拉力和变形量，为表 5 中第二组数据，以同样的方法增加鼓风机机架拉力至 2000 N，记录此时两机架拉力和变形量，为表 6 中第二组数据，以此采用不断交替的方法每次增加机架拉力 1000 N，所测控制鼓风机机架拉力值线性增长的变形量数据如表 5 所示，控制加热器机架拉力值线性增长的变形量数据如表 6 所示。当两机架拉力都增至 5000 N 后，卸载鼓风机机架拉力至 0 N，此时内力耦合导致加热器机架拉力增长至 5660 N，记录此时变形量为表 6 中第六组数据，后卸载加热器机架拉力，记录此时变形量为表 5 中第六组数据。两机架无拉力施加后加热器机架变形量仅为 0.184 mm，且多次实验后该数值未见明显变化。考虑机架螺栓连接处应力释放、拉力计的移动误差等情况，认为机架回零情况良好，未发生塑性变形。

**二、新机架安全性校核**

参照《风力发电机组 设计要求》（GB/T 18451.1—2022），荷载局部安全系数取 1.35，鼓风机机架重量为 15.5 kg，加热器机架重量为 39.5 kg，为进一步保证安全性，实验时取风电机组叶片转速 20 r/min，由表 1 参数可计算出鼓风机机架所受合力（机架和鼓风机所受离心力和重力）为 2422.2 N，加热器机架所受合力为 1993.9 N，故加热器机架和鼓风机机架取安全系数后实际工况下最大载荷分别为 2691.8 N、3270 N。参照《钢结构设计标准》（GB 50017—2017）和《机械设计手册》[13]，机架受侧向外载荷引起的扰度值 e0 与机架高度 L 应满足 e0/L ≤ 1/400，鼓风机机架高度为 315 mm，则鼓风机机架允许的变形扰度为 0.79 mm，加热器机架高度为 893 mm，则加热器机架允许的变形扰度为 2.23 mm。将表 5、表 6 中数据拟合后获得拉力与变形的线性关系，如图 10 所示。由图 10（a）可知，加热器机架受最大载荷 2691.8 N 时顶部最大变形量分别为 1.9272 mm 和 1.6424 mm，均小于 2.23 mm；由图 10（b）可知，鼓风机机架受最大载荷 3270 N 时顶部最大变形量分别为 0.7363 mm 和 0.6436 mm，均小于 0.79 mm，故两机架满足刚度设计要求。

在两机架拉力实验中拉力数值均远超于其实际工况下最大载荷，实验过程中，均未观察到加热器机架和鼓风机机架出现裂纹、变形、脆断等缺陷，且多次拉力实验数据均呈现出良好的线性关系，故机架未发生塑性变形，两机架均满足强度设计要求。

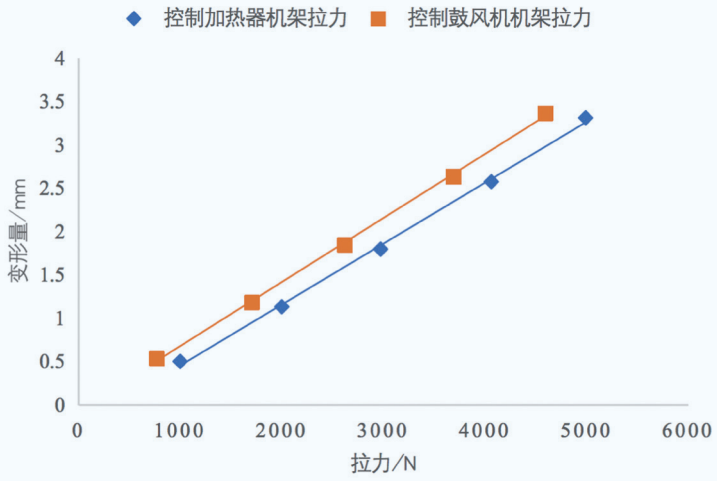
表5 控制加热器机架拉力下变形数据

| | 加热器机架 | | 鼓风机机架 | |
|---|---|---|---|---|
| | 拉力 /N | 位移 /mm | 拉力 /N | 位移 /mm |
| 1 | 1000 | 0.501 | 0 | 0 |
| 2 | 2000 | 1.131 | 620 | 0.196 |
| 3 | 2972 | 1.796 | 1540 | 0.378 |
| 4 | 4062 | 2.574 | 2448 | 0.570 |
| 5 | 4990 | 3.310 | 3483 | 0.780 |
| 6 | 6 | 0.184 | / | / |

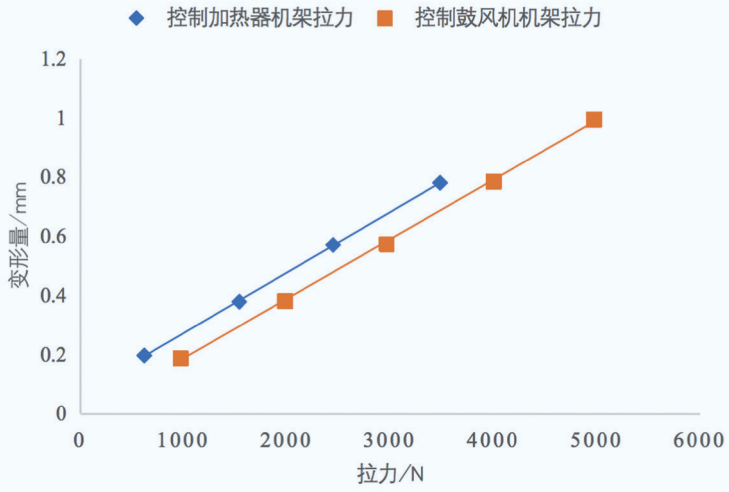
表6 控制鼓风机机架拉力下变形数据

| | 鼓风机机架 | | 加热器机架 | |
|---|---|---|---|---|
| | 拉力 /N | 位移 /mm | 拉力 /N | 位移 /mm |
| 1 | 970 | 0.188 | 768 | 0.536 |
| 2 | 1981 | 0.381 | 1701 | 1.182 |
| 3 | 2964 | 0.574 | 2617 | 1.845 |
| 4 | 4000 | 0.785 | 3686 | 2.635 |
| 5 | 4970 | 0.995 | 4591 | 3.367 |
| 6 | -9 | 0.270 | 5660 | 3.265 |

13: 成大先 . 机械设计手册 [M]. 北京：化学工业出版社，1969.




（a）加热器机架受力-变形关系




（b）鼓风机机架受力-变形关系

图10 新机架受力-变形线性关系

## 结论

本文针对所设计的新型风电机组内腔气热除冰系统承载机架进行了静力学和模态分析，并借助分析结果对机架结构进行了优化，研究方法和结论既具有重要的理论意义，又具有很好的工程应用价值，可为风电机组气热除冰方法中加热系统承载机架的设计和安全性分析提供参考。通过本文的研究可知：

（1）考虑机架实际工作环境，对机架进行结构优化后，新机架前六阶固有频率均高于电机激振频率共振范围，可有效避免加热系统工作时机架共振现象的出现，且机架质量降低了 32.92%，整体优化效果较明显。

（2）模拟机架服役实际工况的机架拉力实验结果表明，机架强度和刚度均满足要求。

**（作者单位：刘志龙，何兆伟，周国文：湖南拓天节能控制技术股份有限公司；唐典雅，王伏林，杨肖：湖南大学机械与运载工程学院）**

# 基于全过程视频监控技术的风电叶片陆上运输风险管控方案

文 | 周月红，楼昱昉，冯暄，袁一帆，刘国锋，杨帅

随着可再生能源的快速发展，风电作为重要的清洁能源之一，其装机容量不断增加，风电叶片运输的安全性和效率日益受到关注。风电叶片因其庞大的体积和特殊的运输要求，面临着多种风险，如物理损伤、环境影响及运输延误等。这些风险不仅可能导致经济损失，还可能影响整体风电项目的建设进度和运行效率。因此，开展有效的叶片陆上运输风险管控显得尤为重要。

目前，叶片在运输阶段的监控手段较少，通常是在叶片运输结束后，再对叶片进行验收。当检测人员接到叶片运损通报后，通常采用目视检验和敲击检验作为常规检查手段。近年来，超声波探伤等无损检测方法（NDT，Non-Destructive Testing）也逐渐得到推广[1]。目视检验和敲击检验成本较低，但在识别体积性缺陷方面存在局限，主要适用于表面开口缺陷和近表面缺陷。而超声波探伤虽然具有较高的检测灵敏度，适合于深层缺陷的检出，但其检验时间较长且成本较高。在运输过程安全性优化方面，仇戈等[2]为提高山地风电叶片运输的安全性，对叶片运输车组的稳定性进行了研究。该研究在特定的风载荷条件下，不断调整工装的举升角度、叶片的自转角度和工装的自转角度，观察到车组所受力及重心位置的变化趋势，通过改变配重块位置平衡工装举升引起的整车重心位置的改变，达到车组稳定的效果。但在该方法中，对车辆运输过程中的行驶速度及叶片摆放角度有一定要求，适用性不高。代朋[3]为了防止风电机组在设备运输和机械转场过程中发生事故，确保风电场的安全建设和高效施工，对山地风电场道路的设计、施工及运行中的风险因素进行深入研究。但该研究成本及周期较长，需要对大型设备运输进行专项论证，系统规划并全面考虑道路设计、设备制造设计及运输车辆等因素，以满足运输需求，确保运输的安全性、适用性和经济性。综合来看，现有研究多集中于运输车组的稳定性优化和道路设计改进，而对于叶片运输过程中的实时状态监测技术研究较少。因此，针对叶片陆上运输的监测需求，探索基于视频监控技术的叶片运输实时监测方法，可能成为进一步提升运输安全性和效率的重要研究方向。

此外，经调研发现，在叶片运输阶段使用的北斗定位系统虽能监控运输车辆的位置及行驶状态，但不能对叶片在运输过程中的状态进行可视化监控。这一盲区，无疑增加了叶片运输过程的风险，使得监管与追责难以实施。随着智能监控技术的发展，基于视频监控的运输过程实时监测方法逐渐应用于大型设备运输领域。通过部署多角度摄像头和智能分析系统，可实时监测叶片姿态、车组稳定性等关键参数，为运输安全提供有力保障。为了弥补叶片在运输阶段可视化监控的空白，本文提出一种基于全过程视频监控技术的风电叶片陆上运输风险管控方案。本方案旨在通过 AI 算法和视频监控技术，提供运输全程点对点管控，实现桨叶设备在运输过程中的在途管理，从而降低运输风险，提高监管效率，并为风电机组运输过程中发生的问题提供明确的追责依据。

## 叶片视频监控方案分析与设计

本文对比分析了三种不同的叶片运输监控方案，分别

1: 曹金祥，任彦忠，王鑫，等 . 关于目视、敲击和超声波联合探伤在风电叶片缺陷检验中的应用分析 [J]. 纤维复合材料，2017，34（2）：27 — 32.
2: 仇戈，赵佳虹，丛鲁兹，等 . 基于专用工装的山地风电叶片运输车组稳定性研究 [J]. 西华大学学报（自然科学版），2024，43（5）：36 — 46.
3: 代朋 . 山地风电场的道路设计及风电机组大部件的运输车辆应用 [J]. 运输经理世界，2023（14）：38 — 40.

是车载监控、传统实时监控以及基于 AI 识别算法的实时监控。车载监控方案主要通过部署标准摄像头，实现运输画面的实时录制，并自动保存至本地存储卡，其优势在于不依赖网络环境，降低了数据丢失的风险，但受限于存储容量，需要定期进行数据清理和备份。传统实时监控方案则使用高清摄像头和处理终端，将运输画面实时上传至服务器，保证了全程监控，但对网络依赖性强，易受网络问题影响，且运营成本较高。而基于 AI 识别算法的实时监控方案则通过智能高清摄像头和具备 AI 算法的处理终端，仅在检测到异常情况时上传视频数据，减少了数据上传量和存储成本，但同样存在网络依赖和误报率较高的问题。各视频监控方案对比见表 1。由表可知，三种方案均面临供电和信号传输的难点，如车载电瓶供电不稳定和信号覆盖不足导致的潜在数据丢失。综合考虑成本、效率和可靠性，本文在测试阶段选择基于 AI 识别算法的实时监控方案。该方案有着针对性的数据上传策略和较低的管理负担，被认为在实际应用中具有较高的实用价值。

本方案的核心是基于 AI 识别算法的实时监控系统，采用 YOLOv8 深度学习算法实现叶片状态实时检测。该算法具有高精度、低计算开销的优势，特别适合嵌入式设备部署。在模型训练阶段，收集多场景下的叶片运输视频数据，通过精细标注和超参数调优提升模型性能，并采用数据增强技术增强泛化能力。针对实际应用需求，对模型进行了剪枝和量化处理以优化运行效率。在运输过程中，系统实时处理视频流数据，通过 AI 模型逐帧分析叶片状态。当检测到异常时，系统立即触发报警机制，自动上传异常片段及相关信息（时间、位置、类型等），为风险管控和事故追溯提供可靠依据。另外，本方案采用支持 AI 功能的智能高清摄像头，具备高分辨率成像和低光环境适应能力，可清晰捕捉运输过程中的叶片状态。摄像头部署在车辆关键位置，实现全方位监控。系统处理终端配备高性能处理器和大容量内存，满足算法运行需求，同时集成高速网络接口和本地存储模块，既保障数据实时上传，又能在网络波动时缓存数据，确保传输完整性。

在设备安装方面，本方案创新性地采用磁吸式设备，解决了传统安装方式中信号线易缠绕、复杂工况下安装困难等问题。磁吸式设计兼具 IP67 级防水防尘性能和强磁吸附特性，能够适应恶劣环境并确保设备稳固性，同时简化了安装和维护流程。设备供电方面，采用 $LiFePO_4$（磷酸铁锂）电池替代传统车载电瓶供电，其高稳定性和长循环寿命有效解决了供电不稳定和断电风险问题。此外，针对带宽及服务器的需求，本方案通过优化视频编码和传输协议降低带宽占用，并采用高性能服务器确保数据实时上传和存储的稳定性。

## 叶片视频监控方案测试

为了验证基于全过程视频监控技术的风电叶片陆上运输风险管控方案的有效性，本研究进行了详细的测试，涵盖了设备安装、视频质量、异常检测准确性以及数据上传

表1 视频监控方案对比

| 方案 | 优势 | 劣势 | 共同难点 |
| --- | --- | --- | --- |
| 车载监控 | 本地记录：不依赖于网络环境，无网络中断导致数据丢失风险 | 数据存储限制：受限于设备容量，需要定期清理和备份数据 | 1. 供电：视频监控设备均采用车载电瓶供电，存在一定的断电风险；<br>2. 信号：受国家基础设施影响，在信号不稳定的地方容易出现数据丢失 |
| 传统实时监控 | 全程监控：查看运输的监控画面，满足即时性的要求 | 依赖于网络：网络出现问题时，实时监控会受到影响，可能导致数据延迟 | |
| 基于 AI 识别算法的实时监控 | 数据上传与存储量少：自动对运输画面进行分析，仅针对异常事件前后时刻的视频数据进行上传和存储 | | |

的稳定性和速度等方面。

**一、测试前设备准备及安装**

（1）设备准备：测试中使用了 3 路 1080p 高清摄像头及处理终端，设备包括车载主机、摄像头等，设备图例如图 1 所示。

（2）摄像头安装：本文方案将在运输车辆上安装 3 路摄像头，通过监控系统可查看桨叶不同位置的监控视频。如图 2 所示，具体分布分别是右侧车头朝后摄像头（监控桨叶右侧状态）、左侧车头朝后摄像头（监控桨叶左侧状态）和尾部朝后摄像头（监控桨叶叶尖状态）。

图1 设备图例

图2 摄像头安装示意

图3 主机电源线走线

（3）电源线和信号线安装：车载主机电源线采用 RVV 2 1.5 $mm^2$ 在车载电瓶直接取电，需确保正负极连接正确，主机到摄像机线缆采用定制长度成品线缆。主机有电源、ACC、地三根线，其中电源线接车载电瓶的正极，ACC 线接车辆点火开关控制的 ACC 电源，主机地线接车载电瓶的负极。主机电源线走线情况见图 3，在主机电源线的走线过程中，首先将主机设备箱沿着车身进行布线，直至连接到车载电瓶。在布线过程中，需确保电源线的走线路径平直顺畅，避免出现折叠、挤压或磨损等情况。同时，电源线应与车辆的弹簧线紧密缠绕在一起，以增强布线的稳定性。此外，布线路径应尽量避开车辆的遮挡物，防止电源线受到不必要的挤压或干扰，确保电源线能够安全、稳定地连接到车载电瓶处。

在主机电源线、摄像机线、摄像机延长线等线束与主机完成连接后，需将线束接口上配置的防退“环形硅胶圈”推入至对应安装位置，以防止后续因车辆运行过程中的振动导致固定螺母松脱，进而避免线束与一体机脱落分离（图 4）。此外，信号线的走线路径应尽量避开高温、潮湿或易受机械损伤的区域，确保信号传输的可靠性和设备的长期稳定运行。

（4）SIM 卡和硬盘安装：使用工业级物联网 SIM 卡（MP2 标准），确保 4G 信号的稳定性。车载主机配备车载视频专用固态硬盘，用于存储视频数据。

以上各项工作中需要用到的工具如表 2 所示。

**二、测试方案**

叶片运输视频监控的实际场景测试重点验证了磁吸式摄像头在复杂路况下的安装稳固性、不同环境中的视频采集质量、异常检测算法的准确性，以及数据传输的稳定性等关键性能指标。

1. 安装稳固性测试（复杂路况验证）

在模拟实际运输的复杂路况下，通过多种动态场景综合验证磁吸式摄像头的安装稳固性。测试车辆以不同速度（30 km/h、60 km/h、80 km/h）通过碎石路、减速带等颠簸路段，观察摄像头在持续振动下的抗位移能力，同时进行急加速、急刹车测试，记录摄像头在惯性作用下的偏移情况，确保吸附力满足动态稳定性要求。在 S 形弯道和急转弯路段，验证摄像头在离心力作用下的固定可靠性，并模拟雨天等天气环境，检查磁吸底座的防滑和防锈性能。所有测试均需确保摄像头在复杂工况下无松动、脱落或角

度偏移，位移量控制在 ±2 mm 以内，符合 ISO 16750-3 标准对车载设备抗振性能的要求。

2. 视频质量测试

（1）白天测试：在白天光照充足的条件下，测试摄像头的视频清晰度和覆盖范围。具体测试方法是将摄像头对准叶片的各个关键部位，如叶片的边缘、表面（重点关注纹理特征）、连接部位等，通过实时监控系统查看视频画面。在不同距离和角度下，观察叶片细节的呈现情况，确保视频画面清晰，能够准确捕捉叶片的姿态和状态。同时，可以将标准的清晰度测试卡（如分辨率测试卡）放置在叶片附近，通过监控画面查看测试卡上的线条和图案是否清晰可辨，以此来量化评估摄像头的清晰度。此外，还需调整摄像头的安装位置和角度，确保其能够完整覆盖叶片的各个部位，包括叶片的根部、中部和叶尖等关键区域，通过实时监控系统查看监控画面，检查是否存在监控盲区，确保摄像头的覆盖范围满足运输监控的需求。

（2）夜晚测试：在夜间光照不足的条件下，测试摄像头的夜视功能。通过红外补光技术，确保夜间视频画面清晰，能够有效监控叶片的运输状态。

3. 异常检测准确性测试

（1）AI 识别算法测试：AI 识别算法测试基于 AI 识别算法的实时监控系统能够自动分析运输画面，仅在检测到异常情况时上传视频数据。为了验证系统的异常检测准确性和响应速度，测试中模拟了多种异常情况，例如通过人为晃动叶片模拟叶片晃动情况，利用车辆在不平整路面行驶来模拟车辆颠簸，以及安排人员或物体在车辆行驶过程中靠近叶片模拟外部物体接近的情况。在模拟这些异常情况的同时，监控系统的 AI 识别算法实时分析运输画面，记录系统检测到异常并上传视频数据的时间点，以此评估系统的响应速度。

（2）误报率测试：对比实际模拟的异常情况与系统检测结果，统计系统准确检测异常的次数和误报的次数，从而计算出异常检测的准确率，确保系统能够在实际运输过程中可靠地识别并及时响应各类异常情况，为风电叶片的运输安全提供有效保障。

4. 数据上传稳定性测试

（1）网络信号测试：测试选取了浙江风电临平基地至舟山项目堆场这条网络覆盖良好的运输路线。测试中通过 4G 网络实时上传视频数据，并采用专业监测工具实时跟踪带宽、丢包率和延迟等关键指标。全程记录各路段信号强度及上传速率，特别在隧道等信号盲区模拟网络波动，验证系统自动切换备用网络和数据缓存的能力，确保数据传输的连续性和完整性。

（2）带宽和服务器测试：为确保在发货高峰期能够处理大量视频数据的上传和存储，进行了详细的测试。首先，

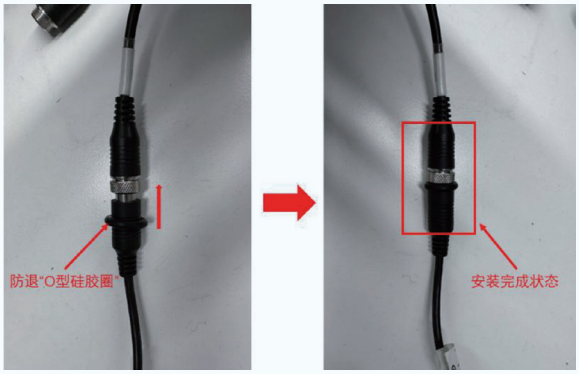



图4 环形硅胶圈安装

表2 设备安装工具

| 名称 | 作用 | 实物图 |
| --- | --- | --- |
| 4G SIM 卡（移动、联通或电信） | 与平台通信时，必须配置 4G 通信模块 | |
| 电笔 | 测试电线中是否带电 | |
| 十字 / 一字螺丝刀 | 安装及走线过程中需用 | |
| 数字万用表 | 找电源正负、脉冲、ACC 等，测电压值及是否短路 | |
| 绝缘胶带 | 用于包扎线头 | |
| 扎带 | 固定走线 | |
| RVV 导线 | 通用型，用于连接车辆电源线到一体机上，确保导线截面积满足电流负载要求，并做防水、防震处理 | |

通过优化视频编码和传输协议，降低视频数据的带宽占用。在测试过程中，模拟发货高峰期的高流量场景，同时上传多路高清视频数据至云存储平台，实时监控带宽利用率和数据传输速度，以确保在高负载下仍能保持稳定的数据传输。此外，部署了高性能服务器，并对其进行了压力测试。模拟大量视频数据同时上传和存储的情况，监测服务器的CPU 使用率、内存占用率以及存储系统性能（包括磁盘读写速度和并发处理能力）等关键指标，确保服务器在高负载下能够稳定运行，不会出现数据丢失或延迟过高的问题。

**三、测试结果分析**

测试结果显示，1080p 高清摄像头在白天和夜晚均能提供清晰的视频画面，能够有效监控叶片的运输状态，实际场景（白天和夜晚）下的测试效果如图 5 和图 6 所示。

测试结果显示，视频监控系统在白天和夜晚均能提供清晰的视频画面，能够准确捕捉叶片的姿态和状态。尤其是在夜间，通过红外补光技术，监控效果显著优于传统实时监控。这是因为红外补光技术能够在低光照或无光照的条件下，为摄像头提供稳定的光源，确保摄像头能够捕捉到清晰的图像。这种技术有效解决了传统实时监控系统在夜间因光照不足而导致画面模糊、细节丢失的问题，从而提高了监控的可靠性和准确性。此外，红外补光技术还能够减少夜间监控中的光污染，避免对周围环境造成不必要的干扰，进一步提升了监控系统的实用性和环境适应性。此外，AI 识别算法能够分析叶片运输画面，并仅在检测到异常情况时才上传视频数据，从而减少了数据上传量和存储成本，同时提高了异常检测的准确性和响应速度。在测试过程中，对 AI 识别算法的性能进行了详细评估。结果显示，在正常运输条件下，AI 识别算法能够准确识别多种异常事件，例如叶片晃动、车辆颠簸等，其准确率达到了 95% 以上。然而，在复杂环境下，如隧道内或信号不稳定区域，算法的误报率有所上升，大约为 10%。这表明，尽管 AI 识别算法在大多数情况下表现出色，但在特定复杂场景下仍需进一步优化以降低误报率。

从本次测试结果来看，基于 AI 识别算法的实时监控在数据流量费用、存储空间、上传速度方面均有较大的提升。传统实时监控方案单趟运输需耗费约 170 G 的数据流量和存储空间，而基于 AI 识别算法的实时监控方案仅需约 50 G，这使得数据流量费用和存储成本显著减少，同时也降低了对存储设备容量的要求，提升了整个监控系统的经济性和实用性。在数据上传速度方面，基于 AI 识别算法的实时监控方案表现出色。由于仅在检测到异常情况时才上传相关视频数据，数据量大幅减少，因此上传速度更快且更稳定。即使在网络条件一般的区域，也能保证数据的及时上传，避免了因网络拥堵或不稳定导致的数据延迟或丢失，从而提高了监控系统的实时性和可靠性。详细对比如表 3 所示。

基于 AI 识别算法的实时监控方案在视频复核环节也具有明显优势。AI 算法能够自动识别异常事件并进行标记，减少了人工复核的工作量。此外，为了评估方案的经济可行性，也进行了详细的成本预估（表 4）。成本包括设备购置费用、安装费用、运营成本（包括数据流量费用和云存储费用、维护费用以及人工成本）。预估结果显示，与传统实时监控方案相比，虽然购置费用、设备安装费用等差距不大，但基于 AI 识别算法的实时监控能够显著降低长期运营成本，同时保持了监控的有效性。

为了进一步提升风电叶片运输监控的效率和便捷性，开发一个集中的视频监控系统平台（图 7）。该系统平台将

图5 白天测试效果

图6 夜晚测试效果

表3 方案流量及存储空间对比

| 方案名称 | 耗费流量 | 存储空间 |
| --- | --- | --- |
| 传统实时监控 | 约 170 G | 约 170 G |
| 基于 AI 识别算法的实时监控 | 约 50 G | 约 50 G |

表4 方案成本对比

| 方案名称 | 硬件成本（每套） | 运营成本（单趟） |
| --- | --- | --- |
| 传统实时监控 | 约 4500 元 | 约 1000 元 |
| 基于 AI 识别算法的实时监控 | 约 4700 元 | 约 600 元 |

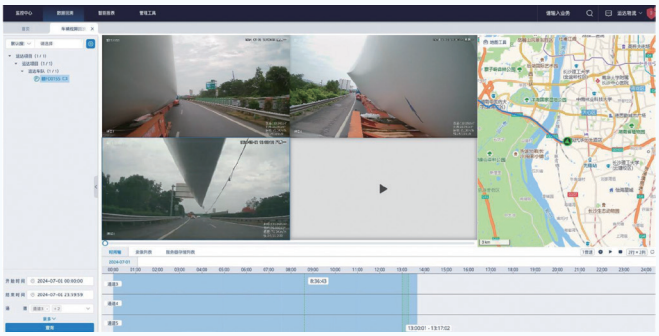


图7 视频监控系统平台

集成实时视频流、历史视频存档、异常事件警报和数据分析等功能，使得监控人员可以远程实时查看叶片运输状态，及时响应潜在风险。平台还将支持多用户访问和权限管理，确保数据安全和操作便捷。此外，通过集成先进的图像识别算法，平台能够自动识别和标记潜在的运输损伤，减少人工审核的工作量，提高监控的准确性和响应速度。

## 结论

本文针对风电叶片陆上运输过程中的风险管控问题，提出了一种基于 AI 识别算法视频监控技术的风电叶片陆上运输风险管控方案。相比于车载监控、传统实时监控，其在降低成本、提高监控效率以及减少数据流量和存储需求方面具有显著优势。实际测试结果进一步验证了该方案在异常检测准确性和响应速度方面的可靠性，同时，成本预估分析也显示了其在经济性方面的优势。尽管如此，该方案也存在一定的局限性。例如，基于 AI 识别算法的实时监控方案在网络不稳定的区域可能面临数据上传延迟的问题，而误报率的控制也有待进一步提高。未来可以在以下几个方面进行深入探讨：首先，探索更先进的图像识别算法以降低误报率；其次，研究如何在网络不稳定环境下保证数据的实时性和完整性；最后，考虑将该方案与其他风险管控措施相结合，如运输路径优化、车辆维护管理等，以实现更全面的风电叶片运输风险管理。

总体而言，本研究提出的基于全过程视频监控技术的风电叶片陆上运输风险管控方案，为风电行业提供了一种新的运输监控思路，有助于提高风电叶片运输的安全性和效率，降低运输过程中的风险，对促进风电行业的健康发展具有重要意义。随着智能监控技术的不断发展，相信基于 AI 的视频监控技术将在风电叶片运输领域得到更广泛的应用，并为其他大型设备运输提供借鉴。

**（作者单位：运达能源科技集团股份有限公司）**

# 风电机组高速轴刹车测温系统研究及应用

文 | 许力伟，宋建秀，何志强，叶伟，王家华

据不完全统计，2010—2020 年国内公开报道的风电机组火灾事故约 30 起，其中，由机械过热导致的风电机组烧毁占比达到 20%，单次事故经济损失可达数百万至上千万元（含机组更换、停机损失等）。风电行业内正不断加强预防技术研发，通过升级技术来完善和降低风险：国家能源局在《关于印发 < 防止电力生产事故的二十五项重点要求 > 的通知》（国能安全〔2014〕161 号）中对于“防止风力发电机组着火事故”，明确要求“严格监控设备轴承、发电机、齿轮箱及机舱内环境温度变化，发现异常及时处理”。中国华电等业主单位要求“在刹车盘安装测温装置，信号接入主控系统”。

目前尚无公开发表的关于风电机组高速轴刹车测温控制技术研究和应用的文献记录，研究内容最接近的是对风电制动盘机械结构或热耦合的研究，以及少量关于汽车刹车盘测温报警装置的研究，前者主要应用于风电制动盘的设计和生产，后者并没有在风电行业内应用，因此风电机组高速轴刹车测温系统的研究工作尚处于行业空白。文献[1]主要研究风电机组主轴制动盘制动过程的温度场情况，研究成果表明在紧急制动时瞬时温度可达到 600℃以上，而风电机组主轴制动器附近一般安装了齿轮箱、液压站等内部存储了易燃油脂的部件，持续高温极易引燃润滑油脂，造成风电机组着火等严重后果，必须在主轴制动盘的早期制动过程中及时探测温度升高的情况，控制风电机组进行顺桨停机，但是该文献并没有进行相关的研究。另外，文献[2-4]对大兆瓦风电制动器的制动盘 / 闸片制动过程的热 - 结构耦合进行分析，但是对风电机组主轴制动器制动盘的温度探测、主控系统监测制动盘温度信号后如何进行控制没有进行探索和应用验证。文献[5]从风电机组控制设备收桨停机方面及设备巡检、运维的维度对风电机组的运行安全进行研究，没有对制动器制动过程产生的高温可能导致机组着火、未检测制动器异常高温状态导致机组停机不及时等情况进行深入研究。文献[6]对盘式制动器电阻式实时报警装置进行了研究，但是解决的是汽车盘式制动器摩擦片剩余厚度的检测问题。

为解决风电机组高速轴高温导致的风电机组火灾问题并避免巨额经济损失，不断提升风电机组预防技术，本文主要探讨风电机组高速轴刹车测温与机组安全控制技术，包括测温系统的选型分析，以及测温传感器探测到主轴制动盘温度升高的异常情况后，如何通过主控系统采取高效的安全控制策略实现快速停机。

## 高速轴刹车测温系统的系统架构

高速轴刹车测温系统的硬件系统构成主要有高速轴刹车、在线式测温传感器、风电机组主控系统，如图 1 所示。

其中，高速轴刹车主要由制动器和刹车制动盘（下称“刹车盘”）组成。制动器安装在齿轮箱高速轴端的箱体上，用于高速轴的机械制动，包括风电机组在正常运行时的紧急

1: 刘莹，宋涛 . 风电主轴盘形制动器温度场的数值模拟 [J]. 机械设计，2015，32（4）：105 — 109.
2: 刘楠 . 大兆瓦风电制动器制动盘 / 闸片热 - 结构耦合仿真研究 [D]. 大连交通大学，2017.
3: 沙智华，刘楠，刘宇，等 . 兆瓦级风电制动器热 - 结构耦合仿真研究 [J]. 大连交通大学学报，2016，37（6）：66 — 71.
4: 尚振国，蔡卫国，高吭，等 . 风电盘式制动器温度场有限元分析 [J]. 机械工程师，2018（8）：1 — 3+6.
5: 梁宏 . 风力发电机组运行安全分析与控制措施 [J]. 河南科技，2013（17）：104 — 105.
6: 孙文文 . 盘式制动器电阻式实时报警装置研究 [J]. 科技视界，2019（27）：64 — 65.

制动、在停机时的制动保持。风电机组控制主轴刹车时通过建立及释放液压力来控制制动器上的摩擦片夹紧刹车盘，从而对刹车盘产生制动力矩，使旋转的主轴停转，或防止静止的主轴旋转。

## 测温传感器技术选型分析

文献[2]的研究表明，双馈风电机组制动器动作时，摩擦区域内的温度最高点位于高温带最宽的区域内，即刹车盘与摩擦片滑出的区域，瞬时最高温度在 600℃以上，因此测温传感器可探测的温度范围应至少包络该最高温度值，并有一定裕度。目前行业内适用风电机组的在线式测温传感器主要有红外测温传感器、铂热电阻 Pt100 传感器、带热成像功能的视频监控传感器等。本文根据市场上已有工业传感器，总结不同在线式测温传感器的主要特点及影响因素如表 1 及表 2 所示。通过对比表 1 和表 2 可知，红外测温传感器安装简单、物料成本低、探测温度范围宽及信号输出简单，是高速轴刹车测温系统接入主控系统的最优方案。

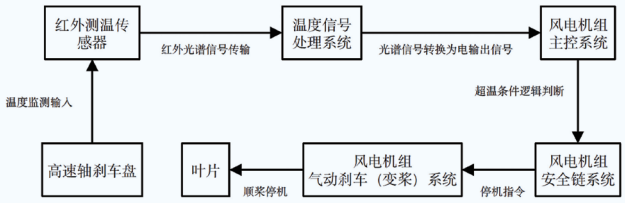



图1 双馈风电机组高速轴刹车盘测温系统

## 高速轴刹车盘测温传感器的技术原理

在线式红外测温传感器的技术原理是通过测量对象发射的红外辐射强度计算出物体的表面温度，通过在线式红外测温传感器的光学系统汇聚其视场内的目标物体红外辐射能量，将红外能量聚焦在光电探测器上并转变为线性映射关系的信号，经过信号处理和控制软件转换计算为被测

表1 不同在线式测温传感器的主要特点

| 传感器类型 | 主要特点 |
| --- | --- |
| 红外测温传感器 | 1. 原理：通过测量被测对象发出的热红外波段（8～14 μm）的光来计算出物体的表面温度；<br>2. 检测范围：－50～1000℃；<br>3. 输出信号：0～20 mA、4～20 mA、0～10 V 等；<br>4. 精度：较高；<br>5. 响应时间：快；<br>6. 安装：无需接触被测对象；<br>7. 成本：适中 |
| 铂热电阻 Pt100 传感器 | 1. 原理：铂热电阻 Pt100 的阻值会随着温度上升而匀速增大；<br>2. 检测范围：－200～850℃（近似线性曲线）；<br>3. 输出信号：经信号变送器后可转换输出 0～20 mA、4～20 mA、0～10 V 等信号；<br>4. 精度：较高；<br>5. 响应时间：快；<br>6. 安装：需要与被测对象接触安装；<br>7. 成本：适中 |
| 热成像视频监控传感器 | 1. 原理：与红外测温传感器类似，同时热成像传感器把热辐射转化为灰度值，再利用各物体的灰度值差异来成像，从而发现和识别目标；<br>2. 检测范围：－50～1000℃；<br>3. 输出信号：可见光或热成像视频信号，并可定制其他输出信号类型；<br>4. 精度：较高；<br>5. 响应时间：快；<br>6. 安装：无需接触被测对象；<br>7. 成本：高 |

表2 不同测温传感器方案的影响因素对比

| 影响因素 / 传感器类型 \ 传感器 | 红外测温传感器（方案一） | 铂热电阻 Pt100 传感器（方案二） | 热成像视频监控传感器（方案三） |
|---|---|---|---|
| 安装难度 | 非接触式，较简单，外部新增简易支架即可安装 | 接触式，安装困难，需要在摩擦片打孔并要求贴合程度较高，摩擦片在抱闸 - 松闸工作过程中可能导致传感器松动 | 非接触式，较简单，但可见光信号在灰尘严重时受影响较大，可能影响温度监测的准确性 |
| 物料成本 | 低 | 低 | 高 |
| 探测温度范围 | -50 ～ 1000℃<br>满足要求 | -200 ～ 850℃<br>满足要求 | -50 ～ 1000℃<br>满足要求 |
| 信号输出 | 0 ～ 20 mA；4 ～ 20 mA；0 ～ 10 V 等信号 | 增加信号转换器，可输出 0 ～ 20 mA；4 ～ 20 mA；0 ～ 10 V 等信号 | 较复杂，需将可见光或热成像视频信号进行转换 |

对象的温度值。

本文搭建的高速轴刹车测温系统采用了某公司的 TAC-IS-T1030 型在线式红外测温传感器，该系统可用于测量高速旋转的高速轴刹车盘温度。TAC-IS-T1030 型在线式红外测温传感器采用 24 VDC 电源供电、4 ～ 20 mA 线性输出信号，光谱范围 8 ～ 14 μm，可测量覆盖 -30 ～ +800℃的温度范围，测量精度为测量值的 ±2% 或 ±2℃。该红外测温传感器的线性输出电流信号与高速轴刹车盘温度的关系可通过下式进行计算：

$$I=(T+70)\times K+4 \quad (1)$$

式中，I 是在线式红外测温传感器的线性输出电流信号（mA）；T 是高速轴刹车盘的实测温度（℃）；K 是传感器的转换常数，该常数值为 0.035555。

## 风电机组高速轴刹车测温系统的实施方案

风电机组高速轴刹车测温系统的实施内容包括传感器等器件的安装、主控系统信号接入、控制程序功能实现、远程监控系统 SCADA 优化等。整体实施方案如下：红外测温传感器探头对高速轴刹车盘温度进行实时监测，输出 4 ～ 20 mA 信号接入到主控系统的模拟量输入模块，主控系统采集高速轴刹车盘温度信息，同时在控制策略中充分考虑温升、转速、温升时长等关联因素进行综合判断，发现异常时触发相应警告和故障，并控制风电机组安全停机。高速轴刹车测温系统通过实时监测刹车盘温度值，执行风电机组保护机制，能够有效预防风电机组高速轴刹车盘火灾事故的发生。

### 一、高速轴刹车测温系统安装施工

高速轴刹车测温系统的安装施工，主要包括红外测温传感器和防雷器等器件的安装。

红外测温传感器的安装位置位于双馈风电机组机舱内的滑环上方，传感器探头应正对高速轴刹车附近的刹车盘，确保高速轴刹车时能够采集到最高温度区域的温度信息，另外这样的安装方式使得传感器的信号电缆位于联轴器罩的保护范围之内，减少高速轴刹车时的高温等影响。红外测温传感器支架的安装如图 2 所示，使用两个 M8 螺栓将传感器支架固定在联轴器保护罩预先设计的通孔上，确保传感器支架安装紧固。

红外测温传感器支架安装完成后，将传感器安装到传感器支架的 U 型孔上，调节合适的传感器高度和探头距离后，使用扳手等工具拧紧传感器自带紧固件即可。传感器支架的 U 型孔根据红外测温传感器的外径大小进行设计，应方便调节传感器的安装高度和探头距离。为了减少高速轴刹车时高温的影响，同时保证高速轴刹车盘的实时温度采集准确，根据已实施项目的验证结果，安装传感器探头与刹车盘的距离以 10 ～ 20 cm 为宜。

防雷器用于保护主控系统在接入温度信号时避免浪涌电压的影响。防雷器安装在机舱控制柜的水平 DIN 导轨

NS35 上，符合《低压开关和控制设备尺寸 开关和控制设备中电气装置的机械支持导轨的标准化安装》（EN 60715—2001）的要求。

## 二、高速轴刹车测温信号接入主控系统

高速轴刹车测温信号接入主控系统主要包括传感器电缆的机舱布线、防雷器接线、主控系统模拟量输入模块接线。由于目前 1.5 MW 双馈机型存量大、对高速轴刹车测温功能的改造需求最迫切，本文以某项目的该机型为例进行介绍，其电路原理如图 3 所示。其中模拟量输入模块及其输入信号点位可根据不同双馈风电机组的实际情况进行调整。

传感器电缆机舱布线包括：传感器电缆经阻燃护套管保护后，按照机舱滑环－机舱电缆桥－机舱控制柜的布线路径进行布线，按照《电气装置安装工程 电缆线路施工及验收标准》（GB 50168—2018）的要求，弯曲半径不小于四倍电缆外径，传感器电缆穿过机舱控制柜底部的电缆接头，进入机舱控制柜内部，按工艺要求剥开传感器电缆的外护套后，将电缆屏蔽层压接到机舱控制柜的屏蔽接地排，导线按照电气接线工艺要求进行压接，所使用的压接端子符合《低压开关设备和控制设备》（GB/T 14048.1—2023）标准要求。

防雷器接线按照图 3 的要求，在防雷器的线路端和设备端完成电气接线，其中电缆线芯和导线按照电气接线工艺要求进行端子压接。

传感器信号的线路经过防雷保护器接入主控系统的模拟量输入模块，模拟量输入模块的接线点位按照图 3 要求

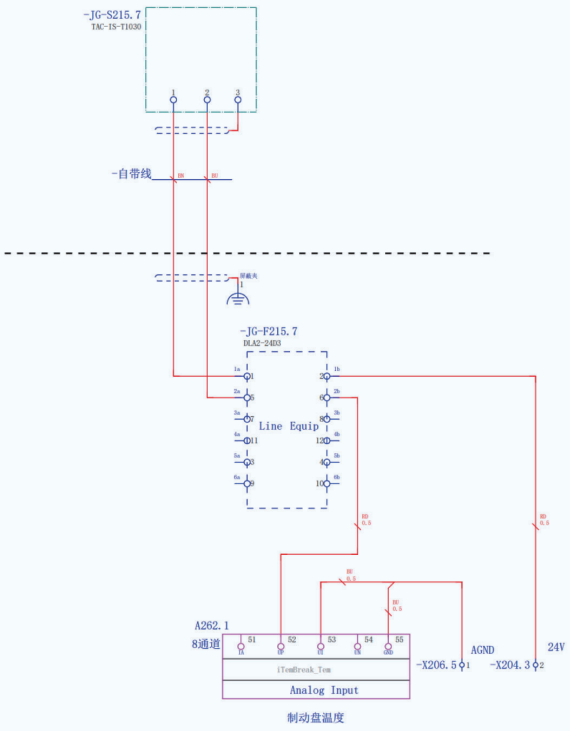



图3 高速轴刹车测温系统电路原理

进行接线。传感器为两线制的信号线，其中一根传感器信号线连接至机舱控制柜的 24 VDC 电源正极端子（24 V），另一根接至模拟量输入模块的 AI+ 输入端子；模拟量输入模块的 AI- 及 GND 端子与机舱控制柜的模拟信号地端子（AGND）连接，保证高速轴刹车测温传感器信号的参考电位符合要求。

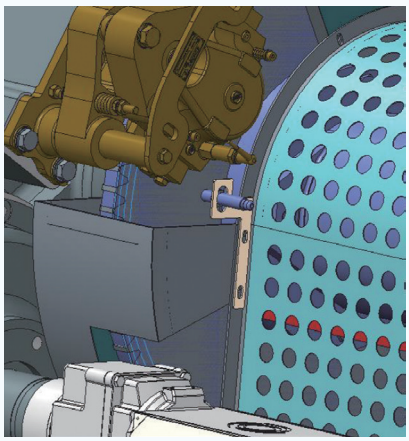


图2 高速轴刹车红外测温传感器安装示意

## 三、高速轴刹车测温系统控制程序实现

高速轴刹车测温系统还需要通过主控系统的安全控制策略进行快速停机，从而降低高速轴刹车盘的温度，因此，其控制功能及算法通过主控系统的 PLC（可编程逻辑控制器）来完成。本文采用基于 SolutionCenter 软件编译环境的巴赫曼 PLC，支持使用《可编程控制器 - 第 3 部分：编程语言》（IEC 61131-3）标准下的多种工程编程语言以及 C/C++ 编程语言生成可执行文件。高速轴刹车测温系统的控制功能主要包括测温信号处理和超温停机控制、状态显示等。

测温信号处理功能是指将 PLC 模拟量输入模块采集的高速轴刹车测温传感器信号进行滤波和解析处理，经过滤波和解析处理后的测温信号可用于超温停机控制和状态显

示。本文采用的测温信号模拟量输入模块的硬件采样和刷新时间为 1 ms，软件滤波器设置滤波为 1 kHz。模拟量输入模块的输入信号类型选择 0 ～ 20 mA 电流信号，由上文关系式（1）可知，高速轴刹车盘的实际温度值与电流信号的映射关系可由下式得到：

$$T=(I-4)/K-70 \quad (2)$$

超温停机控制功能是指实时监测的高速轴刹车盘温度值超出保护阈值后，风电机组主控系统进行停机控制。刹车盘在停机后热量耗散时间较长，而且急速降温对刹车盘的机械性能会产生不利影响，因此本文不考虑停机后的降温处理。高速轴刹车测温系统的停机控制流程的各保护定值设置如表 3 所示。高速轴刹车盘的温度数据经过采集和处理后，由超温停机控制算法进行判断：（1）如果温度值 T ＞ T0，主控系统报出“刹车盘超高温故障”，并触发紧急顺桨停机；（2）如果 T ≤ T0 则进行下一步判断，如果温度值 T ＞ T1 且持续时间 t 超过 t1，主控系统报出“刹车盘超高温故障”，并触发紧急顺桨停机；（3）如果 T ≤ T1 则进行下一步判断，如果温度值 T ＞ T2 且持续时间 t 超过 t2，主控系统报出“刹车盘过温警告”，由值班人员根据实际进行检查和处理；（4）如果温度值 T 在正常范围内，则不触发高速轴刹车测温系统的超温停机控制功能，风电机组正常运行。

高速轴刹车盘的实时温度值、系统故障和报警信息等状态显示在风电机组 HMI（人机界面）及远程监控系统（SCADA），运行数据及故障信息同步记录在远程监控系统。

## 现场数据验证

在某风电场 1.5 MW 双馈风电机组上完成高速轴刹车测温系统技术改造后，对其进行实例测试验证。由于风电机组高速轴多次测试紧急刹车后，刹车盘容易受热变形，从而发生安全风险，为了保证设备和测试人员的安全，采用了模拟热源方式触发刹车盘超温事件。模拟热源的加热设备选用加热功率可达 3 kW 的工业级热风枪，最高加热温度可超过 400℃，具备多档加热功能，测试时安装在被测刹车盘区域的附近；模拟刹车盘摩擦生热的升温方法是使用热风枪对刹车盘进行快速加热，通过调整热风枪的加热档位和加热时长，可以快速控制刹车盘表面升高的温度值。本文的研究重点是高速轴刹车的温度监测及超温停机控制，而不是研究紧急刹车后刹车盘的温度特性，因此本测试方法不会影响高速轴刹车盘测温系统的功能及特性测试结果。

控制外部热源快速升温加热并持续 3 s，传感器监测高速轴刹车盘温度达到 130℃并超过 I 级保护阈值 120℃，控制系统报 186 故障（即刹车盘超高温故障），风电机组快速

表3 高速轴刹车测温系统保护定值设置

| 保护定值名称 | 保护定值定义 | 某 1.5 MW 机型典型设定值 |
|---|---|---|
| T0 | 高速轴刹车盘温度 I 级保护阈值 | 120℃ |
| T1 | 高速轴刹车盘温度 II 级保护阈值 | 100℃ |
| T2 | 高速轴刹车盘温度III级保护阈值 | 90℃ |
| t1 | 高速轴刹车盘温度 II 级保护时限 | 1000 ms |
| t2 | 高速轴刹车盘温度III级保护时限 | 3000 ms |

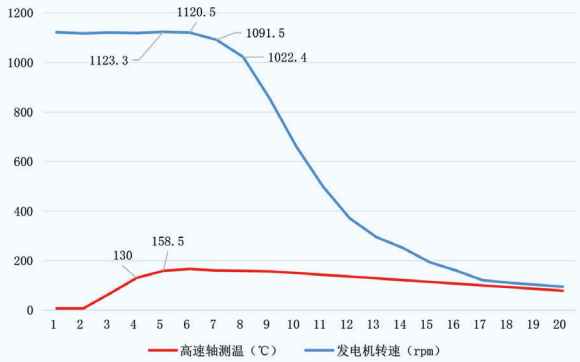



图4 高速轴刹车盘温度超120℃报警测试实例-发电机转速

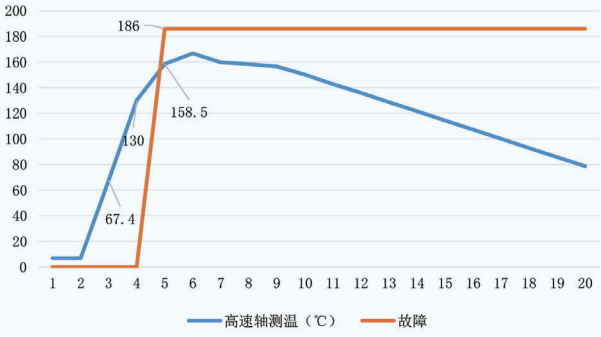



图5 高速轴刹车盘温度超120℃报警测试实例-故障信息

顺桨停机，测试结果如图 4 和图 5 所示。当外部热源停止加热后，刹车盘的热量耗散较慢，高速轴刹车盘温度不会瞬间降低。当触发刹车盘超高温故障后，风电机组能够快速停机，即可验证高速轴刹车盘测温系统具备了设计要求的保护功能。

调低外部热源加热温度，控制升温加热并持续 5 s，传感器监测高速轴刹车盘温度达到 105℃并超过 I 级保护阈值 100℃，1 s 后控制系统报 186 故障（即刹车盘超高温故障），风电机组快速顺桨停机，测试结果如图 6 和图 7 所示。

继续调低外部热源加热温度，控制升温加热并持续 5 s，传感器监测高速轴刹车盘温度达到 90.2℃并超过 I 级保护阈值 90℃，3 s 后控制系统报 190 警告（即刹车盘过温警告），测试结果如图 8 和图 9 所示。该情况下需要由值班人员根据实际情况进行处理，可远程控制风电机组顺桨停机。

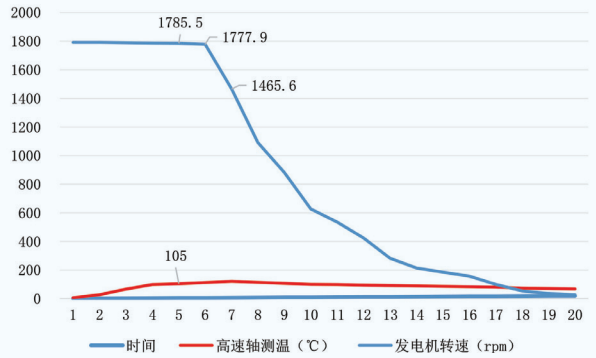



图6 高速轴刹车盘温度超100℃（1 s）报警测试实例-发电机转速

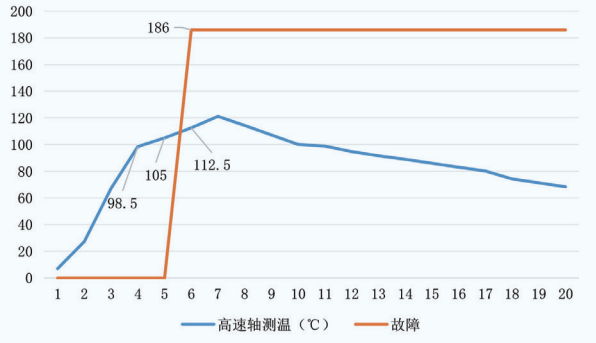



图7 高速轴刹车盘温度超100℃（1 s）报警测试实例-故障信息

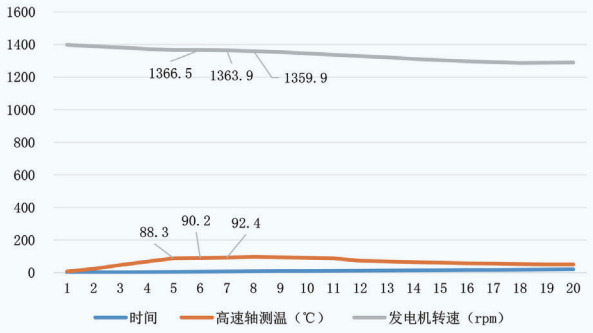



图8 高速轴刹车盘温度超90℃（3 s）警告测试实例-发电机转速

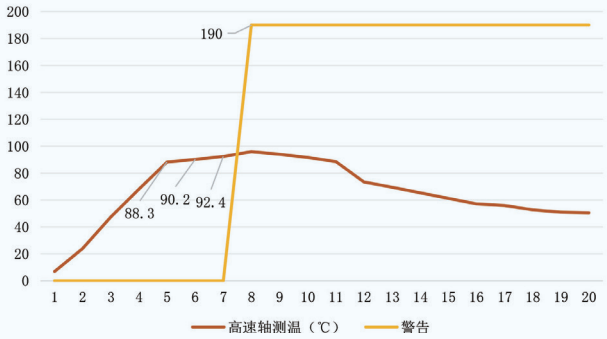



图9 高速轴刹车盘温度超90℃（3 s）警告测试实例-警告信息

通过以上外部模拟热源触发刹车盘超温的方式，测试结果验证了高速轴刹车盘测温系统在高速轴刹车盘温度超过预设保护定值时，能够精准监测温度信息并执行超温停机控制策略，系统性能满足要求。

## 结论

本文综述了高速轴刹车测温系统的技术原理，并在某型 1.5 MW 双馈风电机组上实施了装机试验。根据现场装机运行结果，高速轴刹车测温系统工作正常，功能和性能均满足要求，目前已在新疆、云南、江苏等多地的多个双馈风电机组机型上应用。高速轴刹车测温系统对双馈风电机组防范高温起火、超速飞车等安全性风险具有重大意义，未来将在大兆瓦双馈风电机组上进行推广，进一步保障风电机组设备的安全运行。

**（作者单位：中车株洲电力机车研究所有限公司）**

# 风电机组高强度螺栓连接牙型啮合特性规律研究

文|周卫星，廖建敏，张锋，甄妮

风电机组作为大型可再生能源装备，主要由叶片、轮毂、机舱、塔筒组成，各部件间主要由高强度螺栓连接，进而将叶轮气动载荷传递至塔筒，而湍流风的运行环境复杂多变，对连接结构的可靠性提出极高要求，因此，高强度螺栓性能直接影响整机安全性和使用寿命。风电机组在运行过程中，由于随机风载谱特性，湍流强度可达18%~25%[1]，且气动载荷与高耸塔筒结构耦合易引发高频振动，螺栓连接的可靠性面临极大挑战。以叶片根部为例，在重力与离心力耦合下，叶片根部螺栓承受交变弯曲应力，同时若考虑极端运行温度环境（-30~+50℃）导致热应力集中[2]，螺纹啮合副的摩擦松动和应力集中将加剧。高强度螺栓的螺纹牙型设计对其力学性能、疲劳寿命和连接可靠性具有决定性影响[3]。随着有限元仿真技术和实验测试手段的不断进步，螺纹牙型的分析研究已从传统的经验公式转向高精度数值模拟与实验验证相结合的模式[4, 5]。螺纹牙根是应力集中最严重的区域，也是疲劳裂纹的常见萌生位置[6]，牙型的设计直接影响载荷在各牙之间的分布，本文重点采用参数化建模方法[7]，结合材料弹塑性行为与摩擦特性，通过有限元仿真与敏感性参数分析，研究螺纹牙型的几何特征（牙高、牙距、牙型角）对载荷分布的影响，评估高强度螺栓连接结构特性，为风电机组高强度螺栓工程化应用和全生命周期维护提供实践意义。

## 分析模型建立

螺纹牙型依据标准《普通螺纹 基本尺寸》（GB/T 196—2003）中所定义的要求执行。目前风电机组螺栓连接件按材料性能可分为：环氧树脂复合材料 -42CrMo 锻件、铸件 QT400- 铸件 QT400、铸件 QT400-42CrMo 合金钢、Q355 合金钢板 -Q355 合金钢板，螺栓连接件的刚度影响螺栓预紧性能，且不同螺栓连接件刚度对螺纹牙型啮合特性影响是不同的，因此开展不同材料特性对螺栓应力特性影响是必要的，也可以为后续工程应用中针对不同位置连接提供特定维护方案，降低风电机组运行螺栓连接失效的风险。

连接件结构尺寸相对于单个螺纹牙型啮合尺寸大，在进行整体网格划分处理时，容易产生明显的应力集中，导致结果发散，因此采用二维剖面有限元模型对连接结构的剖面进行仿真建模。风电机组中螺栓法兰连接存在通孔式法兰连接和盲孔式法兰连接，对于盲孔式法兰连接，由于在螺栓预紧后，连接件承载后应力状态对螺栓牙型应力分布影响较大，对螺纹牙造成的损伤难以通过后期运维或者测试设备检测来获得，更容易导致整个连接件开裂，因此本文分析重点考虑盲孔式法兰螺栓连接，并区分平面应力与平面应变状态下的应力差异，以考核三维环向应力对螺

1: K. Thomsen, Poul Ejnar Sørensen. Fatigue loads for wind turbines operating in wakes[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1999, 80: 121-136.
2: 郑小涛，陈瑶，喻九阳，等 . 螺栓法兰连接系统的热应力场 [J]. 武汉工程大学学报，2014，36（6）：37 - 40.
3: Marcelo, A.L, Uehara, A.Y, Utiyama, R.M, et al. Fatigue Properties of High Strength Bolts[J]. Procedia Engineeringe, 2011, 10: 1297-1302.
4: A. B. Smith, C. D. Johnson. Finite Element Analysis of Threaded Connections Under Combined Loading[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2019, 25: 291-298.
5: Ai-lin Zhang, Ting-yong Liu, Yan-xia Zhang, et al. Experimental and numerical research on mechanical behavior of prestressed high-strength bolt joint[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 182: 1-21.
6: 刘永超，郭德瑞，李帅，等 . 风电机组高强度螺栓的失效形式分析 [J]. 太阳能，2021（1）：44 — 50.
7: 史文博，杜静，龚国伟 . 风电机组轮毂螺栓连接建模与接触强度分析 [J]. 机械设计与制造，2019（12）：169 — 172.

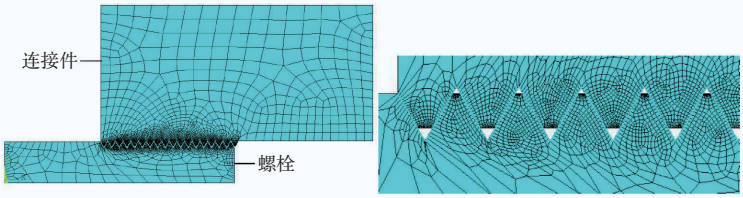



图1 啮合分析仿真模型

纹牙型的影响。

分析建立的连接模型如图 1 所示，采用 1/2 局部对称模型，选用 Plane183 平面单元，该单元为高阶的二维 8 节点实体结构单元，所以对于复杂结构边界具有较好的网格属性，单元畸变较少，对啮合位置处采用精细划分，划分后的 Jacobian Ratio 控制在 1% 以内，可以满足计算精度要求，其中对螺栓采用中心对称约束加载，连接件采用固定约束加载。

表1 材料属性定义

| | 复合材料 | 42CrMo | QT400 | Q355 |
|---|---|---|---|---|
| 密度 /（kg/m$^3$） | 2000 | 7850 | 7100 | 7850 |
| 弹性模量 /GPa | 22 | 212 | 169 | 210 |
| 泊松比 | 0.35 | 0.28 | 0.275 | 0.3 |

## 连接特性影响因素分析

**一、连接件材料**

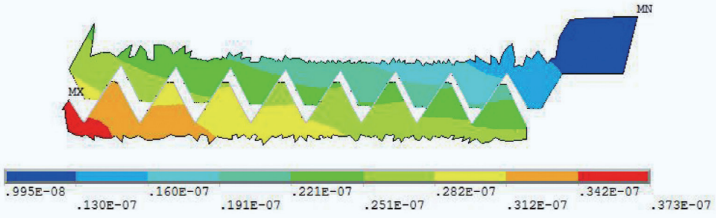
对环氧树脂复合材料、42CrMo 锻件、铸件 QT400、Q355 合金钢板四种材料的连接件进行属性定义，具体如表 1 所示。

采用平面应变状态下的分析模型，进行不同连接件影响特性分析，避免不同厚度平面应力状态对啮合特性的影响，分析结果如表 2 所示。由表可知，锻件、铸件和 Q355 合金钢板对螺栓和连接件承载特性影响基本相当，环氧树脂类承载特性明显与其他材料存在较大差异，在螺栓牙型应力方面，环氧树脂明显高于其他相关连接件。根据进一步提取的环氧树脂复合材料和 Q355 合金钢板两种连接件螺栓啮合受载变形云图（图 2），对于环氧树脂复合材料，其螺纹牙型至少有 4 颗牙发生了类似整体刚度位移，从而对变形相反侧的第一颗啮合牙产生整体横向拉伸，形成较大应力，相对于 Q355 合金钢板，其变形量达到 8 倍。由于牙型挤压对连接件产生较大应力，因此，在实际工程应用中，要求叶片根部的螺栓连接预紧力相比于其他位置小，其主要考虑的连接件刚度如果不足可能导致连接件螺纹啮合发生局部的刚性位移，导致啮合松动。对于此种情况，可以通过对低刚度连接件进行局部系统刚度加强，如增加叶片法兰 [8]，以提供螺纹啮合咬合力。

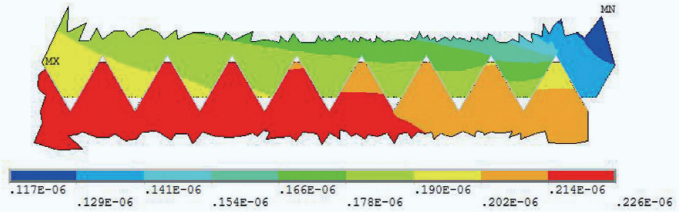
**二、连接环向应变状态**

风电机组中各系统间的高强度螺栓连接，除受本身预紧力和螺栓工作轴力影响外，由于连接形状基本以环向为主，所以同时也承受弯矩载荷，造成环向变形对螺栓啮合位置产生环向应力，因此在二维模型分析过程中就需要分析平面应力状态和平面应变状态下牙型的承载，如图 3 所示。从图中可以看出，相比于平面应变状态，基于平面应力状态下的钢铁类（即高弹性模量）应力都出现了 40% 以上的增加，而复合材料应力水平相应减少。结合平面应力和平面应变状态力学特性，从平面应变到平面应力，法兰螺栓连接主要体现为连接件刚体变形约束减少，使得环向应力降低。根据应力组合，法兰连接件环向应力主要分解至均布的螺栓孔来承担，因此在从平面应变到平面应力变化过程中，低刚度的连接件螺纹牙型应力降低，其相互螺栓孔壁间距对牙型应力敏感性较高刚度连接件小。

8: 赵建刚，张文伟，刘鹏辉，等 . 风电叶片叶根法兰平面度对连接螺栓强度的影响分析 [J]. 风能，2022（12）：72 — 75.




（a）Q355合金钢板




（b）复合材料

图2 不同连接件变形承载特性分析

表2 不同连接材料分析计算对比结果

| 连接材料 | 螺栓 | | 连接件 | |
|---|---|---|---|---|
| | 牙型应力 /MPa | 发生位置 | 牙型应力 /MPa | 发生位置 |
| 铸件 | 338 | 右侧第二个 | 315 | 右侧第二个 |
| 锻件 | 317 | 左侧第一个 | 313 | 右侧第二个 |
| 环氧材料 | 712 | 右侧第一个 | 379 | 右侧第一个 |
| Q355 合金钢板 | 318 | 左侧第一个 | 309 | 右侧第二个 |

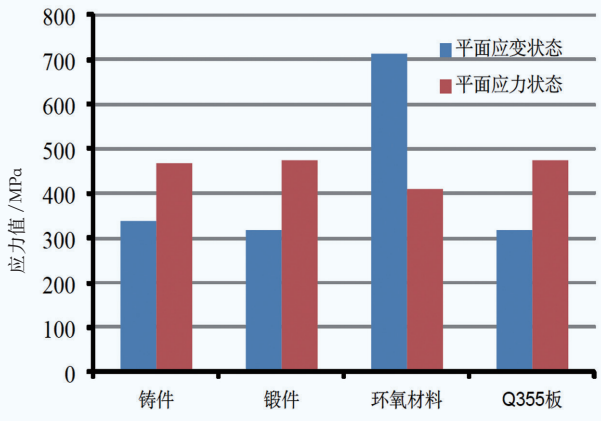



图3 不同应力状态下螺纹牙型应力对比

## 三、螺纹牙型

螺纹牙型设计除了考虑标准所要求的相关牙型角度、倒角、加工制造工艺等，如何选择合适的啮合长度以保证牙型均匀承载也是设计中的关键一项。目前依据工程经验，螺栓连接件结合面是螺纹牙型承载较大的位置，但是更细致地评估整个啮合长度牙型应力分布情况也是必要的。目前 M36 和 M42 是风电行业应用较为普遍的规格型号，本文分析两种规格状态下应力曲线。根据两种螺栓规格下不同啮合长度（啮合牙数的增加表示螺纹啮合长度增加）螺栓最大应力情况（图 4），随着啮合牙数增多，两种牙型最大承载应力均逐渐趋于相同。同时从提取的整个牙型沿轴向应力分布结果（图 5）来看，随啮合长度增加，每个牙型

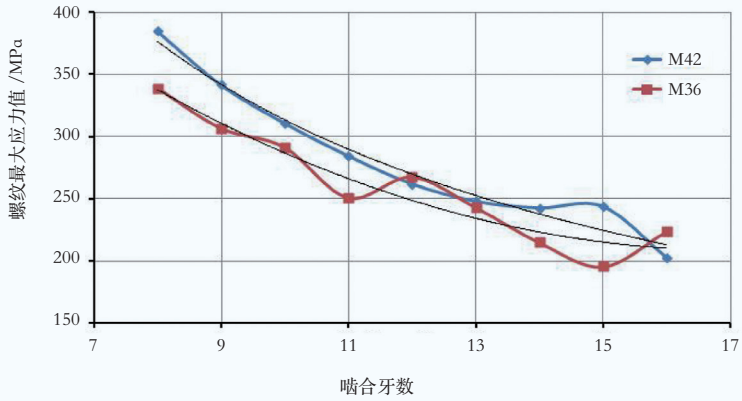



图4 不同规格啮合牙型数与最大应力曲线

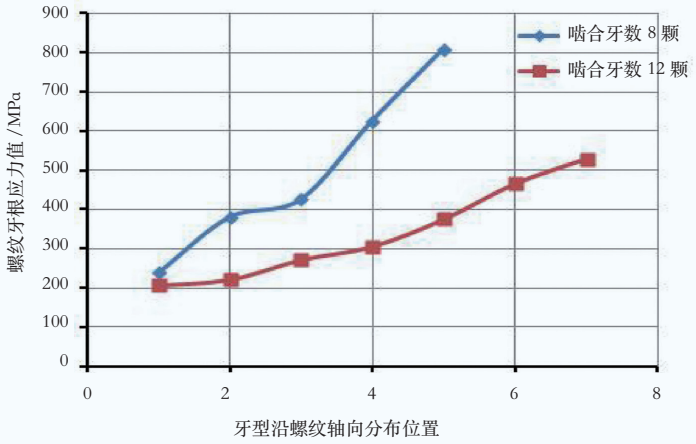



图5 M36螺纹牙牙底尖端应力值沿螺纹轴向分布

承载应力降低，同时对螺纹连接件第一个参与啮合的牙型应力有所改善，有助于降低螺纹失效风险，而在啮合牙远离预紧力加载端的位置牙型应力下降明显，因此如果该盲孔位置周边处于高应力区，可以通过增加一定的啮合牙数，来改善内部螺栓应力状态。

## 结论

本文针对风电机组不同位置连接结构的差异性，通过建立啮合牙型仿真计算模型，从连接材料特性影响因素、连接环向应变状态特性、螺纹牙型影响规律等三方面进行阐述分析，获得如下结论：

（1）以风电机组中典型的三种具有不同弹性模量特性的连接件材料为对象，重点评估连接刚度特性差异。结果表明，低刚度条件下，螺纹啮合部分刚性位移导致啮合松动，所以对低刚度件可以进行整体系统刚度加强，以提供螺纹啮合咬合力。

（2）法兰多螺栓孔分布连接，法兰连接件环向应力主要分解至均布的螺栓孔来承担，从平面应变和平面应力两种连接件应力状态模拟法兰环向应力差异性影响，对于低刚度的连接件螺纹牙型应力降低，其相互螺栓孔壁间距对牙型应力敏感性较高刚度连接件小。

（3）对于盲孔式螺栓连接，其螺纹预紧加载端是由螺纹旋合口向盲孔深处传递扭矩形成预紧，增大啮合长度，可以改善螺纹连接件第一个参与啮合的牙型应力，同时通过增加一定数量啮合牙，可以有效改善内部螺栓应力状态。

**（作者单位：周卫星：上海能源科技发展有限公司；廖建敏：湖南兴蓝风电有限公司海上风电装备与风能高效利用全国重点实验室；张锋：中广核新能源江苏分公司；甄妮：上海电气风电集团股份有限公司）**

CWP HFC
风能氢电展

# 2025氢能装备与燃料电池产业展览会

## 10月20-22日

北京·中国国际展览中心(顺义馆)

## 集中展示

制氢设备技术与氢气供应

燃料电池关键部件及供应技术

氢气储运及相关设备

燃料电池系统

评估、测试、分析仪器

## 与 2025北京国际风能大会暨展览会 同期举办

欢迎加入风能氢电展

关注我们了解更多

扫码预定展位

CCiD 赛迪会展 北京赛迪会展有限公司

010-88558102

info@chinawind.org.cn

www.chinawind.org.cn

广告

CSSC

# 重庆齿轮箱有限责任公司

## 齿齿相依·带动未来

GEARING INTERDEPENDENCE MOVING FUTURE

风电增速箱事业部:023-47231563　售后: 47211556邮箱 :cgclcc-fdkfb@chongchi.com

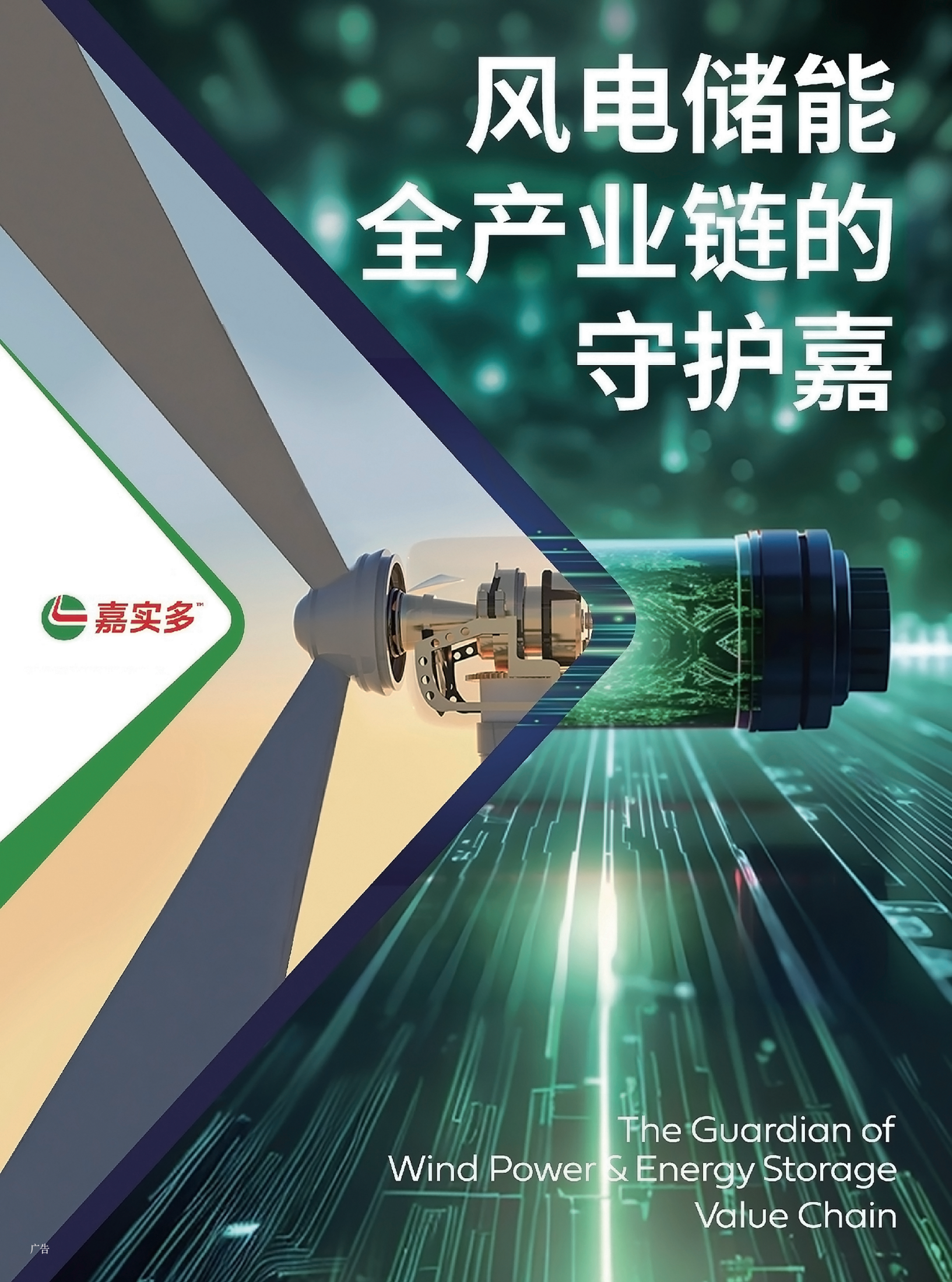
风电偏航变桨事业部:023-47211231  47211230

风电运维事业部:023-47231467　15823931467 邮箱 :cgclcc_fdkfb@163.com

http:www.chongchi.com

广告

# 风电储能
# 全产业链的
# 守护嘉



嘉实多™

The Guardian of
Wind Power & Energy Storage
Value Chain

广告