

# 海上风电场集电线路设计优化软件 - 操作手册

文档版本: v1.0

适用对象: 海上能源业务开发部 - 电气专业

编制日期: 2026年1月5日

## 1. 软件概述

海上风电集电线路作为风电机组与海上升压站的关键连接纽带，其优化设计对提升风电场全生命周期经济性及降低环境影响具有核心意义，不仅能通过拓扑与路由优化减少建设运维成本、降低线路损耗，还能为深远海、大容量风电场开发提供技术支撑。该优化工作面临拓扑与载流量多约束耦合的技术瓶颈，需综合运用数字化技术、先进优化算法进行应对。

本软件专为海上风电场内集电系统 (35kV/66kV/110kV) 设计，旨在通过多种先进的拓扑优化算法（如Esau-Williams、MST、旋转扫描法），辅助电气专业快速完成集电线路的路径规划与经济性比选。

软件能够根据风机坐标、海缆载流量及造价数据，自动计算并生成线损最小、投资最优的接线方案，并支持一键导出 CAD 图纸和海缆长度。

## 2. 准备工作：输入数据编制

软件通过读取 Excel 文件获取设计输入条件。为了确保计算准确，请严格按照以下格式准备数据。

### 2.1 获取标准模板

启动软件后，点击左侧配置面板顶部的“导出 Excel 模板”按钮，保存 coordinates.xlsx 文件。建议在此模板基础上进行修改。

## 2.2 数据表详解

输入文件通常包含三个 Sheet (工作表) :

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Type	ID	X	Y	Power	tfomHeight					
2	Substation	Sub1	4000	-800	0	0					
3	Turbine	0	0	0	8.139661	0					
4	Turbine	1	800	0	7.168543	0					
5	Turbine	2	1600	0	8.839802	0					
6	Turbine	3	2400	0	8.555943	0					
7	Turbine	4	3200	0	7.449474	0					
8	Turbine	5	4000	0	9.461815	0					
9	Turbine	6	0	800	7.450069	0					
10	Turbine	7	800	800	8.919868	0					
11	Turbine	8	1600	800	7.461116	0					
12	Turbine	9	2400	800	8.503925	0					
13	Turbine	10	3200	800	8.408261	0					
14	Turbine	11	4000	800	7.853862	0					
15	Turbine	12	0	1600	8.543186	0					
16	Turbine	13	800	1600	8.304863	0					
17	Turbine	14	1600	1600	8.889313	0					
18	Turbine	15	2400	1600	6.495356	0					
19	Turbine	16	3200	1600	9.061728	0					
20	Turbine	17	4000	1600	8.897883	0					
21	Turbine	18	0	2400	6.566202	0					
22	Turbine	19	800	2400	8.260685	0					
23	Turbine	20	1600	2400	6.586652	0					
24	Turbine	21	2400	2400	8.658344	0					
25	Turbine	22	3200	2400	9.679163	0					
26	Turbine	23	4000	2400	9.343259	0					
27	Turbine	24	0	3200	6.289542	0					
28	Turbine	25	800	3200	9.151323	0					
29	Turbine	26	1600	3200	8.032592	0					
30	Turbine	27	2400	3200	7.491219	0					
31	Turbine	28	3200	3200	7.350891	0					
32	Turbine	29	4000	3200	6.089128	0					
33											
34											
35											
36											
37											
38											
39											
40											
41											
42											
43											

### (1) Coordinates (坐标数据) - [必须]

录入升压站和所有风机的位置及参数。

- **Type:** 填写 `Substation` (升压站) 或 `Turbine` (风机)。
- **ID:** 设备编号 (如 Sub1, 01, 02...)。
- **X / Y:** 投影坐标 (单位: 米)。建议使用高斯投影坐标 (X, Y), 以保证距离计算准确。

- **Power:** 设备功率 (单位: MW)。升压站填 0。
- **PlatformHeight:** 塔筒/升压站平台高度 (单位: 米) , 用于计算海缆爬升段长度。

## (2) Cables (电缆规格) - [必须]

录入本项目拟采用的海缆截面库。

- **Section:** 导体截面 (mm<sup>2</sup>)。
- **Capacity:** 额定载流量 (A)。注意: 需填入考虑降容系数后的实际允许载流量。
- **Resistance:** 交流电阻 (Ω/km)。
- **Cost:** 综合单价 (元/m)。包含本体及敷设费用。
- **Optional:** 可选标记。
  - 填  表示该型号为“可选大截面电缆” (例如仅在特定大负荷回路使用)。
  - 规则: 列表中必须按截面从小到大排序。

## (3) Parameters (系统参数) - [必须]

定义系统级电气参数。

- **Voltage:** 集电系统标称电压 (如 66 或 35) , 单位 kV。
- **Power Factor:** 系统功率因数 (如 0.95)。

## 3. 算法与优化策略介绍

本软件内置了四种不同机制的拓扑优化算法, 分别适用于不同的工程场景。在点击“运行”后, 系统会并发执行所有算法, 模型自动筛选最优解。

### 3.1 最小生成树算法 (MST Method)

- **原理:** 基于图论中的 Kruskal 或 Prim 算法, 寻找连接所有风机且总路径长度最短的树状结构。此算法**不考虑电缆载流量限制**。
- **作用:** 仅作为理论上的“距离基准”参考。它展示了如果导线无限粗、电流无限制情况下的最短布线可能。在实际工程中通常不可行, 但可用于评估其他方案的距离效率。

### 3.2 基础扇区扫描法 (Capacitated Sweep - Base)

- **原理:** 以升压站为中心, 将平面划分为若干个扇区。算法按顺时针方向扫描风机, 一旦累积功率达到当前最大电缆的承载上限, 就进行“切分”, 形成一个独立的集电回路。
- **特点:** 计算速度极快, 拓扑结构简单清晰, 类似于人工排布的辐射状接线。
- **局限:** 对起始扫描角度敏感, 可能因为恰好在某个位置切分而导致该回路包含距离很远的风机。

### 3.3 旋转扫描优化法 (Rotational Sweep)

- **原理:** 这是对“基础扇区扫描法”的增强版。它会自动尝试 0° 到 360° 之间的所有可能的起始扫描角度。
- **优势:** 通过旋转扫描角度, 可以有效避免因特定方位角切分不当造成的“长尾巴”连线, 通常能比基础扫描法节省 3%~8% 的线缆成本。这是最接近人工精细化排布的自动化算法。

## 3.4 Esau-Williams 启发式算法 (Esau-Williams Heuristic)

- 原理**: 经典的约束最小生成树 (CMST) 算法。它从“所有风机都直连升压站”的初始状态开始，迭代计算“将两台风机互联并断开其中一条回升压站连线”所能带来的成本节省 (Trade-off)。在满足载流量约束的前提下，优先执行节省最大的互联操作。
- 优势**: 能够跳出辐射状的思维定式，自动发现树状、多分叉等复杂但更经济的拓扑结构。在风机分布不规则、离岸距离较远或电缆造价极高的情况下，往往能得到比扫描法更优的结果。

## 4. 操作流程

### 步骤一：启动软件

双击运行程序，等待主界面加载完成。界面分为上侧“操作区”和下侧“结果展示区”。

### 步骤二：上传数据

在上侧“配置面板”中，点击“选择Excel文件”区域（或点击云朵图标），选择编制好的项目 Excel 文件。

上传成功后：

- 文件名右侧会出现绿色对勾。
- 右侧信息面板会自动解析并显示**系统参数**（电压、功率因数）和**电缆规格列表**，请务必核对这些数据是否正确。

### 步骤三：运行计算

点击左侧下方的大型按钮“**运行方案对比**”。

软件将自动执行以下计算任务：

- 多场景分析**：
  - Scenario 1 (标准)*: 仅使用标准电缆库进行优化。

- Scenario 2 (含可选): 尝试引入更大截面的可选电缆, 评估是否能减少回路数。

- Scenario 3 (限制): 模拟最大截面电缆缺货情况下的次优方案。

## 2. 多算法寻优: 对每个场景同时运行 MST、基础扫描、旋转扫描、Esau-Williams 等多种算法。

注意: 计算过程中下方黑色日志窗口会实时滚动显示计算进度, 通常耗时 10-60 秒, 取决于风机数量。

## 步骤四：查看与比选

计算完成后, 系统会自动筛选出综合造价最低的推荐方案, 并在界面上展示。

### 1. 结果列表:

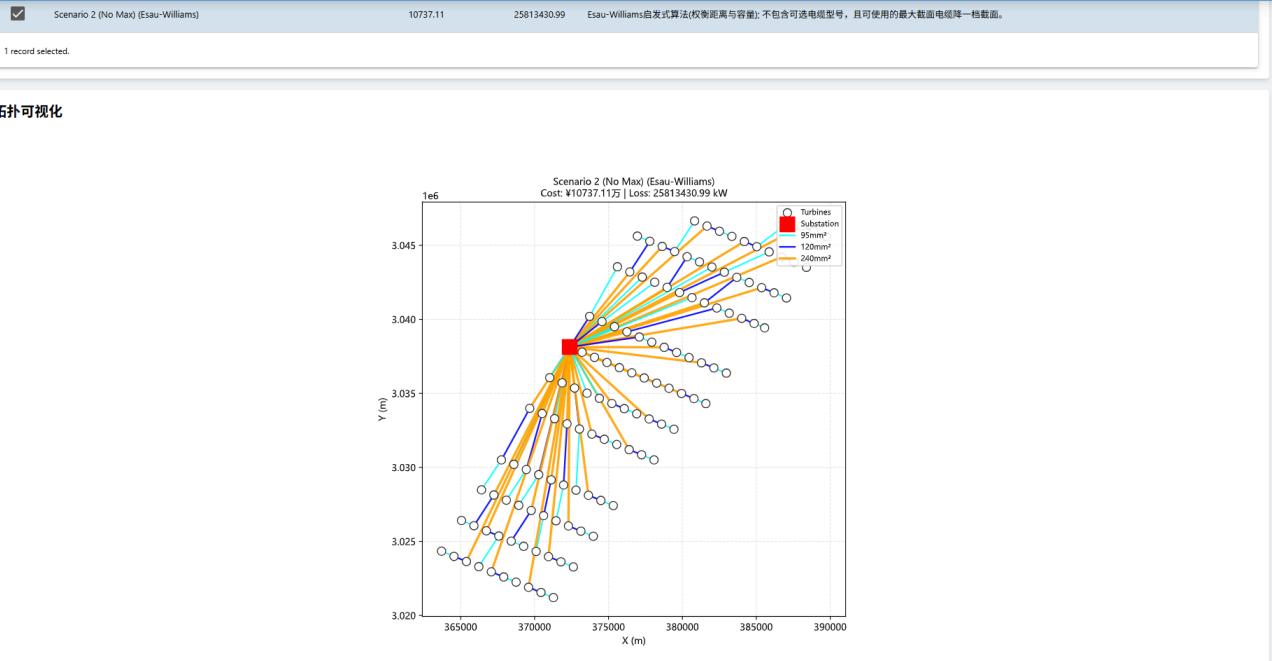
右侧中部的表格列出了所有计算出的可行方案。

- Cost (万元): 总投资估算。
- Loss (kW): 全场集电线路总线损。
- 操作: 点击表格中的任意一行, 下方的拓扑图会自动切换到该方案。

### 2. 拓扑可视化:

右侧下方的绘图区展示集电线路走向。

- 不同颜色的线条代表不同截面的电缆。
- 图例会标明线型对应的截面。
- 升压站显示为红色方块, 风机为圆点。



## 5. 成果导出

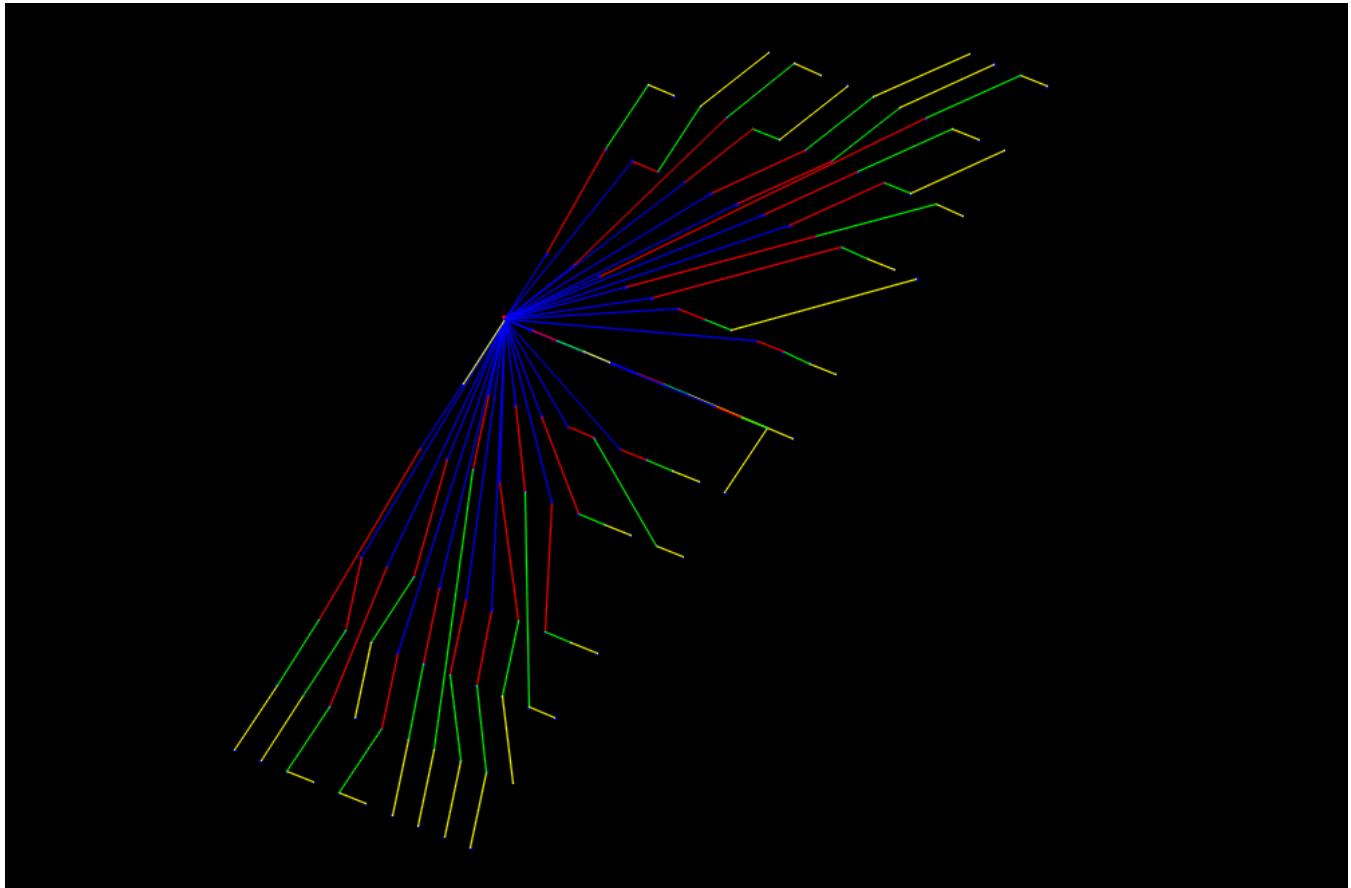
比选确定最终方案后，可以使用底部的“导出与下载”功能区生成设计文件。

### 5.1 导出 CAD 图纸 (.dxf)

- **导出推荐方案**: 直接点击“导出推荐方案 DXF”。
- **导出特定方案**: 在表格中选中任意一行，点击“导出选中方案 DXF”。

生成的 DXF 文件特点：

- **分层管理**: 不同截面的电缆位于不同图层 (Layer)，方便在 AutoCAD 中通过图层过滤器批量修改线型或颜色。
- **地理坐标**: 图纸保留了 Excel 中的原始坐标系，可直接通过“原点粘贴”功能合并到项目总图中。



## 5.2 导出 Excel 报告

点击“[下载 Excel 对比表](#)”，将生成一份包含详细工程数据的 Excel 文件，内容包括：

- **Summary:** 所有方案的经济技术指标汇总。
- **Details:** 推荐方案的每一条海缆连接明细（起点、终点、长度、型号）。

## 5.3 批量归档

点击“[导出全部方案 DXF \(ZIP\)](#)”，可将所有计算产生的方案图纸和报表打包下载，便于项目归档。

# 6. 常见问题 (FAQ)

**Q: 为什么上传文件后提示“电缆数据校验失败”？**

A: 请检查 `Cables` 表。电缆必须严格按照截面从小到大排列，且载流量也必须随截面增加而增加。如果定义了 `Optional` 电缆，它必须是列表中截面最大的一条。

**Q: 计算出的方案有的回路负载率过高怎么办？**

A: 软件算法以不超过额定载流量为约束条件（默认允许 100% 满载）。在实际工程中，建议在 `cables` 表录入载流量时，预先乘以 0.95 或其他安全系数，留出裕度。

**Q: 图纸导出后，在 CAD 里看不到东西？**

A: 请双击鼠标滚轮（Zoom Extents）全屏显示。由于风机坐标通常是大地坐标（数值很大），如果 CAD 当前视口在 (0,0) 附近，可能会找不到图形。