

海上风电支撑我国能源转型发展的思考

刘吉臻¹, 马利飞², 王庆华¹, 房方², 朱彦恺¹

(1. 华北电力大学国家能源发展战略研究院, 北京 102206; 2. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206)

摘要: 我国海上风电资源丰富, 且靠近东部沿海经济发达省份, 就地消纳优势巨大, 发展海上风电有助于加快我国能源转型进程, 助力 2030 年碳达峰、2060 年碳中和目标的实现。本文在分析我国能源发展现状、趋势和面临挑战的基础上, 指出发展海上风电是我国能源结构转型的重要战略支撑。从风电机组、海上输电、海洋工程和运维技术等四个领域归纳提炼了我国海上风电发展的关键技术。针对目前我国海上风电产业发展面临的诸多瓶颈问题, 从海上风电资源勘查与评估、提高能源转型认识、宏观统筹与整体规划、科技创新、政策扶持机制等五方面提出了促进我国海上风电产业健康有序发展的对策与建议, 以期为我国海上风电高质量发展和政府有关部门决策提供参考。

关键词: 能源转型; 海上风电; 海上风电重点技术

中图分类号: F407 **文献标识码:** A

Offshore Wind Power Supports China's Energy Transition

Liu Jizhen¹, Ma Lifei², Wang Qinghua¹, Fang Fang², Zhu Yankai¹

(1. National Institute of Energy Development Strategy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: China is rich in offshore wind power resources, and these resources can be locally consumed by the economically developed provinces located in the eastern coastal region. The development of offshore wind power can accelerate the energy transition in China and help achieve carbon peak in 2030 and carbon neutrality in 2060. In this article, we analyze the current situation, trends, and challenges of energy development in China, and propose that the development of offshore wind power is an important strategic support for the energy structure transformation in China. The key technologies of offshore wind power development in China are summarized including wind turbine, offshore power transmission, offshore engineering, and operation and maintenance technologies. In view of the bottleneck problems restricting the development of China's offshore wind power industry, we propose some countermeasures and suggestions to promote the healthy and orderly development of China's offshore wind power industry from five aspects: exploration and evaluation of offshore wind power resources, understanding of energy transition, overall planning and integrated planning, scientific and technological innovation, and policy support mechanism.

Keywords: energy transition; offshore wind power; key technologies of offshore wind power

收稿日期: 2020-11-25; **修回日期:** 2020-12-25

通讯作者: 王庆华, 华北电力大学国家能源发展战略研究院副院长, 主要研究方向是综合能源系统优化与控制、能源系统低碳转型与决策;

E-mail: wangqhcr@ncepu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“海上风电支撑我国能源转型发展策略研究”(2019-ZD-15)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

面对能源短缺、环境污染、气候变化等人类共同的难题，一场以大力开发利用可再生能源为主题的能源革命在世界范围内兴起 [1]。十九大报告中指出，要推进能源生产和消费革命，构建清洁低碳、安全高效的能源体系。2020年9月和12月，习近平主席分别在第七十五届联合国大会和气候雄心峰会上宣布将提高国家自主贡献力度，提出到2030年，非化石能源占一次能源消费比重将达到25%左右，风电、太阳能发电总装机容量将达到 1.2×10^9 kW以上；二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取于2060年前实现碳中和 [2,3]。这一系列措施进一步明确了新时代我国能源发展的方向。

我国能源供应和能源需求呈逆向分布，在资源上（包括新能源资源）“西富东贫、北多南少”，在需求上恰恰相反。我国海上风电资源丰富，同时具有运行效率高、输电距离短、就地消纳方便、不占用土地、适宜大规模开发等特点，海上风电将成为我国大力发展可再生能源的必然选择。“十三五”期间，我国海上风电虽然得到快速发展，但是截至2019年年底累计装机只有 6.42×10^6 kW，相比海上风电已进入规模化阶段的英国、德国等欧洲国家，我国仍处于商业化发展初期阶段，“十四五”期间面临着诸多挑战。

为推动我国海上风电高质量发展，支撑我国能源转型，2019年9月，中国工程院正式启动“海上风电支撑我国能源转型发展战略研究”重大咨询项目，旨在从战略高度上明确我国海上风电的发展战略，从实践层面上策划我国海上风电的发展路径，为海上风电的高质量发展提供咨询建议。

本文作为“海上风电支撑我国能源转型发展战略研究”项目的阶段性成果，对我国海上风电这一新兴重大技术和产业的战略发展方向进行系统性的分析和研究。在分析我国能源发展现状、趋势及面临挑战的基础上，研判海上风电在我国能源转型中的前景和地位，并梳理影响海上风电发展的重点技术领域，最后针对目前海上风电发展存在的问题，研究提出相关对策建议，为我国经济建设和能源转型提供坚强、绿色、持续的支撑。

二、我国能源革命的紧迫性

随着经济社会的高速发展，我国经济总量已跃居世界前列。与之相应的能源消耗总量也持续大幅增长，目前已成为世界上最大的能源生产国和消费国。2019年我国能源生产总量达到 3.97×10^9 tce，发电量达到 7.14×10^{12} kW·h，包括可再生能源发电装机在内的指标均达到世界首位。2019年我国一次能源消费总量达到 4.86×10^9 tce，其中煤炭占比为57.7%，石油占比为18.9%，天然气占比为8.1%，非化石能源占比为15.3% [4]。在我国能源电力事业取得举世瞩目成就的同时，能源资源约束日益加剧，生态环境问题突出，调整结构、提高能效和保障能源安全的压力进一步加大，能源发展面临一系列严峻挑战。

（一）能源消费总量持续增加，能源利用效率较低

21世纪初以来，我国一次能源消费总量持续增长，年均增长近 2×10^8 tce，有力支撑了我国经济社会的快速发展。我国单位国内生产总值（GDP）能耗从1978年的15.66 t/万元下降到2019年的0.49 t/万元，但仍高于世界平均水平50%左右。多年来，我国GDP增长过多依靠投资和出口拉动，高能耗产业发展过快。我国能源转化和利用效率偏低，先进高效能源技术普及率仍然较低，煤炭等化石能源清洁高效利用技术发展不平衡，部分行业开发应用滞后，能源优质化利用程度不高，与发达国家差距明显，节能潜力巨大。

（二）用能结构不够绿色，碳减排压力大

我国“富煤、贫油、少气”的能源资源禀赋，使煤炭一直在我国一次能源生产和消费结构中占据主导地位。2019年我国煤炭占一次能源消费比重约为57.7%，非化石能源近年来有所增长，占比为15.3%，与世界平均水平（15.7%）相当。2019年全球能源相关CO₂排放总量为 3.42×10^{10} t，我国CO₂排放量位于全球第一，排放量为 9.8×10^9 t，是美国的2倍，欧盟的3倍。2020年12月，习近平主席在气候雄心峰会上宣布到2030年，中国单位国内生产总值二氧化碳排放将比2005年下降65%以上。在全球二氧化碳排放量止增的同时，我国排放量仍在继续上升，为实现这一目标，未来温

室气体减排压力巨大。

（三）油气对外依存度持续增高，能源安全形势严峻

我国化石能源的储采比非常低，远远低于世界平均水平。2019 年我国石油、天然气、煤炭的储采比分别为 18.7 年、47.3 年和 37 年，世界石油、天然气、煤炭平均储采比为 49.9 年、49.8 年和 132 年，石油仅为世界平均水平的约 1/3，煤炭仅为世界平均水平的约 1/4。2017 年我国超过美国成为全球第一大石油进口国，2019 年原油消费量达到 6.4×10^8 t，产量为 1.9×10^8 t，进口量为 5.1×10^8 t，对外依存度达 71%。自 2018 年起我国成为最大天然气进口国，2019 年天然气消费量为 3.001×10^{11} m³，产量为 1.762×10^{11} m³，进口量为 1.391×10^{11} m³，对外依存度达到 43% [5]。随着全球地缘政治变化、国际能源需求增加和资源市场竞争加剧，我国能源安全形势严峻。

（四）产能过剩，同质化严重，技术创新能力不足

当前能源及其相关领域，特别是煤炭、钢铁和煤电行业的投资过剩、产能过剩现象较为普遍。科技是推进经济发展和社会进步的根本动力，也是一个国家核心竞争力的重要标志。新能源产业属于战略性新兴产业和技术密集型产业，尚有大型轴承和齿轮箱、控制系统等部分核心设备和工具软件还严重依赖进口，需要攻克其中的“卡脖子”关键技术。高比例新能源并网系统受到新能源波动性、间歇性和不确定性等的影响，供电可靠性不高，且容易受极端天气等影响，亟需从电力系统基础理论、规划方法、调度运行技术等角度研发解决高比例新能源接入电网造成安全运行与可靠供电等问题。此外，在新能源领域，国家和行业标准尚不完善，技术研发缺乏大型测试平台。

三、海上风电在能源转型发展中的地位和前景

（一）海上风电将成为我国大力发展可再生能源的必然选择

1. 海上风能资源丰富，风电效率高

我国拥有超过 1.8×10^4 km 的大陆海岸线，可利用海域面积超过 3×10^6 km²，5~50 m 水深、70 m 高度的海上风电可开发资源量约为 5×10^8 kW [6]；考

虑到 70 m 以上的技术开发能力，实际可开发资源量更多。海上风速高，风机单机容量大，年运行小时数最高可达 4000 h 以上，海上风电效率较陆上风电年发电量多出 20%~40%，具有更高的能源效益；海上风电场远离陆地，不受城市规划影响，也不必担心噪音、电磁波等对居民的影响。

2. 海上风电靠近东部负荷中心，就地消纳方便

我国绝大部分陆地风能、太阳能资源分布在西北部，北部和西北部煤炭资源占全国的 76%，西南部水能资源占全国的 80%，而中东部负荷需求则占全国的 70% 以上。能源基地大多远离负荷中心，最大距离达到 3000 km。中国工程院《我国未来电网格局研究（2020 年）咨询意见》指出，随着我国西部产业发展和东部清洁能源的开发，东部和西部源荷不平衡程度将降低，“西电东送”规模会出现拐点，“西电东送”也面临着不可持续问题。中国工程院咨询研究团队预测，2030 年我国中东部地区最大用电负荷将达到 9.7×10^8 kW，需受入电力超过 3.6×10^8 kW，必须采取“集中开发、远距离输送”与“分布式开发、就地消纳”并举模式。紧邻东部负荷中心的海上风电大规模开发，能够减轻“西电东送”通道建设压力；海上风电与“西电东送”的水电还能在出力上形成季节互补。发展海上风电能够进一步提高可再生能源占比，加快能源结构转型。

3. 带动沿海地区经济发展，形成海洋经济新的增长极

党的十九大报告中明确要求坚持陆海统筹，加快建设海洋强国。发展海上风电，与大力发展海洋经济、建设海洋强国战略高度吻合。“十三五”期间，海上风电产业对沿海县域经济的拉动作用初步显现，广东阳江，江苏如东、大丰等地都在打造世界级海上风电基地，部分积聚区域年产值已超过 100 多亿元，成为地方经济支柱产业。据估算，目前沿海地区海上风电项目储备总投资约为 1.6 万亿元，能够有效地拉动沿海地区经济发展，不仅助力海洋经济再上新台阶，而且在当前形势下形成新的产业链，对于稳增长稳就业起到重要作用。

根据各省规划，到 2035 年，我国海上风电装机将达到 1.3×10^8 kW 左右，与我国目前西电东送容量相当，对促进我国能源结构转型和构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系，将发挥举足轻重的作用。海上风电综合优势明显，东部地区可以把发

展重心转移到海上风电资源的开发，海上风电将支撑我国能源结构转型和海洋经济发展。未来中东部电力负荷也将形成以本地传统电源、“西电东送”、就地分布式新能源和规模化海上风电四点支撑的局面，结构见图 1。

(二) 国内外海上风电发展现状及趋势

1. 国内外海上风电的发展现状

根据全球风能理事会 (GWEC) 统计数据, 2019 年全球海上风电新增装机 6.1×10^6 kW, 累计装机容量达到 2.914×10^7 kW, 比 2018 年增长了 35.5%。2015—2019 年, 全球海上风电市场年均增长近 16%。中国连续两年成为新增装机容量最多的国家, 全球新增 / 累计装机容量情况见图 2 和图 3。

2019 年我国海上风电新增装机 1.98×10^6 kW, 累计装机 6.42×10^6 kW, 提前 1 年完成了“十三五”末装机 5×10^6 kW 的规划目标, 仅次于英国和德国, 位居全球第三, 海上风电装机容量情况见图 4。截至 2019 年年底, 在建项目装机 1.095×10^7 kW, 已

核准待建项目 4.048×10^7 kW。按照各省规划, 江苏、广东等是未来海上风电发展的重点区域, 我国海上风电也将进入高速发展时期 [7]。

2. 国内外海上风电的发展趋势

近些年欧美发达国家在大规模海上风电集中开发的技术集成与关键装备领域进步巨大, 海上风电总体呈现“由小及大、由近及远、由浅入深”的发展趋势, 即单机额定容量逐步增大, 海上风电机组进入 10 MW 时代; 风电场规模越来越大, 单体规模超过百万千瓦, 规模化开发趋势明显; 风场离岸距离和水深不断增加, 分别超过 100 km 和 100 m, 深远海化趋势明显; 竞价上网成为海上风电发展最新模式, 海上风电成本逐步下降。

四、海上风电重点技术

(一) 风电机组技术

目前海上风电机组向着“大容量、轻量化、高可靠”趋势发展。国外最大单机容量达到 12 MW, 国内最大单机容量为 10 MW, 国内外供应商主要风机型号见表 1。

1. 超长超柔叶片技术

叶片是影响风机性能和成本的关键部件, 是衡量国家技术实力的标志之一 [8], 通过弯扭耦合控制实现叶片的自适应降载, 降低叶片单位长度的成本。通过合理的材料布置方案提高叶片面内的气动阻尼, 提高叶片可靠性。柔性叶片配合气动附件的设计方案可以减少叶片的失速风险, 保证机组的发电量。柔性叶片的弯扭耦合, 柔性叶片与变桨系统耦合的稳定性, 叶片变形动态测试等方面仍受制

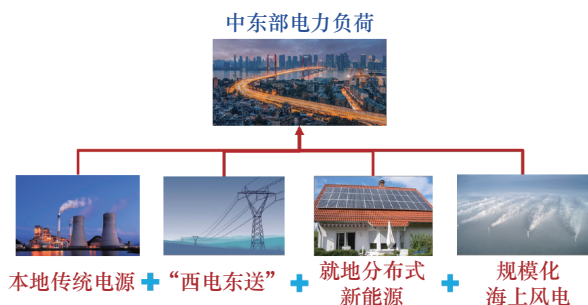


图 1 中东部电力负荷中心能源互补

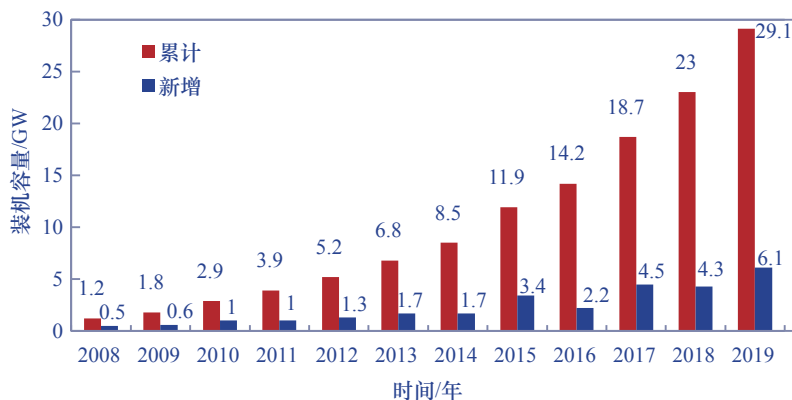


图 2 全球每年新增 / 累计装机容量

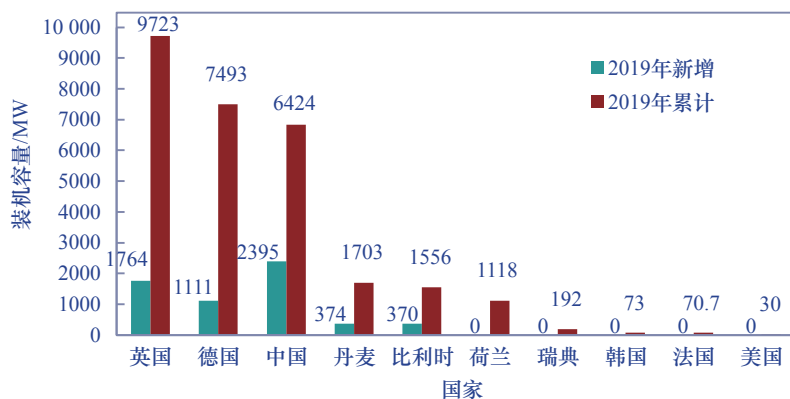


图3 各国2019年新增/累计装机容量

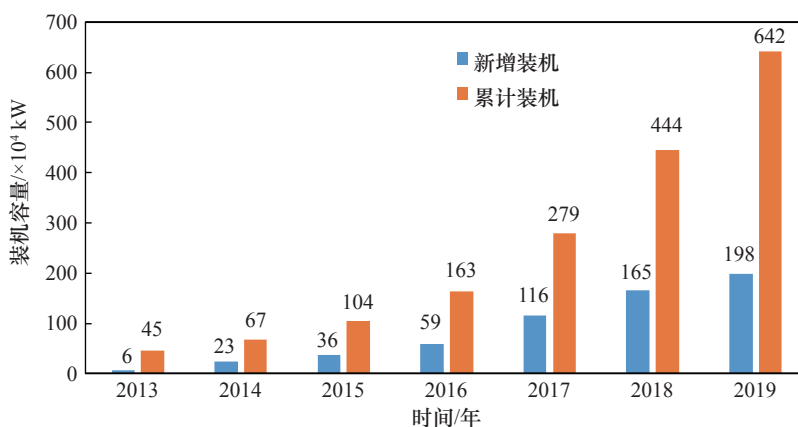


图4 我国海上风电装机容量

注：数据来自中国可再生能源学会风能专业委员会（CWEA）。

表1 国内外供应商主要风机型号

企业	型号	容量/MW	驱动形式	风轮直径/m
通用电气公司	Haliade-X 12 MW	12	直驱永磁	220
西门子歌美飒可再生能源（北京）有限公司	SG 11.0-193DD Flex	11	直驱永磁	200
东方电气集团有限公司	D10000-185	10	直驱永磁	185
明阳智慧能源集团股份公司	SE8.0-10-180	8~10	半直驱永磁	180
MHI Vestas	V164-9.5 MW	9.5	半直驱永磁	164
MHI Vestas	V174-9.5 MW	9.5	半直驱永磁	174
西门子歌美飒可再生能源（北京）有限公司	SG8.0-167DD	8~9	直驱永磁	167
金风科技股份有限公司	GW175-8.0 MW	8	直驱永磁	175
上海电气集团	8.0-167	8	直驱永磁	167
明阳智慧能源集团股份公司	SE7.25-158	7.25	半直驱永磁	158
远景集团	EN-161/5.2	5.2	高速齿轮箱传动	161
中国船舶重工集团海装风电股份有限公司	H171-5 MW	5	高速齿轮箱传动	171

于国外的技术，相关部件材料/软件等进口情况见表2。

2. 风电机组主轴承技术

风电机组主轴承式风机的核心枢纽，不但要具

有防腐防潮等性能，还必须承载整个风机巨大震动冲击[9]。目前国内在主轴承设计布局等方面依然存在薄弱环节，一定程度上依靠国外引进技术，还需进一步深入研究整个轴系，设计适合我国沿海风

情的轴承技术，相关设备进口情况见表3。

3. 直驱永磁风力发电机

目前国内海上风力发电机类型主要有双馈风机和永磁直驱风机两种。它们的主要区别在于发电结构不同，传动不同 [10]。永磁直驱风机相对双馈风机效率更高、能耗较小、受风速等条件限制小，对于我国风电行业发展具有更重要的意义。但因永磁直驱风机制造成本较高，控制难度较大，技术还不成熟等问题，国内未来一段时间永磁直驱风机和双馈风机仍将并行发展。双馈式风机与永磁直驱式风机区别分析见表4。

4. 新型高效风能转换装置

在单风轮 C_{pmax} （风能利用系数最大值）达到0.48的情况下，流过风轮后的风速仅降低20%左右，且主要通过风轮外叶展吸收能量，内叶展能量利用率很低，具有很高的能量梯级利用价值。串列式双风轮机组结构紧凑，单位面积功率密度更高，单位面积内机位更多，总容量更大。双风轮风机功率密

度高、占地少，能够有效提高能源利用率，具有较高风能利用系数。浙江某300 MW海上风电场，风场面积47.5 km²，装有58台5.2 MW机组，如采用等功率双风轮机组，可增加20%~30%机位。

（二）海上输电技术

1. 海上风电单场送出技术

目前海上风电单场送出的技术主要有高压交流输电 (HVAC)、常规直流输电 (LCC-HVDC)、柔性直流输电 (VSC-HVDC)、分频输电 (FFTS) 四种方式 [11,12]，海上风电场输电方式选择主要参考风电场容量和离岸距离，详见表5。海上风电场开发规模的扩大，输电容量和输电距离的增加，机组大型化、受端电网短路电流水平、电网安全稳定等因素，使得海上风电输电直流化方向的发展趋势愈加明显。

2. 大规模海上风电集群组网送出技术

未来可用于大规模海上风电集群组网送出的方

表2 叶片相关部件材料 / 软件等进口情况

设备	项目	类型/型号	进口比例 /%	外资品牌国内生产比例/%	进口原因	主要技术来源及品牌
叶片	材料	碳纤维UD织物	100	0	技术领先	德国Saertex
	材料	碳纤维预浸料	50	30	技术领先	德国Saertex
	材料	聚氯乙烯 (PVC) 泡沫	50	0	国内产能无法满足	意大利 Miracell、Diab
	材料	聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 泡沫	85	15	技术领先	瑞士3A, 比利时 Armacell, 英国Gurit
	气动结构设计	LM75.1	0	100	技术领先	丹麦LM
	设计软件	GH Bladed、ANSYS、Focus	80	0	集成度高	美国GH、ANSYS

表3 主轴承、传动链试验检测设备进口情况

设备	项目	类型/型号	进口比例 /%	外资品牌国内生产比例/%	进口原因	主要技术来源及品牌
整机传动实验台	拖动变频器	18 MW	40	60	高功率IGBT模块技术领先	德国赛米控、英飞凌, 日本富士
	五自由度液压加载系统	弯矩70 MNm	70	30	液压伺服技术领先	美国MTS, 德国 RENK、BIA
	联轴器	扭矩20 MNm	100	0	技术垄断	德国CENTA、RENK
	电网模拟器	6 MW	100	0	技术领先	瑞士ABB
	测试系统	多通道数据采集	100	0	技术领先	美国NI, 德国IMC
	测控系统	可编程逻辑控制器	100	0	技术领先	德国Beckhoff
	电网仿真	实时仿真	100	0	技术垄断	加拿大RTDS

案主要有基于 HVAC 技术的场间交流并联组网交流送出, 基于 VSC-HVDC 的交流并联组网柔直送出, 基于 VSC-HVDC 的多端柔性直流输电和基于 LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 的混合直流输电。

(三) 海洋工程技术

海洋工程技术主要包括勘查工程技术、结构工程技术、岩土工程技术、建造技术以及运营维护技术五部分(见图 5)。水深超过 50 m 的深海区域, 如采用固定式基础结构, 造价将大幅增加, 且目前技术难以实现, 深海浮式风电场将成为海上风电场发展的新趋势 [13]。2018 年江苏亨通光电股份有限公司成功中标葡萄牙海上浮式风力发电输出系统建设项目, 为我国漂浮海上风电项目开发积累了成功经验 [14]。

(四) 运维技术

1. 激光雷达检测技术与风速实时预测

通过装设于漂浮式平台的激光测风雷达进行风

资源观测, 可为设计规划以及优化调度提供高精度风况指导; 通过机舱式激光雷达实现前馈变桨降载运行。分析历史数据及气象数值信息建立预测模型 [15], 输入高精度测量数据进行模型计算, 从而得到风速实时预测结果, 为多尺度场级功率预测以及海上风电能量优化管理提供了测算依据, 风速实时预测流程见图 6。

2. 风电场尾流控制

构建面向控制的稳态尾流模型, 量化机组间因尾流效应产生的功率耦合关系; 通过优化问题的构建求解, 降低尾流效应引起的功率损失, 提高全场发电量。结合模态分解与频域分析手段, 分析尾流的动态特性, 量化尾流效应对机组载荷的影响, 实现功率-载荷协同优化, 风电场尾流控制技术结构如图 7 所示。

3. 风电场优化调度与控制

综合风-浪-流-机的复杂耦合影响, 从固有/可变两个角度表征高可靠性前提下的机组功率调节特性, 量化功率调节与机械载荷指标间的关系。构

表 4 双馈式风机与永磁直驱式风机的区别

特性	双馈式风机	永磁直驱式风机	分析说明
传动系统(齿轮箱)	有	无	双馈风机具有传动系统即齿轮箱, 齿轮磨损等故障率较高
电机体积	小	大	永磁直驱风机电机体积较大, 运输难度也相对更大
制造成本	低	高	永磁直驱风机技术较新, 电子化程度高
维护成本	高	低	永磁直驱风机省去齿轮箱维修费用
空气动力学性能	受限大	受限小	永磁直驱风机通过电磁感应原理发电, 在额定的低转速下输出功率较大、效率较高
电机运行速度	快	慢	永磁直驱风机更能适应低速风, 电机低速运行
电机控制	易	难	永磁直驱风机省去齿轮箱, 全功率逆变, 对风机控制要求更高
发电效率	低	高	双馈式风机支持齿轮箱工作, 本身也耗电, 永磁直驱风机效率更高, 发电效率平均提高 5%~10%
兼容性	弱	强	永磁直驱风机具备较强电容补偿、低电压穿越能力, 对电网冲击小, 兼容性强
可靠性	低	高	永磁直驱风机允许的过载电流大, 总体可靠性显著提高
发展前景	小	大	永磁直驱风机技术较新, 电子化程度高, 我国低风速区比例较高, 未来永磁直驱风机前景更广阔

表 5 海上风电场输电方式选择

序号	风电场容量/MW	离岸距离	输电方式
1	200 以内	80 km 以内	HVAC
2	200~400	300 km 以内	根据距离选择
3	400~600	远海或深海	VSC-HVDC
4	600 以上	远海或深海	LCC-HVDC

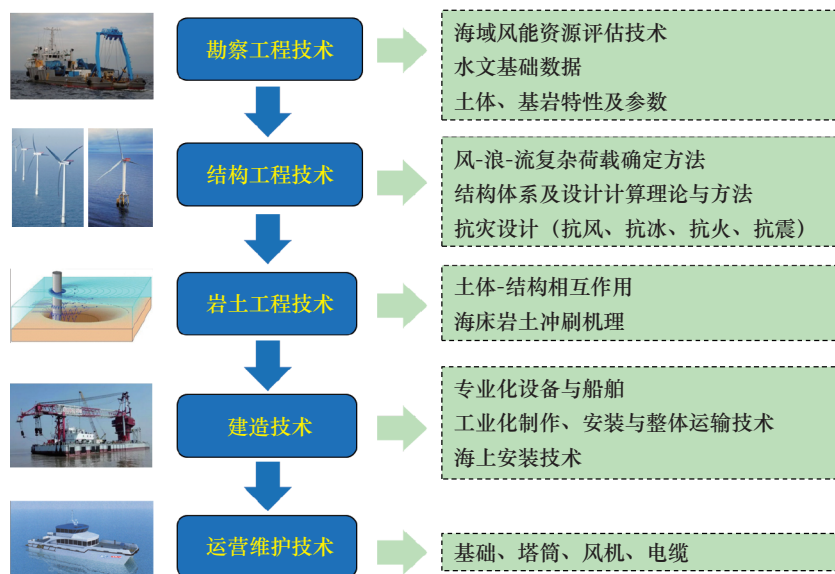


图5 海洋工程技术总览

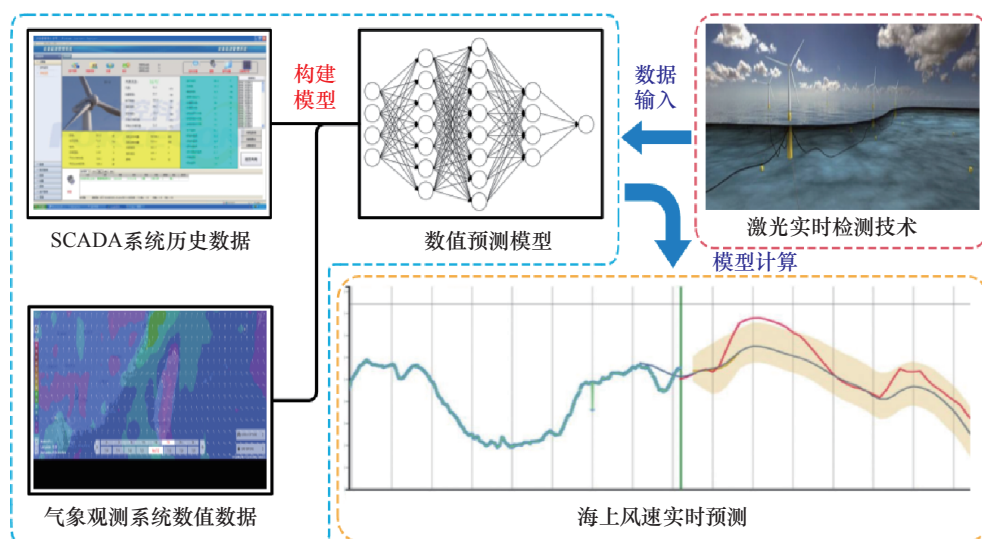


图6 风速实时预测流程图

注：SCADA 指数据采集与监视控制系统。

建群-场-机多层框架的风电场群协同优化调度方法，提高规模化海上风电的并网友好性 [16]。风电场优化调度与控制流程如图 8 所示。

4. 设备智能检测与维修

基于智能数字化检测技术构建风电场大数据云平台，实时更新与计算风场监控状态、故障分析、设备监测及预警等 [17]，以定期维护与故障预警维修相结合的形式，保障机组常规维护，及早发现故障并及时处理，减少故障导致的停机时间，海上风电场运维流程如图 9 所示。建设区域化运维基地及智能调度策略，结合设备健康度检测信息与精细化

气象预报，优化部署海上维修交通工具及检修团队，提高维修效率，降低运维成本。

五、海上风电高质量发展的对策建议

(一) 加大海上风电资源勘察力度，建立资源评估体系

建议政府部门和科研机构，对全国海上风电资源进行详尽的勘测，建立资源评估体系，强力支撑国家能源战略规划、政策法规编制，引导和优化可再生能源项目投资布局。建议在相关教育专业设置

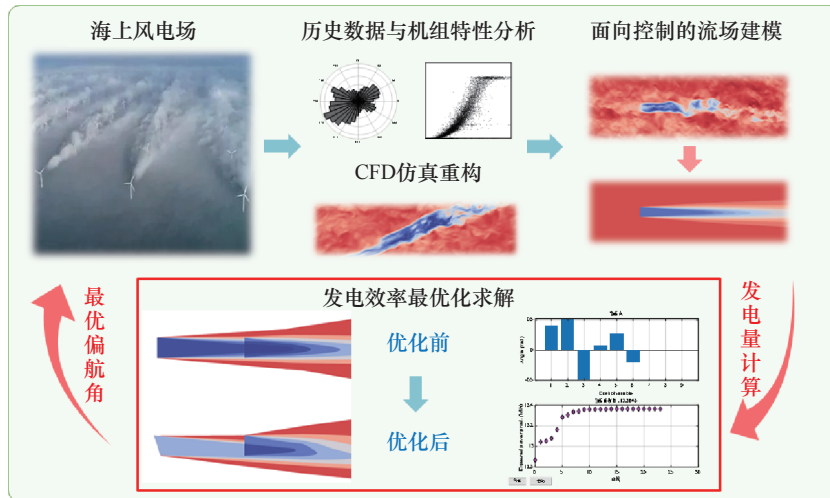


图 7 风电场尾流控制技术
注：CFD 计算流体动力学。

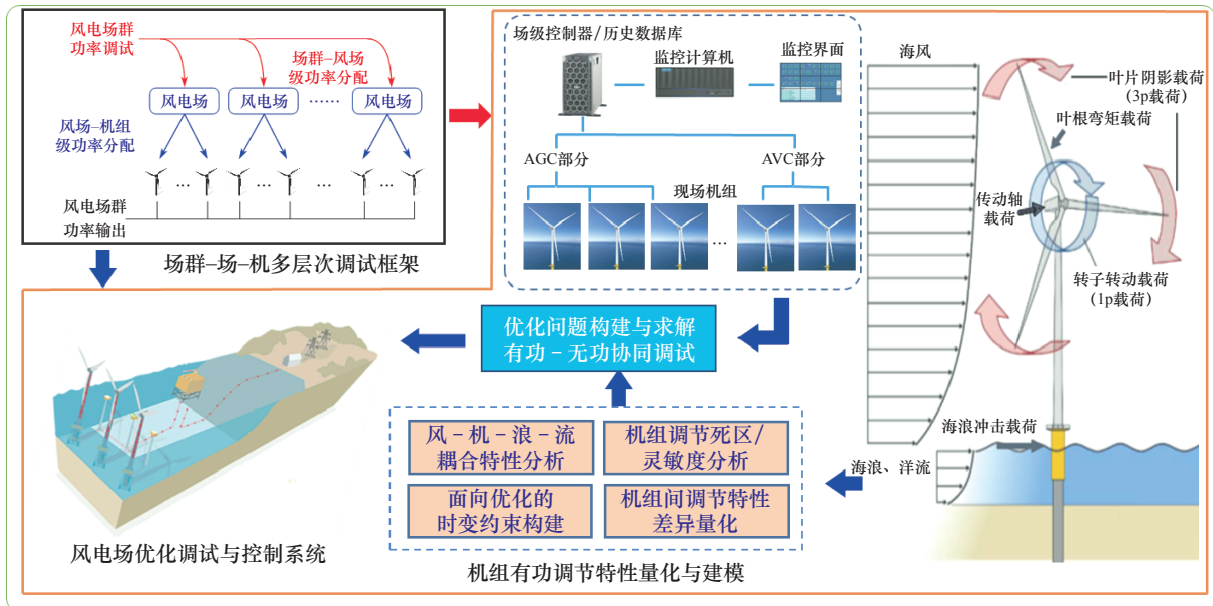


图 8 风电场优化调度与控制
注：AGC 为自动发电控制；AVC 为自动电压控制。

和可再生能源资源勘察评估专业人才培养等方面予以重点支持。

(二) 提高海上风电对我国能源转型发展的认识

革新我国能源资源禀赋理念，规范能源资源禀赋的内涵，旗帜鲜明地将海上风电等可再生能源作为国家能源规划和战略政策中不可或缺的组成部分；国内近海海上风电资源丰富，开发利用潜力巨大，且靠近东部电力负荷中心，就近消纳方便，发展海上风电将成为我国能源结构转型的重要战略支撑，为海洋综合开发利用与建设海洋强

国贡献力量。

(三) 加大国家层面的宏观统筹与整体规划

“十四五”期间强化对海上风电的顶层设计，统筹未来电网建设格局，支持东部沿海加快形成海上风电统一规划、集中连片、规模化滚动开发态势，优化电力生产和输送通道布局；聚焦“新基建”，加快广东、江苏等风能资源良好省份现有的海上风电基地建设，并逐步推动海上风电往深海、远海方向发展，实现海上组网与就地消纳；建议电网企业一同加入海上风电开发，统筹考虑电网格局、电力

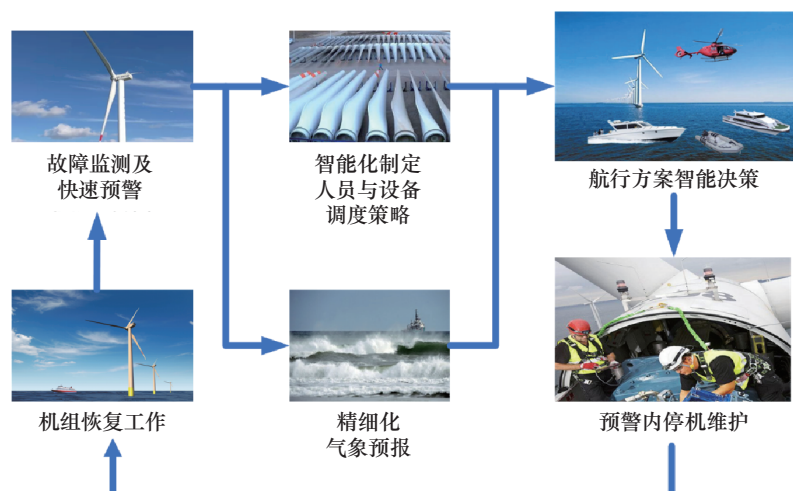


图9 海上风电场运维流程

流和电网安全的影响，统一规划建设海上电力输送通道，减少不必要的重复投资。

（四）聚焦“卡脖子”问题，加强科技创新

海上风电技术和装备要求高、科技内容丰富，利用“十四五”窗口期，建议科学技术部、发展和改革委员会、能源局聚焦海上风电全产业链“卡脖子”问题，加大科技攻关力度，提高装备国产化率，推动关键核心技术实现国产化突破；开展全生命周期多维度技术经济评价，建立引导海上风电科技创新的差异化政策扶持机制；在科研体制方面，探索面向国家需求的新型创新合作机制、激励机制、人才培养机制。

（五）健全政策扶持机制，引导海上风电产业健康发展

改变一刀切、限定时限予以补偿的机制，建立针对海上风电的阶段性退坡补贴机制，避免海上风电片面追求规模、忽视质量的“抢装潮”；调动地方财政补贴积极性，通过补贴实现海上风电产业链延伸和推动地方经济转型升级的良性循环；准确把握“放管服”政策尺度，避免陆上风电“4.95万千瓦现象”；开展全生命周期多维度技术经济评价，建立引导海上风电科技创新的差异化政策扶持机制。

参考文献

[1] 刘吉臻, 王庆华, 房方, 等. 数据驱动下的智能发电系统应用架

构及关键技术 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(12): 3578–3587.
 Liu J Z, Wang Q H, Fang F, et al. Data-driven-based application architecture and technologies of smart power generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3578–3587.
 [2] 中国政府网. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话 [EB/OL]. (2020-09-22)[2020-11-20]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546168.htm.
 Chinese Government Network. Xi Jinping delivers an important speech at the general debate of the 75th UN General Assembly. [EB/OL]. (2020-09-22)[2020-11-20]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546168.htm.
 [3] 中国政府网. 习近平在气候雄心峰会上发表重要讲话 [EB/OL]. (2020-12-13) [2020-12-15]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-12/13/content_5569136.htm.
 Chinese Government Network. Xi Jinping delivers an important speech at the Climate Ambition Summit [EB/OL]. (2020-12-13) [2020-12-15]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-12/13/content_5569136.htm.
 [4] 国家统计局. 中国统计年鉴2020 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
 National Bureau of Statistics. China statistical yearbook of 2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
 [5] BP. Statistical review of world energy (2020 edition) [R]. London: BP, 2020.
 [6] 易跃春. 中国海上风电2018 [J]. 电力设备管理, 2018 (12): 81–83.
 Yi Y C. China offshore wind power 2018 [J]. Electric Power Equipment Management, 2018 (12): 81–83.
 [7] 陈玲娜. 海上风电的发展现状和前景分析 [J]. 中国高科技, 2020 (13): 75–76.
 Chen L N. Development status and prospect analysis of offshore wind power [J]. China High-Tech, 2020 (13): 75–76.
 [8] 张瑞刚, 王冰佳, 王杰彬, 等. 海上风电叶片行业优点及发展阻碍分析 [J]. 船舶工程, 2020, 42(S1): 523–525.
 Zhang R G, Wang B J, Wang J B, et al. Advantages and development obstacles of offshore wind turbine blade industry [J]. Ship Engineering, 2020, 42(S1): 523–525.

- [9] 张宏伟, 闫瑞志, 薛鹏, 等. 风电机组主轴承的设计与技术要求 [J]. 轴承, 2014 (4): 14–19.
Zhang H W, Yan R Z, Xue P, et al. Design and technical requirements of main bearings in wind turbines [J]. Bearing, 2014 (4): 14–19.
- [10] 谢鲁冰, 张振华, 武国洪. 直驱与双馈风机技术流派对比分析 [J]. 应用能源技术, 2012 (8): 42–44.
Xie L B, Zhang Z H, Wu G H. Technology comparison and analysis of direct driving and double fed for the wind power turbine [J]. Applied Energy Technology, 2012 (8): 42–44.
- [11] 张开华, 张智伟, 王婧倩, 等. 海上风电场输电系统选择 [J]. 太阳能, 2019 (2): 56–60, 55.
Zhang K H, Zhang Z W, Wang J Q, et al. Offshore wind farm transmission system selection [J]. Solar Energy, 2019 (2): 56–60, 55.
- [12] 王锡凡, 卫晓辉, 宁联辉, 等. 海上风电并网与输送方案比较 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5459–5466.
Wang X F, Wei X H, Ning L H, et al. Integration techniques and transmission schemes for off-shore wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5459–5466.
- [13] 李翔宇, Gayan Abeynayake, 姚良忠, 等. 欧洲海上风电发展现状 & 前景 [J]. 全球能源互联网, 2019, 2(2): 116–126.
Li X Y, Gayan Abeynayake, Yao L Z, et al. Recent Development and prospect of offshore wind power in Europe [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 116–126.
- [14] 重磅! 亨通中标葡萄牙海上浮式风电海底高压电缆总包项目 [J]. 现代传输, 2018 (4): 6.
Heavy! Hengtong won the bid for Portuguese offshore floating wind power submarine high-voltage cable general contracting project [J]. Modern Transmission, 2018 (4): 6.
- [15] 符杨, 郑紫宸, 时帅, 等. 考虑气象相似性与数值天气预报修正的海上风功率预测 [J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1253–1260.
Fu Y, Zheng Z C, Shi S, et al. Offshore wind power forecasting considering meteorological similarity and NWP correction [J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1253–1260.
- [16] 牛东晓, 赵东来, 杨尚东, 等. 基于改进粒子群算法的海上风电汇集方式与并网优化研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(12): 3146–3155.
Niu D X, Zhao D L, Yang S D, et al. Research on convergence mode and grid-connected optimization of offshore wind power based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(12): 3146–3155.
- [17] 段慧云, 汪洋青. 人工智能技术在风电机组智能巡检中的应用 [J]. 科学技术创新, 2019 (30): 155–156.
Duan H Y, Wang Y Q. Application of artificial intelligence technology in intelligent inspection of wind turbines [J]. Scientific and Technological Innovation, 2019 (30): 155–156.