



清华大学 深圳国际研究生院
Tsinghua Shenzhen International Graduate School

新疆大学 电气工程学院 报告讲座
2026年7月25日，中国 乌鲁木齐

海上风电制绿甲醇系统 及相关优化方法

汇 报 人： 沈欣炜 副教授

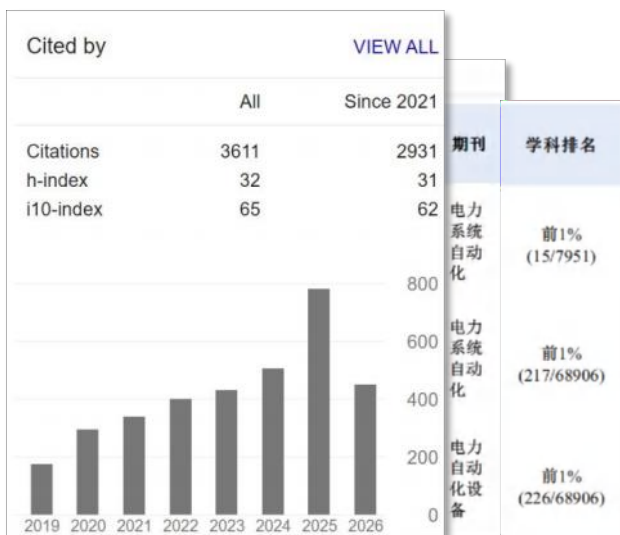
单 位： 清华大学 深圳国际研究生院
海洋工程研究院



沈欣炜

准聘副教授/博导

清华大学深圳国际研究生院



● 教育/访学/工作经历:

□ 清华大学 学士/博士 (韩英铎 院士/朱守真 教授)

□ 曾任 伊利诺伊理工/加州伯克利大学/澳门大学 访问学者

□ 博士后/研究科学家 (孙宏斌 院士/王黎明 教授) 清华-伯克利深圳学院



● 研究方向: 电力系统与综合能源/海洋可再生能源 优化

□ GS被引3600+, H指数32

□ 2024/25中国知网高被引学者TOP 1%

□ 一作及通讯SCI文章40余篇(Nature子刊2篇)

□ 10篇中国学术期刊“高影响力”文章

□ 主持 国家自然科学基金 2项/ 深圳市优青项目 1项/ 广东省海上风电联合基金面上项目2项 (连续两年获批)





● 学术兼职（节选）：

- IEEE高级会员/CSEE会员/CES高级会员/中国运筹学会会员
- IEEE能源互联网协调委员会技术程序秘书
- IEEE Trans. on Sust. Energy/CSEE JPES /Applied Energy 编委

● 学术荣誉（节选）：

- IEEE PES技术理事会青年人才奖（亚太区首位）
- 南方电网科技进步一等奖、广东省电力科技一等奖
- 入选CSEE “青年人才托举工程”
- “F5000” 中国精品科技期刊学术论文奖/CSEE优秀期刊论文奖
- 2019/20/24 IEEE PES GM会议最佳论文奖(Top 4%)



汇报提纲

01 研究背景

02 研究方法

03 结果分析

04 相关研究



汇报提纲

01 研究背景

02 研究方法

03 结果分析

04 相关研究

国家层面政策鼓励



- 《2030年前碳达峰行动方案》指出，推动风电协调快速发展，完善海上风电产业链。
- 《2024年能源工作指导意见》提出，统筹优化海风布局，推动海风基地建设，稳妥有序推动海上风电向深水远岸发展。

规模化与海风消纳



- 江苏如东已建成**亚洲最大海风电场群**，未来10年**近1万亿美元**投资流入全球海风行业。
- 海风大规模接入后，**间歇性、波动性**影响电网安全稳定运行
- **海风制氢**成为提升风电消纳率的首选方案

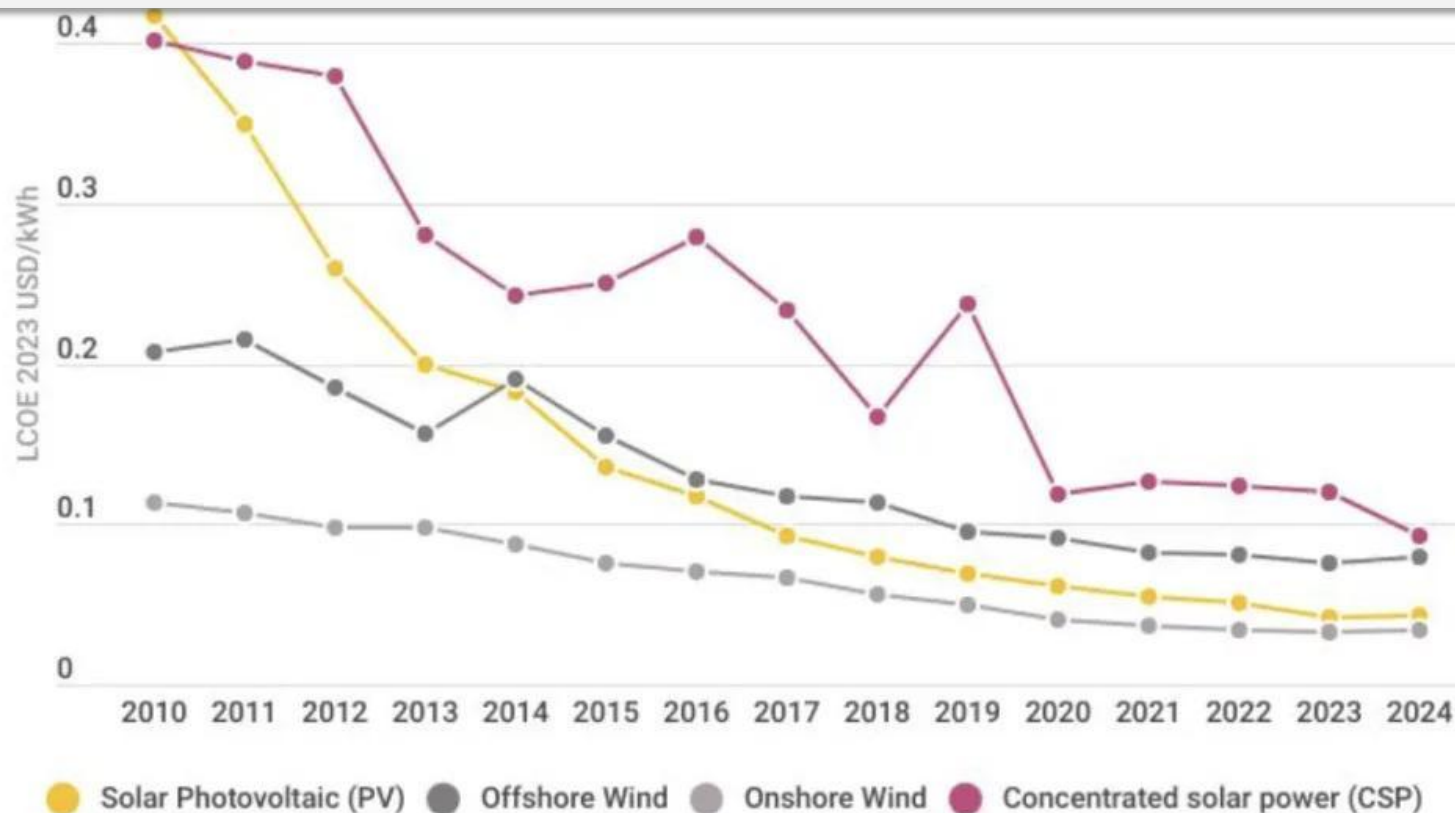
海风制氢陷入困局



- 中国、英国、德国、荷兰等国均开始布局GW级以上项目
- 过去一年中，欧洲数个海风制氢项目纷纷宣告**放弃或延迟**
- 与灰氢、蓝氢相比，**缺乏经济性与竞争力**（补贴力度低、材料昂贵、电力供应不足...）

向海图强、向海而兴，海上的风吹出绿色的氢——海风制氢研究大有可为！

- 为推动全球海上风电成本降低、性能提升及大规模部署，各方已作出重大努力。
- “The cost-competitiveness of renewables is today’ s reality...the avoided fossil fuel costs in 2024 reached up to \$ 467 Bn. ”（可再生能源的成本竞争力已成为当今现实.....2024年节约的化石燃料成本高达4670亿美元）——Francesco La Camera, Director-General of IRENA



过去几年各类可再生能源的平准化度电成本（LCOE）趋势

中国海上风电的发展：

□ 2025年新增风电装机容量120GW，其中陆上风电110 GW，**海上风电6.6GW**。

2015-2025年中国海上风电装机容量及增长率





运载氢气的船舶



“中远海运杨浦”号 (2025年)
中国首艘使用甲醇燃料的船舶

“氢”

- H_2
- CH_4 甲烷
- CH_3OH 甲醇
- NH_3 氨

● 黑氢 (Black Hydrogen)

基于煤炭生产

● 灰氢 (Grey Hydrogen)

基于油气生产

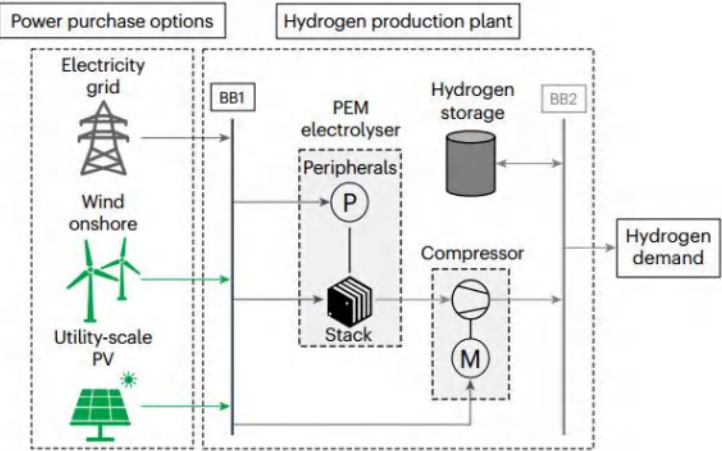
● 蓝氢 (Blue Hydrogen)

基于油气生产+CCUS

● 绿氢 (Green Hydrogen)

基于可再生能源生产

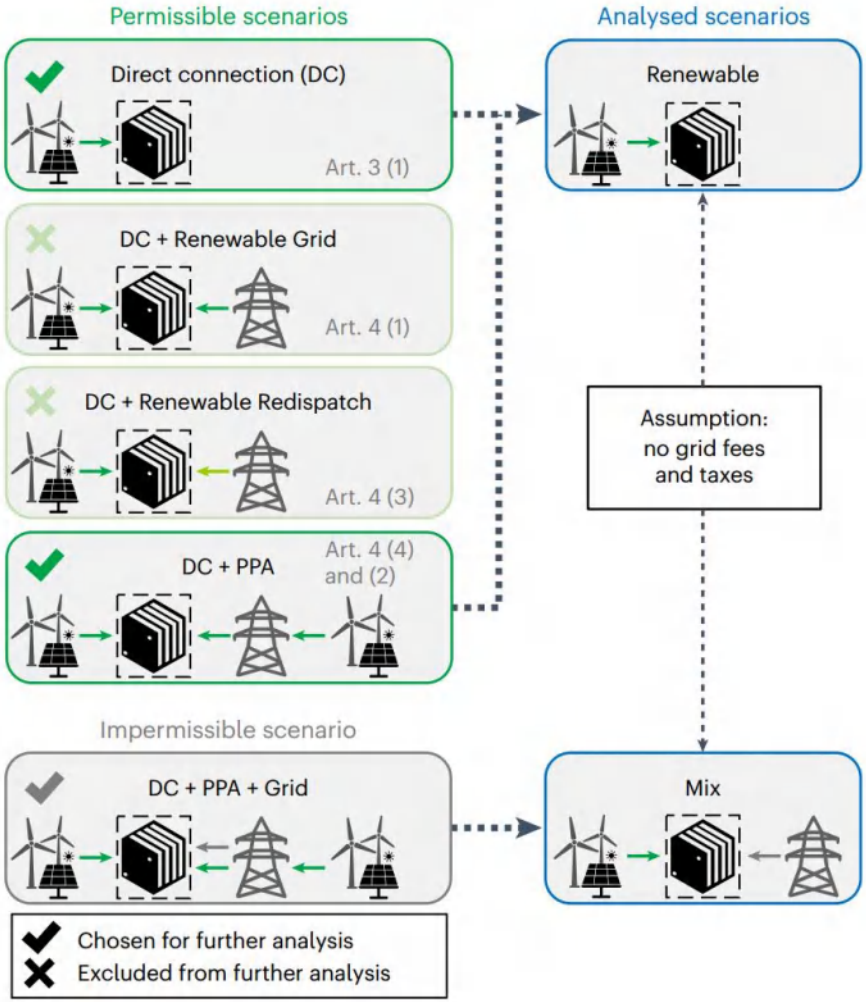
欧盟法规对“绿氢”的生产进行了严格的限制，这对生产系统的配置有重大影响^[1]



系统配置

3种可被计入“绿氢生产”场景：

- 直接连接（DC）；
- 在可再生能源比例超过90%的地区采用电网供电；
- 签订可再生能源电力购买协议后采用电网供电（PPA）。



场景生成及削减（根据欧盟可再生能源指令）

附加约束条件

- Balance场景附加约束，第k个月的电解槽系统功率之和不允许超过相应月份的潜可再生能源功率之和。

$$\sum_{t=k \times 730 + 1}^{(k+1) \times 730} (P_{ElySys,t}) - \sum_{t=k \times 730 + 1}^{(k+1) \times 730} (P_{nom,WT} \times p_{WT,t} + P_{nom,PV} \times p_{PV,t}) \leq 0 \quad \forall k \in \{0, 1, 2, \dots, 11\}$$

- 可再生能源Share场景附加约束。电解槽系统年总功率的90%不允许超过潜在RES功率之和。

$$\sum_{t=1}^T (P_{ElySys,t}) \times 0.9 - \sum_{t=1}^T (P_{nom,WT} \times p_{WT,t} + P_{nom,PV} \times p_{PV,t}) \leq 0$$

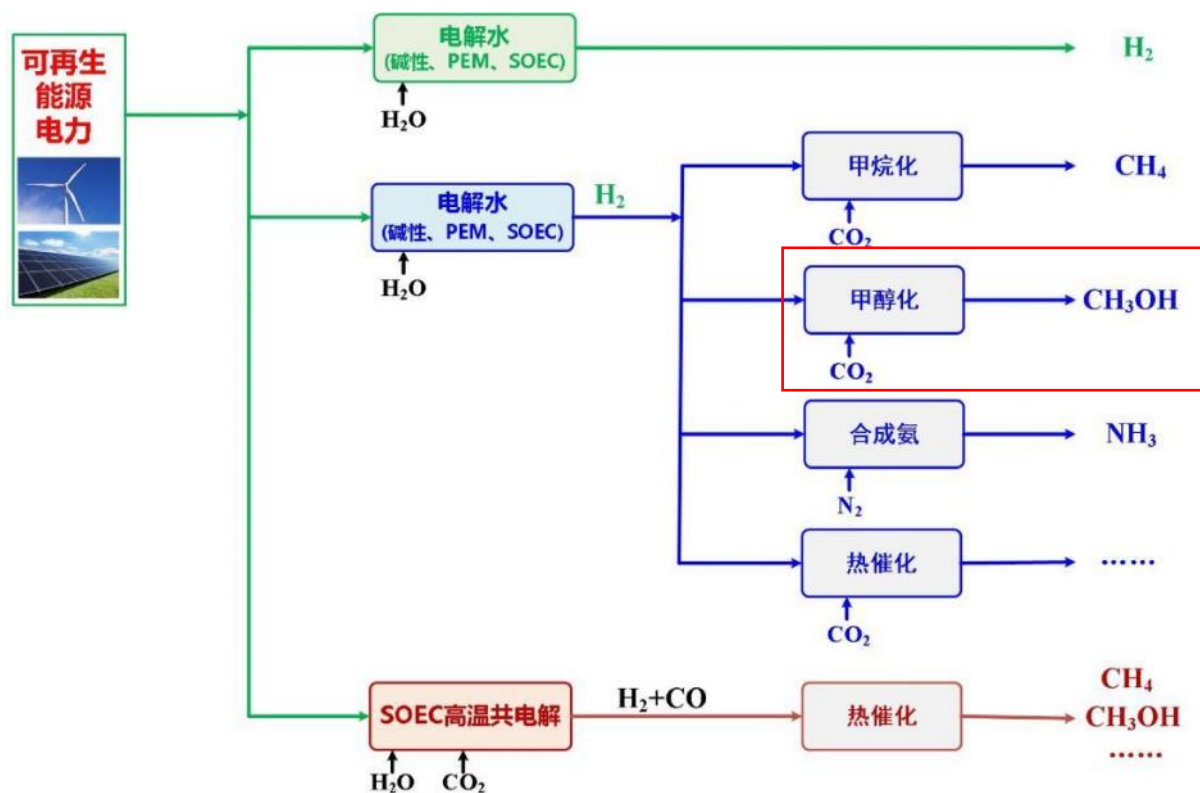
- 碳排放强度(EI)计算/限制

$$i_{e,H_2} = \frac{E_{Grid} \times i_{e,Grid}}{d_{H_2}}$$

- **国际海事组织 (IMO) MEPC 80:** 到2030年, 国际海运温室气体年度排放总量比2008年至少降低20%, 并力争降低30%; 到2040年, 国际海运温室气体年度排放总量比2008年至少降低70%, 并力争降低80%。
 - **美国:** Clean Shipping Act 《清洁航运法案》
 - **欧盟:** EU Emission Trading System (ETS) 《欧盟排放交易体系》^[1]、
FuelEU Maritime Regulation 《欧盟海运燃料法规》^[2]
-
- **EU ETS:** 所有进出欧洲经济区 (EEA) 港口的5000 GT以上船舶需购买欧盟碳配额, 并在2024、2025年和2026年分阶段将海运业排放量40%、70%和100%纳入EU ETS
 - **FuelEU Maritime Regulation:** 作为EU ETS补充, 阶段性设定了减少船舶排放强度的目标。与2020年基线相比, 所需的排放强度降低从2025年的2%, 直到2050年的80%



- ❑ 主要的**替代燃料** (renewable fuels of non-biological origin, RFNBO) 基于绿氢生产
- ❑ 在2024年上半年全球新造船订单中, 采用**替代燃料**的船舶总吨位已占有所有新造船订单的**41%**
- ❑ 随着海运脱碳政策的不断加强, 海运企业愿意为RFNBO支付绿色溢价, 绿氢经济性逐渐显现



Power-to-X 制取RFNBO示意图

- **绿色甲醇——最具经济性和应用潜力的RFNBO^[1]**, 新增数量仅次于液化天然气动力船。
- **海上风电制取绿醇并向海运业供应具备巨大潜力:**
 - ✓ **原位生产与加注:** 绿醇的重要需求在海运, **海上风电**可直接接入港口附近工厂合成甲醇, 避免运输相关的费用和碳排放, 有利于满足欧盟严格的RFNBO政策;
 - ✓ **欧盟海上风电资源丰富:** 欧盟近海风电价格已趋于平价, 可以在无补贴情况下盈利^[2], 且附近海域风资源丰富, 适合作为绿醇电力来源;
 - ✓ **二氧化碳加氢制甲醇工艺成熟:** 可以直接建设海上风电制甲醇项目, 或改造已有海上风电制氢项目制甲醇。

[1] Stolz, B., Held, M., Georges, G. et al. Techno-economic analysis of renewable fuels for ships carrying bulk cargo in Europe. Nat. Energy 7, 203–212 (2022).

[2] Brandt, J., Iversen, T., Eckert, C., et al. Cost and competitiveness of green hydrogen and the effects of the European Union regulatory framework. Nat. Energy 9, 703–713 (2024).



汇报提纲

01 研究背景

02 研究方法

03 结果分析

04 相关研究

系统配置

- 设计港口原位制取-加注绿醇系统，电、热、气（氢气、甲醇）、碳多能耦合
- 满足欧盟可再生能源指令（RED）的电力与二氧化碳来源

场景&指标设计

- 对不同电力来源与碳捕集技术进行组合，得到4种系统配置场景
- 引入经济性、绿色性等多种评价指标辅助场景决策

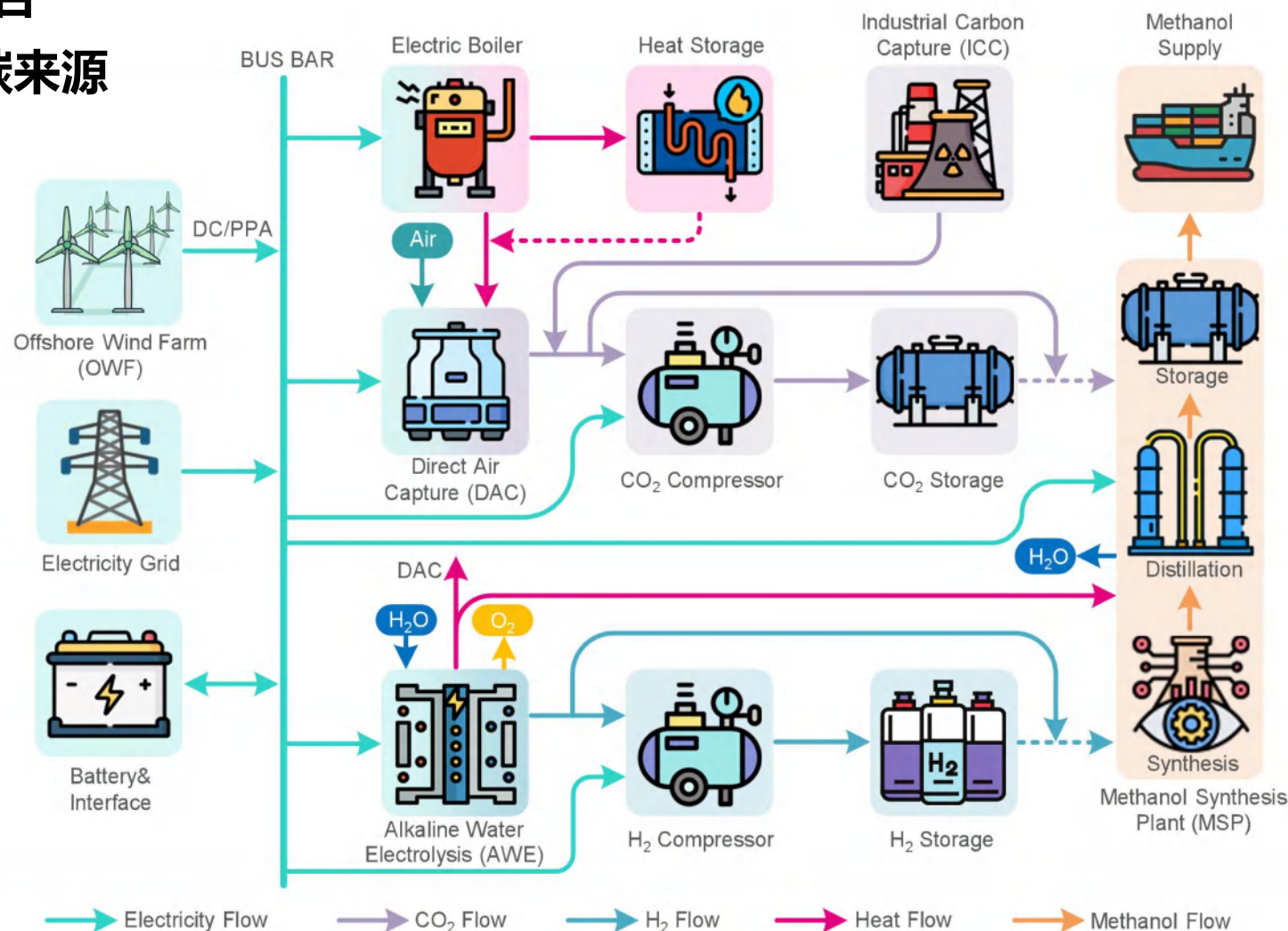
优化决策

- 目标函数：最小化平准化甲醇成本（Levelized cost of methanol, LCOM）
- 决策变量：各设备额定容量+全年8760小时运行变量

□ 电、热、气（氢气、甲醇）、碳多能耦合

□ 满足欧盟RED^[1-3]要求的电力与二氧化碳来源

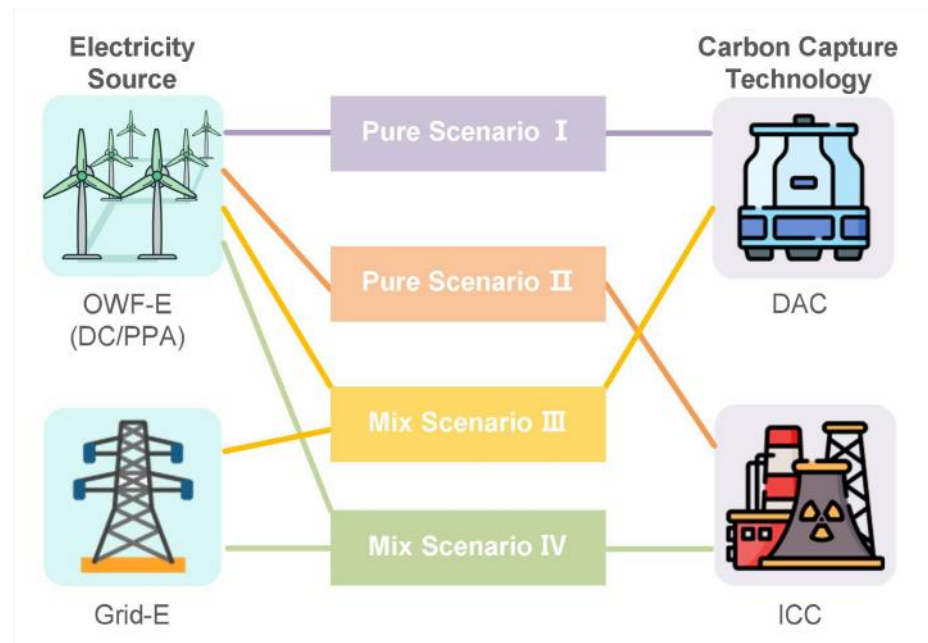
- ✓ **电**：海上风电场（OWF）、上级电网、电化学储能
- ✓ **气**：甲醇合成系统（MSP）、碱性水电解系统（AWE）、氢气压缩机、储氢罐
- ✓ **热**：电解余热、电热锅炉、储热装置
- ✓ **碳**：低温直接空气碳捕集（DAC）、工业烟气碳捕集（ICC）、压缩机、储碳装置。



港口原位制取-加注绿醇系统组成示意图

□ 对不同电力来源与碳捕集技术进行组合，得到4种系统配置场景

- ◆ 海上风电（OWF-E）是必要的电力来源
- ◆ 是否使用上级电网供电（Grid-E）将情景分为Pure Scenario和Mix Scenario。
- ◆ 四种方案的技术组合：
 - ✓ Pure Scenario I：OWF-E+直接空气捕集（DAC）
 - ✓ Pure Scenario II：OWF-E+工业碳捕集（ICC）
 - ✓ Mix Scenario III：（OWF-E+Grid-E）+DAC
 - ✓ Mix Scenario IV：（OWF-E+Grid-E）+ICC



基于不同电力来源和碳捕集技术组合设计的场景

□ 引入经济性、绿色性等多种评价指标辅助场景决策

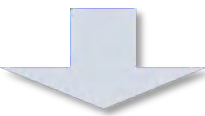
- **经济性指标：**平准化甲醇成本（LCOM）：[项目全生命周期内每单位质量甲醇的生产成本](#)
- **绿色性指标：**RFNBO政策中规定的温室气体排放节约量（GHG-ES），至少每月核查一次

□ 各类设备输入输出特性

能量平衡	$EF_{h,k}^{EX} + \sum_{n=1}^N EF_{n,h,k}^{OUT} = \sum_{n=1}^N EF_{n,h,k}^{IN}, \quad \forall h,k$
能量变换	$EF_{n,h,k}^{OUT} = \lambda_{n,k',k} \times EF_{n,h,k'}^{IN}, \quad \forall n,h,k,k'$
工作范围	$CAP_{n,k} \geq 0, \quad \forall n,k$ $\xi_{n,k}^{MIN} CAP_{n,k} \leq EF_{n,h,k}^{IN} \leq \xi_{n,k}^{MAX} CAP_{n,k}, \quad \forall n,k$
爬坡约束	$EF_{n,h,k}^{IN} - EF_{n,h-1,k}^{IN} \leq \mu_{n,k}^{UP} \times EF_{n,h-1,k}^{IN}, \quad \forall n,h,k$ $EF_{n,h-1,k}^{IN} - EF_{n,h,k}^{IN} \leq \mu_{n,k}^{DOWN} \times EF_{n,h-1,k}^{IN}, \quad \forall n,h,k$

□ 各类能量存储设备建模

$\delta_{n,h,k}^{IN} + \delta_{n,h,k}^{OUT} = 1, \quad \delta_{n,h,k}^{IN}, \delta_{n,h,k}^{OUT} \in \{0,1\}$
$0 \leq EF_{n,h,k}^{IN} \leq \delta_{n,h,k}^{IN} \times \xi_{n,k}^{MAX} \times CAP_{n,k}$
$0 \leq EF_{n,h,k}^{OUT} \leq \delta_{n,h,k}^{OUT} \times \xi_{n,k}^{MAX} \times CAP_{n,k}$
$SOC_{n,k}^{MIN} \leq SOC_{n,h,k} \leq SOC_{n,k}^{MAX}$
$SOC_{n,h,k} = SOC_{n,h-1,k} + (\eta_{n,k}^{IN} \times EF_{n,h,k}^{IN} - \frac{EF_{n,h,k}^{OUT}}{\eta_{n,k}^{OUT}}) \times \Delta h$



□ 目标函数：最小化平准化甲醇成本LCOM

$$\min LCOM = \frac{\sum_{n=1}^N (CAPEX_n + OPEX_n) + EC}{Methanol Production}$$

CAPEX: Capital Expenditure资本支出

OPEX: O&M Expenses运维成本

EC: External costs外部成本 (如购电成本)



汇报提纲

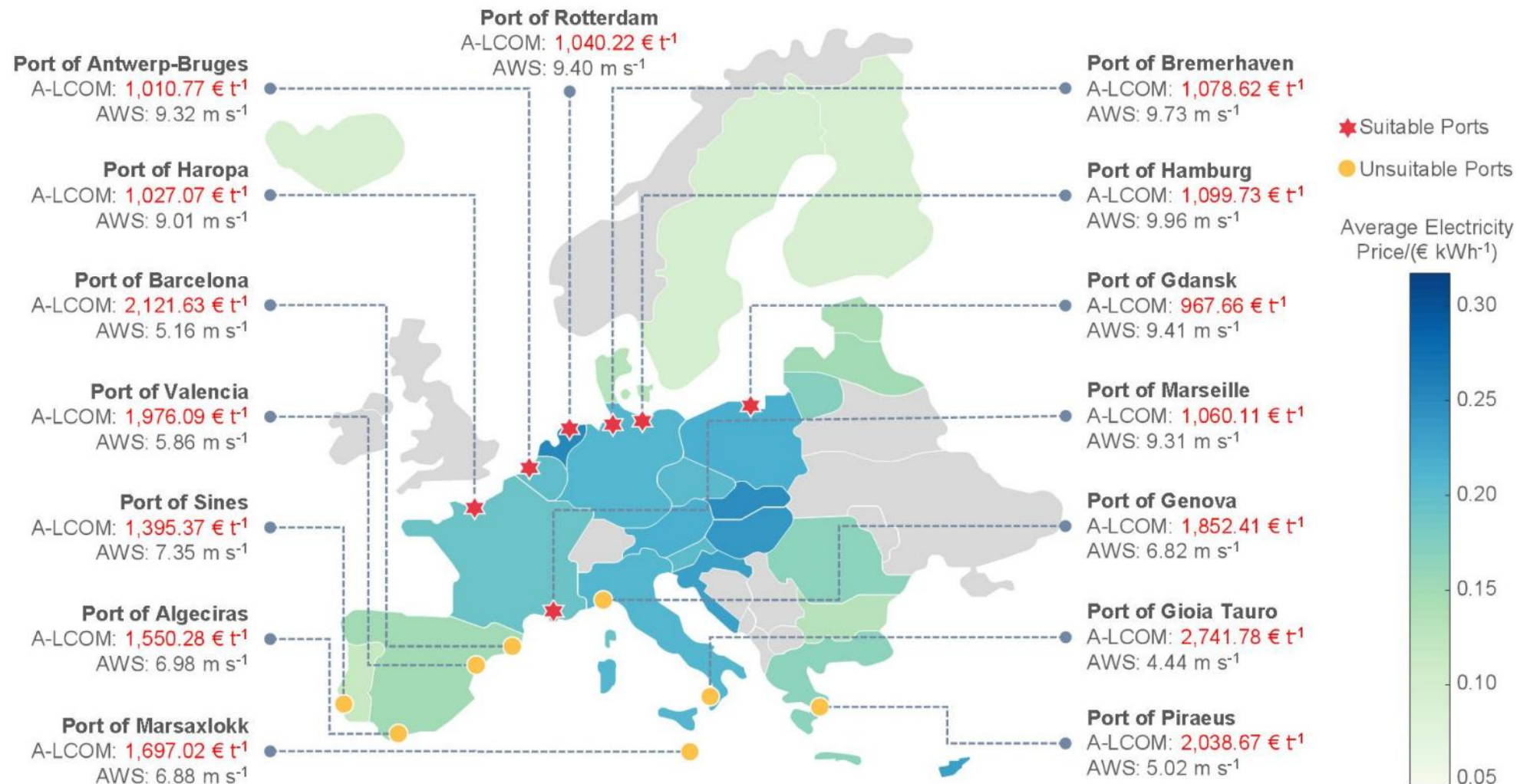
01 研究背景

02 研究方法

03 结果分析

04 相关研究

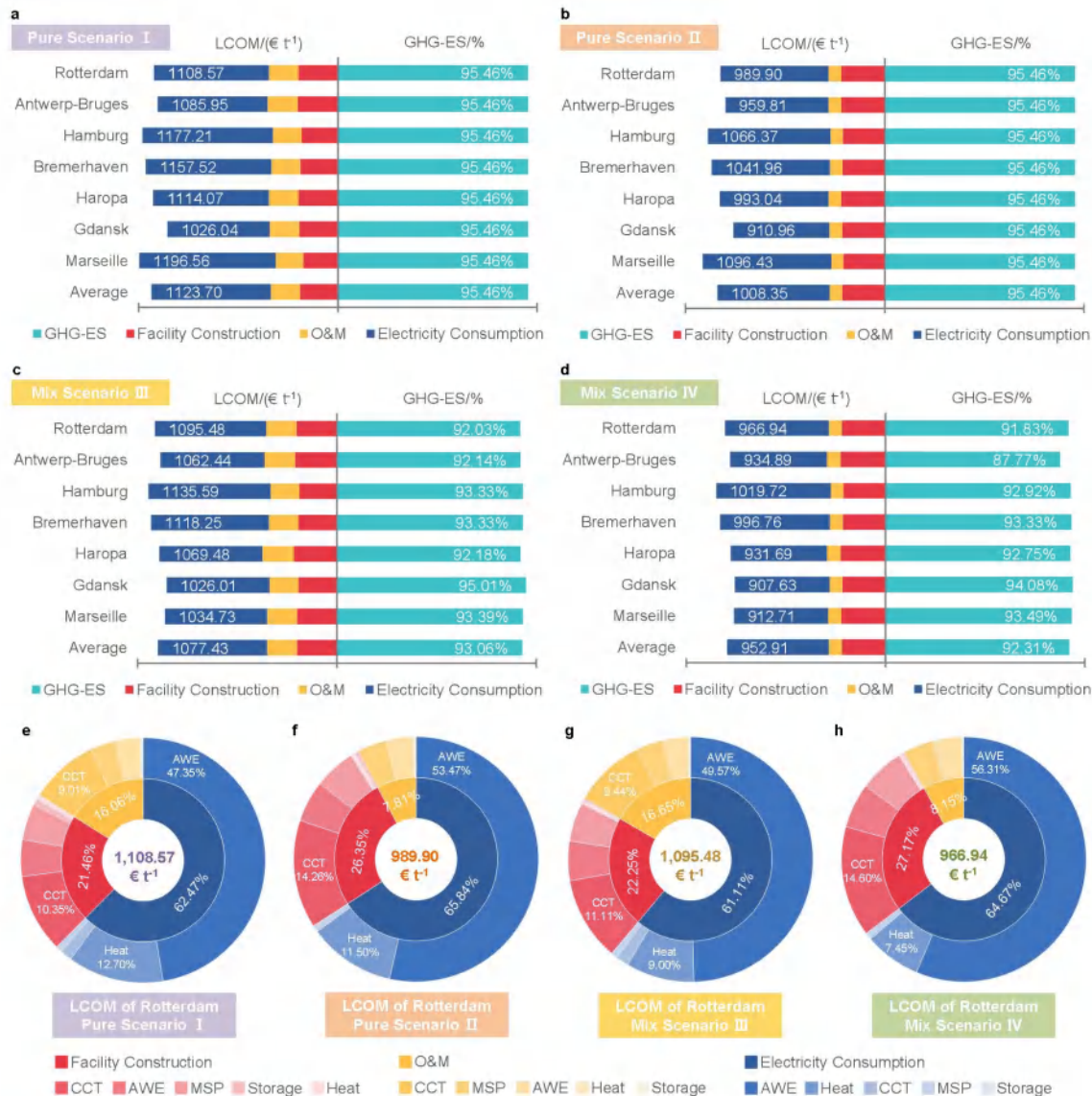
在欧盟港口生产绿色甲醇潜力分析



欧盟前15大集装箱港口制取甲醇的LCOM

并不是所有港口都适合生产绿醇（取决于风资源，★ 为选中的港口）

在欧盟港口生产绿色甲醇潜力分析



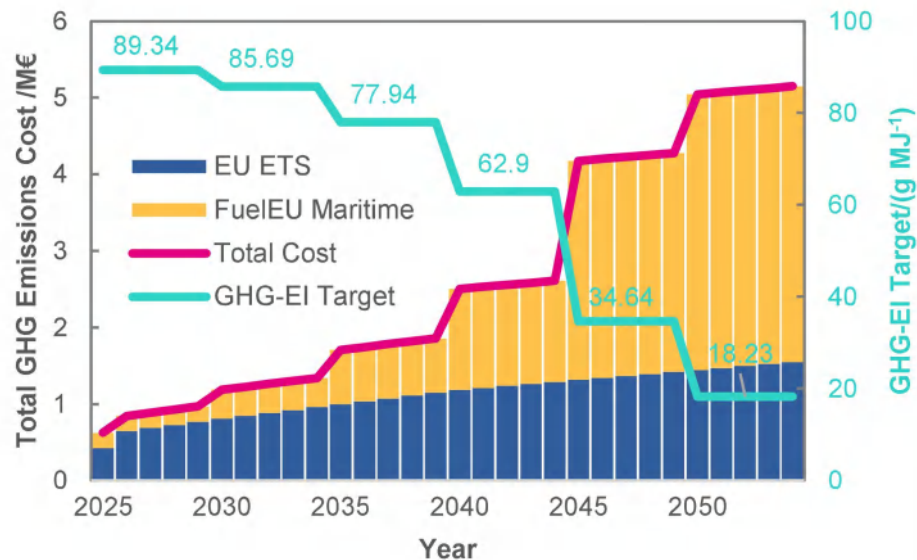
在选中的7个港口内，不同场景下的LCOM及年均GHG-ES

在当前（2025年）：

□ LCOM在907.63~1196.56 €/t，小于当前绿醇成交价2000 €/t，仍有利可图，其中电力消耗占据了60%以上

□ 满足GHG-ES绿色指标前提下，电网电力供应可以平滑风电出力，降低LCOM (III < I , IV < II)

□ 碳来源：工业捕集ICC比空气捕集DAC更经济(II < I , IV < III)



□ 2025~2050年某大型集装箱船在EEA航行的排放总成本

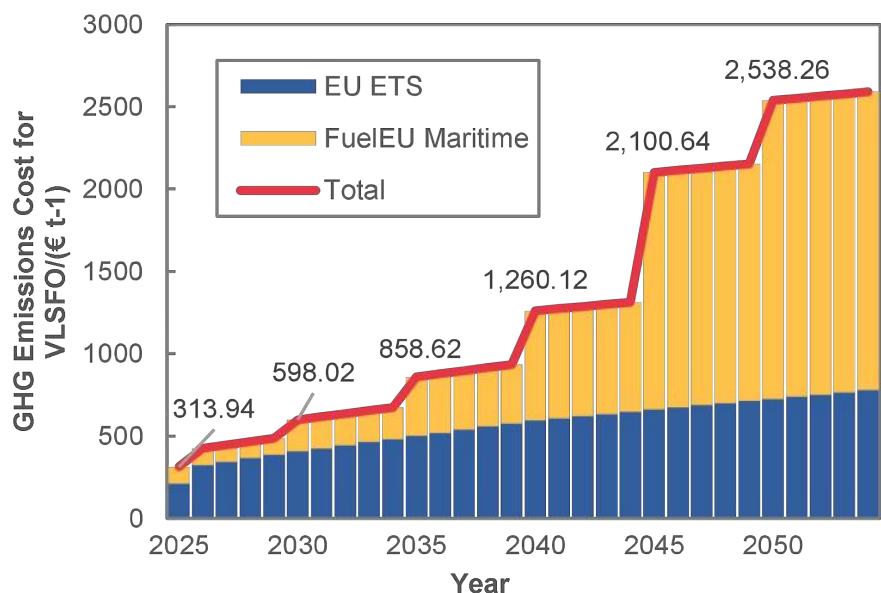
EU ETS: 在2024、2025年和2026年分别将排放量40%、70%和100%纳入

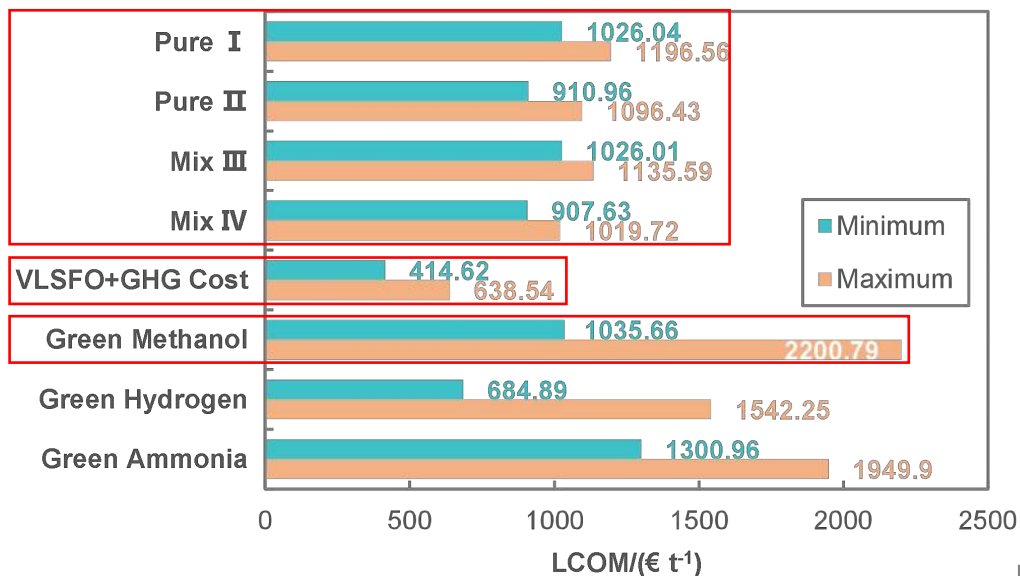
FuelEU Maritime: 温室气体排放强度 (GHG-EI) 限制基准为91.16 gCO₂eq/MJ (2020年基线), 所需GHG-EI降低从2025年-2%开始, 到2050年-80%。



□ 2025~2050年当前主流燃料(低硫燃油VLSFO)排放成本预测

- 成本随年份增加超线性增加, 2025~2040年, FuelEU Maritime力度相对较弱, EU ETS成本更高, 但2040年后, FuelEU Maritime罚款力度显著增加。
- 总体而言, 足够长的缓冲期 (2025~2040) 为海运业向绿色燃料的过渡提供了充分时间。

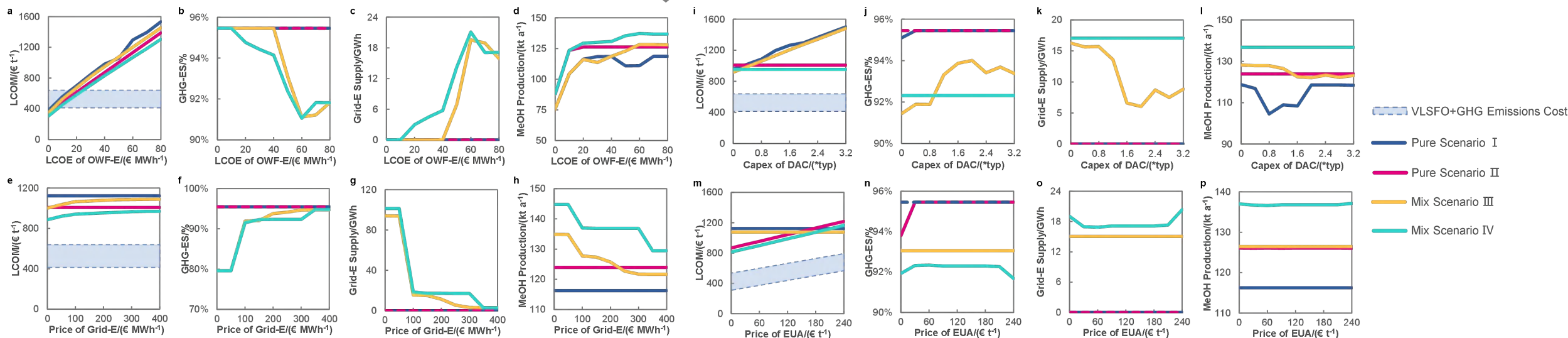




2025年几种潜在解决方案得到的等效LCOM

- 不同场景的LCOM均远小于当前大部分绿醇项目的LCOM (1035.66~2200.79€/t)，与最低值相当
- 2025年对VLSFO施加的排放成本较低，折算为甲醇后的LCOM只有414.62~638.54 €/t。这可能会让船舶运营商在当前阶段“付费遵守”，而不是有效激励他们使用替代燃料。

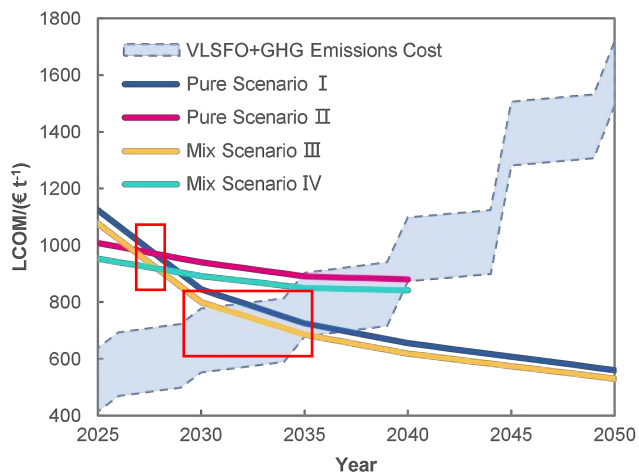
关键因素灵敏度分析 (风电价格、电价、DAC成本、碳价)



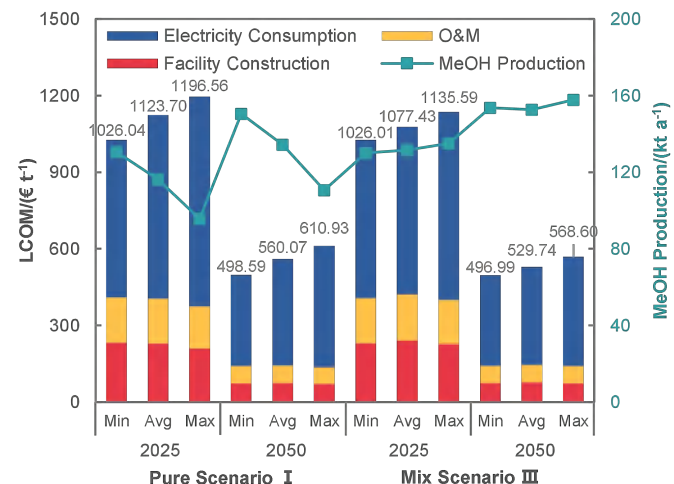
可变范围内，目前（2025年）海风绿醇与VLSFO相比仍不具备成本竞争力

□ 在未来，海风制取绿色甲醇的成本竞争力会迅速显现：

- 2025~2050年内，对单位质量VLSFO所施加的排放成本逐年超线性增加
- 随着各类设备的技术进步和规模化发展（DAC、电解槽、甲醇合成），项目LCOM也会逐渐降低



2025~2050年的
不同场景LCOM变化
(ICC仅被允许在
2041年前使用)



场景 I 与 III 在 2025
年和 2050 年的
LCOM 范围、组成，
以及年甲醇产量

□ 经济性：LCOM在2025~2050年下降比例达50%

□ 竞争力：2030-2035年海风绿醇将与VLSFO成本平价，由两个协同机制驱动：

- 到2035年，EU ETS与Fuel EU Maritime预计将使VLSFO成本增加85.7%-158.9%
- 技术进步使绿色甲醇生产成本降低10.8%-36.4%

□ 碳来源：随着碳价上涨及碳捕集技术成熟，在2030年前，DAC就可以取代ICC成为更经济碳来源（I < II, III < IV）

研究意义

- 随着海运脱碳政策的不断加强，全球海运业寻找绿色替代燃料以确保合规
- 海运企业愿意为**氢基衍生物燃料（RFNBO）**支付绿色溢价，绿氢经济性逐渐显现

研究方法

- 模型设计：基于欧盟RFNBO法规，实现港口原位制取-加注绿醇系统优化规划
- 经济性评估：考虑新出台的EU ETS和FuelEU法规影响，评估海风制取绿醇的成本竞争力。

主要结论

- 考虑欧盟海运业严格的碳排政策，在2030-2035年，海风制绿醇成本将低于低硫燃油。



汇报提纲

01 研究背景

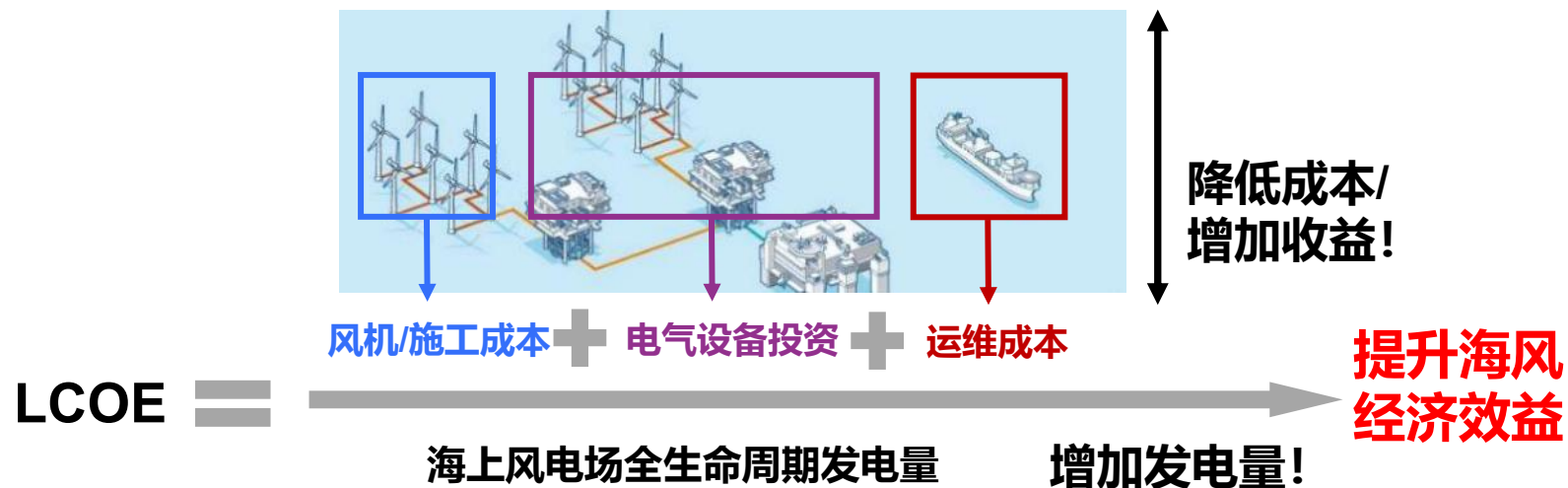
02 研究方法

03 结果分析

04 相关研究

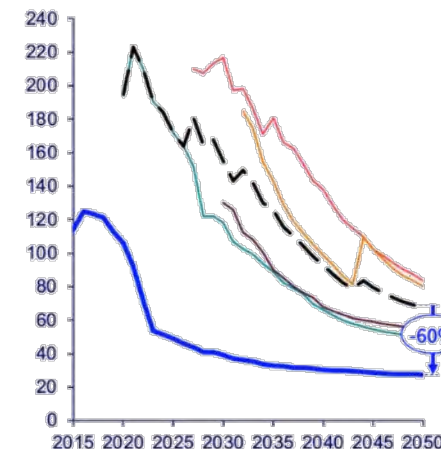
海上风电LCOE

- 平准化度电成本(Levelized Cost of Energy), 体现海上风电综合经济效益
- 2025中国海上风电 LCOE $\approx 0.34-0.45$ 元/kWh^[1] > 煤电 (0.26元/kWh)
- 深远海风能资源条件相对较好, 但设计、设施、运输、施工、运维成本远高于近海海上风电
- 随着补贴退出、风电开发往深远海发展, 降本增效需求更加迫切



平均LCOE: 中国与亚太区其它市场对比 (US\$/MWh)

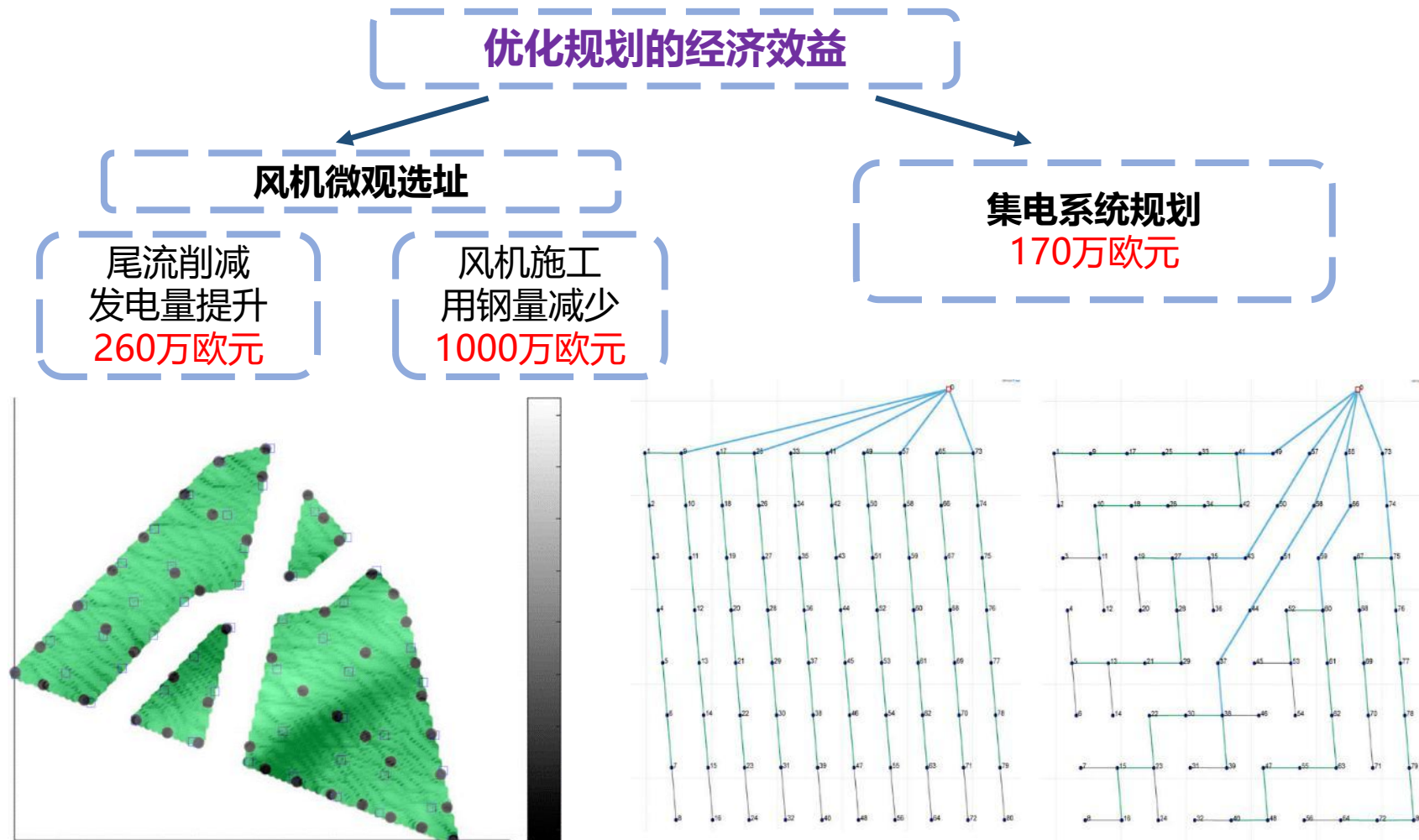
海上风电



— 中国大陆 — 东南亚 — 日本、韩国和台湾地区 — 南亚 — 大洋洲 — 亚太 (除中国大陆外)

- 增加发电量: 优化风机排布, 减小风机间尾流影响 (优化微观选址), 提升可靠性
- 降低成本: 减少电气设备投资 (优化集电系统), 制取高附加值产品 (海风制氢/醇/氨)

- 欧洲知名海上风电建设商 **Vattenfall** 经过实践探索得出：数学优化在海风场规划中应用得当，可为单个风场带来 **1000-1500万欧元** 显著经济效益^[1]。
- 早在2019年，**Vattenfall** 就在多个风场中累积实现 **1.5亿欧元** 的效益^[2]。



数学优化在海风建设开发各个环节中均可以产生巨大效益！

[1] Fischetti M, Kristoffersen JR, Hjort T, Monaci M, Pisinger D. Vattenfall optimizes offshore wind farm design. INFORMS Journal of Applied Analytics, 2020, 50(1):80–94.

[2] Fischetti M, Fischetti M. Integrated Layout and Cable Routing in Wind Farm Optimal Design. Management Science, 2022.

数学优化理论在海风全生命周期应用**关键挑战**在于:



风机微观选址

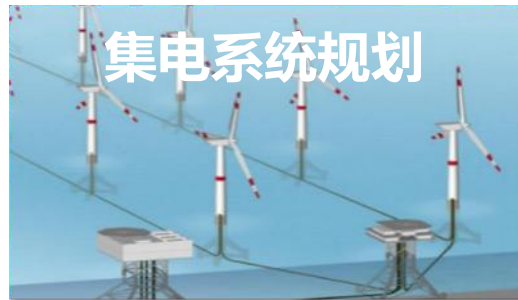
风机间风速相互影响 (**尾流效应**)



合理排布**减少尾流**, 提升发电量



尾流效应强非凸



集电系统规划

系统故障修复时间长 (**可靠性**)



平衡经济性与可靠性



目标/约束复杂



风-氢系统规划

产品类型多样化 (**经济性**)



减少平准化制氢成本**LCOH**



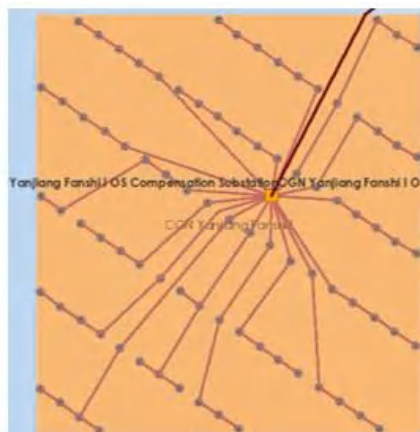
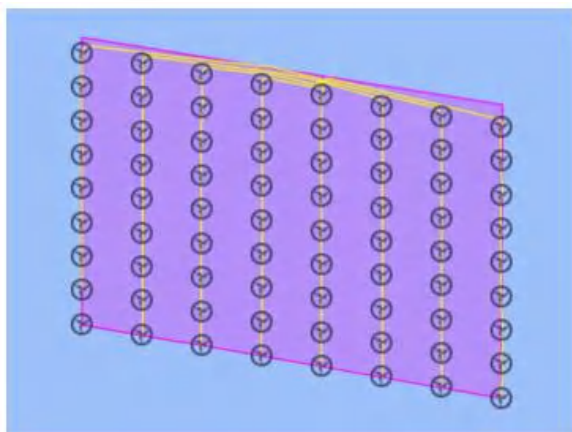
设备动态特性、多重不确定性

$$\begin{aligned} \min & F(x) \\ \text{s. t. } & G(x) \leq 0 \\ & x \in D \end{aligned}$$

核心科学问题: 复杂组合优化问题的建模与求解

难点

如何考虑规则排布需求、选取合适网格规格，结合精细化 **尾流效应** 进行风机排布优化？

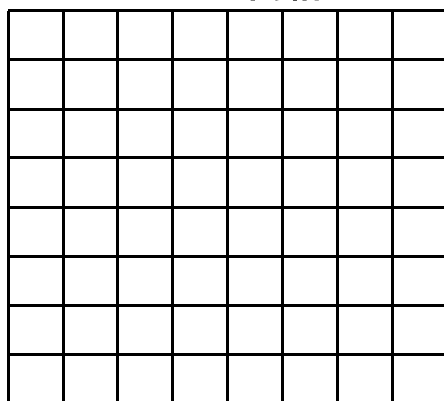


欧洲海上风电场(左)和中国阳江帆石海上风电场 (右)

风电场布局规则化

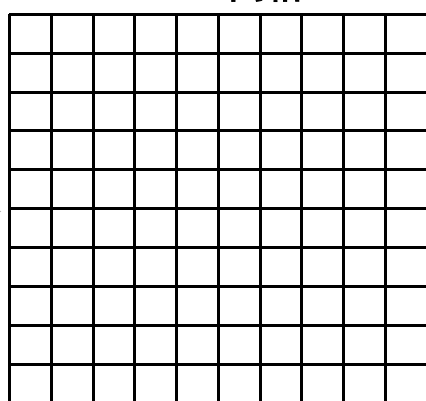
- 必要性：1) 降低电缆等**基础设施建设成本**；2) 确保**适航性**，便于渔业活动；3) 有利于风电场的**运营和维护工作**
- 约束条件：1) 每行风机数量为0或n； 2) 行内相邻风机间距相同

8×8网格



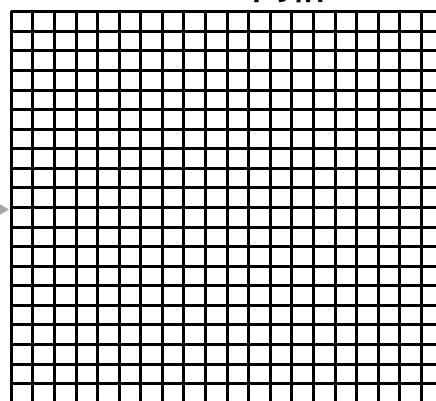
64个0-1变量
15120个连续变量
18144条约束

10×10网格

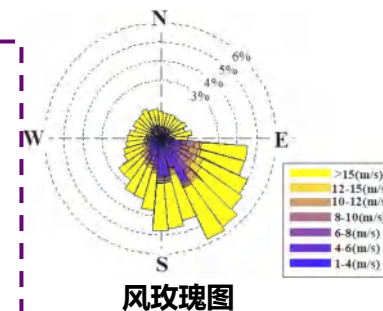


100个0-1变量
18000个连续变量
21600条约束

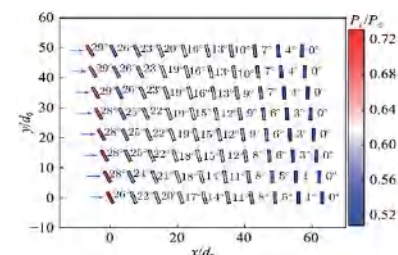
20×20网格



400个0-1变量
72000个连续变量
86400条约束



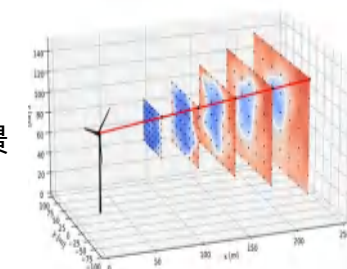
风玫瑰图



尾流量化指标

风速分布计算

基于风玫瑰图刻画多风场景

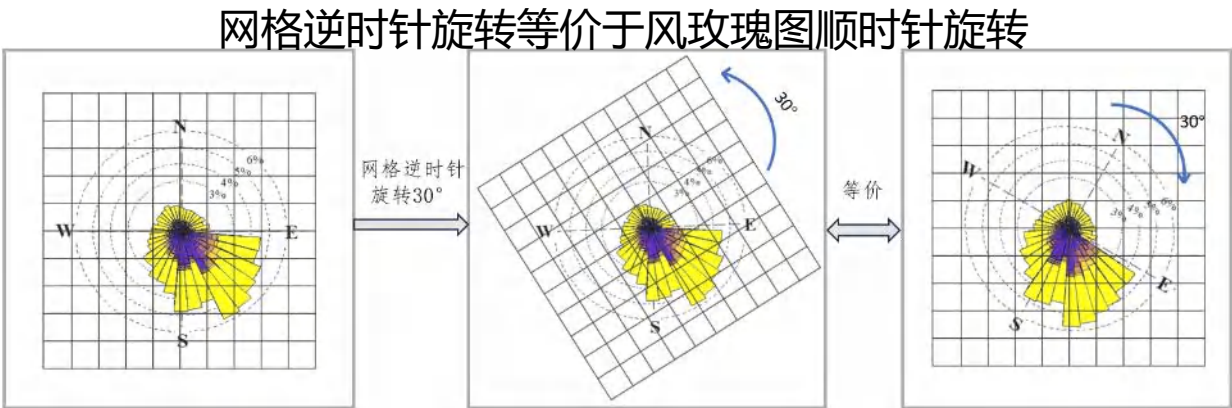


思路

网格化风机排布，引入旋转坐标；
数学优化MIP结合元启发式算法，大幅提升计算效率和规划结果最优性

旋转坐标进行场景解耦

- 将水平网格旋转不同的角度，以得到与水平轴呈不同角度的风机布局方案，提高风机布局的多样性



基于大规模MIP的微观选址初始解搜索

$$\min \sum_{i \in \mathcal{N}} \sum_{d \in \mathcal{D}} \left(\frac{1}{3} u_{id, \infty}^3 x_i - \sum_{j \in \mathcal{N}} \frac{1}{3} (u_{id, \infty}^3 - u_{jd, \infty}^3) y_{ij} \right) p_d$$

s.t.

$$\sum_{i \in \mathcal{N}} x_i = m$$
$$x_i + x_j \leq 1 \quad \forall (i, j) \in \mathcal{E}$$
$$x_i + x_j - 1 \leq y_{ij} \quad \forall i, j \in \mathcal{N}$$
$$y_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in \mathcal{N}$$
$$x_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \mathcal{N}$$

初始排布方案

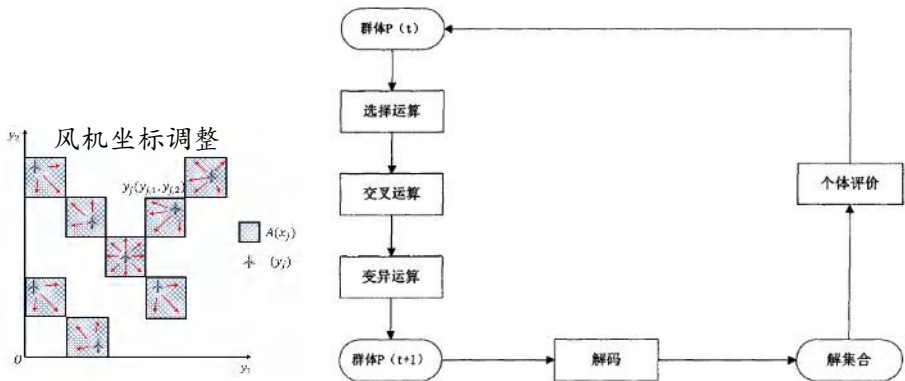
↑				↑
	↑			↑
		↑		
↑			↑	
	↑			

高质量初始可行解

↑ $x_i = 1$
□ $x_i = 0$

基于参数化尾流模型，离散选点建立大规模整数规划问题

启发式算法优化网格内风机坐标



风机坐标作为决策变量，使用启发式算法进行布局优化



海上风电场微观选址两阶段优化模型

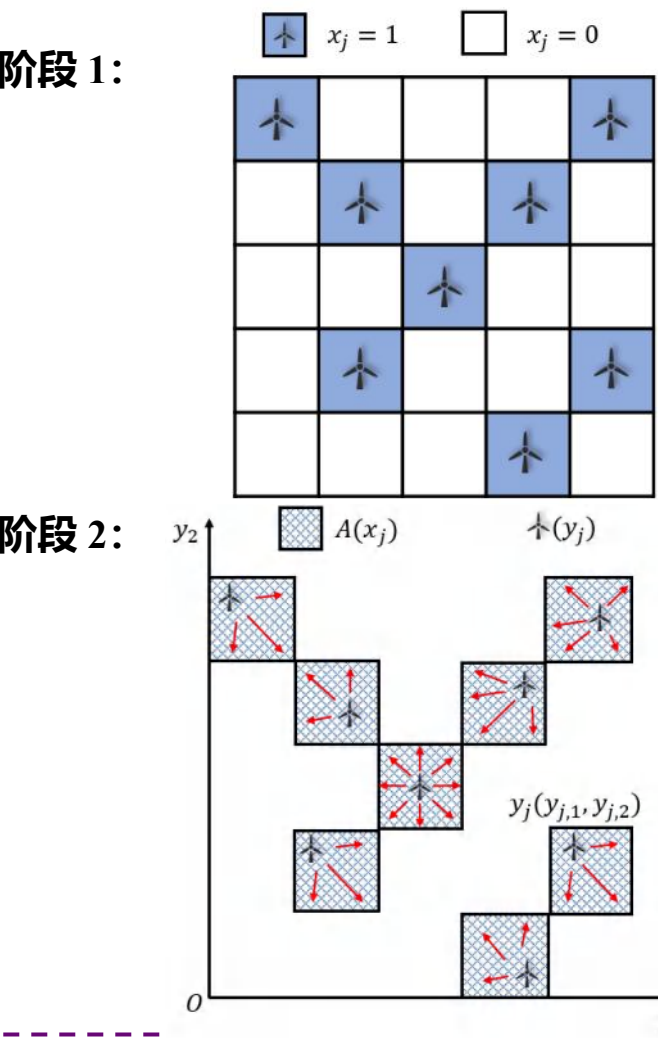
1. 采用数学规划方法求解风机微观选址网格化模型

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{n \in N} \sum_{j \in I} \pi^n P_j^n(x_j, v_{ij,j}^n) \quad \text{风电场总功率} \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{j \in I} x_j = M \quad \text{风机总数约束} \\ & P_j^n \leq P_{rate,j} x_j \quad \forall i \in I \\ & P_j^n \leq P(v_j^n) \quad \forall i \in I \quad \text{风机出力约束} \\ & v_j^n = v_{max,j}^n - \sqrt{\sum_{i \in I \setminus j} x_i (v_{max,j}^n - v_{ij,j}^n)^2} \quad \forall j \in I \quad \text{多机尾流平方和叠加} \\ & v_{ij,j}^n = v_{max,j}^n (1 - w_{ij,j}^n x_j) \\ & x_j + x_i \leq 1 \quad \forall j, i \in I: \text{distance}(j, i) < D_{min} \\ & x_i, x_j \in \{0, 1\} \quad \text{风机最小安全距离约束} \end{aligned}$$

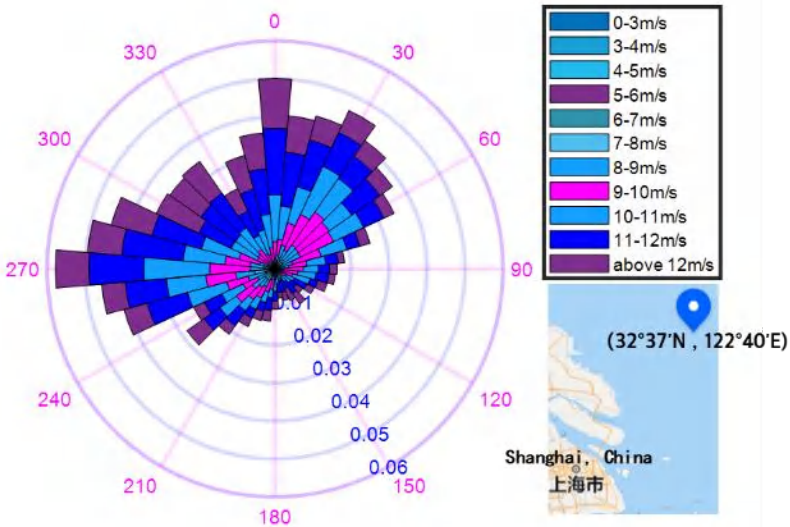
2. 基于启发式算法在网格内进一步优化风机坐标

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{n \in N} \sum_{j \in M} \pi^n P_j^n(y_j, v_j^n) \\ \text{s.t.} \quad & (y_{j,1}, y_{j,2}) \in A(x_j) \\ & (y_{i,1} - y_{j,1})^2 + (y_{i,2} - y_{j,2})^2 \leq D_{min}^2 \quad \forall i, j \in M \quad \text{风机最小安全距离约束} \end{aligned}$$

两阶段规划模型示意



- 海上风电场微观选址两阶段优化模型
- 算例分析



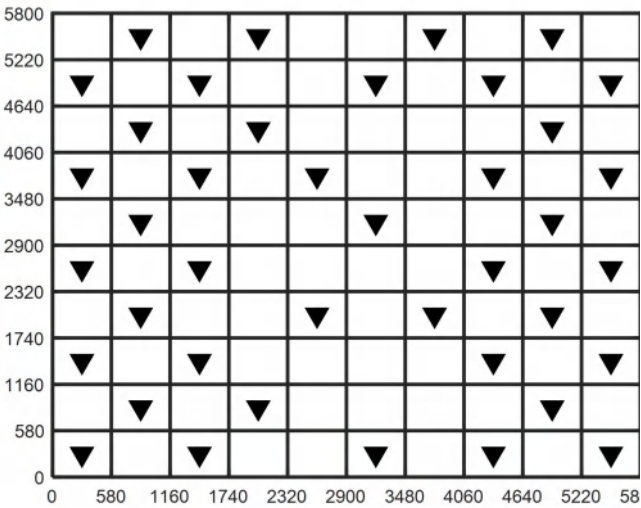
对江苏某200MW海上风电场进行微观选址优化

布局比较

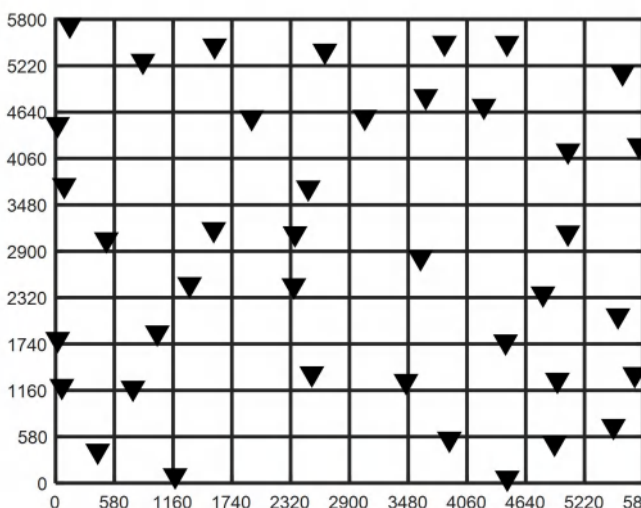
风机排布方案	尾流模型	发电量(MW)	尾流损失(%)
人工排布	Gauss-Jensen	116.5	17.7
优化方案	Gauss-Jensen	126.6	20.2

- 人工选址方案与两阶段规划模型求解结果对比

人工选址典型排布方案



两阶段优化模型求解结果



经布局优化后：

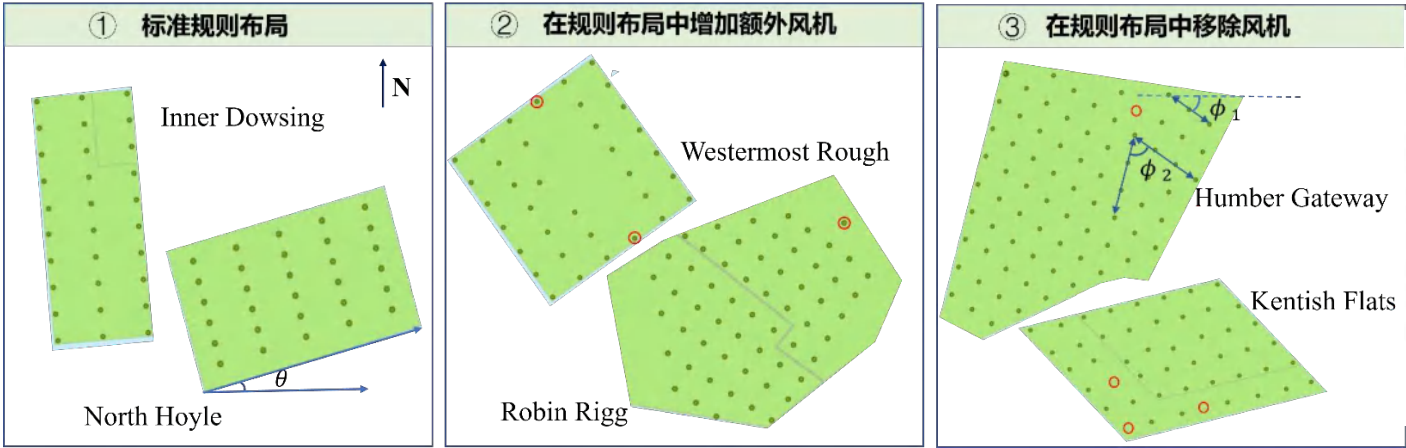
风电场平均发电功率提升8.7%

年总发电量提高 8.8×10^7 kW·h

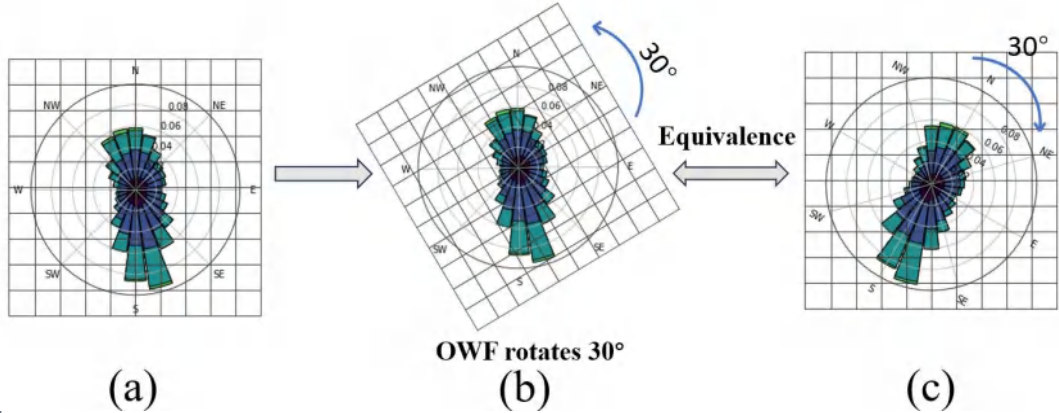
按0.4元/度电价计算，风场每年收益提高3500万元

考虑规则布局的海上风电场微观选址优化模型

结合实际工程案例



旋转坐标法



第一阶段MILP模型

规则布局约束

$$\begin{aligned} \sum_{i \in I} \hat{x}_i &= Q \quad \forall i \in I \\ \sum_{c \in C} x_{r,c} &= \lambda \varphi_r \\ \lambda &= 5 + 5\gamma \\ \Gamma \times \xi &= 5\varepsilon \\ \varepsilon_{1,r} + \varepsilon_{2,r} &= \varphi_r \quad \forall r \in C \\ x_i + 2z_i - y_i &= \hat{x}_i \quad \forall i \in I \\ z_i &\leq \delta, \quad z_i \leq y_i, \quad z_i \geq \delta + y_i - 1 \quad \forall i \in I \end{aligned}$$

功率曲线分段线性化

$$\begin{aligned} \max_{\hat{x}_i} \quad & \sum_{n \in N} \sum_{i \in I} \pi^n P_i^n(\hat{x}_i, \eta_{i,l}^n) \\ \text{s.t.} \quad & 0 \leq P_i^n \leq P_{rate} x_i \quad \forall i \in I \\ & \sum_{l \in L} \eta_{i,l}^n = 1 \quad \forall i \in I \\ & \sum_{l \in L} \eta_{i,l}^n V_{low,l} \leq V_i^n \leq \sum_{l \in L} \eta_{i,l}^n V_{up,l} \quad \forall i \in I \\ & x_j + x_i \leq 1 \quad \forall j, i \in I: d(j, i) < D_{min} \\ & v_j^n = v_0^n \left(1 - \sum_{i \in I/j} x_i w_{ij}^n \right) \quad \forall i, j \in I \end{aligned}$$

第二阶段连续坐标模型

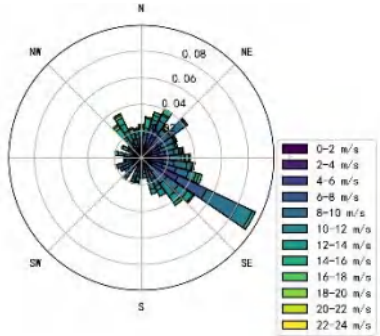
旋转约束

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{n \in N} \sum_{i \in I} \pi^n P_i^n(x, v_i^n) \\ \text{s.t.} \quad & s.t. (a_i, b_i) \in A(x_i) \quad \forall i \in X \\ & (a_i, b_i) \in A'(y_i) \quad \forall i \in Y \\ & (x_{i,1} - x_{j,1})^2 + (x_{i,2} - x_{j,2})^2 \leq D_{min}^2 \quad \forall i, j \in I \\ & \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta' & -\sin \theta' \\ \sin \theta' & \cos \theta' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \end{bmatrix} \quad \forall i \in \hat{X}, \theta' \in \left(\theta - \frac{\pi}{18}, \theta + \frac{\pi}{18} \right) \\ & a_j = a_i + (j - 1)d \quad \forall i \in X, j \in K \\ & b_j = b_i \quad \forall i \in X, j \in K \end{aligned}$$

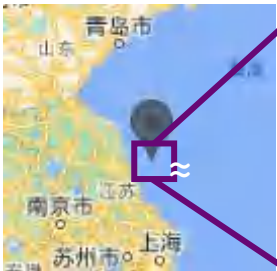
规则约束

考虑规则布局的海上风电场微观选址优化模型

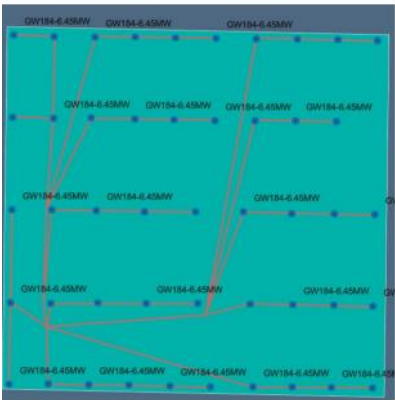
实际案例



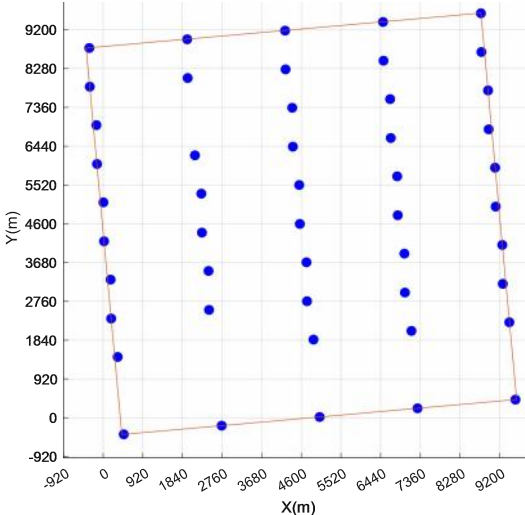
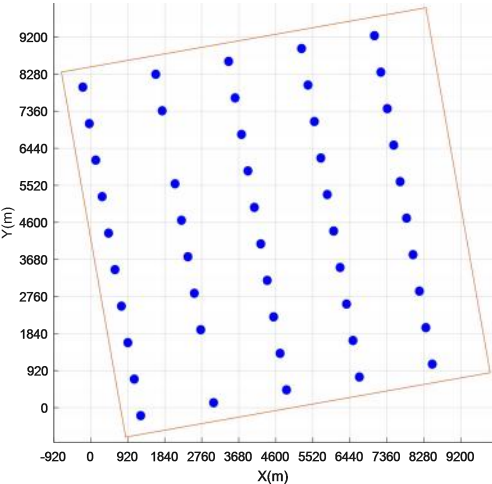
实际风玫瑰图



江苏大丰H4海上风电场

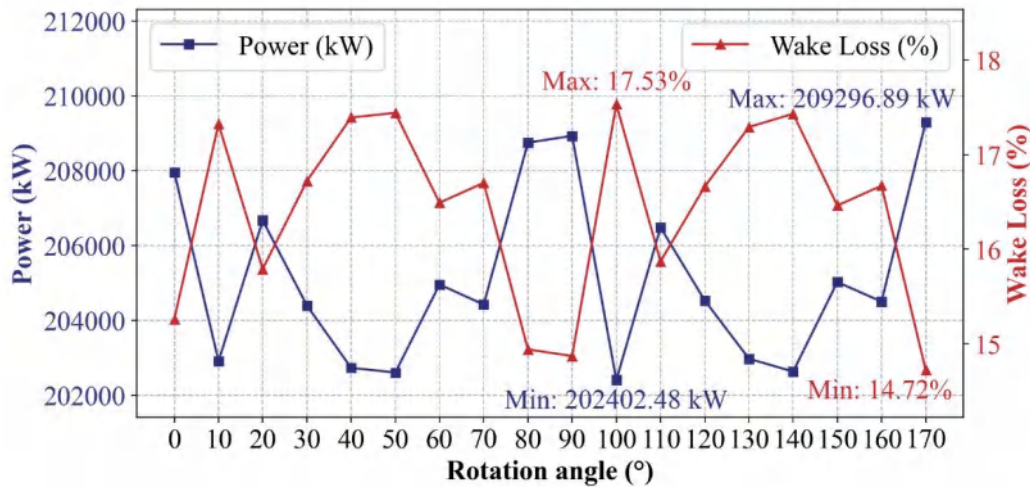


优化结果



第一阶段最优布局（左）和第二阶段布局（右）

第一阶段各旋转角发电量及尾流损失



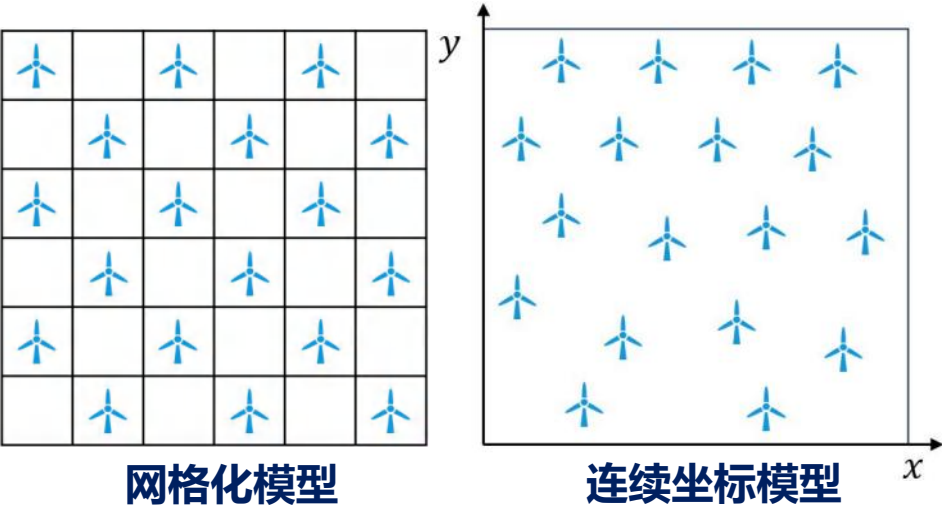
选取第一阶段最优布局，在第二阶段对风机坐标和风电场旋转角进行微调

	所提方法	原有布局
功率 (kW)	217643.9	199045.9
尾流损失(%)	11.32	18.9
年利润(百万元)	785.50	718.30

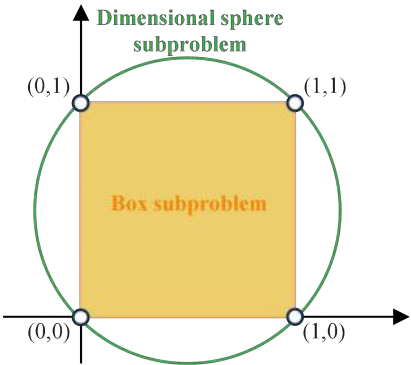
对比原有布局，尾流损失降低**7.58%**，年利润提升**6700万元**

➤ 一种大规模网格化微观选址通用加速求解算法

□ 微观选址建模方法



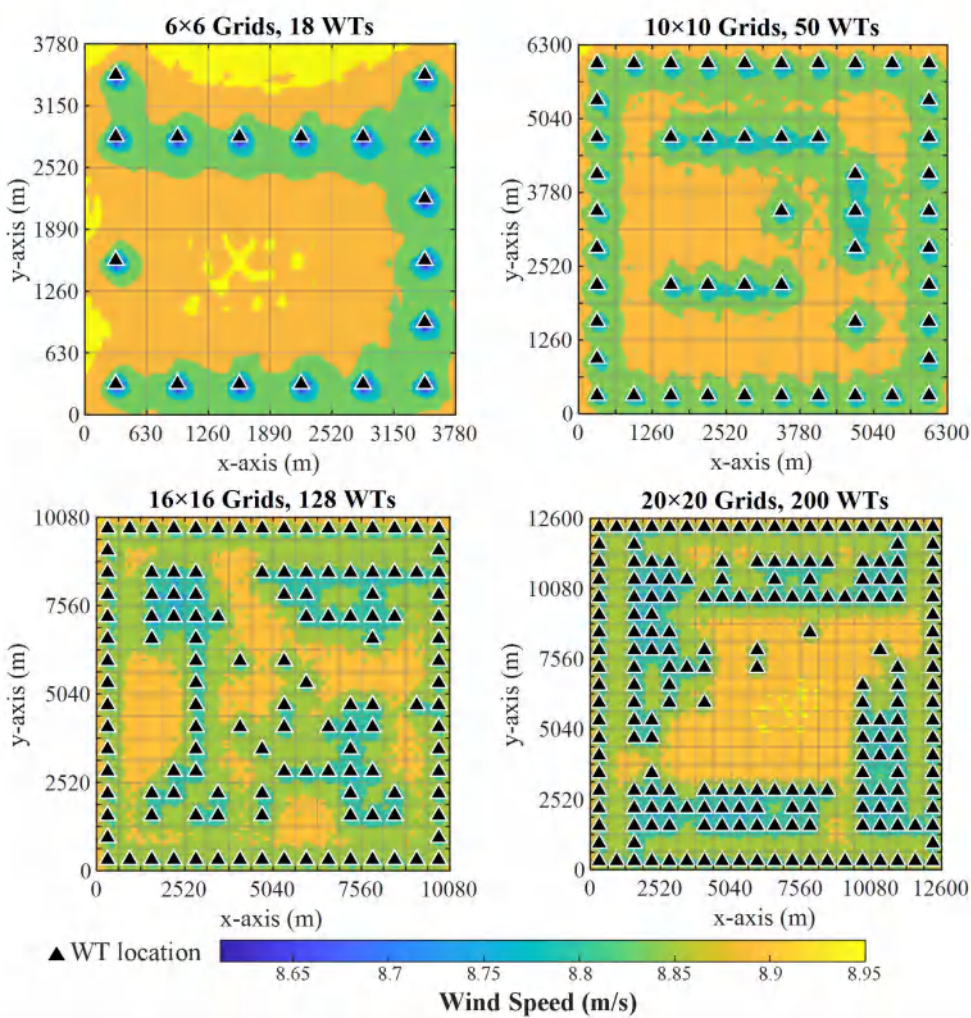
□ Lp-box分解+ADMM并行求解



Algorithm 1: Acceleration Framework for WFLO-GM
Input: ADMM parameters and $\mathbf{x}^0, \mathbf{y}^0, \mathbf{z}^0, \mathbf{w}^0$
Output: $\mathbf{z}^*$.

```
1 While not converged do
2   update  $\mathbf{x}_k^{t+1}$  by solving (8a)
3   update  $(\mathbf{y}_{1,k}^{t+1}, \mathbf{y}_{2,k}^{t+1})$  as shown in (8c) and (8e)
4   if all scenarios in the set  $K$  are computed then
5     update  $\mathbf{z}^{t+1}$  as shown in (8f)
6   end
7   update  $(\mathbf{w}_{1,k}^{t+1}, \mathbf{w}_{2,k}^{t+1}, \mathbf{w}_{3,k}^{t+1})$  by solving (8g)-(8i)
8 end
9 return  $\mathbf{z}^* = \text{round}(\mathbf{z}^{t+1})$ 
```

□ 不同案例下的微观选址结果及风速分布

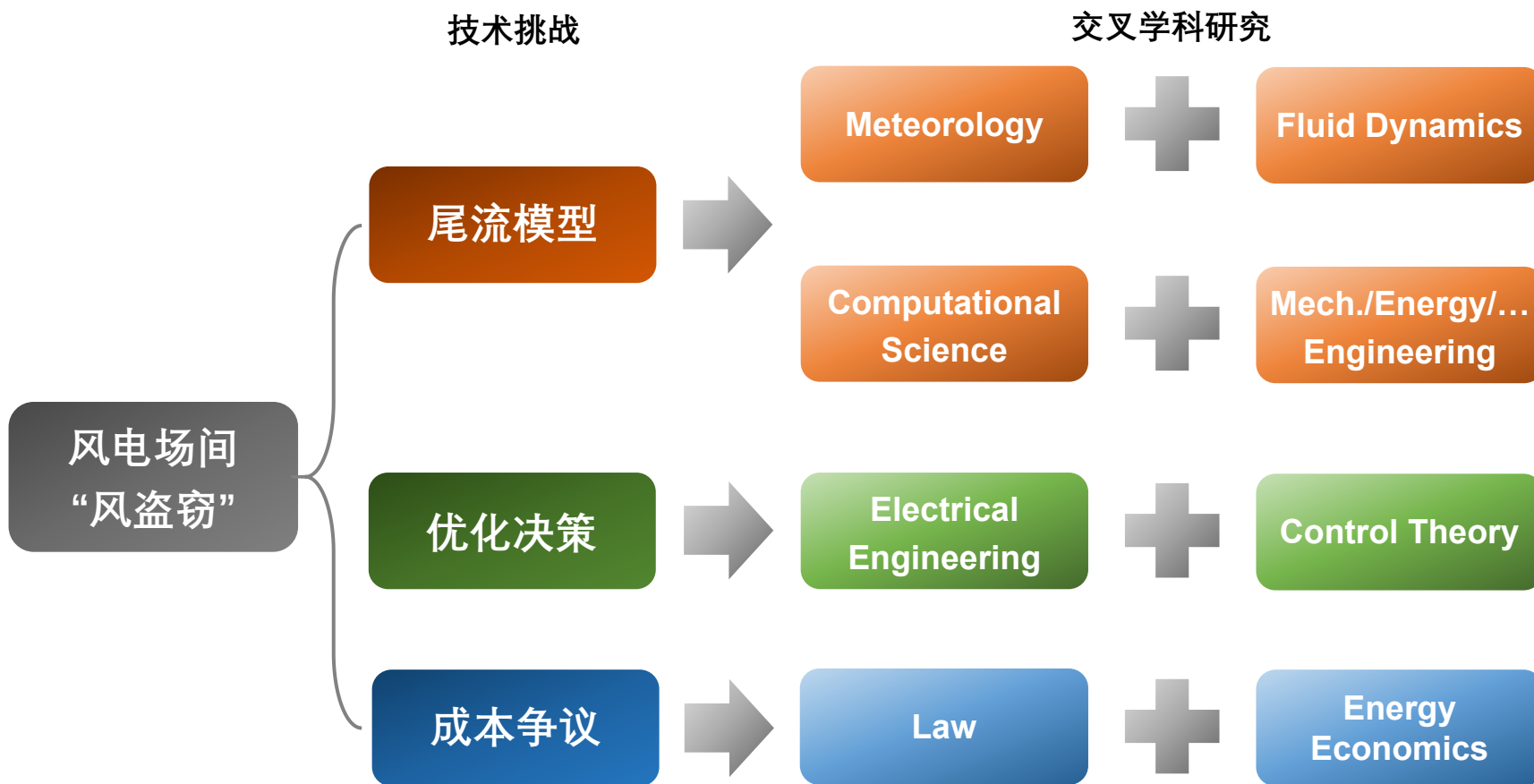


□ 与直接求解相比，求解时间减少了20倍以上

□ 在大规模案例中获得了发电量更大的布局结果

□ 受邀在Nature Reviews Electrical Engineering发表Comment论文

□ 呼吁通过交叉学科研究应对**风盗窃Wind Theft**（场间尾流）



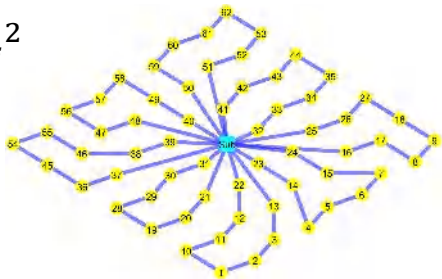
难点

如何考虑**可靠性需求**等复杂目标/约束优化**大规模**风场集电系统？

基于改进CVRP的集电系统规划优化建模方法

$$\min_{x,P} \sum_{(i,j) \in L} c_{ij} x_{ij} + \eta \sum_{(i,j) \in L} r_{ij} P_{ij}^2$$

s. t. CVRP模型
 电缆交叉避免约束
 电网规划模型
 K度中心树模型

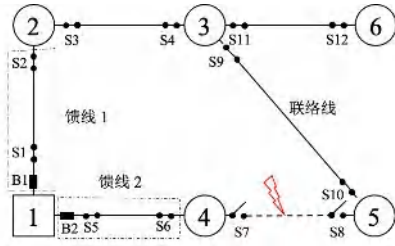


集电系统规划结果

嵌入可靠性约束的集电系统规划建模方法

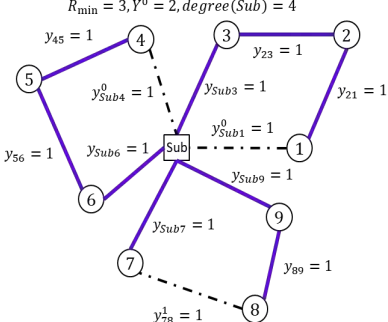
$$\min C_{cap} \sum_{ij \in \Psi_B} d_{ij} l_{ij} + \omega EEND$$

s. t. 运行约束
 网络重构模型
 可靠性评估模型
 可靠性需求约束



故障后网络重构建模

可靠性约束集电系统规划模型加速求解算法

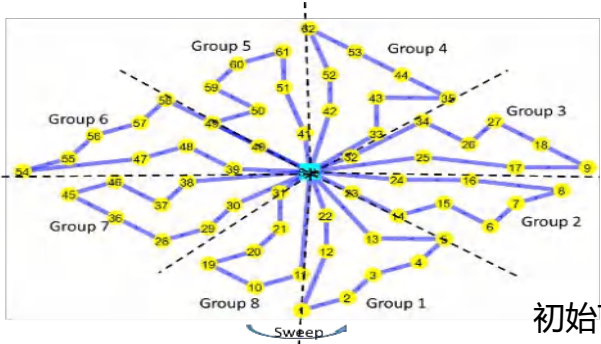


投影割集
模型下界改善

$$\min C^{inv}(x) + \sum_{\xi^h \in \Omega^H} C^{rel}(x, y^h, \xi^h)$$

s. t. $Ax \leq \beta$ 规划投资约束、建设逻辑约束
 $g(x, y^h, \xi^h) = 0$ 运行约束、可靠性指标约束
 $f(x, y^h, \xi^h) \leq 0$
 $x \in \{0, 1\}$ 建设决策0-1变量

渐进故障集融合
“分解-协调”并行计算



初始可行解搜索

思路

考虑线路选型、开关配置、故障后重构等建立各类**MIP**模型用于集电系统优化，研究**可靠性约束**优化建模及相应求解算法

- ❑ **关键挑战**：如何考虑各类复杂约束、经济性与可靠性需求 优化海上风电集电系统？
- ❑ **创新点**：对环状拓扑，提出采用 容量约束车辆路径规划问题(Capacitated Vehicle Routing Problem, CVRP)模型，并加入 多旅行商(mTSP) 模型收紧下界、加速求解

容量约束车辆路径规划(CVRP)模型

CVRP 与 环状ECS规划问题高度相似

CVRP 优化结果**天然满足**“N-1” 准则

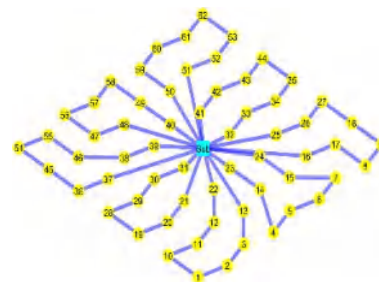
电力网络扩展规划(PNEP)模型

考虑电力系统物理特性，纳入基于**直流潮流**的功率平衡等约束

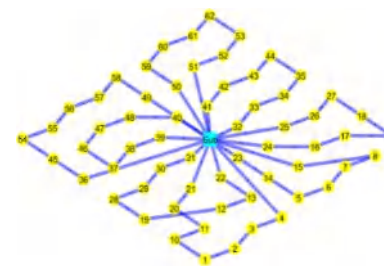
采用近似方法对ECS运行**网络损耗**进行计算

k度中心树(k-DCT)模型

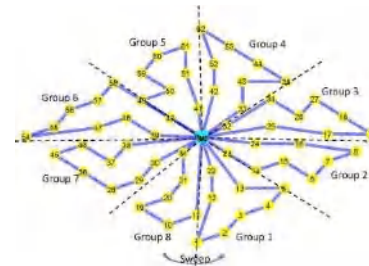
k-DCT模型用于求解**多旅行商问题(mTSP)**，为CVRP提供下界
不影响问题可行性、快速得到更紧下界，**提高模型收敛速度**



所提方法



Google OR-Tools



启发式

环状集电系统优化规划方法

- 符合“N-1” 原则，大幅降低故障损失
- 不存在交叉电缆 (**打败Google OR-Tools**)
- 总成本降26%，全生命周期**1.45亿** (初投资3千万)
- 求解结果最优性强 (**打败Google OR-Tools**)

- ❑ 关键挑战：如何考虑各类复杂约束、经济性与可靠性需求 优化海上风电集电系统？
- ❑ 创新点：对辐射状拓扑，提出采用MILP 热启动 计及网损的MIQP，优化海缆选型

$$\begin{aligned} \min & F^{OW}(x^l, y) \\ \text{s.t. } & H^{OW}(x^l, y) \geq 0 \\ & x^l \in D \\ & G^{OW} = (E^{OW}, V^{OW}) \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} x^l &\in \{0, 1\}^{n \times n \times k}, \\ n &= |V^{OW}|: \text{风机节点数} \\ k &: \text{线路选型数} \end{aligned}$$

G^{OW} : 包含 n^3 数量级的
电缆交叉避免约束

集电系统拓扑与选型规划结果



○ 风机 ■ 海上变电站 — 3×95 — 3×185 — 3×300 — 3×500

原方案(人工经验+启发式 软件)

所提方法^{[1][2]}规划方案

清华大学深圳国际研究生院：

我单位于 2023 年 11 月委托贵单位沈欣炜课题组开展海上风电集电系统电压等级及拓扑规划研究，为海上风电项目优化集电线路提供技术支撑。

贵单位积极支持配合我们工作，特此证明：该课题组研究成果对不同海上风电场的集电线路规划均做出了相较于传统工程规划方法经济性更优的方案，在两个风电场案例中平均可节省集电系统初始投资上千万元。该技术具有较好的推广价值，为我单位后续海上风电的开发提供了有益参考。贵单位相关科研人员沈欣炜、纪鑫哲、丁晓驰、高闻浩、陆柏安、李健等同志按时高质量完成了相关研究工作，向贵单位相关人员的支持和贡献表示感谢！

单位

2024 年



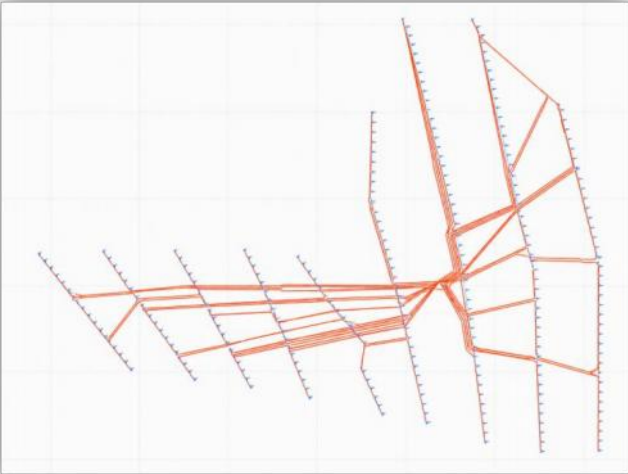
获得设计院感谢信及应用证明

- 所提方法^{[1][2]}优化集电海缆总长和选型
- 两个海风场中，**节约辐射状集电系统初投资总计达 2千5百万元**，获设计院感谢信及应用证明

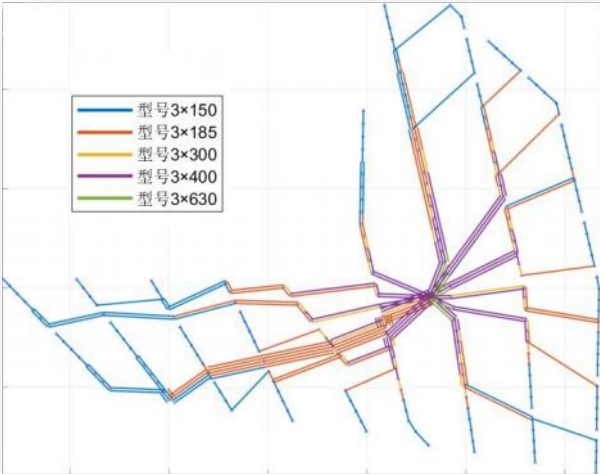
[1] X Shen*, S. Li and H. Li, "Large-scale Offshore Wind Farm Electrical Collector System Planning: an MILP Approach," in IEEE 5th Conf. on EI², Taiyuan, China, 2021, pp. 1248-1253.

[2] 高闻浩，沈欣炜，丁晓驰，等，基于大规模混合整数规划的海上风电集电系统优化，电力系统自动化，2025.

算例：广西北海某大规模海上风电场（230台风机）



原方案 (启发式软件+人工集约)



所提方法规划方案

	原方案	所提方法规划方案	节约投资
总成本（亿元）	18.78	7.43	11.35

- 所提方法可显著优化海上风电场集电系统投资成本、集约化程度；
- 在某大规模海上风电场中，**节约初投资超10亿元，获大型央企应用证明；**
- 为该企业规划软件升级提供重要技术支撑，**得到持续应用。**

应用证明

应用单位	中国电建集团广西分公司
应用的科技成果	论文： [1]X. Shen, S. Li, H. Li, "Large-scale Offshore Wind Farm Electrical Collector System Planning: an MILP Approach," in <i>IEEE 5th Conf. on EP*2</i>, Taiyuan, China, 2021. [2]X. Shen, Q. Wu, H. Zhang, L. Wang, "Optimal Planning for ECS of OWF with Double-sided Ring Topology," in <i>IEEE Trans. on Sus. Energy (TSTE)</i>, 2023. [3]H. Yang, X. Shen*, W. Gao, X. Ding, Y. Du, Q. Li, "Optimal Planning for Offshore Wind Farm Electrical Collector System Considering N-1 Criterion," in <i>IEEE Trans. on Sus. Energy (TSTE)</i>, 2025. 科研项目： 2024.08 - 至今，国家自然科学基金面上项目，深远海风电场布局与集电综合优化规划。 2024.07 - 至今，深圳市优秀青年基础研究项目，面向海上风电规划运维的复杂组合优化与应用。 2023.01 - 至今，广东省基础与应用基础海上风电联合基金，海上风电场多站集电系统高可靠性优化规划方法研究。 2024.01 - 至今，广东省基础与应用基础海上风电联合基金，考虑海底环境的高可靠性海风集电系统优化规划。 国家自然科学基金(52477102)、广东省基础与应用基础海上风电联合基金(2022A1515240019, 2023A1515240055) 以及深圳市优秀青年基础研究项目(RCYX20231211090430053)
依托清华大学深圳国际研究生院沈欣炜课题组（以下简称“贵团队”）在海上风电场集电系统规划与优化领域形成的系统性科技成果，我院已在多个工程项目和软件平台中完成实际应用，取得了显著的经济与社会效益。具体如下： 1、广西北海上风电场集约式用海集电系统规划应用： 在广西北海上风电场工程中，应用基于集约式用海理念的集电系统规划方法，统筹考虑电缆布置、集约式用海原则及功率需求配置。与设计院原人工方案相比，优化方案节约工程投资超过10亿元，并减少海域占用，兼顾经济性与用海集约化，产生了突出的经济效益和良好的社会效益。 2、南澳海上风电场 35 kV/66 kV 集电系统规划： 在南澳海上风电场项目中，我院在贵团队提出的集电系统规划方法及技术支持下，针对 35 kV 和 66 kV 多电压等级架构，对海上升压站选址、容量配置及电缆型号选取等开展系统比选。依托相关成果，形成多套经工程论证的高质量集电系统方案，为项目最终设计提供关键技术依据，在降低投资成本、控制线路损耗和提升运行可靠性方面发挥了重要作用。 3、海上风电集电系统规划软件升级应用： 在我院集电系统规划软件升级过程中，重点引入并集成了贵团队研发的集电系统优化模型与核心算法，由贵团队提供总体技术方案和全过程技术支持，完成软件算法模块重构。升级后软件在海上风电场集电系统建模、求解效率和求解质量等方面能力显著提升，已成为我院工程设计与方案优化的重要工具，充分体现了相关科技成果的工程化转化价值和支撑作用。 综上，贵团队相关科技成果已在我院多个重大海上风电项目和软件平台中得到持续应用，取得了显著的降本增效成果，并在促进海上风电高质量发展 and 绿色低碳转型方面发挥了良好的示范与带动作用。	
应用单位盖章 2025 年 11 月 12 日	

- ❑ 关键挑战：如何在没有指定拓扑（辐射状/环状）的情况下、基于可靠性优化集电系统？
- ❑ 提出一种两阶段随机规划模型，并采用定制的渐进式故障并入算法求解。

数学模型

目标函数

$$\min \quad \underbrace{C_{INV}}_{\text{初试投资成本}} + \underbrace{C_{O\&M}}_{\text{运维成本}} + \underbrace{C_{REL}}_{\text{故障导致的折损成本}}$$

$$C_{INV} = C_{cab} \sum_{ij \in \Psi_C} d_{ij} l_{ij}$$

$$C_{O\&M} = \beta C_{INV}$$

$$C_{REL} = C_{ele} \frac{(1+r)^t - 1}{r(1+r)^t} U \sum_{rs \in \Psi_C \cup \{NO\}} \xi^{rs} \sum_{\omega \in \Omega} \delta^\omega \sum_{k \in \Psi_N^{WT}} P_k \zeta^\omega \frac{\tau_{SW} m_k^{rs} + \tau_{RP} n_k^{rs}}{\tau_{SW} + \tau_{RP}}$$

- 约束条件：直流潮流约束、设备容量约束、故障影响识别约束、故障后网络重构约束、非交叉约束

定制的渐进式故障并入算法

Algorithm 2 Customized PCI algorithm

Initialization:

- 1: $\tilde{\Upsilon} = v_0, \Omega = \omega_n$;
- 2: Apply BD strategy to solve $(\hat{x}, \hat{y}^{v, \omega}) = \arg \min_{x, y^{v, \omega}} \tilde{\mathcal{P}}_{\tilde{\Upsilon}, \Omega}$ to $\epsilon \leq \epsilon_0$;
- 3: $\hat{\Upsilon} = \{v_i | v_i \in \Upsilon \cup v_0, \hat{x}_i = 1\}, x_{ws} = \hat{x}, Ind = 0$;

Iteration:

- 4: **while** $Ind == 0$ **do**
- 5: $\tilde{\Upsilon} = \tilde{\Upsilon} \cup \hat{\Upsilon}$;
- 6: Apply BD strategy to solve $(\hat{x}, \hat{y}^{v, \omega}) = \arg \min_{x, y^{v, \omega}} \tilde{\mathcal{P}}_{\tilde{\Upsilon}, \Omega}$ to $\epsilon \leq \epsilon_0$ with warm-start point x_{ws} ;
- 7: $\hat{\Upsilon} = \{v_i | v_i \in \Upsilon, \hat{x}_i = 1\} \cup v_0, x_{ws} = \hat{x}$;
- 8: **if** $\hat{\Upsilon} == \tilde{\Upsilon} \cap \hat{\Upsilon}$ **then**
- 9: Apply BD strategy to solve $(x^*, y^{v, \omega^*}) = \arg \min_{x, y^{v, \omega}} \tilde{\mathcal{P}}_{\tilde{\Upsilon}, \Omega}$ to optimality with warm-start point x_{ws} ;
- 10: $\Upsilon^* = \{v_i | v_i \in \Upsilon, x_i^* = 1\} \cup v_0$;
- 11: **if** $\Upsilon^* == \Upsilon^* \cap \tilde{\Upsilon}$ **then**
- 12: $Ind = 1$;
- 13: **else**
- 14: $\tilde{\Upsilon} = \tilde{\Upsilon} \cup \Upsilon^*, x_{ws} = x^*$;
- 15: **end if**
- 16: **end if**
- 17: **end while**

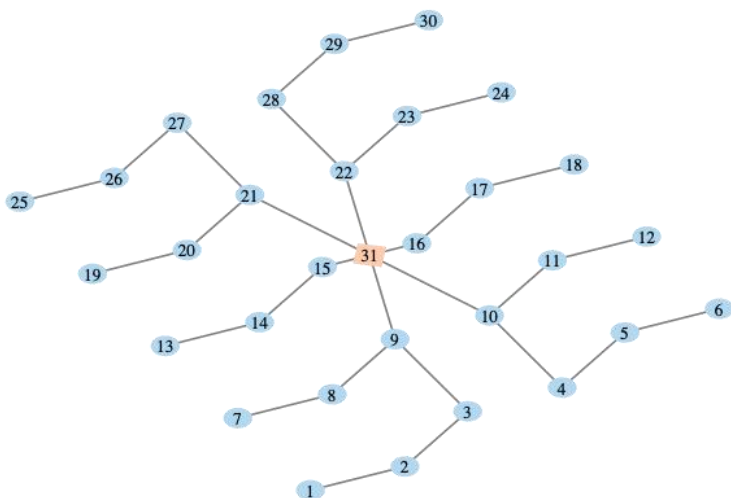
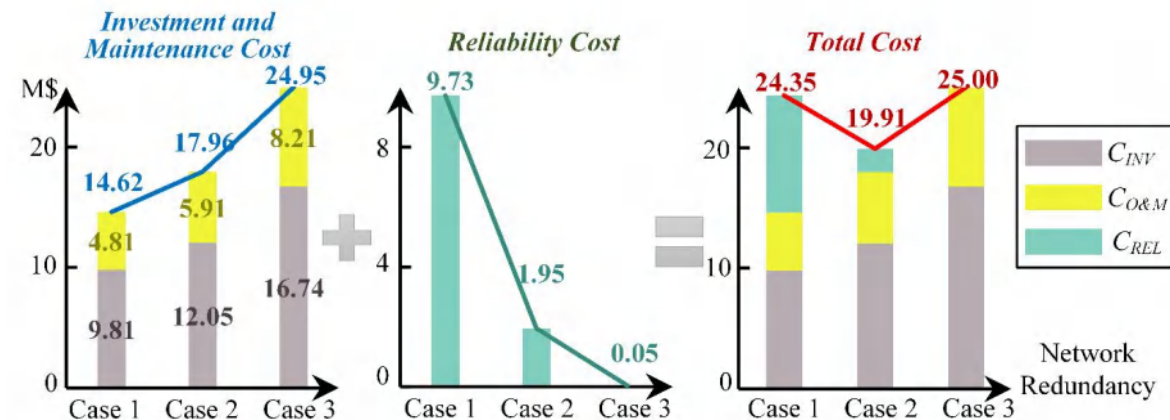
算例-30台风机算例

为了验证所提出方法的有效性，使用30台风机的海上风电场作为第一个测试算例。

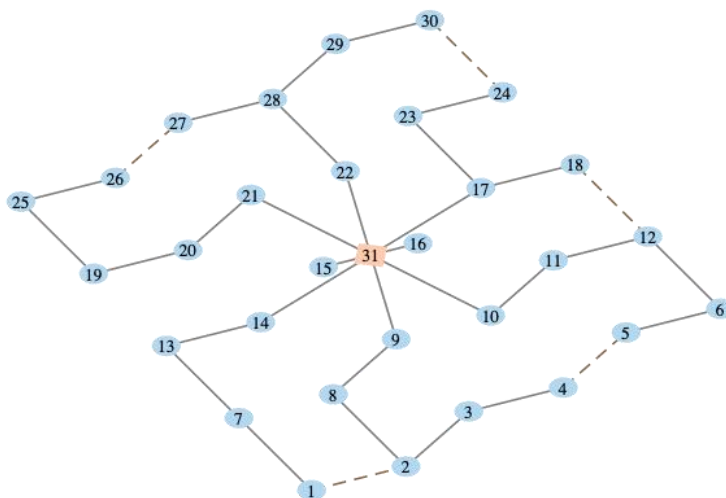
算例1：具有辐射状结构限制的集电系统规划；

算例2：无预定义结构限制的集电系统规划；

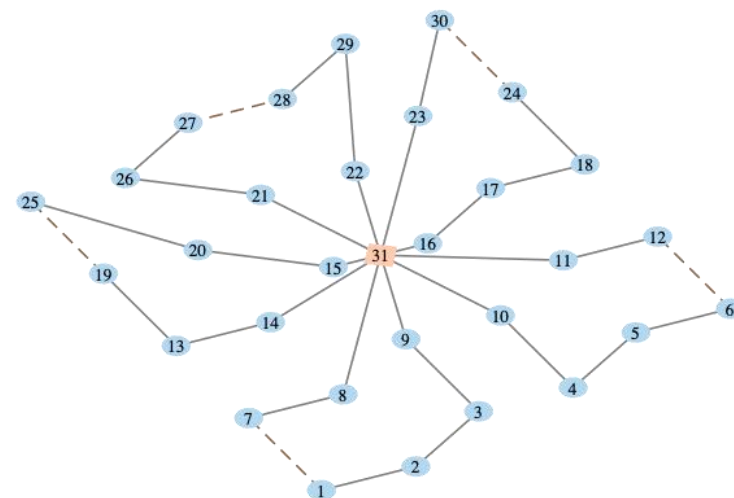
算例3：具有环状结构限制的集电系统规划。



(a) Case 1: Radial planning approach



(b) Case 2: Proposed planning approach



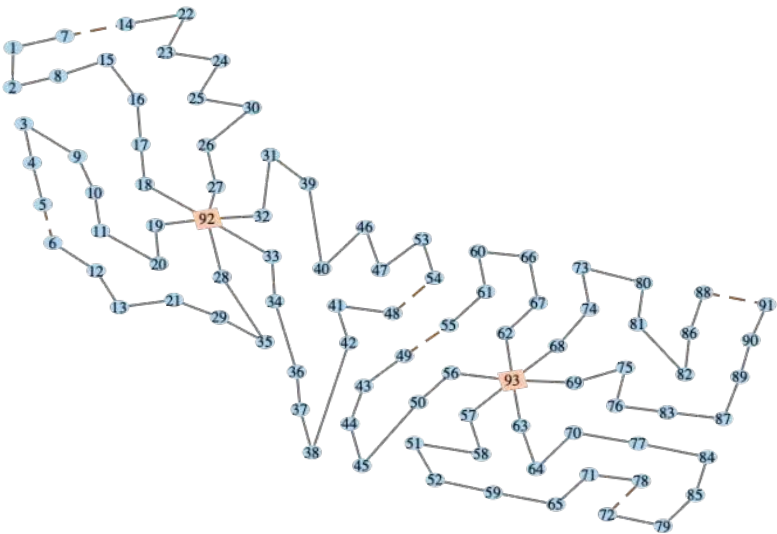
(c) Case 3: Ring planning approach

算例-91台风机算例

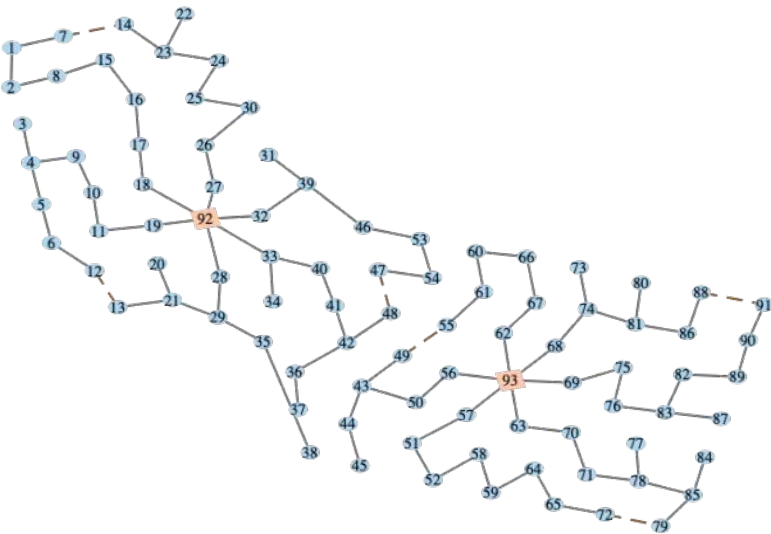
- 算例4：采用两阶段CWS的集电系统规划方法；
- 算例5：采用所提集电系统规划方法，不考虑海上变电站协同运行；
- 算例6：采用所提集电系统规划方法，考虑海上变电站协同运行。

TABLE I
RACE BANK OWF ECS PLANNING RESULTS

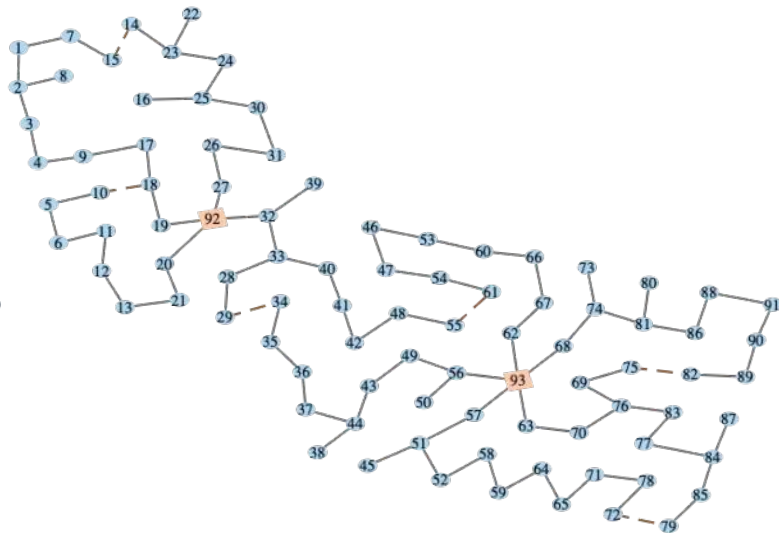
	Case 4 [24]	Case 5	Case 6
$C_{INV}(M\$)$	42.86	40.27	38.82
$C_{O\&M}(M\$)$	21.03	19.76	19.04
$C_{REL}(M\$)$	0.13	1.41	2.91
Total cost (M\$)	64.02	61.44	60.77



(a) Case 4: Sweep + CWS planning



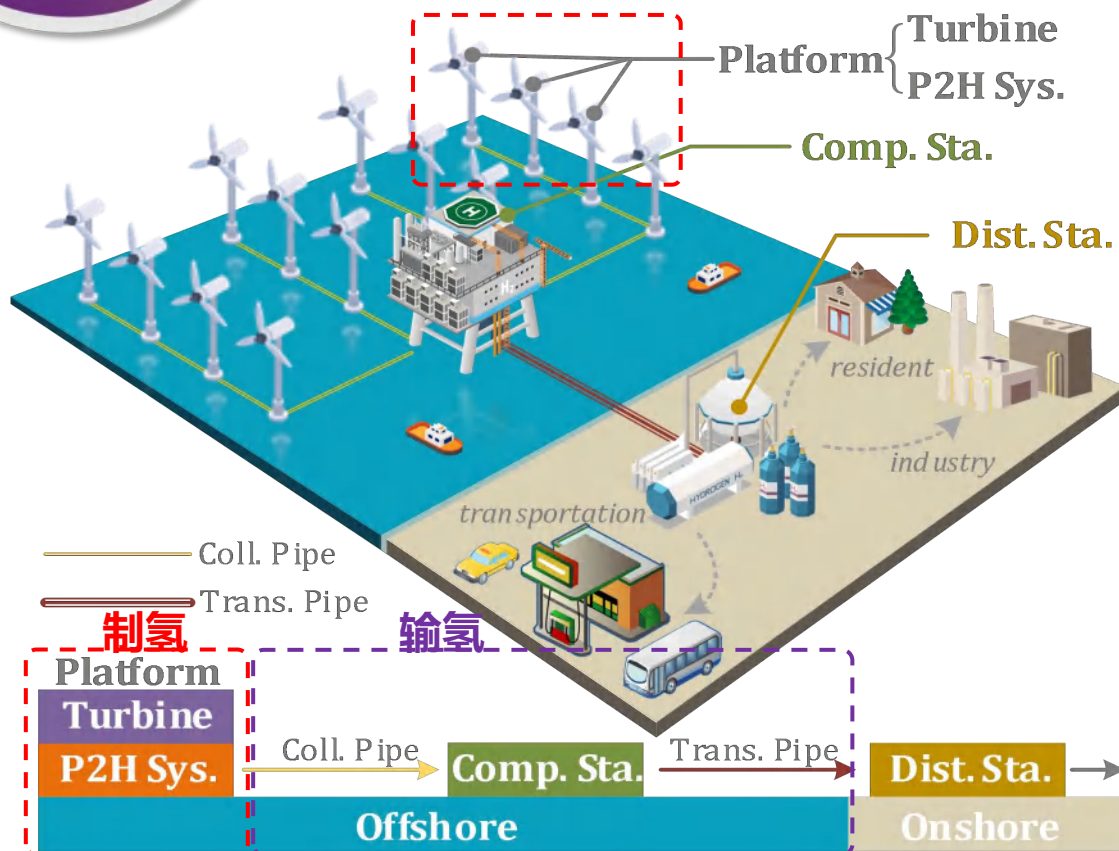
(b) Case 5: Proposed ECS planning without OSS coordination



(c) Case 6: Proposed ECS planning with OSS coordination

难点

在目前的技术水平下，如何通过优化手段进一步降低海上风电制氢的成本？



分布式制氢系统示意图

制氢环节：集成在单一平台内（分布式制氢平台）

- ① **海水淡化**：海水淡化装置从抽取的海水中去除盐分送入电解槽；
- ② **风机供能**：风机所发交流电整流后为电解槽的工作提供能量；
- ③ **淡水电解**：水分子在电解槽内被分裂，分别产生氢气和氧气；
- ④ **氢气储存**：氢气会暂时储存在储氢罐中，并外送至海上集氢站；
- ⑤ **氢气运输**：集氢站内氢气通过管道输送到岸上，或由输氢船回收。

输氢环节：包含集氢管道、海上集氢站、输氢管道等

思路

除实现系统**整体**优化外，进一步考虑系统**内部不同环节**（如制氢、输氢、用氢等）与地理环境耦合的拓扑/结构，全面提升经济性！

- ❑ 关键挑战：如何实现风氢系统制氢环节 优化规划 经济性和产量的平衡？
- ❑ 创新点：以平准化制氢成本（LCOH）为目标函数，联合优化 风机位置 与 设备容量

■ 规划阶段数学模型（阶段1）

- 目标函数：LCOH
$$\min_{\mathbb{X}, \mathbb{Y}, Q^{P2H}} LCOH = \frac{EAC(Q^{P2H}, AHP)}{AHP(\mathbb{X}, \mathbb{Y}, Q^{P2H})}$$

年化支出 (Equivalent annual cost, EAC)
年制氢量 (Annual hydrogen production, AHP)

平台位置/电解槽容量

$$AHP = \mathbb{E}[H_k^{P2H}(\mathbb{X}^*, \mathbb{Y}^*, Q^{P2H*})]$$
$$EAC = EAC_{INV}(Q^{P2H}) + EAC_{OM}(Q^{P2H}) + EAC_{TAX}(Q^{P2H})$$
$$EAC_{INV} = \sum_{i \in N} (R_A^{P2H} c_{INV}^{P2H} Q_i^{P2H} + R_A^{WT} c_{INV}^{WT} P_{MAX}^{WT})$$
$$EAC_{OM} = \sum_{i \in N} (c_{OM}^{P2H} Q_i^{P2H} + c_{OM}^{WT} P_{MAX}^{WT})$$
$$EAC_{TAX} = c_{TAX} (c_H AHP - AC_{OM})$$

■ 约束条件

$$\text{s.t.: } \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \geq 5D, \quad \forall i, j \in N$$
$$x_{MIN} \leq x_i \leq x_{MAX}, \quad \forall i \in N$$
$$y_{MIN} \leq y_i \leq y_{MAX}, \quad \forall i \in N$$
$$0 \leq Q_i^{P2H} \leq P_{MAX}^{WT}, \quad \forall i \in N$$

- AHP与EAC计算方法
- EAC包含投资、运维、纳税等成本
- 平台距离约束
- 风场边界约束
- 电解槽容量约束

■ 运行阶段数学模型（阶段2）

- 目标函数：年制氢量AHP
$$H_k^{P2H}(\mathbb{X}^*, \mathbb{Y}^*, Q^{P2H*}) = \max_{\mathbb{I}_k^{P2H}} 8760 \sum_{i \in N} h_{k,i}^{P2H} (I_{k,i}^{P2H}), \forall k \in K$$

在给定风场布局、电解槽容量下，不同风场景的年制氢量叠加

■ 约束条件

$$\text{s.t.: } \gamma_{MIN} Q_i^{P2H} \leq I_{k,i}^{P2H} \leq \gamma_{MAX} Q_i^{P2H}, \quad \forall k \in K, \forall i \in N$$
$$P_{k,i}^{P2H} \leq Q_i^{P2H}, \quad \forall k \in K, \forall i \in N$$

$$P_i^{WT} \geq P_i^{P2H} = P_i^{CON} + P_i^{DES} + P_i^{ELE}, \quad \forall i \in N$$
$$I_i^{P2H} = f(P_i^{P2H}), \quad \forall i \in N$$
$$P_i^{CON} = \beta_2 (I_i^{P2H})^2 + \beta_1 I_i^{P2H} + \beta_0, \quad \forall i \in N$$
$$P_i^{DES} = \psi^{DES} h_i^{P2H}, \quad \forall i \in N$$
$$P_i^{ELE} = N^C U_i^C I_i^{P2H}, \quad \forall i \in N$$
$$U_i^C = E + U_i^O + U_i^{ACT}$$
$$h_i^{P2H} = \frac{N^C I_i^{P2H} \eta^F}{2F}, \quad \forall i \in N$$

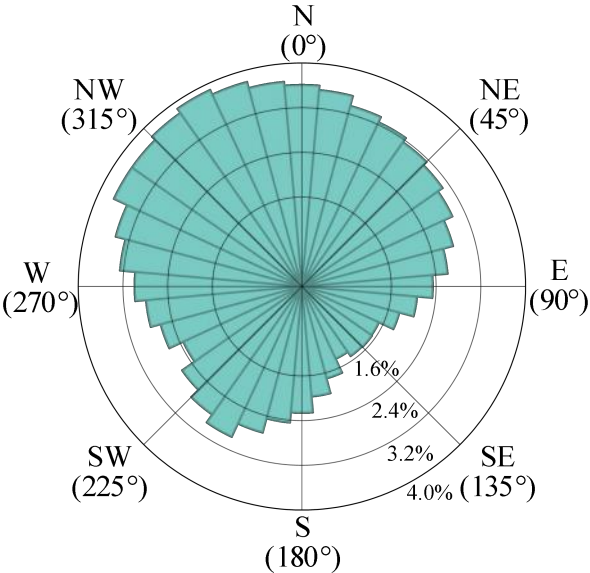
- 海水电解系统运行电流约束
- 系统容量约束

基础模型约束：

- 多尾流叠加下风机出力模型
- 海水动态电解系统模型

案例设置:

- ✓ 4个案例，探究联合优化经济潜力
- ✓ 风速分布：36个风向情景，10°间隔



丹麦北海某海域风向玫瑰图

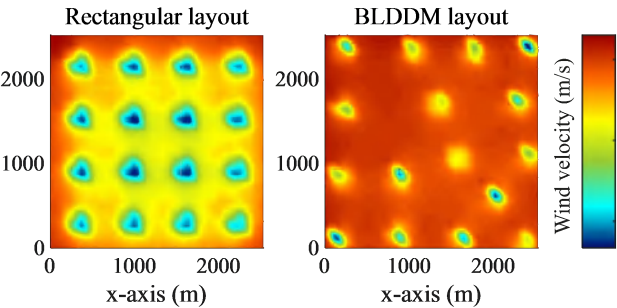
- ✓ 项目用地面积：2520m×2520m
- ✓ 平台的初始布局采用**矩形布局**

优化结果

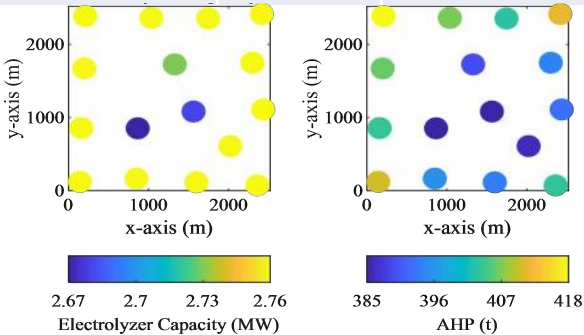
联合优化后的LCOH: **6.33 €/kg**

- ✓ 联合优化（案例4）与现有工程方案（案例1）相比，LCOH**降低19.67%**
- ✓ 与单独优化布局或容量（案例2/案例3）相比，LCOH**降低15.82%/3.21%**

案例	决策变量			仿真结果		
	平台布局	电解槽容量	运行电流	年化成本(M€)	年制量(t)	LCOH(€/kg)
1	×	×	√	47.90	6,075.79	7.88
2	√	×	√	48.76	6,484.37	7.52
3	×	√	√	39.52	6,042.03	6.54
4	√	√	√	40.42	6,384.48	6.33



不同平台布局下场内加权平均风速



优化后不同平台电解槽容量与制氢量

- ✓ 优化后的平台布局更加分散，**场内平均风速高于矩形排布**
- ✓ 电解槽容量与制氢量满足 **“边缘大、内部小”** 原则



- ❑ 关键问题：氢气送出解决方案：管道收集+船舶运输、管道收集+管道运输、船舶收集+船舶运输...
- ❑ 创新点：对不同送出方案的 **管道/船舶路径** 进行优化，减少运输成本

目标函数

$$\min_{x^{GS}, y^{GS}, \xi_{i,j}} C^{TPL}(x^{GS}, y^{GS}) + C^{GPL}(x^{GS}, y^{GS}, \xi_{i,j})$$

x^{GS}, y^{GS}

$\xi_{i,j}$

输氢管道成本

集氢管道成本

候选集氢管道的投资决策变量 (01变量)

集氢站节点坐标 (连续变量)

约束条件

集氢站位置范围约束

$$x^{GS} \in X, y^{GS} \in Y, (x^{GS}, y^{GS}) \in X \times Y$$
$$\text{sqr}t[(x^{GS} - x_j)^2 + (y^{GS} - y_j)^2] \leq D^{MIN}, \forall j \in V^{DP}$$

能流平衡约束

$$|F_{i,j}| \leq \xi_{i,j} \bar{F}_{i,j}, \forall \{i,j\} \in L$$
$$F_{i,j} - H_i = F_{k,i}, \forall i \in V^{DP}$$
$$\{i,j\} \in L_i, \{k,i\} \in L_i$$

生成树约束

$$\sum_{\{i,j\} \in L} \xi_{i,j} = |V^{DP}| - 1, \sum_{\{i,j\} \in L_j} \beta_{i,j} = 1, \forall j \in V^{DP}$$
$$\beta_{j,i} = 0, \forall i \in V^{GS}, \{i,j\} \in L, \beta_{i,j} + \beta_{j,i} = \xi_{i,j}, \forall \{i,j\} \in L$$

工程实际需求约束

$$\xi_{i,j} + \xi_{m,p} \leq 1, \{i,j\}, \{m,p\} \in L, \{i,j\}, \{m,p\} \in L$$
$$\sum_{\{i,j\} \in L_j} \xi_{i,j} \leq N, \forall j \in V^{DP}, \xi_{i,j} = 0, \forall \text{dist}(i,j) > D^{MAX}, i,j \in V^{DP}$$

两阶段优化方法

- ✓ 第一阶段利用基于网格的MILP模型来共同优化集氢站的位置和管道的拓扑结构。
- ✓ 第二阶段采用序列二次规划 (SQP) 算法来优化集气站的位置

一阶段：网格化优化布局

$$\min_{\xi_{i,j}} C^{TPL}(x^{GS}, y^{GS}) + C^{GPL}(x^{GS}, y^{GS}, \xi_{i,j}) \quad \forall k \in K$$
$$\text{s.t.} \quad (x^{GS}, y^{GS}) = (x_k^{GS}, y_k^{GS}), (2) - (15)$$



二阶段：集氢站位置改进

$$\min_{x^{GS}, y^{GS}} C^{TPL}(x^{GS}, y^{GS}) + C^{GPL}(x^{GS}, y^{GS}, \xi_{i,j}^*)$$
$$\text{s.t.} \quad \xi_{i,j} = \xi_{i,j}^*, (x_{(0)}^{GS}, y_{(0)}^{GS}) = (x^{GS*}, y^{GS*}), (2) - (15)$$

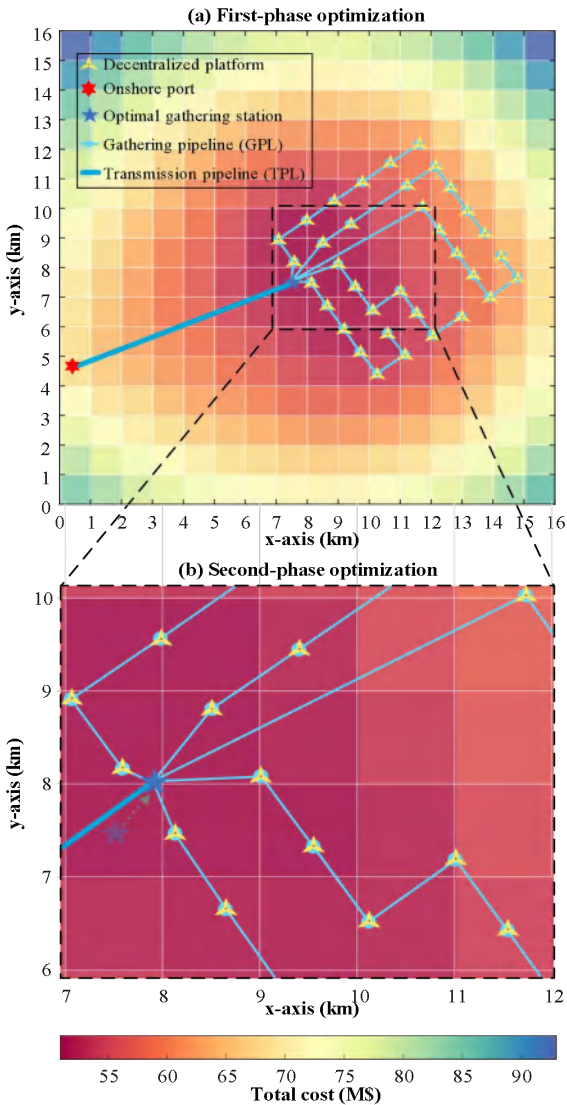
案例分析

- Case 1: 单独优化，先通过模糊c均值方法确定集氢平台位置，随后优化管道布局。
- Case 2: 联合优化，但仅采用第一阶段模型。
- Case 3: 联合优化，采用所提出两阶段方法。

不同Cases的表现对比

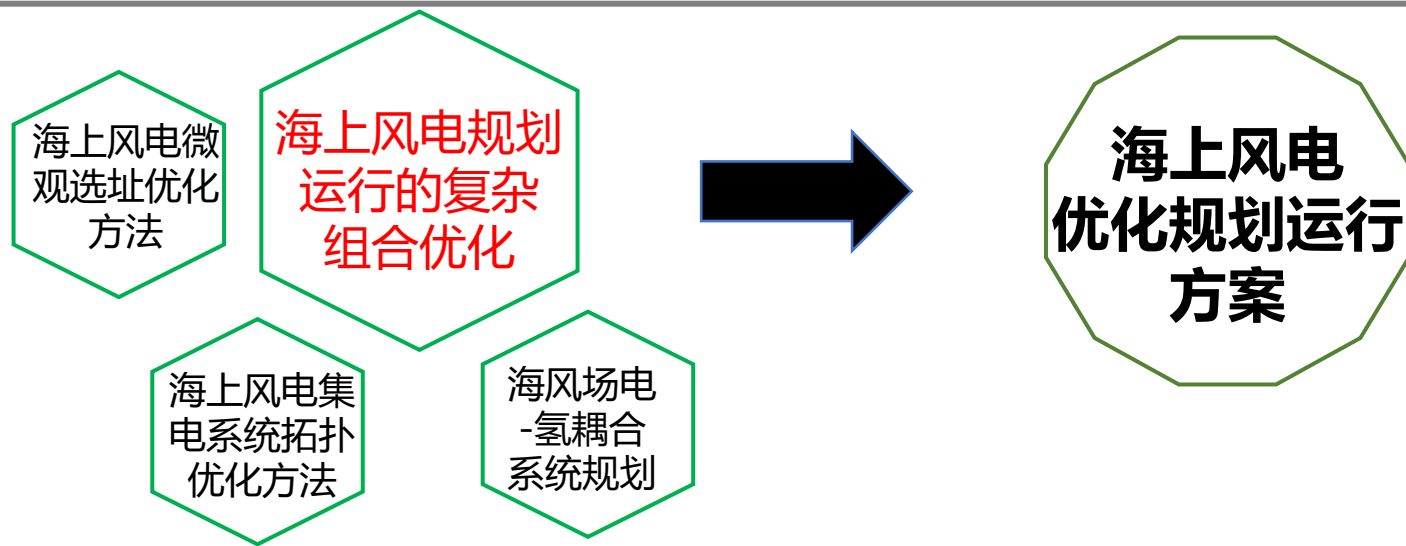
Cases	输氢管道 长度/km	集氢管道 长度/km	总成本	
			M\$	% over Case 3
1	11.22	37.49	54.78	8.86 %
2	7.78	40.83	51.10	1.55 %
3	8.34	38.73	50.32	/

- Case 1: 集氢站位置确定在场址的中心位置，忽略了联合优化的潜力。因此会得到比Case 2与Case 3更高的成本，比Case 3成本高出8.86%。
- 原因在于，集氢站位于边缘（Case 2与Case 3）虽然增加了收集管道的长度，但可以减少更贵的输送管道长度，两者叠加后，总成本反而更低。
- Case 2: 由于网格化的固有误差，因此会比Case 3成本更高，高出1.55%。



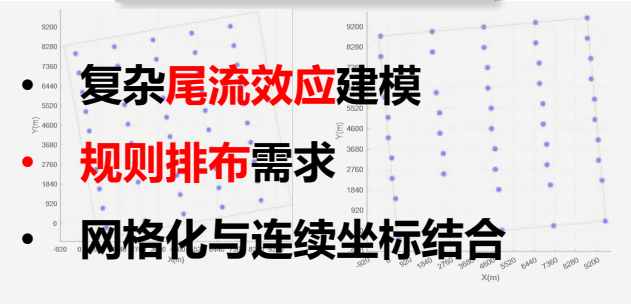
所提出的两阶段优化的计算流程

1. **综合考虑尾流效应、规则布局需求等多方面因素，进行海上风电微观选址优化。**对风电机组的选型及排布进行最优决策，同时作为后续集电系统规划以及运维计划决策的模型架构基础；
2. **计及可靠性需求、传输功率平衡等复杂约束，提出海上风电集电系统拓扑优化设计方法，**在风机排布确定后、进一步优化其线路建设方案、降低建设成本；
3. **考虑海风制氢系统不同环节（如制氢、输氢、用氢等）与地理环境耦合的拓扑/结构，全面提升海风经济性。**



核心科学问题：复杂组合优化问题的建模与求解

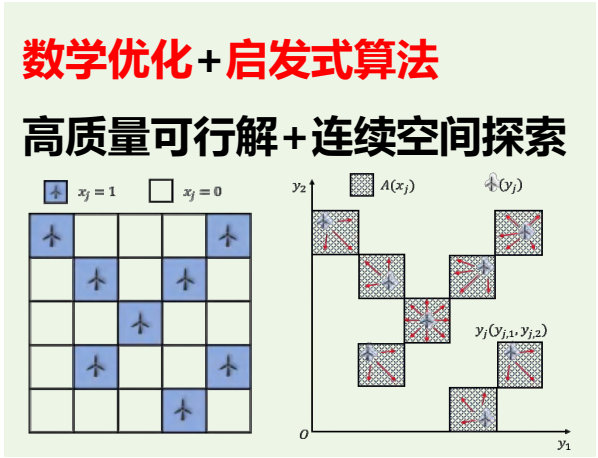
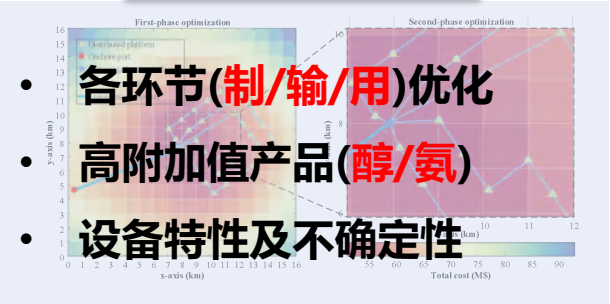
风机微观选址



集电系统规划



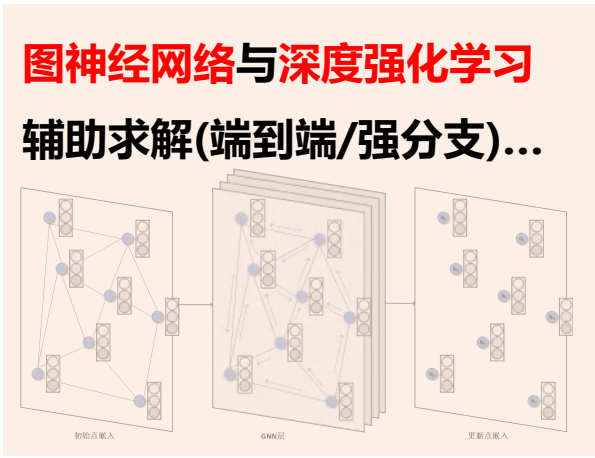
风-氢系统规划



支撑

$$\begin{aligned} \min & F(x) \\ \text{s.t. } & H(x) \geq 0 \\ & x \in D \\ & G = (V, E) \end{aligned}$$

支撑



模型特色

分式目标函数、PDE约束条件、复杂图论特性

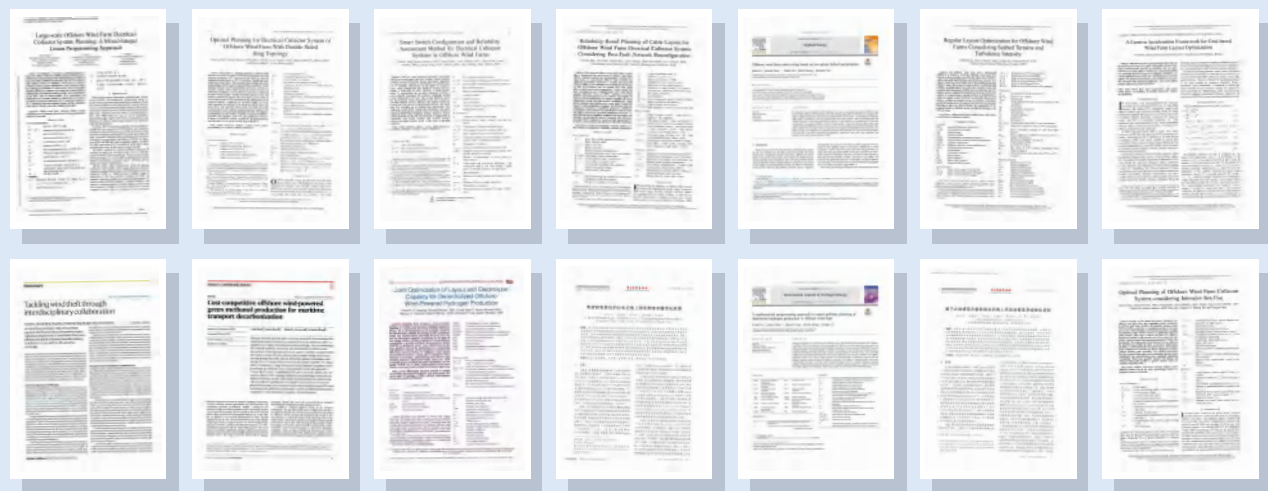
应用技术：复杂能源系统 数学优化建模 与 强最优性高效求解

14 论文

8 授权/申请专利

2 应用证明/感谢信

论文首页



代表性论文



IEEE Trans. Sustainable Energy

2023 · 双边环集电系统规划



Nature Reviews Electrical Engineering

2026 · wind theft 跨学科综述



Nature Communications

2025 · 绿色甲醇生产应用

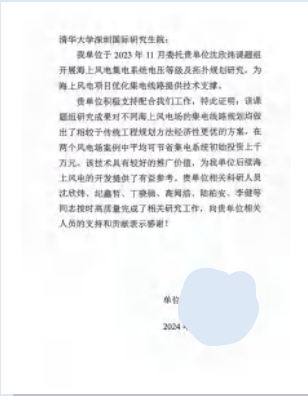
专利证书



应用证明 / 感谢信



应用证明



感谢信



清华大学深圳国际研究生院
Tsinghua Shenzhen International Graduate School

新疆大学 电气工程学院 报告讲座
2026年7月25日，中国 乌鲁木齐

In math we trust, in application we trust



感谢大家
欢迎批评指正！
欢迎关注：
www.xinweishen.com



目标：把论文写在祖国的大海上！

感谢杜云飞、丁骁驰、高闻浩、陆柏安、黄泽海等同学！
NSFC、深圳市优青、广东省海风基金 等 科技项目资助！