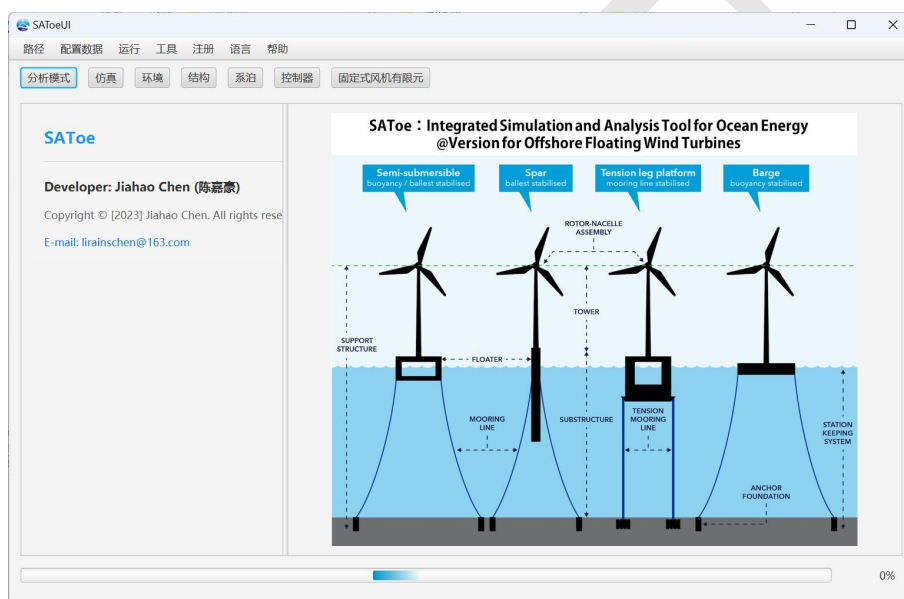


SAToeUI

用户使用手册

SAToeUI Software User Manual



软件名称	SAToeUI 海上风工程综合仿真平台
版本号	V2.6.0
核心求解器	SAToex64 （海上风机多场耦合时域一体化求解器）
集成组件	HydroSolver（势流网格与求解） / WindGen（湍流风场生成） / FOWT Selector（浮式风机选型评价） / FOWT Cost（浮式风机综合成本估算） / FOWT Optimizer（浮式风机平台优化） / AI Assistant（AI辅助）
开发者	陈嘉豪
联系邮箱	lirainschen@163.com
文档日期	2026 年 7 月

目录

第一章 软件概述	6
1.1 软件简介	6
1.2 主要功能	6
1.3 适用领域	6
第二章 软件版本信息	7
2.1 版本详情	7
2.2 集成组件版本	7
第三章 软件安装方法	8
3.1 系统要求	8
3.2 分发格式	8
3.3 安装步骤	8
3.3.1 便携版安装	8
3.3.2 安装版安装	8
3.3.3 求解器单独运行	8
3.4 首次启动配置	9
3.5 特殊版本	9
第四章 软件使用方法	10
4.1 界面布局	10
4.2 快速入门（10 步工作流）	11
第 1 步：路径配置	11
第 2 步：分析模式选择	11
第 3 步：仿真参数配置	12
第 4 步：环境条件设置	12
第 5 步：结构参数配置	13
第 6 步：水动力分析（可选步骤）	13
第 7 步：风场生成（可选步骤）	13
第 8 步：数据文件管理（可选步骤）	13
第 9 步：运行仿真	13
第 10 步：结果分析	13
4.3 部分功能模块配置详解	14
4.3.1 系泊系统配置	14
4.3.2 控制器配置	15
4.3.3 FOWT Selector 浮式风机选型工具	15
4.3.4 FOWT Cost 浮式风机成本估算工具	15
4.3.5 FOWT Optimizer 浮式风机基础优化工具	16
4.3.6 AI 助手	16
4.3.7 固定式风机有限元计算分析	17
4.4 3D 可视化功能	17
4.4.1 三维渲染	18
4.4.2 部件颜色映射	18
4.4 集成工具程序概览	18
第五章 软件输入参数说明	20
5.1 输入文件目录结构	20
5.2 Analyse.dat — 分析模式配置	20
5.3 Simulation.dat — 仿真控制参数	20

5.3.1 物理模型与时间积分.....	20
5.3.2 自由度 (DOF) 开关.....	21
5.3.3 塔架与控制参数.....	21
5.3.4 叶片参数	21
5.3.5 输入文件路径与后处理	22
5.4 Environment.dat — 环境参数	22
5.4.1 水动力参数.....	22
5.4.2 风场参数	22
5.4.3 二阶波浪力与输出控制	23
5.5 Structure.dat — 结构参数.....	23
5.5.1 转子与叶片参数.....	23
5.5.2 塔架参数	24
5.5.3 平台参数	24
5.6 系泊系统参数 (Mooring.smqsc)	24
5.7 ControlParaFile.dat — 控制器参数	25
5.7.1 内置变桨控制器 (CPC)	25
5.7.2 内置发电机扭矩控制.....	25
5.7.3 高级控制器与外部控制器.....	26
5.7.4 故障模拟与外部载荷.....	26
5.8 水动力数据文件 (HydroData)	26
5.9 输出文件说明	27
第六章 帮助和支持信息	29
6.1 软件内置帮助	29
6.2 提示信息 (tooltips)	29
6.3 AI 助手使用指南	30
6.4 常见问题 (FAQ)	30
Q1: 如何设置新的仿真?	30
Q2: 为什么仿真不稳定?	31
Q3: 如何生成水动力数据?	31
Q4: 3D 动画文件路径含中文导致加载失败?	31
Q6: 如何清理旧的计算结果?	31
Q7: 如何配置控制器?	31
6.5 技术支持.....	31
6.6 使用注意事项	31
附录 A 水动力势流求解器 (HydroSolver).....	33
A.1 工具简介	33
A.2 界面布局	34
A.3 操作流程	34
A.3.1 网格转换 (可选)	34
A.3.2 选择网格文件	34
A.3.3 配置求解参数	35
A.3.4 运行与结果复制	35
A.4 输出文件说明	35
A.5 依赖程序与工作目录.....	36
附录 B 风场生成器 (WindGen).....	37
B.1 工具简介	37

B.2 TurbSim 界面布局	38
B.3 关键参数说明	38
B.3.1 运行时选项	38
B.3.2 风机与模型规格	38
B.3.3 气象边界条件	39
B.4 操作流程	39
B.5 WindField Editor 风场数据编辑器	39
附录 C 浮式风机选型工具 (FOWT Selector).....	41
C.1 工具简介	41
C.2 界面布局	41
C.3 单场址推荐	42
C.3.1 输入参数	42
C.3.2 权重预设	42
C.3.3 评价结果	43
C.3.4 批量场址分析	43
C.4 TOPSIS 精排	43
C.5 输出文件	44
C.6 帮助中心	44
附录 D 浮式风机成本估算工具 (FOWT Cost)	45
D.1 工具简介	45
D.2 界面布局	45
D.3 四种浮体模板	46
D.4 操作流程	46
D.5 成本计算模型	46
D.6 结果查看	47
D.7 输出文件	47
附录 E 浮式风机基础优化工具 (FOWT Optimizer)	49
E.1 工具简介	49
E.2 界面布局	49
E.3 三大功能模块	50
E.3.1 单解评估 (Single object)	50
E.3.2 尺寸优化 (Sizing Optimization)	51
E.3.3 敏感性分析 (Sensitivity)	51
E.4 约束体系	52
E.5 输出文件	53
附录 F AI 智能助手 (AI Assistant)	54
F.1 工具简介	54
F.2 界面布局	54
F.3 配置说明	54
F.4 两种工作模式	55
F.5 内置工具	55
F.6 安全机制	56
F.6.1 API Key 加密	56
F.6.2 路径安全	56
附录 G 固定式风机桩土-有限元耦合	57
G.1 单桩基础 (Monopile) 设置说明	57

G.1.1 输入文件.....	57
G.1.2 结构建模.....	57
G.1.3 参数配置详解	57
G.2 导管架基础 (Jacket) 设置说明.....	62
G.2.1 输入文件.....	62
G.2.2 结构建模.....	63
G.2.3 参数配置详解	63
G.3. 分析类型与工作流程.....	65
G.3.1 静力分析 (analysis_type = “static”)	65
G.3.2 模态分析 (analysis_type = “modal”)	65
G.3.3 瞬态时域分析 (analysis_type = “transient”)	65
G.4. 结果输出与解释.....	66
G.4.1 输出文件列表	66
G.4.2 VTK 可视化文件.....	66
G.4.3 应力校核 (UC Check)	67
G.5 使用建议与注意事项.....	67
G.5.1 参数选择建议	67
G.5.2 桩土模型选择	67
G.5.3 常见问题排查	68
参考文献	69

第一章 软件概述

1.1 软件简介

SAToeUI 是一款由陈嘉豪博士自研的海上风工程领域的综合仿真、分析与优化平台图形界面软件，为自研的海上风机多场耦合求解器 SAToex64 提供参数配置、求解运行和结果后处理完整 workflow。软件支持浮式风机（FOWT）和固定式风机（OWT）的风-浪-流耦合动力分析，并集成了水动力势流求解器、风场生成器、自研的浮式风机选型评价工具（FOWT Selector）、浮式风机项目综合成本估算工具（FOWT Cost）和浮式风机平台优化工具（FOWT Optimizer），可一站式完成从网格处理、水动力计算、风场生成到时域耦合仿真、基础选型、基础优化、成本估算的项目主要流程。此外，自研的 AI 辅助功能，可提供关于软件内容的智能问答和智能设置。软件提供了中/英双语切换显示，详细的帮助中心与输入提示，增强用户使用的便捷性。

1.2 主要功能

- 浮式风机风-浪-流耦合时域动力仿真；
- 浮式风机强迫运动分析；
- 陆上/固定式风机有限元分析；
- 基于势流理论的频域水动力求解；
- 基于 IEC 标准的湍流风场生成；
- 浮式风机基础型式选型与评价；
- 浮式风机全生命周期成本估算与 LCOE 分析；
- 浮式风机基础平台尺寸优化与敏感性分析；
- 多种系泊系统建模与分析（内置 7 种自研的系泊算法+兼容 MoorDyn DLL 调用）
- 风机控制器配置（内置自研的多种控制器、兼容外部 DLL 控制器接口）
- 三维可视化与动画播放、时历数据统计与频谱分析
- AI 智能助手（参数查询、配置建议、错误诊断、自动修改参数）

1.3 适用领域

本软件适用于海上风电工程的科研与工程设计，涵盖以下典型应用场景：浮式风机平台运动响应分析、系泊系统设计与校核、固定式风机基础结构分析、风机控制器整定与验证、极端海况下风机生存性评估、水动力系数计算与数据库建立、浮式风机基础型式前期选型、项目成本估算与 LCOE 分析、基础平台尺寸优化等。

第二章 软件版本信息

2.1 版本详情

项目	内容
软件名称	SAToeUI
软件版本	V2.6.0
核心求解器	SAToex64.exe
图形界面框架	JavaFX 17.0.2
三维可视化库	VTK 9.1.0
JSON 处理库	Jackson 2.12.5
开发语言	Java / Fortran

2.2 集成组件版本

组件	可执行文件	所在目录	说明
SAToe 求解器	SAToex64.exe (自研, 可单独运行)	Solver/ (可自主选择, 但使用前需在 UI 配置求解器路径)	核心耦合动力求解器, 运行需要许可
浮式风机选型评价工具	FOWT Selector (自研)	内嵌	四种浮式风机基础选型评价系统, 运行需要许可
浮式风机项目综合成本估算工具	FOWT Cost (自研)	内嵌	浮式风机项目投资与年化成本估算, 运行需要许可
浮式风机平台优化工具	FOWT Optimizer (自研)	内嵌	四种浮式风机平台总体快速优化, 运行需要许可
势流网格与水动力系数求解器	HAMS.exe (内核开源, UI 自研, 可独立运行)	PotentialFlow/Bin/	频域势流水动力系数求解器, 免费提供 UI 与内核
时空风场生成器	TurbSim64.exe (内核开源, UI 自研, 可独立运行)	WindGen/	IEC 标准湍流风场生成器, 免费提供 UI 与内核

第三章 软件安装方法

3.1 系统要求

项目	最低要求	推荐配置
操作系统	Windows 7 (64 位)	Windows 10/11 (64 位)
磁盘空间	约 500 MB	1 GB 以上 (含算例数据)
处理器	64 位 x86 处理器	多核处理器
显卡	支持 OpenGL 2.1	显卡 (独立显卡 3D 渲染更流畅)

3.2 分发格式

SAToeUI 提供两种分发格式，用户可根据需求选择：

格式	文件名	特点	适用场景
便携版	SAToeUI-green.zip	解压即用，无需安装	免安装使用、U 盘便携
安装版	SAToeUI-Setup.exe	安装向导，支持自定义路径	正式安装、创建快捷方式

3.3 安装步骤

3.3.1 便携版安装

1. 获取 SAToeUI-green.zip 压缩包。
2. 将压缩包解压至目标目录（如 D:\Program Files\SAToeUI）。
3. 进入解压目录，双击运行 SAToeUI.exe 启动软件。
4. 首次启动后，通过菜单 Path → Solver Path 设置求解器路径，Path → Input Files Path 设置输入文件目录，并点击 Save Settings 保存配置。

3.3.2 安装版安装

1. 获取 SAToeUI-Setup.exe 安装程序。
2. 双击运行安装程序，启动安装向导。
3. 按照向导提示选择安装路径（可自定义），完成安装。
4. 安装完成后，可通过开始菜单或桌面快捷方式启动软件。

3.3.3 求解器单独运行

1. 上述解压或安装后，在安装目录\Solver\目录下的求解器内核，许可和 Data 文件等可复制或移动到本电脑其他路径以及拷贝多份同时运行。

2. 或单独下载求解器压缩文件，解压即可使用（需要许可）；
3. 运行只需要双击 SAToex64.exe 或采用第三方脚本启动，无需参数输入其他配置。

3.4 首次启动配置

软件首次启动后，需进行以下路径配置（配置保存在 conf/run.cnf）：

配置项	菜单路径	说明	典型值
求解器路径	Path → Solver Path	SAToex64.exe 可执行文件位置	安装目录\Solver\SAToex64.exe
输入文件路径	Path → Input Files Path	输入数据根目录	安装目录\Solver\Data\Input
保存配置	Path → Save Settings	将当前配置写入 run.cnf	---

3.5 特殊版本

1. SAToe2AQWA: SAToe 与 AQWA 的耦合版本，实现 AQWA 实时水动力计算，SAToe 实时风机气动荷载-控制-结构弹性计算耦合，可实现个性化或复杂风机系统仿真；

2. SAToe2WASIM: SAToe 与 WASIM 的耦合版本，实现 WASIM 实时水动力计算，SAToe 实时风机气动荷载-控制-结构弹性计算耦合，可选同步锚链力、部分水动力的耦合传递（相比 AQWA，WASIM 可实现时域势流水动力实时求解，对于变水位，大姿态运动、极端海况，可实时考虑湿表面变化带来的非线性水动力影响）

注：上述特殊版本为试验版本，并不公开，如感兴趣，可联系开发者。

第四章 软件使用方法

4.1 界面布局

SAToeUI 采用经典的菜单栏 + 工具按钮 + 左右分栏布局：

区域	内容	说明
菜单栏	Path ConfigData Running Tools Register Language Help	提供全部功能入口
工具栏	AnalyseMode Simulation Environment Structure mooringMenu Controller FEM_OWT	常用参数配置快捷入口
左侧面板	帮助信息 / 文件列表 / 结果选择	导航与辅助信息
右侧面板	参数编辑表单 / 数据图表 / 3D 视图	主要操作与展示区域
进度条	位于底部，旁边显示进度百分比	显示计算进度

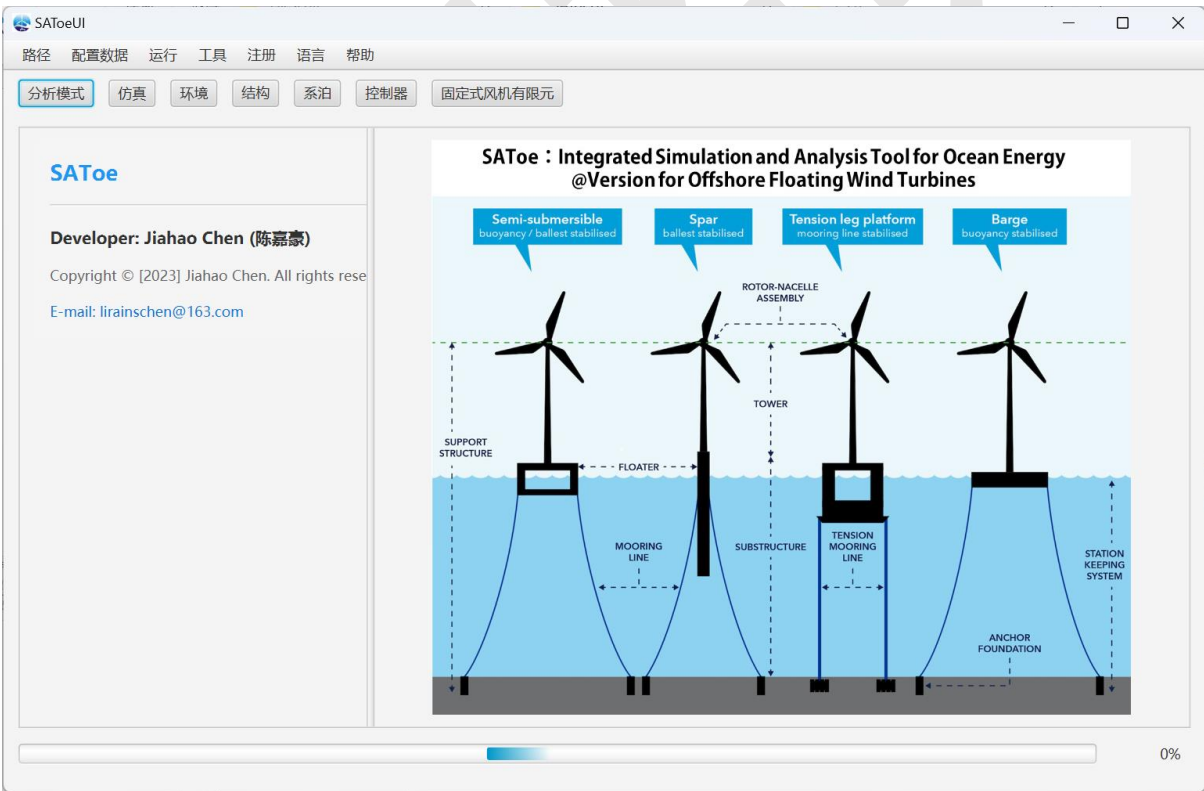


图 SAToeUI 整体界面布局

菜单栏各菜单项详细说明如下：

菜单	子项	功能说明
Path	Solver Path	设置 SAToex64.exe 求解器路径

Path	Input Files Path	设置输入数据目录
Path	Save Settings	保存当前配置到 run.cnf
ConfigData	AirfoilData	管理翼型气动数据文件
ConfigData	HydroData	管理水动力系数文件
ConfigData	WindData	管理风场数据文件
Running	Run	启动 SAToex64 求解器
Running	Result	进入结果分析界面
Running	Stop	终止求解过程
Tools	HydroSolver	打开 HAMS 水动力势流求解器 (详见附录 A)
Tools	WindGen	打开 TurbSim 风场生成器 (详见附录 B)
Tools	FOWT_Selector	打开浮式风机选型工具 (详见附录 C)
Tools	FOWT_Cost	打开浮式风机成本估算工具 (详见附录 D)
Tools	FOWT_Optimizer	打开浮式风机基础优化工具 (详见附录 E)
Tools	AI Assistant	打开 AI 智能助手 (详见附录 F)
Register	Licence	许可证管理
Language	English / Chinese	切换界面语言 (中英文)
Help	Quick Start Tutorial	快速入门教程
Help	Parameter Documentation	参数详细说明
Help	Integrated Tools Guide	集成工具使用指南
Help	Open User Manual	打开用户手册 PDF
Help	FAQ & Support	常见问题与技术支持

分栏比例可拖拽调整，限制在 20%-50% 之间。窗口尺寸变化时界面自适应缩放。

4.2 快速入门 (10 步 workflow)

以下为完整的仿真工作流程，从路径配置到结果分析共 10 个步骤：

第 1 步：路径配置

菜单 Path → Solver Path 选择求解器可执行文件 SAToex64.exe；菜单 Path → Input Files Path 选择输入数据目录（如 Solver/Data/Input/）；菜单 Path → Save Settings 保存当前配置。

第 2 步：分析模式选择

点击工具栏 AnalyseMode 按钮，选择分析模式：

AFlag	模式	说明
1	DOFA	单体模式内置强迫运动分析（注意：多体或外部输入运动的强迫运动分析可在控制器文件进行配置）
2	WWA	风-浪-流耦合动力分析（常规时域仿真）（默认值）
3	FEM OWT	固定式风机有限元分析

固定式风机 owt_test_mode 参数：0=禁用，1=单桩（monopile），2=导管架（jacket）。

第 3 步：仿真参数配置

点击工具栏 Simulation 按钮，配置仿真控制参数：

关键参数	说明	典型值
PhysicalModel	物理模型：1=单刚体，2=多体	1 或 2
SimuTime	仿真总时长（秒）	-
TimeStep	时间步长（秒），建议 0.01-0.05	0.0125
OUTTinter	输出间隔（步数）	10
IntegralMethod	积分方法：1=RK4，2=ABM，3=Newmark-Beta	1
DOF 开关	1=启用，0=禁用，-1=强制运动	按需设置
Initial-	第一个数是初始位置，第二个数是初始速度	0
Flex_ModeShape	0=刚体，1=柔性（自动化模态），2=桨叶模态采用多项式，塔筒采用自动化模态	0 或 2
GenBpCL	发电机/变桨控制开关：0=off control，1=on control	0 或 1
TypeCL	风机控制器类型：0=内置固定式风机，1=内置无滤波浮式风机控制，2=内置滤波浮式风机控制，3=外部 bladed-type DLL 或 ROSCO DLL 控制	2 或 3
GenControl	发电机转速控制方法：0=关闭该自由度，-1=定速旋转，1=打开转速控制	-1 或 1
ILSSSARS	低速轴转动初值与速度（rpm）	0 或额定值

第 4 步：环境条件设置

点击工具栏 Environment 按钮，配置波浪、风场、海流等环境参数。

- 波浪参数：water depth（水深，m）、waveflag（0=静水，1=规则波，2=不规则波 JONSWAP）、H/Hs（波高/有效波高，m）、T/Tp（波周期/谱峰周期，s）、WaveDir（波浪方向，度，0=沿 X 轴）。
- 海流参数：CurrentFlag（0=无流，1=均匀流，2=抛物线分布）、CurrentV（流速，m/s）。
- 风场参数：AeroMethod_flag（气动计算方法，0=BEM，1=FVM），windflag（0=无风，1=定常风，2/3=湍流风 TurbSim）、windspeed（轮毂高度三维风速矢量，m/s）。
- Output3DFlag：0=不输出动画文件，1=输出 point/line 风格，2=输出 3D surface 风格

第 5 步：结构参数配置

点击工具栏 Structure 按钮，配置平台质量、重心位置、惯性张量、轮毂/机舱参数、叶片几何与结构属性、塔架参数、附加质量/阻尼/刚度矩阵以及 Morison 杆件等。

MooringType：锚链计算方法类型选择，内含 7 种自研系泊方法+MoorDyn 调用，共 8 种，根据分析系泊类型进行选择，优选类型 1 或 7=准静态悬链线，3=MoorDyn（动态）。

第 6 步：水动力分析（可选步骤）

菜单 Tools → HydroSolver：准备网格文件（.pnl 格式，或通过 GDF 转换）；点击 View Model 预览三维网格；设置频率范围、方向数等计算参数；点击 Copy to Input 拷贝文件；点击 Run 运行求解器；点击 Copy Results 将结果拷贝至 HydroData 文件夹（.1、.3、.hst 文件）。详细操作参见附录 A。

第 7 步：风场生成（可选步骤）

菜单 Tools → WindGen：配置湍流模型（Kaimal/von Karman 等）；设置风剖面类型（LOG/PL/JET 等）；定义网格尺寸、轮毂高度、参考风速；点击 Save 保存输入文件；点击 Run 生成风场；将输出文件拷贝至 WindData 文件夹。详细操作参见附录 B。

第 8 步：数据文件管理（可选步骤）

菜单 ConfigData 管理各类数据文件：AirfoilData（翼型气动数据，*.dat）、HydroData（水动力系数，*.1/*.3/*.hst/*.12d/*.12s）、WindData（风场数据，*.hh/*.u/*.v/*.w）。

第 9 步：运行仿真

菜单 Running → Run 启动 SAToex64 求解器；菜单 Running → Stop 终止求解过程。运行时右侧面板显示实时日志输出，底部进度条显示计算进度（通过解析输出中的 Prog: XX% 提取进度百分比）。

第 10 步：结果分析

菜单 Running → Result 进入结果分析界面，提供三类功能：

- 3D 动画：输入时间序列号，点击 Open 查看单帧、Play 连续动画播放，支持 Fast 加速、Pause 暂停、BgColor 背景色选择、Color Config 部件颜色自定义。
- 数据曲线：选择输出文件和变量绘制时历曲线，支持统计量分析（均值、极值、标准差）和频谱分析（幅值谱、功率谱密度）。
- Clear Data：清理所有输出文件。

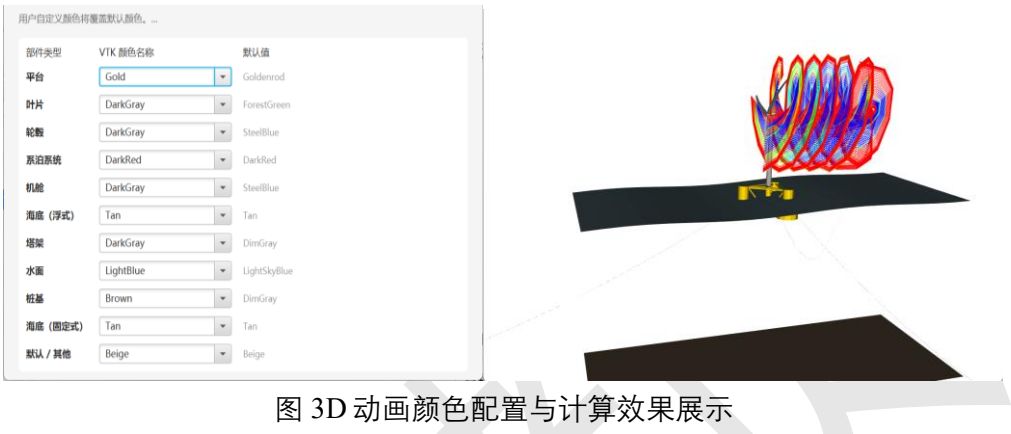


图 3D 动画颜色配置与计算效果展示

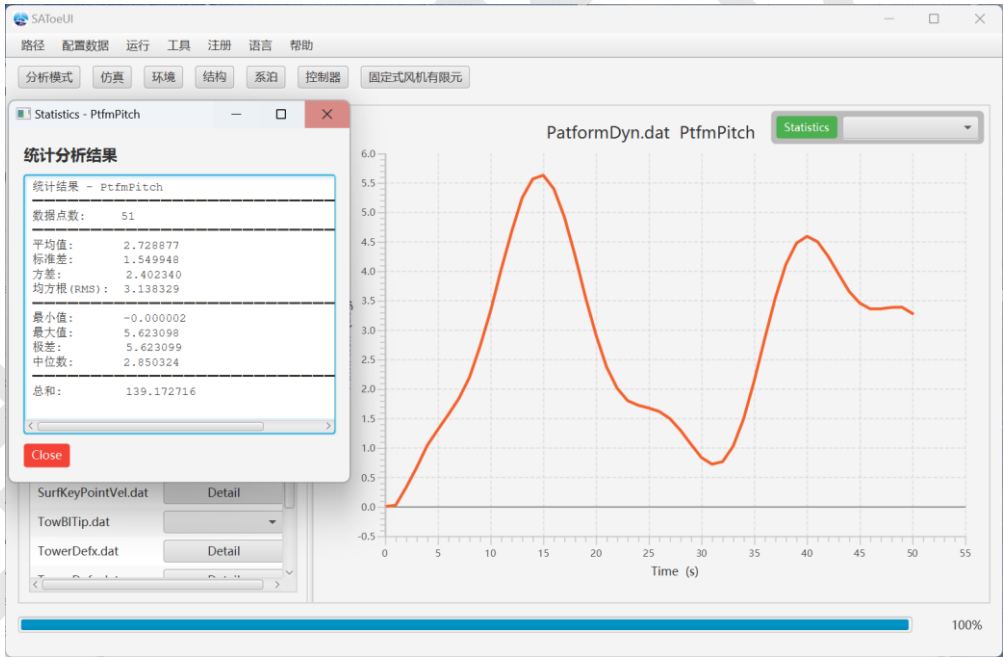


图 计算结果展示与统计

4.3 部分功能模块配置详解

4.3.1 系泊系统配置

点击工具栏 mooringMenu 按钮，可编辑多种系泊模型文件：

文件	编辑方式	说明 (MooringType 类型选择)
Mooring.smqsc	专用表单	悬链线系泊配置（类型 1 或 7 种悬链线方法共用）
Mooring.mmqsc	文本编辑	多段悬链线系泊（类型 4）

Mooring.spmqsc	专用表单	单点系泊配置（类型 5）
Mooring.smmr	专用表单	谱方法系泊模型（适用 TLP）配置（类型 6）
MoorDyn.dat	文本编辑	MoorDyn 动态系泊配置（类型 3）
Mooring.qfeam	文本编辑	准静态有限元系泊配置（类型 8）
Mooring.qlum	文本编辑	集中质量法系泊配置（类型 9）
注意：类型 2 的有限元系泊.mfem 文件已不提供和支持		

4.3.2 控制器配置

点击工具栏 Controller（控制器）按钮，编辑内置控制参数文件 ControlParaFile.dat，包含：变桨控制增益（PC_KP、PC_KI）、变桨速率限制（PC_MaxRat）、发电机扭矩控制（VS_Rgn2K 等）、IPC 独立变桨控制、偏航控制参数、系泊控制参数、陀螺控制参数、故障模拟参数、船舶碰撞参数、强迫运动、外部载荷参数、高级控制器 DLL 支持等。

4.3.3 FOWT Selector 浮式风机选型工具

菜单 Tools → FOWT_Selector，打开浮式风机基础型式选型工具。该工具面向浮式风电项目前期，结合项目场址与风机基本参数，在半潜式、驳船式、Spar、TLP 四种基础型式之间进行相对适应性评估，提供单场址推荐、批量评价和熵权-TOPSIS 概念方案精排三大功能。详细说明参见附录 C。

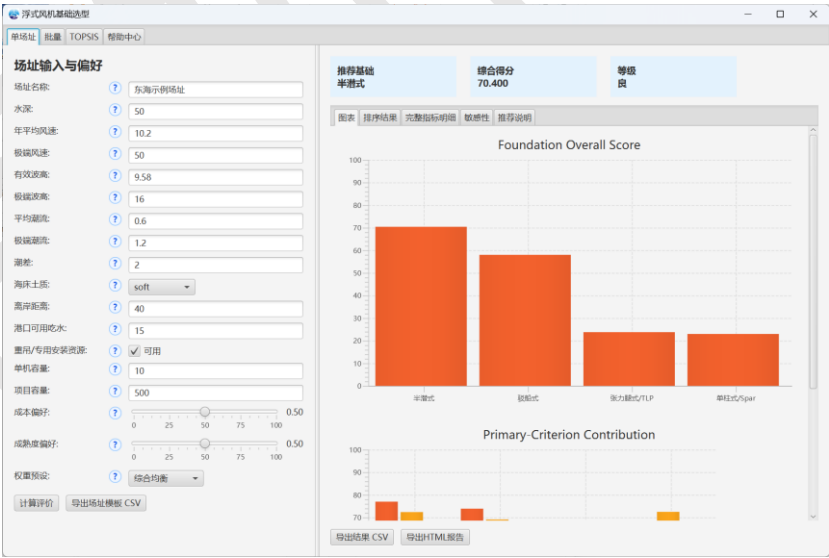


图 浮式风机选型功能界面

4.3.4 FOWT Cost 浮式风机成本估算工具

菜单 Tools → FOWT_Cost，打开浮式风机成本估算工具。该工具采用自下而上（bottom-up）的生命周期成本模型，计算 CAPEX（资本开支）、OPEX（运维成本）、DECEX（退役拆除成本）和 LCOE（平准化度电成本）等，并提供关键参数敏感性分析。详细说明参见

附录 D。

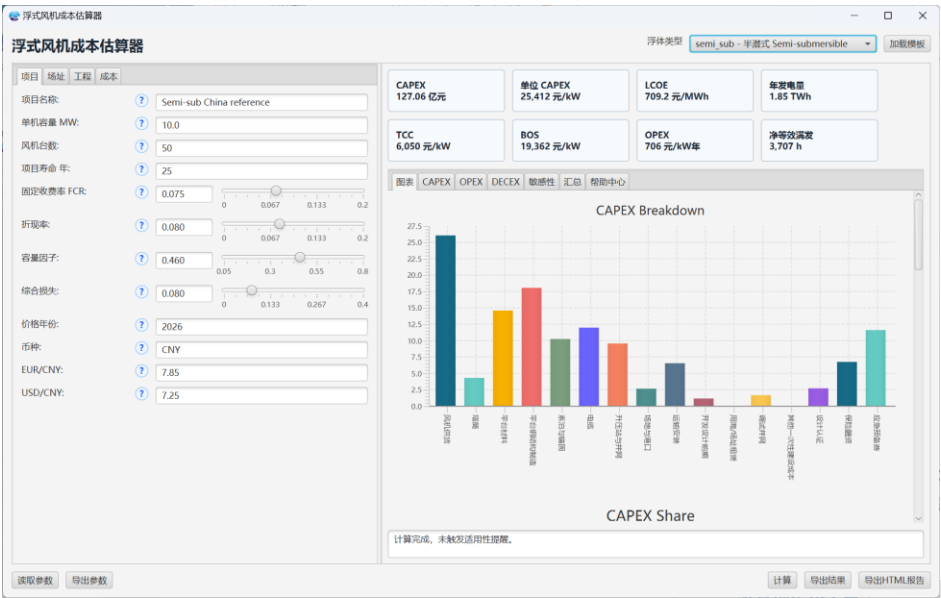


图 浮式风机成本估算工具界面

4.3.5 FOWT Optimizer 浮式风机基础优化工具

菜单 Tools → FOWT_Optimizer，打开浮式风机基础平台优化工具。该工具基于刚体小运动线性化模型，对四种主流浮式基础平台进行平台总体性能评估、PSO/NSGA-II 尺寸优化和敏感性分析。详细使用说明参见附录 E。

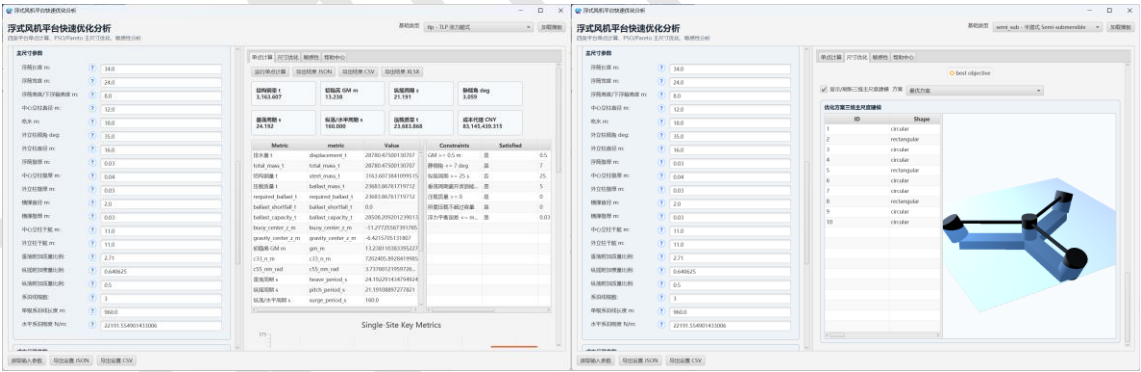


图 浮式风机基础优化工具界面

4.3.6 AI 助手

菜单 Tools → AI Assistant，使用前需在 AI Assistant 窗口中设置 API Key 和 API 地址。支持两种模式：Chat 模式（问答对话，参数说明，文件格式解释，仅读取权限）和 Agent 模式（根据用户要求，自动修改配置文件参数，读写权限）。支持多种 AI 模型：DeepSeek、GPT-4、Claude、Gemini、Qwen 等。详细使用说明参见附录 F。

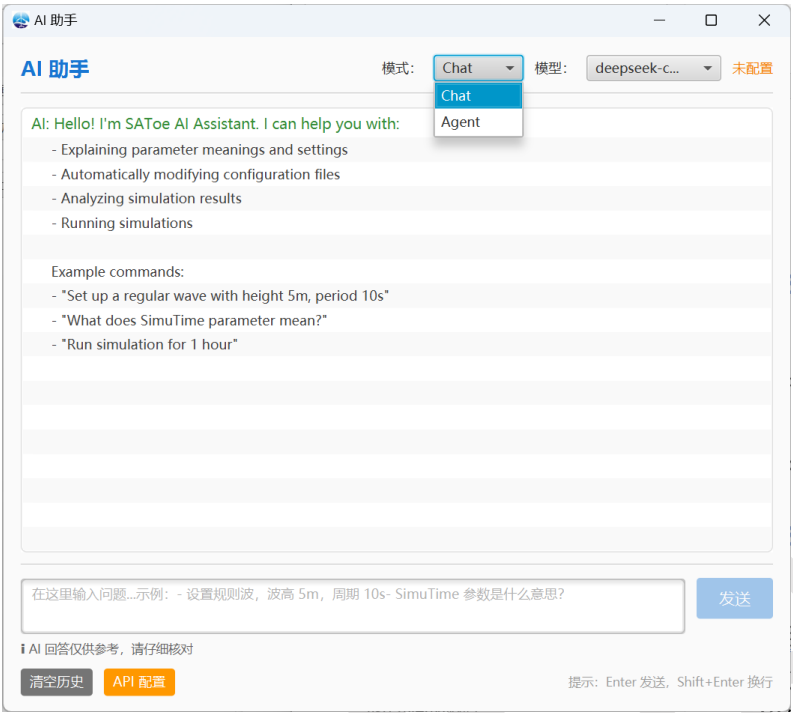


图 AI 助手界面

4.3.7 固定式风机有限元计算分析

点击工具栏 FEM_OWT 按钮，编辑有限元模型输入文件：jacket_input.dat（导管架基础参数）、monopile_input.dat（单桩基础参数）文本数值。需在 Analyse.dat 中设置 owt_test_mode 启用 FEM 模式。详细使用说明参见附录 G。

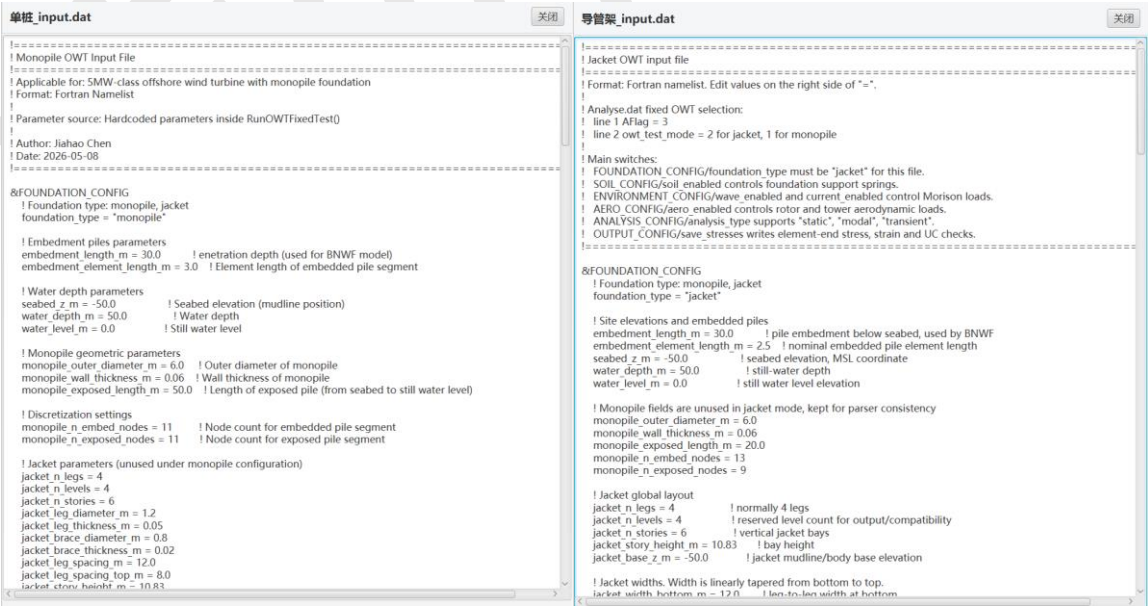


图 单桩与导管架的文本设置格式

4.4 3D 可视化功能

4.4.1 三维渲染

SAToeUI 集支持静态查看、动画播放（连续播放多帧数据，正常 500ms/帧，快进 120ms/帧）、背景颜色选择（7 种预设：White、LightGray、Gray、DarkGray、Black、LightBlue、SteelBlue）、部件自动着色（根据文件名关键词）。

4.4.2 部件颜色映射

关键词	默认颜色	适用对象
platform	Goldenrod	平台
blade	ForestGreen	叶片
hub	SteelBlue	轮毂
mooring	DarkRed	系泊系统
nacelle	SteelBlue	机舱
tower	DimGray	塔架
water	LightSkyBlue	水面
seabottom/seabed	Tan	海底
pile	DimGray	桩基

可通过 Color Config 按钮或_colors.properties 文件自定义颜色。

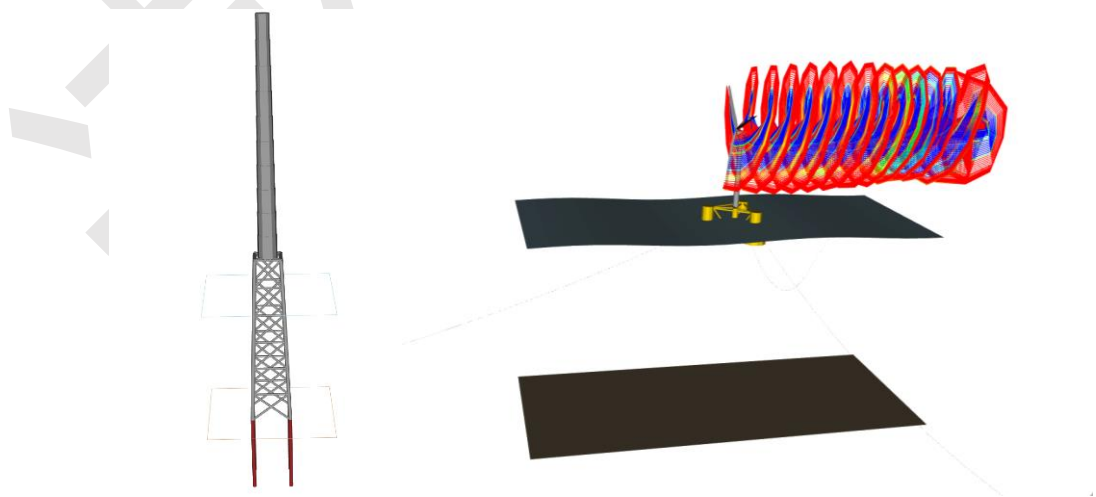


图 三维可视化效果

4.4 集成工具程序概览

SAToeUI V2.6 集成了六个独立的工具程序，均通过菜单 Tools 访问，为用户提供从前期方案筛选到详细仿真分析的完整工具链。各工具程序以独立模态窗口打开，不干扰主仿真 workflow。

工具之间可形成协作链路：FOWT Selector 选出推荐基础型式后，可用 FOWT Optimizer 优化平台尺寸，再用 FOWT Cost 估算该型式的成本，最终将优化结果导入主仿真模块进行详细耦合动力分析。HydroSolver 和 WindGen 为主仿真提供水动力数据和风场数据前置处理。AI Assistant 则贯穿整个工作流，提供参数查询和自动配置辅助。

工具名称	菜单入口	功能定位	详细说明
HydroSolver	Tools → HydroSolver	HAMS 频域势流水动力求解	附录 A
WindGen	Tools → WindGen	TurbSim 湍流风场生成	附录 B
FOWT Selector	Tools → FOWT_Selector	浮式风机基础型式选型	附录 C
FOWT Cost	Tools → FOWT_Cost	浮式风机成本估算与 LCOE	附录 D
FOWT Optimizer	Tools → FOWT_Optimizer	浮式风机基础平台优化	附录 E
AI Assistant	Tools → AI Assistant	AI 智能助手	附录 F

第五章 软件输入参数说明

5.1 输入文件目录结构

安装/解压后默认输入文件位于 Solver/Data/Input/ 目录下（可自行放置它处），文件组织结构如下：

Solver/Data/Input/

- |— Simulation.dat # 仿真控制参数
- |— Environment.dat # 环境条件参数
- |— Structure.dat # 结构参数
- |— Analyse.dat # 分析模式配置
- |— AirfoilData/ # 翼型气动数据（如 Cylinder1/2、DU21~DU40、NACA64）
- |— HydroData/ # 水动力系数（WAMIT 格式*.1, *.3, *.hst, *.12d, *.12s）
- |— MooringData/ # 系泊数据（Mooring.*、MoorDyn.dat）
- |— WindData/ # 风场数据（windfield.hh/.u/.v/.w）
- |— ControlData/ # 控制器数据（ControlParaFile.dat、DISCON.IN）
- |— FEM/ # 有限元数据（monopile/jacket_input.dat）

5.2 Analyse.dat — 分析模式配置

该文件定义仿真的分析模式与强制运动参数。

参数	说明	取值
AFlag	分析模式标志	1=DOFA 强制运动, 2=WWA 耦合动力, 3=FEM OWT 有限元
owt_test_mode	陆上风机模式	0=禁用, 1=单桩, 2=导管架
ST_REG	DOFA 分析类型	1=静态, 2=正弦运动
DOF	目标自由度编号	1=Surge, 2=Sway, 3=Heave, 4=Roll, 5=Pitch, 6=Yaw
DOF-AMPLITUDE	运动幅值	平动 m, 转动 deg
DOF-OMEGA	圆频率	rad/s

5.3 Simulation.dat — 仿真控制参数

该文件是仿真的核心控制文件，定义物理模型、时间积分、自由度、模态及控制参数。

5.3.1 物理模型与时间积分

参数	说明	取值/典型值
----	----	--------

PhysicalModel	物理模型	1=单刚体, 2=多体
ModeFlag	模式标志	单刚体: 0/1 陀螺力; 多体: 0 低阶/1 叶片高阶/2 叶片+塔架耦合
SimuTime	总仿真时长 (s)	3600
TimeStep	时间步长 (s)	0.01-0.05
SkipTime	跳过输出时间 (s)	0
OUTTinter	输出间隔 (步数)	10
IntegralMethod	时间积分方法	1=RK4, 2=ABM, 3=Newmark-Beta
Integralfactor	Beta/Gamma 参数	IntegralMethod=3 时有效
RetardationT	迟滞函数时长 (s)	势流记忆效应截断时长

5.3.2 自由度 (DOF) 开关

格式: Switch(1=on,0=off,-1=forced) Initial_Value Initial_Derivation

参数	说明	初始值单位
Surge/Sway/Heave-DOF	平台平动自由度	m / m/s
Roll/Pitch/Yaw-DOF	平台转动自由度	deg / deg/s
Flex_ModeShape	模态形状	0=刚体, 1=三角模态, 2=多项式

5.3.3 塔架与控制参数

参数	说明	取值
TowerFlexibleX/Y	塔架弯曲模态阶数	0=刚性, 1/2=1 阶/2 阶
YawControl	偏航控制	0=固定, 1=自由+主动, -1=固定初始角
GenBpCL	发电机扭矩+变桨控制	0=无, 1=启用联合控制
TypeCL	控制算法类型	0=陆上, 1/2=漂浮式, 3=Bladed DLL
BladedDLL_Path	外部控制器 DLL 路径	文件路径
GenControl	发电机 DOF	1=启用, 0=禁用, -1=预设转速

5.3.4 叶片参数

参数	说明	取值
PitchControl1/2/3	叶片变桨控制	0=禁用, -1=固定初始角, 1=闭环动态
BladeFlexibleX	叶片挥舞方向模态阶数	0/1/2

BladeFlexibleY	叶片摆振方向模态阶数	0/1/2
----------------	------------	-------

5.3.5 输入文件路径与后处理

参数	说明
HydroData/*.1	辐射力系数文件（附加质量、辐射阻尼）
HydroData/*.3	Froude-Krylov 力系数文件（入射+绕射波激力）
HydroData/*.hst	静水恢复力系数文件（静水刚度矩阵）
ControlParaFile.dat	内置控制器参数文件
Sumcommands	后处理命令数量
OutFilesSumNum	输出摘要文件数

5.4 Environment.dat — 环境参数

5.4.1 水动力参数

参数	说明	取值/默认值
gcc	重力加速度 (m/s^2)	9.80665
WaterDensity	水密度 (kg/m^3)	1025 海水 / 1000 淡水
water depth H	水深 (m)	正值=有限水深, -1=无限水深
waveflag	波浪类型	0=静水, 1=规则波, 2=不规则波 JONSWAP
FWaflag	入射+绕射波力	0=跳过, 1=计算一阶波激力
WaveDir	波浪方向 (deg)	0=沿 X 轴正向
Spectrum flag	波浪谱类型	1=白噪声, 2=JONSWAP
H or Hs	波高/有效波高 (m)	规则波 H / 不规则波 Hs
T or Tp	波周期/谱峰周期 (s)	规则波 T / 不规则波 Tp
gama	JONSWAP 谱形状因子	2.0-3.3
MorisonFlag	Morison 力计算	0=跳过, 1=静水面, 2=瞬时自由面
CurrentFlag	流类型	0=无流, 1=均匀流, 2=抛物线分布
CurrentV	流速 (m/s)	依据工况

5.4.2 风场参数

参数	说明	取值
----	----	----

AirDensity	空气密度 (kg/m ³)	1.225
AeroMethod_flag	气动计算方法	0=BEM (叶素动量法), 1=FVM (升力线自由涡法)
windflag	风类型	0=无风, 1=定常风, 2=TurbSim .hh, 3=TurbSim .u/.v/.w, 4=定常风+方位角
windspeed	轮毂高度风速 (m/s)	三维分量 u,v,w
TurWindMode	湍流风场模式	0=时间变化, 1=时空变化
BEM_flag	BEM 相对风速公式	0=传统, 1=紧耦合
SWC_flag	偏航修正模型	0=无, 1=局部叶素, 2=全局
TipLoss_flag	叶尖损失修正	0=禁用, 1=启用 (Prandtl)
Gla_flag	Glauert 大诱导因子修正	0=禁用, 1=Hansen, 2=AeroDyn
DW_flag	动态尾流模型	0=禁用, 1=启用 (Oye)
TowShadow_flag	塔影效应	0=禁用, 1=启用
FVM_cutoff	远场截断长度	i.e., 4D (D 是风轮直径)
FVM_wake_dt	尾流释放时间步长	建议大于结构仿真时间步长
FVM_nNWPanels	近尾迹面板数	默认 32
FVM_nFWPanels	远尾迹面板数	= CEILING(FVM_cutoff /(WindSpeed*FVM_wake_dt)) - FVM_nNWPanels
FVM_nFWPanelsFree	自由对流远尾迹面板数	默认 12
FVM_VelocityMethod	诱导速度计算方法	1=直接法, 2=近尾迹降阶处理, 3=直接法+远尾 截断处理 (建议, 需设置准确 FVM_cutoff)

5.4.3 二阶波浪力与输出控制

参数	说明	取值
WaveSecFlag	二阶波浪力开关	0=跳过, 1=计算
DiffSecFlag	差频二阶力	1=Newman(Simo), 2=Newman(文献), 3=完整差频
SumSecFlag	和频二阶力	0=跳过, 1=计算
KPout_flag	关键点输出	0=无, 1=输出
Output3DFlag	3D 可视化输出	0=无, 1=点线动画, 2=曲面动画

5.5 Structure.dat — 结构参数

5.5.1 转子与叶片参数

参数	说明	单位
TipRadius	叶尖半径（轮毂中心到叶尖）	m
HubRadius	轮毂半径	m
Hub Mass	轮毂质量	kg
Gearbox ratio	齿轮箱传动比（5MW 典型 97）	---
SumFoil	翼型文件数量	---
SumBlade	叶片数量（通常 3）	---
SumElement	叶片单元数	---

叶片单元表列包括：BEID（单元编号）、LocalR（局部半径 m）、DLength（单元长度 m）、Chord（弦长 m）、TwistAngle（扭转角 deg）、FoilID（翼型编号）、AeroCent（气动中心位置）、BMassDen（单位长度质量 kg/m）、FlpStff（挥舞弯曲刚度 $N \cdot m^2$ ）、EdgStff（摆振弯曲刚度 $N \cdot m^2$ ）、GJStff（扭转刚度 $N \cdot m^2$ ）、EASStff（拉伸刚度 N）。

5.5.2 塔架参数

参数	说明	单位
Tower Refence point	塔架参考点（塔底到静水面垂直高度）	m
SumTStation	塔架截面数	---

塔架截面表列包括：DLength（段长 m）、Diameter（直径 m）、TMassDen（单位长度质量 kg/m）、TwFASStifX/Y（弯曲刚度 $N \cdot m^2$ ）、TwGJStifZ（扭转刚度 $N \cdot m^2$ ）、TwEASStif（拉伸刚度 N）、CDrag_x/y（阻力系数）。

5.5.3 平台参数

参数	说明	单位
Platform Mass	平台总质量	kg
RMassCenter	重心位置（相对静水面）	m
InertialTensor	惯性张量（关于重心）	$kg \cdot m^2$
Platform Volume	排水体积	m^3
SumMember	Morison 杆件数	---

5.6 系泊系统参数（Mooring.smqsc）

悬链线系泊配置文件定义缆索属性与连接关系：

参数	说明
----	----

SumLine	系泊缆索总数
SumAnchor	锚点总数（全局坐标系坐标）
SumFairlead	导缆孔总数（平台体坐标系坐标）
Ulength	未拉伸长度（m）
Diam	直径（m）
EA	轴向刚度（N）
WetD	湿重（kg/m，单位长度在水中质量）
C_Mt/C_Mn	切向/法向附加质量系数
C_Dt/C_Dn	切向/法向阻力系数

系泊类型选择（Simulation.dat 中 MoorType 参数）：1=悬链线，2=有限元（废弃），3=MoorDyn 集中质量，4=多股交叉悬链线，5=单点系泊，6=谱方法（适用 TLP），7=Q 悬链线，8=QFEM，9=Q 集中质量。

5.7 ControlParaFile.dat — 控制器参数

5.7.1 内置变桨控制器（CPC）

参数	说明	单位
CL_DT	通讯间隔（建议不大于仿真时间间隔）	s
CornerFreq	低通滤波器转角频率（叶片摆振固有频率 1/4）	Hz
PC_KK	变桨增益系数	---
PC_KI	变桨积分增益	---
PC_KP	变桨比例增益	---
PC_MaxPit	最大变桨角	deg
PC_MinPit	最小变桨角	deg
PC_MaxRat	最大变桨速率	deg/s
PC_RefSpd	参考转速（目标转速）	rad/s

5.7.2 内置发电机扭矩控制

参数	说明	单位
VS_CtlnSp	切入转速（区域 1 和 1.5 过渡）	rad/s
VS_Rgn2Sp	区域 2 转速（1.5 和 2 过渡）	rad/s

VS_Rgn2K	区域 2 扭矩常数	$\text{N}\cdot\text{m}/(\text{rad/s})^2$
VS_SlPc	额定滑差百分比	%
GridPower	电网功率	MW
EleGenEffect	发电机效率	%
VS_RtGnSp	额定发电机转速	rad/s
VS_MaxRat	最大扭矩变化率	$\text{N}\cdot\text{m/s}$
VS_MaxTq	最大发电机扭矩	$\text{N}\cdot\text{m}$

5.7.3 高级控制器与外部控制器

参数	说明	取值
IPC_Mode	单点系泊对风独立变桨控制	0=无, 1 或 2=开启
NaYaw_limit	机舱对风偏航控制启动阈值	大于该阈值启动偏航, 偏航开启在 simulation.dat 的 YawControl
MoorSerFlag	主动系泊控制标记	0=无, 1=水平运动约束, 2=倾斜运动约束, 控制算法在自编 AdvancedController.dll 内实现, 接口为 AntiMLController 函数
GyroCLFlag	减摇陀螺控制标记	0=无, 1=时间启动内置被动减摇, 2=在 1 的基础上考虑缓和启动约束, 3=在 AdvancedController.dll 内实现自定义主动控制, 接口为 AntiGyroController)
自定义控制器	自定义控制荷载, 如 TMD 控制, 减摇水仓, 主动压载等	ExtLdFlag=1, Mode=4, 设置控制荷载加载点, 开启时间与坐标系定义, 在 AdvancedController.dll 内实现自定义主动控制, 接口为 AdController1

5.7.4 故障模拟与外部载荷

参数	说明	取值
MoorFlMode	系泊故障模式	0=无, 1=缆索断裂, 2=时间触发, 3=锚受拔
BalFlMode	压载故障模式	0=无, 1=时间触发
ColsnFlag	船舶碰撞标志	0=无, 1=时间触发
ColLoadMode	碰撞载荷模式	0=简化位移, 1=经验公式, 2=外部静态模型
ExtLdFlag	外部载荷标志	0=禁用, 1=启用时间触发

5.8 水动力数据文件 (HydroData)

水动力系数采用 WAMIT 格式文件，文件名须与 Structure.dat 中物体名称一致（如 DeepCwind.1）：

文件	内容	用途
.1	辐射力系数（附加质量、辐射阻尼）	计算流体惯性力和辐射阻尼力
.3	Froude-Krylov 力系数（入射+绕射波激力）	计算一阶波浪激振力
.hst	静水恢复力系数（静水刚度矩阵）	计算静水恢复力
.12d	差频二阶传递函数	计算低频慢漂力
.12s	和频二阶传递函数	计算高频和频力

5.9 输出文件说明

输出文件位于 Solver/Data/Output/ 目录下：

文件	内容
InCheck.dat	自检与模型总结信息
PlatformDyn.dat	浮式风机平台 6 自由度运动时历
RotorDyn.dat	浮式风机转子气动荷载与指标时历
NRBAngles.dat	浮式风机转子转速与桨距角时历
Forces.dat	浮式风机锚链与部分水动力荷载时历
TowBlTip.dat	浮式风机塔架/叶尖位移时历
BladeDef*.dat	浮式风机桨叶抽样站 x,y,z 方向变形
TowerDef*.dat	浮式风机塔筒抽样站 x,y,z 方向变形
SurfKeyPoint.dat/ SurfKeyPointVel.dat/ SurfKeyPointAcc.dat	浮式风机多体关键点位移、速度和加速度/水面波高时历
TowerForce.dat / TowerMoment.dat	浮式风机塔架内力/弯矩时历
BEAeroIntF.dat/ BEAeroDyn.dat	浮式风机桨叶内力与气动荷载/指标
OutputSummary.dat	浮式风机自定义输出合集文件
FVMCoreResult.dat	FVM 气动计算结果文件
FVMWakeResult.dat	FVM 涡迹信息
_OWT_aero_history.dat	单桩/导管架气动荷载历程文件
_OWT_displacements.dat	单桩/导管架节点位移历程文件
_OWT_hydrodynamic_history.dat	单桩/导管架水动力荷载历程文件

_OWT_modal.dat	单桩/导管架模态分析结果文件
_OWT_stress_uc.dat	单桩/导管架杆件节点应力结果文件
_OWT_wave_history.dat	单桩/导管架计算时原点波高时历文件
_OWT_time_history.dat	单桩/导管架计基础顶位移与荷载时历文件
_OWT_reactions.dat	单桩/导管架桩头约束力文件
RunTimeStatis.dat	运行时统计信息
3DModelData/*.vtp	三维模型文件（按时间序列 tN 分组）

第六章 帮助和支持信息

6.1 软件内置帮助

菜单入口	功能	说明
Help → Quick Start Tutorial	快速入门教程	快速工作流引导
Help → Parameter Documentation	参数详细说明	支持搜索的参数文档
Help → Integrated Tools Guide	集成工具使用指南	HydroSolver/WindGen/FOWT 工具使用说明
Help → Open User Manual	打开用户手册	打开 PDF 版本用户手册
Help → FAQ & Support	常见问题与技术支持	FAQ 与联系方式
Tools → AI Assistant	AI 智能助手	参数查询、配置建议、错误诊断

6.2 提示信息 (tooltips)

UI 输入界面提供详细的输入提示说明，分为如下几种：

(1) 圈圈问号：在一体化设置面板的输入类型说明，工具设置面板的相关变量输入框左侧，均设有该帮助提示符号，鼠标移动到该提示符即可悬浮弹出提示词；



图 圈圈问号符

(2) 输入框停留悬浮提示：一体化设置面板和部分工具面板在鼠标停留输入框时，会悬浮弹出输入提示；

仿真控制 ?

PhysicalModel

2

ModeFlag

1

物理模型: 1) 单刚体运动模型; 2) 多体运动模型 (单位: -)

SimuTime

50.0

TimeStep

0.0125

SkipTime

0.0

OUTTinter

80

IntegralMethod

1

Integralfactor

2

-

RetardationT

60.0

图 输入框提示符

(3) 输入框内提示符：当输入框没有输入内容时，输入框会有灰色提示信息，输入数值/内容后，灰色提示信息消失。

仿真设置

关闭

仿真控制 ?

PhysicalModel

说明: 物理模型: 1) 单刚体运动模型; 2) 多体运动模型 - (单位: -)

ModeFlag

1

SimuTime

50.0

TimeStep

0.0125

SkipTime

0.0

OUTTinter

80

IntegralMethod

1

Integralfactor

2

-

RetardationT

60.0

图 未输入的灰色提示字

6.3 AI 助手使用指南

AI 助手提供两种工作模式：

模式	功能	权限	典型用途
Chat	问答对话，参数说明，文件格式解释	仅读取	询问参数含义、文件格式、计算方法
Agent	自动执行任务，修改配置文件，运行仿真	读写	自动修改参数、分析结果

详细说明参见附录 F。

6.4 常见问题（FAQ）

Q1：如何设置新的仿真？

按照快速工作流：设置路径（Path 菜单）→ 选择分析模式（AnalyseMode）→ 配置仿真参数（Simulation）→ 设置环境条件（Environment）→ 配置结构参数（Structure）→ 运行仿真（Running → Run）。

Q2：为什么仿真不稳定？

检查以下几点：时间步长是否足够小（尝试 0.01-0.05s）；所有 DOF 是否正确约束；水动力数据文件是否存在且正确；初始条件是否合理。

Q3：如何生成水动力数据？

使用 Tools → HydroSolver：准备网格文件（.pnl 格式，可使用 MeshConverter 转换 GDF 格式）；在 HAMS 窗口配置参数；点击 View Model 预览网格；点击 Run 运行求解器；结果保存至 HydroData 文件夹。详细操作参见附录 A。

Q4：3D 动画文件路径含中文导致加载失败？

VTK 不支持含非 ASCII 字符的路径，软件会自动缓存到 vtk-cache。

Q6：如何清理旧的计算结果？

在 Result 页面点击 Clear Data 按钮，会清除 Data/Output 下的 .dat 和 .vtp 文件。

Q7：如何配置控制器？

有两种方式：内置控制器（编辑 ControlParaFile.dat，通过 Controller 按钮配置参数）；外部 DLL（使用 Bladed 格式控制器，设置 TypeCL=3 并指定 DLL 路径）。

6.5 技术支持

项目	信息
开发者	Jiahao Chen（陈嘉豪）
联系邮箱	lirainschen@163.com
支持的功能咨询	参数含义、文件格式、计算方法、配置建议、错误诊断
反馈渠道	邮件联系开发者，或在软件内通过 AI Assistant 获取即时帮助

6.6 使用注意事项

- 不可修改或删除安装目录下的程序文件及求解器文件，以免软件无法正常运行。
- 输入参数文件格式为"值 -参数名 -注释"（Tab 分隔），编辑时请保持格式一致。
- 水动力数据文件名必须与 Structure.dat 中定义的物体名称一致。

- 湍流风场需先用 TurbSim 生成，且风场时间长度需覆盖仿真时长。
- 漂浮式风机需使用 TypeCL=1 或 2 的控制器；外部 DLL 需提供.IN 配置。
- AI Assistant 的 Agent 模式会直接修改输入文件，操作前会自动创建 .bak 备份，建议重要参数手动确认。
- FOWT 系列工具（Selector/Cost/Optimizer）为前期筛选工具，不替代详细水动力仿真和结构校核。

附录 A 水动力势流求解器 (HydroSolver)

A.1 工具简介

HydroSolver 是基于开源程序 HAMS (Hydrodynamic Analysis of Marine Structures) 的水动力势流求解器界面工具，用于分析无航速三维浮体结构的波浪绕射和辐射问题。通过该工具，用户可以完成网格转换、求解器配置、HAMS 运行和结果拷贝的全流程操作，生成的 WAMIT 格式水动力系数文件可直接供 SAToex64 主求解器使用。

入口：菜单 Tools → HydroSolver，以独立模态窗口打开。



图 水动力势流求解工具输入界面

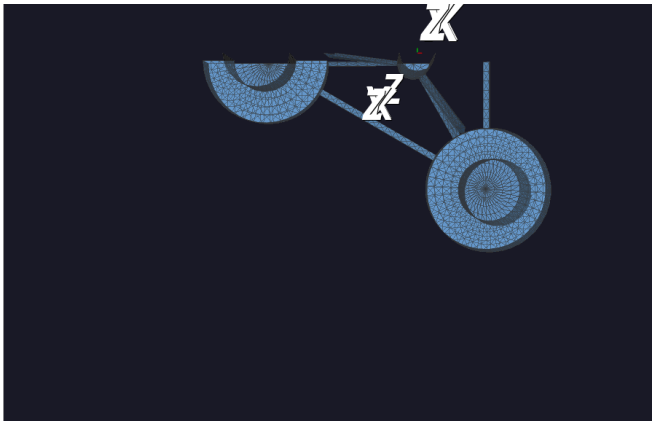


图 模型三维网格查看效果图

A.2 界面布局

界面采用垂直滚动布局，按 4 个步骤分区，每个分区以不同背景色区分：

步骤	区域名称	背景色	主要功能
Step 1	Mesh Conversion (Optional)	蓝色	GDF 格式网格转换为 pnl 格式
Step 2	Mesh Files (Required)	灰色	选择船体/水面网格文件和静水力文件
Step 3	Solver Configuration	橙色	配置求解参数（频率、浪向、求解方法等）
Step 4	Run Solver	绿色	运行 HAMS 并复制结果

A.3 操作流程

A.3.1 网格转换（可选）

- 勾选 "Need to convert mesh from GDF format" 复选框。
- 点击 "Load Default" 加载默认 Settings.ctrl 文件。
- 在文本框中编辑 Settings.ctrl 内容（GDF 文件路径定义在第 3 行）。
- 点击 "Save" 保存 Settings.ctrl。
- 点击 "Convert Mesh"，调用 WAMIT_MeshTran.exe 将 GDF 转为 pnl 格式，自动填充 Hull Mesh 和 Waterplane Mesh 路径。

A.3.2 选择网格文件

通过 "Browse..." 按钮选择以下文件（上面网格转化后会自动填充）：

- Hull Mesh (.pnl)：船体网格文件（必需）。
- Waterplane Mesh (.pnl)：水面网格文件（移除不规则频率时必需）。
- Hydrostatic.in (.in)：静水力文件（可选，会自动转换为 HAMS 格式）。

也可点击 "View Model", 三维查看 .pnl 网格模型, 窗口底部显示节点数、面板数 and 对称性信息。

A.3.3 配置求解参数

在 Step 3 区域设置以下参数:

参数	默认值	说明
Body Name	DeepCwind	输出文件名前缀, 生成 {name}.1, {name}.3 等
Waterdepth (m)	-200	水深, 正值=有限水深, 负值=无限水深
Input/Output Freq Type	2	1=深水波数, 2=有限水深波数, 3=波频率(rad/s), 4=波周期(s), 5=波长(m)
Number of Freq	-3	正值=读取指定值, 负值=等间距自动计算
Min Freq / Step	0.5 / 0.5	等间距起始值和步长 (仅 Number 为负时使用)
Number of Headings	-5	浪向数, 正值: 读取指定数值, 负值: 等间距划分
Min Heading / Step	0 / 45	起始角度和步长 (度), 0 度=波沿 X 轴正方向
Ref Center (X,Y,Z)	0, 0, 0	参考中心坐标(m), 力和矩的计算参考点
Ref Length (m)	1	参考长度(m), 用于结果无量纲化 (建议为 1)
Solution Method	2 (GMRES)	1=直接求解(LU 分解), 2=迭代求解(GMRES)
Remove Irregular Frequencies	勾选	0=不移除(仅需 HullMesh), 1=移除(需 WaterplaneMesh)
Number of Threads	16	OpenMP 并行线程数, 建议设为 CPU 核心数
Number of Field Points	0	场点数 (压力/波高计算点), 0=不计算

A.3.4 运行与结果复制

9. 点击 "Copy to Input" 将网格文件、ControlFile.in 和 Hydrostatic.in 拷贝到 PotentialFlow/Bin/Input/。
10. 点击 "Run" 启动 HAMS.exe, 日志实时显示在 ListView 中, 进度条根据输出中的百分比更新。
11. 运行成功后 "Copy Results" 按钮启用, 点击后将 Bin/Output/Wamit_format/ 下的结果文件按 Body Name 重命名后拷贝到指定输出路径 (默认 Solver/Data/Input/HydroData) 。

A.4 输出文件说明

HAMS 输出目录为 PotentialFlow/Bin/Output/, 包含三个子目录, 主要使用 Wamit_format。

文件扩展名	内容	用途
.1	辐射力系数（附加质量、辐射阻尼）	计算流体惯性力和辐射阻尼力
.3	Froude-Krylov 力系数（入射+绕射波激力）	计算一阶波浪激振力
.4	波激力	波浪激振力数据
.hst	静水力恢复矩阵	计算静水恢复力
.6p	压力场	场点压力分布
.12d / .12s	二阶传递函数	差频/和频二阶力计算

A.5 依赖程序与工作目录

程序/目录	路径	说明
HAMS.exe	PotentialFlow/Bin/	主求解器
WAMIT_MeshTran.exe	PotentialFlow/MeshConverter/	网格转换器
libiomp5md.dll	PotentialFlow/Bin/	OpenMP 运行库
工作目录	PotentialFlow/WorkDir_{BodyName}	运行时临时目录

附录 B 风场生成器 (WindGen)

B.1 工具简介

WindGen 是基于 TurbSim 开源随机全场湍流风模拟器的风场生成工具。TurbSim 基于 IEC 61400 标准生成风力发电机所需的湍流风场，支持 Kaimal 谱、von Karman 谱等多种湍流模型。生成的时空风场文件可供 SAToex64 主求解器的气动载荷计算使用（目前仅支持.hh,.u/.v/.w 的文本格式，简单风矢量设置可直接在 Environment.dat 文件设置）。

入口：菜单 Tools → WindGen，以独立模态窗口打开（920×720）。此外，通过菜单 ConfigData → WindData 可访问 WindField Editor 编辑 .hh 格式风场数据文件。

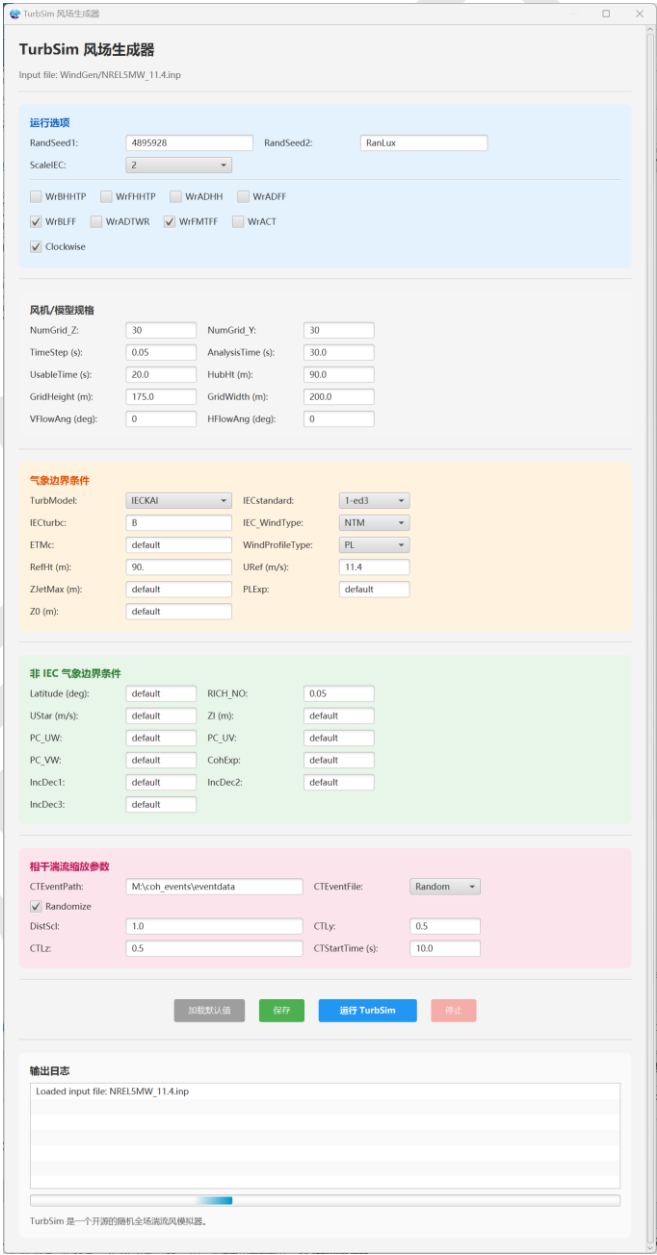


图 WindGen 风场生成器工具输入界面

B.2 TurbSim 界面布局

界面采用垂直滚动布局，包含 5 个参数分区、操作按钮和日志区：

分区	背景色	主要内容
Section 1: Runtime Options	蓝色	随机种子、IEC 缩放、输出格式选项
Section 2: Turbine/Model Specs	灰色	网格尺寸、时间步长、轮毂高度等
Section 3: Meteorological Conditions	橙色	湍流模型、IEC 标准、风剖面、参考风速
Section 4: Non-IEC Conditions	绿色	纬度、摩擦速度、相干性参数等
Section 5: Coherent Turbulence Scaling	粉色	相干湍流事件路径和缩放参数

B.3 关键参数说明

B.3.1 运行时选项

参数	说明
RandSeed1 / RandSeed2	随机种子 (-2147483648 ~ 2147483647)
ScaleIEC	IEC 湍流缩放：0=不缩放，1=轮毂高度缩放，2=各高度独立缩放
WrBHHTP / WrFHHTP	输出轮毂高度湍流参数（二进制/格式化文本）
WrADHH / WrADFF	输出轮毂高度/全场时间序列（AeroDyn 格式）
WrBLFF / WrFMTFF	输出全场时间序列（BLADED/格式化文本）
WrADTWR	输出塔架时间序列数据
Clockwise	顺时针旋转（下风向观察）

B.3.2 风机与模型规格

参数	说明
NumGrid_Z / NumGrid_Y	垂直/水平网格点矩阵维数
TimeStep (s)	时间步长（秒）
AnalysisTime (s)	分析时间序列长度（秒）
UsableTime (s)	可用输出时间序列长度（秒）
HubHt (m)	轮毂高度（应 $> 0.5 \times \text{GridHeight}$ ）
GridHeight / GridWidth (m)	网格高度/宽度（宽度 $\geq 2 \times (\text{RotorRadius} + \text{ShaftLength})$ ）

VFlowAng / HFlowAng (deg)	垂直/水平平均流动角
---------------------------	------------

B.3.3 气象边界条件

参数	可选值	说明
TurbModel	IECKAI, IECVKM, GP_LLJ, NWTCUP, SMOOTH, NONE 等	湍流模型: IECKAI=Kaimal, IECVKM=von Karman
IECstandard	1-ed1, 1-ed2, 1-ed3	IEC 61400-x 标准
IECturbc	A, B, C 或 TI%	湍流特征等级
IEC_WindType	NTM, 1ETM, 2ETM, 3ETM, 1EWM50 等	NTM=正常湍流, xETM=极端湍流, xEWM=极端风
WindProfileType	JET, LOG, PL, default, USR	风剖面: JET=低空急流, LOG=对数, PL=幂律
RefHt (m)	---	参考风速高度
URef (m/s)	---	参考高度平均风速
PLExp	---	幂律指数, 或 'default'
Z0 (m)	---	地面粗糙度长度, 或 'default'

B.4 操作流程

12. 界面初始化时自动从 WindGen/NREL5MW_11.4.inp 读取默认参数并填充到各字段。
13. 修改各参数值 (TextField / ComboBox / CheckBox) 。
14. (可选) 点击 "Load Defaults" 重新从原始文件读取默认值。
15. (可选) 点击 "Save" 保存参数到输入文件 (严格保留原始格式, 仅替换值) 。
16. 点击 "Run TurbSim", 自动先保存参数, 然后调用 TurbSim64.exe 运行求解器。
17. 运行日志实时显示在 ListView 中, 退出码 0 表示成功。
18. 运行中可点击 "Stop" 终止进程。
19. 将生成的风场文件拷贝至 WindData 文件夹供主求解器使用。

B.5 WindField Editor 风场数据编辑器

WindField Editor 以表格形式编辑 .hh 格式风场时间序列数据, 通过菜单 ConfigData → WindData 访问。编辑器嵌入主窗口右侧面板, 包含 9 列可编辑数据:

列名	数据键	说明
index	index	序号 (自动生成)

Time(sec)	Time	时间 (秒)
HorSpd(m/s)	horSpd	水平风速
WndDir(deg)	wndDir	风向 (度)
VerSpd(m/s)	verSpd	垂直风速
HorShr(-)	horShr	水平剪切
VerShr(-)	verShr	垂直剪切
LnVShr(-)	lnVShr	对数垂直剪切
GstSpd(m/s)	gstSpd	阵风风速

文件格式：前 3 行为头信息（保留不编辑），第 4 行起为数据行，每行 8 个数值，空白分隔。
支持 Add（添加行）、Save（保存）、Cancel（取消）操作。

附录 C 浮式风机选型工具 (FOWT Selector)

C.1 工具简介

FOWT Selector 是面向浮式风电项目前期的快速筛选工具，用于在半潜式（Semi-submersible）、驳船式（Barge）、Spar（单柱式）、TLP（张力腿式）四种基础型式之间进行相对适应性评估。该工具提供三大功能：单场址推荐、批量评价、熵权-TOPSIS 概念方案精排。

入口：菜单 Tools → FOWT_Selector，以独立模态窗口打开。

注意：本工具为前期筛选工具，不替代详细水动力仿真、结构强度校核、LCOE 测算或认证。

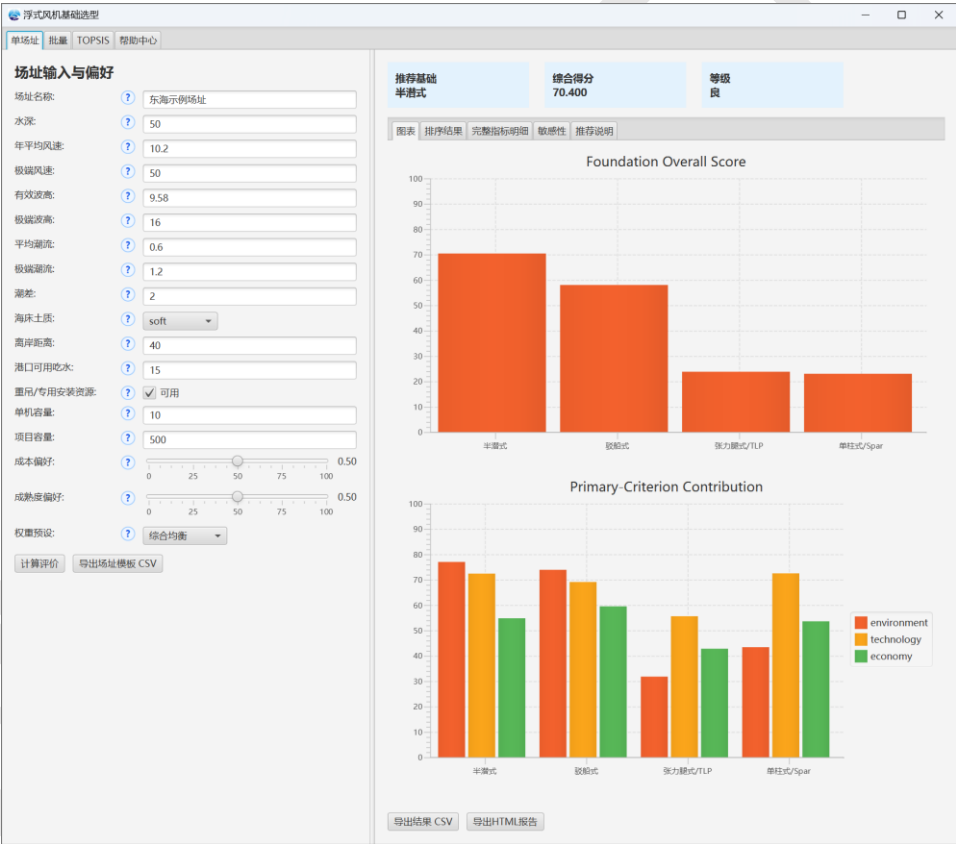


图 浮式风机选型工具输入界面

C.2 界面布局

界面采用 TabPane 布局，包含 4 个标签页：

标签页	名称	功能
Tab 1	Single Site 单场址推荐	输入场址参数和偏好，评估四种基础型式并给出推荐
Tab 2	Batch 批量评价	批量导入多场址数据进行评价

Tab 3	TOPSIS 精排	基于熵权-TOPSIS 方法对概念方案进行多指标排序
Tab 4	Help Center 帮助中心	使用说明、字段说明、算法原理

C.3 单场址推荐

C.3.1 输入参数

左侧面板包含 17 个输入字段，每个字段旁带 "?" 帮助按钮：

字段名	说明	单位/取值
water_depth_m	水深	m
mean_wind_speed_ms	年平均风速	m/s
extreme_wind_speed_ms	极端风速	m/s
significant_wave_height_m	有效波高	m
extreme_wave_height_m	极端波高	m
current_speed_ms	平均潮流	m/s
extreme_current_speed_ms	极端潮流	m/s
tidal_range_m	潮差	m
seabed_soil	海床土质	soft/medium/hard
offshore_distance_km	离岸距离	km
port_draft_limit_m	港口可用吃水	m
port_heavy_lift_available	重吊/专用安装资源	true/false
turbine_capacity_mw	单机容量	MW
project_capacity_mw	项目容量	MW
cost_preference	成本偏好	0-1 滑块
maturity_preference	成熟度偏好	0-1 滑块

C.3.2 权重预设

提供 5 种权重预设，用户可根据项目侧重选择：

预设	环境权重	技术权重	经济权重
综合均衡 BALANCED	0.393	0.383	0.224
成本优先 COST_FIRST	0.30	0.25	0.45
稳性优先 STABILITY_FIRST	0.48	0.36	0.16

施工优先 CONSTRUCTION_FIRST	0.28	0.50	0.22
成熟度优先 MATURITY_FIRST	0.30	0.48	0.22

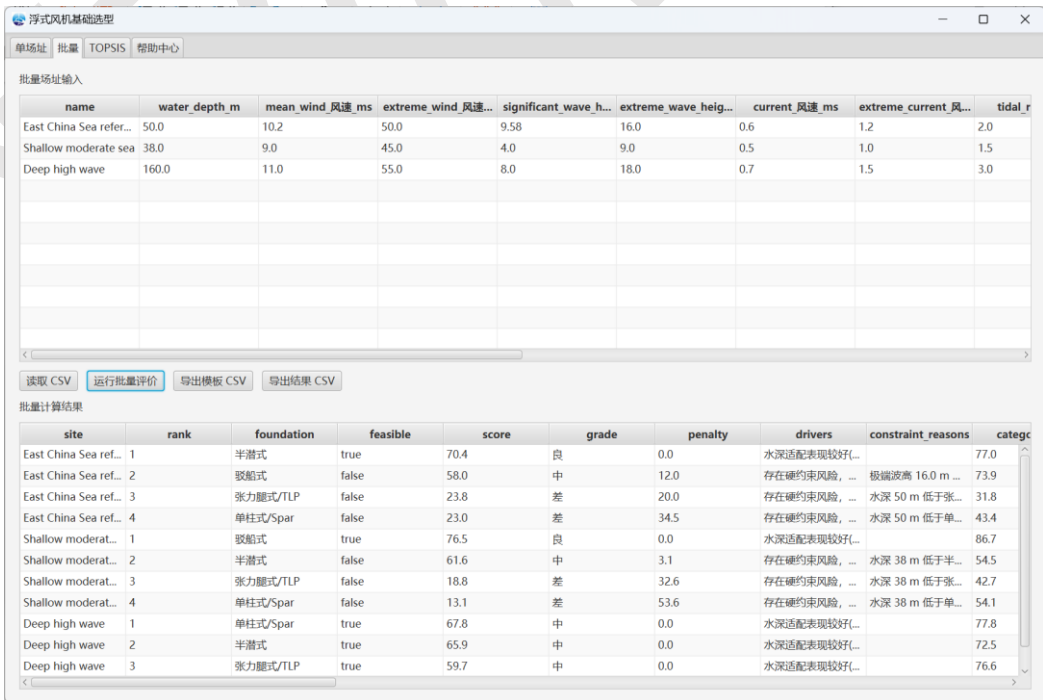
C.3.3 评价结果

点击 "评估" 后，右侧面板刷新显示以下内容：

- 指标卡：推荐基础型式、综合得分、等级（优/良/中/差）。
- 综合得分柱状图：四种基础型式得分对比。
- 主准则贡献柱状图：环境/技术/经济三类得分分项。
- 排序结果表：排名、基础型式、可行性、得分、等级、罚分、驱动因素。
- 完整指标详情表：各基础型式的全部评价指标。
- 敏感性分析表：6 种工况下推荐方案的稳定性。
- 推荐说明文本：自动生成的评估结论文字。
- 点击“计算评价”可进行分析评估，设置参数可通过“导出场址模板 CSV”按钮导出，分析结果可通过 CSV 或 HTML 格式进行导出。

C.3.4 批量场址分析

可依据输入模板（Load CSV）输入各场址和项目信息，进行批量场址的浮式风机选型分析，结果可通过（Export Template CSV）导出。



name	water depth m	mean wind 风速 ms	extreme wind 风速...	significant wave h...	extreme wave heig...	current 风速 ms	extreme current 风...	tidal r
East China Sea refer...	50.0	10.2	50.0	9.58	16.0	0.6	1.2	2.0
Shallow moderate sea	38.0	9.0	45.0	4.0	9.0	0.5	1.0	1.5
Deep high wave	160.0	11.0	55.0	8.0	18.0	0.7	1.5	3.0

site	rank	foundation	feasible	score	grade	penalty	drivers	constraint reasons	catego
East China Sea ref...	1	半潜式	true	70.4	良	0.0	水深适配表现较好...		77.0
East China Sea ref...	2	驳船式	false	58.0	中	12.0	存在硬约束风险，...	极端波高 16.0 m ...	73.9
East China Sea ref...	3	张力腿式/TLP	false	23.8	差	20.0	存在硬约束风险，...	水深 50 m 低于张...	31.8
East China Sea ref...	4	单柱式/Spar	false	23.0	差	34.5	存在硬约束风险，...	水深 50 m 低于单...	43.4
Shallow moderat...	1	驳船式	true	76.5	良	0.0	水深适配表现较好...		86.7
Shallow moderat...	2	半潜式	false	61.6	中	3.1	存在硬约束风险，...	水深 38 m 低于半...	54.5
Shallow moderat...	3	张力腿式/TLP	false	18.8	差	32.6	存在硬约束风险，...	水深 38 m 低于张...	42.7
Shallow moderat...	4	单柱式/Spar	false	13.1	差	53.6	存在硬约束风险，...	水深 38 m 低于单...	54.1
Deep high wave	1	单柱式/Spar	true	67.8	中	0.0	水深适配表现较好...		77.8
Deep high wave	2	半潜式	true	65.9	中	0.0	水深适配表现较好...		72.5
Deep high wave	3	张力腿式/TLP	true	59.7	中	0.0	水深适配表现较好...		76.6

C.4 TOPSIS 精排

TOPSIS 标签页提供基于熵权-TOPSIS 方法的概念方案多指标排序功能。用户在可编辑表格中输入备选方案数据（26 项指标，包括成本型指标如材料成本、运动响应等，和效益型指标如稳性、疲劳寿命等），点击 "运行 TOPSIS" 后系统自动计算各指标熵权、正负理想解距离和贴近度，按 topsis_score 降序排列。

浮式风机基础选型

单场址

批量

TOPSIS

帮助中心

TOPSIS 方案输入

alternative	material_cost	period_gap_wave	period_gap_rotor	static_stability	nacelle_acceleration	tower_fatigue_life	surge_max_extreme	系
OUCFloat	1420.2	18	12	4.2	1.1	28	7.3	10
OO-Star	1043.75	14	10	4.0	1.2	26	8.3	27

读取 CSV

运行 TOPSIS

添加行

删除行

导出模板 CSV

导出结果 CSV

导出HTML报告

TOPSIS 排序结果

rank	alternative	topsis_score	weight_material_cost	weight_period_gap_wave	weight_period_gap_rotor	weight_static_stability	weight
1	OO-Star	0.9776	0.0846	0.0566	0.0299	0.0021	0.0068
2	OUCFloat	0.0224	0.0846	0.0566	0.0299	0.0021	0.0068

C.5 输出文件

文件名	格式	内容
site_batch_template.csv	CSV	批量场址输入模板
foundation_selection_results.csv	CSV	排序结果
foundation_selection_report.html	HTML	含指标卡和表格的报告
topsis_concept_template.csv	CSV	TOPSIS 输入模板
topsis_concept_ranking.csv	CSV	TOPSIS 排序结果
topsis_concept_ranking_report.html	HTML	TOPSIS HTML 报告

C.6 帮助中心

浮式风机基础选型

单场址

批量

TOPSIS

帮助中心

说明

单场址字段表

TOPSIS字段表

帮助中心

这个工具看什么
单场址推荐用于项目前期快速判断半潜式、驳船式、Spar、TLP 的相对适应性。批量评价用于多个场址横向筛选。熵权-TOPSIS用于已有具体概念方案数据后的精排。

结果如何解读
feasible 表示是否通过硬约束预筛；score 是 0-100 综合得分；grade 对应优、良、中、差；drivers 是主要加分和扣分解释。

单场址推荐的计算流程
1. 硬约束预筛：水深、极端波高、潮差/水深比、港口吃水、安装资源、土质锚固。
2. 多层次评分：环境适应性、技术稳定性及可实施性、经济适用性。
3. 模糊等级映射：综合反映为优/良/中/差。
4. 解释与敏感性：提取主要驱动因素并评估关键扰动。

TOPSIS 精排
TOPSIS 页面用于已有多个具体概念方案的情况。topsis_score 越大越接近正理想方案；weight_* 是熵权法计算的指标权重。成本型指标越低越好，效益型指标越高越好。

注意：当前版本是前期筛选工具，不替代详细水力仿真、结构强度校核、LCOE测算或认证。

附录 D 浮式风机成本估算工具 (FOWT Cost)

D.1 工具简介

FOWT Cost Estimator 是面向浮式风电项目早期方案比较和预算框架搭建的自下而上生命周期成本估算工具。计算 CAPEX（资本开支）、OPEX（运维成本）、DECEX（退役拆除成本）和 LCOE（平准化度电成本），并提供关键参数敏感性分析。

入口：菜单 Tools → FOWT_Cost，以独立模态窗口打开。

注意：本工具用于早期估算和方案比较，不替代详细结构设计、施工组织设计或完整项目融资模型。

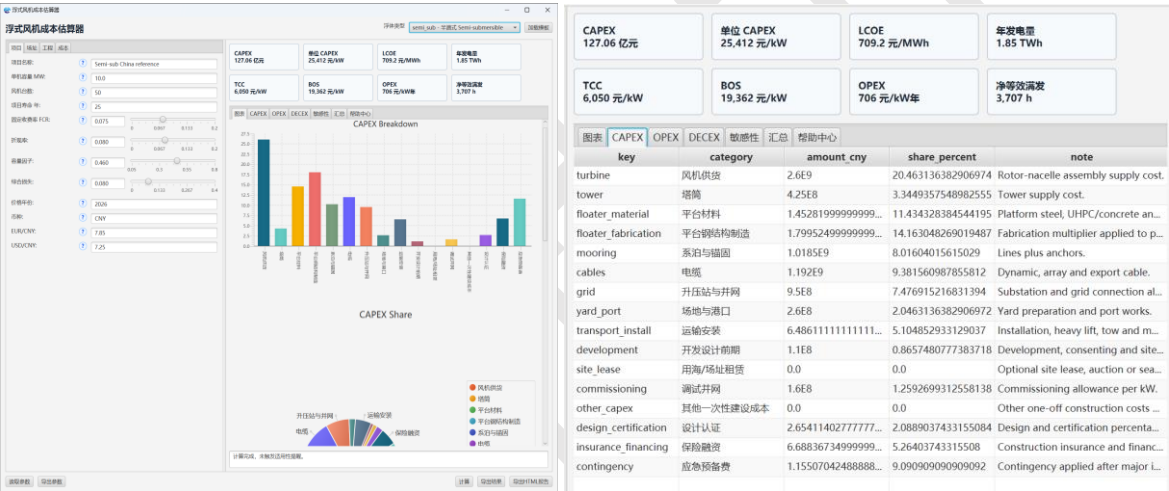


图 浮式风机选型工具输入界面

D.2 界面布局

界面采用上下三段式布局：顶部 Header（浮体类型选择 + 加载模板）、中部 SplitPane（左侧输入面板 + 右侧结果面板）、底部控制栏。

左侧输入面板包含 4 个标签页：

标签页	字段数	主要内容
Project 项目	12	项目名称、单机容量、台数、寿命、FCR、折现率、容量因子等
Site 场址	7	水深、离岸距离、港口距离、风速、波高、波周期、海床土质
Engineering 工程	13	用钢量、混凝土量、压载、系泊线、电缆、安装船天等
Costs 成本	32	材料单价、系泊电缆单价、船机日费、间接费比例、OPEX、DECEX 等

D.3 四种浮体模板

工具内置四种浮体基础模板，点击 "加载模板" 后按所选类型和单机容量自动缩放生成全套参数：

类型	水深(m)	用钢量(t)	压载量(t)	系泊线长(m)	系泊/锚数	制造加成
半潜式 semi_sub	120	2600	2200	950	3/3	1.25
Spar 立柱式	220	2100	4200	1450	3/3	1.05
TLP 张力腿式	160	1900	900	620	4/4	1.35
Barge 驳船式	80	2400	1600	760	4/4	1.00

注：纯钢平台、混凝土平台、钢混平台、可以通过钢和混凝土量分别设置。

D.4 操作流程

1. 在顶部选择浮体类型（默认半潜式）。
2. 设置单机容量 MW，点击 "加载模板" 自动生成全套参数。
3. 在左侧四个标签页检查/修改参数（字段旁 "?" 按钮查看含义，部分字段可用滑块调节）。
4. 点击 "计算"，右侧指标卡、表格、图表全部刷新。
5. 按需导出结果（支持 JSON/CSV/XLSX/MD/HTML 多种格式）。

D.5 成本计算模型

成本估算采用自下而上生命周期成本模型：

CAPEX (16 个分项)

直接成本：风机供货、塔筒、平台钢材、平台混凝土、平台制造、压载、系泊线、锚、动态电缆、阵列电缆、送出电缆、升压站并网、场地港口、运输安装、开发前期、用海租赁、调试并网、其他。间接成本：设计认证、保险、融资、应急（均按直接成本比例计算）。

OPEX (4 个分项, 年度)

固定运维、船机运维、其他年度运维、大部件更换储备。

DECEX (3 个分项)

拆除施工、运输处置、残值回收（负值抵扣）。

LCOE 计算公式

$$LCOE = (\text{年化 CAPEX} + \text{年度 OPEX} + \text{年化 DECEX}) / \text{年发电量}$$

其中：年化 CAPEX = CAPEX × FCR；年发电量 = 装机容量 × 8760 × 容量因子 × (1 - 综合损失)。

D.6 结果查看

右侧结果面板显示 8 个指标卡（CAPEX、单位 CAPEX、LCOE、年发电量、TCC、BOS、OPEX、净等效满发）和 7 个子标签页：

- Charts 图表：CAPEX 分项柱状图、CAPEX 占比饼图、年化 LCOE 成本构成柱状图、敏感性柱状图。
- CAPEX / OPEX / DECEX：各分项明细表（含金额、占比、备注）。
- Sensitivity 敏感性：6 个关键参数（钢材单价、UHPC 单价、安装船日费、固定运维单价、容量因子、FCR）各上下浮动 20% 的 LCOE 变化率。
- Summary 汇总：11 项关键指标汇总表。

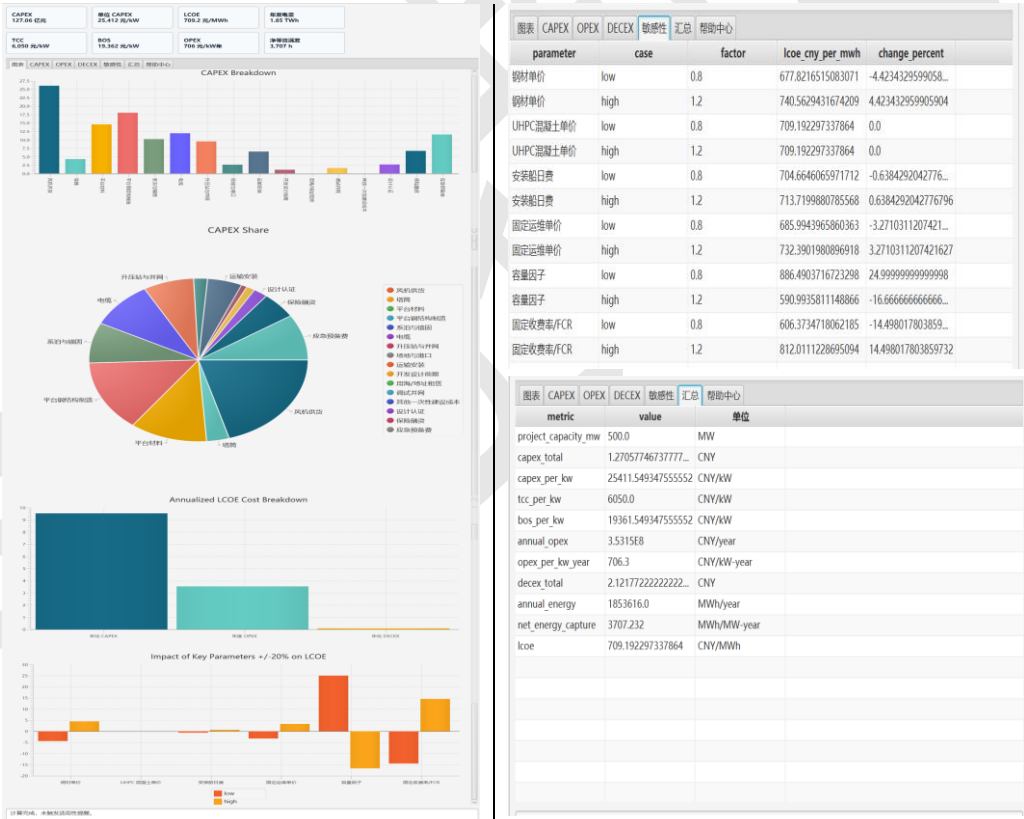


图 成本分析图表

D.7 输出文件

文件名	格式	内容
fowt_cost_inputs	JSON/CSV/XLSX	完整参数文件
fowt_cost_result	XLSX	多 sheet：summary/capex/opex/decex/inputs

fowt_cost_result	CSV/JSON/MD	合并单表或结构化数据
fowt_cost_report	HTML	含 SVG 图表的精美 HTML 报告

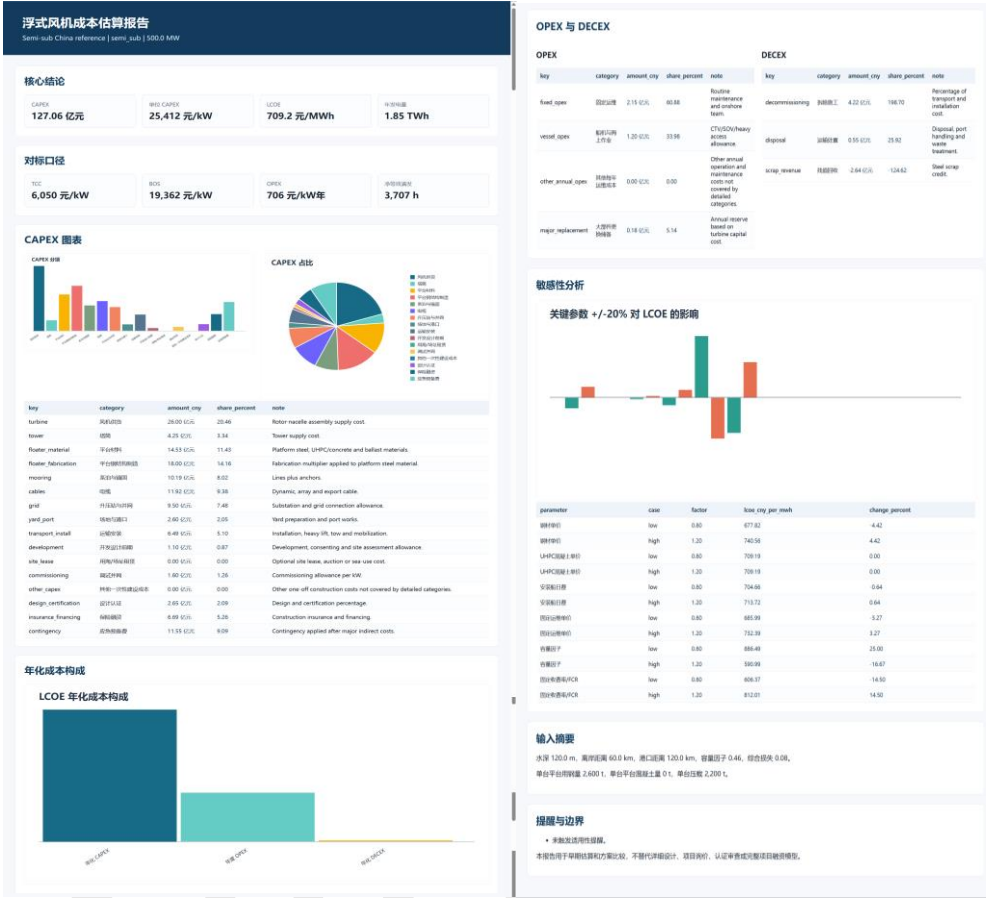


图 自动导出 HTML 结果报告

附录 E 浮式风机基础优化工具 (FOWT Optimizer)

E.1 工具简介

FOWT Platform Optimizer 是面向浮式海上风机基础结构早期概念筛选的尺寸优化工具。基于刚体小运动线性化模型，对四种主流浮式基础平台（半潜式、Spar、驳船式、TLP）进行单点水动力性能评估、PSO/NSGA-II 尺寸优化和敏感性分析。

入口：菜单 Tools → FOWT_Optimizer，以独立模态窗口打开。

注意：本工具不计算绕射/辐射频变水动力、二阶波浪载荷、粘性阻尼、控制耦合、塔筒柔性耦合和疲劳，定位于工程前期方案筛选。

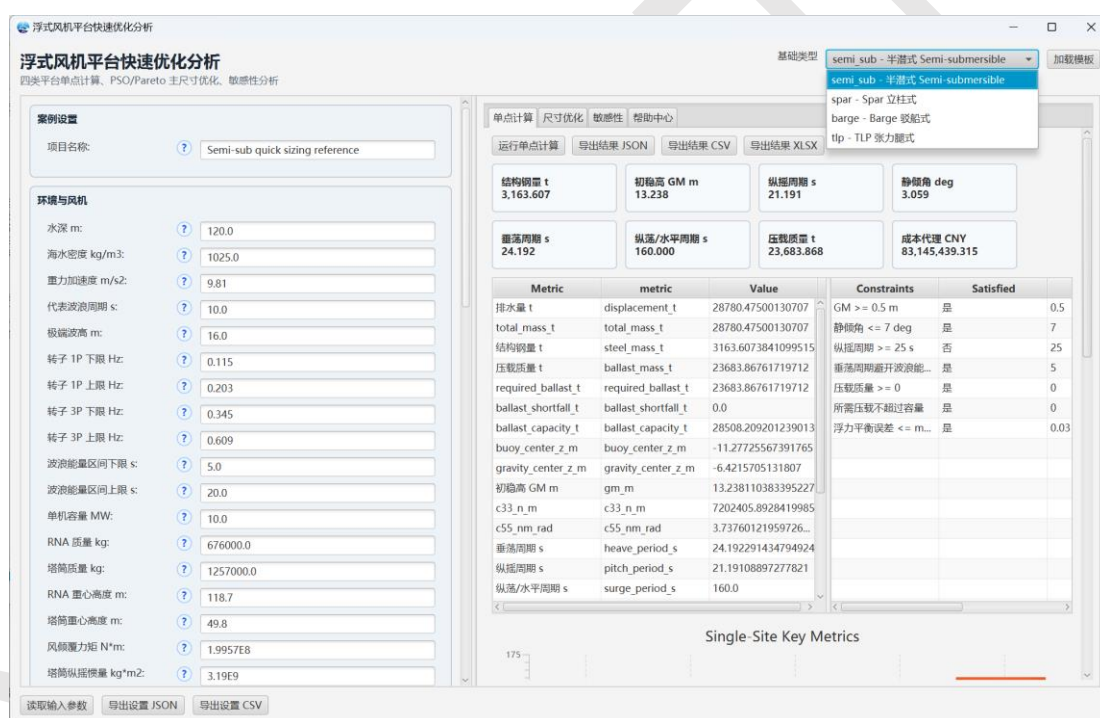


图 浮式风机平台总体优化工具输入界面

E.2 界面布局

界面采用上下三段式布局，中间为 SplitPane 左右分栏（分割比例 0.42）：

左侧输入面板包含 5 个参数分组：

- Case Settings 案例设置：项目名称。
- Environment and Turbine 环境与风机：水深、海水密度、波高、波周期、转子 1P/3P 频率范围、风机容量、RNA 质量、塔筒质量、风倾覆力矩等 18 个字段。
- Principal Dimensions 主尺寸参数：根据所选平台类型动态切换。

- Cost Proxy Parameters 成本代理参数：钢材单价、制造加成、压载单价、系泊/张力腿单价、锚单价。
- Constraints 约束条件：按平台类型动态生成约束列表，每条约束支持勾选和参数编辑。

E.3 三大功能模块

E.3.1 单解评估（Single object）

对当前输入参数进行一次性水动力性能评估，输出 8 个核心指标：

指标	说明
steel_mass_t	平台用钢量（吨）
gm_m	初稳性高 GM（米）
pitch_period_s	纵摇固有周期（秒）
static_pitch_deg	静态纵倾角（度）
heave_period_s	垂荡固有周期（秒）
surge_period_s	纵荡固有周期（秒）
ballast_mass_t	所需压载质量（吨）
cost_proxy_cny	成本代理值（元）

同时显示指标明细表、约束检查表（每条约束的满足状态）、关键指标柱状图，可选查看三维主尺度模型（鼠标拖拽旋转）。

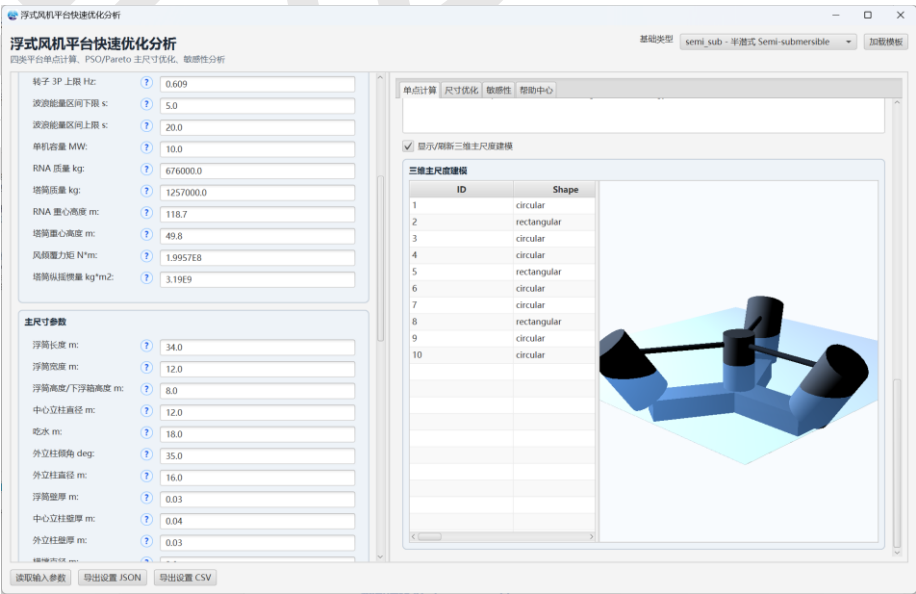


图 优化模型实时显示

E.3.2 尺寸优化 (Sizing Optimization)

支持两种优化模式：

模式	触发条件	算法	输出
单目标 PSO	选择 1 个优化目标	标准粒子群算法	最优解 + Top N 候选方案 + 收敛曲线
多目标 Pareto	选择 2 个及以上目标	类 NSGA-II (非支配排序 + 拥挤度)	帕累托前沿 + 全部候选方案 + 收敛曲线

可选优化目标：cost_proxy_cny (成本)、steel_mass_t (用钢量)、static_pitch_deg (静倾角)、gm_m (稳性高)、pitch_period_s (纵摇周期)。

算法参数：Particles (粒子数, 默认 80)、Iterations (迭代次数, 默认 120)、Random Seed (随机种子, 默认 42)、Return Top N (返回前 N 个解, 默认 20)。

设计变量边界按平台类型预设, 可手动修改。例如半潜式 10 个变量 (浮筒长度/宽度/高度、中心立柱直径、干舷、吃水、外立柱倾角/直径、系泊刚度等)。

E.3.3 敏感性分析 (Sensitivity)

对所选设计变量在 $base \times 0.75$ 到 $base \times 1.25$ 范围内等距采样 (默认 15 个点), 逐点评估指定的输出指标, 生成敏感性数据表和曲线图。可选观察指标包括 GM、静倾角、垂荡/纵摇周期、用钢量、成本代理等。

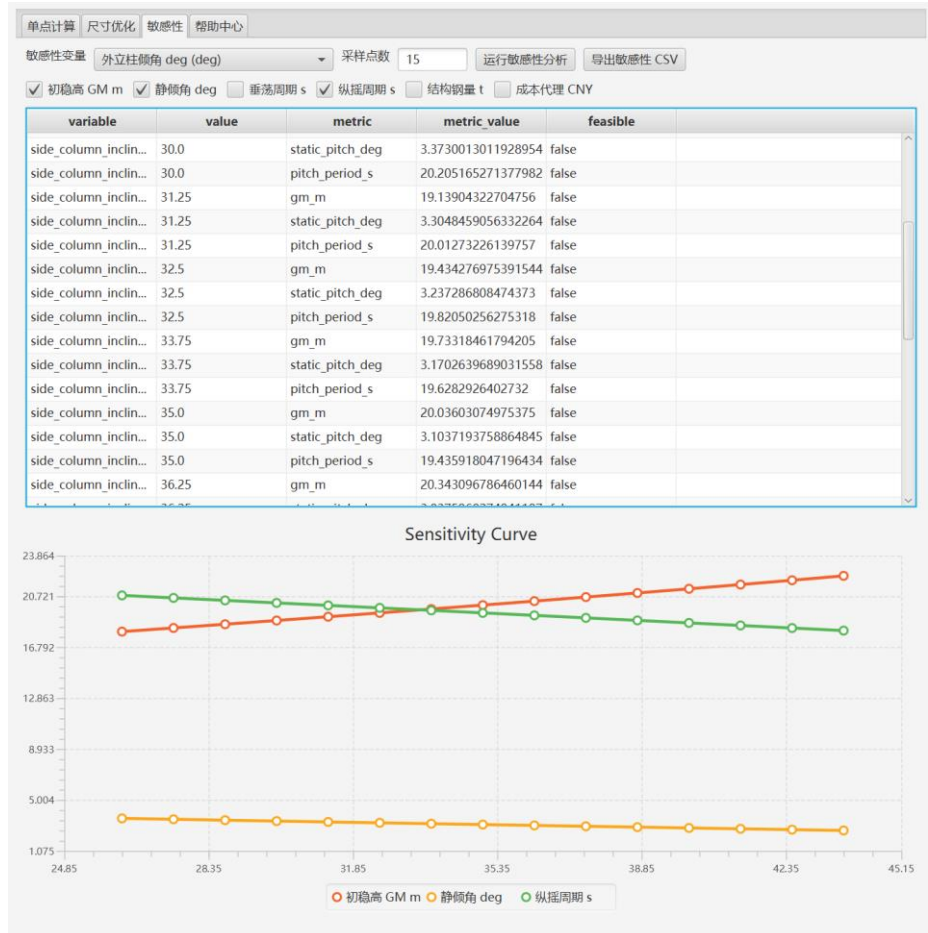


图 敏感性分析

E.4 约束体系

约束条件按平台类型动态生成，支持多种关系类型 ($\geq$, $>$, $\leq$, $<$, between, outside, abs_lte_dynamic, lte_metric, gte_metric, outside_two_ranges, outside_wave_band)。通用约束包括：

- $GM \geq 0.5$ m (初稳性高下限)
- 静倾角 ≤ 7 度
- 纵摇周期 ≥ 25 s (TLP 除外)
- 垂荡周期避开波浪能量区间
- 浮力平衡误差 $\leq \max(3\%, 150$ t)

各平台还有专属约束，如 Spar 的吃水/水深比和细长比，驳船的长宽比，TLP 的预张力系数、张力腿安全系数、气隙、频率避让等共 13 条。

约束条件

启用

约束

?

GM $\geq$ 0.5 m

?

0.5

?

7.0

?

25.0

?

5.0

20.0

?

0.0

?

0.0

?

0.03

150.0

图 示例约束条件

E.5 输出文件

文件类型	格式	内容
输入参数	JSON/CSV	完整案例输入（与 Python 原版兼容）
单点结果	JSON/CSV/XLSX	指标、约束检查、可行性、警告
优化结果	JSON/CSV/XLSX	候选方案、帕累托前沿、收敛曲线
最优方案	JSON/CSV	可直接作为下次运行输入
HTML 报告	HTML	含指标卡、约束表、敏感性表的综合报告

附录 F AI 智能助手 (AI Assistant)

F.1 工具简介

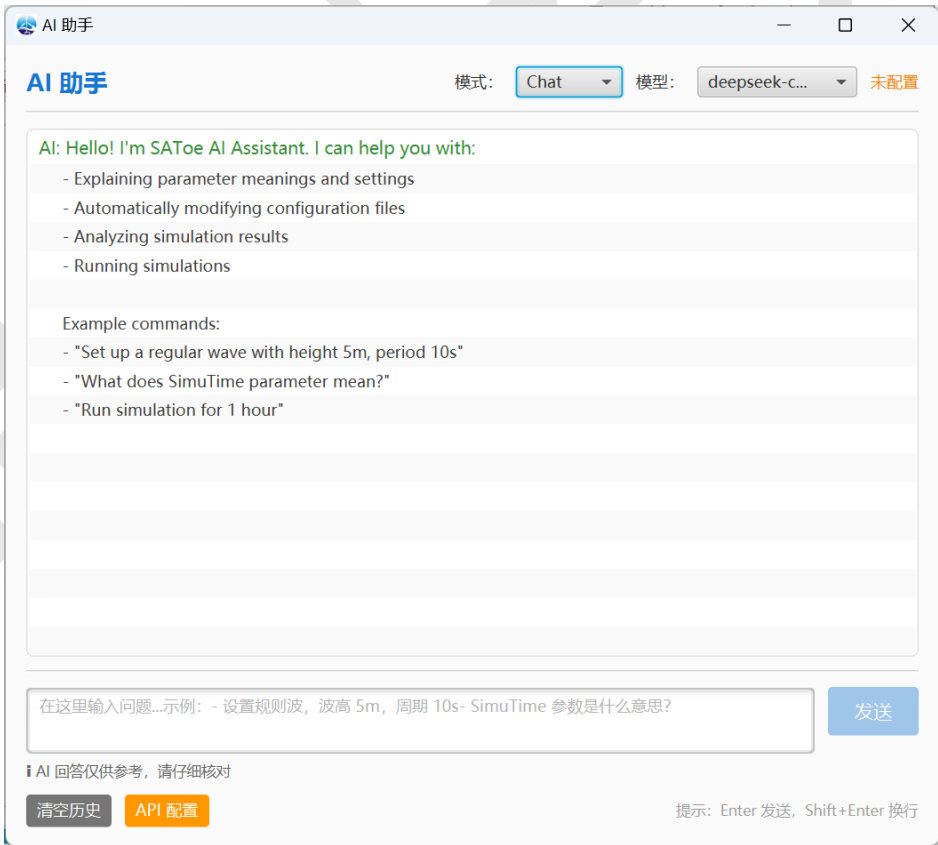
SAToe AI Assistant 是为 SAToe 海上风机仿真软件提供的对话式 AI 助手，帮助用户理解参数含义、自动修改输入文件、运行仿真和分析结果。集成 OpenAI 兼容的 LLM API，通过 Function Calling 机制调用本地工具。

入口：菜单 Tools → AI Assistant，以独立窗口打开。

F.2 界面布局

界面自上而下包含：标题栏（模式选择 + 模型选择 + 状态指示）、聊天区（消息列表，不同角色不同颜色）、输入区（文本输入 + 发送按钮）、底部按钮栏（清除历史 + API 配置）。

消息颜色区分：用户消息蓝色、AI 回复绿色、错误消息红色、工具调用标记紫色斜体、系统消息灰色。



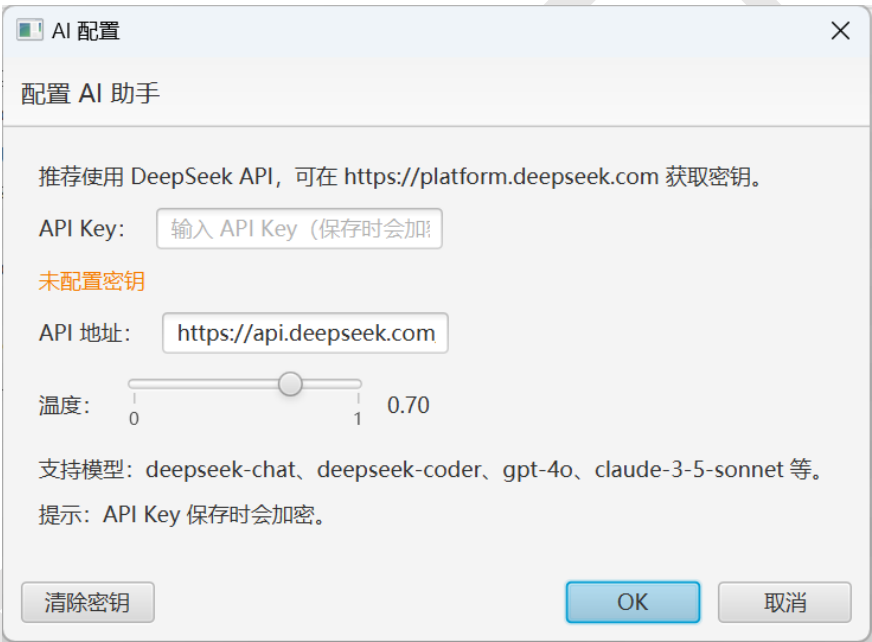
F.3 配置说明

首次使用需点击 "API Config" 按钮进行配置：

配置项	说明	默认值
-----	----	-----

API Key	LLM 服务商的 API 密钥（AES 加密保存）	---
API URL	API 端点地址	例如： https://api.deepseek.com/v1/chat/completions
Model	模型名称	例如：deepseek-chat
Temperature	温度参数（0-1）	0.7
Max Tokens	最大生成 token 数	4096

配置保存在 conf/ai.cnf 文件中，API Key 使用 AES-128 加密存储。支持 20 种模型，包括 DeepSeek、GPT-4o、Claude-3.5、Gemini、Llama、Mistral、Qwen 等。



F.4 两种工作模式

模式	权限	可用工具	典型用途
Chat	仅读取	read_skill_doc	询问参数含义、文件格式、计算方法
Agent	读写	全部 6 个工具	自动修改参数、运行求解器、分析结果

F.5 内置工具

AI Assistant 通过 Function Calling 机制调用以下 6 个本地工具：

工具名	功能	权限
read_skill_doc	读取 skill/ 目录下的参数文档	Chat/Agent

set_parameter	修改 SAToe 输入文件参数 (自动备份 .bak)	Agent
modify_simulation	返回 Simulation.dat 参数修改的 UI 操作指引	Agent
modify_environment	返回 Environment.dat 参数修改的 UI 操作指引	Agent
run_solver	运行 SAToe 求解器	Agent
analyze_results	分析 Data/Output 目录下的结果文件	Agent

F.6 安全机制

F.6.1 API Key 加密

API Key 使用加密算法加密后存储在 conf/ai.cnf 中，运行时解密到内存。

F.6.2 路径安全

路径安全模块 (PathSecurity) 限制 AI 可操作的文件范围：

- 允许修改的目录白名单：Data/Input 及其子目录 (ControlData、HydroData、MooringData、WindData、AirfoilData) 。
- 禁止修改的文件黑名单：run.cnf、ai.cnf、SAToex64.exe、license.lic。
- 允许读取的目录：Input 和 Output 目录。

附录 G 固定式风机桩土-有限元耦合

SAToeUI 软件针对固定式海上风电基础结构提供了较为完整的有限元分析 (FEM) 和桩土耦合功能，支持单桩基础 (Monopile) 和导管架基础 (Jacket) 两种基础型式。该模块通过有限元方法对结构进行离散化建模，结合桩土相互作用模型、Morison 水动力方程和气动载荷计算，实现静力分析、模态分析和瞬态时域分析。

注：该模块功能目前处于测试阶段，准确性有待更充分的验证。

G.1 单桩基础 (Monopile) 设置说明

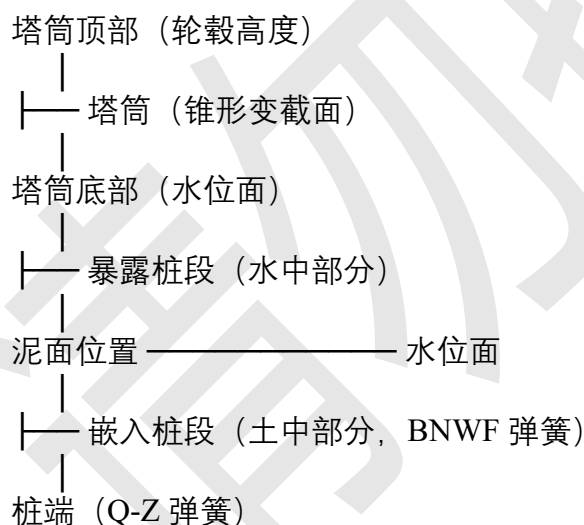
G.1.1 输入文件

单桩基础分析使用输入文件 *monopile_input.dat*，采用 Fortran namelist 格式。文件位于：... \Data\Input\FEM\monopile_input.dat

在 *Analyse.dat* 中选择单桩分析：- 第 1 行：*AFlag* = 3 (固定式风机分析) - 第 2 行：*owt_test_mode* = 1 (单桩模式)

G.1.2 结构建模

单桩基础由以下部分组成：



节点生成逻辑：

1. 嵌入桩段节点：从桩底到泥面，均匀分布 *monopile_n_embed_nodes* 个节点
2. 暴露桩段节点：从泥面到水位面，均匀分布 *monopile_n_exposed_nodes* 个节点
3. 塔筒节点：从塔筒底部到顶部，分 *n_segments* 段

所有桩段和塔筒段均使用 **Euler-Bernoulli 梁单元** 连接。

G.1.3 参数配置详解

1.3.1 FOUNDATION_CONFIG (基础配置)

参数	示例值	说明
<i>foundation_type</i>	"monopile"	基础类型，必须为 "monopile"
<i>embedment_length_m</i>	30.0	桩嵌入深度（泥面以下），单位 m
<i>embedment_element_length_m</i>	3.0	嵌入桩段单元长度，单位 m
<i>seabed_z_m</i>	-50.0	泥面高程（相对于水位面），单位 m
<i>water_depth_m</i>	50.0	静水深度，单位 m
<i>water_level_m</i>	0.0	静水位高程，单位 m
<i>monopile_outer_diameter_m</i>	6.0	单桩外径，单位 m
<i>monopile_wall_thickness_m</i>	0.06	单桩壁厚，单位 m
<i>monopile_exposed_length_m</i>	50.0	暴露桩段长度（泥面到水位面），单位 m
<i>monopile_n_embed_nodes</i>	11	嵌入桩段节点数
<i>monopile_n_exposed_nodes</i>	11	暴露桩段节点数

提示：嵌入桩段节点数越多，BNWF 弹簧分布越精细，桩土相互作用计算精度越高，但计算量也相应增加。建议嵌入段单元长度 ($embedment_length_m / (monopile_n_embed_nodes - 1)$) 取 1~3 倍桩径。

1.3.2 TOWER_CONFIG (塔筒配置)

参数	示例值	说明
<i>tower_enabled</i>	.TRUE.	是否启用塔筒
<i>tower_file</i>	""	外部塔筒定义文件路径（留空则使用以下参数）
<i>tower_height_m</i>	87.6	塔筒总高度，单位 m
<i>tower_base_height_msl_m</i>	0.0	塔筒底部高程（相对水位面），单位 m
<i>n_segments</i>	10	塔筒分段数
<i>diameter_base_m</i>	6.0	塔筒底部外径，单位 m
<i>diameter_top_m</i>	3.75	塔筒顶部外径，单位 m
<i>thickness_base_m</i>	0.035	塔筒底部壁厚，单位 m
<i>thickness_top_m</i>	0.035	塔筒顶部壁厚，单位 m

说明：塔筒截面外径从底部到顶部线性变化，壁厚也可线性变化。对于单桩基础，塔筒底部通常与暴露桩段顶部（水位面处）连接。

1.3.3 MATERIAL_CONFIG (材料配置)

参数	示例值	说明
<i>material_name</i>	"Steel"	材料名称标识

<i>young_modulus_pa</i>	<i>210.0E9</i>	弹性模量, 单位 Pa
<i>shear_modulus_pa</i>	<i>80.0E9</i>	剪切模量, 单位 Pa
<i>density_kg_m3</i>	<i>7850.0</i>	材料密度, 单位 kg/m ³
<i>poisson_ratio</i>	<i>0.3</i>	泊松比
<i>yield_strength_pa</i>	<i>355.0E6</i>	屈服强度, 单位 Pa (用于应力校核 UC 输出)

说明: 材料参数应用于桩、塔筒和导管架所有结构构件。屈服强度用于输出文件中的利用率 (UC, Unity Check) 校核。

1.3.4 SOIL_CONFIG (桩土配置)

参数	示例值	说明
<i>soil_enabled</i>	<i>.TRUE.</i>	桩土相互作用启用开关
<i>soil_coupling_mode</i>	<i>"bnwf_distribute"</i>	桩土耦合模式 (见第 2.8 节)
<i>weak_coupling_iterations</i>	<i>3</i>	弱耦合迭代次数 (仅 <i>bnwf_weak_coupling</i> 模式有效)
<i>py_model_type</i>	<i>1</i>	P-Y 曲线模型: 1=API 砂土, 2=Matlock 黏土
<i>soil_input_file</i>	<i>""</i>	外部土层参数文件路径 (留空则使用内嵌两层土参数)
<i>soil_case_name</i>	<i>"default"</i>	土层工况标识

内嵌两层土参数:

参数	第一层	第二层	说明
<i>layerN_depth_m</i>	<i>25.0</i>	<i>50.0</i>	层底深度 (从泥面起算), 单位 m
<i>layerN_gamma_kn_m3</i>	<i>18.0</i>	<i>17.0</i>	有效重度, 单位 kN/m ³
<i>layerN_phi_deg</i>	<i>35.0</i>	<i>0.0</i>	内摩擦角, 单位 ° (黏土取 0)
<i>layerN_su_kpa</i>	<i>0.0</i>	<i>100.0</i>	不排水抗剪强度, 单位 kPa (砂土取 0)
<i>layerN_type</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	土层类型: 1=砂土, 2=黏土

提示: 默认配置为上层砂土 (厚 25 m) + 下层黏土 (厚 25 m) 的双层剖面。如需更复杂土层, 可通过 *soil_input_file* 指定外部土层文件。*py_model_type* 选择主控 P-Y 曲线模型, 程序会根据各层 *layerN_type* 自动选择相应的 P-Y 公式。

1.3.5 ENVIRONMENT_CONFIG (环境配置)

参数	示例值	说明
<i>wave_enabled</i>	<i>.TRUE.</i>	波浪载荷开关
<i>wave_height_m</i>	<i>4.0</i>	波高（峰谷距离），单位 m
<i>wave_period_s</i>	<i>8.0</i>	波周期，单位 s
<i>wave_direction_deg</i>	<i>0.0</i>	波浪入射方向角，单位 °
<i>wave_theory</i>	<i>1</i>	波浪理论：1=线性 Airy 波，2=Stokes 波
<i>current_enabled</i>	<i>.TRUE.</i>	海流载荷开关
<i>current_speed_ms</i>	<i>0.5</i>	近表面流速，单位 m/s
<i>current_direction_deg</i>	<i>0.0</i>	海流方向角，单位 °
<i>current_power_factor</i>	<i>0.1</i>	流速垂向幂律分布指数
<i>wind_enabled</i>	<i>.TRUE.</i>	风载荷开关
<i>wind_speed_ms</i>	<i>11.4</i>	参考高度风速，单位 m/s
<i>wind_reference_height_m</i>	<i>87.6</i>	风速参考高度，单位 m
<i>wind_direction_deg</i>	<i>0.0</i>	风向角，单位 °
<i>wind_shear_exponent</i>	<i>0.11</i>	风剪切幂律指数
<i>air_density_kg_m3</i>	<i>1.225</i>	空气密度，单位 kg/m ³
<i>cd</i>	<i>1.0</i>	Morison 拖曳力系数
<i>cm</i>	<i>2.0</i>	Morison 惯性力系数
<i>ca</i>	<i>1.0</i>	附加质量系数
<i>marine_growth_thickness_m</i>	<i>0.1</i>	海生物附着厚度，单位 m
<i>marine_growth_density_kg_m3</i>	<i>1500.0</i>	海生物密度，单位 kg/m ³

说明：海生物附着会增加构件的有效直径（影响水动力计算）和有效质量（影响动力响应）。Morison 系数取值应参照 DNV-RP-C205 或 API RP 2A 规范。

1.3.6 AERO_CONFIG (气动配置)

参数	示例值	说明
<i>aero_enabled</i>	<i>.TRUE.</i>	气动载荷开关
<i>aero_scale_factor</i>	<i>1.0</i>	气动载荷全局缩放因子
<i>aero_wind_speed_ms</i>	<i>11.4</i>	轮毂高度风速，单位 m/s
<i>rotor_angular_speed_rpm</i>	<i>12.1</i>	转子角速度，单位 rpm
<i>pitch_angle_deg</i>	<i>0.0</i>	桨距角，单位 °

<i>yaw_angle_deg</i>	0.0	偏航角, 单位 °
<i>azimuth_angle_deg</i>	0.0	方位角, 单位 °
<i>rotor_diameter_m</i>	126.0	转子直径, 单位 m
<i>hub_diameter_m</i>	3.0	轮毂直径, 单位 m
<i>hub_height_m</i>	87.6	轮毂高度, 单位 m
<i>shaft_tilt_deg</i>	5.0	主轴倾角, 单位 °
<i>controller_type</i>	"none"	控制器类型 (当前不支持外部控制器耦合)
<i>blade_model</i>	"rigid"	桨叶模型 (当前仅支持刚性桨叶)

1.3.7 TOPLOAD_CONFIG (顶部载荷配置)

参数	示例值	说明
<i>nacelle_mass_kg</i>	240000.0	机舱集中质量, 单位 kg
<i>hub_mass_kg</i>	56780.0	轮毂集中质量, 单位 kg
<i>n_blades</i>	3	桨叶数量
<i>blade_mass_each_kg</i>	17740.0	单片桨叶质量, 单位 kg
<i>Fx_n</i>	0.0	附加 x 向集中力, 单位 N
<i>Fy_n</i>	0.0	附加 y 向集中力, 单位 N
<i>Fz_n</i>	0.0	附加 z 向集中力, 单位 N
<i>Mx_nm</i>	0.0	附加 x 轴力矩, 单位 N·m
<i>My_nm</i>	0.0	附加 y 轴力矩, 单位 N·m
<i>Mz_nm</i>	0.0	附加 z 轴力矩, 单位 N·m
<i>use_aerodynamic_load</i>	.FALSE.	气动载荷替代开关 (遗留参数)

说明: 顶部总集中质量 = 机舱质量 + 轮毂质量 + 桨叶数量 × 单片桨叶质量。默认值为 240000 + 56780 + 3×17740 = 350000 kg (对应 NREL 5MW 参考风机)。

1.3.8 ANALYSIS_CONFIG (分析配置)

参数	示例值	说明
<i>analysis_type</i>	"transient"	分析类型: "static" / "modal" / "transient"
<i>n_modes</i>	5	模态分析阶数
<i>transient_dt_s</i>	0.05	时间步长, 单位 s
<i>transient_total_time_s</i>	12.0	总模拟时长, 单位 s
<i>transient_save_interval</i>	1	结果保存间隔 (每 N 步保存一次)
<i>transient_variable_load</i>	.FALSE.	时变外载荷开关 (正弦调制)
<i>transient_load_freq_hz</i>	0.0	谐波载荷频率, 单位 Hz

<i>convergence_tolerance</i>	<i>1.0E-6</i>	Newton-Raphson 收敛容差
<i>max_iterations</i>	<i>100</i>	最大迭代次数
<i>use_geometric_stiffness</i>	<i>.FALSE.</i>	几何刚度矩阵 (P-Δ 效应) 开关

三种分析类型说明:

<i>static</i>	静力分析, 计算位移和反力	位移、反力、应力
<i>modal</i>	模态分析, 计算结构自振频率和振型	固有频率、振型 + 静力结果
<i>transient</i>	瞬态时域分析, Newmark-β 积分	时程位移、反力、应力、水动力/气动时程

1.3.9 OUTPUT_CONFIG (输出配置)

参数	示例值	说明
<i>output_directory</i>	<i>"Data\Output"</i>	结果输出根目录
<i>case_name</i>	<i>"Monopile_OWT"</i>	工况标识名
<i>save_displacement</i>	<i>.TRUE.</i>	输出位移结果
<i>save_reactions</i>	<i>.TRUE.</i>	输出反力结果
<i>save_stresses</i>	<i>.TRUE.</i>	输出单元应力、应变和 UC 校核
<i>save_modal_results</i>	<i>.TRUE.</i>	输出模态分析结果
<i>save_time_history</i>	<i>.TRUE.</i>	输出塔顶时程 (位移/载荷)
<i>save_hydrodynamic_history</i>	<i>.TRUE.</i>	输出水动力合力时程
<i>save_aero_history</i>	<i>.TRUE.</i>	输出气动合力时程
<i>save_wave_history</i>	<i>.TRUE.</i>	输出参考波面高程时程
<i>plot_z_aspect_cap</i>	<i>1.8</i>	竖向绘图比例上限
<i>vtk_enabled</i>	<i>2</i>	VTK 输出模式: 0=无, 1=线框, 2=曲面
<i>vtk_output_directory</i>	<i>"Data\Output\3DModelData\"</i>	VTK 文件输出目录
<i>vtk_main_structure_file</i>	<i>"Monopile_Tower_Complete"</i>	主体结构 VTK 文件名
<i>vtk_embedded_pile_file</i>	<i>"Monopile_Embedded_Pile"</i>	嵌入桩 VTK 文件名
<i>vtk_water_surface_file</i>	<i>"Monopile_Water_Surface"</i>	水面网格 VTK 文件名
<i>vtk_seabed_surface_file</i>	<i>"Monopile_Seabed_Surface"</i>	泥面网格 VTK 文件名

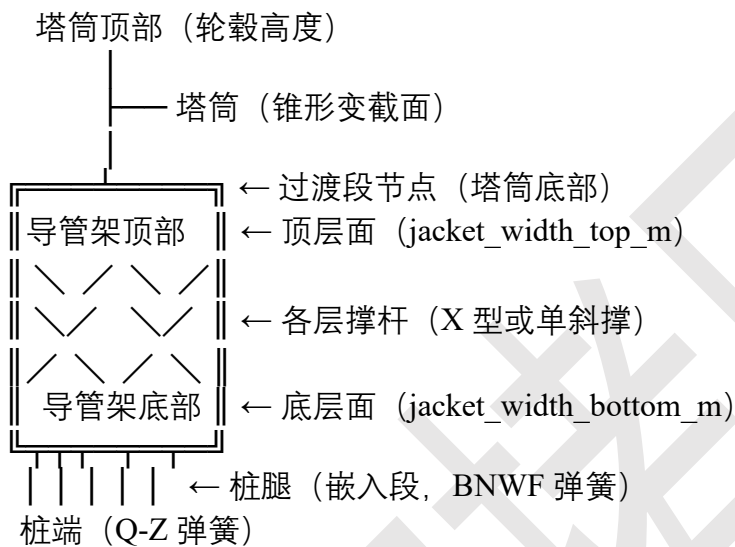
G.2 导管架基础 (Jacket) 设置说明

G.2.1 输入文件

导管架基础分析使用输入文件 *jacket_input.dat*，位于：\Data\Input\FEM\jacket_input.dat
在 *Analyse.dat* 中选择导管架分析：- 第 1 行：AFlag = 3（固定式风机分析）- 第 2 行：
owt_test_mode = 2（导管架模式）

G.2.2 结构建模

导管架基础由以下部分组成（自下而上）：



节点生成逻辑：

1. 桩腿嵌入段节点：每条腿从桩底到泥面，按 *embedment_element_length_m* 离散
2. 导管架主体节点：每条腿从泥面到导管架顶部，按 *jacket_story_height_m* 分层
3. 撑杆节点：连接相邻腿柱的水平和斜向撑杆
4. 过渡段节点：导管架顶部与塔筒底部连接点
5. 塔筒节点：从过渡段到塔筒顶部

导管架几何特征：- 腿柱数量： *jacket_n_legs*（通常为 3 或 4）- 层数（bays）：
jacket_n_stories（竖向分层数）- 宽度线性渐变：底面 *jacket_width_bottom_m* → 顶面
jacket_width_top_m - 撑杆布置：每面可设置 X 型撑杆 (*jacket_use_x_braces* = .TRUE.) 或单斜
撑

G.2.3 参数配置详解

2.3.1 FOUNDATION_CONFIG（导管架基础配置）

参数	示例值	说明
<i>foundation_type</i>	"jacket"	基础类型，必须为 "jacket"
<i>embedment_length_m</i>	30.0	桩嵌入深度（泥面以下），单位 m
<i>embedment_element_length_m</i>	2.5	嵌入桩段单元长度，单位 m
<i>seabed_z_m</i>	-50.0	泥面高程，单位 m
<i>water_depth_m</i>	50.0	静水深度，单位 m

<i>water_level_m</i>	<i>0.0</i>	静水位高程，单位 m
----------------------	------------	------------

导管架布局参数：

参数	示例值	说明
<i>jacket_n_legs</i>	<i>4</i>	腿柱数量（通常 3 或 4）
<i>jacket_n_levels</i>	<i>4</i>	预留层面数（兼容性参数）
<i>jacket_n_stories</i>	<i>6</i>	竖向分层数（bays）
<i>jacket_story_height_m</i>	<i>10.83</i>	每层高度，单位 m
<i>jacket_base_z_m</i>	<i>-50.0</i>	导管架底部高程（泥面位置），单位 m
<i>jacket_width_bottom_m</i>	<i>12.0</i>	底部腿间距（腿到腿），单位 m
<i>jacket_width_top_m</i>	<i>8.0</i>	顶部腿间距（腿到腿），单位 m
<i>jacket_leg_spacing_m</i>	<i>12.0</i>	遗留底部间距参数（兼容性保留）
<i>jacket_leg_spacing_top_m</i>	<i>8.0</i>	遗留顶部间距参数（兼容性保留）

导管架截面参数：

参数	示例值	说明
<i>jacket_leg_diameter_m</i>	<i>1.2</i>	腿柱外径，单位 m
<i>jacket_leg_thickness_m</i>	<i>0.05</i>	腿柱壁厚，单位 m
<i>jacket_brace_diameter_m</i>	<i>0.8</i>	撑杆外径，单位 m
<i>jacket_brace_thickness_m</i>	<i>0.02</i>	撑杆壁厚，单位 m

撑杆配置参数：

参数	示例值	说明
<i>jacket_brace_member_type</i>	<i>"beam"</i>	撑杆单元类型： <i>"beam"</i> （梁）或 <i>"rod"</i> （杆）
<i>jacket_brace_diagonal_pattern</i>	<i>"face_single"</i>	斜撑布置模式（当前支持单面斜撑）
<i>jacket_use_x_braces</i>	<i>.TRUE.</i>	是否每面设置 X 型撑杆
<i>jacket_n_div</i>	<i>1</i>	预留细分因子

提示： - 导管架宽度从底部到顶部线性渐变（底宽 > 顶宽），提供更好的整体稳定性。 - 撑杆选择 *"beam"* 可考虑弯曲刚度，结果更精确但计算量更大；选择 *"rod"* 仅考虑轴向刚度，适用于初步设计。 - *jacket_n_stories* 决定导管架的竖向分段数，需与 *jacket_story_height_m* 配合使用，确保总高度 = *n_stories* × *story_height* 覆盖从泥面到过渡段的高度。 - 单桩参数（*monopile_**）在导管架模式下不使用，仅为解析器兼容性保留。

2.3.2 其他配置段

导管架 *TOWER_CONFIG*、*MATERIAL_CONFIG*、*SOIL_CONFIG*、*ENVIRONMENT_CONFIG*、*AERO_CONFIG*、*TOPLOAD_CONFIG*、*ANALYSIS_CONFIG* 和 *OUTPUT_CONFIG* 的参数定义与单桩基础相同，详见第 G.1.3 节。

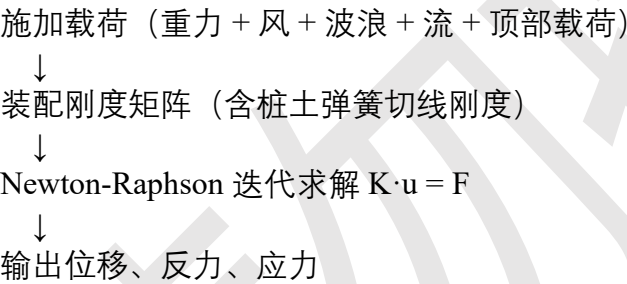
导管架特有的输出文件名默认值：

参数	示例值	说明
<i>case_name</i>	"Jacket_OWT"	工况标识名
<i>vtk_main_structure_file</i>	"Jacket_Tower_Complete"	主体结构 VTK 文件名
<i>vtk_embedded_pile_file</i>	"Jacket_Embedded_Pile"	嵌入桩 VTK 文件名
<i>vtk_water_surface_file</i>	"Jacket_Water_Surface"	水面网格 VTK 文件名
<i>vtk_seabed_surface_file</i>	"Jacket_Seabed_Surface"	泥面网格 VTK 文件名

说明：导管架的桩土配置与单桩基础共用同一套 BNWF 模型。每条腿柱的嵌入段均分布 P-Y/T-Z 弹簧，桩端连接 Q-Z 弹簧。土层参数配置方式与单桩完全一致。

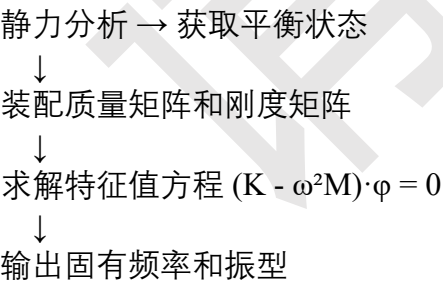
G.3. 分析类型与工作流程

G.3.1 静力分析 (analysis_type = “static”)



适用场景：极端环境载荷下的结构位移校核、桩承载力验算、初步设计评估。

G.3.2 模态分析 (analysis_type = “modal”)

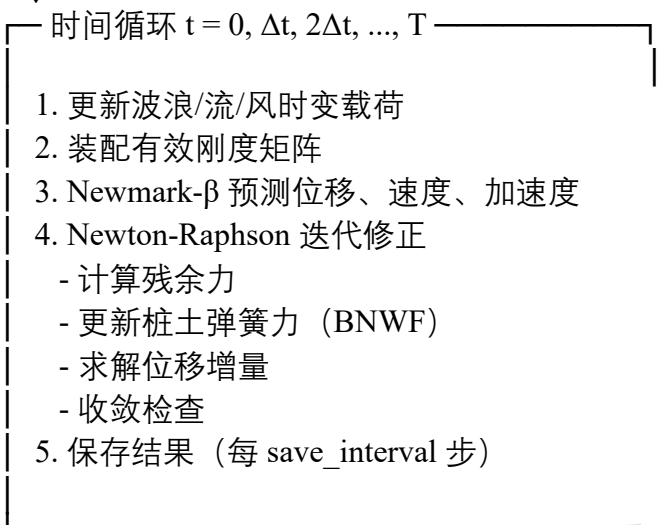


适用场景：结构动力特性评估、共振检查、地震响应谱分析输入。

说明：模态分析在静力平衡状态的基础上进行，桩土弹簧采用平衡状态处的切线刚度。输出的 *n_modes* 阶频率和振型可用于后续动力分析。

G.3.3 瞬态时域分析 (analysis_type = “transient”)

初始化 (t=0) : 施加初始载荷



适用场景: 极端波浪工况动力响应分析、疲劳分析载荷输入、地震时程分析。

时间步长选择建议: - 波浪主导: $\Delta t \leq T_{wave}/100$ (如波周期 8 s, 建议 $\Delta t \leq 0.08$ s) - 结构主导: $\Delta t \leq T_{min}/20$ (T_{min} 为关注的最高阶模态周期) - 默认值 0.05 s 适用于大多数海上风机工况

G.4. 结果输出与解释

G.4.1 输出文件列表

分析完成后, 结果文件保存在 `output_directory` 指定的目录下。以单桩为例 (`case_name = "Monopile_OWT"`) :

参数	示例值	说明
<code>Monopile_OWT_displacement.dat</code>	节点位移	<code>save_displacement = .TRUE.</code>
<code>Monopile_OWT_reactions.dat</code>	支座反力	<code>save_reactions = .TRUE.</code>
<code>Monopile_OWT_stress_uc.dat</code>	单元应力、应变和 UC 校核	<code>save_stresses = .TRUE.</code>
<code>Monopile_OWT_modal.dat</code>	模态频率和振型	<code>save_modal_results = .TRUE.</code>
<code>Monopile_OWT_time_history.dat</code>	塔顶位移/载荷时程	<code>save_time_history = .TRUE.</code>
<code>Monopile_OWT_hydrodynamic_history.dat</code>	水动力合力时程	<code>save_hydrodynamic_history = .TRUE.</code>
<code>Monopile_OWT_aero_history.dat</code>	气动合力时程	<code>save_aero_history = .TRUE.</code>
<code>Monopile_OWT_wave_history.dat</code>	参考波面高程时程	<code>save_wave_history = .TRUE.</code>

G.4.2 VTK 可视化文件

VTK 文件保存在 *vtk_output_directory* 指定的目录下，可用 ParaView 等工具打开查看三维模型。

参数	示例值	说明
<i>Monopile_Tower_Complete.vtp</i>	完整结构（桩+塔筒）三维模型	<i>vtk_enabled</i> = 1（线框）或 2（曲面）
<i>Monopile_Embedded_Pile.vtp</i>	嵌入桩段及土弹簧	<i>vtk_enabled</i> ≥ 1
<i>Monopile_Water_Surface.vtp</i>	水面网格	<i>vtk_enabled</i> ≥ 1
<i>Monopile_Seabed_Surface.vtp</i>	泥面网格	<i>vtk_enabled</i> ≥ 1

VTK 输出模式说明： - *vtk_enabled* = 0：不输出 VTK 文件 - *vtk_enabled* = 1：点-线模型（节点和单元线框，文件较小） - *vtk_enabled* = 2：曲面模型（带截面渲染的三维实体，文件较大）

G.4.3 应力校核 (UC Check)

当 *save_stresses* = *.TRUE.* 时，输出文件中包含各单元的利用率（Unity Check）：

$$UC = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{yield}}$$

其中 σ_{max} 为单元最大等效应力， σ_{yield} 为材料屈服强度 (*yield_strength_pa*) 。

- *UC* < 1.0：结构安全
- *UC* ≥ 1.0：结构可能屈服，需进一步评估

G.5 使用建议与注意事项

G.5.1 参数选择建议

1. **嵌入深度：**应基于地质勘察数据和承载力验算确定，通常取 4~6 倍桩径
2. **桩径选择：**单桩直径通常为 5~8 m，需考虑水深和载荷大小
3. **壁厚选择：**需满足结构强度和屈曲稳定性要求，通常 40~80 mm
4. **网格密度：**嵌入段建议 10~15 个节点，暴露段和塔筒建议 8~12 个节点
5. **时间步长：**瞬态分析建议 $\Delta t \leq 0.05$ s，确保收敛和精度

G.5.2 桩土模型选择

SAToeUI 提供四种桩土耦合模式，通过 *soil_coupling_mode* 参数选择：

类型	解释	场景
<i>none</i>	不考虑桩土相互作用，桩底固定	初步估算、刚性地基假设
<i>head_6x6</i>	等效 6×6 桩头刚度矩阵	结构整体分析、简化桩土模型

<i>head_6x6_fast</i>	简化 6×6 桩头刚度（快速计算）	参数化研究、快速迭代
<i>bnwf_distributed</i>	沿桩身分布非线性弹簧（完整 BNWF）	精细桩土分析、设计验算
<i>bnwf_weak_coupling</i>	耦合迭代（FEM ↔ PileSoil 交替求解）	强非线性工况

G.5.3 常见问题排查

问题	原因	解决方案
计算不收敛	时间步长过大或载荷过大	减小 <i>transient_dt_s</i> ，增大 <i>max_iterations</i>
桩土反力异常	土层参数不合理	检查 <i>layerN_*</i> 参数，确保深度连续无间隙
频率结果异常	质量矩阵或边界条件错误	检查顶部质量和桩底约束模式
VTK 文件无法打开	输出路径含特殊字符	确保路径为英文且无空格
应力 UC 过大	截面尺寸不足或载荷偏大	增大壁厚或减小环境载荷

参考文献

- [1] **Jiahao Chen**, Zhiqiang Hu, Geliang Liu, Decheng Wan. Coupled aero-hydro-servo-elastic methods for floating wind turbines. *Renewable Energy*, 2019, 130, 139-153.
- [2] **Jiahao Chen**, Yong Ma, Zhiqun Guo, Ruosi Zha. Performance and optimization of wind tracking of a single-point moored floating offshore wind turbine. *Ocean Engineering*, 2025, 329, 121139.
- [3] **Jiahao Chen**, Zhiqiang Hu, Geliang Liu, Decheng Wan. Study on Rigid-Flexible Coupling Effects of Floating Offshore Wind Turbines. *China Ocean Engineering*, 2019, 33(1): 1-13.
- [4] Chuanfu Wang, **Jiahao Chen***, Shiting Wang, Shaotao Fan, Hao Ren, Donghua Liu. Sensitivity analysis and optimization of passive gyrostabilizers to mitigate pitch motion of a semi-submersible floating offshore wind turbine. *Ocean Engineering*, 2025, 329, 121147.
- [5] **Jiahao Chen***, Fan Zhang, Caiwei Sun. Research on fully coupled method for floating offshore wind turbines considering nonlinear time-domain hydrodynamic effects. *Ocean Engineering*, 2025, 340, 122245.
- [6] Chuanfu Wang, **Jiahao Chen***, Jian Guo, and Xiping Zheng. Research on active mooring control in mitigating platform surge motion of a floating offshore wind turbine. *J. Renewable Sustainable Energy* 18, 013305 (2026); doi 10.1063/5.0310381.
- [7] 陈嘉豪.SAToe—海上漂浮式风机多场耦合数值工具研究.南方能源建, 2025. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-436.
- [8] **Jiahao Chen***. Review of Coupled Dynamic Modeling Methods for Floating Offshore Wind Turbines. *Energies* 19.1 (2025): 205.