

# 风能

## WIND ENERGY

传播专业知识 启迪成长智慧

主办单位：中国电子信息产业发展研究院  
赛迪工业和信息化研究院（集团）有限公司

《中国核心期刊（遴选）数据库》收录期刊 中国知网收录期刊

ISSN 1674-9219  
CN 11-5942/TK

11

2023年第11期 总第165期 赛迪出版社



### P12. 专栏

加快发展零碳灵活性资源是构建新型电力系统的迫切任务

### P22. 现场

回溯来时路，展望新征途

——“风起五十年”主题论坛与主题展举行

## 在CWP 2023 遇见全球风电美好未来 P40



效益优先 创新驱动 协同发展 改革提升

地址：重庆市两江新区经开园金渝大道30号  
电话：023-63396122  
网址：<http://cssc-hz.com>



# 源自高铁 值得信赖

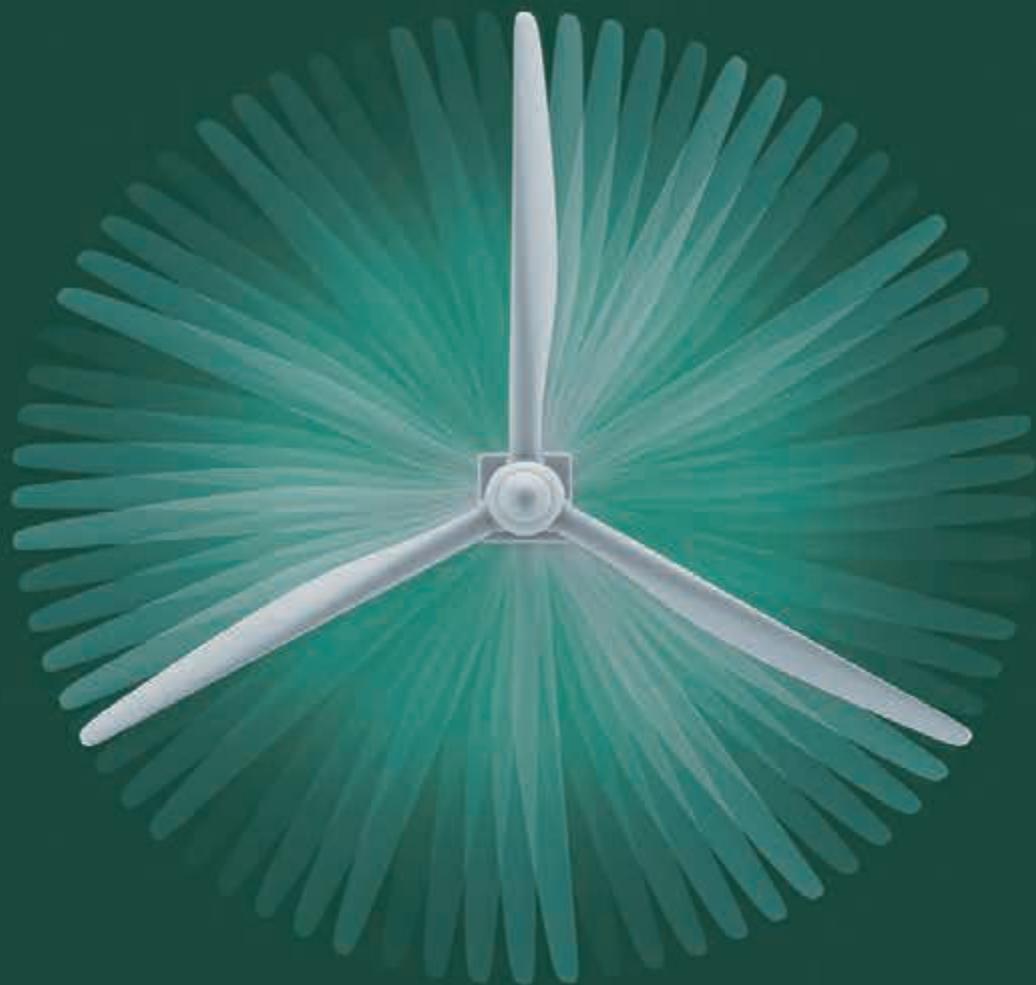
中车株洲电力机车研究所有限公司(简称中车株洲所)为中国中车一级子公司,是一家以轨道交通为核心业务的技术先导型企业集团。2006年进入风电整机装备领域,致力于全球风能资源的高效开发与利用。中车株洲所将源自高铁的十大核心技术,再创新应用于风电产业,着力打造风电整机、智能运维、综合能源服务三大产品线,持续培育和发展技术创新能力,快速响应智能化运维、综合能源服务、分布式电源建设等增量业务市场,矢志成为国际化的清洁能源、智能化运维整体解决方案提供商和综合能源服务商。



中车株洲所

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





**麦加芯彩让生活更环保**

**MEGA P&C Makes Our Life Greener and Better**

**麦加芯彩**

**新材料科技(上海)股份有限公司**

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



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



哈电风能有限公司

HARBIN ELECTRIC CORPORATION WIND POWER CO., LTD.

绿色能源  
系统方案服务商

[www.hewp.com.cn](http://www.hewp.com.cn)

X-CALIBER

# 卓刻平台

瞄准“高收益”  
聚焦“高可靠”

助力陆上定制化  
解决方案提供



持续迭代优化  
开拓紧凑型半直驱新时代



海上成熟经验“移植”至陆上  
基于丰富的海上风电样本库开发



海陆关键部件复用  
提升可靠性、保障交付能力



上海电气风电集团公众号



# 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



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



股票代码：601012

# 深化国际合作, 加快全球风电发展

文 | 秦海岩

近年来, 随着全球气候变化和环境危机日益加剧, 各国纷纷加快推进能源转型, 实现碳中和已成为国际社会的主流价值观。与此同时, 乌克兰局势等对全球能源市场造成的强烈冲击, 促使各国深刻认识到实现能源独立和安全的重要性。就落实这些目标而言, 大力发展可再生能源是必由之路。相应地, 越来越多的国家提出了雄心勃勃的可再生能源发展目标, 并为此加大支持力度。

当前, 我国已是风电大国, 有义务, 也有能力帮助其他国家大力发展风电。一是我国风电技术在全球范围内处于领跑位置, 不仅在大容量机组上持续推陈出新, 长叶片、高塔架应用等方面处于国际领先水平, 新技术应用不断涌现。二是经过多年持续的技术创新, 我国形成了丰富的风电机组产品谱系, 能够满足全球各种环境气候区域的开发需求。三是我国是全球最大的风电装备制造基地, 生产的风电机组占到全球市场的三分之二以上, 铸锻件及关键零部件的产量占到全球市场的70%以上。再加上风电机组成本的大幅下降, 我国风电企业可以为全球提供极具技术、质量、价格竞争力的机组产品组合, 让更多地区的风能资源得到高效开发。此外, 我国在风电产业政策和技术标准制定方面积累了丰富经验, 可以为其他国家提供借鉴。因此, 我国风电企业具备了全面参与国际市场竞争的实力。

与家电等产品的出口不同, 整机商“出海”并非止于“卖风机”, 更关键的是完成风电项目建设, 这意味着企业不仅需要熟悉各国的政策法规环境, 还需要参与融资、认证、物流、施工安装等其他诸多环节, 因而存在很高的准入门槛, 需要形成一套完整的配套体系作为支撑, 这是一个循序渐进的过程。且国外的风电项目单体规模较小, 进一步增加了国内整机商布局海外市场的难度。经过多年的积累, 通过在全球建立较为完善的配套体系, 我国风电整机商不仅出口容量实现大幅增长, 而且开始更多地直接参与国外风电项目的招投标。

今年以来, 我国风电整机商在开拓国际市场方面捷报频传。金风科技、远景能源、明阳智能、运达股份等先后在海外市场签下多个订单。其中, 金风科技截至今年三季度末海外在手外部订单共计381万千瓦, 运达股份目前在海外市场已签订超过200万千瓦的项目合同。大金重工在欧洲海工市场单桩产品累计新签订单全球领先, 同时正在参与的欧洲、日本、美国多个海工项目的总需求量接近300万吨。

考虑到风电产业已高度全球化, 为加快全球风电发展, 加强国际合作是必不可少。各国应坚定维护以规则为基础的贸易体制, 努力营造公平、公正的市场环境, 携手风电企业共同在全球范围内构筑互信稳定的风电产业链供应链, 为风电更大规模、更高质量发展夯实基础, 使之成为助力实现碳中和的关键力量。■

## 40 封面故事 Cover Story

### 在CWP 2023 遇见全球风电美好未来

在全球范围内构建具有韧性的风电产业链供应链，已成为推动能源转型、应对气候变化的客观需要。CWP 2023 聚焦于此，以达成最广泛的共识，为实现风电高质量发展凝心聚力。



## 12 专栏 Column

### 加快发展零碳灵活性资源是构建新型电力系统的迫切任务

本文重点关注源侧和网侧灵活性资源，在短时、中时、长时三个时间尺度上探讨对应的重点零碳灵活性技术发展现状与未来展望。

## 32 对话 Dialogue

### 风电最有可能解决人类面临的气候问题

Henrik Stiesdal认为，风电机组会达到合理的最大值；漂浮式与固定式海上风电机组的成本曲线会有交集。风电最有可能解决人类面临的气候问题。

## 66 国际 International

### 越南第八个国家电力发展规划下的海上风电发展

中资企业已活跃于越南海上风电市场中，PDP8规划有望为其带来更大的机遇，但中资企业仍需要做好风险防范工作。

DRIVING OUR RENEWABLE FUTURE

可 持 续 更 美 好



  
Goldwind



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



《风能》杂志在线阅读网站  
www.cwea.org.cn

## 卷首语/ From The Editor

深化国际合作, 加快全球风电发展  
..... 秦海岩 / 01

## 要闻 / Highlights

《全球风电产业链供应链安全宣言》在京发布  
..... 夏云峰 / 08-11

## 专栏 / Column

加快发展零碳灵活性资源是构建新型电力系统的迫切任务 ..... 刘子屹, 田嘉琳 / 12-15

## 乘风 / Windward

智慧能源闪耀在花吐古拉 ..... 王芳 / 16-21

## 现场 / Presence

回溯来时路, 展望新征程  
——“风起五十年”主题论坛与主题展举行  
..... 赵靛 / 22-25  
全球聚力, 共创未来——2023北京国际风能大会暨展览会精彩汇编  
..... 时春景 / 26-28

## 人物 / Figure

从小白到大咖, 一名运维人员的成长经历  
..... 赵靛 / 30-31

## 对话 / Dialogue

风电最有可能解决人类面临的气候问题  
..... 32-34  
哈电风能: 凝势蓄力谋新篇、开新局  
..... 36-38

## 封面故事/ Cover Story

在CWP 2023 遇见全球风电美好未来  
..... 《风能》编辑部 / 40-56

## 市场 / Market

阳光电源: 依托协同创新, 打造极致产品  
..... 夏云峰 / 58-61

## 调研 / Survey

从CWP 2023看全球风电产业发展趋势  
..... 夏云峰 / 62-65

## 国际 / International

越南第八个国家电力发展规划下的海上风电发展 ..... 王达 / 66-68

## 产业 / Industry

风电场改造升级项目财务评价方法及最佳改造时间探讨 ..... 张彬彬, 邵建春 / 72-79

## 技术 / Technology

兆瓦级双馈风电联轴器设计与制造技术研究  
... 张凯, 肖旺, 李肖霞, 董国庆, 王京丽 / 80-84  
风电格构式塔架技术研究综述  
..... 乔亚兰 / 86-95  
基于改进D-S证据理论的齿轮箱故障诊断决策模式研究 ..... 史龙伟, 王宁 / 96-101  
浅析海上风电项目机组选型要求  
..... 詹海宁, 邵帅, 齐博, 朱永飞,  
杨金宝, 张文平, 高松玉 / 102-105  
(西藏) 大型矿区离网项目的经济性分析与技术挑战 ..... 李光明, 靳志会, 王兆邻 / 106-111

## 广告目次

广告主	广告内容	页码
中船海装	形象	封面拉页
中国中车	形象	封二
麦加芯彩	形象	扉页 1
哈电风能	形象	扉页 2
电气风电	产品	扉页 3
运达股份	形象	卷首语对页
金风科技	形象	目录对页 1
东方电气	形象	目录对页 2
《风能》	产品	版权对页
埃斯倍	产品	P29
鉴衡认证	服务	P35
《风能》	公益	P39
CWP 2024	形象	P57
国能信控	形象	P69
恩斯克	产品	P85
南高齿	产品	后彩一
重齿	产品	封三
中际联合	产品	封底

# 绿色动力 驱动未来

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

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

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



Telephone

电话(Tel): 0838-2689589  
传真(Fax): 0838-2821700



address

四川省德阳市华山路  
二段2号

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



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



## 《全球风电产业链供应链安全宣言》在京发布

本刊 | 夏云峰

2023年10月16日—19日,以“构筑全球稳定供应链 共建能源转型新未来”为主题的2023北京国际风能大会暨展览会(CWP 2023)在北京举行。今年的CWP吸引了来自30多个国家和地区的1000多家参展企业,外资企业超过250家。会上,100多家中外风电企业作为代表,与多个行业组织共同签署并发布了《全球风电产业链供应链安全宣言》,致力于构筑安全稳定、畅通高效、开放包容、互利共赢的全球风电产业链供应链体系,推动全球风电高质量发展,为各国应对气候变化、实现能源转型、增进人民福

祉作出贡献。

当前,面对日益严峻的生态环境问题和气候危机,各国纷纷明确各自的碳中和时间表,应对气候变化,实现能源转型,已经成为全人类的共同目标。作为最成熟、最具市场竞争力的可再生能源之一,大力开发风能资源是建设零碳世界、实现全球可持续发展的必由之路,而这离不开富有韧性的全球风电产业链供应链的支撑。加强国际合作,务实推动构建互信、互助、互利的风电产业链供应链,保障其安全稳定,是全球面临的一项紧迫任务。中国可以在其中发挥建设性

作用。中国是全球风电最大单一市场,为迅速提升风电竞争力作出了巨大贡献。中国风电产业链供应链高度国际化,众多国际知名企业参与其中,赢得了广阔的发展空间和机会。中国离不开世界,世界也需要中国。中国风电产业企业将以负责任、专业的精神积极投身于全球风电事业进步和能源转型中,携手各国构建全球稳定风电产业链供应链。

中国职工技术协会副理事长、电力专委会名誉会长毕亚雄,代表全体嘉宾庄严宣读了《全球风电产业链供应链安全宣言》。



宣言签署企业代表合影

《全球风电产业链供应链安全宣言》指出，深化国际合作是保障全球风电产业链供应链安全的关键举措。风电产业已高度全球化，遍布世界的风电产业链供应链紧密交织。应对当前全球风电产业链供应链面临的挑战，确保其可持续和稳定，离不开各国政府、企业和国际组织的积极协作。国际社会只有通力合作，坚定维护以规则为基础的贸易体制，才能更好地应对挑战，有效提升全球风电产业链供应链的韧性和安全，支持落实可持续发展目标。

《全球风电产业链供应链安全宣言》提出，技术合作和知识共享对于构建全球稳定风电产业链供应链具有重要作用。风电属于技术密集型行业，当前全球风电技术创新加快，各种新技术、新应用不断涌现。只有促进知识和技术的跨境传播，才能在全球范围内推动风电产业链供应链建设。这就要求各国政府大力支持风电技术创新，企业携手研发和推广新技术，提

高产业链供应链的效率和可靠性，以推动本国风能资源开发，更好地满足未来的能源需求。

为进一步加强全球风电产业链供应链安全，《全球风电产业链供应链安全宣言》发出了五点倡议，包括“加快全球风电产业链供应链建设，为应对气候变化提供积极支持”“营造公平、公正的市场环境，通过竞争推动风电发展”“打造多元化供应源，让能源转型惠及更多国家和地区”“提高透明度和可追溯性，确保产品质量、降低风险”“坚持可持续发展原则，打造绿色产业链供应链”。

全球风能理事会（GWEC）首席执行官 Ben Backwell、金风科技股份有限公司总裁曹志刚、远景能源有限公司高级副总裁田庆军、舍弗勒大中华区工业事业部总裁王贵轩作为代表分别发言。

Ben Backwell 表示，今年全球风电累计装机容量突破了 10 亿千瓦大关，这对风电行业来说是一个重大时

刻，也是值得全世界庆祝的时刻。但目前全球风电的发展速度，仍然难以满足实现净零排放的需要，并且面临着诸多挑战，迫切需要各国深化合作，增加对产业链供应链的投资，在满足新需求、提高韧性的同时，确保所有国家能够推进能源转型并从中受益。

曹志刚认为，在中国风电过去数十年的发展，产业链供应链起到了坚实的支撑作用，推动着科技创新、技术进步，给开发商、投资者提供了可靠的产品保障，促使风电成本大幅下降，使之成为绿色、可负担的能源。到 2030 年甚至更长一段时间内，全球风电将会保持高速增长，核心的支撑力量依然是产业链供应链，但目前却面临着很多挑战。因此，此时发布宣言可谓恰逢其时。希望风电全体同仁共同践行宣言，携手为风电发展贡献力量。

田庆军表示，宣言的发布表明，中国风电行业已经开始从全球角度思考未来风电产业链供应链安全。我们要感恩，中国风电过去几十年的发展，



01	02	03
	04	05

- 01: 中国职工技术协会副理事长、电力专委会名誉会长毕亚雄宣读宣言
- 02: 全球风能理事会（GWEC）首席执行官Ben Backwell发言
- 03: 金风科技股份有限公司总裁曹志刚发言
- 04: 远景能源有限公司高级副总裁田庆军发言
- 05: 舍弗勒大中华区工业事业部总裁王贵轩发言

应感谢中国各级政府、国外政府及机构和全体风能人。我们要有担当，今天的中国风电已经走进“无人区”，需要我们扛起全球风电发展大旗。我们要坚持创新。创新是中国风电走到今天的“传家宝”。接下来中国风电要坚

持创新、国际化、市场化，才能真正匹配中国作为一个风电大国在全球的担当。中国风电是世界风电不可分割的一部分。我们倡导合作共赢、共建共享、开放包容，为可再生能源发展作出更大贡献。

王贵轩认为，宣言代表整个风电行业形成了一致的观点，重要的一点是保持上下游的密切沟通、紧密合作。这种沟通不局限于产品和技术，也涉及材料碳足迹的追溯，这样才能实现全行业的可持续发展。🚩

# 全球风电产业链供应链安全宣言

中国·北京  
2023年10月16日

我们，来自全球风电领域的代表，齐聚于金秋十月的北京，共同致力于构筑安全稳定、畅通高效、开放包容、互利共赢的全球风电产业链供应链体系，推动全球风电高质量发展，为各国应对气候变化、实现能源转型、增进人民福祉作出贡献。经全体代表讨论，一致通过《全球风电产业链供应链安全宣言》。

我们一致认为，深化国际合作是保障全球风电产业链供应链安全的关键举措。风电产业已高度全球化，遍布世界的风电产业链供应链紧密交织。应对当前全球风电产业链供应链面临的挑战，确保其可持续和稳定，离不开各国政府、企业和国际组织的积极协作。国际社会只有通力合作，坚定维护以规则为基础的贸易体制，才能更好地应对挑战，有效提升全球风电产业链供应链的韧性和安全，支持落实可持续发展目标。

我们一致确信，技术合作和知识共享对于构建全球稳定风电产业链供应链具有重要作用。风电属于技术密集型行业，当前全球风电技术创新加快，各种新技术、新应用不断涌现。促进知识和技术的跨境传播，才能在全球范围内推动风电产业链供应链建设。这就要求各国大力支持风电技术创新，企业携手研发和推广新技术，提高产业链供应链的效率和可靠性，以推动各国风能资源开发，更好地满足未来的能源需求。

为进一步加强全球风电产业链供应链安全，我们发出五点倡议：

一、加快全球风电产业链供应链

建设，为应对气候变化提供积极支持。根据国际能源署（IEA）2023年更新版《净零路线图》报告，为实现《巴黎气候协定》将全球温升控制在1.5℃的目标，到2030年全球风电新增和累计装机容量需要在当前的基础上增加两倍。但根据全球风能理事会（GWEC）的最新统计数据，目前全球风电产业链供应链的产能仍存在不足，如果新的投资无法及时跟上，预计从2026年起全球大部分区域都将面临风电产业链供应链与海上配套设施短缺的风险。因此，在各区域、各国产业政策的正确引导下，我们需要持续加大投资，加快全球风电产业链供应链建设，进一步增强供应能力，为建设零碳世界提供关键支撑。

二、营造公平、公正的市场环境，通过竞争推动风电发展。我们呼吁全球携手构建公正、合理、透明的贸易规则体系，为所有企业提供公平的市场准入机会。充分发挥国际组织的作用，加紧完善国际协调机制，依托双边和多边磋商机制妥善处理分歧和争端，增进全球互信。打破贸易壁垒，消除关税及非关税贸易壁垒等各种形式的贸易限制措施，确保全球风电产业链供应链自由流动。

三、打造多元化供应源，让能源转型惠及更多国家和地区。为减少潜在风险，增强全球风电产业链供应链的安全，我们鼓励多元化供应源建设，这意味着更广泛的资源采购和生产布局，不仅将有助于提高产业链供应链的弹性和可靠性，也可以让更多的国家和地区从中受益。我们鼓励企业开展跨区域合作，积极寻求新的合作伙

伴；区域间应相互协作，构筑新的区域化产业中心，共建能源转型新未来。我们呼吁各国政府释放清晰的投资和价格信号，帮助全球风电产业降低投资风险，并取得合理的投资回报。

四、提高透明度和可追溯性，确保产品质量、降低风险。我们呼吁产业链供应链各方提高透明度，建立可追溯性体系，保证从原材料采购到最终产品交付的全程可控。这将有助于防止潜在的安全漏洞和风险，并确保产品的质量和安全性。我们鼓励建立产业链供应链管理平台，以提高信息共享和数据可视化，实现产业链供应链的可追溯性。

五、坚持可持续发展原则，打造绿色产业链供应链。我们承诺在产业链供应链管理中融入可持续发展理念，确保资源的有效利用，减少环境影响，早日实现全价值链碳中和。可持续发展是产业链供应链安全的重要组成部分，只有通过可持续的方式管理产业链供应链，才能为未来的世代留下更美好的世界。我们呼吁企业采取可持续的生产和运营方式，减少能源和资源浪费，促进社会责任和环保实践。

维护全球产业链供应链韧性和稳定是推动世界经济发展的重要保障，符合世界各国人民共同利益。《全球风电产业链供应链安全宣言》是我们对保障全球风电产业链供应链安全的坚定承诺，展示出我们积极应对气候变化，为维护全球经济繁荣和社会稳定而团结一致的决心。相信在全球风电行业的共同努力下，我们将迈向一个更加安全、繁荣和可持续的未来。✉



# 加快发展零碳灵活性资源 是构建新型电力系统的 迫切任务

文 | 刘子屹, 田嘉琳



刘子屹  
落基山研究所高级  
咨询师



田嘉琳  
落基山研究所助理  
咨询师

2023年6月, 国家能源局发布《新型电力系统发展蓝皮书》, 明确了我国构建新型电力系统的方向, 即“推动新能源成为发电量增量主体”, “电力供给结构以化石能

源发电为主体向新能源提供可靠电力支撑转变”。然而, 在可再生能源大规模开发的背景下, 电力系统面临更高的灵活性需求, 这已成为新型电力系统建设过程中面临的主要

挑战之一。

近些年, 电力系统供需双方的不确定性带来的电力系统灵活性缺口凸显。一方面, 我国风、光、水等可再生能源渗透率不断提高, 2022年年底装机占比已达47.3%。由于可再生能源出力受到天气、季节影响显著, 电力供给端不确定性增加。例如, 2022年7—8月受汛期来水偏枯影响, 四川省的水电出力减少, 水电利用小时数较前一年同期下降12%, 19个市(州)采取了工业侧限电措施。另一方面, 伴随经济发展、终端电气化和极端天气频发等多重因素影响, 电力负荷侧波动性愈发强烈。多年来, 我国的电力需求持续增长。2015—2022年全社会用电量年复合增长率达6.1%, 最大用电负荷增速更高, 年复合增长率为7.1%。此外, 极端高温和严寒等天气会造成电力负荷的短期剧烈波动。例如, 2022年夏季我国平均气温升高1.2°C, 最大负荷同比增长7992万千瓦, 其中的80%来自空调制冷负荷<sup>1</sup>。

在此背景下, 如何加速发展清洁能源灵活性资源、保障高比例可再生能源电力系统的灵活性需求, 已成为构建新型电力系统的迫切任务。本文重点关注源侧和网侧灵活性资源, 在短时、中时、长时三个时间尺度上探讨对应的重点零碳灵活性技术、发展现状与未来展望。短时灵活性是在分钟级及以下的时间尺度上维持系统安全可靠, 如维持频率和电压稳定等; 中时灵活性是在小时至多日的时间尺度上, 来应对如非水可再生能源与负荷波动引发的系统电力平衡需求; 长时灵活性

1: 王涛, 张剑, 吴婧. 浅谈气温对我国电力负荷增长的影响, 中国电力发展报告2023.

是在周至季节的时间尺度上应对系统平衡需求，如应对用电负荷和水电的季节性变化。

## 短时灵活性：完善辅助服务市场是释放电化学储能等灵活性资源潜力的破局之道

可提供短时灵活性（分钟级以下）的技术多样且成熟，包括煤电、气电、常规可调节水电、抽水蓄能和电化学储能。其中，以锂离子为代表的电化学储能是目前商业化成熟且适合快速大规模部署的资源。与抽水蓄能、煤电等传统调节手段相比，电化学储能响应时间最短、调节速率最高。凭借极佳的技术特性，电化学储能应当成为提供短时辅助服务的主力资源之一，可为电网提供调峰、调频、备用、黑启动等辅助服务。

随着新能源配储等政策的实施，电化学储能装机规模迅速扩大，但利用率仍低于预期。2020—2022年，电化学储能年复合增长率为34%，2022年的装机容量达到853万千瓦。据中关村储能产业技术联盟预测，到2025年年底，电化学储能累计装机规模将达到5500万千瓦。电化学储能规模化蓬勃发展，但整体利用率偏低，平均等效利用系数为12.2%，新能源配储系数仅有6.1%。这意味着已建储能电站调用情况较差，其灵活调节能力未能被充分利用，进而导致电化学储能投资收益低于预期。

为充分释放以电化学储能为代表的新型短时灵活性资源潜力，推进多主体、多品种的辅助服务市场建设应是电力市场改革的重点方向。首先，应给予符合灵活调节能力要求的各类

资源同等的市场主体地位。近些年，我国多地辅助服务市场实现了供给主体扩维，纳入了更多类型、更低装机规模、更低调度等级的灵活性资源。例如，华东区域于2022年更新电力辅助服务管理实施细则，将辅助服务扩展至接入电压等级35kV及以上的风电、光伏、自备电厂、抽水蓄能等发电侧并网主体、可调节负荷和新型公用储能电站。接下来，应不断扩充辅助服务交易品种，完善市场化交易机制。目前，各省份（二次）调频辅助服务多采用市场化交易，而备用、转动惯量、无功补偿、爬坡辅助服务主要通过“两个细则”进行固定补偿。

从国际经验来看，电力市场发展较为成熟且新能源占比较高地区的辅助服务，正朝着细分品种更多、市场化交易定价的方向发展。例如，美国加利福尼亚州电力辅助服务市场有4个响应速度与方向不同的辅助服务品种，即向上调频、向下调频、旋转备用和非旋转备用。英国电力市场拥有3种调频服务、5种备用服务、2种无功支持服务和黑启动服务，其中的2种为无偿强制服务，其余均通过双边协商或集中竞价等市场化方式确定交易价格，市场设计者会根据系统需求不断推出新的服务品种或更替现有品种。

## 中时灵活性：全面推动新能源和抽水蓄能等灵活性资源参与现货市场，以现货价格信号促进移峰填谷

储能型光热发电、压缩空气储能、抽水蓄能等技术均可以为电力系统提供中时灵活性（小时级至多日），但它们

为了充分释放新型短时灵活性资源潜力，推进多主体、多品种的辅助服务市场建设应是电力市场改革的重点方向。



的应用在不同程度上受到技术成熟度、建造成本和地理位置等因素的限制。

相比之下，抽水蓄能是目前最具大规模发展潜力的中时灵活性资源。抽水蓄能可为电网提供调峰、填谷、事故备用等多种功能，储能时长通常为 8~12 小时，循环效率在 75%~80%。抽水蓄能可以在短时间（5 分钟）内响应调度信号迅速启动，仅需 10 分钟即可完成从满负荷抽水到满负荷发电的过程，调节范围在 ±100%。据《抽水蓄能产业发展报告 2022》统计，截至 2022 年我国抽水蓄能总装机容量达到 4600 万千瓦，已纳入规划的抽水蓄能站点资源总量约 8.23 亿千瓦，已建和核准在建的装机规模达到 1.7 亿千瓦，项目覆盖全国 28 个省（区、市）。

为激励中时灵活性资源发展，应充分利用现货市场发现不同时间维度的电能量价值，以电价波动激励灵活性资源响应电网需求。现货市场设计一般以 15 分钟作为最小出清时段，交易品种包括日前、日内和实时市场，即对应着中时灵活性的时间范围。目前，山西、山东、广东、甘肃、蒙古等地现货市场发展走在全国前列，已进入长周期连续试运行阶段。“十四五”期间，应全面建成省级现货市场，推动新能源、核电、水电等优先发电的电量更高比例进入电力市场，充分发挥现货市场实时发现电量价值的能力。同时，应进一步放宽现货市场限价幅度，这有助于应对新能源比例上升带来的发用电平衡难度增加，通过现货市场提供的价格信号促进灵活性资源的优化调配。

具体来说，推动抽水蓄能进入电力现货市场，可以合理疏导抽水蓄能

为激励中时灵活性资源发展，应利用现货市场发现不同时间维度的电能量价值，以此激励灵活性资源响应电网需求。

成本，增加其盈利能力，激发抽水蓄能电站投资热情。2021 年，国家发展改革委印发的《关于进一步完善抽水蓄能价格形成机制的意见》明确提出，要逐步推动抽水蓄能电站进入电能量市场。2022 年，山东省开始探索推动抽水蓄能电站享受新型储能相关政策，推动抽水蓄能电站进入电力市场，平等参与电力中长期交易、现货市场交易及辅助服务市场。今年 8 月，青海省发展改革委就《青海省抽水蓄能项目管理办法（试行）》公开征求意见，明确推动抽水蓄能电站作为独立主体参与电力市场交易，逐步实现电站主要通过参与市场回收成本、获得收益。同月，山西省已经有首座抽水蓄能电站参与电力现货市场。抽水蓄能进入电力现货市场后，对保障当地的电力供应、电网安全，推动能源绿色低碳转型具有重要的意义。

## 长时灵活性：探索以氢能为代表的多样化技术路线，突破核心技术自主研发瓶颈

目前，火电和大型水电依然是提供长时灵活性（周至季节）的主要来源，适应未来新型电力系统的零碳长时灵活性技术路线尚不明确。在碳中和的背景下，煤电将面临更严格的发展约束；气电需要解决本土气源不足、供应安全风险等问题，难以在全国范围成为主要过渡手段；水电存在地理局限性强、资源分布不均的发展约束。为解决长时灵活性资源短缺的矛盾，应鼓励绿电制氢 - 氢能发电、火电 + 捕集、利用与封存（CCUS）等多样化创新发展。火电厂搭配 CCUS 技术是化石能源发电近零排放的唯一技术选择，



但捕集源二氧化碳浓度较低，技术成本高，火电厂加装 CCUS 技术后的发电成本会升高 60%<sup>2</sup>，CCUS 技术的大规模应用仍需要低成本、低能耗的关键技术研发。而氢能凭借其可零碳循环、可规模化、可存储、可运输等特性，有望成为在电力、工业、交通等多个领域中极具潜力的零碳技术。

实现氢能电力系统的推广和大规模应用，必须打通制氢 - 储氢 - 运氢 - 氢能发电的全产业链。在制氢与储氢环节，我国从核心设备到制备工艺方面都与国际水平存在较大的差距。例如，目前国内对高压气态储氢技术仅掌握 35MPa 储气，而 70MPa 储气技术主要依赖从国外引进。在氢能发电环节，我国尚未掌握大型燃气轮机的核心技术，在燃氢型燃气轮机研发方面远远落后于国外厂家，市场主要的燃氢型燃气轮机均为国外厂家设计研发。因此，暂时缺乏核心技术导致推广氢能发电需要进口昂贵的国外设备，在燃气机组寿命期内进行掺氢改造的整体经济性差，阻碍了其大规模应用。

由此可见，长时灵活性资源的发展仍需推动以氢能为代表的技术突破，通过更具系统性的政策措施加快其在未来十年的试点、示范与早期市场化应用。以氢能为例，在“十四五”期间应着重掌握制氢、储氢、氢能发电（如氢燃机领域）的核心技术，从而大幅降低绿氢发电应用的全供应链成本。“十五五”期间应大范围推广利用风、光、水等可再生能源发电制氢技术，长期存储与长距离运输技术，并在电力供应短缺、需要灵活性支持的时间

与空间点开展利用氢能发电提供电力的试点与商业化应用示范。

## 政策、市场、技术合力促进零碳灵活性资源规模化发展

我国的资源禀赋决定了传统电力系统主要依靠煤电与水电作为可灵活调节的电源，但在构建新型电力系统的进程中，如何加速发展零碳灵活性资源、保障多时间尺度的系统灵活性已成为迫切任务。从技术维度看，传统的煤电、气电、水电等技术受到碳排放、燃料供应安全、地理位置等发展约束，亟需大力发展以电化学储能、抽水蓄能、氢能为代表的多样化电能存储技术。

目前，电化学储能、抽水蓄能等技术发展最为成熟，但还需完善电力市场机制以充分释放其灵活调节能力，通过合理的市场激励促进灵活性资源大规模投资。当务之急便是加速建设和运行省级电能量现货市场与辅助服务市场，推动多元主体平等参与电力市场，从而充分利用市场手段优化调配灵活性资源，保障系统运行安全稳定，促进可再生能源消纳。

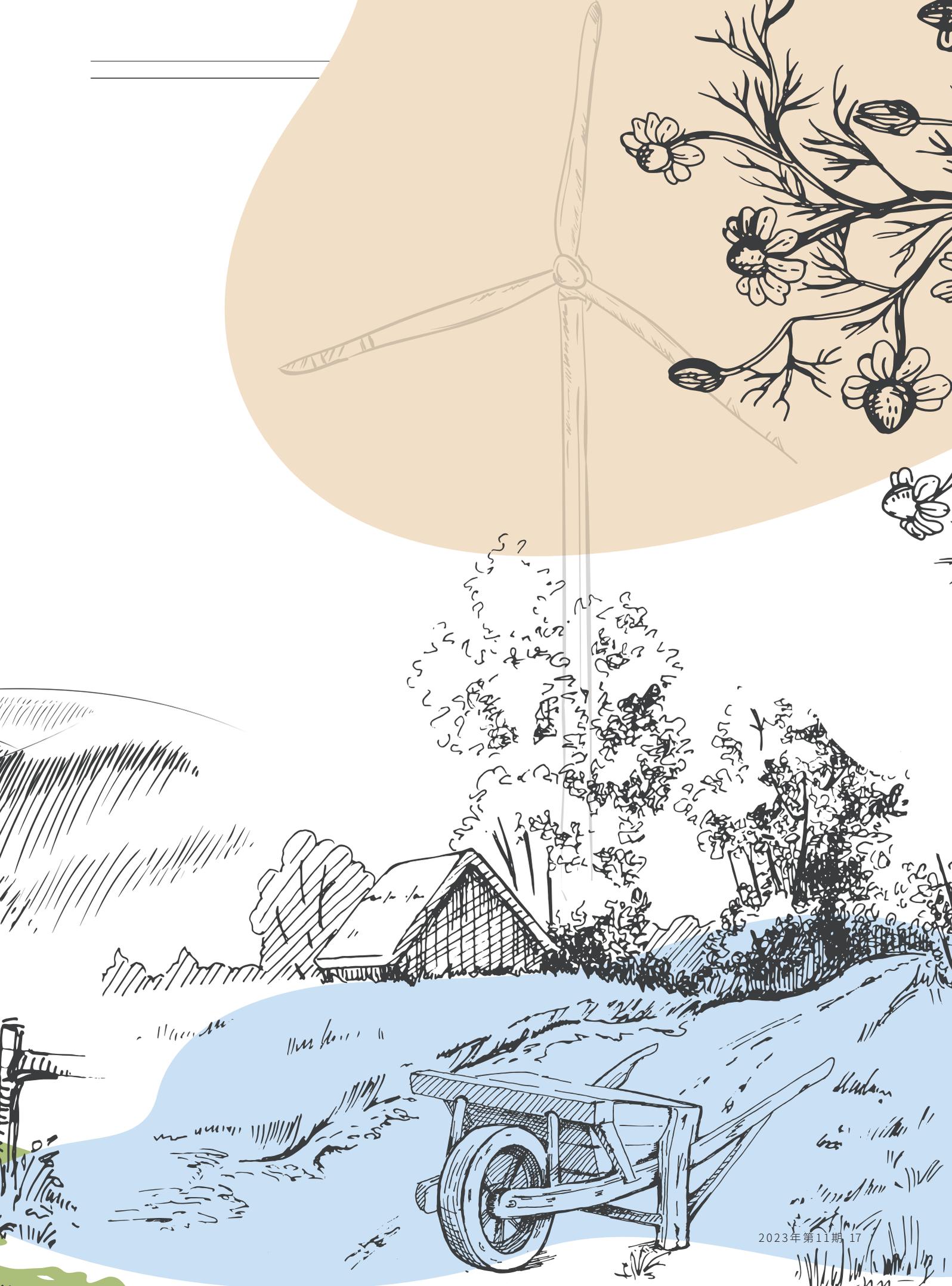
相比之下，氢能、储能型光热发电等创新技术尚处于商业化初期，且部分技术存在自主研发瓶颈。国家与省级地方政府宜提供差异化、精细化的政策扶持与激励措施，鼓励这些灵活性潜力巨大，但短期内难以实现经济效益的零碳灵活性技术的发展与应用，推动试点示范应用，促进相关产业集群发展。🚀

长时灵活性资源的发展仍需推动以氢能为代表的技术突破，加快其在未来十年的试点、示范与早期市场化应用。

2: 张贤, 杨晓亮, 鲁玺, 等. 中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2023) [R]. 中国21世纪议程管理中心, 全球碳捕集与封存研究院, 清华大学. 2023.

# 乡村振兴

位于科尔沁大草原深处的内蒙古通辽市花吐古拉镇，充分利用当地风光资源，采用创新型、集成化综合智慧能源方式，形成广泛适用于城镇、乡村的能源开发建设模式，成为了通辽市首批乡村振兴综合智慧能源示范项目所在地。



# 智慧能源闪耀在 花吐古拉

本刊 | 王芳

花吐古拉镇位于科尔沁草原腹地，属大陆性季风气候，常年干旱。这种对植被不太友好的环境，却蕴藏着丰富的风光资源。2021年，国家电投综合智慧能源项目花落于此。一年后，从养牛、供暖、家庭用电，到智能的路灯、垃圾桶、座椅等，智慧生活已融入当地群众的生产生活之中，人居环境得到全面改善。作为清朝孝庄文皇后的故里、嘎达梅林的故乡、“红色骑兵”的诞生地，这个拥有3.5万人的蒙古族聚居地，经过新能源的美化、绿化、亮化、净化，农牧民安居乐业，再也舍不得离开家乡。

## 深入调研，智慧能源落地花吐古拉

2021年，国家能源局、农业农村部、国家乡村振兴局联合发布《加快农村能源转型发展助力乡村振兴的实施意见》，提出到2025年，建成一批农村能源绿色低碳试点，风电、太阳能、生物质能、地热能等占农村能源的比重持续提升，农村电网保障能力进一步增强，分布式可再生能源发展壮大，绿色低碳新模式新业态得到广泛应用，新能源产业成为农村经济的重要补充和农民增收的重要渠道，绿色、多元的农村能源体系加快形成。

国家电投积极践行社会责任，开展了一系列助推清洁能源与乡村振兴融合发展的帮扶活动。结合公司首批启动的“红色百年”特色行动的契机，内蒙古革命老区科左中旗成为综合智慧能源项目落地的首选。



为了让综合智慧能源真正助力少数民族地区的乡村振兴，国家电投控股的中电投蒙东能源集团有限责任公司通辽发电总厂（下称“通辽发电总厂”）调集精兵强将，组成专班专队，一边到北京、合肥、青岛等地进行项目调研，到公司在安徽小岗村建设的美丽乡村综合智慧能源示范项目开展考察调研；一边在科左中旗勘测走访，综合地质、风能资源等，最终将目光聚焦在了科左中旗西南部、曾是内蒙古自治区重点扶持的贫困地区——花吐古拉镇。

随后，通辽发电总厂专班专队积极与通辽市政府、花吐古拉镇政府沟通，同设计院、规划院深入交流，先后与科左中旗政府和花吐古拉镇政府签订了《深化合作框架协议》；并邀请通辽市能源局、发展改革委等政府部门的负责人，到国家电投综合智慧能源示范项目村进行考察，到花吐古拉镇现场实地踏勘调研。

专班人员制定了详细的调研规划，明确分工，由企业派驻的第一书记带队，深入嘎查逐户摸底调查，收集村民



对项目建设、运营方面的意见建议，调研项目开发建设条件及可行性。面对村民的疑虑，专班人员和嘎查干部耐心解释了国家对风光项目建设的各种优惠政策，以及通过日益完善的法制化、规范化治理乱象，如何将荒地变废为宝的措施，使村民放宽了心。

通辽市能源局组织专家对项目建设的必要性、惠民收益、方案竞争优选及可复制与可推广示范性进行评审优选，最终确定了将“国家电投花吐古拉镇综合智慧能源项目”作为通辽市首批乡村振兴综合智慧能源示范项目实施开发建设。

花吐古拉嘎查和四合嘎查偏僻的 386 亩盐碱地荒滩，从此成为国家电投花吐古拉镇综合智慧能源项目得以落地生根的宝地。

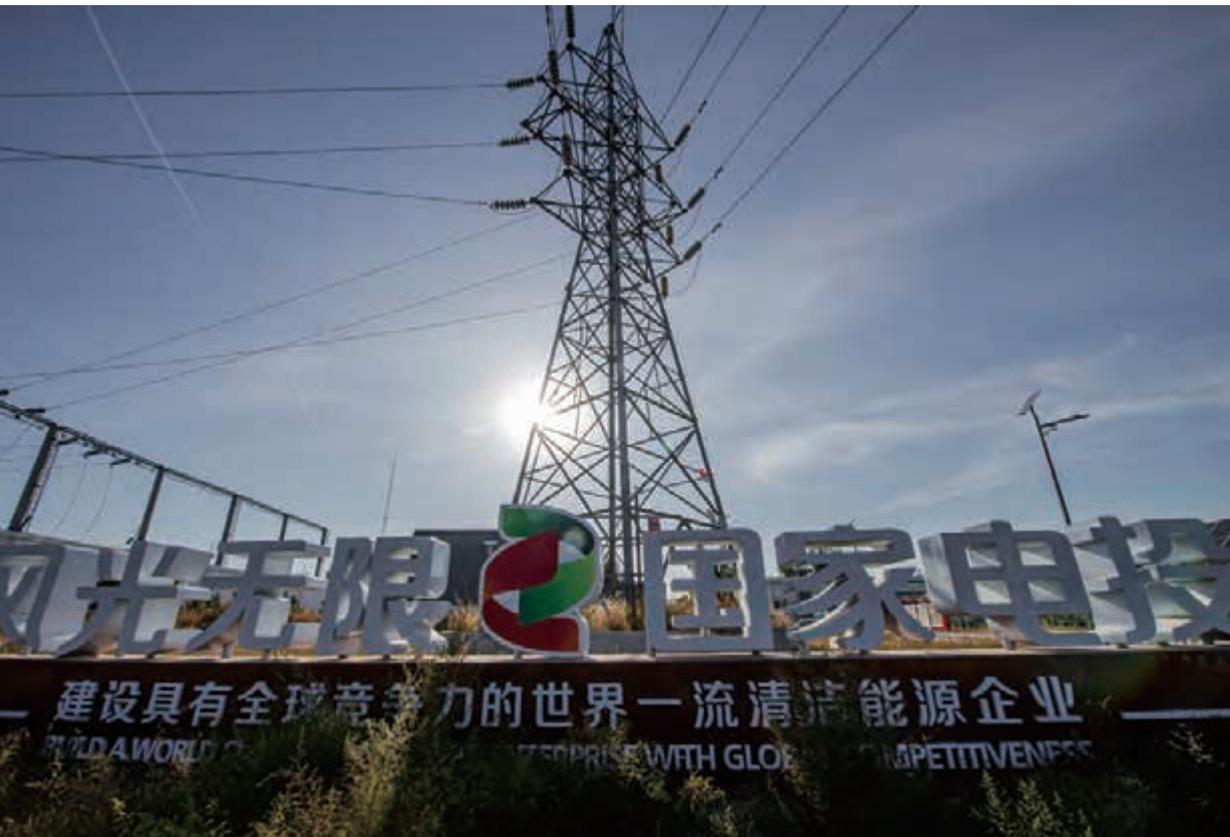
## 新能源产业帮扶，农牧民收入多了

产业帮扶是乡村振兴的重要抓手，而风电、光伏项目

是产业帮扶的新兴业态。国家电投花吐古拉镇综合智慧能源项目包含 8MW 风电、11MW 光伏和 0.99MW 户用光伏。

两台 4.0MW 风电机组的建设工作自 2022 年 10 月底至 12 月底。“当时正值疫情封闭期间，施工人员进场、原材料及备品备件运输、各项生活物资供应等都遇到了诸多困难。此外，冬季低温环境对施工机械启动、混凝土浇筑、作业人员等的影响较大。然而，面对诸多困难，全体管理人员和施工队伍始终团结在一起，圆满完成了这次的艰巨任务，保证风电机组如期投运。”通辽发电总厂副总工程师何建新，谈及项目建设遭遇疫情的困难时向《风能》如是说。

国家电投花吐古拉镇综合智慧能源项目落地后，为当地村集体带来了现金流，向农牧区嘎查振兴注入了新动力。2021 年，通辽发电总厂决定租用 25 年荒地，前 10 年以 11.8 万元/年租用花吐古拉嘎查的 127 亩荒地，以 24.18 万元/年租用四合嘎查的 266 亩盐碱地；后 15 年按照土地实际租金结算。通过这种村企共享新能源项目收益的方



式，嘎查村集体将获得 300 余万元的乡村振兴基金资金，用于建设和改善嘎查村容、村貌及公共基础设施。

考虑到项目占用的是盐碱地，为了能够有效利用土地，通辽发电总厂党员突击队对场区 100 多亩土地进行了重新覆土增肥，并多次聘请内蒙古农业大学农作物种植专家，对盐碱地土壤进行科学改良，向农牧民传授农作物、中草药、花果林木种植技术。农牧民可以在这里免费种植小麦、荞麦、牲畜饲料，以及中草药等经济作物，还可以种植披碱草、紫花苜蓿、葵花、高粱和树苗等，免费放养羊、鸭、鹅等牲畜家禽。

花吐古拉镇党支部书记包宝音吐说，“以前这里是个大土包，后因村民取土变成了大坑，种什么都不行。电厂租地建发电基地，把专家请过来好几次，荒地经过科学改良后，种在上面的荞麦一开花，就意味着丰收的季节快到了！”

“花吐古拉”为蒙古语，意为“淡黄色的牛犊”。当地的养牛产业已经形成集种植、养殖、繁育、屠宰、深加工、

销售于一体的全产业链循环经济模式。在花吐古拉镇的东北侧，项目部为养殖合作社盖起 960 平方米的牛舍，饲养了 70 多头黄牛。新能源所发的电可自发自用于轧草、照明、饲料种植和灌溉等，每年能够为村集体带来 3 万元的收益。

此外，村委选出生活相对困难的 100 户家庭，为他们安装了 50kW 户用光伏，不但减少了这些家庭的用电支出，每年还能够为他们带来 2000 元租地费用。

据了解，国家电投花吐古拉镇综合智慧能源项目落地一年后的 2022 年，当地年产值比 2021 年增加了 1396.54 万元，人均可支配收入增加 838.64 元。

## 新能源供电，鸟儿飞回来了

国家电投花吐古拉镇综合智慧能源项目建成后，两台风电机组每月可提供 210 万千瓦时的清洁能源，每年相当于减少 1.9 万吨二氧化碳排放。

项目所发电量采用“自发自用，余额上网”模式消纳，



自用电占 75%，剩余的 25% 电量上网。自发自用的电量用于花吐古拉镇附近工业园区。另一部分电量则用于冬季供暖，这是项目配套的惠民举措之一，即“煤改电”清洁供暖，通过新能源发电带动电锅炉、空气源泵，借助综合智慧能源管控平台对热负荷及设备进行集中监控管理，完成向花吐古拉镇人民政府办公楼、司法所办公楼、政务办公大厅等共计 5000 平方米的建筑面积提供全天 24 小时的稳定供暖，每年直接减少取暖燃煤消耗量 150 吨，为镇政府和村部节约供暖费和电费 14 万元。

风光互补，实现了地面光能和高空风能的有效结合，使得当地可再生能源得到了更高效利用。能源管控平台，可根据用户用电负荷和资源条件合理配置系统容量，既保证了供电可靠性，又降低了发电系统成本。

据估算，国家电投花吐古拉镇综合智慧能源项目每年可发电 4991.01 万千瓦时，相当于节约标煤 15292.45 吨，减排二氧化碳 39760.38 吨、二氧化硫 28.6 吨、氮氧化物 29.8 吨、烟尘 5.8 吨。

实施清洁能源供暖及供电，大大改善了周边空气质量。“以往火力发电的煤灰堆积，一刮风都看不见人。经过覆盖修复，土壤质量转好，尤其是在光伏板下的韭菜，避免了强光照射，又能够保持一定的温湿度，长势非常好。环境变好后，很多鸟又飞回来了。”何建新笑着说道。

未来，国家电投将继续探索优化城镇电锅炉与空气源热泵相结合的集中供热模式，大力推广用更多的清洁能源替代燃煤取暖。

## 实现智慧生活，村民心里更亮了

农村地区能源绿色转型发展，是满足人民美好生活愿望的内在要求。国家电投花吐古拉镇综合智慧能源项目最大限度将新能源与百姓生活场景深度融合，村民们对“智慧”二字有了更直观的理解。嘎查由于地处偏远，很多道路照明设施不完备，影响村民夜间出行安全。在依托分布式能源场区配套建设的红色主题文化广场和智慧公园里，智慧路灯、智能垃圾桶、智慧座椅、智慧车棚和扫码免费充电桩……一个个智能设施出现在生活中，让乡亲们心里越来越亮堂。

利用项目带来的乡村振兴基金，嘎查农牧民的人居环境、村容村貌等方面得到全面改善，大家的幸福感和获得感有了大幅度提升。四合嘎查书记张贵权说，“村里的环境卫生整治、沟塘清淤、清理农业生产废弃物、公厕的新修和改造、绿化美化项目等，都得益于新能源给村集体带来的振兴基金。嘎查现在越来越好，大家都不再想往外跑了……”

此外，依托国家电投自主研发的“天枢云”系统建成的综合智慧能源管控系统，项目还将智慧政务、智慧农业、智慧医疗、智慧旅游纳入终端管理，打造能源网、社群网、政务网“三网”融合，让“智慧大脑”服务产业发展，助力乡村振兴步入快车道发展。

目前，国家电投花吐古拉镇综合智慧能源项目已无偿投资 3176.25 万元。当前，通辽发电总厂正积极拓展新能源基地，推进火电灵活性改造配置新能源的兴安盟突泉县 44.5 万千瓦风电项目落地。该项目已于今年 3 月 30 日成功获得核准，并于近期开工建设。这将进一步提升花吐古拉镇的清洁能源占比，促进形成以新能源为主体、煤电为辅助的能源结构，助力建设更加美丽的绿色乡村。📍



## 回溯来时路，展望新征途

### ——“风起五十年”主题论坛与主题展举行

本刊 | 赵靓

10月16日下午，作为2023北京国际风能大会暨展览会（CWP 2023）重要环节之一的“风起五十年”主题论坛举行。此次论坛是风电大家庭一次难得的聚会，邀请到全球现代风电技术与产业的缔造者和开拓者，包括几位中国风电行业的“老朋友”相聚一堂，回首五十年的风雨兼程，展望繁花似锦般的美好未来。

论坛由中国可再生能源学会风能专业委员会（CWEA）秘书长秦海岩与全球风能理事会（GWEC）首席执行官

Ben Backwell共同主持。8位嘉宾分享了自身的从业经历，阐述了对未来风电发展的看法。

在论坛中，西门子风电前CTO、Stiesdal A/S公司CEO Henrik Stiesdal首先分享了自己对风电技术进行探索与研究的过程。有趣的是，Henrik Stiesdal研制风电机组的初衷，是他父亲的农场希望获取更有经济性的能源。在气候变化问题愈演愈烈后，他的目标有所变化，那就是通过发展风电避免气候变化引发的灾难性后果。谈及对中国风电30



左图：参加论坛的嘉宾合影；右（上）图：在“风起五十年”主题论坛上，嘉宾回顾风电发展历程；右（下）图：风电先行者代表合影

年发展的感受，他认为中国最初只是一个追随者，今天已经可以与欧洲肩并肩发展，甚至在不少领域都是“领头羊”。

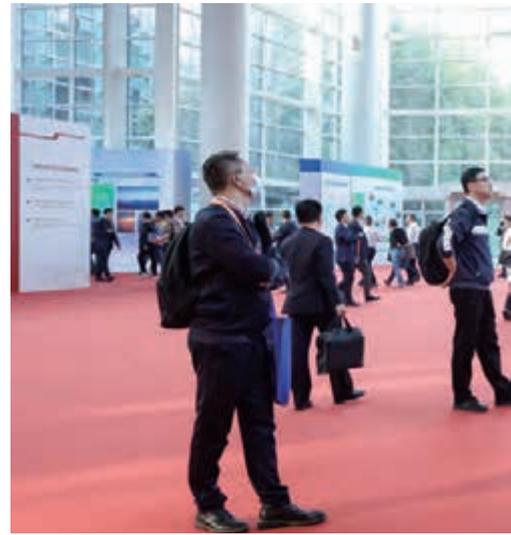
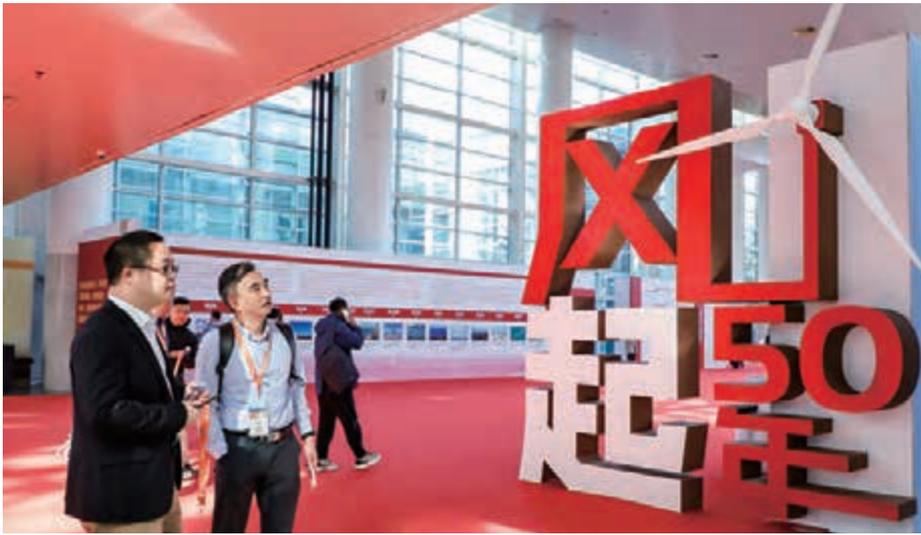
30年前，Henrik Stiesdal 曾作为 Bonus 公司风电机组的技术负责人，参与过中国达坂城风电场建设。在这段记忆犹新的经历中，他对与中国团队的共事感到开心。金风科技股份有限公司董事长兼总工程师武钢当时正是达坂城风电场的场长。他回忆了以 Bonus 为代表的国外公司的风电专家，如何细致入微地给予技术支持。在谈起 20 年前多次前往丹麦考察学习的经历时，武钢表示，当时丹麦国家可再生能源实验室（RISO）采取开放合作的态度，开放了大量技术资料，帮助中国风电提升技术水平。武钢总结说，中国风电产业是从国际合作开始的，未来也一定要与这些国家携手并进。

中国能源研究会常务理事李俊峰同样谈及了达坂城风电场，以及位于朱日和、汕头、汕尾等地的其他国际援助的风电项目。他认为，中国最早的风电项目大多得到过国外支持，甚至包括一系列技术培训等。应该感谢这一时期

的国际合作，使中国风电行业交了一批外国朋友。今天，推动风电领域的国际合作，受益者已不仅仅是中国，而是全球各地。目前，能够切实应对气候变化的抓手之一是新能源，中国已经成为全球风电产业链供应链中非常重要的一环，这为未来的国际合作奠定了基础。

Garrad Hassan 公司创始人、前 CEO Andrew Garrad 分享了自己首次进入风电领域的过程。当时他还能够用身体背得起风电叶片，而如今风电叶片的长度已经达到 120 米以上。Andrew Garrad 认为，对风电模型的开发和验证，是令他最为着迷的一件事，因此，希望将数字建模技术应用在风电领域，而金风科技正是 Garrad Hassan 公司的第一个客户。在不少国家，风电的投资、规模化发展与电网建设是热点话题，而在中国，这些能力的提升却非常迅速，这是中国的优势。在谈及未来的技术发展趋势时，Andrew Garrad 认为风电机组应向高可靠性方向持续优化。

中国风电政策体系的建立过程，有中国的创造与智慧，也有对国际经验的借鉴。国家能源局新能源和可再生能源

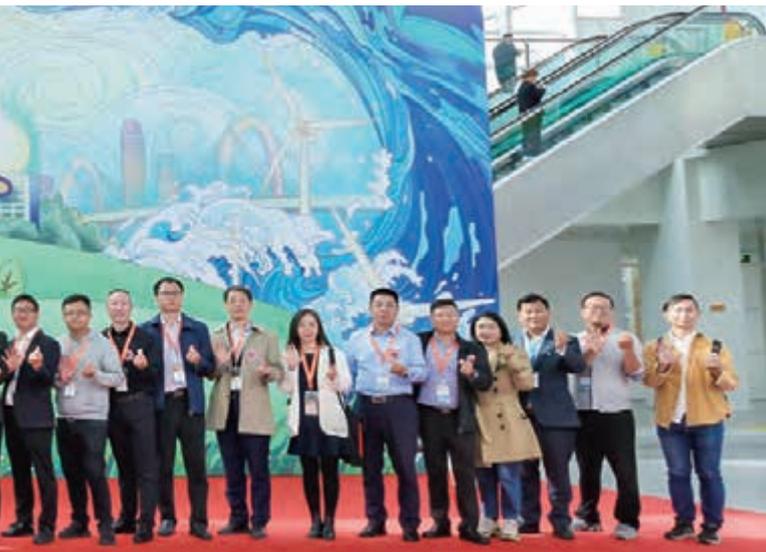
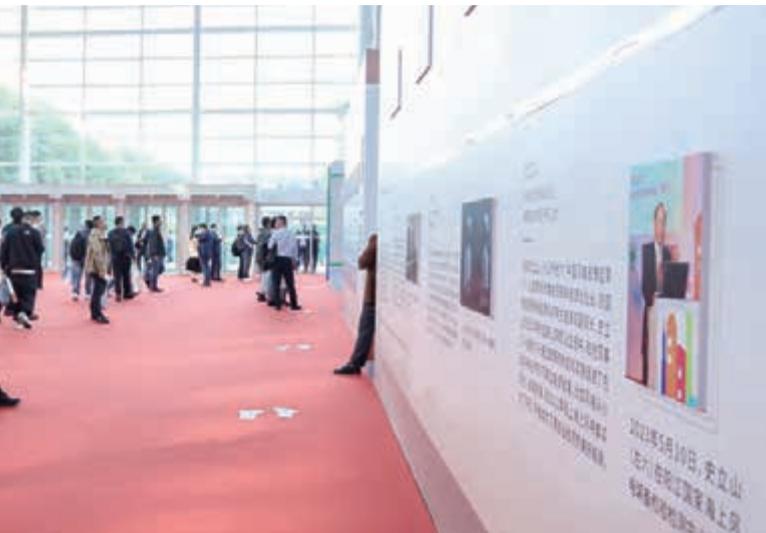


司原副司长史立山举例说，风电特许权招标的测风与可研工作，得到了联合国开发计划署（UNDP）的支持，为中国风能资源评价打下基础。而对可再生能源的立法与规划，以及后续配套政策的制定，则得到了世界银行的支持。尤其是于2009年开展的中丹项目，支持了《中国可再生能源发展路线图2050》的研究工作，通过一系列模型预见未来中国以可再生能源为主的能源形态。这些实实在在的国际支持，使中国风电学到了很多最新的发展思路。

Arthouros Zervos 是21世纪可再生能源政策网络（REN21）主席、全球风能理事会（GWEC）首任主席，经历横跨风电产学研等领域。在他看来，2000年左右欧洲在行业协会的支持下，通过国际合作逐渐使风电成

为全球产业。他引用前几年所做的市场分析，表示中国是一个非常重要的市场，潜力巨大。2005年在中方参与下，全球风能理事会（GWEC）成立，这是一个转折点。Arthouros Zervos 认为今天中国风电产业如此成功，离不开国际合作，这也是未来推动行业发展的关键一步。

在论坛上，中国可再生能源学会风能专业委员会原副主任施鹏飞分享了自己早年参与风电国际合作项目的故事。1986年，他作为技术顾问全程参与了比利时赠送的4台200kW风电机组的安装调试，项目位于福建平潭。国外专家刚开始对安装队使用土办法吊装感到不安，当机组安装好后，则对中国工人的能力表示非常佩服。比利时政府提供的人员培训，帮助中国具备了风电叶片设计和制造



能力。1988年在北京的英国大使馆内举行了微型风电机组的赠送仪式，由英国驻华大使亲自主持。这批50W的微型风电机组，分配给了没有电网的山区和牧区居民使用。同年，英国赠送的60kW独立运行风电机组和柴油发电机组安装在山东的崂山岛上。这套系统不但使岛上渔民延长用电时间，还可洗上热水澡，提高了生活质量。

明阳智慧能源集团股份有限公司党委书记、董事长张传卫回忆起公司从电力设备制造商进入风电行业的情形。当时，他了解到变频器可能是兆瓦级风电机组的核心部件，650kW以下的机组有60%依靠进口，兆瓦级机组建立了国际供应链，同时又在参观了金风科技的工厂、达坂城风电场后，决定进入风电领域。在与欧洲专家的交流中，公

司确定了机组向大型化、轻量化、免/少维护的发展方向，最终在半直驱、紧凑型设计上取得了突破。他表示，中国风电行业是在学习到的欧洲技术思维、工业思维和制造思维基础上做到从“0”到“1”的突破，建立起适合中国风况的供应链体系。在这个过程中，创新是中国风电发展的内在驱动力。

参加论坛的嘉宾们还对未来风电技术与产业发展进行了展望。他们表示，为实现零碳社会，需要尽可能地充分生产与消费绿电。无法采用电气化能源的生产工艺，必须利用基于绿电的非碳燃料，包括制氢、制氨等“Power to X”技术，从而为全球风电产业打开新的市场空间。实现这些创新技术与发展模式的加速发展仍存在诸多挑战，需要各国进一步加强互动、共同应对，这为全球开展更为紧密的技术与经济合作创造了机遇。

一个个风电人物、一座座风电地标，诠释了中国近半个世纪的风电史。论坛上，秦海岩介绍并发布了《风起五十年：风电地标与风能人的故事》一书，希望让更多的人了解中国风电从无到有、由弱变强的奋斗史。

正是基于对风电的热爱，中国及其他国家的众多风电前辈，以先行者的姿态，开启了近半个世纪筚路蓝缕的奋斗征程。他们中有技术创新引领者，有政策创新推动者和奠基人，有众多的企业领袖。涓涓细流汇成滔滔江海，正是所有人的创新精神、创业精神、企业家精神，才铸就了风能人的精神。可以说，没有他们，就没有风电的今天。“风电先行者”活动环节，邀请到中外风电产业先行者的代表到场，向他们致敬与致谢。

10月17日，“风起五十年”主题展在CWP 2023展览现场开幕。该主题展用文字、图片记录过去半个世纪经历的辉煌瞬间，细数来时路上的座座丰碑。一个个鲜活的人物，一张张充满历史感的照片，一段段极富张力的文字，一幅幅清晰易懂的图表，盘点产业发展的重要成就，再现那段波澜壮阔的历史。在展板前，观众们细心观看，驻足留影，为风电行业的快速发展而自豪，为风能人不屈不挠的奋斗精神所鼓舞。

回溯来时路，展望新征程。前行者们的信念、经验与力量，激励着全体风能人不忘初心、奋勇前行，通过深化国际合作，携手推进风电这一关乎全人类福祉的共同事业，使之成为全球范围内可负担的绿色能源，为人类社会的可持续发展作出贡献。📍





# 全球聚力，共创未来

## ——2023北京国际风能大会暨展览会精彩汇编

本刊 | 时春景



秋风正好，秋意渐浓。10月16日—19日，2023北京国际风能大会暨展览会（CWP 2023）在北京盛大举行。CWP 2023以“构筑全球稳定供应链 共建能源转型新未来”为主题，展览面积超过8万平方米；参展企业突破1000家，覆盖了整机、零部件、勘测设计、施工、工程装备等全产业链；国际展商占到全部参展商的四分之一，来自丹麦、挪威、德国等多国的企业组团参展；吸引了超过10万人次观众，创下历届CWP的最高纪录。作为全球最受瞩目的风电展会之一，透过一项项刷新历史的数据，一场场精彩纷呈的论坛，一个个独具特色的展区，CWP 2023再次凝聚起全球风能人关注的目光：同览今日繁荣画卷，是倾力筑梦者应有的欣喜；共绘明天兴盛蓝图，是风雨兼程者必达的使命。



### 置身论坛，聆听智者先声

CWP 2023 基于对产业发展态势的研判，围绕全球合作、技术创新、绿色投资、高质量发展等关键议题，设置了企业家论坛、全球风电产业布局及供应链安全、国际风电发展动态及投资、海上风电工程装备、人工智能与智能运维、风电产业技术创新、机组可靠性、储能 & 氢能高质量发展、风电产业链国际合作等20多场广受行业关注的重量级论坛。来自国际组织、多国驻华使领馆、国内外政府部门、全球风电产业链企业、高校与科研院所等机构的

01	02
03	04
05	06

01: 创新剧场  
02: 储能论坛  
03-06: 展览现场

数百位专家代表，通过主旨发言、对话、专业演讲等多种形式，探寻双碳背景下风电产业高质量发展的路径。高级别的嘉宾代表，是 CWP 给予观众的最大诚意；座无虚席的讲演现场，则是观众对 CWP 的极大认可。

作为 CWP 的重头戏，创新剧场是新品发布和品牌推广的绝佳舞台。产业的蓬勃发展推动着产品与技术的加速迭代更新，在新一轮四季的更迭中，众多研发努力结出了累累硕果。经过组委会的精心筛选与组织，共有来自远景能源、DNV、三一重能、金风科技、明阳智能、鉴衡认证中心等多家企业和机构的数十个前沿技术、产品和研究报告，集中亮相 CWP 2023 创新剧场的舞台。在新机型方面，众多风电整机商推出了 10MW 级及以上陆上风电机型，新发布海上风电机组的单机容量普遍在 12MW 以上。在研究成果方面，DNV 发布了年度重磅报告——《能源转型展望报告 2023》；鉴衡认证中心与金风科技共同发布了《中国海上风电机组抗台风风险检验白皮书》《风力发电碳足迹研究报告》。此外，一系列新材料、零部件产品及解决方案带领观众登临行业创新的高地。

## 漫步展区，感受科技力与设计美

参与本次展览的千余家企业，错落有致地分布于 6 个展馆内。而储能与氢能展区、海上风电工程及装备展区、技术交流区、洽谈对接区与招聘发布区等细分功能区域，则大幅提升了专业观众的观展体验与交流效率。在兼顾整体性与协调性，又各具特色的参展厂商展位上，各家企业通过滚动播放的电子屏幕、宣传册页、专题演讲、实物及微缩模型，实时向外传递着产品、技术、解决方案信息。在金风科技展台上，新一代风电机组模型徐徐转动，1600 吨海上风电吊装平台模型宣示着它海上重器的身份。在中际联合展台上，可供真人演示的齿轮齿条升降机则汇聚着科技的力量，为风电运维赋新能……

除了硬实力，设计感和科技感并重、契合企业发展理念的展台设计给观众带来了极佳的视觉体验。以“黄金螺旋线”作为设计理念的明阳智能展台，融合风之灵动与海之深邃，传递出明阳智能与全球风电同行共建海洋文明的决心。中船海装打造出大气磅礴的开合式复合空间，特别是悬于展台上方的数字巨幕变幻出海天的蔚蓝与广袤，让观众获得了沉浸式参展感受。电气风电的展台以代表着未

知、无限、希望的字母“X”为主视觉设计元素，一面 X 形电子屏拼贴设计于透明的主体构筑物外立面，具象化动态展现电气风电的产业布局。

在这个多样化和立体化展示空间里如潮水般涌动的观众，昭示着风电产业生生不息的生命力。他们中，有熟悉的老面孔，也有充满朝气的崭新面孔；有已经在各自岗位上兢兢业业工作多年的企业员工，也有尚未走出象牙塔的莘莘学子；有同胞，也有国际友人。他们，或将目光聚焦于一台台设备样品，或在展区的可移动座椅上专注聆听，抑或与技术团队进行深入的沟通交流……

值得一提的是，每年立于展馆中的一块巨型主题展板，是观众驻足的打卡点。今年的主题展板，以属于风能人共同情怀的主题设定和简洁大气的配色设计高频出镜，成为人气场景。

## 匠心办展，臻于细节

让观众获得极致的参展体验，是 CWP 不变的宗旨。在 CWP 2023 上，图文交互的参展须知、占据醒目位置的注册二维码、区分不同参展群体的注册窗口、一字排列的自助取票机……观众虽多，但一键直通会场绝不是梦。巨幅参展平面示意图及参展企业名录展板，轻巧便携的参展手册，粘贴于各展馆走廊的展台分布导引图，使展览信息触目可及、俯拾即是。在立体化信息指示牌的指引下，观众能够随时随地获悉自己所处的位置，并轻松到达所要探访的目的地。

与此同时，CWP 贯彻环保理念，一步步升级材料，一点点改进设备，致力于打造绿色展会。CWP 2023，除了采用灵活电子屏幕向观众及时传达有效信息，还在展台搭建上大量运用可重复使用的钢质材料替代木质材料，以及可降解的贴纸饰面替代涂料。此外，在现场出入口设置证件回收处，以回收利用参观证件。

一代代怀揣梦想的风能人筑牢了风电发展的根基，让风电产业的旌旗在全球飘扬；一届届倾力打造的 CWP 让风能人看见、听见、记住风电产业的今天，并为它明天的辉煌注入更大力量。CWP 2023 再次为全球风电行业搭建起高效沟通的桥梁，让肩负重任的风能人坚定方向，奔赴未来。展期有限，后会有期。CWP 2023 虽已落幕，但在高速旋转的双碳时代车轮下，新的道路正在开辟，新的成就必将书写，新的重逢也终将到来。🚀

Nidec  
All for dreams

SSB Wind Systems<sup>®</sup>  
Be consistent.

# SSB变桨系统 经验祝您成功

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



集成式变桨驱动器EPD



SSB超级电容模组



手持高压蓄电池电容测试仪BPMM-2H



叶片状态及全场测量系统  
Blade Vision

埃斯倍风电科技（青岛）有限公司 [www.ssbwindsystems.cn](http://www.ssbwindsystems.cn)

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

数据来源：埃斯倍风电

广告



## 从小白到大咖， 一名运维人员的成长经历

本刊 | 赵靛

2019年的一天，于重阳与两位同事围着一个伺服驱动器认真拆解。这个驱动器在风电机组中发挥着非常关键的作用，每台机组上都装有三个这样的设备，虽说它们是从国外进口的，可一到冬天便频繁损坏。换新的话，一台就要2万多元。于重阳等人主动请缨，力图破解伺服驱动器损坏的原因，找到修好它的方法，并防止它再次损坏。三人已经围着这台驱动器修理了一周。突然，驱动器的风扇开始快速转动，风扇的轰鸣意味着部件已被修好。办公室里正潜心工作的其他同事，不约而同地鼓起了响亮的掌声。

那个瞬间，令龙源蒙东公司技术管理员于重阳至今难忘。

以风电作为工作起点，在于重阳看来是必然的选择。他从小就喜欢研究电，年少时则喜欢做各种各样的小试验，捣鼓电气设备，因此，上大学后选择了电气专业。加上生长在内蒙古赤峰市，风电机组的身影在他的内心深处扎了根，毕业后于重阳顺理成

章地选择了风电行业。为了离家近些，他应聘了龙源蒙东公司，成为一名风电场值班员。

入职半年后，于重阳所在的风电场出质保，开始由业主方负责机组运维。“刚开始对风电机组不了解，也没有什么特长和绝技，就是跟着老师傅干，对新技术掌握不够。”于重阳向《风能》回忆道。然而，对于普通人而言枯燥乏味的工作，却被于重阳找到了乐趣与希望。

有一次，于重阳在风电机组上做测试，由于操作错误导致变流器中的斩波器损毁，金属都化成了液体。场长并没有过多责备于重阳，只是告诉他，此前风电场中所有变流器都运行稳定，因此，没有人维修过这些设备，正好可以借此契机去研究它们，但前提是尽快恢复机组的运行。

“变流器太稳定了，连厂家的联系方式都没有，也不认识技术专家，没有救兵，只能硬着头皮自己上。”于重阳与另一名同事参考图纸将变流器全

部拆开，对照其他品牌变流器去研究。最终用四五天的时间弄明白了原理，更换了部件。

对于于重阳来说，这件事是一个挑战，更是一个机遇。正因为捋顺了变流器的工作原理与内部器件的设置，于重阳的运维技术能力得到了大幅提升，他决定将风电技术作为日后工作的主攻方向。

2018年，于重阳参加了龙源电力举办的脱产培训班——匠星训练营。培训班邀请到专业的大学教授，从零基础开始，对40多名来自全国各地的一线员工进行为期半年的脱产培训。

“节奏非常快，一本电路教材在大学里需要教两个学期，在培训班里只有4天学习时间。如果合格，就继续下一阶段的学习；不合格的话，可能会被劝退。”于重阳回忆说，“所有人都在拼命学习。”

在匠星训练营的40多人中，有12人得以晋级，参加首席师培训生的训练，继续以实战的形式脱产培训一

年，探索攻破一些风电场现场的技术难题。“相比匠星训练营，这一年对我而言更关键。”

于重阳日后才得知，能够脱颖而出进入首席师培训生训练的12个人，所展现的竞争优势并非只有风电理论扎实或技术水平高那么简单。“还要看你有没有责任心，是不是爱管闲事，比如有没有主动倒办公室的垃圾，或是烧开水等。”

如果说内部培训为于重阳日后转向技术岗位打下了基础，那么，一场全国技能竞赛则为其指明了职业生涯的坐标。

2021年，龙源电力选拔了几人参加由中电联组织的全国电力行业职业技能竞赛，并组织了赛前集训。

“竞赛集训分理论与实操两方面，我比较擅长实操，但在理论阶段感到非常吃力。”于重阳回忆说。

为了能够入选，于重阳关闭手机，不仅按照目标学完理论书籍，还认真弄明白每一处知识点，除吃饭和睡觉，他将全部时间用于学习。“每天早上七点准时考试，成绩当天中午公布，每天的排名都在变化，大家使劲往上赶，否则稍有不慎，成绩就会出现下滑。”

正是通过这样的高强度学习，于重阳成功入选为参赛选手，“到真正竞赛的时候，反而感到比较轻松。”

最终，于重阳与搭档在这场全国技能竞赛中夺得了第一名。

如今，于重阳的主要工作是开展技术创新，解决技术难题。一方面，他负责管理龙源蒙东公司的技术中心。该中心约有50名技术人员，分布在不同的项目现场。他们既是风电场的一员，又兼有技术中心的工作。另一方面，龙源电力成立了以于重阳名字命名的

创新工作室，6名来自不同项目的同事在于重阳的组织下共同完成一个又一个技术创新课题。

“这类技术创新一般都落实在生产上，一是通过创新解决设备问题；二是提升工作效率。”于重阳解释说。

例如，于重阳十分清楚风电机组中的液压系统故障率较高，而为诊断该系统是否存在隐患，需要两名工作人员爬到风电机组上，戴着护目镜等防护措施进行手动测试，不但效率低，且存在风险，“液压系统中的油一旦溅出，很容易伤到眼睛。哪怕溅到皮肤上，也会对身体造成不小的伤害。”

为提高对液压系统的检测效率，于重阳利用自己在大学期间所学的编程技术，在妻子生产的陪护期间开发出一款软件。它可以通过PLC获取运行数据与控制能力，诊断出设备是否存在缺陷，并显示出现问题的部件，指导检修人员更精准地开展检修工作。

“以前，一座安装66台1.5兆瓦风电机组、装机容量为10万千瓦的风电场，检测一遍液压系统需要一个月。现在，我们用这款软件，把时间缩短到了30分钟。”于重阳自豪地说，“这款软件虽然在技术上不存在太大的难度，但之前就是没有人去研制它。软件开发出来后，很多项目团队都协助进行了测试与修正，使这款软件得到了广泛应用。”

多年前的小白，现今已成长成为一名技术大咖；从台下认真听讲的学员，变成了一名经验丰富的讲师。最近两年，于重阳将更多的工作精力用在了培养新人上。作为龙源蒙东公司菁英班的讲师，他每年要为企业带出7名学徒，不仅帮助他们打好理论基础，也会带着他们到风电场现场进行实战。

据统计，于重阳处理过的普通机组故障已有上千个，超疑难故障有400个左右；授课课时达到1600多学时，有2600多人曾参加过他的培训。

当被《风能》问及他是如何做好项目技术能力积累时，于重阳表示，当前虽然自己更多的时间是在办公室、教室或出差培训，但他始终无法放下的是风电设备。

“技术学得再好，一旦脱离了设备，都不叫技术。理论功底再强，若没怎么爬过机组，当问题出现后，解决起来也会很困难。因此，要与风电机组多打交道，与现场人员多交流。”于重阳坦言，“更应多学习新知识、新技术，因为技术是迭代更新的。比如，有一个故障以前用一天时间能够解决就很厉害了，但通过学习可能会发现一个更便捷的方式，只需要一个小时便可以解决好。”

回顾于重阳的经历可以发现，他的成长与龙源电力的人才培养机制息息相关。于重阳认为，无论是自己，还是同事们，成长进步归根到底源于企业的培养。“近些年，人才培养的力度很大，企业搭建了匠星训练营、首席师培训生、菁英班等一系列学习平台，通过‘一杯两赛’助力多位技术工作者，这在其他行业并不常见。现在企业又设置了各种人才晋升通道，包括技术、技能通道，给了现场技术人员很大的成长空间。”

企业与员工的努力正在得到回报。据于重阳透露，随着人才队伍的建设完善，企业实力逐步得到提升。就生产工作而言，龙源电力对风电项目的考核标准不断提高，近年来的机组运行指标实现了大幅度提升。“以往，我每天都会帮助项目现场应对各种各样的故障；近两年，已经很少再接到类似的求助电话了。”于重阳坦承。✎

# 风电最有可能解决人类面临的气候问题

本刊 | 王芳, 叶无极



受访者：Stiesdal A/S 公司 CEO Henrik Stiesdal

Henrik Stiesdal, 被誉为“现代风电产业之父”。CWP 2023 举办期间,《风能》采访了这位风电泰斗。他认为,风电机组的大型化会达到合理的最大值,漂浮式海上风电机组的成本与固定式海上风电机组的成本曲线会有交集。他还坚信,风电最有可能解决人类面临的气候问题。

**Q** : 从您设计出第一代风电机组,到现在已经近 50 年,丹麦的风电发展格局有哪些应验了您之前的想法? 哪些超出您的想象?

**A** : 20 世纪 80 年代,丹麦风电行业认为风电能够在电力系统中发挥重要作用,政府同样认为这是可行的,提出到 2005 年使风电占比达到 10% 的计划。随着装机规模的扩张,风电在丹麦电力系统中的扩张势头迅猛,到 1999 年其占比已经达到 12%。

2002 年左右,一些大型欧洲公用事业公司发现有太多的风电要并网,他们需要改变在电力系统中处理风电的方式。在此之前,如果电网出现稳定性等问题,就会让风电与电网断开连接。等电网的其他部分处理好问题后,风电才可以重新并网。

改变从两家欧洲能源企业开始,一家是德国的意昂 (E.ON),另一家是苏格兰电力公司 (Scottish Power),他们让风电机组保持并网的状态。这带来了新的问题——如何保证电网的稳定性?然而,这也透露出两个重要的信号,一是风电技术需要升级,否则就无法实现并网的目标;二是风电已不再是电网的辅助电源,而是能够起到主导作用。事实上,如今风电发电量已占到丹麦全部发电量的 55% 左右。

**Q** : 丹麦大力发展风电的动力是什么? 近些年的关注点是否发生了变化?

**A** : 我最初研究风电,是为了让父亲的农场可以用上更便宜的能源,这与发展风电的初衷是相同的。二十世纪八九十年代在风电领域工作的人,会为自己所在的公司感到自豪,因为公司研发了很多新设备,提供了很多新岗位。然而,现在的人们会更多地关注环境的未来状态,希望为全球可持续发展或者后代更好地生存作出贡献,在观念上会比原来有更高的追求。

目前,丹麦风电从业者超过 3 万人。因此,从物质和精神两方面来看,我们正在做的事情都是非常重要且有意义的。

**Q** : 您认为风电产业未来会朝着哪些方向发展?

**A** : 这有点像汽车行业,它已经有超过 100

年的历史，人们在 50 年前就找到了汽车设计的最终形态，但它们此后依然变得更加高效、便宜。如果将现在的一辆汽车与 25 年前的汽车相比，前者会好很多。风电行业依旧有很大的提升空间。风电机组最开始可能只是作为单一的发电设备，如今更多的是想让它成为一个系统，使之应用场景更加丰富，比如与制氢、储能等相结合。

电气化是现代社会的发展方向之一，风电可以得到更充分的利用。能够转型的行业都应该用电，用不了电的选择用氢，能够使用绿电的地方应尽可能地使用绿电，还可以使用不含碳的能源。飞机、轮船等交通工具，钢铁、水泥的生产，高温加工的流程现在仍无法全面实现电气化，但可以使用基于绿电的非碳燃料。

在绿电应用方面，我们可以发展制氢。氢能发挥着至关重要的作用，可以帮助将绿电扩展到其他的领域，如制氨。

**Q：**国际合作在全球风电产业发展中发挥着怎样的作用？如今，中国风电产业可以为全球能源转型作出哪些贡献？

**A：**从全球范围来说，很多国家尚未发展风电产业，需要进口风电设备；另一些国家，如中国和丹麦，有着很好的风电制造企业，可以促进国际贸易合作。并非每个国家都能够自己找到发展风电的路径，有经验的国家可以与之合作，将先进的技术与经验带过去，使其少走弯路。我认为，国际合作确实在某种程度上发挥了作用，如在越南、印度尼西亚、马来西亚、菲律宾、泰国等，通过国际合作可以缩短前期的学习过程。此外，能源系统应该如何运作才能吸收尽可能多的可再生能源，这是亟待解决的一个问题。

围绕金融、设备、技术、服务等风电全产业链，都可以开展国际合作。中国有着很好的资源，以及完整的供应链，可以帮助更多的国家。

**Q：**海上风电机组技术未来将呈现怎样的发展趋势？单机容量和风轮直径会继续增大吗？

**A：**先要看技术。我们发现最佳的实践是不



上图：1978年Henrik Stiesdal正在研究风轮直径10m的风电机组；中图：1979年工作中的Henrik Stiesdal；下图：2016年Henrik Stiesdal手动转起1m的风轮

断地去改进和提升，持续降低度电成本，提升性能。

对于单机容量和叶片尺寸，我无法预测上限，但总会达到上限。从其他产业来看，它们在经历指数级增长后，最终都触碰到了“天花板”。比如，大型客机、油罐车等的大型化因为无法收回成本而停止了。我想，应该限制风电机组的高度，海上风电机组最高到 300 米，陆上风电机组最高到 200 米，就足够了。风电机组需要的是更加智能化，而非只追求大型化。这不是一个技术问题，而是成本问题。

风电机组的智能化肯定是最重要的发展方向。依靠智能化的模拟仿真，可以降低整体的设计成本。比如，针对风电机组的尾流影响，经过智能化设计后，系统能够运算出结果，从而实现风能资源利用的最大化。目前，人们对风电机组运行状态监测的智能化可能会有更迫切的需求。

**Q**：目前，欧洲漂浮式海上风电发展进入了哪个阶段？面临着哪些新的挑战？未来将呈现怎样的发展趋势？

**A**：风电可以产生我们需要的所有电力，但风能资源的分布非常不均匀。在欧洲西北部存在很多浅水区，可以很容易部署海上风电，在中国、美国东海岸同样如此。然而，世界上大多数地方并没有这样的场景。如果我们引入漂浮式海上风电，全球风能资源的利用率可以增长 10 倍。

不可否认，当前漂浮式海上风电机组的价格仍较高。就如同 30 多年前，风电与化石燃料相比是非常昂贵的，而现在在欧洲风电已经比化石燃料便宜，这是依靠工业化、机组大型化实现的。漂浮式海上风电同样需要依靠工业化来降本。

我认为，在接下来的十年中漂浮式海上风电将可以实现商业化的降本。值得注意的是，固定式海上风电的成本也会越来越低，但最终两者的成本曲线会有交集。

**Q**：漂浮式海上风电的成本要降到多少才能实现商业化？

**A**：近几年，全球的诸多突发事件导致风电

机组、基础和电缆都变得更贵了，出现很多不确定性因素。然而，我从一份公开报告中看到的最新预测是，漂浮式海上风电的度电成本在 2035 年将降至 50 欧元 / 兆瓦时（约合人民币 0.39 元 / 千瓦时）。

在产品批量生产前，总得有一些人愿意去做，而且是在成本很高的阶段去做，但我们相信成本最终是会降下来的，进而实现商业化。

**Q**：在降本的要求下，未来漂浮式海上风电基础型式会不会走向同质化？

**A**：我认为会逐渐统一到一个型式。就如同风电机组，不管是哪家的产品，它都是一个塔筒加上三支叶片。我认为，漂浮式海上风电最终会与陆上风电一样，能够通过模块化建造，叶片、塔筒和其他部件可以来自不同的厂家。

**Q**：当前，漂浮式海上风电成本较高，您认为依托海上风电进行立体融合开发会成为主要的降本方式吗？

**A**：“海上风电场 + 养鱼场”的想法很好，但多数漂浮式海上风电机组将安装在深海区域，以至于经营养鱼场的人可能会觉得它们离岸太远了。

如果想改变世界，对抗气候变化，我们需要建设一些超大型的电力和氢能项目。这是降低成本最重要的途径，并将创造更多的价值。

**Q**：您在风电领域的梦想是什么？希望看到一个怎样的能源未来？

**A**：我从事风电工作已有 47 年。现在回头看，发现风电行业的发展比我想象的要精彩得多、好得多。我完全相信，风电和太阳能光伏在我们对抗气候变化的斗争中将发挥越来越重要的作用。因此，当你研究风电时，你就是在研究世界上最重要的东西，这个领域最有可能解决人类面临的气候挑战。

在现有的所有发电技术中，风电产生的二氧化碳排放量是最低的，它的价格更是已经大幅下降。大家应该保持开放的心态，不断推进创新。🚀

国家海上风电装备公共检测检验与技术服务平台



国家海上风电装备质量监督检验中心



完全满足IEC标准要求的实验风电场，可开展9MW机组研发性测试

国家风电装备检测实验平台



国家能源风能太阳能仿真与检测认证技术重点实验室

集仿真技术、标准研究、检测认证技术研究与实践于一体的国家公共技术服务平台

## 创造客户价值, 推动产业进步



### 1 叶片试验

可开展150米叶片全尺寸试验

叶片全尺寸试验  
叶片子部件试验  
叶片原材料试验



### 2 整机装备检测

可开展15MW以上整机检测全套设备

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



### 3 在役机组检验

在役风电设备全生命周期技术服务

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



北京鉴衡认证中心有限公司

☎ 010-59796665

🌐 www.cgc.org.cn

📍 北京市东城区和平里北街6号远东科技文化园26号楼三层

# 哈电风能： 凝势蓄力谋新篇、开新局

本刊 | 王芳



受访人：哈电风能党委委员、副总经理 曹颖春

金秋时节，哈电风能以全新的姿态盛装亮相 2023 北京国际风能大会暨展览会（CWP 2023）。期间，哈电风能党委委员、副总经理曹颖春接受了《风能》的采访。他表示，哈电风能通过股权结构优化，成功完成了资源重组和战略调整，集中优势力量谋新篇、开新局。同时，他呼吁行业严守安全底线，加强行业自律，开展有序竞争，推动风电装备行业高质量、可持续发展。

**Q**：哈电风能全面开启了新征程，请问在实力上扩充了哪些优势？

**A**：哈电风能今年 8 月完成了股权结构优化，其中，湖南省属国企兴湘集团占股 49.2%，央企哈电集团占股 49%，湘煤集团占股 1.8%。本次股权结构优化得到了湖南省政府、兴湘集团、哈电集团的鼎力支持。湖南省国资委领导进行了实地调研，湖南省政府召开了哈电风能发展专题会议，研究部署哈电风能的发展大计。同时，作为大股东的哈电集团通过委派多名董事与经营高管深度参与公司未来的发展。通过本次股权优化，公司的决策、管理、经营机制能够更好地适应行业与市场，同时更好地保障了公司发展所需的资金、资源。哈电风能将与大家共享共荣、共赢共进。

**Q**：针对目前市场集中度越来越高、投资成本高、价格下降等趋势，哈电风能采取哪些措施？

**A**：在当前的国内市场上，风电装备产品平台化、系列化、集约化的趋势日益明显，主流厂家的开发策略趋同，产品同质化竞争激烈，产业链关键零部件共享逐渐成为常态，整机价格不断下降，给整个行业带来了巨大挑战。面对这样的市场环境，哈电风能不忘初心，坚持稳健、安全、可持续发展策略，始终将质量安全放在首位，不盲目追求规模和价格竞争，更注重知识产权的形成与应用，追求产品特色竞争优势，并储备了多元化技术路线，通过获取高质量订单、加大开发风能资源、拓展后市场运维、实施差异化发展战略，以应对市场的不断变化和未来更极限的挑战。我们坚信，风电发展是一场“长跑”，只有坚定前行，方能行稳致远，在激烈的竞争中取得最终胜利。

在市场方面，一是注重开拓海外市场。依托哈电风能在海外的研发和市场平台——达尔文公司，积极参与欧洲公司漂浮式项目合作及联合研发平台的搭建，通过设备出口、技术转让等方式积极开拓海外市场。哈电风能积累的漂浮式风电机组一体化仿真技术，包括多方分工协作的标准评估流程和自主知识产权的仿真工具箱，已在苏格兰、西班牙和法国的多个漂浮式海上风电项目上得到了应

用。2022年年底及2023年上半年先后与法国Valorem和Eolink公司完成了大西洋漂浮式海上风电项目机组供货与漂浮式技术服务合同的签订，凭借欧洲市场对直驱技术的认可和市场的积累，以及达尔文公司在漂浮式海上风电方面的工程实践和研发实力，我们深入挖掘欧洲漂浮式海上风电市场。此外，达尔文公司正在联合欧洲电力开发企业和能源创新企业，推进开展25MW+漂浮式海上风电项目。

二是面向中低风速乃至超低风速山地、丘陵地区，依靠资源优势获取高质量订单。结合哈电风能在复杂地形低风速风电场建设与运行的丰富经验，依托技术创新，开发出高可靠、高效率、高集成的新一代中速永磁风电机组。该系列平台机组搭载的风轮直径为195米、210米，功率等级5.X/6.X MW可调，单位扫风面积可达 $6.7\text{m}^2/\text{kW}$ 。除了保持准入性好、可靠性高、零压运维等优势，它的发电性能与风轮捕风能力大幅提升，突破了年平均风速 $4\sim 5\text{m/s}$ 的超低风速复杂地形资源开发限制，参建风电场的整体收益回馈价值更高，使得我们在这些地区的竞争力得到了极大提升。

三是响应国家“千乡万村驭风行动”等政策号召。经过多年技术创新与积累，哈电风能已形成功率范围在20~500kW的御风 $\mu$ 系列智能微风发电机组产品矩阵，其具有消纳容易、工程实践简单可靠、市场环境适用性强、投资门槛低等特点。依托该产品平台，哈电风能针对工业园区、乡村等的微风条件推出了中小型风电机组的“1+N”综合能源解决方案，通过御风 $\mu$ 系列智能微风发电机组与光伏、储能和充电桩等组成智能微电网系统，为不同场景用户提供定制化的优质新能源综合解决方案。在资源条件好的乡村，利用村集体荒废闲置土地。村集体可以土地等参股，多方出资共享共建，达到风电下乡、振兴乡村的目的。

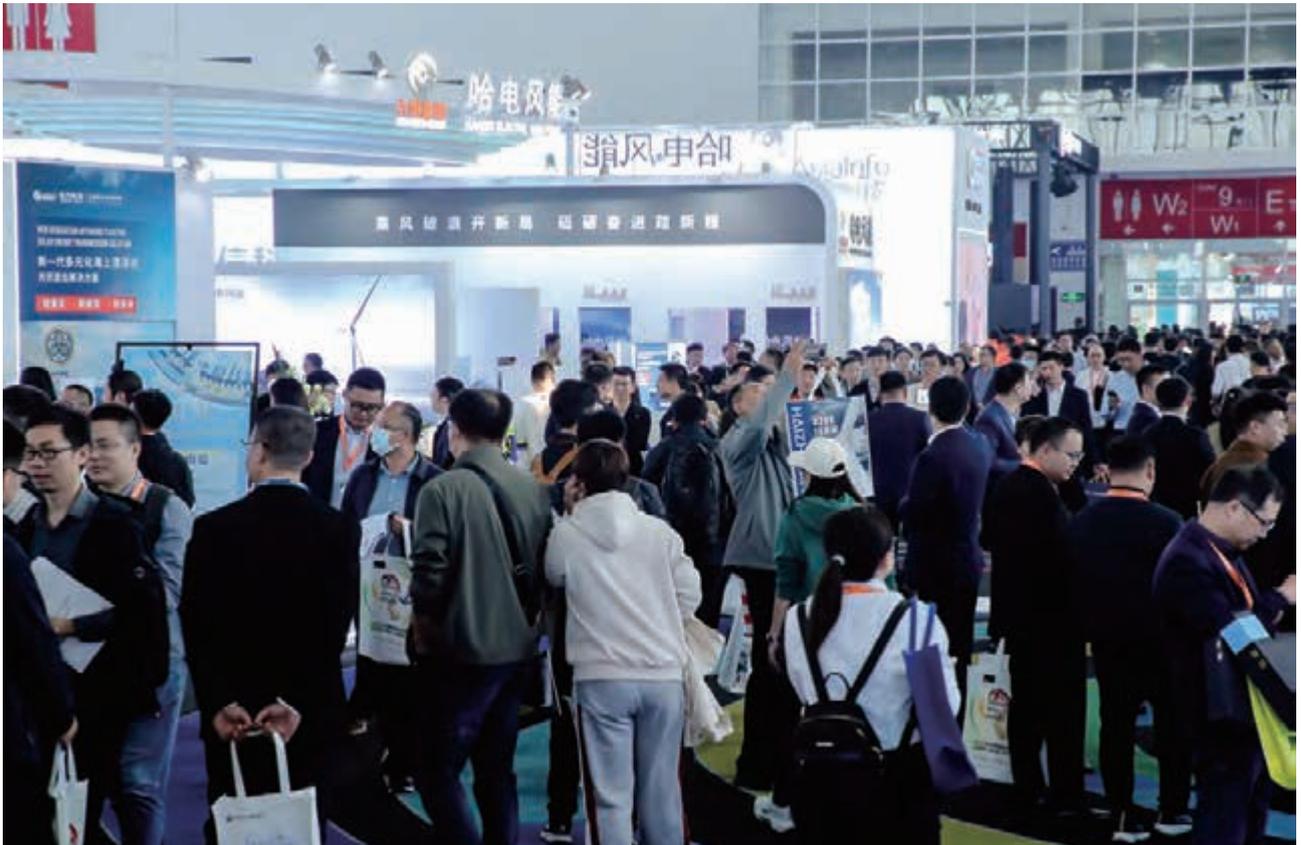
同时，哈电风能成功研制出直流并网风电机组，解决了直流微网控制的波动大、功率响应要求高等问题，创新使用了柔性控制

策略及算法，快速响应系统调度要求，保证了机组和系统的安全。相较于风电机组交流并网制氢，哈电风能研发的直流并网制氢系统免去了机组侧逆变、升压及制氢电源侧降压、整流等环节，能有效降低线路成本，显著提升系统整体的效率，更适用于直流微网系统的需要。目前，该型直流并网风电机组已成功应用于张家口崇礼基于直流特性的直流微网风光储耦合制氢示范项目，充分展示了哈电风能在清洁能源利用和氢能制备方面的技术优势，为清洁能源的广泛利用和可持续发展提供了强有力的支持。

四是在后市场发力。哈电风能在全国29个省（区、市）参建了200余座风电场。我们以内蒙古和福建两大生产基地为依托，不断拓展运维业务版图。通过应用高速迭代的控制系统优化、偏航效能提升、电气系统改造、叶片技改增容等关键技术，哈电风能已在多座风电场开展老旧机组的深度技改或“以大代小”工作，使老旧机组的发电效能大幅提升。例如，在南方某低风速风电场，通过采取控制系统升级、降低自耗电等措施，使单机发电效能提升6.2%。在贵州某风电场，通过更换更长的叶片，机组年发电量比相邻未换叶片机组提高10%。此外，在多个风电场通过加装叶片涡流发生器和尾缘扰流板，使发电量提升了1.5%~2.5%。

**Q**：围绕风电关键技术和前沿技术、工艺等方面，哈电风能重点推进哪些工作？

**A**：作为全球绿色能源系统方案服务商，哈电风能依托国内与国际两个研发平台，以及国内唯一的“海上风力发电装备与风能高效利用全国重点实验室”，长期致力于新能源领域共性基础技术、应用基础技术及前沿技术研究。哈电风能是海上风电的“拓荒者”之一，2014年在全国首先实现了5MW海上风电机组的商业化运行，目前在大功率海上风电基础理论与技术研究、漂浮式海上风电、构网型中小型风电、低风速复杂地形风电及分散式风电方面的



CWP 2023 哈  
电风能展台前  
人潮涌动

研发上取得了一定成绩。尤其是在海上漂浮式一体化仿真技术、先进控制技术和孤岛运行等核心技术上，取得了显著成果。

**Q**：CWP 2023 聚焦构筑稳定的全球风电产业链供应链，哈电能将在这方面发挥怎样的作用？

**A**：哈电能是一家拥有自主知识产权和核心技术的风电机组制造企业，在风电产业链供应链中处于系统集成的中心地位。我们目前正致力于市场供应链体系重铸，寻求战略合作伙伴，共同应对当前市场形势；积极拓展微型风电产品链，打造适用于微风孤网运行应用场景的 20~500kW 的御风  $\mu$  系列产品；向产业链上下游延伸，着力开拓后市场运维，加大新能源项目自主开发建设，为风电产业链供应链高质量、可持续发展贡献积极力量。

风电发展是一场“长跑”，要实现高质量

发展，必须解决一系列矛盾和挑战，包括成本与利润、价格与品质、竞争与合作、初始投资与长期收益等。这需要全新的思维模式，推动商业模式、技术和管理的创新，转变投资商、开发商、设备商和运营商的合作业态。每个业务环节的主体应提高内部效率，减少损耗，避免浪费，以促进整个风电产业的健康发展。

面对国内整机市场供给充足、机型迭代频繁、低价竞争的形势，我们应该坚定高质量发展的策略，注重修炼“内功”，严守安全底线，加强行业自律，积累技术研发储备，培育增长新动力，推动风电行业平稳发展。我们呼吁风电同仁以前瞻性视角研判行业发展前景和技术趋势，共同探寻创新方向，开展有序竞争，促进风电装备行业的高质量、可持续发展。只有通过这样的努力，我们才能在这场“长跑”中取得胜利，为清洁能源的利用和可持续发展作出贡献。✎



# 风力发电 转出美好未来

# 在CWP 2023 遇见全球风电美好未来

在全球范围内构建具有韧性的风电产业链供应链，已成为推动能源转型、应对气候变化的客观需要。CWP 2023 聚焦于此，以达成最广泛的共识，为实现风电高质量发展凝心聚力。

策划 | 《风能》编辑部





10月16日—19日，2023北京国际风能大会暨展览会（CWP 2023）在北京举行。CWP 2023以“构筑全球稳定供应链 共建能源转型新未来”为主题，来自国际组织、多国驻华使领馆、国内外政府部门、全球风电企业、高校与科研院所等机构的高级别代表，紧扣新时期的机遇与挑战，共谋风电产业高质量发展新格局。

当前，实现碳中和已经成为国际社会的主流价值观，大力发展可再生能源是必由之路。在全球范围内建立安全、稳定的风电产业链供应链是实现这些目标的基础，这离不开从各国政府到企业的紧密合作。本届大会的召开，有助于加快构建更具韧性的全球风电产业链供应链，推动风电高质量发展，为实现全球可持续发展提供关键支撑。

CWP 2023年历时4天，举办了20多场分论坛，与会代表围绕产业最前沿展开研讨，涵盖产业链供应链建设、技术发展前景、风电机组可靠性、海上风电、风能资源技术、新型电力系统、氢能、储能等，旨在厘清当前产业界面对的主要问题，找准未来发展路径。

会上发布了《全球风电产业链供应链安全宣言》，致力于构筑安全稳定、畅通高效、开放包容、互利共赢的全球风电产业链供应链体系。

CWP 2023组织的“风起五十年”主题论坛，邀请到几位全球现代风电技术与产业的缔造者和开拓者，大家相聚一堂，深情回顾了过往五十年的风雨兼程，并对风电未来发展作出展望。作为论坛的重点环节之一，“风电先行者”活动旨在向中外风电产业先行者致敬与致谢。同期举办的“风起五十年”主题展，以文字、图片的形式再现了过去半个世纪中国风电产业走过的那段波澜壮阔的历史。

在为期三天的展览会上，千余家风电企业集中展示了各自的新机型、新技术、研究成果等。本届展览会的面积超过8万平方米，参观人次突破10万，均创下历史新高。今年的国外参展企业达到250家，来自30多个国家和地区，占全部参展商的25%。

本期“封面故事”，将全面呈现CWP 2023上的那些真知灼见和精彩瞬间，希冀能够为风电产业接下来的发展带来启迪。📍

# 嘉宾致辞共谋能源转型新未来

整理 | 夏云峰

10月16日下午，在由中国可再生能源学会风能专业委员会秘书长秦海岩主持的CWP 2023开幕式上，中国能源研究会理事长史玉波、中国可再生能源学会风能专业委员会主任王同光、国家能源局新能源和可再生能源司副司长王大鹏、挪威王国驻华大使白思娜、西班牙驻华大使拉法尔·德斯卡亚、荷兰王国驻华大使馆公使高罗柯、英国驻华贸易使节倪乐思、丹麦王国驻北京大使馆能源参赞马海分别致辞。



史玉波

中国能源研究会理事长

气候变化给人类生存和发展带来严峻挑战，能源结构版图亟须深度调整。近年来，风能作为新能源的重要组成部分，在保障能源供应、确保能源安全、促进社会经济可持续发展方面发挥了越来越重要的作用，是全球低碳转型的优先选择之一。中国风电为加速全球能源转型、构建全球气候治理的新格局贡献出“中国智慧”和“中国方案”。未来，相信随着科

技创新的不断实施和体制机制改革的不断深入，在中国政府和全社会的共同支持下，新能源将在中国各个领域得到更广泛应用，真正融入百姓日常的生产生活。同时，为了促进未来全球共同的发展目标，我们必须主动适应新形势、新变化，积极参与国际交流，加强互信合作，为全球的清洁低碳转型提供稳定的产业链供应链发展空间。



王同光

中国可再生能源学会  
风能专业委员会主任

北京国际风能大会暨展览会自2008年首次举办以来，已成为全球风电最具规模和影响力的展会之一。本届展会的展览面积超过8万平方米，参展企业达1000余家，其中国际参展商占到25%，来自30多个国家和地区。观众人数预计将超过10万人次。大会规模和热度的大幅度提升，反映了中国风电市场的繁荣发展。本届大会将在双碳目标背景下，重点探

讨风电产业链供应链的国际合作、全球产业链供应链安全、技术创新、人才培养、质量与风险管控等议题。我们期待在风电蓬勃发展的新时代，加强全球产业链供应链建设，构筑开放、安全、互利、共赢的产业链供应链体系，推进全球风电交流与互通，汇聚起全球风电产业链供应链的强大合力，让风电为全球绿色能源转型作出更大贡献。

自 2020 年 9 月碳达峰碳中和目标提出以来，在国家政策的大力支持下，风电产业携手同行，推动中国风电提速发展，为中国推进能源革命、应对气候变化提供了重要支撑。今年以来，中国风电保持平稳发展态势，装机规模持续增长，利用水平稳步提升，海上风电稳妥推进，技术研发有序推进，企业实力明显增强，国际化程度显著提升。进入新阶段，乡村风电

发展迎来新契机，深远海风电技术不断取得新突破，“风电+”带来了无限可能，风电国际化进程提速，机组大型化趋势明显，数字化与智能化应用日益广泛……这些都将进一步提升风电的发展质量。下一步，国家能源局将加强顶层设计，着力推动海上风电平稳有序发展，加速农村能源绿色低碳转型，深化推进国际技术与产能合作。



王大鹏

国家能源局新能源和  
可再生能源司副司长

全世界必须积极应对气候变化危机，持续关注绿色转型。根据国际能源署(IEA)的数据，预计到 2025 年全球 35% 的电力将来自可再生能源，风电在促进实现净零排放方面有着巨大潜力。陆上风电是一项经过验证的成熟技术，拥有广泛的全球产业链供应链。同时，全球海上风电也有快速增长的潜力。测算表明，世界上超过 80% 的海上风能资源处于水深超过 60

米的水域，部署漂浮式海上风电机组可以为推动全球能源转型作出重大贡献。挪威已经建立了全球领先的海上风电供应链，可以提供有竞争力的高质量服务。挪威最近宣布了一项雄心勃勃的出口战略，风电被看作是核心的支撑点。挪威和中国在漂浮式海上风电方面拥有广阔合作空间，可以带来互利共赢的结果，共同推动全球海上风电发展。



白思娜

挪威王国驻华大使

在过去的三年中，西班牙更新并公布了多项与绿色转型相关的法律法规，并将大量欧盟复苏和转型专项基金用于发展绿色经济。现在，西班牙作为欧盟的轮值主席国，能源转型是我们议程上的优先事项。截至 2022 年年底，西班牙的可再生能源装机容量在全部发电装机容量中占 42%。我们相信，多元化和有韧性的风电产业链供应链可以推动绿色经济的发

展。中国是全球风电第一大国，而西班牙企业自 2000 年以来一直在中国推广风电技术，为中国产业的发展和能源转型作出了贡献。今年是中西建交 50 周年，西班牙愿意继续与中国合作伙伴分享经验，关注和中国的合作。西班牙已经做好了准备，我们愿意与中国的合作伙伴共同推动能源转型，助力脱碳和净零排放目标的实现。



拉法尔·德斯卡亚

西班牙驻华大使



高罗柯

荷兰王国驻华大使馆  
公使

为更好开发风能资源的潜力，需要国际合作。我们应互相分享、学习，推动创新，寻找最佳的解决方案。我们必须形成生态系统，使公司、公民社会能够达到共同的目标，确保可持续发展。尤其在海上风能资源开发中，国际合作要求各国政府、各国企业充分发挥自身优势，在欧洲和中国之间亦是如此。荷兰是一个快速转型成碳中和的经济体，更加关注于能源

效率和低碳能源经济。我们希望到 2030 年可以将荷兰的排放量减少 55%，到 2050 年实现碳中和。荷兰有着开放、友好的商业环境，提倡通过公平竞争推动创新、提高效率。此外，荷兰极其关注风电机组、电网的创新，这将有助于使产业链供应链更加稳定。当然，这些都需要符合伦理、生态环境的要求，也是我们希望共同达成的目标。



倪乐思

英国驻华贸易使节

当前，全球最重要的目标是减缓气候变化，有着独特海上风能资源优势的英国积极参与其中。英国和中国共同举办过多次会议活动，致力于将地球变成可宜居的星球。我们会更多地推动英国和中国之间的双边贸易，我们最近也在北京的相关会议讨论中提到了这些关键事项。中国和英国都是全球最重要的海上风电市场，两国可以发挥关键作用，为未来发展指明

方向。同时，两国在海上风电发展方面有很多互补的地方，英国也需要国际专家的帮助，包括来自中国的支持。我们有着共同的目标，相信双方在包括海上风电在内的多个领域有很多合作机会和发展潜力，以此缓解气候变化带来的影响。加深中国和英国在关键领域的合作，加大投资力度，将能够产生更大的效益，最终实现双赢。



马海

丹麦王国驻北京大使馆  
能源参赞

自 1986 年以来，丹麦一直参与到中国风电的发展之中。过往的三年中，我们与中国相关研究机构对整个能源系统进行了研究，发布了中国能源转型展望报告，提出了以经济高效的方式来实现 2030 年和 2060 年减排目标的路线图。报告显示，中国有能力完成这一任务。令我担忧的是，可再生能源并不总被视为安全的能源。这是错误的，丹麦已经证明了这一点。

可再生能源可以为确保能源安全和应对气候变化提供支撑。我们现在无法承受更大的气候变化，必须逐步淘汰煤炭，更好地保障能源安全。此外，许多有经验的可再生能源开发商迫切需要加大对全球项目的投资，也包括中国的项目。通过增加投资使需求侧变得更加灵活，使企业能够更容易从项目中购买绿色电力，从而阻止气候进一步恶化。

# 主旨演讲

## 聚焦电网数字化转型与全球风电发展趋势

整理 | 王芳

10月16日下午，在由中国可再生能源学会常务理事赵勇强主持的主旨演讲环节中，国家电网公司发展部二级顾问（新能源云项目负责人）刘劲松、全球风能理

事会（GWEC）战略总监赵锋，分别做了题为“构建新型电力系统，新能源云促进新能源行业高质量发展”和“全球风电产业布局及供应链安全”的演讲。



刘劲松

国家电网公司发展部二级顾问（新能源云项目负责人）

### 构建新型电力系统，新能源云促进新能源行业高质量发展

新能源云将新一代信息技术与新能源、新型电力系统、新型能源体系、碳达峰碳中和等生态圈的业务深度融合，建设具有中国特色国际领先的新型能源数字经济平台，设计了“环境承载、资源分布、规划计划、厂商用户、电源企业、电网服务”等15个子平台，涵盖源网荷储各环节，提供信息分析和咨询、全景规划布局和建站选址、全流程一站式接网、全域消纳能力计算和发布、全过程补贴申报和管理五个方面的服务，建立“横向协同、纵向贯通”和“全环节、全贯通、全覆盖、全生态、全场”的新能源开放服务体系。

新能源云实现了新能源业务一站式线上办理，做到了接网服务高效透明、补贴申报公开公正、消纳计算科学准确，得到国家相关部门及社会各界的高度认可。目前已接入新能源场站210万座，装机4.62亿千瓦，注册用户超过25万个，入驻企业超过1万家，带动就业超过120万人。

新能源云以电网数字化转型为根本点，建设新能源优化配置、新能源互联网、碳中和支撑服务、新型电力系统科技创新四大平台，最终服务构建以新能源为主体的新型电力系统，推动新型能源体系规划建设，积极服务碳达峰碳中和。



全球风能理事会  
(GWEC) 战略总监

## 全球风电产业布局及供应链安全

据 GWEC 统计，2022 年，全球风电新增装机 7760 万千瓦，在历年风电新增装机容量排名中居第三。截至 2022 年年底，全球风电累计装机容量突破 9.06 亿千瓦，较上一年增长 9%。2022 年，全球陆上风电新增装机 6680 万千瓦，中美两国占全球的一半以上，排名前五的国家占全球的 72%。平价、拍卖 / 招标和生产税收抵免（PTC）依然是 2022 年陆上风电装机容量增加背后的三大市场支持机制。2022 年，全球海上风电新增装机 880 万千瓦。其中，欧洲海上风电新增装机容量合计 250 万千瓦。此外，尽管经历 2021 年“抢装”后，中国海上风电年度新增装机容量下滑了 70%，但 2022 年的新增装机容量仍占全球的 58%。到 2022 年年底，亚太地区海上风电累计装机容量已经超过欧洲，核心推动力来自中国。不过，在漂浮式海上风电装机容量方面，欧洲仍处于领先地位。

今年 6 月，全球风电累计装机容量突破 10 亿千瓦，第二个 10 亿千瓦目标有望在 2030 年年底前实现。然而，为实现《巴黎气候协定》将全球温升控制在 1.5°C 的目标，到 2030 年全球风电新增和累计装机容量需要在当前的基础上增加两倍，到 2030 年新增装机容量需要达到 3.6 亿千瓦。然而，目前行业尚未达到足够的投资水平，根据预测，到 2030 年全球风电新增装机容量仅有 1.9 亿千瓦。

到 2026 年，除了中国外，全球大部分地区都可能出现产业链供应链瓶颈。贸易摩擦、地缘政治、反补贴调查等不确定因素，或将导致全球产业链供应链停止流动。中国拥有富余的产能，区域性合作有助于保障全球风电产业链供应链安全。因此，迫切需要新的投资和区域合作，建立更加多样化、富有弹性的产业链供应链。同时，还需打破贸易壁垒，确保全球风电产业链供应链自由流动。限制性的贸易和投资政策将增加成本，并有可能推迟全球能源转型。此外，新兴市场需要政府释放清晰的投资和价格信号，让企业、产业链供应链能够从中受益，实现健康发展。

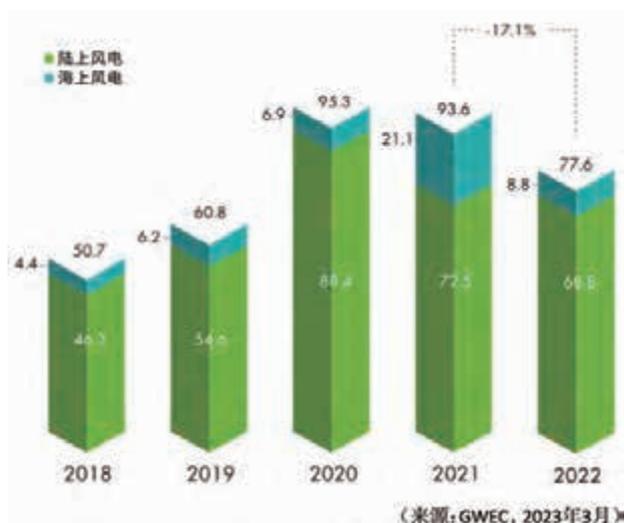


图1 2018—2022 年全球新增风电装机容量 (GW)



# 企业家论坛一： 双碳时代下的风电技术发展前景

整理 | 赵靓

技术进步为风电发展提供了源源不断的动力，对新技术、新产品的研发布局，在很大程度上决定着风电未来发展水平。对此，CWP 2023 设置了以“双碳时代下的风电技术发展前景”为主题的“企业家论坛一”，由中国可再生能源学会常务理事、风能专业委员会副主任李鹏主持。

近年来，风电机组大型化趋势明显，在本届展会上已有厂商推出 15MW 陆上风电机型，25MW 海上风电机型有望在未来推出。大型化有效降低了风电项目的开发成本，对提升风电的竞争力具有重大意义。同时，大型化能够促进新材料应用，降低新材料成本。“大型化会促进新材料运用，包括碳纤维、滑动轴承、高强度钢等。大型化提高新材料使用量与应用规

模，会促进新材料的成本下降，进一步反向推动大型化进步。”上海电气风电集团股份有限公司首席技术官兼工程与技术研究院院长蒋勇表示。

然而，大型化对制造商的能力提出了更高的要求。一方面是制造成本的提高，需要通过技术创新加以消化。

“机组大型化与整个项目的建设成本有着极强的耦合，可降低平准化度电成本（LCOE），但会提升产品本身的成本，需要通过创新手段进行抵消。未来，若想在做到大型化的同时使得单位千瓦成本更优，必须多管齐下：接受更‘柔’的现实，了解柔性的特点并驾驭它；尽可能增加材料承载能力；设计更精细化；控制更智能化。”中车株洲电力机车研究所有限公



司风电事业部首席技术官万宇宾强调。

三一重能股份有限公司研究院院长杨怀宇同样给出了自己的答案，“成本管控是多方面的，从技术角度讲，要根据自身情况和供应链配套能力合理地定义产品，选择或定义部件，有时不能去求全，而应找到最适合自身的状态。”

另一方面，机组大型化要求整机商提高对机组可靠性的把控能力。

“大型化的最大贡献是为业主降低了LCOE及征地成本等，但反过来给制造企业，包括供应商带来非常大的挑战，要求我们在机组可靠性上做得更好。”远景能源副总裁（中国区）兼解决方案总经理许锋飞认为。

蒋勇进一步表示，“今天的单机容量已经达到15MW，不久的将来会达到25MW。如果一台机组的可靠性出了问题，损失会比之前小容量的机组大很多，包括更换部件的成本与发电损失等。因此，对于风电机组大型化而言，最大的挑战是可靠性。”

在中船海装风电有限公司总经理助理张凯看来，目前市场中的产品确实存在可靠性验证不足问题。他强调，“陆上风电和海上风电机组的大型化，在基础理论上，包括叶片等是很难跨越的。同时，机组快速迭代推向市场，验证是不充分的，导致近两年出现了一些问题。”

中国已经进入风电技术的“无人区”，不再有国际厂商产品与技术边界的验证作为参考，使得企业对做好产品可靠性工作更加重视。

浙江运达风电股份有限公司首席技术官兼创新研究院院长潘东浩认为，“现在的可靠性与以往不是一个层面。过去有很多欧洲厂商在前面，可靠性理论的边界是比较清晰的。现在进入了‘无人区’，不仅要做好理论测算、台架实验，还需进行充分验证。因为任何机械设备的尺寸达到一定程度后，理论边界都可能会被突破。应更谨慎地看待这个问题，否则等可利用率等指标出来后，就为时已晚了。”

“今天我们进入了风电技术的‘无人区’，



没有经验可以借鉴，需要提升自身设计能力，对新产品的运行情况进行密切跟踪，同时提高制造与检测技术能力。”南高齿集团执行董事、风电事业部总裁顾晓斌从部件制造商的角度表达了相似的观点。

对于如何破解这项挑战，万宇宾给出了具体答案，“我们需要在产品的各个阶段、各个环节通过有效的测试和验证，让设计之初的预期、前提条件形成精准闭环，从而使产品在大型化之路上走得稳、走得远。”

虽然大型化依然面临着一系列挑战，但在嘉宾们看来，其技术发展的总体趋势未变。杨怀宇认为，机组大型化最终仍需看成本，只要度电成本可以继续下降，趋势就不会停止。当然，整机商会有自身考量，使得步伐有快有慢，关注点存在一定差异，但目前仍会向更大的水平发展。

对于风电机组大型化在未来会发展到何种程度，潘东浩表示，“任何产品总有一个物

理边界，但目前机组大型化的边界尚未到来。这一点上的技术边界不一定来自产业链，可能会牵涉到工程技术，包括能否运到现场，能否在制造端生产，能否得到材料端支持等。并且，以往风电机组产品的单机容量提升依靠大量数据与时间做过验证，如 1.5MW 机组在一座风电场中可能会安装几十台，验证可靠性会更快。现在机组的单机容量更大，在同一座风电场中运行半年都未必能够验证出产品的可靠性。这就需要在理论端、台架端、测试端投入更大成本进行验证，对单机容量提升速度形成一定限制。”

嘉宾们还就如何打造整机商的差异化优势进行了讨论。他们认为，目前风电机组产品策略更多是由市场驱动的，不同整机商的产品差异体现在多方面，不仅仅只是单机容量和风轮直径。“不是棍子长了就能打败少林武僧，少林武僧用一根很短的棍子就能打败你，因为他做到了身体和棍子合一。因此，大型化不是比功率和风轮直径，那么大的叶片是否能够做好气动测试，是否能够被制造出来，是否能够用控制系统指哪儿打哪儿，这些就是不同。”许锋飞比喻道。

除了生产制造与测试环节外，机组产品的差异化还体现在市场策略、供应量、软件等方面。张凯则认为，目前行业的整机产品不是由技术驱动，更多是由市场推动的。例如，大型化带来的成本竞争产品策略。并且，表面上各整机商的供应链同质化严重，但核心并不相同。同时，在硬件技术没有颠覆性改变的情况下，如何通过主控、变桨、场群控制等软件技术利用好硬件，整机商有着自己的独门绝技。

整机产品的内在差异，仅从表面难以区分，需要通过一系列的验证手段分辨。“我们对机组的考验，并没有在比较严苛的环境下进行，因此，差异性没有得到体现。例如，有的厂家可以将年等效利用小时数做到 3800 小时，有的甚至达到 4000 小时，产品的可靠性、差异性就体现出来了。”顾晓斌表示。✎



## 企业家论坛二： 全球风电产业布局及供应链安全

整理 | 王芳

过去的三年，从疫情到乌克兰局势导致的原材料价格上涨、高通胀、欧洲能源危机，使得全球能源遭遇多重挑战。中国的风电产业链供应链不断补强，凸显了中国风电行业“出海”的机遇，但也面临诸多风险，包括地缘政治带来的各种潜在影响。与此同时，本地化的诉求进一步提升，对全球风电产业链供应链的布局将产生深刻影响。中国风电产业链供应链如何安全、稳定、有效地“走出去”？如何促进风电在全球的合作共享，让风电为全世界带来更加绿色低碳的生活贡献更多力量？

针对这些热点话题，在10月17日由全球风能理事会（GWEC）战略总监赵锋主持的企业家

论坛二上，彭博新能源财经（BNEF）全球风电研究主管奥利弗·梅特卡夫（Oliver Metcalfe）做了“全球风电供应链的四大挑战”主旨发言，随后6位中外风电企业代表围绕“全球风电产业布局及供应链安全”的主题展开讨论。参与讨论的嘉宾分别为：金风科技股份有限公司副总裁兼风电产业集团总经理薛乃川、明阳智慧能源集团股份公司首席营销官叶凡、阳光电源副总裁兼阳光氢能公司董事长彭超才、弗兰德传动系统有限公司董事会主席兼首席执行官勾建辉、中车永济电机有限公司首席专家李咏梅、舍弗勒大中华区工业事业部总裁王贵轩。

后疫情时代，全球风电产业面临哪些挑战？本地化诉求的提升会对全球风电产业布局带来怎

样的影响？

奥利弗·梅特卡夫在主旨演讲中表示，全球风电产业主要应对来自四个方面的挑战。一是宏观经济形势变化给产业发展带来压力。由于疫情、乌克兰局势导致原材料价格不断上涨，利率上升、融资成本提升导致利润率不断下降，欧洲整机企业去年基本都是亏损的，美国海上风电项目不得不重新谈判。一旦项目延误，很多国家近几年会加大装机容量进行弥补，导致供应链出现紧张。二是整机厂商竞争格局的变化。欧洲和美国的风电机组价格上升，中国风电由于产能大幅增加，整机价格下降，“价格战”在2020年后越来越激烈，并传导至供应链，与此同时，中国风电在海外的竞争势头也很强劲。三是风电单机容量的竞赛。2020年后，单机容量增长非常迅速，这影响到研发、投入及整个供应链。四是全球正在推动供应链的本地化。欧洲风电参与者对中国风电行业的崛起表示担忧，可能会掀起对中国技术的反补贴调查。

金风科技的风电机组产品已连续多年出口海外市场，目前业务遍及全球6大洲、30多个国家，建立了8个海外区域中心，属地化率达到70%，全面实现资本、市场、技术、人才、管理的国际化。针对全球供应链本地化的趋势，薛乃川表示，从投资方到装备制造，再到供应链，乃至服务商，本地化要求影响的是整个风电产业链条。各国新能源发展阶段存在较大差异，引进风电产业对本国的制造、材料、劳动力市场等方面都会产生影响。各国从利于本国经济发展需要的角度出发加强本地化和属地化，这是可以理解的。中国新能源发展速度非常快，对全球的技术、研发、科技创新方面可以起到很好的引领作用。然而，在技术领域，中国风电行业与他国的科研机构保持着长期的研究合作关系，并未因本地化要求而减少交流和沟通。

明阳智能凭借海上风电的优势，实现国内海上风电机组的首次“出海”，并在全球定义了四大片区作为国际业务的重点开拓区域。叶凡表示，在国际化过程中，明阳智能开始探索从设备销售转向供应链携手“走出去”，当地政府也很欢迎。但如何入乡随俗，得到全球范围内的认可，挑战很

大。因此，先从小部件开始尝试，适应当地属地化的需求。中国过去的发展经验可以为欧洲提供很好的参考。在国际合作中，双方达成相互的信任、标准上的认同。面临挑战的同时，也存在着很大的机遇。

中车永济的产品已出口至40多个国家，而且实现了从产品输出向技术输出、资本输出转型升级的新跨越。李咏梅结合企业“走出去”过程中遇到的挑战表示，一是对全球风电供应链本地化影响最大的是政治因素；二是当地的规则、认证、融资、用工要求，甚至付款方式都需要企业做好全面的准备；三是对产品各项技术指标的要求，在技术、质量方面一致性的要求及各项验证等方面，需要花费大量时间才能得到客户的认可。

据彭超才介绍，阳光电源在光伏和储能业务的国际化方面走得比较靠前，目前外籍员工已经超过1000人，美洲地区的当地人才已有400人。他表示，海外市场本地化的诉求，一方面是通过本地化的生产制造要能带动当地经济发展，另一方面是满足当地对技术、知识产权方面，以及突发情况下保供等本地化综合要求。

作为有着140年历史的轴承生产商舍弗勒，其产品遍布全球各个市场。王贵轩表示，从一个市场转向另一个市场，舍弗勒的原则是“永远要做本地化”。在他看来，本地化实际上是一个经济核算的问题，即项目要赚钱。应当分析当地市场有哪些条件可以利用，在面对较小市场时，可以选择在当地组装；随着市场扩大，生产、研发、设计必须全部做到本地化。

弗兰德早在二十世纪七八十年代开始在德国、丹麦为风电整机商提供配套服务，后进入中国、美国、印度市场。勾建辉介绍，弗兰德涉足多个行业，1996年进入中国后经过投资，目前国产化已经达到90%，完全融入到中国的经济建设中。无论从技术还是管理，都给本地供应商带来收益。他认为，本地化是要做到全球化。本地化无非是各国政府为当地经济制定的政策，这些政策也会发生变化，企业要针对不同市场制定自己的战略，做好区域性产业布局。



随着风电产业的快速发展，全球风能资源开发潜力得到快速释放。近年来，进口国更希望在本国建立风电产业链供应链，从而在经济、税收、就业等方面起到更好的拉动效应。那么，在全球建立稳定可靠的风电产业链供应链，需要坚持哪些做法？具体有哪些较好的方式？

嘉宾们表示，首先应坚持“引进来，走出去”，引进外来的技术、人才、资金；而在“走出去”的过程中，整个产业链供应链的产品和服务需要达到国际标准。同时，应培养大量的海外人才，这样才能在海外市场获得立足之地。为此，在技术上必须保持领先，因为技术是核心竞争力。其次，客户需要高效的交付，缩短交付周期，“携手走出去”能够给当地带来更好的协同效应，为全产业链创造价值。再次，应在国际上进一步推广品牌价值，形成自己的品牌竞争力。最后，应全面融入当地的经济、社会、文化，用当地人员和方式解决当地的问题。

针对具体做法，嘉宾们给出了建议：第一，做好调研，了解当地的政治因素、政策要求、合作方式等，包括全球新能源发展动态和风电市场趋势等。第二，加强与当地企业的合作。由于面临诸多不确定因素，且关税等对制造业“走出去”的利润影响很大，因此，可以采用变通方式，如

在当地寻找代工企业；还可以采用多元化的业务模式，变通合作模式，如通过国外的代理商营销，缓解部分压力。第三，利用在全球的研发中心，与行业专家和政策制定者保持密切联系，这样可以更加清楚地了解当地的政策、标准，包括对设备和电网的要求。

风电行业如何携手解决机型快速迭代与打造稳定健康产业链供应链之间的矛盾？对此，王贵轩表示，一味追求大兆瓦机组并不一定是最经济的方案，产品必须做到稳定、可靠，一定要考虑全生命周期的性能，而不是只看眼前的。他建议，业界应更加关注产品的标准化，快速的产品迭代对于供应商来说是很困难的，且投入的研发费用太高，产出又没那么多。

勾建辉认为，目前国内风电机组的快速迭代更多的是偏重于设计。国外的整机商不追求大兆瓦，却可以直接买断5年乃至10年的质保期，这是需要勇气的。只追求数量，最终要为质量买单。虽然技术是解决大部分问题最关键的一把“钥匙”，但需要以科学的态度看待它，最终仍必须依靠产品的可靠性。

赵锋对此提出，风电行业的快速迭代有必要放慢脚步，认真总结一路走来的教训和经验，把产品质量提上来，价格降下去。🔗

# 海上风电工程装备发展的机遇与挑战

整理 | 叶无极



近些年，中国海上风电发展迅速。全球风能理事会（GWEC）发布的《2023 年全球海上风电报告》（*Global Offshore Wind Report 2023*）显示，2022 年全球海上风电新增装机 880 万千瓦，累计装机容量 6430 万千瓦，中国新增、累计装机均雄踞全球首位。

在 CWP 2023 的“海上风电工程装备论坛”上，演讲嘉宾表示，未来 5 年，全球海上风电年复合增长率预计将达 8.3%，2022—2026 年的新增装机容量有望超过 9000 万千瓦。

专家们认为，机组快速大型化，进入技术“深水区”甚至“无人区”；市场价格压力大，降本目标激进；产品更新加快，开发周期显著缩短，是当前海上风电产业发展中呈现的主要趋势。

这意味着，业界依然面临着诸多挑战，压力巨大。然而，这也为产业和企业实现升级发展提供了契机。

明阳智能风能研究院软件数字化室主任孙启涛援引联合国权威机构发布的数据表示，全球面临爆发式的人口增长，到 2050 年将达到 97 亿人，对应的是 61 万亿千瓦时的工业、生活用电需求。同时，全球面临着非常严重的环境问题，如北极的海冰融化，亚马孙雨林遭大量砍伐。全球对能源的巨大需求推动着能源行业走向海洋，步入深远海。在深远海的综合能源应用方面，经过测算，深远海

发电利用率可以提高 20% 以上。

另一方面，考虑到海上风电成本仍需进一步下降，业主方期望运用更大型的风电机组。过去的一年中，多家风电企业发力，密集发布了数十款海上风电机组，最大的单机容量已达到 22MW。

对此，金风海洋工程公司副经理冒锦玉表示，目前市场中采用的主流技术是中速永磁，机组的重量能够控制在一定范围内。随着机组大型化趋势的延续，未来 20MW 风电机组的整体重量要求不会超过 1000 吨，但也会引起施工装备吊高、吊重的变化。而对于在海上部署风电机组，运输船在整个吊装环节起到承上启下的作用，运输船吨位的大小直接影响着船舶能够发挥的作用和吊装效率。

在海上风电工程装备方面，既要满足当前的施工建设需要，也必须针对未来的运输和海域等特点打造相应的船舶，以满足未来海上风电场建设的需要。此外，还需结合机组的发展趋势进行匹配性设计，对四锚定位能力和耐波性也要进行优化选择，以便适应深远海的施工要求。

随着全球海上风电发展的提速，相关施工安装装备的交付也明显加快。论坛上公布的数据显示，今年将是全球海上风电安装船交付创纪录的一年，全球会有超过 40 艘安装船交付，其中的 30 多艘来自中国。

从海上风电建设者的角度来看，比较难以改



变的现状是海上风电安装船的可持续性与规模化。如果一个项目的延续性不够高，会导致海上风电安装船的转场频率偏高。而每个风电项目的业主对于安装船的要求不尽相同，存在审核的过程和中间转场的时间，这本身就是对核心资源的浪费。此外，项目延续性低，会导致物流运输及中间倒运环节难以组织，从而影响整个吊装效率，也难以锁定优质施工资源。不过，中国海上风电安装船存在通过更换旗帜服务于欧美市场的机会。同时，由于国内船厂的发展空间非常大，可以很好地为西方投资者提供投资的必要条件。

需要注意的是，风电产业的高质量发展离不开合法合规性。特别是对于海上风电而言，工程管理的资质设定、企业的承包资质等是基础。同时，还需完善海上作业船舶的管理体系，让具备船舶管理经验兼具施工资质的企业管理。解决这些问题，必须从政府行政监管的角度厘清电力工程、海洋工程的监管责任，从而进一步完善相关政策。

海上风电项目开发涉及设计开发、设备制造、施工建设、运营维护等环节，需要形成一个完整的生态系统。行业必须统筹考虑，避免因单一环节导致整个项目开发成本的上升。比如，在物流环节，优化工程组织效率，针对每个风电项目进行大数据分析，制定完备的开工时间和存货周期。按照开发软件进行分析，施工时间一般可以缩短3%~5%。

自2021年平价破冰以来，中国海上风电发展

得更快，但如何进一步提升基础能效，降低开发成本，仍是业界面对的首要问题。

中船海装研究院副院长文茂诗表示，投资收益率是决定海上风电平价的关键要素。风轮直径、功率等级影响的是风电场的投资和收益，从而影响到投资收益率。

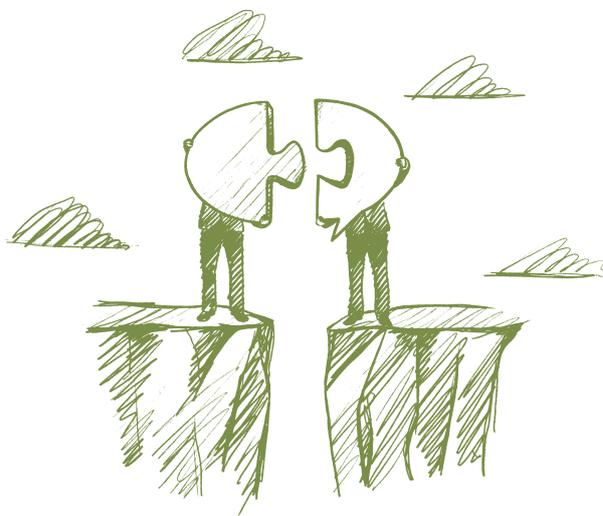
按照传统设计方法，企业一般先确定风轮直径、功率等级，再建立详细的仿真模型，进行载荷迭代，输出详细的载荷结果，最后完成详细设计。这意味着企业至少需要完成概念设计才能得到比较具体的基础成本，并结合风电场进行投标的精细测算。

这种方式存在较大风险。如果建立一套设计软件，以电价、资源特征和风电场投资收益率为约束，使整机核心参数高效匹配，并针对特定区域的地质条件、上网电价、年平均风速等计算所有功率等级、风轮直径下的收益率，就可以基于风电场投资经济性测算反过来确定所需要的机型。

目前，海上风电的建设成本和运营成本依然很高，是限制其发展的主要因素之一。随着技术的进步和规模的扩大，成本将逐渐下降。此外，政府的支持和鼓励也将促进海上风电的高质量发展。在技术方面，业界仍需要在气弹设计、海洋工程、数字化技术、材料科学、海洋装备技术等领域不断进行创新，进一步提高海上风电基础能效，让风电机组成本更低，运行更稳定，生产更安全。▶

# 深化国际合作， 通过推动风电发展 加快全球能源转型

整理 | 叶无极



在全球绿色低碳转型的大趋势下，目前已有近 150 个国家和地区提出了碳中和目标，覆盖全球 88% 的碳排放、92% 的 GDP 和 89% 的人口。然而，全球的努力与落实《巴黎气候协定》目标的要求依然存在较大差距。因此，必须加快全球可再生能源发展，这需要进一步深化国际合作。唯有如此，方能解决各国面临的困难，加速转型与创新。

针对于此，CWP 2023 组织了“海外机构专场：实现公平安全的能源转型”“国际风电市场动态及投资机会”“风电产业链国际合作交流”等多场论坛，由来自全球的企业代表、专家学者围绕相关议题展开研讨。

据金风国际首席财务官朱辉介绍，目前全球已有 100 多个国家和地区开始发展风电产业。2022 年，全球风电新增装机容量约 7760 万千瓦。其中，陆上新增装机容量接近 6680 万千瓦，海上风电新增装机容量约 880 万千瓦。截至 2022 年年底，全球风电累计装机容量达 9.06 亿千瓦，陆上风电累计装机容量为 7.8 亿千瓦，海上风电累计装机容量约 6430 万千瓦。

在减碳目标的影响下，清洁能源将代替传统能源成为能源系统的主力。更重要的是，风电的占比

将由目前的 8% 左右升到 2050 年的 20%~35%。据预测，2023—2027 年全球风电新增装机容量将以 15% 的年复合增长率稳定提升。

全球风能理事会（GWEC）亚洲区负责人乔黎明表示，根据 2023 年发布的数据，亚太地区 2022 年的风电新增装机容量达到 4330 万千瓦，包括 3700 万千瓦陆上风电和 630 万千瓦海上风电。亚太地区风电新增装机容量占全球的 56%。其中，陆上风电新增装机容量占全球的 54%，海上风电新增装机容量占全球的 74%。

东亚市场中的日本和韩国拥有较成熟的市场环境，两国政府为海上风电发展分别制定了明确的规划目标。日本提出，到 2030 年部署 1000 万千瓦海上风电装机；韩国提出，到 2030 年部署 1430 万千瓦海上风电装机。两国都将海上风电技术视为自身实现低碳发展目标的核心手段。因此，虽然发展海上风电面临诸多障碍，但两国政府依然采取了相对积极的态度，不断学习欧洲及亚洲其他国家的先进经验。

东南亚市场中的越南和菲律宾，虽然缺乏成熟的外部市场环境，投资风险较高，但作为新兴市场，两国的经济发展迅猛，用电需求量巨大。新建煤电项目已无法获得融资，因此，可再生能源项目迎来



前所未有的发展机遇。当地政府同样视海上风电为实现低碳转型的重要途径，并认为海上风电仍有很大成本下降空间。

运达股份国际事业部投融资负责人胡菁表示，按照泰国能源部的规划，该国的可再生能源占比将从2020年的15.54%提升至2037年的30%。2023年4月，泰国能源监管委员会（ERC）公布了固定电价计划下可再生能源采购的规定。2022—2030年，泰国可再生能源采购配额将超过500万千瓦。其中，太阳能光伏为236.8万千瓦，配储能的太阳能光伏为100万千瓦，风电为150万千瓦。

2021年7月，印度尼西亚政府宣布计划于2060年实现碳中和，并确定通过绿色能源代替使用超过20年以上的燃煤电站，总计约1100万千瓦。然而，该国并未为风电提供固定电价政策，必须通过拍卖程序获得购电协议（PPA）。

哈萨克斯坦作为中亚最发达的国家，其风电规划相对稳定。未来5年，该国计划每年开发50万千瓦以上的风电项目。随着电网和政策的不断完善，哈萨克斯坦风电的增长将较为稳定。

随着中东业主的强势入驻，乌兹别克斯坦风电市场发展较快，每年对风电机组的需求超过了100万千瓦。

据GWEC预测，2023—2027年，中东、非洲地区风电年新增容量将达到1700万千瓦，主要来自南非（540万千瓦）、埃及（360万千瓦）、摩洛哥（220万千瓦），以及中东的沙特阿拉伯（240万千瓦）。

英国驻华大使馆苏格兰国际发展局投资部中

国区总监赵莉介绍了苏格兰海上风电战略投资模式（SIM）。SIM的目的是形成共同的需求，通过跨领域和政府的协作机制来促进投资，并降低风险。通过实施这个模式，可以为中国企业带来很多益处。

该模式包括三个阶段：第一阶段是明确布局，对产业链供应链、企业及相关方提交的投资方案进行评估，确定重点和需求。根据评估结果，开发企业和相关方选择是否进入下一阶段。第二阶段是方案实施。开发企业与政府、港口和产业链共同开发一套围绕投资建议的商业化方案。第三阶段是将港口和制造相关的基础设施作为重中之重，基于SIM解决其他问题。

为实现苏格兰海上风电项目建设目标，需要升级基础设施。相比英国其他地区，苏格兰需要支付传输系统使用费，使其用电成本相对更高。收费体系之外，可再生能源供电增长带来的电网稳定性、连接和控制等方面的问题与电网的局限性直接相关，陈旧的电网基础设施，需要花费大量预算进行升级或重建。

在拉美地区，拉美各国基本都制定了以2035年为目标能源转型、碳排放达标的国家能源战略规划，并明确了相应的支持政策。

近几年，在巴西、智利等重点国家，中国企业和资本已经迅猛进入新能源领域的投资开发和运营中。然而，拉美各国的本地化要求、电网标准差异等，是需要特别关注的。此外，当地对机型认证、机组及各部分参数文件、运维合同工作范围要求细致，对公司资质审核也较为严格。📍

CHINA  
WINDPOWER  
2024 October  
Beijing, China

www.chinawind.org.cn

CHINA  
WIND  
POWER

# 2024北京国际风能大会暨展览会 CHINA WIND POWER

2024年10月 北京·中国国际展览中心（顺义馆）

October, 2024

China International Exhibition Center (Shunyi Hall), Beijing



官方微信 CWPBEIJING



## 阳光电源： 依托协同创新， 打造极致产品

本刊 | 夏云峰

作为关键部件之一，变流器是风电机组不可或缺的能量变换单元。伴随国家加快构建以新能源为主体的新型电力系统，风电变流器扮演着日益重要的角色。然而，风电机组大型化的提速，叠加降本压力的骤增，给风电变流器领域带来一系列挑战。那么，风电变流器企业如何加以应对？带着问题，《风能》近日专访了阳光电源风能事业部副总裁吴玉杨，从这家风电变流器头部企业的视角去找寻答案。

### 开展协同创新，实现进一步降本增效

降本增效，是风电产业发展中的永恒主题。当前，这项工作面临着新形势。



一方面，风电机组大型化被业界视为推动降本增效的关键路径之一，近几年机组单机容量增大势头迅猛。

据中国可再生能源学会风能专业委员会（CWEA）统计，2022年，在我国风电新增装机容量中占比最大的风电机组已经由2021年的3.X MW提升到4.X MW。而在前不久举办的北京国际风能大会暨展览会（CWP 2023）上，企业发布的陆上风电机组最大单机容量达到15MW，海上风电机组为22MW。

风电变流器领域同样如此。阳光电源提供的数据显示，其2021年发货的风电变流器的平均功率为3.6MW，2022年增至4.8MW，2023年有望突破6MW。截至发稿时，阳光电源已下线的风电变流器的最大功率达到18MW。

这意味着，当前的风电行业机型众多，技术迭代快。身处这样的市场中，企业要立于潮头，必须具备强大的研发实力和快速的转产能力。

另一方面，风电机组价格的大幅下降，给产业链上游造成了极大的成本压力。

吴玉杨坦言，“变流器成本在风电机组成本中的占比仅3%~4%，但它却发挥着非常关键的作用。尤其是构建新型电力系统，要支撑日益复杂的电网，很多功能需要由变流器来实施。对于变流器而言，功能需求越来越多，责任越来越大，价格却一降再降，已经到了‘地板价’。”

多重挑战之下，产品的系列化和平台化设计成为了风电企业的共同选择。据悉，阳光电源结合各类应用场景的特点，经过多年研发形成了丰富的风电变流器产品矩阵，功率等级覆盖1.5~26MW，电压等级包括690V/950V/1140V/3300V，涵盖双馈、全功率两条技术路线。

考虑到风电机组大型化并非简单的功率增大，而是存在一定的技术门槛，做好预研和技术储备就变得至关重要。

阳光电源坚持“开发一代、预研一代、储备一代”的科研方针，基于深度市场调研，研判技术发展趋势，据此制定研发规划，有序推

进预研工作，确保在市场需要时快速交付产品。

“预研不可能100%成功，即便成功了，不少成果也无法批量应用。但我们会坚持不懈地做好这项工作，它是一种兜底方案，确保一旦行业有需要，我们的技术和产品能够跟得上。”吴玉杨强调。

他认为，在当前环境下推动技术创新及成本下降，更需要全产业链的紧密协作。“随着变流器与风电机组的不断融合和深入匹配，变流器的降本路径不再是简单追求单个部件的绝对值降本，更应该站在整机系统的角度，通过变流器与整机系统的协同优化，降低整机系统的单瓦成本，提升机组发电效益，实现整体系统的综合竞争力提升是关键。”

以阳光电源推出的基于新一代三电平变流器技术的超大功率解决方案为例，通过采用2300V系列功率模块，支持电网接入电压和发电机端电压等级到1800V、2000V，使得网/机侧的电流降低超过30%，变流器的体积和重量下降了1/3，在减少功率器件数量、电缆使用数量的同时，也有利于风电机组的轻量化设计。“由此带动的电缆成本下降，就超过了变流器成本的上升。”

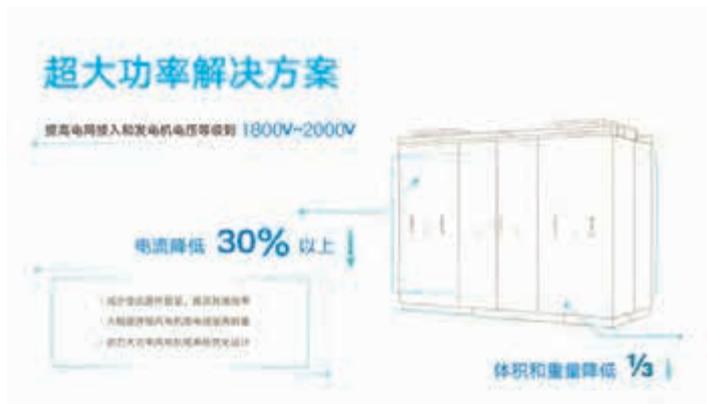
基于上述认识，阳光电源与产业链上下游建立起多层级的交流合作机制，精准定义客户需求，开展联合创新，通过不断修正迭代，在成本允许的范围内打造极致产品。

“风电产业已进入更加追求发展质量的时代，需要细抠各个环节潜在的创新和降本空间，形成合力才能实现进一步的降本增效。”吴玉杨表示。

需要注意的是，降本绝不能以牺牲产品质量和可靠性为代价，这始终是风电行业的共识。尤其是机组大型化和技术迭代的加快，显然对风电设备的可靠性提出了更高要求。

对此，围绕研发、测试验证、质量管理、服务等环节，阳光电源已经形成一套规范的流程和严格的保障体系。

比如，研发过程中，在严格遵循相关标准



的基础上，阳光电源会综合考虑性能要求与成本，结合最大风况、最高温度、最大湿度等机组运行的极端边界条件，来考量变流器的设计裕度。阳光电源还遵循 IPD 和 APQP4Wind 等产品开发流程，加强对各个环节质量的严格把控和审核。

在测试验证方面，阳光电源建有完善的电网与电机半实物、热设计等仿真平台，大功率、不同电压等级的测试平台，以及各类环境实验箱，可以将理论设计、模型及半实物仿真、实验台验证及现场实证等全面融合，提高设计精度。

在质量管理方面，阳光电源的产品线、研发、供应链管理、器件导入、检测、品管等多部门联手，从器件筛选、制程管理、整机检验、供应链保障等全过程进行管控，确保产品可靠性。

深厚的技术积累，以及完善的质量与可靠性保障体系，正是阳光电源对自己产品品质充满自信的底气所在。

## 面向多应用场景，提供具有竞争力的产品

当前，风电的应用场景日益丰富，不断拓宽风电的发展空间。然而，各类场景的风能资源和环境条件存在差异，这无疑十分考验企业因地制宜提供解决方案的能力。

吴玉杨表示，“我们会结合不同应用场景的特点，将通用平台化设计与差异化设计相结合，精

准定义设计目标，确保产品能够满足各种特殊场景的需求。”

以阳光电源推出的新一代高防护型风冷变流器为例，它集成了突破性设计和高精尖技术——分舱独立的功率柜、集成式内外独立的并网柜、精准控温控湿的控制柜，可为沙戈荒、盐碱地、海上等多种复杂环境提供多样化风冷解决方案。

近些年，阳光电源还持续大力布局海上风电领域，多款产品已批量投用到国内各沿海区域，批量最大功率已达 9MW 海上双馈变流器、13MW 海上全功率变流器，18MW 海上全功率变流器也已下线。

在此过程中，阳光电源积极探索海上风电前沿技术，为漂浮式海上风电、海上风电低频传输等深远海方案提供配套变流器产品。

“除了高湿、高盐雾等挑战，漂浮式海上风电在机组振动等方面缺少统一的标准，且项目离岸距离远，电力输送难度大，都要求我们必须要在变流器的软硬件及结构上进行针对性设计。”吴玉杨说，“目前，我们正在配合整机商开展 16~20MW 大功率漂浮式海上风电机组变流器样机开发及测试工作。”

此外，随着新能源快速发展，局部电网形成了高比例新能源和弱电网环境，对新能源并网安全稳定运行造成风险。正是在此背景下，基于电压源的构网型风电机组成为了业内关注的热点。

“通俗来说，构网型风电机组能够根据电网运行的需要而自主支撑频率和电压，助力电网稳定。即便与主电网分离，构网型风电机组也可以独立运



行，特别适用于弱电网环境，甚至是独立组网运行。它的应用场景包括沙漠、源网荷储、分散式、乡村风电及深远海等。”吴玉杨解释道。

作为风电变流器技术的引领者，阳光电源较早即启动了构网型变流器研发，其产品主动支撑电网和孤岛运行的能力已在各种复杂电网环境下得到了全面验证。

今年9月，在张家口市张北县库金图风电场，国内首台构网型双馈风电机组通过现场实测试验。测试中，阳光电源的构网型变流器表现优异，依托宽范围阻抗模拟环境，构网型双馈风电机组在强、弱、极弱等不同强度的电网条件下表现出良好的暂/稳态控制能力，成功完成跟网/构网模式在线切换、电网故障穿越、低频振荡抑制、暂态支撑等试验验证和控制策略优化测试。

值得一提的是，为提高新能源发电设备并网性能研发及测试的效率，阳光电源推出了最新一代电网模拟电源，实现1~60MVA容量全覆盖、380V~35kV、50Hz/60Hz电网全适应，可完成风电、光伏、储能、氢能、SVG等领域的电网适应性、故障电压穿越、调频、惯量响应、阻抗扫描及模拟等测试，助力产品研发和现场测试。

## 发挥集团优势，持续延伸风电业务链条

众所周知，阳光电源的业务覆盖风能、太阳能、储能、氢能、电动汽车等，且多个领域均处于行业

领跑位置。近几年，阳光电源通过充分整合相关业务部门的技术和资源，不断扩大风电业务版图。

在CWP 2023上，阳光电源展示了一套风氢系统解决方案，旨在通过制氢的方式提高风电利用效率。

据了解，阳光电源于2019年成立了氢能事业部，是国内最早一批布局氢能领域的新能源企业，拥有IGBT制氢电源、ALK和PEM电解槽、气液分离与纯化设备、智慧氢能管理系统等一体化系统设备的研发制造和交付能力，并开发了离网、并网、微网多模式下制氢系统解决方案，已在吉林、宁夏、内蒙古、甘肃、湖北等地得到应用。

吴玉杨认为，当前发展风电制氢的主要价值在于，可以最大限度利用电网消纳不了的风电，产生的氢气用于化工、电力、交通、工业等领域，既拓展了风电的利用途径，也会对减碳作出重要贡献。

此外，阳光电源还涉足风电变桨领域，推出了适配于1.5~18MW风电机组的SPD100-45/55、SPD101-45/55、SPD102-65、SPD110-80等风电变桨产品，兼具安全可靠、灵活智能和高度集成的优点。

吴玉杨告诉《风能》，阳光电源拥有独立的新能源汽车电驱系统业务板块，电控类产品年供货超百万套。风电变桨系统与新能源汽车驱动系统具有技术及供应链协同效应，并可与风电变流器形成营销协同。

“这正是我们发展风电变桨业务的背后逻辑，目前我们已经开始批量供货。”他说，“接下来，我们将着力研发更大功率单驱、双驱驱动器产品，并提升产品的集成度、智能化、可靠性。”

面向未来，阳光电源对其风电业务的发展前景充满信心。2022年，阳光电源的全球风电变流器发货量超过2300万千瓦，同比增长53%。2023年，其风电变流器发货量有望再创新高。

“我们将继续深耕国内市场，锚定前沿技术，以市场需求为导向，加大协同创新，为客户提供最具竞争力的产品。同时，我们将携手合作伙伴，加快进军国际市场，进一步拓宽业务场景，为全球碳中和事业贡献‘阳光力量’。”吴玉杨表示。🔗

# 从CWP 2023看全球风电产业发展趋势

本刊 | 夏云峰



知名的专业性展会，往往是观察某一领域发展态势的绝佳窗口。北京国际风能大会暨展览会（CWP）之于全球风电产业，亦是如此，被视作行业的“晴雨表”和“风向标”。CWP 2023 举办期间，千余家风电全产业链企业集中展示了自己的最新研发成果和主力产品，从中可以管窥当前全球风电行业关注的焦点，以及接下来一

段时间的产业走势。

## 大型化发展进一步提速

风电机组大型化，是风电行业降低成本的一个关键路径，这一趋势在近几年日益凸显。

据统计，在 CWP 2023 上，有 13 家整机商发布了 10MW+ 机型，其

中的 7 家发布了 15MW+ 产品。

在陆上风电方面，三一重能发布的 15MW 机组为目前全球单机容量最大的陆上风电机组。它所配备的发电机和叶片由三一重能自主设计，实现了与整机设计的高度协同；采用双箱变上置机舱技术，在减少发电损耗的同时，可以节约安装成本。

金风科技、远景能源、明阳智能、

表1 整机商在CWP 2023上推出的新机型一览

整机商	机型	单机容量/MW	风轮直径/m	分类
金风科技	全新系列海上风电机组	12.X~16.X	26X	海上
	全新系列陆上风电机组	6.X~10.X		陆上
远景能源	EN-270/14MW	14	270	海上
	大兆瓦 Model T 陆上智能风电机组平台	6.X~10	220~240	陆上
明阳智能	MySE22MW	22		海上
	MySE11-233	11	233	陆上
运达股份	15MW 海鹰平台抗台型海上风电机组	15	260	海上
	9MW 海鹞平台抗台型海上风电机组	9		海上
三一重能	13/16MW 海上风电机组	13/16		海上
	15MW 陆上风电机组	15		陆上
中国中车	“海平面一号” 机组	8~16	230~280	海上
	陆上 12.X MW 风电机组	12.X		陆上
中船海装	H260-12.5MW 海上风电机组	12.5	260	海上
	H202-7.XMW 陆上风电机组	7.X	202	陆上
电气风电	EW18.0-263	18	263	海上
	EW14.0-263	14	263	海上
	EW10.0-230	10	230	陆上
	EW8.35-220	8.35	220	陆上
	EW6.7-202	6.7	202	陆上
	EW6.25-202	6.25	202	陆上
	EW5.0-202	5	202	陆上
东方电气	DEW-18000	18	262	海上
	DEW-H18000	18	260	海上
	DEW-H10000	10	222	陆上
华锐风电	SL10.X/230	10.X	230	陆上
哈电风能	HEHD195/200-5.X/6.X	5.X/6.X	195/200	陆上
太重集团	TZ8.X MW 系列陆上风电机组	8~10	220 ~ 230	陆上

运达股份、中国中车、东方电气、华锐风电等，均推出了 10MW+ 陆上风电机组。

在海上风电方面，明阳智能针对广东、福建等超 I 类风速区域，推出了 MySE22MW 海上风电机组，一举刷新全球最大海上风电机组的纪录。该机型为半直驱机组，叶片采用碳纤维材料，具备高强度、轻量化、耐腐蚀特性，使整机效率和载荷达到最优平衡；运用了漂浮式海上风电的关键核心技术，适用于固定式和漂浮式场景。

东方电气发布了 18MW 直驱海上风电机组 DEW-18000、18MW 半直驱海上风电机组 DEW-H18000。DEW-18000 机组，是针对海上 I 类风速区域研发的，风轮直径为 262m，采用平台化设计，突出成熟、稳定、高效、安全、低运维成本的特点。DEW-H18000 机组的风轮直径为 260m，传动链采用模块化设计，轴系、齿轮箱和发电机高度集成，机舱重量和尺寸更优；运用变压器上置方案，在解决扭缆问题的同时，降低了电缆损耗，机组效率更高，发电量更好；全功率变流器三电平拓扑结构的应用，使得机组具备良好的电网性能。

电气风电基于其海神平台推出了新一代半直驱产品 EW18.0-263 海上风电机组，单机容量为 18MW，风轮直径达到 263m，适用于年平均风速 10m/s 的高风速海域，目标区域为福建及粤东。

不仅如此，叶片、轴承、发电机、齿轮箱、变流器等核心部件同样呈现出加速走向大型化的趋势。

在 CWP 2023 上，中材科技、双瑞风电、艾郎科技均推出了百米级叶片产品。中材科技推出的沙戈荒风

电叶片 12.XMW-SI118，长度达到 118m，扫风面积超过 6 个标准足球场的大小。

洛轴展出了 16MW 平台风电主轴轴承、陆上 7MW 级双馈机型单 SRB（调心滚子轴承）结构配置主轴轴承、陆上 6.X MW 级双馈机型齿轮箱一级行星架前单列满装圆柱滚子轴承、5.X MW 内齿式三排滚子结构变桨轴承。

中国船舶集团展示的 18MW 风电机组增速齿轮箱，传动链采用主轴 + 齿轮箱 + 发电机全集成式结构，具有发电功率高、结构紧凑、传递效率高、可靠性高等特点；齿轮箱采用行星多分流均载、零部件抗疲劳设计制造、高可靠性试验测试等多项关键核心技术，传递效率高，扭矩密度超过 210Nm/kg。

中国中车发布的 20MW 海上半直驱永磁同步风力发电机，具有集成度高、冷却效率高、匹配性好等特点，实现了 20MW 级以上风力发电机整机和部件关键技术的突破，是目前全球功率最大的风力发电机。

禾望电气推出的新一代全功率变流器覆盖 3.X~30MW 功率等级，具有模块化、高性能、易拓展等优势。

## 构网型风电技术受关注

构网型风电机组因可以根据电网运行需要自主支撑频率和电压、助力电网稳定，成为解决高比例新能源电网安全稳定运行难题、构建新型电力系统的有效途径，受到各方关注。

9月27日，国家能源局印发《关于组织开展可再生能源发展试点示范的通知》提出，主要支持构网型风电、构网型光伏发电、构网型储能、新能

源低频组网送出等技术研发与工程示范，显著提高新能源接入弱电网的电压、频率等稳定支撑能力，大幅提升风电、光伏大基地项目输电通道安全稳定送电能力。

在 CWP 2023 上，金风科技发布的构网型机组 2.0 产品，是业内首个通过数字验证、单机验证、场站验证的构网型机组，适用于沙戈荒大基地、源网荷储、分散式、深远海等场景。构网型机组 2.0 产品可以提供 150%~300% 的短路电流支撑能力，实现延时不高于 5 毫秒的惯量响应，以及宽范围的阻尼可调，用高倍短路电流支撑、充足的有功缓冲，让新能源电站呈现更稳定、更柔性的电源特征。构网型机组 2.0 产品在促进电站运行更高效的同时，通过系统集成简化控制复杂度，通过自建电压主动响应让运维更简单，相应降低设备投资、运维成本和平准化度电成本（LCOE）。

中国中车研发的构网型风电机组技术，则获得了鉴衡认证中心颁发的认证证书。

而在此前的 9 月，运达股份 2.5MW 构网型双馈风电机组已经在河北省张家口市张北县库图风电场完成了暂 / 稳态特性验证与策略优化。现场实测结果表明，机组具有良好的弱电网适应性与故障穿越能力。

此外，明阳智能于今年 1 月获得了全球首张风电机组构网型功能证书。

部件企业也推出了相关产品。例如，阳光电源在 CWP 2023 上展示了其构网型双馈风电变流器，该产品的主动支撑电网和孤岛运行能力已在各种复杂电网环境下得到了全面验证。

禾望电气则提出了新能源构网制氢场站生态，将风光储氢与构网型技



术相结合。在该解决方案中，禾望电气的构网型技术通过复刻同步发电机电压稳定、频率稳定、功角稳定等功能，在新能源场站中投运许多“虚拟同步机”，从而起到快速调压、调频，为系统增加惯量和短路容量，并能够抑制系统中的宽频振荡等。

## 积极探索“风电+”模式

通过“风电+”模式，既可以丰富风电的应用场景，为风电发展打开增量市场空间，也能够实现风电的就地消纳，并形成多元化的盈利模式。

其中，风电制氢是业界探索的热点方向之一。在 CWP 2023 上，多家风电企业推出了相关的产品和解决方案。

以中国中车的柔性绿电制氢系统为例，它利用高性价比的“碱性+PEM”电解槽组合，通过 IGBT 制氢电源，与可再生能源相结合，具有波动范围更宽、响应速度更快、制氢效率更高、功能安全等级更高等特点。

东方电气推出的离网一体化独立制氢技术，无须独立的海上平台，即可实现离网运行、分布制氢，为风·光·氢·储独立运行的综合能源系统提供

了整体解决方案。

同期，阳光电源借助集团在氢能领域的多年积累，推出了一套风氢系统解决方案。

依托海上风电，实现海洋资源的立体融合开发，是另一个重点的探索方向。

明阳智能在其展位陈列了一个名为“综合能源岛”的装置，涵盖漂浮式海上风电、海洋牧场、海水制氢、波浪能发电等。据悉，今年 8 月，明阳智能自主研发设计的全球首台“导管架风电机组+网箱”风渔融合一体化装备“明渔一号”已在广东阳江海域完成安装。结合网衣系统和智能渔业系统，当地投放了石斑鱼、金鲳鱼等进行养殖，有效解决了近岸养殖空间受限、海域污染、资源荒漠化等难题。

## 业界更注重高质量发展

实现自身的绿色、可持续，是风电行业谋求高质量发展的内在要求。对此，业界一方面通过增加绿电使用、打造绿色供应链等方式，着力降低全生命周期的碳足迹。

在 CWP 2023 上，鉴衡认证中心

与金风科技联合发布了《风力发电碳足迹研究报告》。本次风电产品碳足迹核算分别采集了金风科技 GWH182-5.3/6.2/7.2/7.5 MW 四个型号风电机组在生产、制造、运输、吊装、运行等生命周期全过程的碳排放数据，并测算了 25 年服役时间内的风电机组上网发电量。核查结果显示，4 个型号风电机组单位上网电量的温室气体排放值最低为 3.88g CO<sub>2</sub>.eq/kWh，最高为 4.55g CO<sub>2</sub>.eq/kWh，不到传统火电的 1%。

同期，金风科技还发布了《2023 金风科技气候行动白皮书》，并正式成为 RE100 金牌会员，承诺于 2031 年实现 100% 绿电使用。金风科技在碳中和层面已有诸多成功实践，2022 年首次实现公司运营层面碳中和，且持续开展绿色供应链项目，帮助供应商节能减排。

另一方面，随着越来越多风电机组接近设计使用年限，风电行业正加紧探索退役风电设备的循环利用。比如，中国中车展出了再生纤维材料，它是由废旧叶片经过切割、粉碎等工序制成的。这些材料经过筛分、打包封装，可以制成新的再生纤维产品，应用于建筑工程、木塑及塑料制品中。🔵

# 越南第八个国家电力发展规划下的海上风电发展

文 | 王达 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院，  
中交第三航务工程局有限公司



经过与各类投资人长达 2 年的磋商，历经 12 次修改，越南第八个国家电力发展规划于 2023 年 5 月 15 日，经越南总理范明政批准后发布。该规划用于指导越南 2021 年至 2030 年发电站和电网的发展。

越南位于东南亚的中南半岛东部，北接中国，西临老挝、柬埔寨，国土狭长，自北向南毗邻北部湾、南海和泰国湾等海域。越南电力基础设施薄弱，用电需求增长迅猛，导致该国长期处于缺电状态。越南海岸线长达 3260km，拥有丰富的海上风能资源。据世界银行（World Bank）预测，离岸 200km 内的海上风能资源开发潜力约 475GW。

2011 年 6 月，越南政府发布总理决议 No.37/2011/QD-TTg，为该国风电发展提供了政策和制度支撑。2012 年 6 月，越南财政部发布了通告 No.96/2012/TT-BCT，下发风电项目上网电价财政支持机制指南。2012 年 11 月，越南工业与贸易部发布了通告 No.32/2012/TT-BCT，下发风电项目

开发实施条例和风电项目购电协议范本。一系列政策的出台，推动了越南海上风电发展。然而，受新能源领域外资投资限制、项目审批程序繁琐复杂、购电协议投资人风险较大、政府补贴电价较低等因素的影响，越南海上风电产业在早期阶段并未实现迅速发展。直到 2018 年 9 月，越南政府发布总理决议 No.39/2018/QD-TTg，即越南风电支持制度修订版，宣布于 2021 年 11 月 1 日前并网运营的海上风电项目，将享受 20 年运营期的 9.8 美分 / 千瓦时（约合人民币 0.7 元 / 千瓦时）的上网电价，由此引发一轮“抢装”。

## 越南海上风电现状

### 一、发展历程与规模

2010 年，越南启动建设第一座海上风电场。项目位于薄寮(Bac Lieu)省，装机容量为 99.2MW，一期采用 10 台 GE 1.6MW 风电机组，于 2013 年调试

并网。2016 年 1 月，整座风电场完工。

全球风能理事会（GWEC）发布的《2023 年全球风能报告》（Global Wind Report 2023）显示，截至 2022 年年底，越南海上风电累计装机容量为 874MW。根据 4C Offshore 网站的统计，截至 2023 年上半年，越南共规划建设海上风电场 142 座，其中的 28 座已投入运营，2 座待并网，4 座处于建设中，其他的风电场仍在审批和规划中。越南现有的海上风电项目均位于近海，所用风电机组的单机容量尚未超过 7MW。Minh Ha-Duong 在发表于《可持续发展能源》（Energy for Sustainable Development）期刊上的研究成果中指出，越南海上风电平均造价成本为 2011 美元 / 千瓦。

### 二、项目开发流程和审批手续

越南海上风电项目开发主要包括预开发、开发、建设和运营四个阶段，涉及的流程和审批手续如表 1 所示。

### 三、产业配套设施

越南的大型码头主要集中于南部，

表1 越南海上风电项目开发流程和审批手续

预开发阶段	开发阶段		建设阶段	运营阶段
<ul style="list-style-type: none"> <li>· 土地专用函</li> <li>· 预可行性研究</li> <li>· 电力开发规划审批 (国家级或省级)</li> <li>· 投资许可</li> <li>· 投资注册证明 (适用于外资投资项目)</li> <li>· 初步购电协议审批</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 风电机组位置许可</li> <li>· 风电机组高度许可</li> <li>· 可行性研究</li> <li>· 可行性研究批准函 (含初步设计审批)</li> <li>· 环评报告审批</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 海床租用审批</li> <li>· 技术协议</li> <li>· 电网接入协议</li> <li>· 计量协议</li> <li>· 数据采集与监控协议</li> <li>· 继电保护协议</li> <li>· 实施性购电协议</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 消防设计审批</li> <li>· 设计文件审批</li> <li>· 施工许可</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 运营执照</li> <li>· 发电执照</li> <li>· 越南电力集团 (EVN) 完工确认</li> </ul>

码头配套起重设施性能不足，装卸风电机组组件较为困难。越南的海工市场施工船舶数量缺乏，性能落后。起重能力在 1000 吨以上的起重船屈指可数，无专业敷缆船，驳船锚泊系统落后。现有国家电力主网容量有限，2022 年具备并网条件的海上风电场无法接入国家电力主网。

#### 四、上网电价

2021 年年底前未能及时并网的海上风电项目，直到 2023 年 1 月才获得新的电价机制。越南工业与贸易部于 2023 年 1 月发布决议 No.21/QD-BCT，明确了太阳能光伏和风电的过渡阶段上网电价。对于 2021 年 11 月前已获批但未能完成入网的项目，给予享受过渡阶段电价政策，上网电价不超过 7.8 美分 / 千瓦时。对于 2021 年 11 月后启动的项目，仍未明确上网电价。目前，业主方已放缓在建项目和新开发项目的推进速度，以等待政府的后续政策。

### 越南海上风电面临的问题

#### 一、投资人申办流程繁琐

在项目前期开发阶段，要经过选址、测风、投资许可、可行性研究、

设计等阶段，需提交和取得各类文件和许可，如风电开发计划、预可研、可研、用地和用海许可、投资许可、设计审批、施工许可等，签订购电协议、入网协议等，流程涉及众多主管部门。相关政策不明确，流程冗长，导致投资人申办过程缓慢，国际投资方有时不得不依赖当地资源来完成相关手续。

#### 二、本国技术装备能力不足

越南依然缺少风电机组设备及配套设施的生产制造能力，风电机组安装船、起重船等船机设备匮乏，缺少配套的海工基地和出运码头，经验充足的海上风电施工作业人员数量不足。在越南，海上风电项目的设备供应、现场运输、安装施工等环节对国际供应商和承包商依赖较大。

#### 三、购电协议风险较大

2019 年 1 月，越南工业与贸易部发布 No.02/2019/TT-BCT，即关于风电项目开发和购电协议的公告，公布了风电项目购电协议范本。越南电力集团 (EVN) 是新能源电力唯一的收购方。在购电协议范本中，未约定“照付不议”条款，投资方的收益难以保障。对于 EVN 的付款能力，未约定政府担保或其他降低风险的条件。未约定法律变化引起的成本改变的处理方式。

这些条款的缺失，导致项目在进行国际融资时困难重重。

#### 四、上网电价不连续、不明确

对 2021 年 11 月前获批但未能完成入网的项目，经过一年多时间方确定上网电价。对于 2021 年 11 月后启动的项目，仍未明确上网电价，导致业主方不敢贸然推进新建项目和在建项目。

#### 五、国家电网承载能力不足

越南电力集团国家电网公司公布的数据显示，截至 2023 年上半年，越南输变线路总长度为 29189km (500kV 线路共 10728km，220kV 线路共 18461km)。共有变电站 185 座 (36 座为 500kV，149 座为 220kV)，总容量为 116.475GW。电网负荷一直处于高位运行，难以满足后续电站接入和区域经济发展需求。

### PDP8明确海上风电发展

2023 年 5 月 15 日，越南政府发布《越南 2021—2030 年及 2050 年国家电力发展规划》(On approving the National Power Development Plan for the 2021-2030 period, with a vision to 2050)，即越南第八个国家电力发展规划，简称“PDP8”。PDP8 提出，发

展电力资源和 220kV 以上电网、新能源与可再生能源产业和服务，以及与邻国的电力互连设施。

针对海上风电，PDP8 主要明确了以下内容：

海上风电发展规模。到 2030 年，越南 30.9%~39.2% 的电力将来自可再生能源；至 2050 年，67.5%~71.5% 的电力将来自可再生能源。到 2030 年，并入国内电网的海上风电装机容量达到 6GW，至 2050 年达到 70~91.5GW。至 2035 年，海上风电供应 15GW 用于新能源产品；到 2050 年，海上风电供应 240GW 用于新能源产品。

发展配套储能设施。到 2030 年，抽水蓄能产业规模达到 2.4GW，储能电池规模达到 300MW。至 2050 年，抽水蓄能和储能电池的容量达到 30.65~45.55GW，可满足可再生能源发电的需求。

规划国家总装机容量。到 2030 年，发电设施总装机容量满足 150.5GW 的国内总需求（不含出口、新能源产品用电）。其中，海上风电达到 6GW（占比 4%），在技术、电价、输电成本合理的情况下，可以适当提高。至 2050 年，发电设施总装机容量达到 490.5~573.1GW（不含出口、新能源产品用电）。其中，海上风电达到 70~91.5GW（占比 14.3%~16%）。

电网建设与更新。2021—2030 年，新建与更新 500kV 变电站分别达到 49.35GW 和 38.17GW，新建与更新 500kV 输电线路分别达到 12300km 和 1324km。新建与更新 220kV 变电站分别达到 78.53GW 和 35GW，新建与更新 220kV 输电线路分别达到 16285km 和 6484km。与湄

公河次区域国家及东盟国家就 500kV 和 220kV 电网连接项目继续开展研究与合作，强化系统的连通性。

推动可再生能源产业和服务发展。到 2030 年，在越南的北部、中部和南部，当条件允许时，建设 2 个跨区域可再生能源产业和服务中心，包括 2~4GW 的可再生能源发电站（主要为海上风电），可再生能源设备制造设施、新能源产品等。

加大电力规划投资规模。2021—2030 年，电力能源和输电线路总投资约 13470 亿美元（约合人民币 98351 亿元），其中的 1198 亿美元（约 120 亿美元/年）用于电力能源建设，150 亿美元（约 15 亿美元/年）用于输电线路建设。

## 对中资企业进军越南海上风电市场的建议

PDP8 提出了越南海上风电装机容量和占比方面的具体目标，明确了提升电网能力、加大设施投入、发展配套产业方面的规划，释放出越南政府支持可再生能源和新能源发展的信号。大力发展海上风电，对于缓解越南用电紧张局面、推动工业发展、降低碳排放具有重要作用。

目前，中资企业已活跃于越南海上风电市场，PDP8 有望为中资企业带来更大的机遇。然而，中资企业参与越南海上风电发展，仍需要做好风险防范工作。

谨慎筛选，择机参与投资业务。越南海上风电规划目标及 2050 年“净零排放”目标的实现，需要大量资金投入，吸引外资是推动产业发展的重要途径。面临投资机遇，应谨慎筛选

投资项目。做好项目的尽职调查，确认属地合作方的实力与项目的各项条件满足项目开发要求，项目审批手续可按时完成。在实施性购电协议谈判阶段，应特别注重“照付不议”条款、支付担保条款和调价条款的约定，避免项目建成后出现电送不出、款收不齐、成本倒挂等风险。项目的建设需等待政府明确新的上网电价后再择机启动，以确保预期收益。

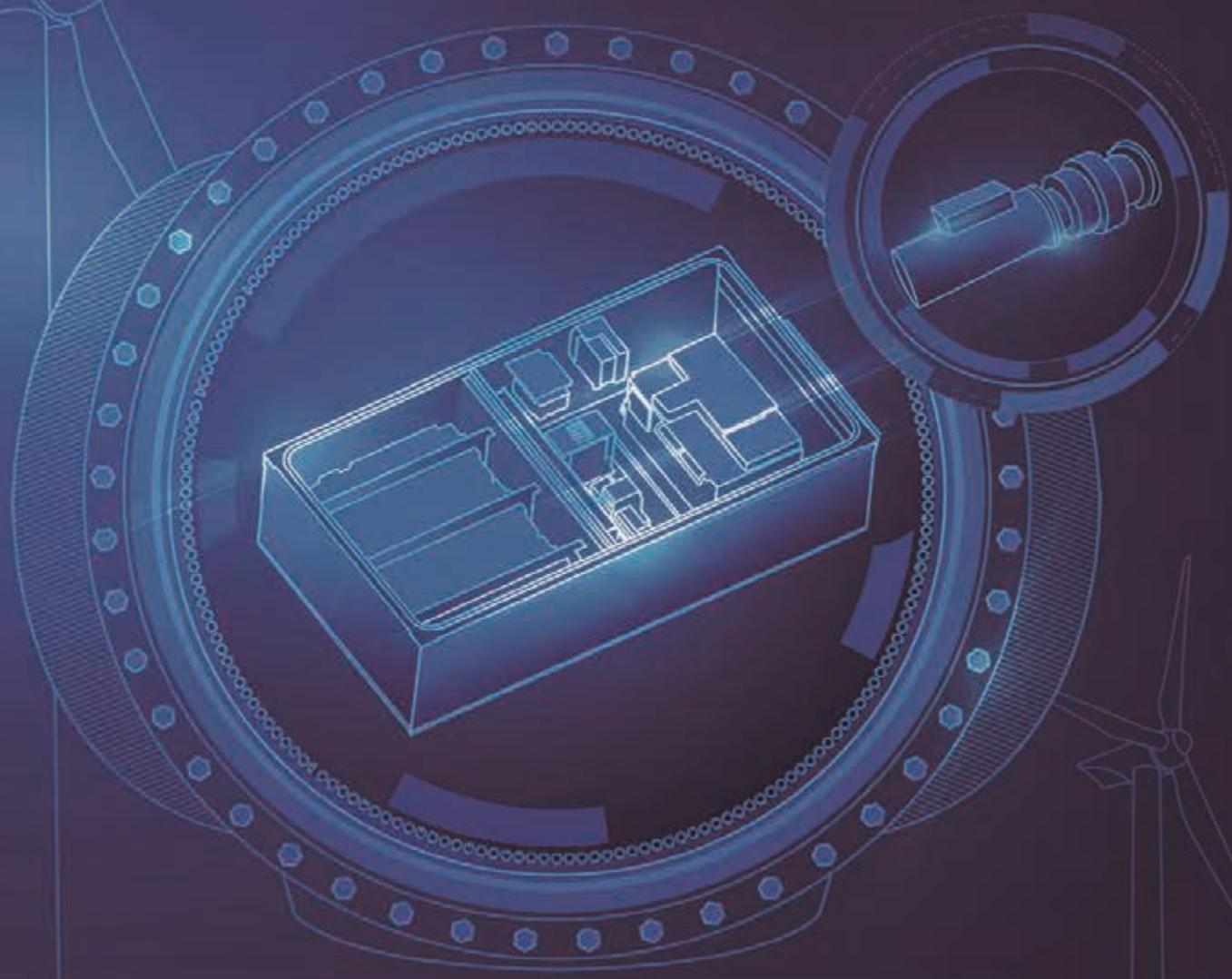
对于已建设但未并网的海上风电项目，可积极探索发电方与购电方间直购电协议的落地。在国家电网满载运营的情况下，可申请与用电方签署直购电协议，以满足双方的供需要求，实现互惠发展。

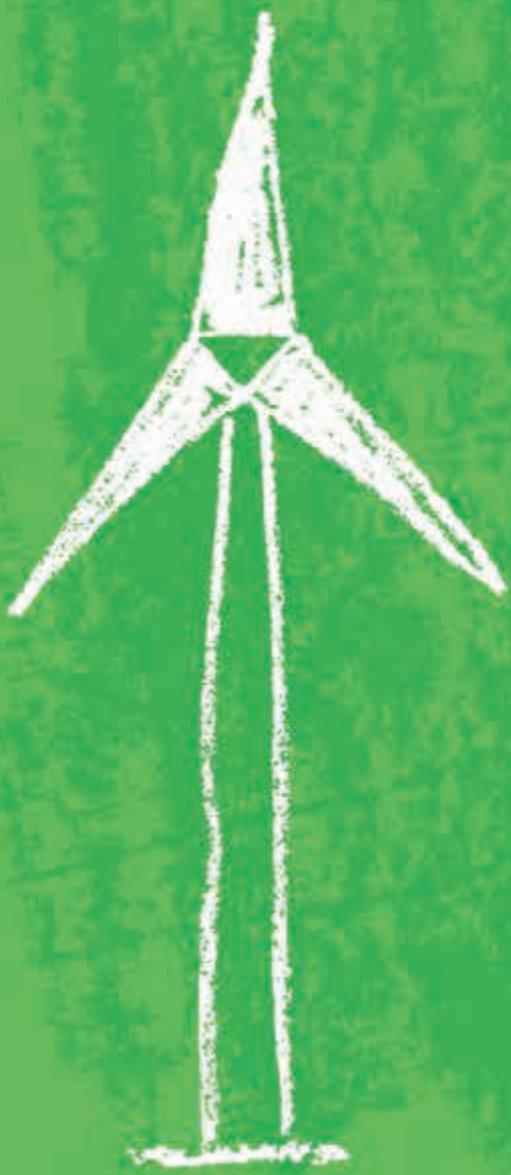
发挥船机设备优势，参与越南海上风电项目建设。随着中国海上风电走向“大型化”和“远海化”，吊重低于 1200 吨的海上风电安装船舶已逐步不能满足国内海上风电机组的安装需求。“抢装”过后，中国海上风电施工船舶租赁价格大幅度回落。在国内市场需求减少、利润压缩的双重压力下，越南海上风电产业的发展为中国海上风电施工船舶提供了新的市场空间。针对越南缺乏专业施工船舶的情况，中资企业可以发挥船机设备优势，参与越南海上风电项目建设。

建设当地产业链，布局融合发展。越南缺乏发展海上风电所需的风电机组及零部件制造能力、大型钢结构加工能力，以及配套的海工基地和出运码头，对海上风电场的融合创新和融合发展缺少成熟的规划和布局。中资企业可以积极谋划，发挥在制造业、建筑业领域的优势，抢抓机遇，建设越南本土风电产业链；提前布局越南海上风电的融合发展，形成先发优势。📌

# 智能源 慧未来

信控互联能源新世界





Industry

Technology





# 风电场改造升级项目财务评价方法及最佳改造时间探讨

文 | 张彬彬, 邵建春

据统计<sup>1</sup>,截至2022年年底,运行超过15年的风电装机规模约5.85GW,运行超过10年的风电装机规模约75.3GW,运行超过5年的风电装机规模约188.39GW。由于早期风电技术不成熟,这些老旧风电机组普遍存在技术落后、大部件可靠性低、发电能力差、故障率高、安全隐患多等问题。有些风电机组的部分部件为进口件,不但价格昂贵,而且采购周期较长,甚至部分风电机组品牌制造商由于各种原因已退出市场,造成风电机组缺少备件、技术服务的支持。在这类风电场,对场内风电机组、配套升压变电站、场内集电线路等设施进行更换或技术改造,用先进高效的大兆瓦机组代替老旧风电机组,充分利用原有的风能资源及土地资源,即进行改造升级,可以实现可观的经济效益和社会效益。就政策层面而言,早在2019年6月辽宁省发展改革委即印发了《关于征求现役风电机组更新项目建设有关事项意见的函》,为首个针对现役机组更新制定的政策文件;2021年2月,山西省能源局印发了《关于进一步梳理山西风电项目有关事宜的通知》;2021年8月,宁夏发展改革委率先发布了全国首个老旧风电场“以大代小”更新试点的通知。为了进一步推动老旧风电场改造升级,2021年12月,国家能源局公布了《风电场改造升级和退役管理办法(征求意见稿)》,重庆、河北张家口、内蒙古等地随后出台相关政策。2023年6月,《风电场改造升级和退役管理办法》正式发布。

在政策的指引下,“十四五”以来,越来越多的“以大代小”项目开始浮现,风电场改造升级呈现蓬勃发展之势。宁夏发展改革委发布更新试点政策后,宁夏龙源贺兰山“以

大代小”等容技改项目成为全国首个备案的“以大代小”风电等容技改项目,2022年12月24日,2条35kV线路及6条10kV线路全部送电成功,预示着该项目首批机组顺利并网发电。2022年4月29日,随着大唐重庆四眼坪风电改扩建项目最后一台风电机组并网调试成功,全国首个实施的大规模“以大代小”增容改造风电项目全容量并网发电。2022年9月,国华投资广东汕尾红海湾16MW改建项目开工,成为广东省首个取得“以大代小”风电技改备案的项目。新疆风能有限责任公司达坂城风电场升级改造项目首台成功并网的机组,成为自2023年6月《风电场改造升级和退役管理办法》印发以来首台并网的风电机组。

对于风电场改造升级项目,制约其实施的一个关键因素是财务评价<sup>2</sup>——在国家现行财税制度和价格体系下,从项目的角度出发,计算项目范围内的财务效益和费用,分析项目的盈利能力与清偿能力,评价项目在财务上的可行性。财务评价为项目决策提供经济方面的依据,它的准确性对于决策的正确与否起到决定性作用,因此,财务评价方法的选择及方法选定后对改造年限的确定尤为重要。本文在现有的财务评价方法上引入“增加成本法”,对最适合风电场改造升级项目的评价方法进行分析,并基于此方法展开最佳改造年限的论证。

## 风电场改造升级项目财务评价方法概述

### 一、目前常用财务评价方法

根据相关文献<sup>1,3</sup>,目前主要有以下几种财务评价方法:

1: 吴宪. 基于“以大代小”改造的风电项目经济评价方法研究 [J]. 风能, 2023 (5): 98 - 107.

2: 国家发展改革委、建设部. 《建设项目经济评价方法与参数》(第三版) [M]. 中国计划出版社, 2006.

3: 杜文珍, 吴俊辉. 经济性评估方法在老旧风电场改造中的应用 [J]. 风能, 2022 (12): 60 - 65.

“增量法”：用“有项目”的现金流量减“无项目”的现金流量。具体计算时，需要先用“有项目”的投资减去“无项目”的投资，得到增量投资；“有项目”的发电收益减去“无项目”的发电收益，得到增量收益；“有项目”的运营成本减去“无项目”的运营成本，得到增量运营成本。再计算增量部分的税金，最后得到增量现金流量和增量效果指标。

“账面价值法”：将原项目固定资产剩余价值与新增投资一起计入投资费用，其中可利用的升压站、线路、道路等资产按账面原值，在剩余的运营年限内继续提取折旧与修理费；不可利用的原风电机组、塔筒拆除后变卖，风电机组基础拆除做报废处理，按沉没成本在计算期首年计提减值。此外，不考虑原项目其他任何影响，将“以大代小”改造项目转化成一个常规的新建项目进行经评测算。

“资产重新估值法”：通过对老旧风电场进行重新估值，测算其实际价值，在未来各年度收益预测值（剩余运行年度预估发电量对应的销售收入减去运维成本及所得税等）的基础上引入折现率，得到折现到改造升级时间点并累加的风电场重新评估的价值，再与新增投资一起计入投资费用，将“以大代小”改造项目转化成一个常规的新建项目进行经评测算。

根据研究结论，“账面价值法”和“资产重新估值法”中部分参数存在一定的不确定性，会对改造项目的实际收益造成影响；而采用“增量法”，能够较为清晰、客观地反映改造项目的收益。

## 二、引入新的评价方法

“账面价值法”和“资产重新估值法”的唯一区别是，原项目固定资产剩余价值与重新估值的数值大小，在计算经济性原理上并无区别，本文统一称为“增加投资法”。在用此方法进行财务评价时，会出现资本金财务内部收益率偏高的现象。为解决该问题，本文延伸出另一种评价方法“增加成本法”：将原项目固定资产剩余价值或者重新估值纳入建设期成本，将“以大代小”改造项目转化成一个常规的新建项目进行经评测算。

利用上述方法分别计算现金流入和现金流出的公式如下：

各年度现金流入 = 新机组年发电量 × 电价 + 固定资产增值税抵扣 + 回收固定资产余值 + 回收流动资金 + 即征即退增值税

各年度现金流出 = 建设投资（仅建设期有）+ 原项目固定资产剩余价值或者重新估值（仅建设期有）+ 流动资金

（仅运营期第一年有）+ 经营成本 + 销售税金附加

## 风电场改造升级项目案例分析

本文以辽宁某风电场改造升级项目为例，进行“增量法”、“增加投资法”与“增加成本法”的对比。

项目装机容量为 49.5MW，安装 33 台 1.5MW 风电机组，风轮直径为 82m，于 2009 年 12 月底投运，补贴后的电价为 0.61 元 / 千瓦时，当地燃煤发电标杆上网电价为 0.3749 元 / 千瓦时。风电场位于四类风能资源区，全生命周期合理利用小时数为 36000h，改造前年等效可利用小时数为 1981h，至 2023 年 6 月底已补贴小时数为 24500h。改造采用 21 台 7MW 机组，改造后容量为 147MW，年上网发电量为 448982MWh，年等效利用小时数为 3054h，静态总投资为 62380.13 万元。按 2024 年年底建设完成并上网发电考虑，原风电场 2023 年年底账面净值按 19376 万元估算。

原项目定员数量为 8 人，人均工资为 12 万元，福利费及其他占工资的 50%，年保险费为 74 万元，其他年运维费用为 92.7 元 / 千瓦（合计 459 万元）。改造后的定员数量为 20 人，人均工资为 12 万元，福利费及其他占工资的 50%，年保险费为 172 万元，质保期内的其他年运维费用为 50 元 / 千瓦（合计 735 万元），质保期外的其他年运维费用为 70 元 / 千瓦（合计 1029 万元）。

项目改造资本金按占静态总投资的 20% 测算（12476 万元），其余的资金采用银行贷款。贷款偿还期为 15 年，宽限期为 1 年，宽限期后每年按贷款等额还本利息照付，贷款年利率为 4.3%。流动资金按 30 元 / 千瓦估算，其中的 30% 为自有资金，70% 采用银行贷款，贷款年利率为 4.3%。发电收入增值税税率为 13%，企业所得税税率为 25%。财务评价计算期为 21 年，其中，建设期 12 个月，运营期 20 年。

依据《风电场改造升级和退役管理办法》第十四条关于“并网运行未满 20 年且累计发电量未超过全生命周期补贴电量的风电场改造升级项目，按照《财政部 发展改革委 国家能源局关于〈关于促进非水可再生能源发电健康发展的若干意见〉有关事项的补充通知》（财建〔2020〕426 号）相关规定享受中央财政补贴资金，改造升级工期计入项目全生命周期补贴年限。改造升级完成后按照《财政部办公

厅关于开展可再生能源发电补贴项目清单审核有关工作的通知》(财办建〔2020〕6号)有关规定,由电网企业及时变更补贴清单,每年补贴电量按实际发电量执行且不超过改造前项目全生命周期补贴电量的5%。风电场完成改造升级后,对并网运行满20年或累计补贴电量超过改造前项目全生命周期补贴电量的项目,不再享受中央财政补贴资金”的规定,该风电场改造后每年可享有的补贴小时数为1800h(对应为49.5MW)。

### 一、“增量法”

发电收入方面:

0—1年,增量年发电收入(发电损失)=0-原风电场小时数(1981)×含补贴电价(0.61)×原项目容量(49500)

2—6年,增量年发电收入=可补贴小时数(1800)×含补贴电价(0.61)×原项目容量(49500)+差额小时数(3054-1800)×标杆电价(0.3749)×原项目容量(49500)+新风电场小时数(3054)×标杆电价(0.3749)×差额容量(97500)-原风电场小时数(1981)×含补贴电价(0.61)×原项目容量(49500)

7—21年,增量年发电收入=新风电场小时数(3054)×标杆电价(0.3749)×新项目容量(147000)-0

经营成本方面:

0—1年,增量年经营成本=0-原定员数量(8)×人均工资(12)×(1+福利及其他占比(50%))-原年保险费(74)-原其他年运维费用(459)

2—6年,增量年经营成本=新定员数量(20)×人均工资(12)×(1+福利及其他占比(50%))+新年保险费(172)+新其他年运维费用(735)-原定员数量(8)×人均工资(12)×(1+福利及其他占比(50%))-原年保险费(74)-原其他年运维费用(459)

7—21年,增量年经营成本=新定员数量(20)×人均工资(12)×(1+福利及其他占比(50%))+新年保险费(172)+新其他年运维费用(1029)

### 二、“增加投资法”“增加成本法”

发电收入方面:

0—1年,年发电收入=0

2—6年,年发电收入=可补贴小时数(1800)×含补贴电价(0.61)×原项目容量(49500)+差额小时数(3054-1800)×标杆电价(0.3749)×原项目容量(49500)+新风电场小时数(3054)×标杆电价(0.3749)×差额

容量(97500)

7—21年,年发电收入=新风电场小时数(3054)×标杆电价(0.3749)×新项目容量(147000)

经营成本方面:

0—1年,年经营成本=0

2—6年,年经营成本=新定员数量(20)×人均工资(12)×(1+福利及其他占比(50%))+新年保险费(172)+新其他年运维费用(735)

7—21年,年经营成本=新定员数量(20)×人均工资(12)×(1+福利及其他占比(50%))+新年保险费(172)+新其他年运维费用(1029)

经济性分析结果如表1所示。

首先,对“增加投资法”与“增加成本法”进行对比分析:二者最大的不同在于资本金财务内部收益率,前者为66.97%,后者为30.55%,按照“增加投资法”进行评价会给投资者带来收益很好的假象。财务内部收益率的定义是使项目计算期内净现金流量现值累计等于零的折现率。按照“增加投资法”的原理进行测算时未使原项目固定资产剩余价值(或重新估值)这一前期大额数值形成现金流出,导致资本金财务内部收益率偏高。而“增加成本法”将此纳入建设期成本,形成了现金流出,则能更好地解决这一问题。

其次,对项目投资财务内部收益率进行对比分析:三种方法在本案例中得到的结果基本一致,暂不能看出各方法的优缺点。当改变案例中的一个条件时,可以得到如表2所示的结果。由表可以看出,若原风电场小时数增加,会降低“增量法”的投资财务内部收益率,不改变“增加投资法”与“增加成本法”的结果;若原风电场账面净值降低,会提高“增加投资法”与“增加成本法”的投资财务内部收益率,不改变“增量法”的结果。这说明在某些条件改变时,“增量法”与另两种方法得到的结果趋势不一致(不同时增大或同时减小),即在全国大批量的项目中会有一些项目采用这几种方法得到不同的决策结论(有的计算方法收益率满足预期,有的计算方法不满足预期)。

由于采用不同的方法可能得出不同的投资结论,对于投资的可行性,笔者认为应该回归到这些计算方法背后的逻辑上,且应与实际对应。当有新投资方(非原风电场业主)先按照财务账面价值(或估值)将原风电场买入,形成真实的现金流出,而后对其进行投资改造时,对于项目投资

表1 不同财务评价方法的财务指标汇总

项目	单位	增量法	增加投资法	增加成本法
装机容量	MW	147.00	147.00	147.00
经营期年均上网电量	MWh	423018.59	448938.00	448938.00
项目总投资	万元	63894.07	83686.52	63894.07
建设投资	万元	62380.13	81756.00	62380.13
单位千瓦静态投资	元 / 千瓦	4243.55	5561.63	4243.55
建设期利息	万元	1072.94	1489.52	1072.94
流动资金	万元	441.00	441.00	441.00
销售收入总额 (不含增值税)	万元	280689.68	307156.97	307156.97
总成本费用	万元	104711.95	127811.34	122693.31
销售税金附加总额	万元	3025.17	3369.24	3369.24
利润总额	万元	188078.39	194142.59	199260.62
经营期平均电价 (不含增值税)	元 / 千瓦时	0.3318	0.3421	0.3421
经营期平均电价 (含增值税)	元 / 千瓦时	0.3749	0.3866	0.3866
项目投资回收期 (所得税前)	年	6.55	5.73	5.73
项目投资回收期 (所得税后)	年	7.53	6.89	7.03
项目投资财务内部收益率 (所得税前)		18.53%	19.20%	19.19%
项目投资财务内部收益率 (所得税后)		14.89%	15.19%	14.79%
项目投资财务净现值 (所得税前)	万元	95621.17	104255.35	103900.01
项目投资财务净现值 (所得税后)	万元	71873.24	78597.42	75165.78
资本金财务内部收益率		34.66%	66.97%	30.55%
资本金财务净现值	万元	48365.33	56099.76	52280.25
总投资收益率 (ROI)		16.49%	12.99%	18.49%
投资利税率		15.34%	11.72%	17.33%
项目资本金净利润率 (ROE)		57.87%	57.35%	66.75%
资产负债率 (最大值)		88.01%	84.69%	110.07%
盈亏平衡点 (生产能力利用率)		37.71%	42.07%	40.39%
盈亏平衡点 (年产量)	MWh	159527.42	188879.81	181316.37
度电成本 (LCOE)	元 / 千瓦时	0.1484	0.1784	0.1414

表2 项目投资财务内部收益 (所得税后)

改变条件	增量法	增加投资法	增加成本法
原结果	14.89%	15.19%	14.79%
改造前年等效利用小时数若为 2200h	14.48%	15.19%	14.79%
原风电场 2023 年年底账面净值为 13376 万元	14.89%	16.61%	16.32%

财务内部收益率的计算，因为采用“增加投资法”与“增加成本法”都增加了这笔现金流出，采用这两种方法均合理；对于资本金财务内部收益率的计算，采用“增加成本法”会使这笔现金流出无法形成固定资产，因此，“增加投资法”最为合理。在未出现新投资方的情况下，由于没有形成财务账面价值（或估值）这笔现金流出，依据《风电场项目经济评价规范》，改扩建项目应识别与计算“无项目”“有项目”“现状”“新增”“增量”状态下的资产、资源、效益和费用；遵循“有无对比”的原则，计算增量效益和增量费用，无论计算项目投资财务内部收益率，还是计算资本金财务内部收益率，“增量法”都更为科学合理。

### 基于“增量法”对于改造时间节点的分析

同样以上文风电场为例，它于2009年12月底投运，运营期满20年为2029年年底。分别对2024—2030年改造进行财务评价（若2030年改造，原项目已终结，增量即为新项目数据），计算方法和数据同上文。由经济性分析结果（表3）可以看出，越晚进行改造，效益越好。造成这种现象的原因是越晚进行改造，原项目和新项目的重合期越短，即增量现金流量和增量效果指标越高。

此时，各年进行改造的所得税后净现金流量（仅以此项作为代表进行分析，其他指标同理）如表4所示。由表可以看出，2024—2030年改造计算期虽均为21年，但对应的时间段并不相同。依据《风电场项目经济评价规范》，备选技术方案包含的范围和时间应一致，若要比较哪一年改造收益效果更佳，需将评价期调整一致。现仅对2024年改造及2030年改造这两种情况进行分析（依据表3，2025—2029年改造评价指标介于两者之间），假设投资方2024年年初有足够的资金，对以下两种方案进行投资决策：

方案一：投资方于2024年年初进行投资改造，2044年项目结束，回收的资金可以投资下一个项目，到2050年项目结束。

方案二：投资方于2024年进行短期投资（以保证2030年年初资金能够回收用于改造），投资年化收益率为3%（税后），2030年年初进行改造，到2050年项目结束。

两种方案所得税后净现金流量如表5所示。由表可

得，方案一项目投资财务内部收益率（所得税后）大于14.89%，方案二仅为10.31%。经过测算，若使方案二的项目投资财务内部收益率（所得税后）达到14.89%，投资年化收益率（税后）需达到12.69%。站在投资方的角度，若当下进行短期投资，年化收益率超过12.69%（税后），则于2030年进行改造；若不及12.69%，则于2024年进行改造。

### 风电场改造升级财务评价误区分析

上文介绍了多种财务评价的方法，依据《风电场项目经济评价规范》以及实际情况，“增量法”是最科学合理的评价方法，其他几种评价方法主要是基于投资方以下想法的产物：第一，风电场改造升级在现实层面确实造成了固定资产的损失；第二，在财务层面，账目要如何处理以规避固定资产损失；第三，在项目评价过程中要考虑这些损失，作出中肯的评价。以上想法会使得投资方在财务评价方面陷入以下两个误区：

误区一：考虑固定资产损失，将损失视为建设期成本或投资去评价。

视为建设期成本或投资即形成现金流出，固定资产损失应视为《风电场项目经济评价规范》中提及的“沉没成本”，不形成现金流出，不对现在的决策产生影响。

误区二：不同的记账方式会对项目财务评价产生较大影响。理论上财务对于拆除设备的记账方式有如下几种：

(1) 将拆除老旧风电机组固定资产净值和处置收益净额纳入当期损益<sup>4</sup>。

(2) 将拆除老旧风电机组固定资产净值和处置收益净额计入新建项目固定资产。

(3) 将拆除老旧风电机组固定资产净值和处置收益净额作待摊费用，按照一定年限折旧。

(4) 不做处置，按原项目剩余年限继续折旧，至原项目运营期末回收残值。

由于以上提到的“净额”并未形成现金流出，因此，不同记账方式造成的不同现金流出主要体现在税收方面（主要由利润不同导致），四种方式之间的税收流出差额不大，同时差额占新项目投资的比例以及占发电收入的比例过小，

4: 卢用. 风电场“以大代小”更新会计处理问题研究[J]. 能源, 2023(4): 69-70.

表3 不同改造年份的财务指标汇总

项目	单位	2024年改造	2025年改造	2026年改造	2027年改造	2028年改造	2029年改造	2030年改造
装机容量	MW	147.00	147.00	147.00	147.00	147.00	147.00	147.00
经营期年均上网电量	MWh	423018.59	428202.47	433386.36	438570.24	443754.12	448938.00	448938.00
项目总投资	万元	63894.07	63894.07	63894.07	63894.07	63894.07	63894.07	63894.07
建设投资	万元	62380.13	62380.13	62380.13	62380.13	62380.13	62380.13	62380.13
单位千瓦静态投资	元/千瓦	4243.55	4243.55	4243.55	4243.55	4243.55	4243.55	4243.55
建设期利息	万元	1072.94	1072.94	1072.94	1072.94	1072.94	1072.94	1072.94
流动资金	万元	441.00	441.00	441.00	441.00	441.00	441.00	441.00
销售收入总额 (不含增值税)	万元	280689.68	284129.39	287569.11	291008.82	294448.53	297888.24	297888.24
总成本费用	万元	104711.95	105682.95	106653.95	107624.95	108595.95	109626.27	103375.90
销售税金附加总额	万元	3025.17	3069.88	3114.60	3159.31	3204.03	3248.75	3248.75
利润总额	万元	188078.39	190725.97	193373.54	196021.12	198668.70	201256.96	207507.33
经营期平均电价 (不含增值税)	元/千瓦时	0.3318	0.3318	0.3318	0.3318	0.3318	0.3318	0.3318
经营期平均电价 (含增值税)	元/千瓦时	0.3749	0.3749	0.3749	0.3749	0.3749	0.3749	0.3749
项目投资回收期 (所得税前)	年	6.55	6.36	6.17	5.99	5.80	5.61	5.19
项目投资回收期 (所得税后)	年	7.53	7.36	7.18	7.01	6.83	6.68	6.16
项目投资财务内部 收益率(所得税前)		18.53%	18.83%	19.19%	19.63%	20.17%	20.86%	23.05%
项目投资财务内部 收益率(所得税后)		14.89%	15.12%	15.40%	15.73%	16.12%	16.50%	18.36%
项目投资财务净现值 (所得税前)	万元	95621.17	97547.58	99576.62	101711.00	103962.61	106337.31	112034.07
项目投资财务净现值 (所得税后)	万元	71873.24	73363.83	74928.30	76567.36	78291.49	79788.71	85512.73
资本金财务内部收益率		34.66%	35.36%	36.31%	37.64%	39.51%	42.12%	59.88%
资本金财务净现值	万元	48365.33	49566.74	50874.20	52292.56	53832.68	55466.43	59914.13
总投资收益率(ROI)		16.49%	16.70%	16.91%	17.11%	17.32%	17.63%	17.63%
投资利税率		15.34%	15.55%	15.76%	15.97%	16.18%	16.49%	16.49%
项目资本金净利润率 (ROE)		57.87%	58.66%	59.45%	60.23%	61.02%	62.34%	61.72%
资产负债率(最大值)		88.01%	88.01%	88.01%	88.01%	88.01%	90.19%	80.34%
盈亏平衡点 (生产能力利用率)		37.71%	37.60%	37.49%	37.39%	37.29%	37.21%	35.09%
盈亏平衡点(年产量)	MWh	159527.42	161011.11	162494.77	163978.40	165462.02	167035.98	157512.39
度电成本(LCOE)	元/千瓦时	0.1484	0.1475	0.1466	0.1456	0.1446	0.1435	0.1435

表4 不同改造年份的所得税后净现金流量（单位：万元）

	2024 年改造	2025 年改造	2026 年改造	2027 年改造	2028 年改造	2029 年改造	2030 年改造
2024 年	-67042						
2025 年	9952	-67042					
2026 年	10393	9952	-67042				
2027 年	10393	10393	9952	-67042			
2028 年	10393	10393	10393	9952	-67042		
2029 年	8557	9403	9403	9403	8962	-68362	
2030 年	11336	11533	12575	12691	12691	12250	-62380
2031 年	11336	11336	11336	12262	12691	12691	12250
2032 年	11336	11336	11336	11336	11949	12691	12691
2033 年	11336	11336	11336	11336	11336	11636	12691
2034 年	11336	11336	11336	11336	11336	11336	11636
2035 年	11336	11336	11336	11336	11336	11336	11336
2036 年	11336	11336	11336	11336	11336	11336	11336
2037 年	11336	11336	11336	11336	11336	11336	11336
2038 年	11336	11336	11336	11336	11336	11336	11336
2039 年	11336	11336	11336	11336	11336	11336	11336
2040 年	11336	11336	11336	11336	11336	11336	11336
2041 年	11336	11336	11336	11336	11336	11336	11336
2042 年	11336	11336	11336	11336	11336	11336	11336
2043 年	10581	11336	11336	11336	11336	11336	11336
2044 年	13883	10581	11336	11336	11336	11336	11336
2045 年		13883	10581	11336	11336	11336	11336
2046 年			13883	10581	11336	11336	11336
2047 年				13883	10581	11336	11336
2048 年					13883	10581	11336
2049 年						13883	10581
2050 年							13883

注：-67042 万元等于投资 -62380 减去建设期电费损失 5982 万元加上原项目期末应回收的机组价值 1320 万元。

表5 两种改造方案的所得税后净现金流量（单位：万元）

年份 \ 改造方案	方案一	方案二	年份 \ 改造方案	方案一	方案二
2024年	-67042	-62380	2038年	11336	11336
2025年	9952	1871	2039年	11336	11336
2026年	10393	1871	2040年	11336	11336
2027年	10393	1871	2041年	11336	11336
2028年	10393	1871	2042年	11336	11336
2029年	8557	1871	2043年	10581	11336
2030年	11336	1871	2044年	13883	11336
2031年	11336	12250	2045年	> 0	11336
2032年	11336	12691	2046年	> 0	11336
2033年	11336	12691	2047年	> 0	11336
2034年	11336	11636	2048年	> 0	11336
2035年	11336	11336	2049年	> 0	10581
2036年	11336	11336	2050年	> 0	13883
2037年	11336	11336			

注：1871万元等于62380万元乘以3%。

不足以对主要的几个评价指标产生较大影响。因此，不论财务采用何种记账方式，对于风电场改造升级项目的财务评价影响可以忽略不计。

此外，在对改造年限进行分析时，容易忽视不同年限改造对应的时间节点并不统一。若将不同改造时间节点作为独立型方案进行评价，风电场改造升级项目改造时间节点越晚，数据上越可观（由于原项目和新项目的重合期越短，增量现金流量和增量效果指标越高）。然而，如果将各方案评价期调整一致后再进行分析决策，则越早进行改造，效益可能越好。针对实际项目，需进行进一步的对比分析。

## 结语

根据目前风电市场的形势及政策情况，未来风电场改

造升级的市场会非常庞大，对低效风电场进行合理的技术、财务评价，有助于企业获得更好的效益，对促进地方经济发展同样有积极的推动作用。本文对目前的财务评价方法做了总结，在原业主进行风电场改造升级项目财务评价时，采用“增加投资法”，会使资本金财务内部收益率偏高，对投资者造成误导。而引入“增加成本法”，可以解决资本金财务内部收益率偏高的问题。在新业主进行风电场改造升级项目财务评价时（新投资方将原风电场先买入），在计算项目投资财务内部收益率方面，两种方法均合理；在计算资本金财务内部收益率方面，“增加投资法”最合理。在无新投资方的情况下，“增量法”最为科学合理。在采用“增量法”进行最佳改造年限的分析时，应注意将各对比方案评价期调整一致。✎

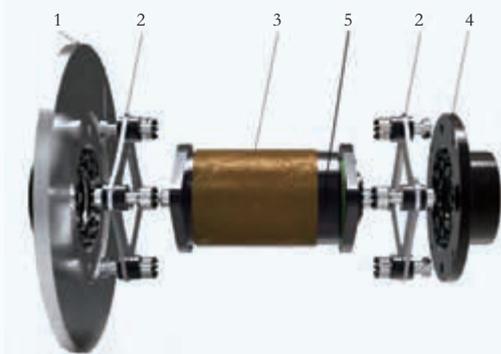
（作者单位：润阳能源技术有限公司）

# 兆瓦级双馈风电联轴器设计与制造技术研究

文 | 张凯, 肖旺, 李肖霞, 董国庆, 王京丽

在我国双碳战略目标倡导的绿色、环保、低碳发展要求下, 新能源产业快速发展, 2022 年以来, 陆上 5MW 和海上 8MW 级别风电机组已成为市场上的主流产品。风电联轴器是双馈型风电机组传动系统中的重要部件, 安装在齿轮箱输出轴和发电机输入轴之间, 通过弹性组件将两者连接起来。其具有正向传扭、绝缘电流、弹性纠偏、打滑保护的作用, 各项性能和可靠性直接影响风电机组的运行和发电量<sup>1</sup>。因此, 风电联轴器设计和制造技术对整台风电机组具有重要意义。

本文通过汇总分析多家风电联轴器厂家的技术方案, 再结合风电场失效案例原因调查分析相关结论, 针对风电联轴器设计和制造的关键技术提出合理化建议, 以期帮助厂家规避设计和制造中的风险, 提升风电联轴器产品的可靠性和竞争力。



1-齿轮箱侧胀紧套组件；2-弹性组件；3-中间体组件；  
4-发电机侧胀紧套组件；5-扭矩限制器

图1 联轴器结构组成

## 国内外风电联轴器设计研究

### 一、国外设计

双馈型风电机组高速轴联轴器通常包括齿轮箱侧胀紧套组件（含刹车盘）、两组弹性组件、中间体组件、发电机侧胀紧套组件和扭矩限制器（内置或外置）五个主要部分, 如图 1 所示。与常规的联轴器相比, 风电联轴器具有传递载荷大、各向补偿大等优点<sup>2</sup>。尤其是当发电机发生异常短路时, 发电机侧会产生极大的反扭力矩, 需要通过扭矩限制器打滑限制过大的反扭力矩传递给齿轮箱, 从而保护齿轮箱不受损伤。风电联轴器作为一个行业内非标产品, 各联轴器厂家的结构设计存在差异性, 主要体现在中间体制造工艺、弹性组件结构形式、扭矩限制器的结构设计三个方面。其他子部件, 如胀紧套、刹车盘等基本已经实现行业标准化设计。

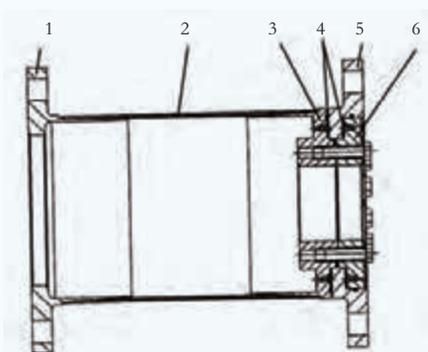
本文以 5.XMW 机型为设计输入, 通过汇总分析《全球及中国风力发电机组用联轴器行业研究及“十四五”规划分析报告》中提及的多家国内外知名联轴器厂家的设计方案可知, 国外风电联轴器设计按弹性组件类型主要分为膜片式和橡胶连杆式两种。

在设计方案中, 某知名德国 A 品牌风电联轴器设计采用“玻纤中间筒粘接+膜片式纠偏+内置摩擦式扭矩限制器”结构。由于中间体使用玻纤材料, 具有绝缘性, 故该设计具有较好的电绝缘性能。这一设计的中间筒通过胶水粘接工艺与相邻部件连接, 其中间筒结构和摩擦式扭矩限制器剖面如图 2 所示。扭矩限制器由发电机侧连接法兰、摩擦片、摩擦法兰盘、压盘、紧固件组成, 置于中间筒内部, 通过

1: 王岳峰, 王书勇, 姜宏伟, 等. 兆瓦级风电机组联轴器的研究 [J]. 机械工程与自动化, 2019 (4): 101 - 102+104.  
2: 王亚平, 顾笑然, 刘文松, 等. 风电联轴器的结构类型及技术特点 [J]. 机械工程师, 2014 (11): 72 - 75.

调整压盘处的螺栓力矩实现扭矩限制器打滑扭矩的调整<sup>3</sup>。该结构设计具有简洁、紧凑的优点，但因扭矩限制器内置，导致对扭矩限制器的巡检、维修更换较为困难。

某知名美国 B 品牌风电联轴器设计采用“合金钢中间筒焊接 + 膜片式纠偏 + 外置摩擦式扭矩限制器”结构，如图 3 所示。由于中间筒采用焊接工艺进行连接，故该连接方式与玻纤中间筒粘接相比具有更高的连接强度。随着机型功率增大，该焊接式中间筒优势会越来越显著。此外，该设计的扭矩限制器外置集成在发电机侧胀紧套上，检修保养时无需任何拆解即可完成螺栓标线等方面检查，运维比较便捷。然而，其绝缘方面需进行特殊设计。



1-齿轮箱侧连接法兰；2-中间筒；3-发电机侧连接法兰；  
4-摩擦片；5-摩擦法兰盘；6-压盘

图2 某中间筒和扭矩限制器剖面示意<sup>3</sup>



图3 某钢筒焊接工艺风电联轴器

某知名德国 C 品牌风电联轴器设计采用“合金钢中间体焊接 + 连杆式纠偏 + 外置摩擦式扭矩限制器”结构，与前两种设计的主要不同点是弹性组件采用橡胶连杆式，如图 4 所示。橡胶连杆式相比膜片式安装螺栓数量多，故存在安装和维护项点多、运维工作量大的缺点。

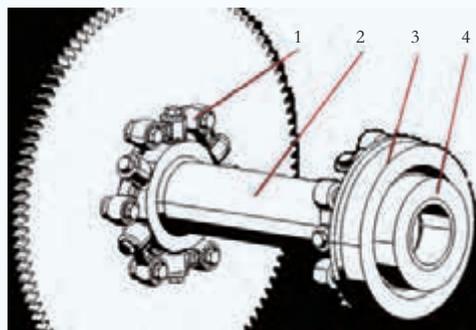
汇总多家风电联轴器厂家的设计方案可知，以上三种风电联轴器设计形式基本包含目前行业内双馈风电联轴器结构类型，其他设计都是在这些结构的基础上对弹性组件、中间体和扭矩限制器结构进行组合和细节调整，目的是达到更高的产品可靠性。

## 二、国内设计

早在 20 世纪 80 年代初，我国一些科研机构便开始对膜片联轴器开展设计与研究<sup>4</sup>，但专门针对风电联轴器的研究起步较晚。随着我国风电行业发展，国产联轴器厂家逐渐增多，风电联轴器的设计、校核和工艺等都获得了专项研究<sup>5-7</sup>。

根据《中国风电机组零部件产品汇编》，近几年众多国产风电联轴器厂家都在积极占据市场，其产品结构设计和制造工艺存在相似性。

经过对国内多家联轴器厂家 5.XMW 联轴器设计方案汇总，国内联轴器中间体基本都是采用玻纤材料，其一般是采用玻纤对中间筒毛坯缠绕成型后再进行机加工修型处理得到<sup>8</sup>。相



1-橡胶连杆关节；2-合金钢中间筒；  
3-扭矩限制器；4-发电机侧胀紧套

图4 橡胶连杆式风电联轴器

3: 朱建东. 风力发电机高速轴用联轴器 [P]. 中国: 201284799, 2009-08-05.

4: 徐阳, 赵金阳, 陈永祥, 等. 国产膜片联轴器的技术及应用进展 [J]. 流体机械, 2010, 38 (11): 30 - 35.

5: 李钦奉, 宋霄, 耿莹晶, 等. 风电联轴器极限扭矩下膜片组振动特性分析 [J]. 机械设计与制造工程, 2020, 49 (9): 19 - 22.

6: 王习林, 秦中正, 胡伟辉, 等. 一种风电联轴器胀紧套强度校核方法 [J]. 机械工程师, 2020 (1): 97 - 99.

7: 陈兴东, 裴伟平, 黄滔. QT400-18L 材料风电联轴器摩擦片补焊工艺对比研究 [J]. 东方汽轮机, 2021 (4): 57 - 60+69.

8: 余训章, 李双虎, 沈伟樑. 兆瓦级风力发电机联轴器中间管轴的制造方法 [P]. 中国: 101712204, 2010-05-26.

比于钢质中间筒，玻纤中间筒除了具有较高的绝缘性能，成本优势也较高，故被国内厂家广泛应用。齿轮箱侧和发电机侧胀紧套都是标准设计，多数是根据整机商接口尺寸设计后，在外协厂直接采购，整个供应链比较成熟。在弹性组件设计上，国产联轴器多采用金属膜片式，其材质以弹簧钢（50CrVA 和 51CrV4）和不锈钢（JB/T 9147—1999《膜片联轴器》要求材料性能不低于 1Cr18Ni9 和 1Cr18Ni9Ti）为主。根据《不锈钢和耐热钢冷轧钢带》（GB/T 4239—91）和《弹簧钢》（GB/T 1222—2016），膜片选用弹簧钢会具有更高的抗拉强度和屈服强度，故国内应用该材质相对较多。此外，国产联轴器厂家扭矩限制器都采用摩擦式结构，摩擦片材质多选用铜基粉末材料。该材质摩擦片相比树脂基摩擦片具有更好的耐磨性、热传导性<sup>9</sup>，有助于提高产品耐久性。

通过对国内多家联轴器厂家的设计方案汇总研究可知，国产联轴器结构多为膜片式设计，主要形式是“玻璃钢中间体粘接 + 金属膜片式纠偏 + 内置摩擦式扭矩限制器”。

## 结构与制造技术研究

本节以两座风电场实际失效事件为例，依据原因调查分析相关结论，针对风电联轴器易失效部件（弹性组件和扭矩限制器）的结构设计及制造工艺提出合理建议。

### 一、弹性组件

吉林某风电场安装某 D 品牌 3.XMW 风电联轴器，在 6 个月定期巡检中发现 1 台联轴器膜片出现断裂问题，如图 5 所示。拆换返厂后联轴器厂家对失效膜片进行原因调查发现，膜片机加工质量差和漏检是导致该质量问题的主要原因。

弹性组件是实现联轴器轴向、径向和角度方向纠偏的关键部件，在风电机组运行中既需承受传递扭矩时的拉、压载荷，也要承受纠偏变形的交变载荷，故对材料性能要求非常高。

失效膜片材质是 50CrVA，化学成分符合《弹簧钢》（GB/T 1222—2016）要求。该膜片材质是一种较高级弹簧钢，主要用作较大截面的高负荷弹性件，加入钒使钢的晶粒细化，提高了强度和韧性，具有较高的疲劳强度<sup>10</sup>。

经联轴器厂家对失效膜片进行失效分析可知，失效膜片尺寸、化学成分和力学性能满足技术要求。但根据产品追溯，该失效膜片为早期激光直接落料成型产品，加工后外轮廓表面质量差，具有肉眼可见的凸凹纹理，如图 6 所示。且早期产品探伤采用抽检，存在漏检风险，从而导致存在微裂纹的不合格膜片流出、使用。

膜片主要加工工序包括原材料落料、热处理、铣削加工等。落料常用激光切割成型，具有切割速度快、精度高、热影响区小等优点<sup>11</sup>，但切割端面存在挂渣、粗糙度高等缺点（图 6），会严重降低膜片的使用性能，故推荐在落料后、热处理前增加铣削加工工序。有条件厂家可增加磨削或强化喷丸工序，有助于提升膜片的疲劳性能<sup>12</sup>。

为防止出现漏检失效风险，对加工后的成品膜片 100% 进行无损探伤检测，防止存在微裂纹的不合格膜片流出使用。由于弹簧钢具有磁性，可使用磁粉无损探伤检验。



图5 膜片断裂



图6 膜片切割端面

9: 白润东, 黄滔. 某型风电联轴器的力矩限制器——拉伤解决方法 [J]. 东方汽轮机, 2017 (3): 76 - 79.

10: 鞠辉, 李良晨, 纪同圣, 等. 喷丸强化表面的疲劳过程 [J]. 锻造与冲压, 2022 (5): 34 - 37.

11: 冯巧波, 赵旺初, 李永兵. 工艺参数对不锈钢薄板激光切割质量的影响 [J]. 机械设计与研究, 2017, 33 (6): 118 - 121.

12: 王帅. 喷丸残余应力和表面粗糙度对疲劳寿命的综合影响研究 [D]. 济南: 山东大学, 2018.

此外，膜片长期承受拉压交变载荷，需严格控制表面质量，不允许存在任何线性裂纹缺陷，以防止发生疲劳断裂等问题，故无损探伤检测可按《承压设备无损检测 第4部分：磁粉检测》（NB/T 47013.4—2015）要求的1级进行。

## 二、扭矩限制器

内蒙古某风电场安装4.XMW风电机组40余台，安装某E品牌风电联轴器运行未1年，其中的27台联轴器发生扭矩限制器打滑故障，严重影响风电场正常发电运行。登机检查发现27台故障联轴器的扭矩限制器标线均出现错移，21台扭矩限制器存在螺栓松动现象，5台联轴器下方机舱地板上有摩擦片磨损掉落的黑色粉末。选取一台摩擦片掉粉的联轴器进行拆解后发现摩擦片严重磨损，存在较大面积摩擦片磨损脱落现象，如图7所示。后期将该27台联轴器均更换为某F品牌联轴器后，失效打滑问题未再出现。

发生问题后开展原因调查分析，分别对E和F品牌扭矩限制器结构进行对比分析和摩擦片耐久打滑试验。

### 1. 扭矩限制器结构对比分析

扭矩限制器部件是风电联轴器实现打滑保护的关键结构，该部分设计是国内外各联轴器厂家的核心保护技术之一，其打滑精度和打滑寿命都直接关系到产品的核心竞争力。

分别对两品牌联轴器测绘可知，案例中运行质量较好的F品牌扭矩限制器总体结构形式与图8所示相似，两片摩擦片连接部件之间有抗剪销设计，保证连接法兰和压盘无间隙刚性连接，始终保证两片摩擦片无相对位移且能同时参与打滑摩擦。

E品牌扭矩限制器结构形式与图9所示相似，该设计通过螺栓预紧力将外压盘、大碟簧、连接法兰、中间法兰以及内压盘连接成一个整体，其两组摩擦片分别粘接在内

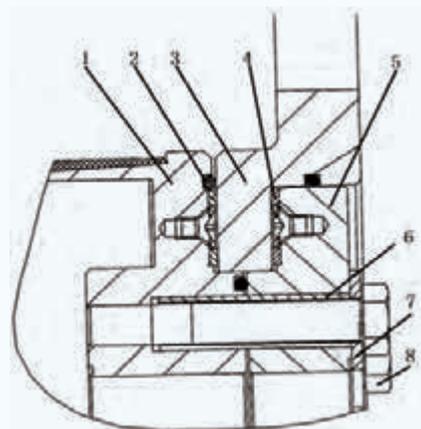


图7 摩擦片磨损

压盘和连接法兰上。该限制器结构中无抗剪销或其他弹性销等抗滑移设计，导致内压盘和连接法兰的配合间隙无法消除。在实际风电机组高速运行过程中，作用在联轴器上的扭矩是波动交变载荷，持续波动冲击会导致配合间隙不断变大，粘接在内压盘和连接法兰上的摩擦片会频繁发生相对小角度摩擦，直至失效。此外，长久小角度摩擦也会加速螺栓松动，直至大碟簧失去防松作用，这是导致案例中扭矩限制器螺栓存在松动现象的原因之一。

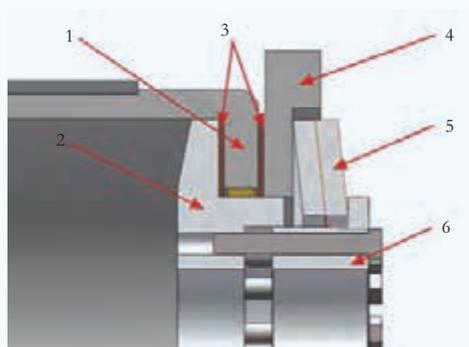
### 2. 摩擦片耐久打滑试验验证

协调厂家开展扭矩限制器耐久性能打滑试验。在扭矩限制器设计中，摩擦片材料选型直接关系到扭矩限制器



1-连接法兰；2-密封圈；3-摩擦法兰盘；4-摩擦片；5-压盘；  
6-抗剪销；7-垫圈；8-螺栓

图8 F品牌扭矩限制器结构示意图<sup>3</sup>



1-中间法兰；2-内压盘；3-摩擦片；  
4-连接法兰；5-大碟簧；6-外压盘

图9 E品牌扭矩限制器结构示意图

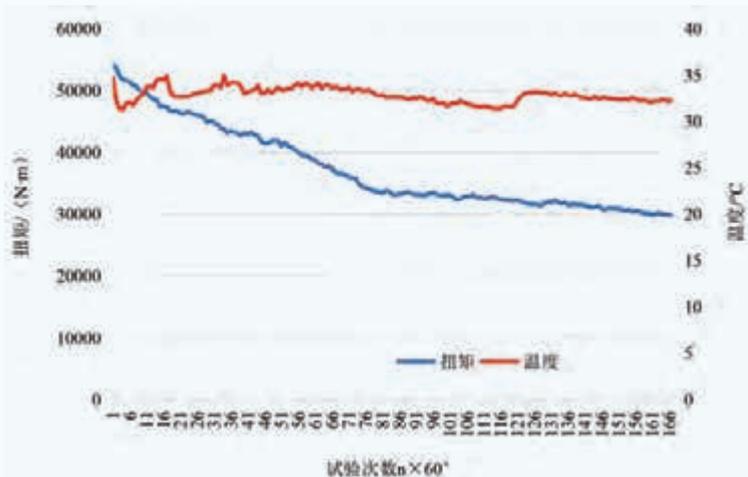


图10 耐久试验打滑扭矩曲线



图11 耐久试验后摩擦片

的使用性能，摩擦片性能需通过型式试验进行验证。此次摩擦片耐久试验按6万度打滑试验进行，即每次打滑60度，打滑1000次<sup>13</sup>，结束时打滑扭矩下降幅度不超初始值的15%。通过试验数据（图10）可知，在保证扭矩限制器表面温度35℃左右时，累计打滑1万度后，E品牌扭矩限制器的打滑力矩从初始打滑值54.19kN·m下降到29.8kN·m，下降幅度为45%，不满足耐久试验要求。从而可知，该联轴器扭矩限制器选用的摩擦片耐久性较差，可能是导致失效的原因之一。

为进一步对比分析，对F品牌扭矩限制器也进行6万度耐久打滑试验。试验结果显示，F品牌选用的摩擦片材质能够满足试验要求，具有较好耐磨性。然而，拆解时发现存在摩擦片偏磨现象，如图11所示。该产品的摩擦片使用螺钉紧固在金属件上，在保证各部件加工精度的前提下，螺钉规格、布局以及预紧力对摩擦片均匀受载会有影响。经确认，该试验件加工精度满足设计要求，故螺钉预紧力或分布设计可能是导致偏磨的原因之一，可在产品螺钉布置设计时逐步优化。

此外，为了保证摩擦片在陆上和海上风电机组运行时都具有稳定的摩擦性能，F品牌扭矩限制器增加无尘保护设计。通过增加橡胶密封圈等防尘设计，可降低运行环境中

灰尘、潮湿等因素对摩擦片性能的影响<sup>14</sup>。在本失效案例中还存在扭矩限制器螺栓松动现象，造成该问题的原因之一可能是螺栓防松设计不足。高速双馈型风电联轴器工作转速可达1720rpm，且转速和扭矩均存在波动，扭矩限制器上螺栓（图8）在持续波动载荷下会有松动趋势。针对该问题，除了使用案例中大碟簧防松设计外，也可参考其他联轴器厂家使用的蝶形垫圈或双螺母设计。

## 结语

本文通过调研国内外多家风电联轴器厂家设计，以及分析风电场失效案例，对风电联轴器设计和制造技术提出以下建议：

- (1) 需对膜片式联轴器膜片材质的化学成分、机械性能、表面质量及检验加强管控。
- (2) 扭矩限制器摩擦片的材质选型是设计的关键技术之一，可使用6万度耐久打滑试验标准进行验证。
- (3) 扭矩限制器结构设计需关注摩擦片无相对位移和螺栓防松等方面结构优化，从而减少产品失效风险，提升产品可靠性，降低维护成本。✎

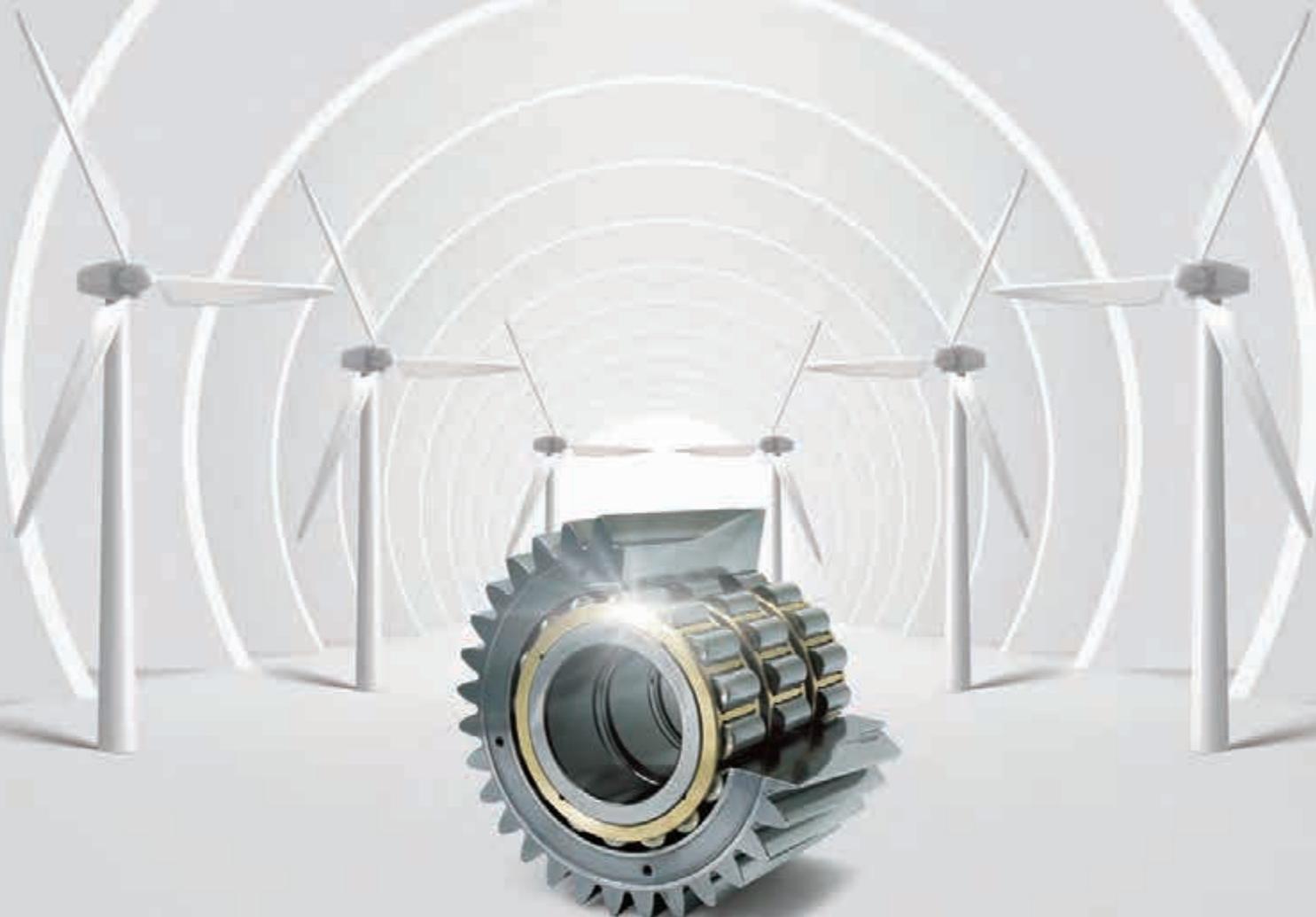
（作者单位：中车山东风电有限公司）

13: 秦中正, 彭浩坤, 陆响, 等. 某型风电联轴器用扭矩限制器的设计及试验 [J]. 机械研究与应用, 2019, 32 (5): 79 - 81+88.

14: 王宁, 符蓉, 高飞. 摩擦压力和干湿条件对铜铝基材料摩擦性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2011, 40 (22): 12 - 14.



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



保障风力发电机组稳定可靠运行，将风能转化为电能，年复一年风雨无阻

### 无外圈轴承 — 风力发电增速机用

齿轮内径面直接作为轴承的滚道使用，从而省略了外圈的设计。

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

提高该部位的运转可靠性。

NSK微信公众号



# 风电格构式塔架技术研究综述

文 | 乔亚兰

在风电机组高塔架发展趋势下，传统的钢制筒形塔架、钢混塔架的制造成本和开发难度日益凸显，而格构式塔架具有结构强度较高、不受公路运输限制、材料成本更低等优势，可作为传统塔架的替代方案。本文梳理了风电机组塔架选型的发展路线及特点，并从设计型式研究、力学性能分析与优化、新型材料应用三个方面对格构式塔架的技术发展进行了介绍，最后对风电格构式塔架的技术研究方向给出了建议。

## 风电机组塔架选型发展路线

风电塔架选型的发展（图 1），与风电主机的研发设计水平和风电设备的商业化进程息息相关。

### 一、早期

在风电设备商业化早期阶段（21 世纪前），由于对风电机组设计的认知程度低，作为支撑结构的塔架并非此时期的研究重点，故塔架的设计与选型多种多样，呈现出“百花齐放”的特点。

塔架的典型类型包括，格构式塔架、筒形塔架、拉索塔、混凝土塔架，等等。如图 2 所示，案例 1 为美国国家航空航天局（NASA）设计的风电机组 Mod-0A，采用双叶片设计，风轮直径为 38m，额定功率为 200kW，支撑结构采用格构式塔架。这台风电机组位于新墨西哥州克莱顿，于 1977 年安装，1982 年拆除。案例 2 为西屋电气公司（Westinghouse）的 600kW 风电机组，位于科罗拉多州的美国国家可再生能源实验室（NREL），采用筒形塔架。案例 3 为德国技术发展部（BMFT）的 Growian 项目，下风向，风轮直径为 100m，采用拉索塔。案例 4 为丹麦研发的 Tjæreborg 2MW 风电机组，采用混凝土塔架，风轮直径为 61m，安装于 1988 年<sup>1</sup>。

在风电行业发展的初期，降本增效并不是风电机组的首要目标，塔架选型处于不断更新中，塔架缺乏参数优化设计，因此，风电机组塔架的设计承载力极高，设计上采用大量材料堆砌以承载不够成熟的主机设计。格构式塔架在这一时期并未获得足够的研究与应用。

### 二、成熟期

随着风电机组设计理论不断成熟，风电机组设计开始从研究走向商业化，到 20 世纪 70 年代末 80 年代初，风电机组产品开始逐步实现商业化规模并稳步增长。在风电设备产品批量供应的商业模式下，产品供应商为了追求批量生产带来的规模化经济效益优势，风电机组塔架选型逐渐趋同。结构稳定、外形美观的钢制筒形塔架成为首选类型，如图 3 所示。钢制筒形塔架是通过法兰螺栓将若干段塔筒连接在一起组成风电机组整体支撑结构，塔筒段可在工厂预制，通常以 20~30m 的长度为一段<sup>1</sup>。

近年来，风电进入了大风轮、大功率、高塔架的时代。随着塔架高度增加，筒形塔架的直径越来越大，导致钢板厚度越来越大、加工困难、经济性变差。有研究<sup>2</sup>显示，当轮毂中心高度超过 100m 后，筒形塔架直径可能会超过公路运输限高，导致运输困难，并存在高塔经济性差的问题。于是，研究人员开始寻求筒形塔架的替代方案，以期解决瓶颈，提高收益。典型的钢制筒形塔架替代方案见表 1。

近年来，风电行业竞争激烈，各个国家陆续明确碳中和时间表，对风电机组产品竞争力提出了更高要求。塔架成本约占风电机组总成本的 20%，在风电机组产品降本增效的进程中，对塔架型式的创新及对塔架设计方式的深入研究，不仅能够解决筒形塔架的设计瓶颈，也可以带来良好的收益。格构式塔架因具有结构承载力强、成本低、制造运输简单等特点，一直是风电行业关注的对象。

1: <https://journals.sagepub.com/doi/epub/10.1177/0309524X221122594>

2: 陈俊岭, 阳荣昌, 马人乐, 等. 大型风电机组组合式塔架结构优化设计 [J]. 湖南大学学报 (自科版), 2015 (5): 29 - 35.

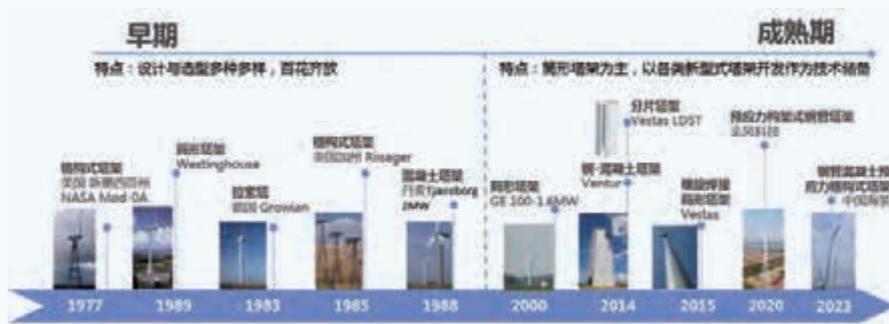


图1 风电机组塔架选型发展



图2 早期风电机组支撑结构案例



图3 通用电气GE 1.5MW机组

## 格构式塔架技术发展综述

### 一、格构式塔架的技术内涵

格构式结构是一种组装式结构，是由型钢、钢管或组

合截面杆件连接而成的杆系结构，杆件通过焊接或螺栓连接组成整体，其抗风性能良好，被广泛应用于电视塔、输电塔等高耸结构中，如图4所示。格构式塔架在高耸结构中的大规模应用与技术发展成熟，使其具备了应用于风电领域的良好条件。

格构式塔架有如下特点<sup>3, 4</sup>：

(1) 结构性能好：格构式塔架结构刚度大，承载力高，抗侧刚度大，材料利用率高。

(2) 制造优势：格构式塔架可在工厂预制，制造质量高，制造方法简单。

(3) 运输与储存方便：运输与储存方式灵活，构件均为散件运输，不存在公路运输超限问题。

(4) 安装效率高：现场装配化建造，施工效率和质量高。

3: 彭文兵, 阳荣昌, 马人乐, 等. 格构式风机塔架设计中的特殊问题 [J]. 钢结构, 2019, 34 (6): 75 - 77+106.

4: 孔祥宇. 格构式钢管混凝土风力发电机塔架的风振响应分析 [D]. 沈阳工业大学, 2014.

表1 典型的钢制筒形塔架替代方案

塔架形式	设计代表厂家	适用轮毂中心高度	结构特点
齿形预制混凝土板拼接钢混塔	Ventur	120~200m	混凝土段由齿形预制混凝土板拼接而成，相邻预制混凝土单元错位放置。混凝土塔架从下往上呈锥形，横截面为八边形
圆筒形钢 - 混凝土混合塔架	MaxBogl	190m 以下	塔架外形是圆筒形，整套塔架系统主要包括基础、混凝土塔架段、过渡段和钢塔段，混凝土塔架高度在 50~110m
四边形圆角钢 - 混凝土混合塔架	ATS	180m	下部是四边形圆角混凝土塔架结构，上部是传统的钢制筒形塔架。每一段混凝土塔架由 8 块预制混凝土板拼接而成，包括 4 块圆弧形和 4 块梯形预制混凝土板
分片塔	Vestas	-	由分片段和常规段组成，分片段分为三片，各片纵向及横向均焊有法兰，各片运输至现场后通过螺栓进行拼装
螺旋连续焊接塔架	Keystone	140m	可实现自动化生产并完成 100%UT 探伤，生产效率高。在项目现场制作螺旋连续焊接塔架直径可达 7.5m。螺旋连续焊接塔架需通过移动工厂生产的方式来解决运输问题
格构式塔架	-	120~200m	由型钢、钢管、组合截面杆件或组合材料杆件连接而成，形成的空间杆系结构，抗风性能良好，刚度大、承载力高



图4 西电东送工程中的特高压输电塔

(5) 基础设计与征地优势：该塔架的基础为柱下独立基础，造价成本低于混凝土塔筒基础，基础征地面积小；可立于渠道或河道上，避免占用基本农田。

(6) 结构缺点：存在通向塔顶的爬梯布局不便、上下时安全性差等缺点。

根据目前在风电行业内的应用情况，格构式塔架按照组成材料可分为如表 2 所示的两类<sup>1</sup>；按照钢材截面形状，可分为圆形、正方形、六边形、八边形等；按照钢材与钢材之间的连接方式，可分为焊接和螺栓连接两种形式<sup>4</sup>。

表2 格构式塔架分类

分类	材料	结构的基本组成
钢格构式塔架	钢材	格构段 - 过渡段 (图 5)
	钢材	下部采用钢格构段，上部采用钢制筒形塔筒段，上下部通过钢结构过渡段连接 (图 6)
钢 - 混凝土格构式塔架	钢材、混凝土	下部采用钢管混凝土格构柱，上部采用钢制筒形塔筒段，上下部通过钢混组合结构过渡段连接



图5 钢格构式塔架（全塔格构式）



(a) 组合式格构塔架



(b) 转接段

图6 钢格构式塔架（组合格构式）

## 二、格构式塔架的技术发展

欧美国家在风电机组研究应用初期，即实现了格构式塔架的应用。比如，前述案例1，1978年安装在丹麦的NIVE风电机组，1986年安装在美国加利福尼亚州、由Kenetech风能公司开发的56-100kW风电机组，都采用了格构式塔架<sup>5</sup>。

20世纪中后期，钢制筒形塔架以其外形简洁美观、结构稳定、构造简单、传力明确、便于安装等优势，成为了各类型风电机组塔架中交付比例最高的一类塔架型式<sup>5</sup>。这一时期，格构式塔架的应用较少。

2005年左右，随着风电机组大型化和装备制造技术的发展，风电机组载荷水平不断攀升，使得钢制筒形塔架的经济性优势不再显著。在一些所用机组轮毂中心高度超过100m的风电项目中，开发商开始重新考虑格构式塔架设计。有研究指出，塔架高于50m时即应采用格构式塔架，低于40m时则宜采用筒形塔架<sup>6</sup>。随后，国内外高校、研究机构与整机商对格构式塔架的研究逐渐增多，其技术的发展、迭代、演进，主要体现在设计型式研究、力学性能分析与优化、新材料应用三个方面，见图7。

### （一）设计型式研究

设计型式研究是指针对风电行业格构式塔架提出了新的设计型式的研究。这些研究案例中提出的格构式塔架设计型式是开创性的，它们丰富了格构式塔架在风电领域内的设计方式，引领了风电行业对格构式塔架的研究方向，在格构式塔架的发展中起到了重要作用。

2007年，Seidel介绍了一种针对5MW风电机组的组合式格构塔架的结构设计。其上部为钢制筒形塔段，下部为格构式钢管塔架，塔柱和斜杆之间通过铸钢节点连接。两年后（2009年），中国学者首次提出将格构式结构应用于风电领域，并对此开展了相关研究<sup>7</sup>。研究中将这类结构称为“构架式风力发电塔架”，如图8所示。该结构的设计是基于某3MW风电机组，塔架设计高度为82.5m，塔架底部直径为4.5m。分析结果表明，构架式塔架相对于钢制筒形塔架，具有较高的刚度和一阶自振频率，且构架式塔架的基础工程量更小。随后，2015年，同济大学教授陈俊岭<sup>2</sup>，提出了新型的“钢组合式格构式塔架”结构，并对其进行

5: <https://dist-eng.com/wind-turbine-tower/>

6: 张羽, 蔡新, 高强, 等. 风力机塔架结构研究概述 [J]. 工程设计学报, 2016, 23 (2): 108 - 115+123.

7: 郑瑞杰, 马人乐. 变截面构架式风力发电塔架 GA 优化 [J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31 (6): 1 - 6.

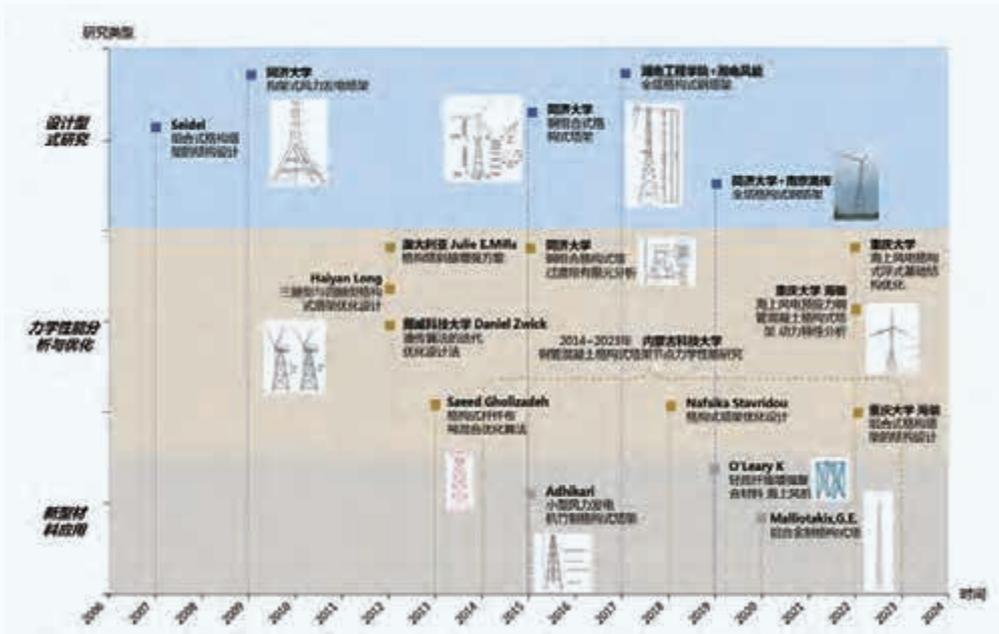


图7 格构式塔架的技术发展历程

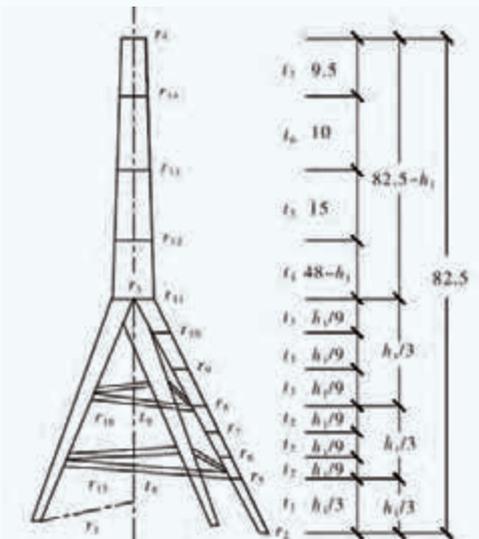
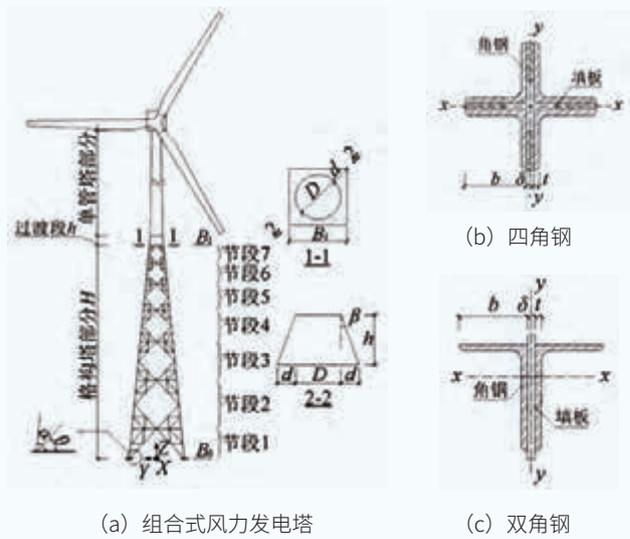


图8 构架式风力发电塔架结构示意图



(a) 组合式风力发电塔

(c) 双角钢

了优化设计。该结构下部采用钢格构段（四角钢十字形组合截面塔柱），上部采用钢制筒形塔筒段，中部通过钢结构过渡段连接，如图9所示。分析结果表明，相比于传统的钢制筒形塔架，该型式塔架的用钢量可节省约34%。

随着格构式塔架受到的关注度不断提高，高校与企业

的合作逐渐密切。2017年，湖南工程学院与湘电风能合作，研究了全塔格构式钢塔架的设计<sup>8</sup>，如图10所示。参照湘电风能2MW风电机组的测验载荷数据（用轮毂高度85m外推120m塔架载荷），设计了两种格构式塔架，分别是三角形分段格构式与矩形分段格构式，设计采用20层格构式

8: 颜熹, 宁立伟, 魏克湘, 等. 新型格构式风机塔架结构设计与分析 [J]. 湖南工程学院学报 (自然科学版), 2017, 27 (3): 25 - 30.

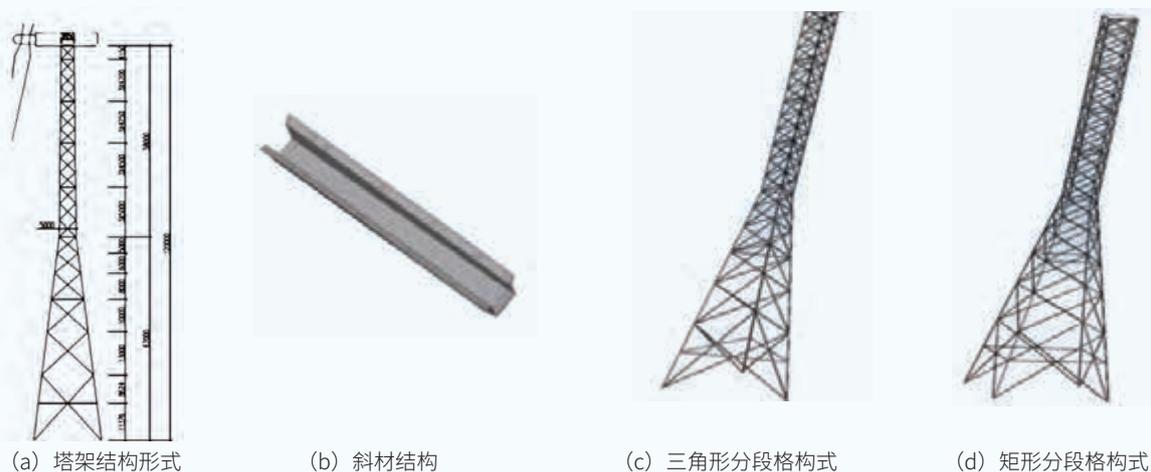


图10 全塔格构式钢塔架结构示意图



图11 格构式塔架示意

结构，斜材和主材相互独立，主材采用管道式，斜材采用凹槽式。经分析，三角形分段格构式塔架的稳定性更好。

2019年，同济大学彭文兵与南京高传机电自动控制设备有限公司联合发表了一项基于实际工程项目的全塔格构式钢塔架研究<sup>3</sup>。该工程建设地点位于江苏省泗洪县天岗湖乡内，风电场共安装了25台ZR 122-2.0MW风电机组，轮毂中心高度为120m。塔架底部采用四边形格构式钢塔架，高102.6m，底部跟开20m，在58.42m高度处变坡度一次。为便于设备安装与维修，塔顶采用一小段筒形塔，高11m，连接筒形塔段与格构塔段的过渡结构高4m。由于塔柱受力较大，故采用4个角钢拼成的十字形截面[图11(c)]，各分肢角钢中间通过隔一定间距设置的填板连接成整体；

而横杆与斜杆的受力相对较小，可采用单角钢。杆件之间均采用摩擦型高强螺栓连接。

## (二) 力学性能分析与优化

力学性能分析与优化指的是，针对已有型式的格构式塔架，进行结构力学性能研究，或在确定的工程目标下，进行结构优化设计方法探索。

2012—2013年，有四项较有代表性的格构式塔架力学性能分析与优化研究案例。

案例1：澳大利亚学者Yan Zhuge、Julie E.Mills等人，针对高载荷水平下的钢格构式塔架，研究了塔架斜腿的增强方案，并对其做了建模分析，提高了结构的承载能力。论文采用有限元分析的方法研究了3种增强斜腿的方案(图12)。

研究表明,相较于未增强斜腿结构,3种增强方案的承载能力均有提高,其中,X形内部支撑的方案最优<sup>9</sup>。

案例2:针对海上风电,Haiyan Long等人以海上35m水深条件下5MW风电机组为例,研究了在极限状态下的格构式塔架优化设计,给出了两种格构式塔架(三腿型与四腿型)设计,见图13,并通过支腿跟开、支腿倾角及沿塔高的分段数量等参数寻优来优化格构式塔架重量。分析结果表明,考虑波浪载荷时,四腿型格构式塔架抗扭转性能更好,塔架重量更轻<sup>10</sup>。

案例3:针对海上风电,挪威科技大学学者Daniel Zwick等人通过基于遗传算法的迭代优化设计方法,简化全塔格构式钢塔架的设计过程。其文章以风电机组塔架生命周期为目标函数,采用迭代优化方法对某100m高的格构式钢管塔架的杆件厚度进行了优化,并对关键参数进行了敏感性分析<sup>11</sup>。

案例4:乌尔米亚大学Saeed Gholizadeh为优化格构式结构的杆件布局,提出了一种混合优化算法。它结合了元胞自动机(CA)和粒子群优化(PSO)的计算优点,采用一种基于caba的机制作为粒子的速度更新方程,因此被称为序列细胞粒子群优化算法(SCPSO)。结果表明,该算法不仅收敛到更好的解(即结构重量更轻),且收敛速度更快<sup>12</sup>。

国内方面,2014—2023年,内蒙古科技大学针对钢管混凝土格构式塔架展开了大量分析研究<sup>13-21</sup>。这些研究主要是将土木建筑行业大跨度网架结构中出现的新型节点形式与钢管混凝土格构式塔架做组合研究,丰富了钢管混凝土格构式塔架的节点力学性能研究。这些文献所研究的节点形式包括,包裹式节点、螺栓球节点、双角钢螺栓拼接节点、椭球型节点、附着式节点、装配式节点等(图14)。同时,这些文献含有对三肢柱钢管混凝土格构式塔架腹杆



图12 塔架斜腿增强方案

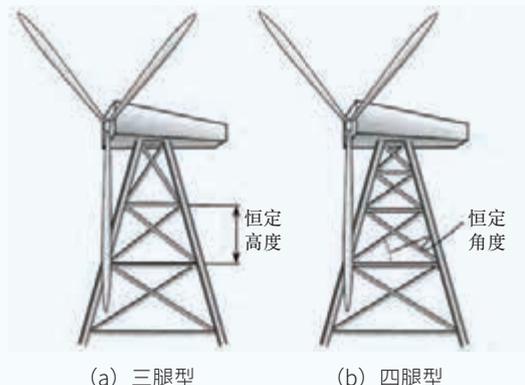


图13 三腿型与四腿型格构式塔架

- 9: Yan Zhuge, Julie E. Mills, Xing Ma. Modelling of steel lattice tower angle legs reinforced for increased load capacity[J]. Eng Struct, 2012, 43(10): 160 - 168.
- 10: Haiyan L, Geir M, Tim F. Lattice Towers for Bottom-Fixed Offshore Wind Turbines in the Ultimate Limit State: Variation of Some Geometric Parameters[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2012, 134 (2) : 021202.
- 11: Zwick D, Muskulus M, Moe G. Iterative Optimization Approach for the Design of Full-Height Lattice Towers for Offshore Wind Turbines[J]. Energy Procedia, 2012, 24 : 297 - 304.
- 12: Gholizadeh S. Layout optimization of truss structures by hybridizing cellular automata and particle swarm optimization[J]. Computers & Structures, 2013, 125 : 86 - 99.
- 13: 李兆建. 钢管混凝土分体球节点风电平面塔架受力性能研究[D]. 内蒙古科技大学, 2022.
- 14: 熊文. 格构式钢管混凝土风电塔架万向包裹装配式节点受力性能研究[D]. 内蒙古科技大学, 2021.
- 15: 杨晨旭. 钢管混凝土格构式风电塔架新型装配式节点受力性能研究[D]. 内蒙古科技大学, 2021.
- 16: 吴益阳. 不同腹杆形式钢管混凝土格构式风电塔架抗震性能对比研究[D]. 内蒙古科技大学, 2021.
- 17: 辛巧玲. 格构式钢管混凝土球-板型节点四肢柱风电塔架受力性能研究[D]. 内蒙古科技大学, 2021.
- 18: 张军. 格构式钢管混凝土球-板型节点风电塔架受力性能研究[D]. 内蒙古科技大学, 2017.
- 19: 赵洁. 钢管混凝土格构式风电塔架地震响应分析[D]. 内蒙古科技大学, 2020.
- 20: 于蛟. 钢管混凝土格构式风电塔架法兰盘球式节点受力性能研究[D]. 内蒙古科技大学, 2023.
- 21: 蔡俊青. 钢管混凝土格构式风电塔架万向包裹Y型节点受力性能研究[D]. 内蒙古科技大学, 2023.

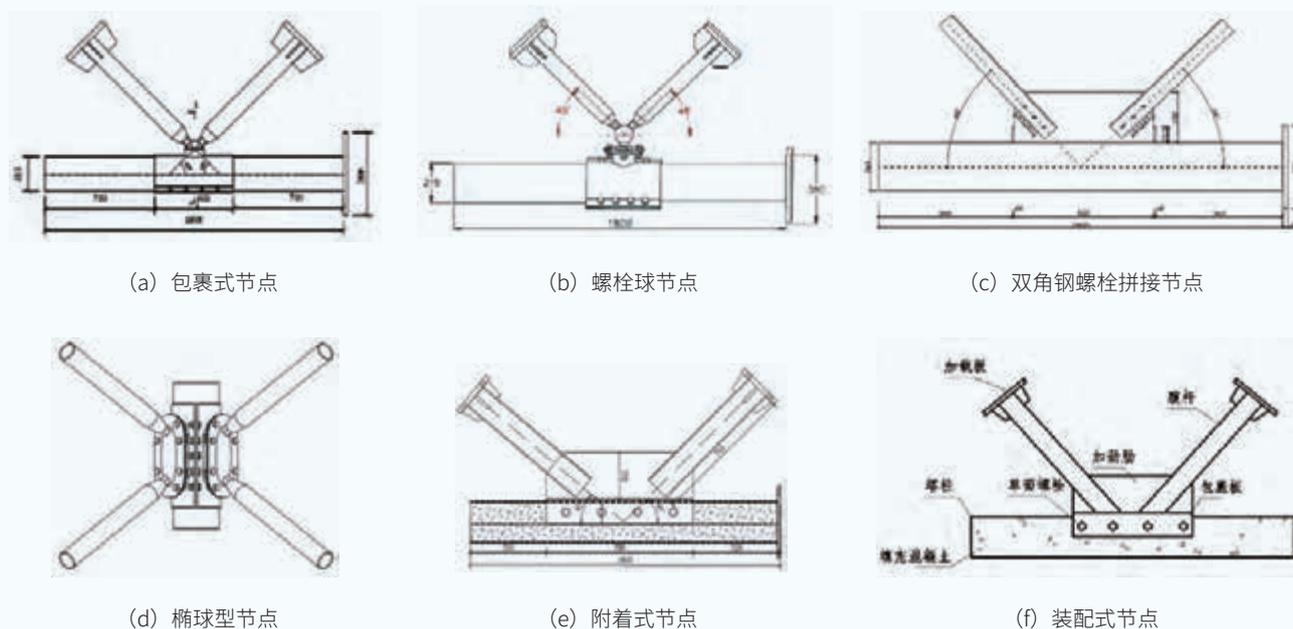


图14 节点形式

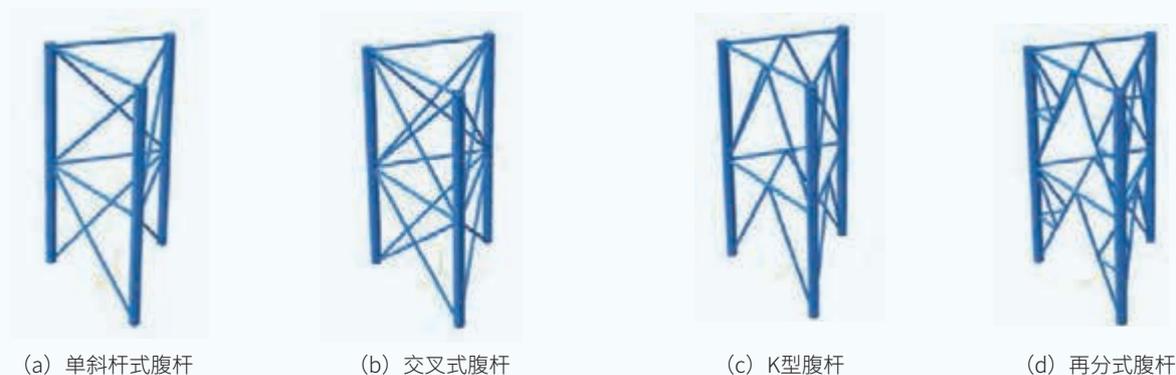


图15 腹杆形式

形式的研究，包括单斜杆式、交叉式、K型及再分式四种腹杆形式（图15）。其分析结论是，交叉式腹杆塔架与钢管混凝土柱肢协同工作性能效果最佳，抗震性能最优，在不显著增加用钢量的同时，达到了承载力及抗震性能的最优化。

2015年，同济大学高日吨等人针对钢组合格构式塔架的过渡段（图16），进行了静力性能和疲劳性能有限元分析<sup>22</sup>。该分析基于某2MW风电机组，轮毂中心高度为

120m，采用角钢四边形的钢组合格构式塔架。分析结果表明，静力工况下过渡段厚度在28~38mm范围内变化时，塑性总应变均小于1.0%；过渡段厚度由45°方向的疲劳荷载控制，最大疲劳应力幅出现在过渡段插接焊缝处；在0°方向荷载作用下，过渡段受压侧纵向法兰连接顶部螺栓受到较大附加弯曲效应和撬力，设计时需增加该处螺栓直径。

2018年，亚里士多德大学 Nafsika Stavridou 等人对比了传统钢制筒形塔架与格构式塔架的结构性能，并进行

22: 高日吨, 阳荣昌, 彭文兵. 组合式风力发电塔架过渡段有限元分析 [J]. 特种结构, 2015, 32 (4): 23 - 26+17.

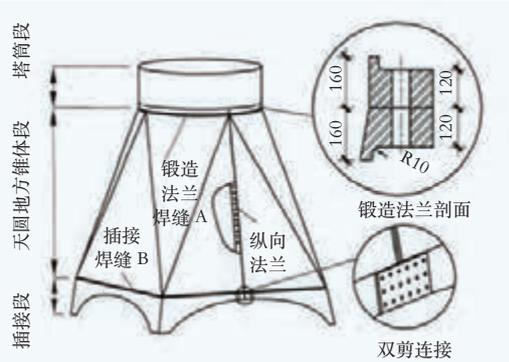


图16 过渡段设计示意

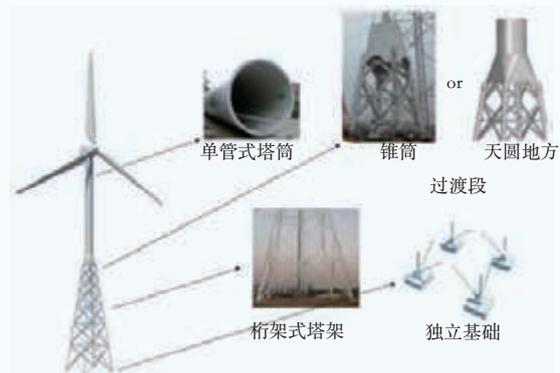


图17 钢管混凝土预应力格构式塔架

了优化设计<sup>23</sup>。分析结果显示,格构式塔架具有塔底弯矩小、基础工程量小的优点,基础施工成本更低。从结构用钢量来看,以轮毂中心高度为76m的风电机组为例,格构式塔架用钢量比筒形塔架减少了40%。

2022年,国内相关研究主要以重庆大学与中国海装两家单位为主。重庆大学于2022年5月发表了《海上风电机组格构式浮式基础结构优化及响应分析》<sup>24</sup>。随后,重庆大学与中国海装开展合作研究,发表了《海上风电机组预应力钢管混凝土格构式塔架动力特性分析》<sup>25</sup>与《预应力钢管混凝土格构式风机塔架节点及过渡段有限元分析》<sup>26</sup>,并于2023年1月在山东安装了钢管混凝土预应力格构式塔架样机。钢管混凝土预应力格构式塔架(图17)的最大特点是,下部的格构柱是通过在钢管中内填混凝土形成的,填充的混凝土可改善外包钢管的局部屈曲现象,外包钢管的横向约束可提高核心混凝土的韧性。钢管混凝土预应力格构式塔架的特点有:(1)承载力高,自重轻,塑性好,耐疲劳,耐冲击。(2)可采用高强混凝土,三向压力避免了核心高强混凝土的脆性破坏。(3)在各方向上的惯性矩、承载能力均相同,因而适合用于承受地震、风载等作用方向不确定的结构。(4)钢管内核心部分混凝土不用配钢筋,便于浇灌混凝土。(5)钢管在施工阶段可以起到支撑作用,从

而能够简化施工安装工艺,节省部分支架,有利于减少工序、缩短工期<sup>6</sup>。

### (三) 新型材料应用

根据有关文献,风电机组格构式塔架新材料主要以铝合金材料与竹子为代表。

#### 1. 铝合金

文献<sup>27</sup>基于小型风力发电机,对比了钢制格构式塔架与铝合金制格构式塔架的塔顶最大水平位移、频率、工程造价与维护费用,汇总结果见表3。表中,水平位移是指在极限承载力状态下的塔顶最大水平位移;成本分析基于当时的市场价格确定,即钢材为0.652欧元/千克,铝材为1.60欧元/千克;维护成本仅考虑了材料腐蚀情况,铝不会被腐蚀,而钢需要防腐保护,由于该文献考虑的塔架使用场址位于腐蚀环境中,故考虑钢结构每五年需要维护一次。

#### 2. 竹子

文献<sup>28</sup>研究了适用于运输困难的偏远地区的小型风力发电机竹制格构式塔架(图18)。由于竹子是一种便宜、可再生和可持续的材料,天然具有管状截面,拥有良好的拉伸、压缩和屈曲性能,非常适合制造格构式塔架。该文献考虑了500W风电机组的荷载条件下,对12m高的三角形格构

23:Stavridou N, Koltsakis E, Baniotopoulos C. Structural analysis and optimal design of steel lattice wind turbine towers[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings, 2018, 172 (8) : 1 - 43.

24:王宇航,王文玲,周绪红,等.海上风电机组格构式浮式基础结构优化及响应分析[J].中国电力,2022,55(5):21-31.

25:周扬,骆光进,李晓艳,等.海上风电机组预应力钢管混凝土格构式塔架动力特性分析[J].船舶工程,2022,44(S2):112-115.

26:张杰,李强,谭俊,等.预应力钢管混凝土格构式风机塔架节点及过渡段有限元分析[J].船舶工程,2022,44(S2):116-121.

27: Malliotakis, G. E., Th N. Nikolaidis, et al. Small wind turbines: Sustainability criteria related to the local built environment[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 410 : 012046.

28: Adhikari R, Wood D, Sudak L. Low-cost bamboo lattice towers for small wind turbines[J]. Energy for Sustainable Development, 2015 (28) : 21 - 28.

表3 钢制格构式塔架与铝合金制格构式塔架对比

塔架类型	水平位移	一阶频率 /Hz		建造成本 / 欧元	维护成本 / 欧元
		塔架	塔架 - 机头		
钢制格构式塔架	4.74cm	4.425	2.457	17000	652
铝合金制格构式塔架	14.21cm	5.405	2.004	16000	480

式塔架进行了设计分析。结论表明，竹制格构式塔架方案可行。同时，作者建议每 4~5 年更换一次塔架构件，以保证支撑结构强度。

## 格构式塔架的技术研究方向

格构式塔架的承载力良好、刚度大、可散件运输储存，这些特点使其在风电大型化的趋势下广受关注。同时，格构式塔架材料利用率高、重量轻，也有望带来更好的经济性。从设计角度来说，相比于传统钢制筒形塔架，格构式塔架的用钢量可节省 22.5%~50%<sup>29</sup>。由欧盟资助的 HYPER TOWER 项目<sup>30</sup>的研究人员对 182 种方形和六边形的格构式塔架进行分析后，证实了格构式结构能够用更少的材料承受更大的载荷。以塔架高度 76m 为例，与相同高度的筒形塔架相比，采用六角形的格构式塔的总重量减少了 22.5%，采用方形的格构塔总重量减少了 40%，建造地基的材料减少了 50%。可以预见，格构式塔架在风电领域中的应用将越来越广泛。

风电行业格构式塔架技术的研究重点应以“提高格构式塔架的适用性和结构性能，实现塔架结构的轻量化设计，降低综合成本”为目标，今后的研究方向主要包括以下四类：

### 1. 结构优化设计

现有文献对格构式塔架的结构优化设计多集中在对某个特定格构形式的某些特定参数的优化上，开展多变量寻优设计的研究较少。故要想实现格构式塔架在风电领域中的成熟应用，应开展多变量耦合对结构的力学性能影响分析，并开展多参数优化设计，寻求结构性能最



图18 竹制塔架示意

佳的设计方案。

### 2. 新材料应用

目前，针对新材料的应用研究较少，且缺乏完备的规模化应用的考察分析。故应继续研究高强轻质新材料（如碳纤维复合材料、玻璃纤维、高强铝合金等）在格构塔中的应用，以实现更大功率机组的超轻量化。

### 3. 制造技术提效

应通过研究新的制造工艺与技术，来进一步提高格构式结构的制造效率与质量，如预装配工艺。

### 4. 其他方面

目前，格构式塔架在风电领域中的应用仍缺乏：(1) 统一的结构设计标准与评估方法；(2) 针对不同地质 / 海洋环境条件的格构式塔架基础设计；(3) 结构状态监测技术与维护方法的研究。🔍

（作者单位：金风科技股份有限公司）

29: Barbu M, Darie G, Patrascu R. A technical analysis and comparison of tubular and lattice towers for wind turbines[J]. IOP Conference Series : Earth and Environmental Science, 2021, 664 (1) : 012044.

30: <https://cordis.europa.eu/article/id/415889-new-modular-wind-turbine-designs-the-quest-for-stronger-wind>

# 基于改进D-S证据理论的齿轮箱故障诊断决策模式研究

文 | 史龙伟, 王宁

风电装机规模和机组单机容量均快速增长, 对风电机组的安全性和经济性提出了更高要求。风电场通常地处偏远、布局分散, 其点多面广、管理半径大, 且现场工作艰苦, 设备巡检工作量大、健康状态判断难度大。为精准检测到发电机、叶片、齿轮箱等大部件的损坏隐患, 各新能源投资企业相继投入巨额资金, 为大规模风电场群建设各类生产信息化监控与故障预警系统。通常各类型监测系统之间互不关联, 所获得的是分散的、局部的, 甚至是冲突的诊断结论, 无法形成指导风电设备精准高效运行的故障诊断合力。因此, 建立起一套科学的风电机组融合故障诊断决策模式, 消除传统单一系统故障诊断结论带来的不确定性, 变得至关重要。

本文对比了风电机组的故障预警系统 (FPS)、风电机组状态监测系统 (CMS)、油品监测系统 (OTS)、风电数据监控系统 (SCADA) 等独立系统间的齿轮箱诊断结论与证据合成决策的效果, 并对诊断结论间由冲突导致证据合成误判的情况, 进行了决策模式的算法优化改进, 旨在提升齿轮箱等大部件诊断决策的准确性。

## 证据理论的决策融合

20 世纪 60 年代, 美国哈佛大学数学家 A.P.Dempster 首次提出构造不确定性推理框架模型系列论文, 将命题的不确定性转化为集合的不确定性问题, 用上、下限概率来研究多值映射问题, 建立命题与集合之间的对应关系, 此为证据理论的起源。随后, 其学生 G.Shafer 引入信任函数概念进一步发展了证据理论, 形成一套基于“证据”和“组合”处理不确定性推理的完整证据理论。这种方法便以两人名字命名, 称作 Dempster-Shafer (简称“D-S”) 证据理论。

D-S 证据理论建立的辨识框架 (Frame of Discernment), 记为  $\Theta$ 。定义为一个互不相容事件但仅有

一个正确答案的完备集合。贝叶斯 (Bayes) 推理对象是对  $\Theta$  中元素, 而 D-S 证据理论对象则是对  $2^\Theta$  中元素。

与 Bayes 推理相似, D-S 证据理论定义了多源信息的合成规则。综合来自多源的基本概率赋值, 得到新的基本概率赋值。该合成规则称作正交和规则, 用  $\oplus$  表示。

合成规则融合的信任区间决策结论:

规则 1: 故障类型应具有最大的基本可信度值。

规则 2: 故障类型与其他类别的基本可信度值的差必须大于某一阈值。

规则 3: 不确定性概率  $m(\Theta)$  必须小于某一阈值。

规则 4: 故障类型的基本可信度值必须大于不确定性概率  $m(\Theta)$ 。

### 一、齿轮箱故障的概率分配

以风电场中对发电成本影响最大的机械部件——齿轮箱为例, 来研究证据理论在故障诊断决策中的作用。齿轮箱结构如图 1 所示。

假设齿轮箱存在以下几种诊断结论:

$a_1$  = 齿轮箱齿轮损伤

$a_2$  = 齿轮箱轴承损伤

$a_3$  = 齿轮箱性能正常

设第  $i$  个多信息系统存在一个可靠性系数, 即证据的折扣  $D_i$ , 表示对专家判定的信任程度。其输出的第  $j$  个证据诊断结论值记  $Y_i(a_j)$ , 那么, 它对应的在证据的基础上对状态  $a_j$  的基本概率赋值为:

$$m_i(a_j) = D_i \frac{Y_i(a_j)}{\sum_{j=1}^i Y_i(a_j)}$$

$$m_i(\Theta) = 1 - D_i$$

其中,  $m_i(a_j)$  为第  $j$  个证据对  $a_j$  状态的基本概率赋值,  $\Theta$  表示各自系统局部性能模式识别时由于不知道引起的不确定性,  $m_i(\Theta)$  为专家根据第  $j$  个证据不能确定的基本概

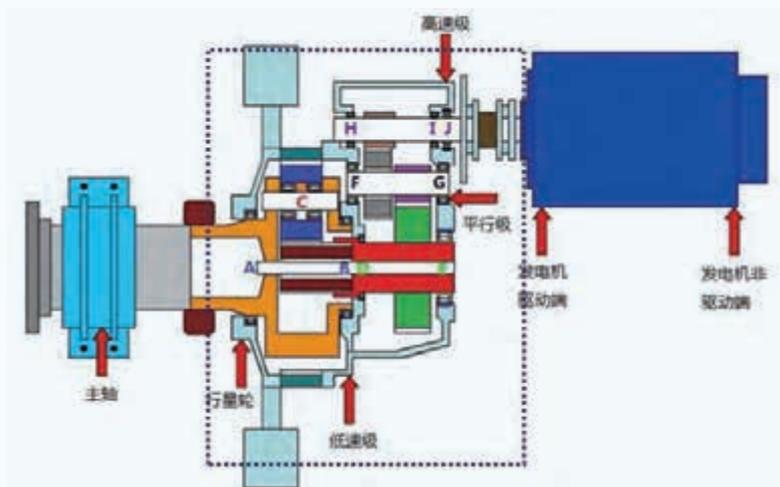


图1 风电机组齿轮箱结构（虚线框内）示意

率赋值。

本文根据可靠性将齿轮箱故障预警系统 (FPS)、风电机组状态监测系统 (CMS)、油品监测系统 (OTS)、风电数据监控系统 (SCADA) 四种信息系统故障识别的概率分配为： $m_{FPS}(a_1, a_2, a_3, \Theta)$ 、 $m_{CMS}(a_1, a_2, a_3, \Theta)$ 、 $m_{OTS}(a_1, a_2, a_3, \Theta)$ 、 $m_{SCADA}(a_1, a_2, a_3, \Theta)$ 。

## 二、D-S 证据诊断决策合成规则

D-S 合成规则可以用来融合来自多源信息系统的相容命题对应的概率分配值，从而得到这些相容命题的交集命题对应的概率分配值。融合时计算过程用矩阵方法表示。矩阵每个元素为相应命题的概率分配值，矩阵第一列与最后一行即为被融合的命题概率分配值。对于要合成的融合决策结论计算为： $m_{FPS} \oplus m_{CMS} \oplus m_{OTS} \oplus m_{SCADA}$ ，逐次合成证据，其结论与合成顺序无关。

表 1 为不同诊断系统的同批次初步故障诊断结论。其中，I 组  $m_{FPS} \oplus m_{CMS}$  两组合成矩阵计算结果如表 2 所示。通过将交集命题为空集  $\emptyset$  的概率分配值设为 0，并重新调整合成矩阵各非空概率分配值，将其放大 K 倍，使得放大后求和重新为 1。调整后结果如表 3 所示。同理，对四个源信息系统故障诊断初步结论进行决策融合，合成结果如表 4 所示。

## 三、D-S 证据融合决策分析

通过 D-S 证据理论决策融合四个独立多源信息系统的故障诊断结论，分析最终决策结论可得出：

(1) 齿轮箱 I 组齿轮箱正常、II 组典型的齿轮故障、

III 组非典型齿轮故障诊断合成结果，较证据合成前有更高的置信区间，同时融合决策后不确定性亦大大降低，即提升了证据合成后的确定性。

(2) 齿轮箱 IV 组有一定齿轮和轴承故障诊断冲突诊断结果，较证据合成前有更高的置信区间；故障诊断的不确定度均值亦大大降低。

(3) 齿轮箱 V 组的多源系统的独立诊断结果存在高度冲突，其融合结论与人们正常的决策结论“相左”。

通过以上分析得出，证据合成可以提升各单独证据的支持度，降低不确定性，但在某些特殊合成环节会出现“失灵”，偏离正常的决策逻辑判断。

## D-S 证据理论的改进

### 一、证据合成冲突问题分析

尽管 D-S 证据推理理论比传统的概率论能够更好地把握问题的未知性和不确定性，通过证据的累积逐步缩小假设集，充分利用多证据源信息，极大提高识别准确率，消除单一数据源信息的不全面、不确定的劣势特点，可以对多个证据都支持的判断进行加强，但有时 D-S 合成算法存在失效的问题，使其在使用过程中受到一定限制。

对于如 V 组数据， $\Theta = \{a_1, a_2, a_3\}$ ，通过多源信息故障诊断的基本概率分配为： $m_1(a_1, a_2, a_3, \Theta) = (0.9, 0.1, 0, 0)$ ， $m_2(a_1, a_2, a_3, \Theta) = (0, 0.9, 0.1, 0)$ ， $m_3(a_1, a_2, a_3, \Theta) = (0.85, 0.05, 0.05, 0.05)$ ， $m_4(a_1, a_2, a_3, \Theta) = (0.8, 0.1,$

表1 多源信息系统故障诊断初步结论

诊断分组	多源信息系统	$m_x(a_1)$	$m_x(a_2)$	$m_x(a_3)$	$m_x(\Theta)$
I 组	1.FPS	0.15	0.1	0.7	0.05
	2.CMS	0.1	0.05	0.8	0.05
	3.OTS	0.05	0.1	0.75	0.1
	4.SCADA	0.1	0.1	0.7	0.1
II 组	1.FPS	0.9	0.05	0	0.05
	2.CMS	0.8	0.1	0.05	0.05
	3.OTS	0.7	0.05	0.1	0.15
	4.SCADA	0.65	0.1	0.1	0.15
III 组	1.FPS	0.5	0.3	0.1	0.1
	2.CMS	0.4	0.4	0.1	0.1
	3.OTS	0.6	0.1	0.1	0.2
	4.SCADA	0.55	0.1	0.1	0.25
IV 组	1.FPS	0.9	0.05	0	0.05
	2.CMS	0.3	0.5	0.1	0.1
	3.OTS	0.85	0.05	0.05	0.05
	4.SCADA	0.8	0.1	0.05	0.05
V 组	1.FPS	0.9	0.1	0	0
	2.CMS	0	0.9	0.1	0
	3.OTS	0.85	0.05	0.05	0.05
	4.SCADA	0.8	0.1	0.05	0.05

表2 设备正常组诊断决策合成矩阵

	$m_x(\bullet)$	$m_x(a_1)$	$m_x(a_2)$	$m_x(a_3)$	$m_x(\Theta)$
$m_{FPS}(a_1)$	0.15	0.015	0.0075	0.12	0.0075
$m_{FPS}(a_2)$	0.1	0.01	0.005	0.08	0.005
$m_{FPS}(a_3)$	0.7	0.07	0.035	0.56	0.0035
$m_{FPS}(\Theta)$	0.05	0.005	0.0025	0.04	0.0025
		0.1	0.05	0.8	0.05
		$m_{CMS}(a_1)$	$m_{CMS}(a_2)$	$m_{CMS}(a_3)$	$m_{CMS}(\Theta)$

表3 诊断决策合成调整矩阵

	$m_x(\bullet)$	$m_x(a_1)$	$m_x(a_2)$	$m_x(a_3)$	$m_x(\Theta)$
$m_{FPS}(a_1)$	0.15	0.0221	0	0	0.0111
$m_{FPS}(a_2)$	0.1	0	0.0074	0	0.0074
$m_{FPS}(a_3)$	0.7	0	0	0.8266	0.0517
$m_{FPS}(\Theta)$	0.05	0.0074	0.0037	0.0590	0.0037
		0.1	0.05	0.8	0.05
		$m_{CMS}(a_1)$	$m_{CMS}(a_2)$	$m_{CMS}(a_3)$	$m_{CMS}(\Theta)$

表4 五组故障融合决策合成结果

决策融合分组	$K_x$	$m_x(a_1)$	$m_x(a_2)$	$m_x(a_3)$	$m_x(\Theta)$
I 组决策	1.4760	0.0020	0.0013	0.9966	0.0001
II 组决策	1.2542	0.9982	0.0013	0.0005	0.0001
III 组决策	1.9231	0.8858	0.0948	0.0171	0.0023
IV 组决策	2.2727	0.9966	0.0030	0.0003	0.0000
V 组决策	11.111	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000

0.05, 0.05)。

尽管  $m_1$ 、 $m_2$  对  $a_1$ 、 $a_2$  各有高支持度，但合成结果却认为  $a_2$  为真。接下来无论如何加入新的证据合成计算，其合成结果都为： $m(a_1, a_2, a_3, \Theta) = (0, 1, 0, 0)$ 。即若某一证据因为证据信息的局部故障而被否定，会导致整个系统的决策失误。因此，有必要对 D-S 证据合成公式作进一步改进，避免小概率事件影响整个系统的正确决策。

## 二、新改进证据合成算法

改进合成算法的思路：

(1) 在冲突证据下新证据合成结论可以排除干扰，确定最终结论，而不是将冲突全部划归为不确定因素；冲突证据是部分可用的，故线性放大就将可用部分分配到各元素里。尽管证据间冲突越高，可以信赖利用的越少，但有小比例部分依然可用，剩余不可用部分划归到不确定区间。这与 Ronald R.Yager 改进合成公式不同，也是对孙全合成规则的进一步提升。

(2) 定义一个冲突可用率函数来重新量度。证据之间冲突越高，可以信赖利用的东西越少，不确定性越大，初步判定冲突可用率是冲突的减函数。

(3) 冲突可用率函数的关系分析。无冲突时可用率应该最高，其值为 1；冲突为 1 时完全不可利用，其值为 0；冲突在一般较小值范围变化时，冲突可用率的变化所对应 D-S 合成算法中的变化较小；冲突在较大值接近 1 变化时，冲突可用率的变化所对应 D-S 合成算法中的变化很大，故可定性判断出冲突可用率函数为凸减函数。

(4) 定义新改进合成算法：

$$m(\phi) = 0$$

$$m(A) = m_p(A) + \lambda \times \mu \times m_q(A) \quad A \neq \phi, \Theta$$

$$m(\Theta) = m_p(\Theta) + \lambda \times \mu \times m_q(\phi) + \lambda \times (1 - \mu)$$

其中，

$$m_p(A) = \sum_{\substack{\cap a_i = A, a_i \in A_i \\ 1 \leq i \leq n}} [\cap m(a_i)]$$

$$\lambda = \sum_{\substack{\cap a_i = \phi, a_i \in A_i \\ 1 \leq i \leq n}} [\cap m(a_i)]$$

$$\text{由 } K^{-1} = 1 - \sum_{\substack{\cap a_i = \phi, a_i \in A_i \\ 1 \leq i \leq n}} [\cap m(a_i)]$$

可知，

$$\lambda = (1 - K^{-1})$$

$$m_q(A) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i(A)$$

设  $m_1, m_2, \dots, m_n$  对应的证据集为： $A_1, A_2, \dots, A_n$ ；假设证据集  $i, j$  之间的冲突大小  $\lambda_{ij}$ ，则有：

$$\lambda_{ij} = \sum_{a_i \cap a_j = \phi, a_i \in A_i, a_j \in A_j} [m_i(a_i) m_j(a_j)]$$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{n(n-1)/2} \sum_{i < j} \lambda_{ij}, i, j < n$$

上述各式中， $n$  为证据源的数量； $\lambda$  为  $n$  个证据集中对每对证据集两两间冲突总和的平均，反映了证据之间冲突的综合程度，其与 D-S 证据理论中的  $\lambda$ （证据空集之和）有所不同； $\mu$  是  $\lambda$  的减函数，反映了证据冲突的可用率，当证据间的冲突增大时，证据的可用率随之降低。

上述  $m(A)$  公式可以写为：

$$m(A) = K \times m_p(A) \times (1 - \lambda) + \lambda \times \mu \times m_q(A)$$

第一项中的  $K \times m_p(A)$  就是 D-S 合成公式。因此，新的合成公式实际上是一个加权和的形式， $\lambda$  和  $1 - \lambda$  可视为新的权重系数。 $\lambda$  值较小，反映了证据冲突较小，式中的第一项起主要作用，合成效果近似于 D-S 合成。 $\lambda$  值为 0，新合成公式等价于 D-S 合成。 $\lambda$  值较大，则反映证据冲突本身较大，其合成结果主要由  $\mu \times m_q(A)$  项决定。 $\mu$  为整个证据冲突的可用率函数， $\mu \times m_q(A)$  为证据对  $A$  元素分配的可用率。也可以看作冲突  $\lambda$  调节的是非空集元素概率赋值和空集  $\Phi$  的比例关系，而可用率函数  $\mu$  调节的是元素  $A$  合成基本概率赋值和不确定基本概率赋值  $\Theta$  之间的比例关系。

当然  $\mu$ 、 $\lambda$  之间有一定的关系，冲突的存在将会导致不确定程度的增加，从式中的  $\lambda \times (1 - \lambda)$  项可以看出，当冲突  $\lambda$  增大或可用率  $\mu$  降低，都会使得不确定程度增加，若两证据合成迭代， $\bar{\lambda}$  会退化成  $\lambda$ 。

(5) 选择满足上述条件的函数，如定义冲突可用率函数  $\mu$  (图 2)。

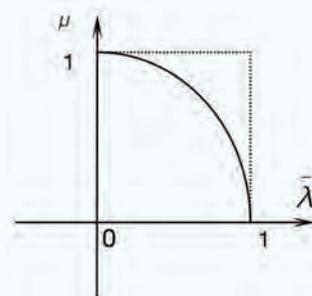


图2 改进合成可用率函数示意

冲突可用率函数可从  $\mu = 2 \times \arccos(\bar{\lambda}) / \pi$ ,  $\mu = 1 - \bar{\lambda}^m$  ( $m=2, 3, \dots$ ),  $\mu = \cos(\bar{\lambda} \times \pi / 2)$  等函数中选择。

检验改进合成算法的原则：

(1) 在一般较小冲突和无冲突下，与 D-S 证据合成效果相当。

(2) 在高度证据冲突下，D-S 证据合成算法失效，改进合成算法结论要与人们的正常决策思维相符。

(3) 若试验的函数公式都满足以上条件，挑选简单高效函数。

经过多种函数试验，用多项式拟合思路，经过如图 3、图 4 的计算对比，对于  $\mu = 1 - \bar{\lambda}^m$  函数，当 m 取值为 4 时，少数服从多数的决策效果最好，相比 2 阶冲突可用率函数，证据支持效果提升了 0.7%，同时不确定性下降了 59.1%。

$$\mu = 1 - \bar{\lambda}^4$$

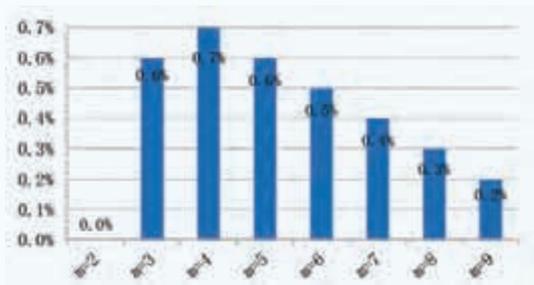


图3 不同幂指数的合成支持度提升效果

D-S 合成在高度证据冲突时往往不能提供任何有用的信息，甚至出现不合常理的谬论。尽管证据之间存在冲突，但新改进合成算法依然保证其部分可用，可用程度取决于证据冲突可用率函数。

### 三、新改进合成算法效果检验

根据以上检验原则与思路，取两组实验数据（V 组为高度冲突证据数据，IV 组为一般冲突证据数据）比较该改进算法的效果。

高度冲突证据 V 组数据下，D-S 证据推理合成、Yager 改进算法、孙全改进算法及本文新改进合成算法效果对比情况如表 5 所示。

对于一般冲突 IV 组数据，D-S 证据推理合成、Yager 改进算法、孙全改进算法及本文新改进合成算法效果比较如表 6 所示。

由高度冲突合成效果（图 5）可知，新改进算法表现

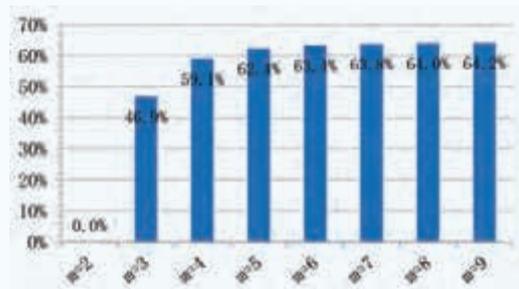


图4 不同幂指数的合成不确定性降低效果

表5 高度冲突证据合成

合成算法	合成步骤	$m_x (\cdot)$				系数		
		$a_1$	$a_2$	$a_3$	$\Theta$	$\mu$	$\lambda$	$K_x$
D-S 合成	$m_{12}$	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000			11.1111
	$m_{123}$	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000			10.0000
	$m_{1234}$	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000			6.6667
Yager 改进	$m_{12}$	0.0000	0.0900	0.0000	0.9100		0.9100	
	$m_{123}$	0.7735	0.0545	0.0455	0.1265		0.0810	
	$m_{1234}$	0.7587	0.0208	0.0109	0.2096		0.2033	
孙全改进	$m_{12}$	0.2335	0.1953	0.0183	0.5529	0.4025	0.9100	
	$m_{123}$	0.7909	0.0971	0.0382	0.0738	0.8060	0.2156	
	$m_{1234}$	0.8500	0.0755	0.0168	0.0578	0.7901	0.2356	
新改进	$m_{12}$	0.1823	0.1722	0.0143	0.6312	0.3143	0.9100	
	$m_{123}$	0.8191	0.1022	0.0423	0.0364	0.9988	0.1861	
	$m_{1234}$	0.8827	0.0899	0.0184	0.0089	0.9962	0.2478	

表6 一般冲突情况下证据合成

合成算法	合成步骤	$m_x(\cdot)$				系数		
		$a_1$	$a_2$	$a_3$	$\Theta$	$\mu$	$\lambda$	$K_x$
D-S 合成	$m_{12}$	0.8523	0.1250	0.0114	0.0114			2.2727
	$m_{123}$	0.9806	0.0165	0.0022	0.0007			1.2626
	$m_{1234}$	0.9966	0.0030	0.0003	0.0000			1.1948
Yager 改进	$m_{12}$	0.3750	0.0550	0.0050	0.5650		0.5600	
	$m_{123}$	0.8178	0.0338	0.0288	0.1198		0.0915	
	$m_{1234}$	0.7909	0.0170	0.0089	0.1832		0.1772	
孙全改进	$m_{12}$	0.6029	0.1110	0.0210	0.2651	0.5712	0.5600	
	$m_{123}$	0.8746	0.0506	0.0228	0.0520	0.8361	0.1791	
	$m_{1234}$	0.8992	0.0408	0.0129	0.0471	0.8231	0.1947	
新改进	$m_{12}$	0.7348	0.1434	0.0302	0.0916	0.9017	0.5600	
	$m_{123}$	0.9024	0.0590	0.0191	0.0195	0.9972	0.2297	
	$m_{1234}$	0.9268	0.0462	0.0130	0.0140	0.9983	0.2027	

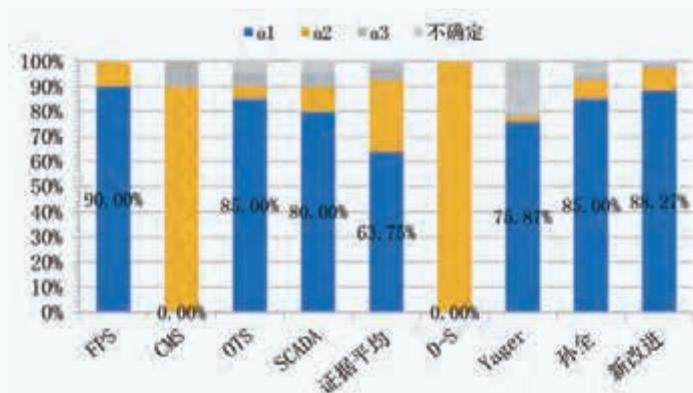


图5 高度冲突合成对比

出良好的识别效果，比 Yager 改进和孙全改进算法合成效果统计平均分别提升了 19.0%、4.3%。

## 结语

由于不同采集数据蕴涵故障的差异性，诊断证据合成结论可能会出现模糊的现象，本文对 D-S 证据推理合成算法进行改进优化，使得在发生高度证据冲突时将支持的概率赋值因素记入该元素的基本概率赋值，不支持该元素的因素记入不确定因素的基本概率

赋值，避免了合成过程中某一证据因为传感器信息模糊而被否定，进而造成因高度证据冲突，齿轮箱状态出现错误判定。实践表明，新改进合成算法有效提升了齿轮箱等大件故障决策的可信度。在 2022 年 2000 万千瓦风电装机应用中，整体故障诊断的精准度提升了约 15%，同比减少维修近百次，风电年发电小时数比行业高出 5.5%。该算法对大型化风电机组故障决策具有现实指导意义，能产生良好的经济效益和社会效益。✎

(作者单位：中国广核新能源控股有限公司)

# 浅析海上风电项目机组选型要求

文 | 詹海宁, 邳帅, 齐博, 朱永飞, 杨金宝, 张文平, 高松玉

国内海上风电机组制造技术日趋成熟, 针对不同区域风能资源条件, 各机组制造厂家已开发出不同结构型式和控制调节方式的风电机组, 并进入了商业运行阶段。根据场址风能资源条件和风况特征及海上的特殊水文气象条件, 选择更优的机组型式是海上风电项目建设必经之路。本文主要阐述了海上机组选型需考虑的主要原则、认证、设计、运输安装与运维及技术经济性评价等方面的基本要求。

## 机组选型原则

海上风电机组的选型一般遵循安全、可靠、经济、适用、易维护等基本原则。

### 一、遵循安全性, 符合安全等级要求原则

风电机组应先满足一定的安全等级要求, 根据项目场区的年平均风速、50年一遇最大风速/50年一遇极大风速、

湍流强度参数, 确定场区的 IEC 类型, 进而初步选取适用于对应风区类型的风电机组。IEC 关于风区类型的定义如表 1 所示。

### 二、遵循可靠性原则

选择风电机组时应考虑其运行的可靠性, 包括电能质量、对电网的要求、对运行环境适应性及可用率保证等方面。根据《风电场接入电力系统技术规定》(GB/T 19963—2011)、《风电机组并网监测管理暂行办法》(国家能源局 [2010] 433 号)、《关于加强风电安全工作的意见》(国家电监会 [2012]) 等的规定, 风电机组应具备低电压穿越能力和必要的高电压穿越能力; 具备有功功率控制能力, 接收并自动执行电网调度部门发出的有功功率控制信号, 以保证电力系统稳定性; 在不同的输出功率时, 其功率因数应在  $-0.95 \sim +0.95$  变化范围内可控; 具有自动电压调节能力的动态无功补偿装置, 补偿容量以接入系统批

表1 国际电工委IEC 61400风区标准 (第四版)

风电风区等级		第 I 类 风能资源区	第 II 类 风能资源区	第 III 类 风能资源区	特定风能 资源区 S
年平均风速 $V_{ave}$	风速 / (m/s)	10	8.5	7.5	由设计者选取, 并在设计文件中 详细指定 具体的值
10min 参考平均 风速 $V_{ref}$	50 年一遇最大风速 / (m/s)	50	42.5	37.5	
	50 年一遇极大风速 $V_{refT}$ / (m/s)	57	57	57	
超高湍流 A+	风速 15m/s 下湍流强度的预期值 $I_{ref(-)}$	0.18	1.0000	0.0000	
高湍流 A	风速 15m/s 下湍流强度的预期值 $I_{ref(-)}$	0.16	0.0900	0.0000	
中湍流 B	风速 15m/s 下湍流强度的预期值 $I_{ref(-)}$	0.14	0.0545	0.0455	
低湍流 C	风速 15m/s 下湍流强度的预期值 $I_{ref(-)}$	0.12	0.0208	0.0109	

复为准，其调节范围和响应速度应满足并网点电压调节的要求。

### 三、遵循气候适应原则

根据特殊气候选择机组，需考虑各种气候因素（如高温、低温、台风、雷暴等）、水文等对风电机组安全的影响。根据风电场的气候环境情况，选择适用的具有特殊适应性的风电机组，如海上风电机组需要具备抗潮湿、防盐雾腐蚀等特性，在台风多发区域需要具备抗台风特性，在雷暴多发区域需要具有适当防雷保护。同时，根据项目的温度范围选择对应的常温型或低温型风电机组。常见机组类型适用条件如下：

常温型机组适用条件为运行温度范围： $-20^{\circ}\text{C}\sim +40^{\circ}\text{C}$ ，生存温度范围： $-30^{\circ}\text{C}\sim +50^{\circ}\text{C}$ 。

低温型机组适用条件为运行温度范围： $-30^{\circ}\text{C}\sim +40^{\circ}\text{C}$ ，生存温度范围： $-40^{\circ}\text{C}\sim +50^{\circ}\text{C}$ 。

抗台型机组适用条件为 10min 最大风速： $57\text{m/s}$ ，3s 极大风速： $79.8\text{m/s}$ 。

### 四、遵循易维护性原则

海上风电场运行环境复杂，运行维护较陆上风电场难度大、费用高，特别是海况恶劣时，维修人员难以到达，故障较难排除。因此，风电机组除应具备较高的可靠性外，也应具备易维护性。

### 五、遵循经济性原则

风电机组选型应从风电场全生命周期成本收益角度考虑，实现整体效益的最大化。根据场区特征，采用不同机型进行排布设计，计算优选发电量最高、工程造价最低、度电成本最低的机组。

### 六、遵循的其他原则

除以上选型原则外，影响机组选型的运输、安装条件特殊要求，基础和施工等配套技术能力要求，单机容量大型化要求，工程进度保证要求等方面，在机组选型中同样应予以考虑。

## 认证要求

我国风电行业已建立起相对比较完善的风电整机装备及部件认证体系，风电机组整机装备及部件的认证逐步成为保证风电产业健康发展的重要管理手段和方法。目前，风电领域的认证范围包括：

### 一、设计认证

通过设计评估、场地试车（安全及功能试验）和生产质量控制审核等，对新型号的风电机组与标准/规范的符合性进行评价。机组选型时，应选择获得行业专业机构设计认证证书的机型。

### 二、型式认证

2014年9月，国家能源局印发《关于规范风电设备市场秩序有关要求的通知》（国能新能〔2014〕412号），明确提出风电行业要“加强检测认证确保风电设备质量”。文件规定，接入公共电网的风电机组及其风轮叶片、齿轮箱、发电机、变压器、控制器和轴承等关键零部件必须进行型式认证。机组选型时，需要确认机型具备相应的机组型式认证证书。

### 三、项目认证

评估已通过型式认证的风电机组和对应的塔基设计是否能与外界条件、可适用的构造物和电力参数相适应，以及是否满足与指定场地有关的其他要求。项目认证应评估场地的风能资源条件、其他环境条件、电网条件及土壤特性是否与定型风电机组设计文件和塔基设计文件中确定的参数相一致。因此，机组选型时，应选择经过项目认证的机型。

## 设计要求

### 一、机组选型设计要求

遵循机组选型原则，首先应确定机组的安全等级，结合风能资源进行机组适应性分析，确定市场主流机型及风电机组容量范围，再按照不同机型方案进行风电机组机位及海缆路由布置。机型选择包括以下内容：

(1) 比较特征参数、结构特点、塔架形式、功率曲线和控制方式。

(2) 根据充分利用风电场海域和减小风电机组间相互影响的原则，对各机型方案机组进行初步布置，计算各机组的年发电量。

(3) 初步估算各机型方案风电机组及相关配套投资、运行费用。

(4) 通过技术经济比较提出推荐机型。

### 二、机组结构设计载荷工况要求

海上风电机组的设计应满足 IEC 61400 系列规范中关于风电机组的基本设计要求，并重点对在机组全生命周期

内威胁到结构完整性、安全性的各种设计载荷工况予以周全考虑，包括重力和惯性载荷、空气动力载荷、驱动载荷、水动力载荷、海冰载荷、尾流载荷、船舶冲击载荷、涡激振动等。应将具有合理发生概率的各相关载荷工况与控制系统动作结合在一起考虑。

### 三、机组电力系统选型设计要求

海上风电机组接入集电线路的电压等级目前一般有 35kV 和 66kV 两种，据此可选择单台机组配套升压设备的电压等级。海上风电机组需具备一定的无功补偿功能，且应满足功率因数在超前 0.95 到滞后 0.95 的范围内动态可调。

### 四、机组运行设计要求

风电机组应具有低电压和高电压穿越能力。风电场运行适应性应符合下列规定：

(1) 风电场并网点电压在标称电压的 0.9 ~ 1.1 倍额定电压范围（含边界值）内时，风电机组应能够正常运行。

(2) 电力系统频率在 49.5 ~ 50.2Hz 范围（含边界值）内时，机组应能够正常运行；电力系统频率在 48 ~ 49.5Hz 范围（含 48Hz）内时，机组应能够不脱网运行 30min。

## 运输安装要求

海上风电机组运输包括陆运、陆转海和海运三个阶段。海上风电机组选型需要充分考虑满足风电项目场址的交通运输条件，包括道路、车辆、码头、船舶等。随着海上风电机组单机容量不断增大，机组重量和体积不断攀升，对运输高度、地面承载力、运输坡度、运输稳性、码头吊装能力和水深、船舶甲板面积等不断提出新的要求。因此，机组选型时要确定海上风电机组及部件的运输模式，一般有整机商码头交货、整机商机位点交货两种。选择码头交货时，还应考虑机组部件尺寸和重量对海上运输船运输能力和方式的要求，如船舶甲板上塔架立式、叶片叠放等运输方式。

对于海上风电机组的安装，要充分考虑海上项目的不同海况、作业环境、船机资源和码头资源等条件，要求海上风电机组具备整体安装或分体安装的工艺和装备。整体安装分为整体吊装和整体拖航安装，具有对运输船和安装船的施工能力要求高、工装工艺复杂、对组装场地要求高、适合于短距离运输等特点。目前，行业中使用整体安装的

较少。分体安装为海上风电机组常用的安装方式，是先将风电机组的各个部件由制造厂家运输至装配基地进行模块化组装，再将各个部件和组件运输至海上风电场进行顺序安装。分体安装最大的优点是对安装船的起重能力要求相对较低，可以充分利用市场上的安装船舶资源，但海上安装效率会比整体安装低。分体安装分为三种方式：三叶式安装、免耳式安装和单叶式安装。随着海上风电机组叶片尺寸越来越大，从成本、安装船性能要求及吊装安全可靠方面考虑，水平单叶式吊装方式将是未来大容量海上风电机组的主流安装方式。

## 运维要求

海上风电机组运维需要高可靠性保障。对于部分关键部件和故障高发的组件，应采用双备份冗余设计，如变流器冗余设计多套变流器模块可独立运行、机械式+超声波风速风向仪、变桨通讯及偏航电机冗余设计等；或采用模块化设计、多回路设计等，增加发电的可靠性，减少故障引发的停机时间。

在机组维护周期方面，需要考虑海上风电机组的长周期维护。海上风电机组的计划性年度维护周期从传统的一年一次，通过可靠性设计和设备性能提升等，形成两年或三年一次。

## 技术经济性比选要求

海上风电项目的建设条件更为复杂，投资风险较高，应综合考虑投资条件、机组产品竞争力水平、建设条件等开展项目综合评价，实现项目优劣比选，判定项目的技术经济可行性。海上风电项目技术经济评价应按照定量分析与定性分析相结合，动态分析与静态分析相结合，以定量分析、动态分析为主的原则开展，确保评价结论的客观性、准确性和科学性；应遵循“同时期、同区域、同类型”的竞争力分析原则，确保费用与效益计算范围的一致性，稳妥确定评价参数，结合项目所在地区、所处行业及项目自身特点进行技术经济评价分析。

海上风电项目技术经济评价判据参数一般采用“X+Y”体系。“X”为项目经济评价通用指标，包括全投资财务内部收益率（税前）、全投资财务内部收益率（税后）或资本

表2 海上风电项目经济评价判据参数

项目类型	容量等级 M / 万千瓦	判据参数				
		通用指标 (X)			辅助指标 (Y)	
		全投资财务内部收益率 (税前)	全投资财务内部收益率 (税后)	资本金财务内部收益率	总投资收益率	资本金净利润率
新建海上风电项目	M < 50	6%	5%	7%	10%	15%
	50 ≤ M < 100	6.8%	5.8%	8%		
	M ≥ 100	7%	6%	9%		

金财务内部收益率。“Y”为结合行业水平和项目特点增加的辅助指标，在项目满足通用指标的前提下，做进一步参考评判，包括总投资收益率和资本金净利润率。海上风电项目经济评价判据参数详见表2。

判据参数的数值为行业常规水平。其中，全投资财务内部收益率（税前）、全投资财务内部收益率（税后）和资本金财务内部收益率之间为“或”的关系，测算结果大于等于判据参数时可予以接纳，说明项目具有投资价值，具有较为合适的投资回报。针对具体项目情况，包含机组选型的测算结果可作为投资决策的主要依据之一。

## 结语

国家“十四五”海上风电新增规划规模接近3.2亿千瓦，发展潜力巨大。海上风电正朝着大型化、远海化快速发展，机型种类繁多。了解和掌握海上风电机组的选型要求，根据不同海域项目的海洋环境和投资条件，选择更优的海上风电机组型式，可实现最优的海上风电场效益。✎

(作者单位：詹海宁，邳帅，齐博，朱永飞：中海油能源发展股份有限公司清洁能源分公司；杨金宝，张文平，高松玉：金风科技股份有限公司)



# (西藏) 大型矿区离网项目的经济性分析与技术挑战

文 | 李光明, 靳志会, 王兆邻

随着经济的快速发展和能源需求的增加, 大型矿区在全球范围内得到了广泛的开发和利用。然而, 部分矿区位于偏远地区或环境复杂的地理条件下, 传统的电网供电不仅存在成本高昂和供电不稳定的问题, 还可能对环境造成负面影响。因此, 离网项目成为一种潜在的解决方案。通过建设独立的、可再生的能源系统, 可以满足大型矿区的能源需求。大型矿区离网项目的投资规模庞大, 因此, 对其经济性进行分析能够为决策者提供科学依据。同时, 大型矿区离网项目面临着复杂的技术挑战, 包括能源的稳定供应、可再生能源的利用、能源存储技术等。此外, 矿区离网项目通常需要考虑多种能源的组合利用, 如太阳能、风能、水能等, 以满足高电力需求。本研究旨在对(西藏)大型矿区离网项目的经济性与技术挑战进行探讨。在常态时连接电网, 如果主电网出现故障或是电能质量问题, 其可以实现自动断开主网, 从

而既可以使电网整体运行得到保证, 又能够确保当地能源的正常供应。若项目地不具备接入电网条件, 则可一直以孤岛方式运行。

## 理论基础

### 一、微电网的定义

目前, 各国对微电网尚未形成统一的定义和表述。通常可认为, 微电网是由负荷、DG、储能设备、电力电子器件、测量、监控及保护装置汇集而成的小型发电系统, 是一种对外部大电网表现为单一的受控单元, 且能够实现自我控制、保护和管理的独立自治系统, 同时可以满足用户对电能质量和供电安全的需求, 既可并网运行, 也可孤岛运行<sup>1</sup>。其结构如图1所示。

(1) 微电网中包含了光伏、小型燃气轮机和构网型

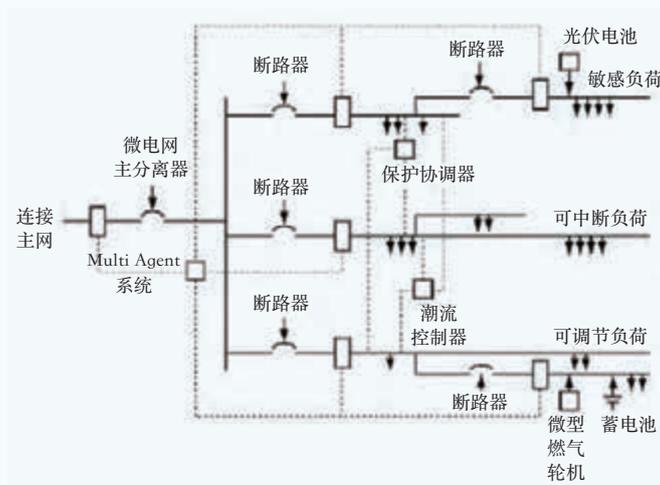


图1 微电网基本结构

1: 党瑞, 邹蕴韬, 侯丹, 等. 风光发电制氢供电系统稳态运行研究 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 5 (2) : 1 - 13.

储能等形式的电源。当前先进的电源设备具备毫秒级的电压控制、故障穿越等能力。且光伏系统与储能系统可实现相互配合控制。

(2) 微电网配备了能量管理系统。通过数据采集并连接到能量管理系统,可解决秒级的电压控制、潮流控制、保护控制等一系列问题。

(3) 在微电网中有各种不同类型的负荷,需要用不同的策略进行供电,如可以直接对某些当地的负荷进行供电。

(4) 微电网可以通过主隔离器实现与主电网的并网运行,并改善主网的电能质量。

## 二、微电网分类及控制技术

### (一) 微电网的分类

微电网作为主动网络,是智能配电网的重要组成部分,能够充分整合多种 DG,并使其以并网或孤岛方式运行,为人们提供可靠性供电<sup>2</sup>。微电网的分类如下:

(1) 按能量传输类型分为直流微电网、交流微电网和混合微电网。

(2) 按并网方式分为独立型微电网和并网型微电网。

(3) 按地理位置分为海岛型微电网、偏远地区微电网和城市片区微电网。

(4) 按用途分为工业微电网、商企业及生态城微电网、民用微电网、校园微电网等。

(5) 按我国常用微电网电压等级分为 400V、10kV 和 35kV 电网等。

### (二) 微电网的控制技术

#### 1. 微电网运行

正常情况下,微电网并网运行,由大电网提供刚性的电压和频率支撑,内部工作在电压源(Voltage Source, VS)或电流源(Current Source, CS)状态,在能量管理系统或本地的控制下调整各自功率输出。当大电网出现电压骤升、骤降、不平衡和谐波等电能质量问题或有计划检修时,微电网转入孤岛运行模式,此时的电压和频率由内部 MS 负责调节。当电网故障消失后,微电网重新并入电网<sup>3</sup>。微电网除了并网/孤岛两种稳态运行模式外,还存在两种模式间的转换过渡过程。模式

转换的方式不是电源的重新启动,而是在逆变器持续不断工作的同时,通过控制方法和网络结构等方面的调整来保证网内电压的连续平稳过渡,即实现无缝切换,以确保网内重要敏感负荷的供电不受影响。过渡过程是两种模式间转换的桥梁和纽带,过渡过程中电能质量的优劣将直接影响到网内重要负荷的安全运行,是微电网系统能否实现灵活运行、提供定制电力服务的重要标志。其中,重新并网相对容易,而从并网转入孤岛模式的无缝过渡过程则相对困难。在不同的微电网运行模式和孤岛拓扑结构下,微源可以采用不同的控制方法和硬件拓扑,但究竟何种控制方法能够保证网内电压的稳定,目前很少有文献报道。在进行微电网模式转换时,微源的控制方法受多种因素的影响,如转换前后的并网/孤岛运行状态、微源硬件配置等。同时,储能单元也会对微源控制方法的选取及其控制效果产生一定的影响,具体包括<sup>4</sup>:

#### (1) 微电网孤岛运行拓扑结构对控制方法的影响

正常情况下,微电网和大电网共同负担网内负荷。当微电网转入孤岛运行时,存在功率需求和供给的不平衡。此时,除了切除普通负荷外,微电网的拓扑结构也可能会发生相应的变化。

#### (2) 微源配置对控制方法的影响

在不同的微电网拓扑结构下,微源可以采用不同的输出滤波器结构(L、LC或L-CL),不同的滤波器结构同样会对微源控制方法的选取产生影响<sup>5</sup>。

#### (3) 微源控制方法的选择

逆变器并网运行时,可以工作在 VS 或 CS 方式下,由大电网为其提供电压和频率支撑。当微电网转入孤岛运行后,由于电网电压的缺失,其构网能力必须由储能侧的 PCS 提供。

#### 2. 微电网控制方法

目前,常用的微电网控制方法包括以下三种:

##### (1) 基于功率管理系统的控制

该方法采用不同控制模块对有功、无功分别进行控制,很好地满足了微电网多种控制的要求,尤其在调节

2: 张强,王超,李欣蔚,等.考虑典型电能替代的配电网新能源接纳能力研究[J].可再生能源,2023,41(10):1414-1420.

3: 姚鸿波,李小刚.太阳能光伏发电技术在钢铁企业厂房屋顶的应用[J].南方金属,2023(5):27-31.

4: 武昭原,刘婧宇,周明,等.分散决策下分布式光伏储能系统外部性价值量化评估[J].电力系统自动化,2023,8(15):1-11.

5: 李琛玺,燕恒,张浩,等.计及阶梯式碳交易的风-光-火-抽蓄联合系统日前优化调度[J].水利学报,2023,12(4):1-14.

功率平衡时，加入了频率恢复算法，能够很好地满足频率质量要求。此外，针对微电网中对无功的不同需求，功率管理系统采用了多种控制方法，从而大大增加控制的灵活性，并提高了控制性能。这种方法未考虑在微电网运行模式切换时的过渡过程<sup>6</sup>。

(2) 基于电力电子技术的“即插即用”与“对等”的控制

该方法根据微电网控制要求，灵活选择与传统发电机相类似的下垂特性曲线进行控制，将系统的不平衡功率动态分配给各机组承担，具有简单、可靠、易于实现的特点。然而，该方法没有考虑系统电压与频率的恢复问题，即类似于传统发电机中的二次调整问题。因此，在微电网遭受严重扰动时，系统的频率质量可能无法得到保证。此外，该方法没有讨论在微电网运行模式切换时的过渡过程。

(3) 基于多代理技术的控制

该方法将传统电力系统中的多代理技术应用于微电网控制系统。代理的自治性、反应能力、自发行为等特点，正好满足微电网分散控制的需要，提供了一个能够嵌入各种控制性能但又无需管理者经常出现的系统<sup>7</sup>。然而，目前多代理技术在微电网中的应用多集中于协调市场交易、对能量进行管理方面，还未深入到对微电网

中的频率、电压等进行控制的层面。要使多代理技术在微电网控制系统中发挥更大作用，仍需要开展大量研究工作。

(三) 微电网的综合控制策略

1. 主从控制

主从控制指的是以一个分布式电源作为主控单元，其余分布式电源为从属单元的控制方式。主从控制的关键在于各分布式电源之间的通信。

如前所述，微电网处于并网运行状态时，微电网内的电压和频率稳定均由大电网提供支撑。微电网处于孤岛运行状态时，如采用主从控制策略，作为系统中的主控制单元需要维持系统的频率和电压。因此，一般底层分布式电源主从控制的主单元控制策略如图2所示。在联网运行时，微网中的所有分布式电源采用PQ控制，即微网不参与系统频率调节，只输出指定的有功和无功功率。在孤岛运行时，主单元采用Vf控制，维持系统的电压和频率恒定<sup>8</sup>。

2. 对等控制

如图2所示，在微电网中，还有另一种控制方式——对等控制。在这种控制方式下，每一个分布式电源对于微电网的作用是相同的。各个分布式电源之间并不像主从控制那样进行通信以确定系统运行状态，因而减少了对通信设备

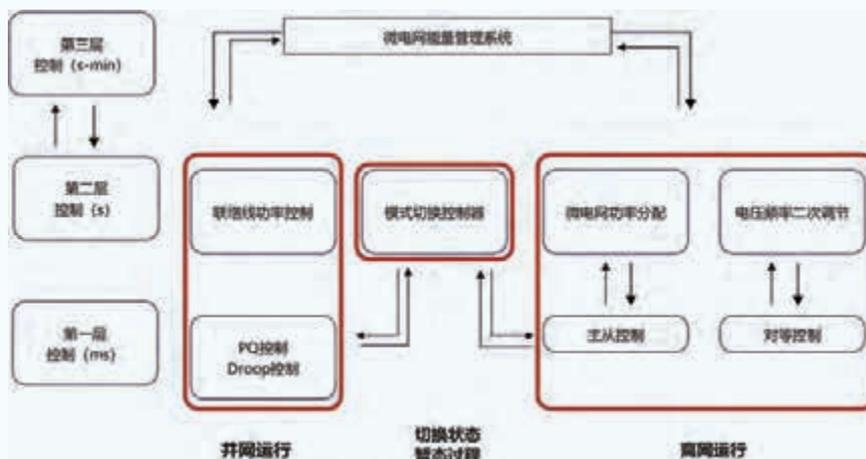


图2 微电网控制策略

6: 潘毅群, 王哲, 尹茹昕, 等. 电网交互建筑及电力协调调度优化策略研究 [J]. 暖通空调, 2023, 9 (8) : 1 - 20.

7: 刘帅, 吴胜洋, 刘卫亮, 等. 计及不确定性的风光抽蓄发电系统容量优化 [J]. 水力发电学报, 2023, 22 (15) : 1 - 12.

8: 赵耀, 高少炜, 李东东, 等. 基于天气相似聚类与 QRNN 的短期光伏功率区间概率预测 [J]. 电力系统自动化, 2023, 3 (14) : 1 - 14.

的投入。每个分布式电源可以根据微电网的运行状况，自主参与电网频率和电压的调节。这种控制方法的好处在于，当有分布式电源接入电网或者与微电网断开连接时，并不需要对其他分布式电源进行控制，使分布式电源具有“即插即用”的特性，可以提高微电网的可靠性<sup>9</sup>。目前应用最广泛的对等控制方式为基于 P-f、Q-V 下垂特性的下垂控制。

### 3. 微电网控制策略的协调

微电网运行模式主要包括并网运行模式、孤岛运行模式、并网模式和孤岛模式之间的转换。

当微电网处于并网运行模式时，微电网内的分布式发电单元可以按照最大功率进行输出，当分布式发电单元的输出功率大于微电网内负荷的总量时，微电网向大电网输出功率，相当于电源。当分布式发电单元的输出小于微电网内负荷的总量时，微电网从大电网吸收功率，相当于负荷。但是当分布式电源总容量较大，而且具有大容量的储能装置时，可以对微电网内的分布式储能单元进行有计划的控制，使其承担微电网内的调压调频任务，从而提高微电网的稳定性，改善用户的用电质量<sup>10</sup>。

当微电网处于孤岛运行模式时，最重要的是维持电压和频率的稳定。解决这个问题关键在于微电网内的能量是否平衡。因此需要对微电网内的负荷进行分类，当分布式发电单元的输出不足以满足微电网内的负荷时，需要对不太重要的负荷进行切除。大部分微电网孤岛运行是为了避免受到大电网故障波及，所以一般孤岛运行时间较短，对于不重要负荷的暂时性切除是可行的。以风光能为主要能源的分布式发电单元经常会遇到风光能的波动，进而造成输出功率的波动，所以当微电网孤岛运行时，必须配有足够容量的储能装置来平衡这种波动。微电网一般都是配电网内接入分布式电源形成的，而配电网线路呈阻性，当阻抗不可忽略时，电压和频率不再是单纯的 P-f、Q-V 关系<sup>11</sup>。

不论是从并网模式转换到孤岛模式，还是反之，都会

引起微网系统的不稳定。尤其是当微网和大电网有功功率交换时，突然转换到孤岛模式会导致自身系统严重的不平衡。不仅如此，微网若重新从孤岛模式转换到并网模式，也会引起与大电网不同步的问题。因此，设计合理的控制方法及合理的微网结构，对微网的模式切换非常关键。储能装置被看作是具有惯性的能量存储装置，可以较好地解决微网暂态能量的平衡问题。

### 三、微电网的主要分类和用途

微电网分为并网型和独立型，可实现自我控制与自治管理。独立型微电网单独运行，不与大电网联网，完成内部发电和供电平衡。并网型微电网通常与外部电网联网运行，且具备并离网切换与独立运行能力。

微型：微电网电压等级低，一般在 35kV 以下；系统规模小，系统容量（最大用电负荷）原则上不大于 20MW。

清洁：电源以当地可再生能源发电为主，或以天然气多联供等能源综合利用为目标的发电型式，鼓励采用燃料电池等新型清洁技术。

自治：微电网内部具有保障负荷用电与电气设备独立运行的控制系统，具备电力供需自我平衡运行和黑启动能力，独立运行时能够保障重要负荷连续供电（不低于 2h）。微电网与外部电网的年交换电量一般不超过年用电量的 50%<sup>12</sup>。

友好：微电网与外部电网的交换功率和交换时段具有可控性，可与并入电网实现备用、调峰、需求侧响应等双向服务，满足用户用电质量要求，实现与并入电网的友好互动，用户的友好用能<sup>13</sup>。

## 西藏偏远地区大型矿区微电网项目的可行性

西藏全区总面积 120 多万平方公里，辖 6 个地级市、1 个地区，74 个县区，总人口约 365 万。通过小城镇（中心村）、“三区三州”农网改造升级工程和抵达村寨电网等脱贫攻坚工程建设，实现西藏电网主网覆盖达到 74 个县，但因部分

9: 梁以恒, 杨冬梅, 刘刚, 等. 基于功率预测精度提升和市场交易的平抑新能源出力波动策略 [J]. 上海交通大学学报, 2023, 11 (9) : 1 - 17.

10: 王轶辰. 光热发电走向规模化 [N]. 经济日报, 2023-10-13 (006) .

11: 邹宇波. 昔日尾矿库 今成“绿”电厂 [N]. 江西日报, 2023-10-13 (005) .

12: 房惠玲. 逐“绿”而行 玉门新能源发展“风光”无限 [N]. 甘肃经济日报, 2023-10-13 (001) .

13: 高平, 王潇, 孙亚辉. 绿色发展“风光”无限 [N]. 光明日报, 2023-10-13 (005) .

乡镇距离县城较远，主网延伸投资大，导致居民未用上大网电。西藏配电网多为单链式结构，35kV 线路 N-1 通过率 5.94%、110kV 线路 N-1 通过率 54.76%，且末端电网缺少电源支撑，导致配网供电可靠性差，电能质量低，保供压力大<sup>14</sup>。因此，开发微电网示范项目是解决西藏偏远地区供电问题的重要路径。

### （一）构建新型电力系统

西藏阿里地区电网的电源构成为：（1）狮泉河水电站装机容量为  $4 \times 1.6\text{MW}$ ，由于水库库容及流量限制，常年仅有一台或两台水轮发电机组发电。（2）狮泉河柴油发电站装机容量分为  $4 \times 2.5\text{MW}$  和  $4 \times 1.8\text{MW}$  两个电站，受设备磨损、高原气候等因素制约，柴油发电机组实际运行的上限仅分别为  $4 \times 1\text{MW}$  和  $4 \times 0.8\text{MW}$ 。当前，狮泉河水电站和柴油发电站年发电量约为 2400 万千瓦时，而电网年需电量约为 3800 万千瓦时，电量缺口高达 1400 万千瓦时。阿里地区太阳能资源丰富，辐照度非常高，多年平均太阳辐照度为  $8366\text{MJ}/\text{m}^2$ ，日照时数长达 10h。因此，考虑该地区环境保护的要求，适宜采用光伏发电解决地区用电紧张问题。阿里地区光储型微电网建设规模为  $10\text{MWp}$ ，除供微电网自身负荷使用外，主要用于接入阿里地区孤立型 35kV 电网，不仅解决了供电不足问题，也减轻了柴油发电站的负担，保护了环境，大大降低了运行成本。

光储型微电网由两段 35kV 母线组成。两段母线间设有母联断路器，且每段目前分别经联络开关 QF1 和 QF2 与阿里地区孤立型 35kV 电网相联。每段母线都接有光伏、储能及负荷，且每段母线光伏和储能的装机容量分别为  $5\text{MWp}$  和  $5.2\text{MWh}$ 。此外，为保证微电网电压稳定，母线中接有静止无功发生器（SVG）<sup>15</sup>。

### （二）实现双碳目标

阿里地区原有的孤立型 35kV 电网供电区域较小，主要为阿里昆莎机场、狮泉河镇及其周边村落。光储型微电网接入孤立型电网后负荷暂时不发生改变，因此，接入后的电网整体可等效为含有水光储柴的微电网。

该微电网主要由光储型微电网、水力发电系统、柴油发电系统和负荷组成，且属于孤立电网，与大电网无任何电气连接。微电网中所有电源点都直接与 35kV 中心变电站联接。35kV 中心变电站具有两台变压器，二者互为备用。负荷则通过中心变电站辐射型联接，整个电网为典型的辐射型拓扑结构。光储型微电网通过 35kV 双回架空线与中心变电站相联；水电站经 6/35kV 升压变压器通过双回架空线与中心变电站相联；柴油发电系统经 10/35kV 升压变压器与中心变电站相联；负荷是由多个 10kV 馈线组成<sup>16</sup>。

### （三）满足不同终端用户的供电需求

微电网的经济性在以下几个方面与主电网较为相似：（1）经济调度规则；（2）根据设备特性以尽可能低的成本整合资源使成本最小化；（3）不同时段的购售电交易；（4）多元技术资源的优化组合满足系统不同的工作周期；（5）高投入低可变成本的发电技术满足基本负荷需求的适应性；（6）低投入高可变成本的发电技术满足峰值负荷需求的适应性<sup>17</sup>。

微电网的某些经济问题具有其独特特征，有别于传统的主电网规模经济。与集中式发电不同，微电网需要在一些约束条件下运行，如减少发电机产生的噪声。传统电力系统的设计和运行通常是按照统一的电能质量和可靠性为用户输送电能，而不考虑终端用户的不同需求。微电网则可以控制终端用户侧节点的电能质量和可靠性，从而满足用户不同可靠性水平的供电需求。因此，对用电质量和供电可靠性要求低的低端用户，可以通过低价购电来降低能源费用。同理，对用电质量和供电可靠性要求高的高端用户，可以通过更高的价格购电以保障精密设备的供电，而不需要额外投资优质的供电设备。此外，如果供电短缺，微电网可以通过切除低端用户的负荷来保证高端用户的供电。微电网的广泛应用、就地控制发电、需求侧管理的备用容量及储能装置可以有效地为敏感负荷供电，从而降低了主电网因敏感负荷可靠性要求而产生的经济负担。

14: 许新华, 高刚, 徐永嘉. 基于改进遗传算法的综合能源优化调度方法 [J]. 电气开关, 2023, 61 (5): 35 - 38+42.

15: 董侨, 李家旺, 顾兴宇, 等. 基于 APSO 算法的公路光伏声屏障储充系统优化 [J]. 中国公路学报, 2023, 22 (14): 1 - 21.

16: 黄立滨, 郭临洪, 郭天宇, 等. 基于多核 CPU 的风光新能源场站全拓扑实时仿真建模方法 [J]. 南方电网技术, 2023, 2 (8): 1 - 10.

17: 丁嘉铨, 孔德明, 肖宸瑄, 等. 产业链视角下全球光伏产业贸易格局演变特征研究 [J]. 世界地理研究, 2023, 33 (45): 1 - 19.

## 大型矿区建设中微电网推广建议

微电网的推广和应用可以为大型矿区建设提供可靠的电力供应，提高能源利用效率，减少能源浪费，并促进矿区的可持续发展。以下是关于在大型矿区建设中推广微电网的建议：

**评估矿区能源需求：**在推广微电网前，需要对矿区的能源需求进行全面评估，包括矿区的电力需求、能源消耗情况、峰谷电需求特征等。通过了解能源需求的特点，可以设计出更适合的微电网系统，满足矿区的实际需求<sup>18</sup>。

**搭建微电网基础设施：**在矿区中建设微电网需要合适的基础设施支持，包括建设光伏电站、风电设施、储能系统、微电网控制中心等。合理规划和布置这些设施，确保能够有效运行和管理微电网系统。

**引入智能能源管理系统：**在微电网中引入智能能源管理系统，可以实现能源的优化调度和管理。通过监控技术，实时调整能源供应和需求之间的平衡，最大程度地提高能源利用效率。智能能源管理系统还可以帮助矿区进行能源需求预测和计划，以提前做好能源供应准备。

**加强储能技术：**当前微网与传统微网的最大区别是电源侧的设计理念，即储能技术的应用。在微网建设中，储能系统必须具备以下几个功能才可保障整个微网系统的安全稳定：

(1) “N-1”稳定性设计：基于储能系统的构网能力保障关键负荷，以子阵为单位进行微电网的 N-1 系统设计，合理配置光伏和储能子阵的容量；采用光储协同的暂态稳定控制技术，在静态工况下，储能维持电压和频率稳定，光伏实现不同电网电压和频率下的最大化利用；在 N-1 扰动下，光伏、储能主动协同，变流器瞬时响应出力，调整子阵输出的有功功率和无功功率，从而保障微电网在大扰动暂态问题出现时可以顺利进行故障穿越，并恢复微电网的电压和频率的稳定；采用基于高性能电站控制的多子阵协同策略，实施各子阵功率自动分配再均衡技术，抑制子阵环流。

(2) 储能系统黑启动：在新型电力系统或微电网中，

可利用储能系统中存储的电量和电力电子变流器来建立电网交流电压，实施电网黑启动，快速恢复电网供电，减少电网异常停电带来的损失。多机同步建立电压的稳定控制技术是制约黑启动电源规模的关键因素，是大容量微电网实施黑启动必须要解决的“卡脖子”难题。本项目微网系统黑启动技术，利用快速广播通信技术，向多个储能子阵协同下发黑启动控制指令，子阵时差小于 50ms，激活组串式电池系统，并使各子阵同步实施建立交流电压；子阵内部采用无互联通信线的多机协同并联同步技术，保障多机缓起步伐的同步性；采用储能 PCS 无协同通信线的自动同步校准技术，保障大容量多机并联微网黑启动储能系统的可靠实施<sup>19</sup>。

(3) 建议储能设备具有电池包优化功能：由于微电网场景对电源侧的利用率高，具备储能仓内电池包优化功能，有利于电池包 SOC 均衡，通过精细化控制可保证电池的使用寿命。

## 结语

大型矿区离网型项目在西藏等偏远地区的建设面临经济性分析和技术挑战。通过对经济性进行全面评估，包括能源成本、投资回报期和能源可靠性等因素的考量，可以确保项目的可行性和可持续性。同时，在技术上要克服可再生能源利用、储能技术、电力管理和控制及网络通信与安全等方面的挑战。通过不断的技术创新和经验积累，可以逐步解决离网项目中的技术挑战，并提高离网系统的可靠性、稳定性和运维效率。此外，政府、企业和研究机构的合作将在推动离网项目的发展上起到关键作用。

大型矿区离网项目的成功实施，将为西藏等地区的可持续发展 and 能源转型树立典范。它们将为能源供应安全、经济效益和环境保护提供可行的解决方案，并为其他类似地区的离网项目提供宝贵的经验。通过推动大型矿区离网项目的发展，可以实现能源的可持续利用和矿区的可持续发展目标。✎

(作者单位：中广核风电有限公司)

18: 谈玲, 康瑞星, 夏景明, 等. 融合多源异构气象数据的光伏功率预测模型 [J]. 电子与信息学报, 2023, 6 (7) : 1 - 15.

19: 张维明. 绿色节能技术在海洋装备智能制造基地建筑设计中的应用及探讨 [J]. 石化技术, 2023, 30 (10) : 59 - 61.

# 南高齿



大功率机型平台化高质量发展，覆盖高速齿轮箱、中速齿轮箱及集成传动链。



平台产品：CMG605A  
额定功率：13.5-15MW



平台产品：CMG502A  
额定功率：9.X-10MW



平台产品：CMG455A  
额定功率：8.5-9.XMW

**CSSC**

重庆齿轮箱有限责任公司  
CHONGQING GEARBOX CO.,LTD

改变成就未来



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



3S LIFT

SAFE | SIMPLE | SPECIALIZED

# 大载荷 齿轮齿条升降机

—

大风机登塔全新解决方案

