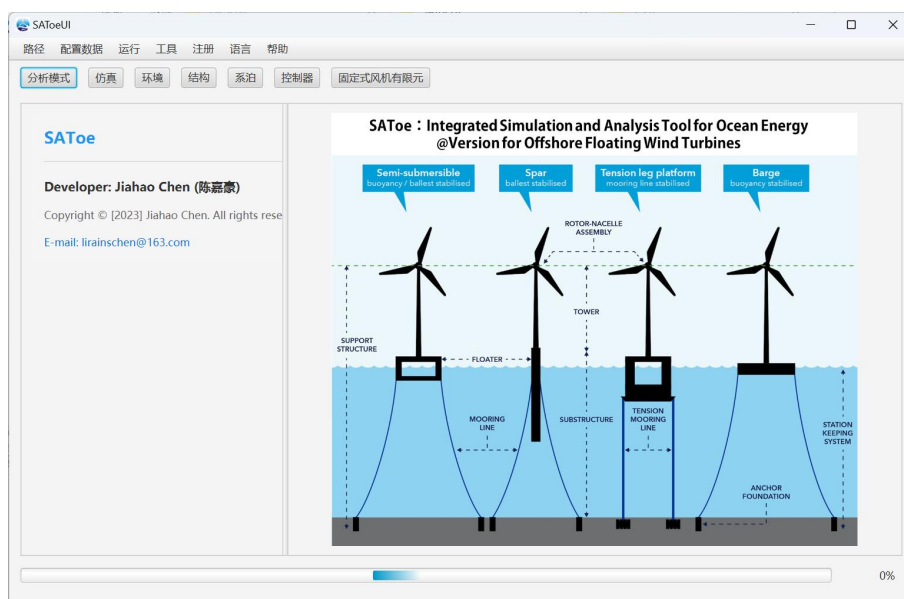


SAToeUI

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
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（3 步）	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
5.5.4 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 运行入口与推荐流程.....	57
G.1.2 输入文件语法规则	57
G.1.3 输入文件清单	58
G.1.4 结构建模与节点生成.....	59
G.1.5 参数配置详解	59
G.2 导管架基础 (Jacket) 设置说明	69
G.2.1 输入文件.....	69
G.2.2 结构建模与节点生成.....	69
G.2.3 参数配置详解	70
G.3 分析类型与工作流程	72
G.3.1 静力分析 (analysis_type = "static")	72
G.3.2 模态分析 (analysis_type = "modal")	72
G.3.3 瞬态时域分析 (analysis_type = "transient")	73
G.3.4 时间步长选择建议	73
G.3.5 荷载、组装与计算原理	73
G.4 结果输出与解释.....	74
G.4.1 结果文件列表	74
G.4.2 VTK 可视化文件	75
G.4.3 屈服比与工程筛查	76
G.4.4 审计与追溯文件.....	76
G.5 可选高级功能	77
G.5.1 荷载工况与组合	77
G.5.2 疲劳参考.....	77
G.5.3 地震输入.....	78
G.5.4 牵索塔	78
G.5.5 成员与土层覆盖文件.....	78
G.6 使用建议与注意事项	79
G.6.1 参数选择建议	79
G.6.2 桩土模型选择	79
G.6.3 常见问题排查	80
G.6.4 严格模式检查清单	80
参考文献	82

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）的多物理场耦合动力分析，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自动设置。软件提供了中/英双语切换显示，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

- 浮式风机气动-水动-结构-伺服-系泊耦合时域动力仿真；
- 浮式风机强迫运动分析；
- 海上固定式风机桩土-风浪-结构耦合有限元分析；
- 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、动画播放与导出、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
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/ (可自主选择路径, 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 (3 步)

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带风机系统仿真；
 - 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，正版用户可联系开发者。

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

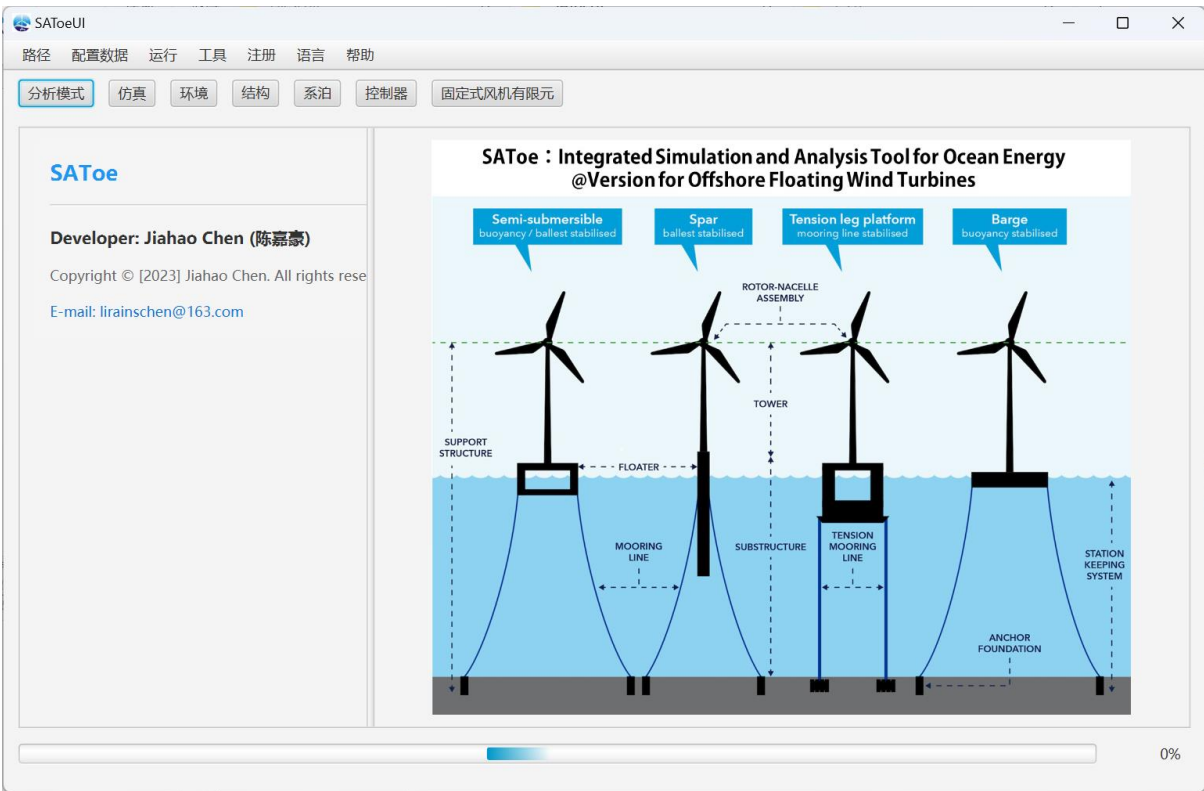


图 SAToeUI 整体界面布局

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 值	模式	说明
1	DOFA	浮式风机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	浮式风机风-浪-流耦合动力分析（常规时域仿真）（默认值）
3	FEM OWT	固定式风机桩土耦合-结构有限元分析

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

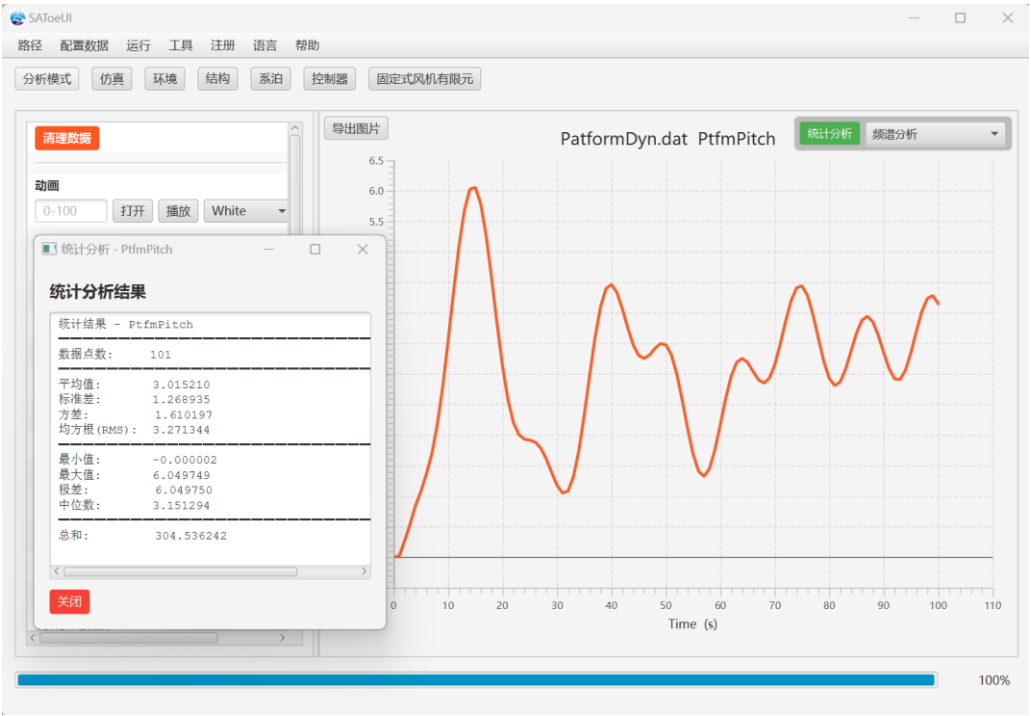


图 计算结果展示与统计

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。

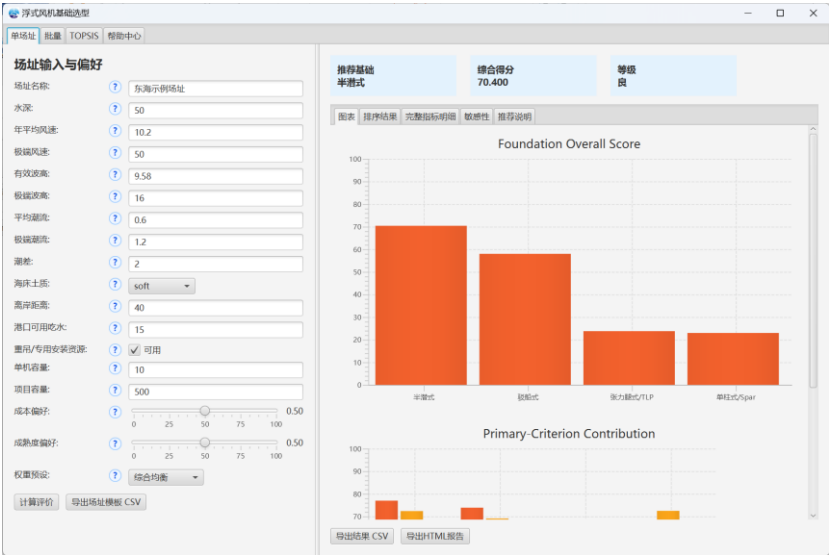


图 浮式风机选型功能界面

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。详细使用说明参见附录 D。

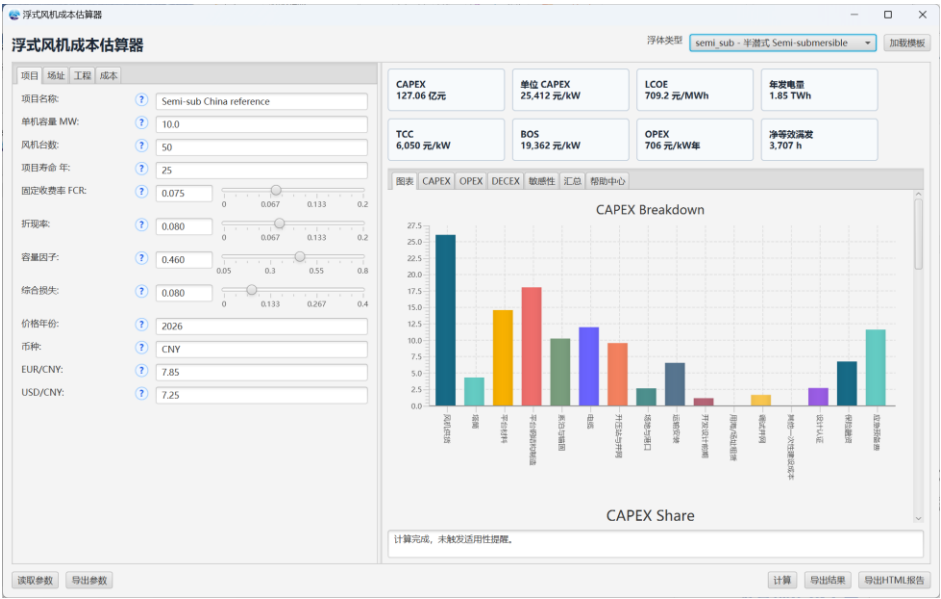


图 浮式风机成本估算工具界面

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。

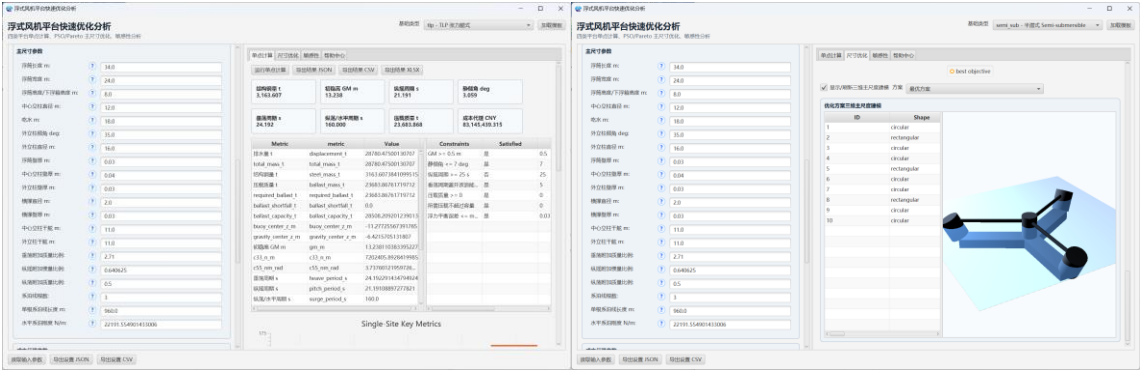


图 浮式风机基础优化工具界面

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。

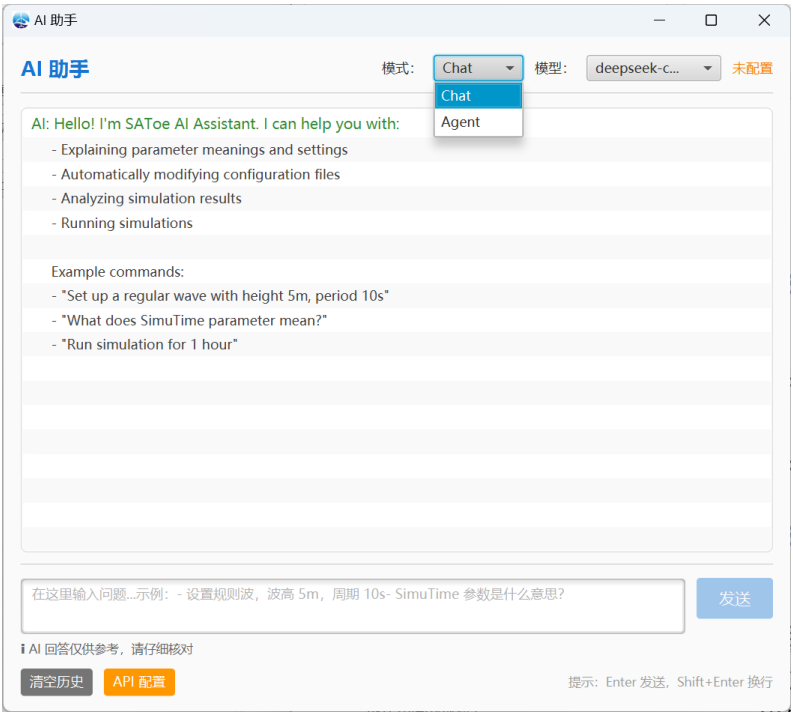


图 AI 助手界面

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。

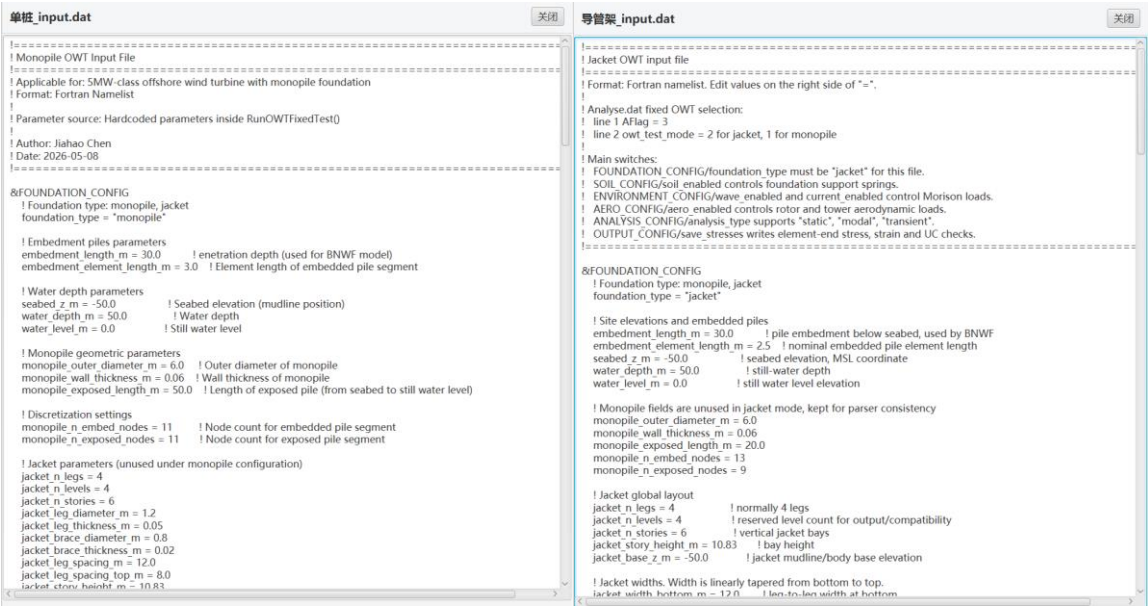


图 单桩与导管架的文本设置格式

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，动画导出与播放速率调节）、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）。

动画文件可选择在 SAToeUI 展示播放，也可在 paraview 展示，固定式风机支持杆件支持应力，内力等云图展示。

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。

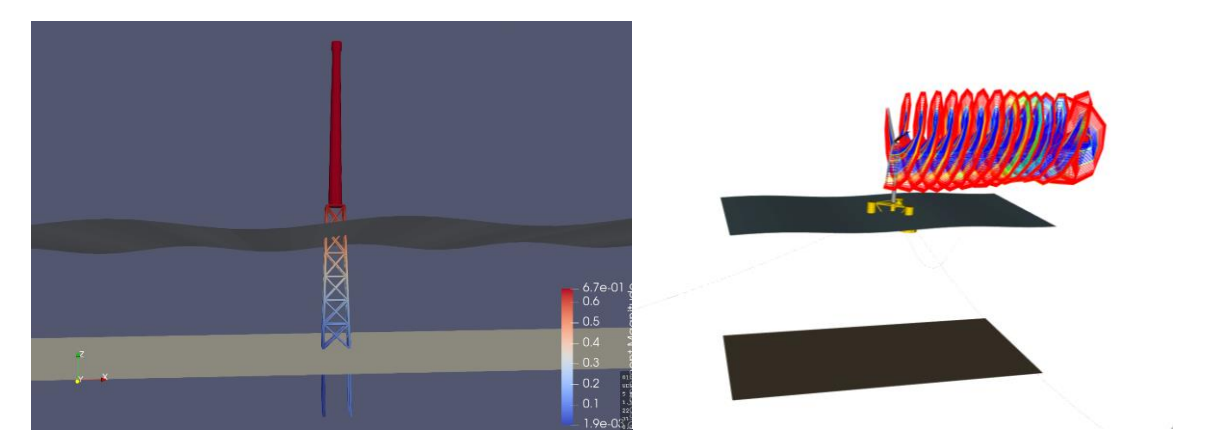


图 三维可视化效果

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	---

5.5.4 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_CtInSp	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
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

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

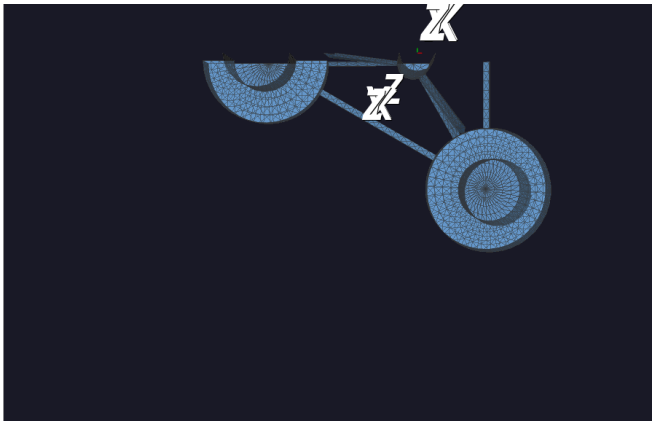


图 模型三维网格查看效果图

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）

- 4. 勾选 "Need to convert mesh from GDF format" 复选框。
- 5. 点击 "Load Default" 加载默认 Settings.ctrl 文件。
- 6. 在文本框中编辑 Settings.ctrl 内容（GDF 文件路径定义在第 3 行）。
- 7. 点击 "Save" 保存 Settings.ctrl。
- 8. 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。

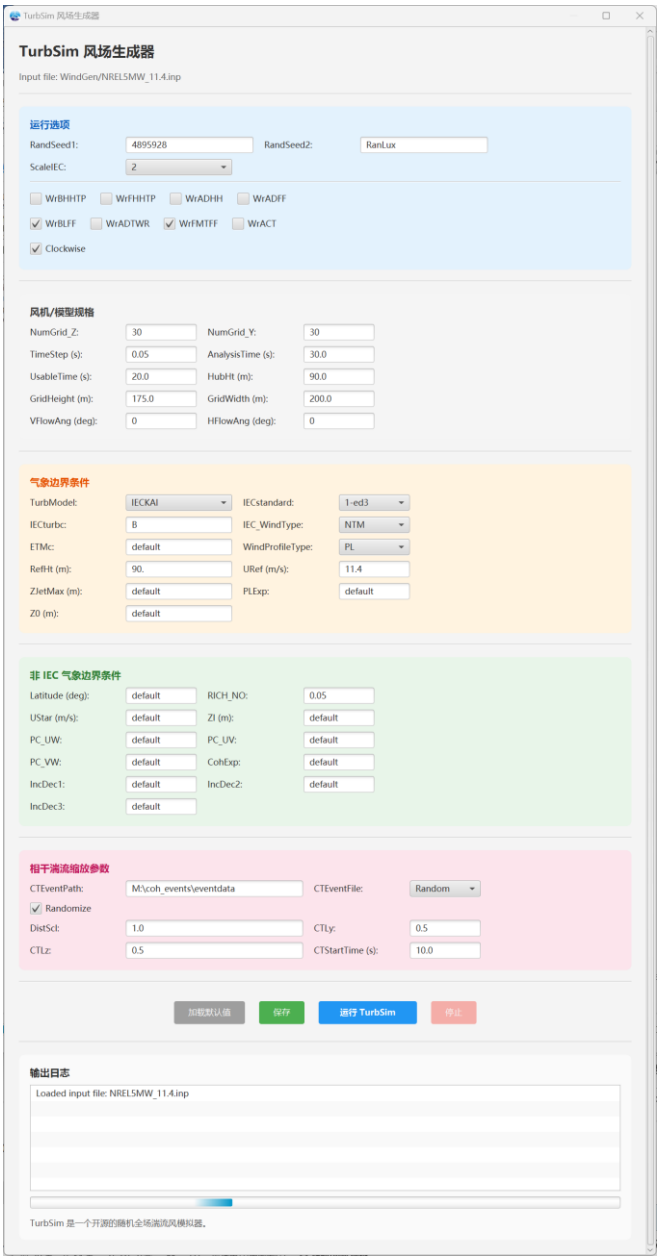


图 WindGen 风场生成器工具输入界面

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。

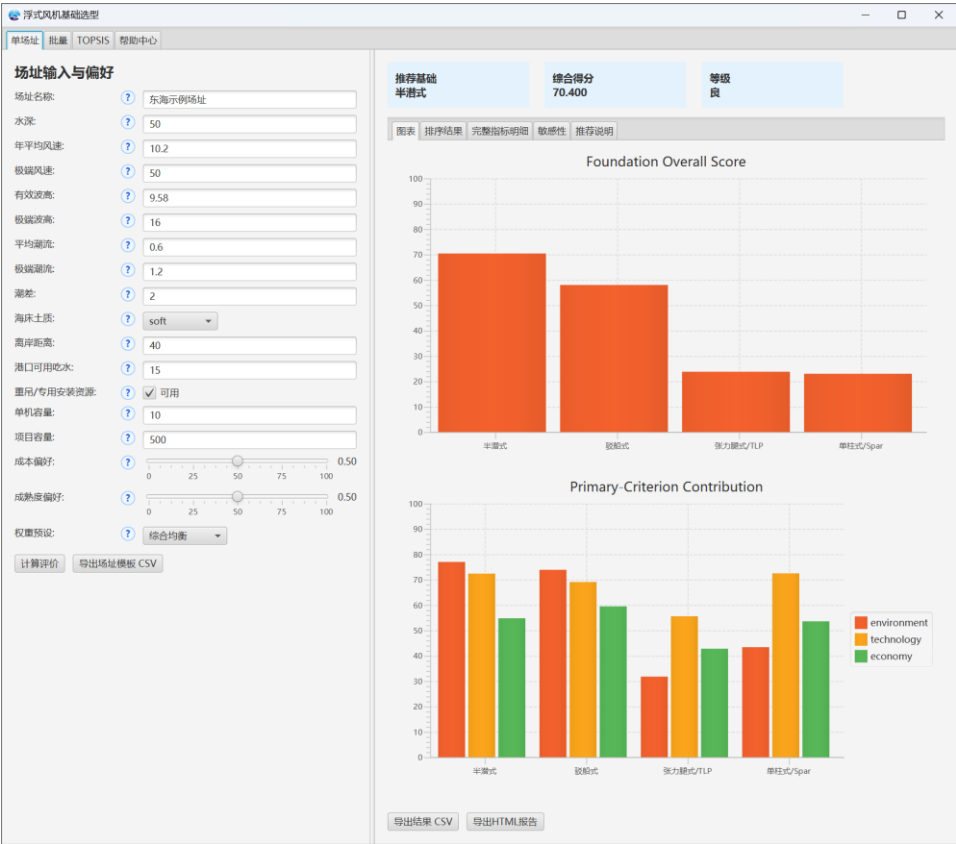


图 浮式风机选型工具输入界面

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。

浮式风机基础选型

单场址 批量 TOPSIS 帮助中心

批量场址输入

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

读取 CSV

运行批量评价

导出模板 CSV

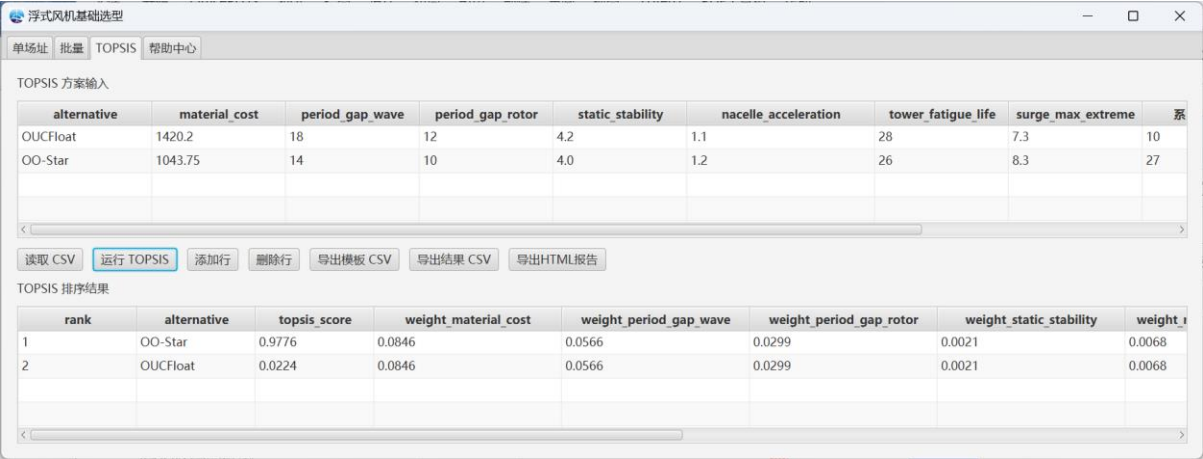
导出结果 CSV

批量计算结果

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。



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



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。

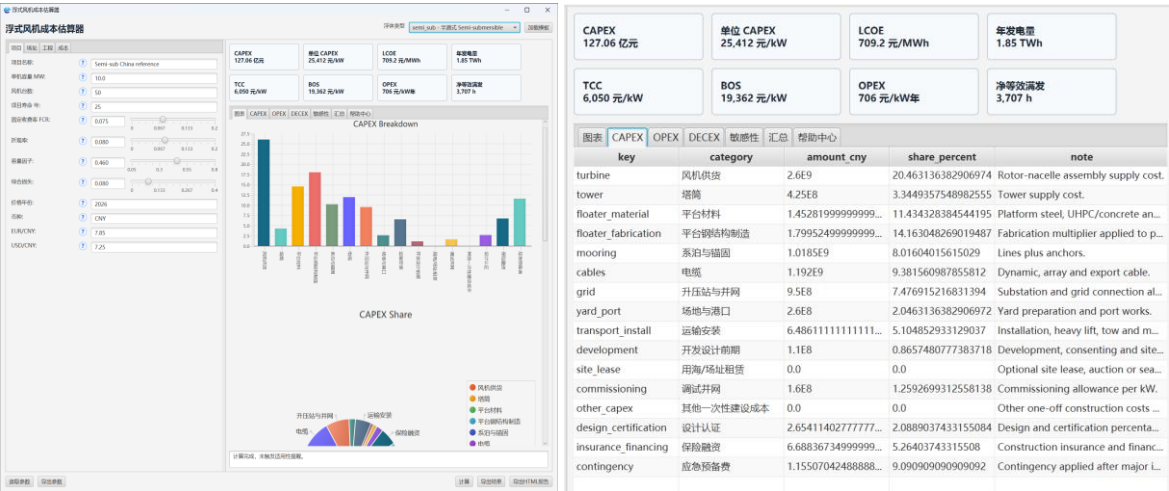


图 浮式风机选型工具输入界面

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

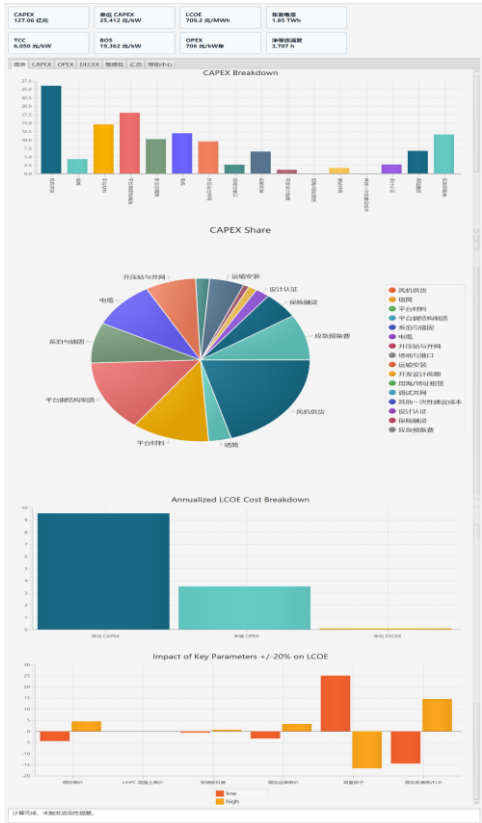
$$LCOE = (\text{年化 CAPEX} + \text{年度 OPEX} + \text{年化 DECEX}) / \text{年发电量}$$

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。



图表	CAPEX	OPEX	DECEX	敏感性	汇总	帮助中心
parameter	case	factor	lcoe.cny.per.mwh	change.percent		
钢材单价	low	0.8	677.8216515083071	-4.4234329599058...		
钢材单价	high	1.2	740.5629431674209	4.4234329599058...		
UHPC混凝土单价	low	0.8	709.192297337864	0.0		
UHPC混凝土单价	high	1.2	709.192297337864	0.0		
安装船日费	low	0.8	704.6646065971712	-0.6384292042776...		
安装船日费	high	1.2	713.7199880785568	0.6384292042776...		
固定运维单价	low	0.8	685.9943965860363	-3.2710311207421...		
固定运维单价	high	1.2	732.3901980896918	3.2710311207421...		
容量因子	low	0.8	886.4903716723298	24.999999999999998		
容量因子	high	1.2	590.9935811148866	-16.6666666666666...		
固定收费率/FCR	low	0.8	606.3734718062185	-14.498017803859...		
固定收费率/FCR	high	1.2	812.011228695094	14.498017803859732		

图表	CAPEX	OPEX	DECEX	敏感性	汇总	帮助中心
metric	value	单位				
project_capacity_mw	500.0	MW				
capex_total	1.27057746737777...	CNY				
capex_per_kw	25411.549347555552	CNY/kW				
tcc_per_kw	6050.0	CNY/kW				
bos_per_kw	19361.549347555552	CNY/kW				
annual_opex	3.53158	CNY/year				
opex_per_kw_year	706.3	CNY/kW-year				
decex_total	2.12177222222222...	CNY				
annual_energy	1853616.0	MWh/year				
net_energy_capture	3707.232	MWh/MW-year				
lcoe	709.192297337864	CNY/MWh				

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

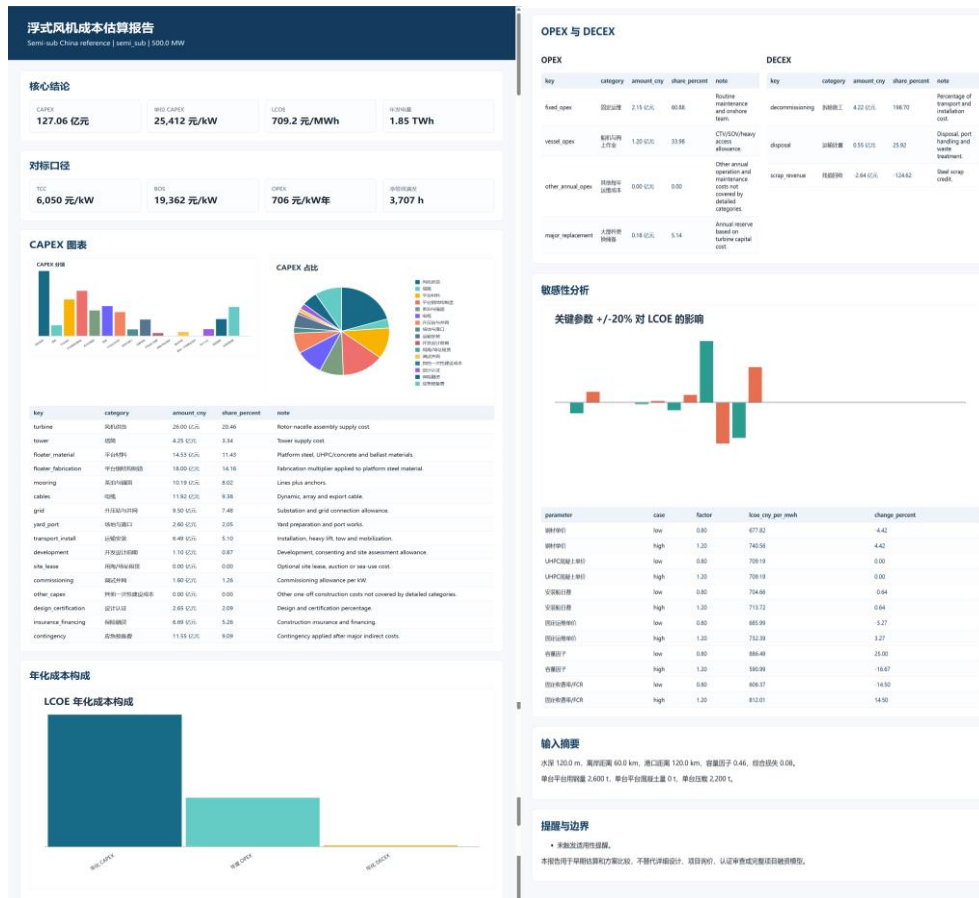


图 自动导出 HTML 结果报告

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。

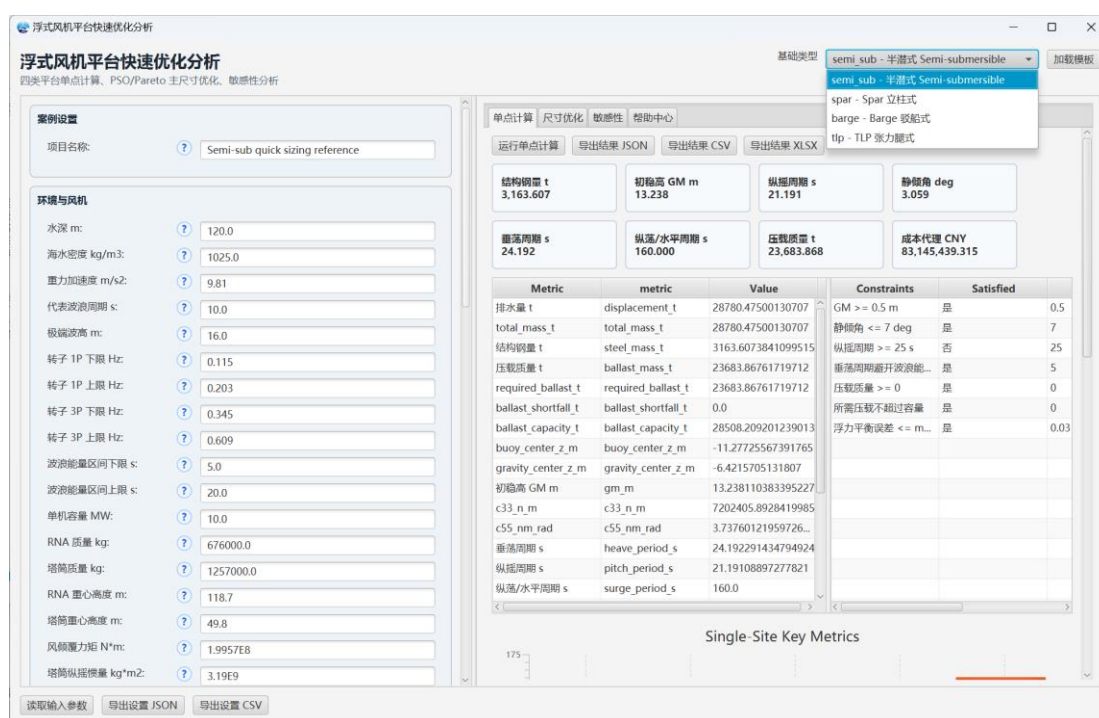


图 浮式风机平台总体优化工具输入界面

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）。

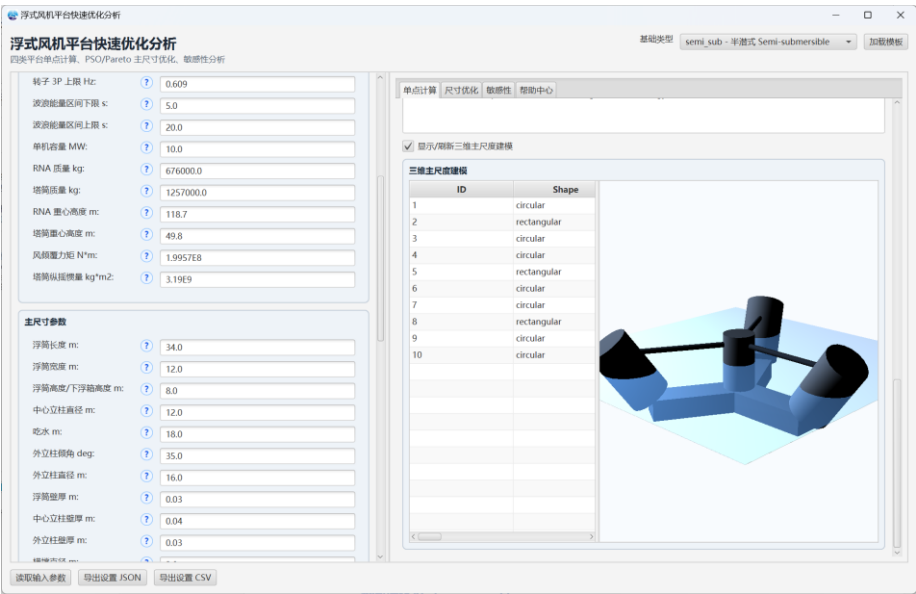


图 优化模型实时显示

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 $\text{base} \times 0.75$ 到 $\text{base} \times 1.25$ 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。

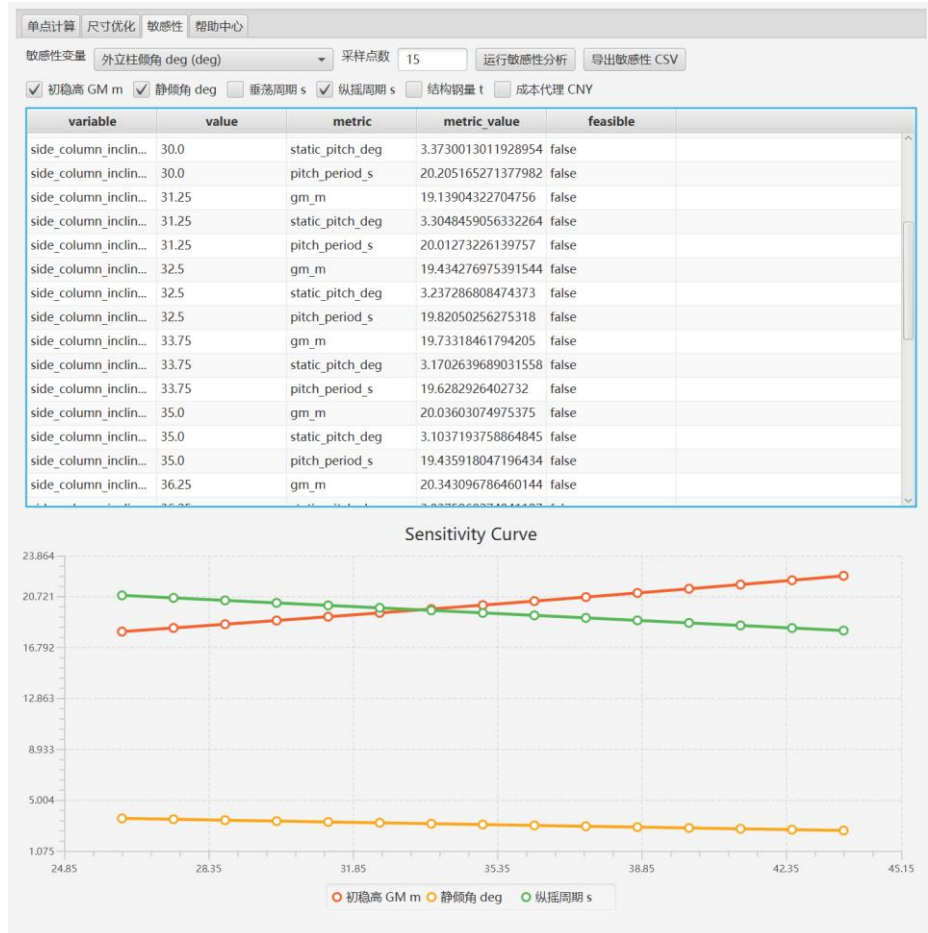


图 敏感性分析

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 $\leq \max(3\%, 150 \text{ t})$

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		可调参数1	可调参数2
☒	GM $\geq$ 0.5 m	0.5	
☒	静倾角 $\leq$ 7 deg	7.0	
☒	纵摇周期 $\geq$ 25 s	25.0	
☒	垂荡周期避开波浪能量区间	5.0	20.0
☒	压载质量 $\geq$ 0	0.0	
☒	所需压载不超过容量	0.0	
☒	浮力平衡误差 $\leq$ max(3%,150t)	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

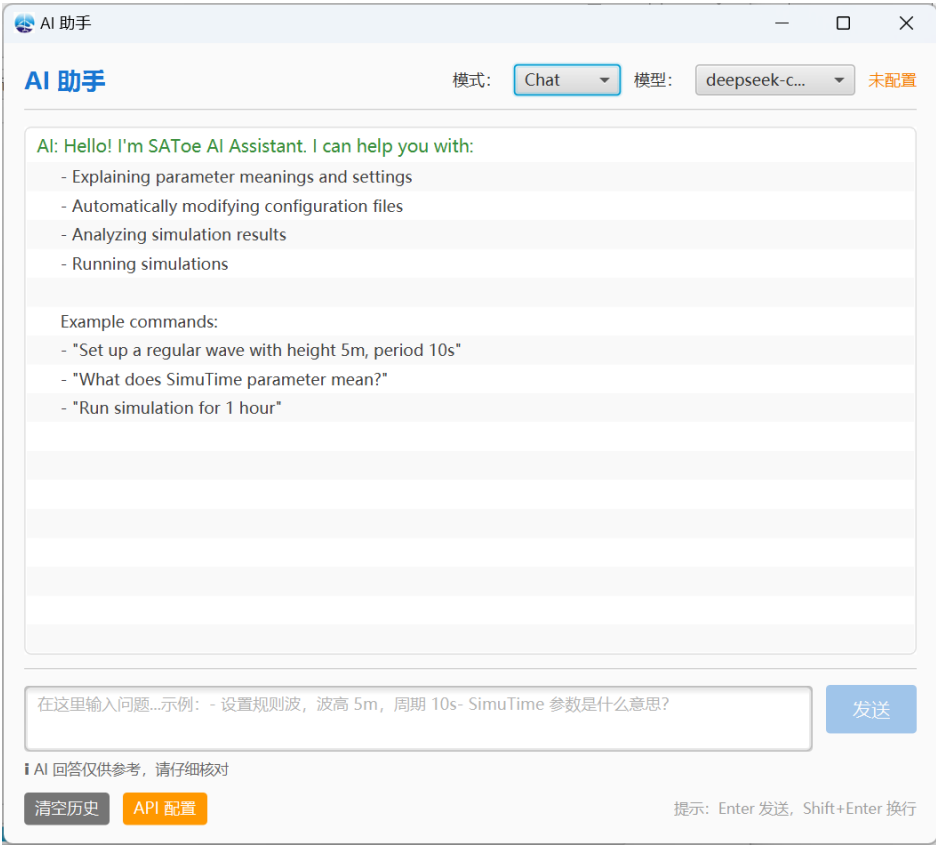
SAToe AI Assistant 是为 SAToe 海上风机仿真软件提供的对话式 AI 助手，帮助用户理解参数含义、自动修改输入文件、运行仿真和分析结果。集成 OpenAI 兼容的 LLM API，通过 Function Calling 机制调用本地工具。

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。



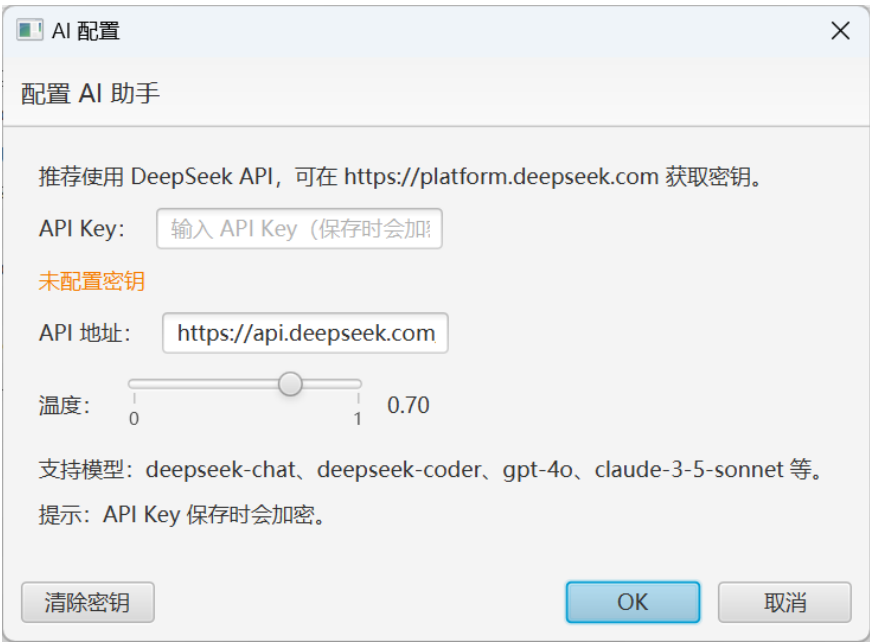
F.3 配置说明

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，主要支持风电场见的单桩基础（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（BNWF）、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，并可输出构件端力、屈服比筛查、疲劳与地震参考量，以及可用于 ParaView 的真实 FEM 三维模型。

注：该模块功能目前处于测试阶段，有待更充分的验证。

G.1 单桩基础（Monopile）设置说明

G.1.1 运行入口与推荐流程

固定式计算首先由 Data\Input\Analyse.dat 选择：

```
AFlag = 3
owt_test_mode = 1      ! 1=monopile（单桩），2=jacket（导管架）
```

- AFlag = 3 进入固定式风机 FEM，不走浮式的 AFlag = 1/2 链路。
- owt_test_mode = 1 读取 Data\Input\FEM\monopile_input.dat; = 2 读取 Data\Input\FEM\jacket_input.dat; = 0 不执行固定式 FEM。

建议按以下顺序推进：

1. 复制并修改对应的 monopile_input.dat 或 jacket_input.dat。
2. 先用 analysis_type="static" 检查几何、支承和静力平衡。
3. 再用 analysis_type="modal" 检查质量、刚度和前几阶频率。
4. 最后使用 analysis_type="transient" 做风浪流、地震或牵索时程。
5. 检查 <case>_engineering_summary.csv、平衡审计、构件端力和 VTP/PVD 等。

G.1.2 输入文件语法规则

主输入是 Fortran NAMELIST：&GROUP_NAME 开始一个分组，单独一行 / 结束。

- 空行可以增加或删除。
- 同一分组内变量顺序通常不影响读取，程序按变量名匹配。
- 变量名必须与源代码中的 NAMELIST 名称完全一致，拼写错误不是可用配置。
- ! 是主 NAMELIST 的注释符，可以放在行首，也可以放在数值或字符串右侧。
- 字符串必须使用引号，例如 wave_model = "jonswap"。
- 逻辑量使用 .TRUE. 或 .FALSE.。
- 数值使用 SI 单位：长度 m，时间 s，力 N，力矩 N·m，质量 kg，应力 Pa，角度输入为 degree。

注： monopile_input.dat 或 jacket_input.dat 以外的表格文件不是 NAMELIST，采用逐行数字或逗号记录格式。外部表格的注释应使用行首第一个字符为 # 或 ! 的整行注释，不要依赖行内注释。数据行的列数、顺序和单位必须保持示例格式。

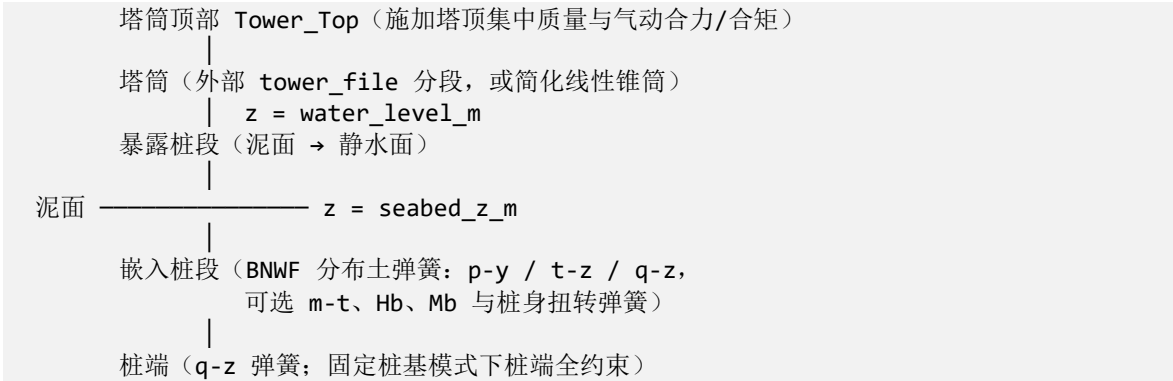
G.1.3 输入文件清单

文件	是否自动读取	作用
monopile_input.dat	是 (owt_test_mode=1)	单桩主 NAMELIST 输入。
jacket_input.dat	仅 owt_test_mode=2	导管架主 NAMELIST 输入。
tower_nrel5mw.dat	是 (tower_file 非空且读取成功时)	塔筒分段外部文件，覆盖简化线性锥筒参数。
soil_profile.dat	是 (soil_input_file 非空且读取成功时)	八列分层土层文件，覆盖内置两层回退值。
member_property_example.dat	否，示例	成员级截面、材料、海生物、充水与 Morison 参数覆盖示例。
soil_model_curve_example.dat	否，示例	土层乘子及 p-y/t-z/m-t/q-z 自定义曲线覆盖示例。
fixed_owt_group_factor_template.dat	否，示例	桩群 p/t/q/mt 深度乘子示例。
fixed_owt_current_profile_example.dat	否，示例	三列海流深度表格示例。
fixed_owt_wave_spectrum_example.dat	否，示例	两列频率与谱密度示例。
fixed_owt_seismic_time_history_example.dat	否，示例	三向地震加速度时程示例。
fixed_owt_seismic_spectrum_example.dat	否，示例	三向反应谱示例。
load_case_example.dat	否，示例	基础荷载工况与线性组合示例。
fixed_owt_fatigue_template.dat	否，示例	S-N 曲线与疲劳成员配置示例。
fixed_owt_fatigue_cases_template.dat	否，示例	多海况年出现时长示例。
fixed_owt_joint_template.dat	否，示例	管节点候选与显式 SCF 示例。
fixed_owt_member_channels_template.dat	否，示例	节点、成员与土弹簧时程通道示例。
tethered_mooring_attachment_example.dat	否，示例	牵索导缆点与 FEM 节点映射示例。
monopile_engineering_template.dat	否，模板	单桩工程化输出与瞬态 VTP 推荐配置片段。
jacket_engineering_template.dat	否，模板	导管架工程化输出与瞬态 VTP 推荐配置片段。
fixed_owt_input_reference.md	否，说明	输入 v2、输出与审计字段简表。

主输入中出现的空外部文件字段表示不启用该覆盖，不是缺少默认文件：

```
soil_model_file = ""
member_property_file = ""
load_case_file = ""
```

G.1.4 结构建模与节点生成



节点生成逻辑 (按当前实现) :

- 塔筒节点: 按塔筒分段高度累加。采用外部塔筒文件时, 分段数由文件数据行数决定; 否则为 `n_segments` 段。塔顶节点名为 `Tower_Top`, 并施加 `TOPLOAD_CONFIG` 的集中质量。
- 嵌入桩段: 仅在 `soil_coupling_mode = "bnwf_distributed"` 时生成。自桩底 $z = seabed_z_m - embedment_length_m$ 向上等间距生成, 与暴露段共用泥面节点。
- 暴露桩段: 自泥面向上等间距生成至 $z = water_level_m$ 。
- 非 BNWF 模式 (`none` / `head_6x6` / `head_6x6_fast`) : 不生成嵌入段, 桩底节点按模式施加 6×6 等效刚度或全约束。
- 所有桩段与塔筒段均为梁单元, 梁理论由 `ANALYSIS_CONFIG / beam_theory_default` 决定。

G.1.5 参数配置详解

1.5.1 FOUNDATION_CONFIG (基础配置)

参数	示例值	说明
foundation_type	"monopile"	基础类型, 必须与所选主输入文件和 <code>owt_test_mode</code> 一致。
embedment_length_m	30.0	桩自泥面向下的埋置长度, m。BNWF 土弹簧的分布范围与入土几何都使用它。
embedment_element_length_m	3.0	入土段目标单元长度, m。导管架按此计算入土段分段数; 单桩当前不使用 (见 G.7.1)。
seabed_z_m	-50.0	泥面 (海床) 全局 Z 坐标, m, 通常为负值。
water_depth_m	50.0	静水深度, m。应与 $water_level_m - seabed_z_m$ 一致。
water_level_m	0.0	固定静水面高程, m。塔筒底部高程和空气阻力露出判定都使用它, 不随波面上下切换。
monopile_outer_diameter_m	6.0	单桩外径, m。

参数	示例值	说明
monopile_wall_thickness_m	0.06	单桩名义壁厚，m。有效壁厚还要扣除 MATERIAL_CONFIG / corrosion_loss_m。
pile_end_condition	"open_unplugged"	桩端状态，见下表。
monopile_exposed_length_m	50.0	泥面以上的暴露段长度，m。
monopile_n_embed_nodes	11	入土段节点数（含端点）
monopile_n_exposed_nodes	11	暴露段节点数（含端点）

pile_end_condition 的取值及其对桩端面积和桩身周长的影响：

取值	桩端面积	桩身侧摩阻周长	适用说明
legacy_gross	毛面积 $\pi D^2/4$	外周长 πD	旧版本兼容字段
open_unplugged	环形面积 $\pi(D^2-D_i^2)/4$	外周长 + 内周长	开口桩且不携带土塞，海上大直径桩常用。
open_plugged	毛面积 $\pi D^2/4$	外周长 + 内周长	开口桩且携带土塞。
closed	毛面积 $\pi D^2/4$	外周长 πD	闭口桩。

提示：pile_end_condition 同时影响桩端承载力面积与桩身侧摩阻周长。工程案例应根据实际桩端施工方式和土塞状态选择，不能仅按名称猜测承载力。

提示：嵌入段单元长度建议取 1~3 倍桩径。土弹簧越密，桩土相互作用的分辨率越高，但 BNWF 非线性迭代的代价也越大。

1.5.2 TOWER_CONFIG (塔筒配置)

参数	示例值	说明
tower_enabled	.TRUE.	是否建立塔筒。关闭时必须确认顶部连接和气动载荷作用点仍符合模型目的。
tower_file	"Data\Input\FEM\tower_nrel5mw.dat"	外部塔筒分段文件。非空且成功读取时，其分段数据覆盖下方的简化线性锥筒参数；严格模式下路径必须存在。
tower_height_m	87.6	无外部塔筒文件时使用的简化塔筒总高，m。
tower_base_height_msl_m	0.0	保留字段。当前固定式链路不使用，塔筒底高程由单桩暴露段顶部决定
n_segments	10	无外部文件时的简化塔筒段数。
diameter_base_m	6.0	简化锥筒底部外径，m。
diameter_top_m	3.75	简化锥筒顶部外径，m。
thickness_base_m	0.035	简化锥筒底部壁厚，m。
thickness_top_m	0.035	简化锥筒顶部壁厚，m。

外部塔筒文件 tower_nrel5mw.dat 的每个数据行是：

```
segment_height_m outer_diameter_m wall_thickness_m
```

- 行高之和决定外部塔筒的离散总高。当前示例共 11 段、合计 77.6 m。

- 使用外部文件时，输入内的 tower_height_m、直径与壁厚锥度是读取失败时的回退定义，不是对外部每行数据的二次修改。
- 外部塔筒的壁厚同样会扣除 corrosion_loss_m；若腐蚀量不小于任一壁厚，外部塔筒读取失败并回退到简化定义。

注：外部塔筒总高、AERO_CONFIG / hub_height_m 与轮毂高应由项目人员一起核对，不能只改其中一个数值。

1.5.3 MATERIAL_CONFIG (材料配置)

参数	示例值	说明
material_name	"Steel"	审计和输出中的材料名称。
young_modulus_pa	210.0E9	弹性模量 E, Pa。
shear_modulus_pa	80.0E9	剪切模量 G, Pa。
density_kg_m3	7850.0	结构材料密度, kg/m ³ , 用于构件质量。
poisson_ratio	0.3	泊松比。
yield_strength_pa	355.0E6	屈服强度, Pa。仅用于屈服比和工程筛查输出，不代表任何规范的允许应力。
corrosion_loss_m	0.0	均匀腐蚀裕量, m。从桩、塔筒和导管架构件的壁厚中扣除，有效壁厚用于结构刚度、应力和参考筛查。必须小于各构件壁厚。

1.5.4 SOIL_CONFIG (桩土配置)

(1) 支承、求解与土弹簧开关

参数	示例值	说明
soil_enabled	.TRUE.	桩土耦合总开关。设为 .FALSE. 可做固定桩基回归，但入土桩几何仍会保留，并对桩端施加全约束。
soil_coupling_mode	"bnwf_distributed"	none / head_6x6 / head_6x6_fast / bnwf_distributed / bnwf_weak_coupling
weak_coupling_iterations	3	弱耦合迭代次数上限。使用 BNWF 时仍应根据收敛记录判断是否足够。
py_model_type	1	p-y 曲线模型：1 = API 砂土，2 = Matlock 黏土。外部曲线覆盖可进一步指定曲线。
soil_input_file	soil_profile.dat"	外部分层土层文件。非空且成功读取时，其层数据优先于内置两层回退定义。
soil_model_file	""	土层乘子与自定义 p-y/t-z/m-t/q-z 曲线覆盖文件
group_factor_file	""	用户指定的桩群 p/t/q/mt 深度乘子文件。未提供时默认乘子为 1，程序不自动生成经验折减。
soil_case_name	"default"	自由审计标签
soil_state_mode	"backbone"	backbone = 骨架响应；hysteretic = 路径相关的 trial / commit 状态链路。应在结果审计中注明。
bnwf_solver_mode	"newton_linesearch"	分布式 BNWF 非线性残差求解与线搜索模式。不要写成 newton 或其他未经验证的别名。

参数	示例值	说明
soil_damping_mode	"radiation_hysteretic"	legacy_mass = 旧质量型阻尼； radiation_hysteretic = 辐射 / 滞回阻尼模式。
enable_distributed_mt	.FALSE.	启用独立分布式 m-t 转动土阻力。它不替代 p-y 力乘力臂形成的弯矩，需有项目标定参数。
enable_base_hb	.FALSE.	启用桩端水平 Hb 弹簧，需要项目标定参数。
enable_base_mb	.FALSE.	启用桩端转动 Mb 弹簧，需要项目标定参数。
enable_shaft_torsion_spring	.FALSE.	启用沿桩身扭转土弹簧。必须与 soil_enabled = .TRUE. 和 bnwf_distributed 一起使用。
scour_depth_m	0.0	冲刷深度，m。会下移有效泥面、删除冲刷段弹簧并重算有效应力和控制体，不只是改水深；必须小于有效埋深。

(2) 内置两层回退土（仅当 soil_input_file 为空或在兼容模式下读取失败时使用）

参数	第一层（砂土）	第二层（黏土）	说明
layerN_depth_m	25.0	50.0	自泥面向下的层底深度，m，必须递增。
layerN_gamma_kn_m3	18.0	17.0	有效重度，kN/m³。
layerN_phi_deg	35.0	0.0	内摩擦角，°（黏土取 0）。
layerN_su_kpa	0.0	100.0	不排水抗剪强度，kPa（砂土取 0）。
layerN_type	1	2	土层类型：1 = 砂土，2 = 黏土。

(3) 外部土层文件 soil_profile.dat 的当前格式为八列：

z0_m z1_m soil_type gamma_kn_m3 phi_deg su_kpa Es_MPa nu

- z0 / z1: 自泥面向下的深度，m； soil_type: sand 或 clay； gamma: 总重度，kN/m³（有效重度 = gamma - 10）； phi: 内摩擦角，°； su: 不排水抗剪强度，kPa； Es: 土的弹性模量，MPa； nu: 泊松比。
- 以 # 开头的行是元数据，支持 water_line = <值>（水面相对泥面的深度；0.0 表示泥面即水面、全淹没剖面）。以 ! 开头的行为说明注释，读取时跳过。
- 深度区间必须覆盖桩的有效埋置段。当前示例为 0–5 m 砂、5–15 m 砂、15–25 m 黏土、25–40 m 黏土、40–60 m 砂。
- 每根导管架桩使用独立土求解状态；

提示：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；外部曲线覆盖可进一步指定任意深度的自定义骨架曲线。

1.5.5 ENVIRONMENT_CONFIG (环境配置)

(1) 总开关

参数	示例值	说明
hydrodynamic_enabled	.TRUE.	固定式水动力总开关。关闭时同时移除 Morison 力、浮力和水动力附加质量；不影响结构自重、气动和独立顶载。
wave_enabled	.TRUE.	在水动力总开关开启时，独立控制波浪运动学。
current_enabled	.TRUE.	独立控制海流运动学。
wind_enabled	.TRUE.	风环境总开关。严格模式下启用气动载荷时必须为真。

(2) 波浪

参数	示例值	说明
wave_height_m	4.0	规则波为波高 H；PM / JONSWAP / 表格模型为显著波高 Hs 目标值，m。
wave_period_s	8.0	规则波周期；不规则波作为峰值周期代理，s。
wave_direction_deg	0.0	波传播方向，0° 为全局 +X。
wave_model	"regular"	regular / pm / jonswap / table / user。pm 与 jonswap 为确定随机相位线性不规则波；table / user 读取外部频谱表。
wave_theory	1	旧兼容字段，保持 1。当前固定式 Morison 路径是线性 Airy 类运动学，2 不是可用的 Stokes 开关。
wave_peak_enhancement	3.3	JONSWAP 峰值增强因子，其他波模型忽略。
wave_frequency_min_hz	0.04	不规则波最低频率，Hz。
wave_frequency_max_hz	1.50	不规则波最高频率，Hz，须大于最低频率。
wave_component_count	64	频率分量数，不规则波至少 2。增加分量会增加计算量。
wave_random_seed	13579	随机相位种子。固定种子可复现实验。
wave_spectrum_file	""	table / user 时必须存在。两列 frequency_hz 与 spectral_density_m2_per_hz，频率正值且严格递增，谱密度非负。

规则波示例：

```

wave_enabled = .TRUE.
wave_model = "regular"
wave_height_m = 4.0
wave_period_s = 8.0
wave_direction_deg = 0.0
wave_theory = 1

```

JONSWAP 不规则波示例：

```

wave_enabled = .TRUE.
wave_model = "jonswap"
wave_height_m = 6.0
wave_period_s = 10.0
wave_peak_enhancement = 3.3
wave_frequency_min_hz = 0.04
wave_frequency_max_hz = 1.50
wave_component_count = 64
wave_random_seed = 13579

```

外部频谱表示例：

```

wave_model = "table"
wave_spectrum_file = "Data\Input\FEM\fixed_owt_wave_spectrum_example.dat"

```

注：同一组不规则波分量用于波面、Morison 波浪运动学、波浪历史和 VTP 水面。当前是单向线性分量模型，不是带方向 spreading 的完整长期海况生成器。

(3) 海流

参数	示例值	说明
current_speed_ms	0.5	近表层或指定参考流速，m/s。
current_direction_deg	0.0	海流方向，0° 为全局 +X。
current_profile_mode	"power"	constant / power / linear / table / user。
current_power_factor	0.1	current_profile_mode = "power" 时的垂向幂指数。
current_profile_file	""	table / user 时必须存在。三列 z_m、speed_m_s、direction_deg；z 可自上而下或自下而上，递减行会自动反转。

注：波流速度在构件积分点叠加，Morison 使用“流体速度 - 结构速度”的相对速度。海流只在 hydrodynamic_enabled = .TRUE. 时参与水动力总载荷。

(4) 风场

参数	示例值	说明
wind_speed_ms	11.4	参考高程风速，m/s，也是固定式气动链路的同源标量基准。
wind_reference_height_m	87.6	wind_speed_ms 对应的参考高程，m。
wind_direction_deg	0.0	入流方向，°。
wind_shear_exponent	0.11	定常幂律风垂向切变指数。
wind_source_mode	"steady"	steady / hub_file / full_field。hub_file 读取 TurbSim .hh 文件；full_field 读取同源 .u / .v / .w 分量文件。
wind_file_hh	""	wind_source_mode = "hub_file" 时必须存在。
wind_file_u / wind_file_v / wind_file_w	""	wind_source_mode = "full_field" 时必须三者同时存在。
air_density_kg_m3	1.225	空气密度，kg/m³。

注：固定式当前要求转子气动、塔筒空气阻力和露出水面构件空气阻力采用同一环境风源。wind_source_mode = "full_field" 时，风场按时间线性插值，并在 TurbSim 可用的 Y / Z 网格上做双线性插值。示例文件位于 Data\Input\WindData (windfield.hh 与 windfield.u / .v / .w) 。AERO_CONFIG / aero_wind_speed_ms 是兼容标量，建议与 wind_speed_ms 相同；严格模式下不应给出冲突值。

(5) Morison、海生物与充水

参数	示例值	说明
cd	1.0	默认拖曳系数。
cm	2.0	默认惯性系数。
ca	1.0	默认附加质量系数。

参数	示例值	说明
marine_growth_thickness_m	0.1	海生物厚度, m, 参与有效外径以及质量 / 浮力相关计算。
marine_growth_density_kg_m3	1500.0	海生物密度, kg/m³。
submerged_members_flooded	.TRUE.	.TRUE. 表示开口或充水构件, 内部水体不被当作封闭排水体; .FALSE. 表示密闭构件假设。

提示: 可用 member_property_file 对单个成员覆盖这些默认值。露出水面判定使用固定 water_level_m, 波峰波谷只改变波浪运动学和波面显示, 不会让同一构件在时域计算中因瞬时波面反复切换空气 / 水下状态。Morison 系数取值应参照 DNV-RP-C205 或 API RP 2A。

1.5.6 AERO_CONFIG (气动配置)

参数	示例值	说明
aero_enabled	.TRUE.	转子 / 机舱气动合力与合矩总开关。
apply_tower_drag	.TRUE.	露出水面塔筒和结构构件空气阻力的独立开关。可以保留转子气动而关闭结构风阻。
aero_structure_motion_coupling	.FALSE.	瞬态中是否用上一步已收敛塔顶运动驱动 hub / 叶素气动。必须配合瞬态与气动开启。
aero_scale_factor	1.0	气动结果整体缩放。
aero_wind_speed_ms	11.4	兼容标量, 应与 ENVIRONMENT_CONFIG / wind_speed_ms 一致。
rotor angular_speed_rpm	12.1	刚性转子自转速度, rpm。
pitch_angle_deg	0.0	集体桨距角, °。
yaw_angle_deg	0.0	转子相对来流的偏航角, °。
azimuth_angle_deg	0.0	初始方位角, °。
rotor_diameter_m	126.0	转子直径, m。
hub_diameter_m	3.0	轮毂几何参考直径, m。
hub_height_m	87.6	轮毂高程或默认气动作用高程, m。应与塔筒顶部和外部塔筒总高核对。
shaft_tilt_deg	5.0	主轴倾角, °。
controller_type	"none"	固定式当前使用 none, 表示不接入活动控制器。
blade_model	"rigid"	固定式当前为刚性叶片近似。

注: 气动合力与合矩通过现有轮毂 / 塔顶力系按 $r \times F$ 规则传递到实际塔顶节点。启用 aero_structure_motion_coupling 后, 使用上一步收敛的塔顶位置、速度和小转角更新 hub / 叶片采样位置和相对风, 再把本步气动载荷作为下一步外载。这是显式松耦合, 不是结构与气动在同一步内的强迭代; 塔顶转角超过线性 FEM 限值时, 严格模式会判定为失败。

1.5.7 TOPLOAD_CONFIG (顶部载荷配置)

参数	示例值	说明
nacelle_mass_kg	240000.0	机舱集中质量, kg。
hub_mass_kg	56780.0	轮毂集中质量, kg。

参数	示例值	说明
n_blades	3	叶片数。
blade_mass_each_kg	17740.0	单片叶片质量, kg。
Fx_n / Fy_n / Fz_n	0.0	全局坐标系下的附加集中力, N。
Mx_nm / My_nm / Mz_nm	0.0	全局坐标系下的附加集中力矩, N·m。
use_aerodynamic_load	.FALSE.	旧气动替代开关。现优先使用 AERO_CONFIG / aero_enabled, 并保持两者逻辑一致。

塔顶集中质量 = 机舱质量 + 轮毂质量 + 叶片数 × 单片叶片质量。默认值为 $240000 + 56780 + 3 \times 17740 = 350000$ kg (对应 NREL 5MW 参考风机)。

注：固定式当前不把顶部真实刚体惯性重新增加为独立 hub 偏置质量。修改顶部质量时必须检查质量清单, 防止机舱、轮毂和叶片质量重复计入。

1.5.8 TETHERED_MOORING_CONFIG (牵索配置, V2.6.8 新增)

参数	示例值	说明
tethered_moorings_enabled	.FALSE.	固定式牵索塔功能总开关, 默认关闭。
tethered_moorings_attachment_file	""	FAIRLEAD, fairlead_id, fem_node_id 映射文件。建议导缆点初始坐标必须与 FEM 节点一致。不一致会以 FEM 节点为准。
tethered_moorings_output_enabled	.TRUE.	是否输出牵索映射、力时程和汇总。

注：首期为松耦合, 复用既有 MooringType = 1 / 4 / 7 准静态方法。每个固定式时步使用已知结构状态更新导缆点, 计算一次锚链力, 把 FMF 三分量直接加到映射的 FEM 节点, 不在本步内重复迭代锚链与结构。节点直接受力, 因此不再额外施加一个 $r \times F$ 力矩。

1.5.9 ANALYSIS_CONFIG (分析配置)

(1) 输入校验与规范参考

参数	示例值	说明
input_schema_version	2	输入模式版本标记。2 启用工程化校验标记。
input_validation_mode	"strict"	strict = 求解前检查并拒绝非法输入; legacy_warn = 兼容旧输入并给出告警。
code_reference_mode	"both"	none / dnv / api_wsd / both。输出 REFERENCE_ONLY 工程筛查指标。

(2) 分析与时间积分

参数	示例值	说明
analysis_type	"transient"	static / modal / transient。
n_modes	5	模态阶数。
transient_dt_s	0.05	时域积分步长, s。应能解析结构和波浪的目标频率。
transient_total_time_s	12.0	总计算时长, s。

参数	示例值	说明
transient_save_interval	1	每多少个积分步保存一次结果，不改变积分步长。
transient_variable_load	.FALSE.	旧的用户顶载时间变化开关。
transient_load_freq_hz	0.0	用户顶载谐波频率，Hz。
transient_start_from_static_eq_uilibrium	.TRUE.	是否从已收敛静力状态开始时域计算，推荐为真。
structural_damping_ratio	0.02	结构 / 模态阻尼比，非负。
damping_frequency1_hz	0.3	Rayleigh 阻尼参考频率 1，Hz。
damping_frequency2_hz	2.0	Rayleigh 阻尼参考频率 2，Hz。

(3) 非线性、二阶与审计

参数	示例值	说明
convergence_tolerance	1.0E-6	非线性 / 迭代收敛判据，必须为正。
max_iterations	100	最大迭代次数，必须大于 0。
use_geometric_stiffness	.FALSE.	旧几何刚度布尔开关。
geometric_stiffness_mode	"none"	none 或 pdelta。pdelta 启用固定式几何刚度路径。
beam_theory_default	"timoshenko"	euler_bernoulli / euler 或 timoshenko。后者包含剪切变形，适合大直径或短粗构件。
prestressed_modal	.FALSE.	是否用静力平衡后的应力刚化状态进行模态参考。
equilibrium_audit_enabled	.TRUE.	是否输出全局力 / 力矩平衡审计。
equilibrium_force_tolerance	1.0E-3	力平衡报告阈值。
equilibrium_moment_tolerance	1.0E-3	力矩平衡报告阈值。

(4) 可选外部配置

参数	示例值	说明
member_property_file	""	成员级覆盖：局部轴、腐蚀、海生物、充水、Cd / Cm / Ca 与可用端部释放。
load_case_file	""	CASE 与 COMB 行式工况文件。含非线性土时，程序先组合荷载再求解。
fatigue_config_file	""	S-N 曲线、成员、端部、纤维、环境区与设计寿命配置。
fatigue_case_file	""	海况年出现时长，用于 Miner 设计寿命汇总。
joint_property_file	""	用户确认的管节点关系和 SCF。未配置时疲劳结果为名义应力。

(5) 地震

参数	示例值	说明
seismic_enabled	.FALSE.	固定式地震输入总开关。
seismic_analysis_mode	"none"	none / time_history / spectrum。
seismic_config_file	""	四列时程或反应谱文件，模式非 none 时必须存在。

参数	示例值	说明
seismic_combination	"srss"	srss / cqc / both, 反应谱模态结果的组合方式。
seismic_scale_factor	1.0	地震输入缩放。
seismic_damping_ratio	0.05	反应谱模态阻尼比, $0 < \zeta < 1$ 。

1.5.10 OUTPUT_CONFIG (输出配置)

参数	示例值	说明
output_directory	"Data\Output"	DAT / CSV 结果根目录。
case_name	"Monopile_OW T"	当前工况输出前缀, 也是 VTP 文件名的前缀。
write_resolved_input	.TRUE.	写出程序实际消费值、外部绝对路径和哈希。
output_profile	"engineering"	basic / engineering / full。engineering 增加紧凑的机器可读摘要。
result_table_format	"dat_csv"	dat = 保留旧 DAT; dat_csv = 增加带表头 CSV。
transient_statistics_enabled	.TRUE.	节点位移极值、峰值时刻、均值、RMS 和标准差。
spectral_summary_enabled	.FALSE.	选定时程通道的频谱摘要 (V2.6.8 新增, 输出链路见 G.7.1)。
output_channel_file	""	选择节点 / 成员 / 土弹簧时程通道。
save_node_history	.FALSE.	选定节点通道。
save_member_history	.FALSE.	选定成员端力和名义应力通道。
save_soil_history	.FALSE.	选定 BNWF 弹簧通道。
save_displacement	.TRUE.	节点位移结果。
save_reactions	.TRUE.	约束和基础反力结果。
save_stresses	.TRUE.	构件端应力、屈服比和工程筛查结果。
save_modal_results	.TRUE.	模态频率、参与系数和有效模态质量。
save_time_history	.TRUE.	固定式时域历史。
save_hydrodynamic_history	.TRUE.	波流和 Morison 合力历史。
save_aero_history	.TRUE.	气动合力、合矩及传递结果历史。
save_wave_history	.TRUE.	波面和参考波浪历史。
plot_z_aspect_cap	1.8	绘图时 Z 方向显示比例限制, 不改变计算。

VTK 输出相关字段:

参数	示例值	说明
vtk_enabled	2	0 = 不输出; 1 = 输出真实 FEM 点线; 2 = 输出由实际 beam / rod 节点和截面生成的管面。
vtk_transient_enabled	.TRUE.	是否按保存时刻输出结构瞬态帧。
vtk_transient_save_interval	20	VTK 帧保存间隔, 单位为积分步。
vtk_deformation_scale	1.0	仅可视化变形倍率, 不改变求解位移。
vtk_field_level	"engineering"	basic = 几何 / 运动场; engineering = 加入端力、应力、屈服比等工程字段。

参数	示例值	说明
vtk_write_pvd	.TRUE.	写 ParaView 时间集合索引。
vtk_output_directory	"Data\Output\3D ModelData\"	VTP / PVD / VTM 输出目录。
vtk_main_structure_file	"Monopile_Tower_Complete"	保留字段。当前固定式 VTP 文件名由 case_name 生成。
vtk_embedded_pile_file	"Monopile_Embdedded_Pile"	同上，保留字段。
vtk_water_surface_file	"Monopile_Water_Surface"	同上，保留字段。
vtk_seabed_surface_file	"Monopile_Seabed_Surface"	同上，保留字段。

建议的 VTK 配置：

```

vtk_enabled = 2
vtk_transient_enabled = .TRUE.
vtk_transient_save_interval = 10
vtk_deformation_scale = 1.0
vtk_field_level = "engineering"
vtk_write_pvd = .TRUE.

```

提示： vtk_transient_save_interval = 10 配合 transient_dt_s = 0.05 时，相当于每 0.5 s 保存一帧；对 8 s 周期波既能得到平滑动画，也不会产生过多输出。

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 Data\Input\FEM\jacket_input.dat，在 Analyse.dat 中选择：

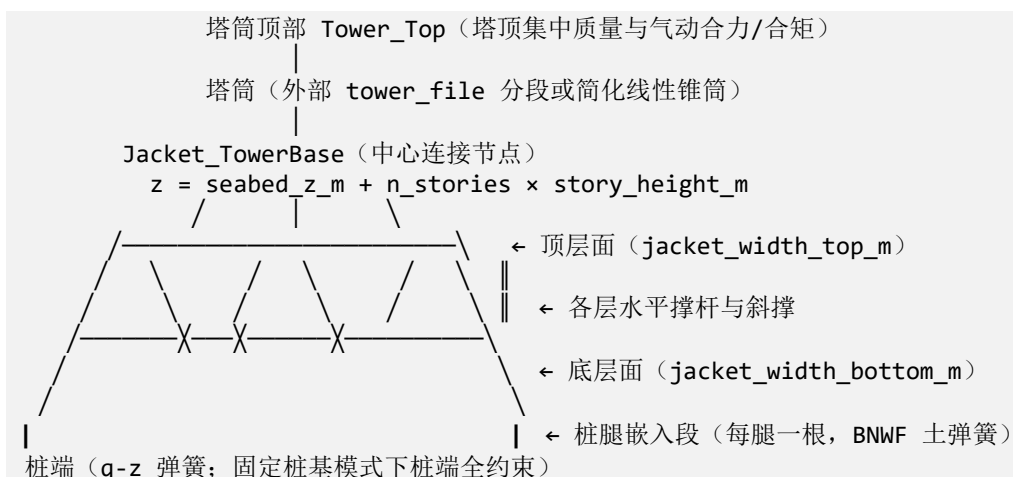
```

AFlag = 3
owt_test_mode = 2      ! 2 = jacket (导管架)

```

主输入中的 FOUNDATION_CONFIG / foundation_type 必须同时为 "jacket"。

G.2.2 结构建模与节点生成



节点生成逻辑：

- 腿柱节点：每腿自泥面 seabed_z_m 起，按 jacket_story_height_m 分层，共 n_stories + 1 个高程层；腿间宽度自 jacket_width_bottom_m 线性渐变到 jacket_width_top_m。
- 腿平面位置按规则多边形布置：4 腿为正方形 ($\pm half, \pm half$)；3 腿为等边三角形；6 腿为正六边形；其他腿数为一般正多边形，半径 = 半宽 $\times 1.414$ 。
- 过渡段：程序在 $z = seabed_z_m + n_stories \times story_height_m$ 处生成一个中心连接节点 Jacket_TowerBase，塔筒自该节点向上。
- 入土桩节点：每根桩自泥面向下，分段数 = $CEILING(embedment_length_m / embedment_element_length_m)$ 。仅在 bnwf_distributed 或关闭土耦合（固定桩基）时生成；head_6x6 类模式不生成入土桩，而在腿底施加等效刚度。关闭土耦合时，仅入土段最后一个节点（桩端）为全约束。
- 撑杆：每层每对相邻腿之间生成一根水平撑；斜撑按 jacket_brace_diagonal_pattern 生成。
- 塔筒节点：与单桩相同，由 tower_file 或简化线性锥筒决定。

注：导管架当前是参数化规则模型，不是通用任意节点 / 构件输入器。若要表达不同腿长、每腿不同土层或局部属性差异，应使用当前已支持的成员覆盖与土层覆盖文件；不能把未实现的拓扑名字当作已支持功能。

G.2.3 参数配置详解

2.3.1 FOUNDATION_CONFIG (导管架基础配置)

场地与桩：

参数	示例值	说明
foundation_type	"jacket"	基础类型，必须为 "jacket"。
embedment_length_m	30.0	每根桩自泥面向下的埋置长度，m，BNWF 土弹簧使用它。
embedment_element_length_m	2.5	入土段目标单元长度，m。实际分段数 = $CEILING(embedment_length_m / 该值)$ 。
pile_end_condition	"open_unplugged"	桩端状态，取值与含义同单桩，见 1.5.1。
seabed_z_m	-50.0	泥面高程，m。
water_depth_m	50.0	静水深度，m。
water_level_m	0.0	静水面高程，m。

总体布局：

参数	示例值	说明
jacket_n_legs	4	腿柱数量，通常 3 或 4；也支持 6 及一般正多边形布置。
jacket_n_stories	6	导管架竖向 bay 数，必须大于 0。
jacket_story_height_m	10.83	每个 bay 的高度，m。

参数	示例值	说明
jacket_base_z_m	-50.0	保留字段。当前导管架主体底部固定取泥面 seabed_z_m，该值不改变模型高程，见 G.7.1。
jacket_width_bottom_m	12.0	底部腿间宽度（腿到腿），m。
jacket_width_top_m	8.0	顶部腿间宽度，m。
jacket_leg_spacing_m	12.0	旧版底部间距兼容字段，通常与 jacket_width_bottom_m 同值。
jacket_leg_spacing_top_m	8.0	旧版顶部间距兼容字段，通常与 jacket_width_top_m 同值。
jacket_n_levels	4	兼容和输出用层数参数，实际 bay 数由 jacket_n_stories 控制。
jacket_n_div	1	兼容的细分控制字段，修改后应检查实际生成的节点数和构件数。

圆管截面：

参数	示例值	说明
jacket_leg_diameter_m	1.2	导管架腿和默认桩腿外径，m。
jacket_leg_thickness_m	0.05	导管架腿和默认桩腿壁厚，m。
jacket_brace_diameter_m	0.8	默认撑杆外径，m。
jacket_brace_thickness_m	0.02	默认撑杆壁厚，m。

撑杆配置：

参数	示例值	说明
jacket_brace_member_type	"beam"	beam = 具有完整梁端力；rod = 仅轴向的撑杆模型。
jacket_brace_diagonal_pattern	"face_x"	face_single / face_x / face_cross / plan_cross / legacy / cross，见下表。
jacket_use_x_braces	.TRUE.	是否生成所选斜撑布置。设为 .FALSE. 时不生成任何对角撑。

斜撑布置	含义	生成数量
face_single	每个相邻腿面、每个层间生成一根斜撑。	$n_stories \times n_legs$
face_x / face_cross	每个相邻腿面、每个层间生成两根交叉斜撑，即传统立面 X 布置。	$2 \times n_stories \times n_legs$
plan_cross / legacy / cross	对向腿平面斜撑，保留旧语义，不等同于立面 X。	偶数腿： $n_stories \times (n_legs / 2)$ ； 奇数腿： 不生成

提示：导管架宽度从底部到顶部线性渐变（底宽 > 顶宽），可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 与 jacket_story_height_m 需配合使用，确保 $n_stories \times story_height$ 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

导管架的 TOWER_CONFIG 、 MATERIAL_CONFIG 、 SOIL_CONFIG 、 ENVIRONMENT_CONFIG 、 AERO_CONFIG 、 TOPLOAD_CONFIG 、 TETHERED_MOORING_CONFIG、ANALYSIS_CONFIG 和 OUTPUT_CONFIG 的参数定义与单桩基础相同，详见 G.1.5。

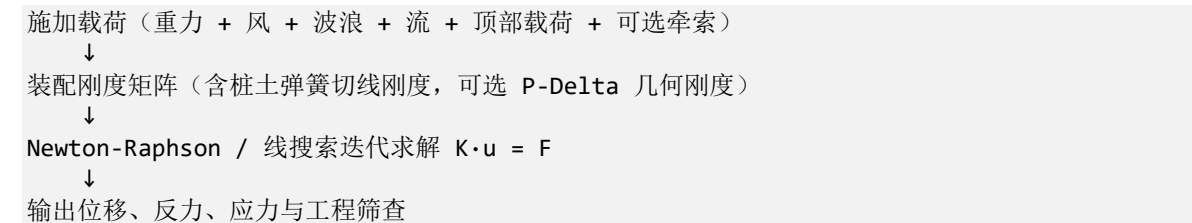
注：导管架的桩土配置与单桩基础共用同一套 BNWF 模型。每条腿柱的入土段均分布 p-y / t-z 弹簧，桩端连接 q-z 弹簧；土层参数配置方式与单桩完全一致。

2.3.3 导管架特有的输出默认值

参数	示例值	说明
case_name	"Jacket_OWT"	工况标识名，也是 VTP 文件名前缀。
vtk_main_structure_file	"Jacket_Tower_Complete"	保留字段，实际 VTP 文件名见 G.4.2。
vtk_embedded_pile_file	"Jacket_Embedded_Pile"	保留字段。
vtk_water_surface_file	"Jacket_Water_Surface"	保留字段。
vtk_seabed_surface_file	"Jacket_Seabed_Surface"	保留字段。

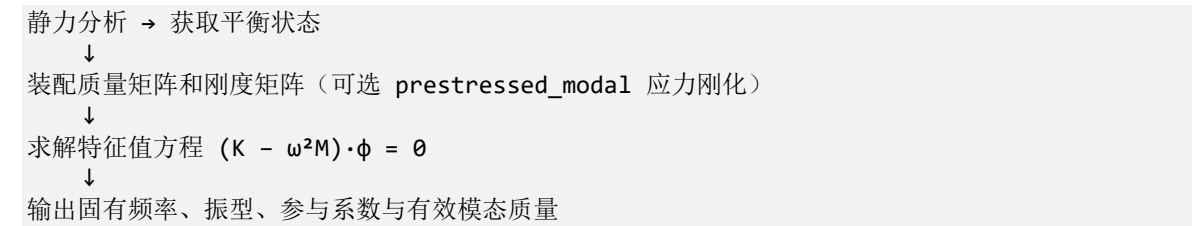
G.3 分析类型与工作流程

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，以及作为瞬态分析的初始平衡状态。

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、地震反应谱分析的输入。

注：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。开启 prestressed_modal 时保留静力应力刚化效应；关闭时会在求解前移除几何刚度。

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

初始化 ($t = 0$)：施加初始载荷（推荐从已收敛静力状态开始）



适用场景：极端波浪工况动力响应分析、疲劳分析载荷输入、地震时程分析和牵索塔时程。

G.3.4 时间步长选择建议

- 波浪主导： Δt 建议取 $T_p / 50 \sim T_p / 100$ 。例如峰值周期 8 s 时， $\Delta t = 0.05 \sim 0.1$ s。
- 结构主导： Δt 建议不大于所关注最高阶模态周期 T_{min} 的 1/10。
- 开启 aero_structure_motion_coupling、m-t / Hb / Mb 弹簧或强非线性土时，应进一步减小步长，并检查每步的收敛记录。
- 默认值 0.05 s 适用于大多数海上风机工况；transient_save_interval 只影响保存密度，不改变积分步长。

G.3.5 荷载、组装与计算原理

(1) 结构与质量

程序将参数化单桩、导管架、入土桩、塔筒和 beam / rod 组装为三维 FEM 模型。梁采用 Euler-Bernoulli 或 Timoshenko 选项，rod 为轴向构件。构件质量来自有效截面、材料密度、海生物和充水设置；顶部机舱、轮毂和叶片质量作为集中质量加入塔顶质量矩阵。

(2) 水动力

Morison 在构件积分点计算。流体速度为波浪与海流叠加，结构速度从 FEM 变形状态取值，拖曳项使用相对速度，惯性项使用流体加速度。积分点载荷再按梁形函数一致转移到节点，并输出合力、关于全局原点的合矩和虚功审计。水下构件外径应来自实际截面和海生物覆层，不能用钢材实心面积反推水动力直径。

(3) 风机气动与结构风阻

转子气动先计算整体六分量，再按实际塔顶节点位置使用 $r \times F$ 规则传递。apply_tower_drag 只控制露出水面塔筒和结构构件的空气阻力，空气阻力的露出判定使用固定静水面。启用塔顶运动-气动显式耦合时，上一时刻已收敛塔顶状态驱动 hub 和叶素位置与速度，当前气动载荷用于下一步结构积分。

(4) BNWF 桩土耦合

分布式 BNWF 沿每根桩的深度建立独立弹簧点，计算 $p-y$ 、 $t-z/q-z$ ，以及可选的 $m-t$ 、 H_b 、 M_b 和扭转土弹簧。非线性迭代使用残差和切线，trial 状态在步内试算，收敛后 commit；失败重试不会污染已提交的循环土状态。 $m-t$ 是独立分布转动阻力，不能再次把 $p-y$ 的力臂弯矩重复累加。

(5) 地震

地震时程对结构施加三向基底惯性项。反应谱模式使用已求得的模态和参与因子，做 SRSS 或 CQC 参考组合。两种结果都应标为 REFERENCE_ONLY，工程设计仍需按项目采用的规范和经批准的输入谱复核。

G.4 结果输出与解释

G.4.1 结果文件列表

分析完成后，DAT / CSV 结果保存在 output_directory 指定的目录下，文件名前缀为 case_name。下表中 <case> 表示 case_name（例如 Monopile_OWT）。

文件	内容	触发条件
<case>_displacements.dat	节点位移	save_displacement = .TRUE.
<case>_reactions.dat	约束与基础反力	save_reactions = .TRUE.
<case>_stress_yield_ratio.dat	构件端应力、应变、屈服比与工程筛查量	save_stresses = .TRUE.
<case>_modal.dat	固有频率、振型、参与系数与有效模态质量	save_modal_results = .TRUE.
<case>_time_history.dat	塔顶位移 / 载荷时程	save_time_history = .TRUE.
<case>_hydrodynamic_history.dat	波流与 Morison 合力时程	save_hydrodynamic_history = .TRUE.
<case>_aero_history.dat	气动合力、合矩与传递结果时程	save_aero_history = .TRUE.
<case>_wave_history.dat	参考波面高程与波浪时程	save_wave_history = .TRUE.
<case>_member_end_forces.dat	构件端部 $N / V_y / V_z / T / M_y / M_z$	工程输出级别
<case>_soil_reactions.dat	BNWF 反力、切线刚度与动员率	土耦合开启
<case>_environment_history.csv	轮毂处波浪、海流、风速与地震加速度	工程输出级别
<case>_aero_motion_history.csv	塔顶运动-气动耦合状态	aero_structure_motion_coupling = .TRUE.
<case>_seismic_history.dat	三向地震响应时程	seismic_analysis_mode = "time_history"
<case>_seismic_spectrum.csv	SRSS / CQC 反应谱参考结果	seismic_analysis_mode = "spectrum"
<case>_engineering_summary.csv	塔顶位移、总质量、力 / 力矩平衡残差、最大土动员率与控制桩 / 深度	output_profile ≠ basic 或 result_table_format = dat_csv

文件	内容	触发条件
<case>_transient_node_statistics.csv	节点平动位移的最小值、最大值、绝对峰值、峰值时刻、均值、RMS、标准差	transient_statistics_enabled = .TRUE.
<case>_code_reference.csv	REFERENCE_ONLY 构件筛查指标 (API WSD、DNV 弹性参考、欧拉柱参考)	code_reference_mode ≠ none
<case>_resolved_input.dat	程序实际消费的关键输入值、外部绝对路径与哈希	write_resolved_input = .TRUE.
<case>_analysis_manifest.csv	解析后的固定式选项、引用文件、模型元数据哈希与收敛状态	工程输出级别
<case>_joint_candidates.csv	多构件管节点候选、弦杆直径比与 NEEDS_PROJECT_CONFIRMATION 状态	启用疲劳或 SCF 输入
<case>_member_history.csv <case>_member_envelope.csv <case>_fatigue_cycles.csv <case>_fatigue_damage.csv <case>_fatigue_life_summary.csv	成员时程、包络、雨流计数、Miner 损伤与设计寿命汇总	fatigue_config_file 非空
<case>_tethered_mooring_mapping.csv <case>_tethered_mooring_history.csv <case>_tethered_mooring_summary.csv	牵索映射、力时程与汇总	tethered_mooring_enabled = .TRUE.
<case>_load_envelope.dat	荷载包络	load_case_file 非空

注：V2.6.6 中的 <case>_displacement.dat 与 <case>_stress_uc.dat 在 V2.6.8 中已分别更名为 <case>_displacements.dat 与 <case>_stress_yield_ratio.dat，引用旧文件名的后处理脚本需同步修改。

G.4.2 VTK 可视化文件

VTP / PVD / VTM 文件保存在 vtk_output_directory 指定的目录下，可用 ParaView 等工具打开。

文件	内容	触发条件
<case>_Structure_Initial.vtp	初始真实 FEM 网格	vtk_enabled ≥ 1
<case>_Structure.tN.vtp	第 N 个保存时刻的结构帧	vtk_enabled ≥ 1 且 vtk_transient_enabled
<case>_Structure_Water_Initial.vtp <case>_Structure_Water.tN.vtp	随时间起伏的水面网格	vtk_enabled ≥ 1
<case>_Structure_Seabed.vtp	海床面网格	vtk_enabled ≥ 1
<case>_Structure.pvd	ParaView 时间集合索引	vtk_write_pvd = .TRUE.
<case>_Structure_Scene.tN.vtm	多 block 场景 (Structure / WaterSurface / Seabed)	vtk_write_pvd = .TRUE.

文件	内容	触发条件
<case>_Structure_Mooring_Initial.vtp <case>_Structure_Mooring.tN.vtp	牵索几何	tethered_mooring_enabled = .TRUE.

VTK 输出模式说明:

- `vtk_enabled = 0`: 不输出任何固定式 VTP 文件。
- `vtk_enabled = 1`: 输出装配后的 FEM 梁 / 杆中心线。PointData 含节点 ID、原坐标、位移、速度和加速度; CellData 含构件 ID、类型与可用端力。
- `vtk_enabled = 2`: 为每个装配好的梁 / 杆构件按变形后端节点和有效圆截面生成真实圆管外表面。CellData 含所属构件 ID、类型、外径、有效壁厚、端力、极纤维应力、屈服比、土中状态以及疲劳 / SCF 状态。

注: 模式 2 的 Structure block 已经是实际管面, 不需要在 ParaView 中再套 Tube filter。

`vtk_deformation_scale` 与 `plot_z_aspect_cap` 只影响显示, 不改变求解位移; PVD 只按真实时间索引多个 VTP / VTM 文件, 不负责着色; VTP / VTM / PVD 的文件名由 OUTPUT_CONFIG / case_name 加固定后缀生成, 不使用 `vtk_main_structure_file` 等四个文件名参数, 见 G.7.1。

G.4.3 屈服比与工程筛查

当 `save_stresses = .TRUE.` 时, `<case>_stress_yield_ratio.dat` 对每个构件端输出轴向应变、轴力 N、My、Mz、扭矩 T、最大 / 最小纤维应力、最大主应力和 von Mises 应力, 以及下列筛查量:

量	定义	说明
yield_stress_ratio	$\text{von_mises} / \text{yield_strength}$	名义应力屈服比, 主筛查指标。
axial_bending_screen	轴力 + 弯矩组合筛查比	非规范工程筛查量, 用于快速定位控制构件。
euler_screen	轴力 / 欧拉临界荷载参考值	欧拉柱稳定参考比。
D_over_t	外径 / 有效壁厚	径厚比, 用于局部屈曲敏感性判断。

建议的判读方式:

yield_stress_ratio	判读建议
< 0.6	一般可接受, 可作为正常使用与极端工况的常规筛查结果。
0.6 ~ 1.0	需复核载荷组合、有效壁厚、腐蚀裕量、局部屈曲与节点连接。
> 1.0	名义应力已超过屈服强度, 必须复核; 此时线性弹性模型已不适用。

注: 上述比值是工程筛查参考, 不是任何规范的 UC 或合规判定。规范参考比另见 `<case>_code_reference.csv`, 其中 API 依据 API RP 2A-WSD (第 22 版, 2014)、DNV 依据 DNV-ST-0126 与 DNV-RP-C202 给出参考公式标识与参考比, 统一标记 REFERENCE_ONLY。

G.4.4 审计与追溯文件

- <case>_resolved_input.dat 记录程序实际消费的关键输入值、外部文件的绝对路径与哈希，是核对“我以为的输入”和“程序实际使用的输入”的第一手依据。
- <case>_analysis_manifest.csv 记录解析后的固定式选项、引用文件、模型元数据哈希与收敛状态。
- <case>_engineering_summary.csv 中的 equilibrium_force_residual 与 equilibrium_moment_residual 是力 / 力矩平衡残差，maximum_soil_mobilization 与 critical_soil_pile / critical_soil_depth 指出土弹簧动员率最高的桩号和深度。

注：数值意义上的小残差只说明该次求解在平衡意义上完成，不能单凭残差证明模型输入和设计工况一定合理。每次正式计算都应保存 resolved input、输入文件哈希、单位制、梁理论、土模型、桩端状态和收敛状态。

G.5 可选高级功能

G.5.1 荷载工况与组合

load_case_file 使用行式记录：

```
CASE,case_id,component,scale
COMB,combination_id,case_id,factor
```

component 可为 gravity、buoyancy、aero、hydro 或 top。示例：

```
CASE,DEAD,gravity,1.0
CASE,BUOY,buoyancy,1.0
CASE,WIND,aero,1.0
CASE,WAVE,hydro,1.0
CASE,TOP,top,1.0
COMB,SERVICE_POS,DEAD,1.0
COMB,SERVICE_POS,BUOY,1.0
COMB,SERVICE_POS,WIND,1.0
COMB,SERVICE_POS,WAVE,1.0
COMB,SERVICE_NEG,WIND,-1.0
COMB,SERVICE_NEG,WAVE,-1.0
```

注：线性组合仅表示先组合荷载再求解。含非线性土时，禁止把多个单工况的位移、土反力或损伤结果直接相加。

提示：把基础模型定义放在主输入、把成组工况放在覆盖文件，可在同一套结构、土层与环境模型上快速跑多个 ULS / SLS / 极端风浪方向组合，并保留控制工况的可追溯记录。

G.5.2 疲劳参考

fatigue_config_file 使用 DEFAULT 与 MEMBER 行：

```
DEFAULT,design_life_years,curve_id,environment,thickness_mm,log10_a,m
MEMBER,member_type,member_id,end_id,curve_id,environment,thickness_mm,log10_a,m
```

fatigue_case_file 用于多海况年出现时长聚合：

```
CASE,case_name,annual_hours
```

- end_id = 0 选择构件两端；fiber 为 1~16 的周向名义应力纤维编号。

- 首期使用构件端力和 16 个周向名义应力纤维；轴力和双向弯矩进入 S-N 与 Miner。剪力和扭矩会输出，但当前不作为多轴疲劳损伤处理。
 - joint_property_file 中的显式 SCF 在用户确认的构件端与纤维上施加，结果标记为 EXPLICIT_SCF / HOTSPOT_STRESS；未配置时标记为 NOMINAL_STRESS_ONLY。
 - 未指定 S-N 曲线时的默认曲线标记为 DEFAULT_ASSUMPTION。
 - 生成的 <case>_joint_candidates.csv 只是几何辅助清单，不是自动 SCF 指派。
- 注：**全部疲劳输出为 REFERENCE_ONLY，不能替代经批准的 SACS、Sesam、DNV 或 API 工程复核。

G.5.3 地震输入

时程文件格式：

```
time_s  acceleration_x_m_s2  acceleration_y_m_s2  acceleration_z_m_s2
```

反应谱文件格式：

```
period_s  Sa_x_m_s2  Sa_y_m_s2  Sa_z_m_s2
```

配置方式：

```
seismic_enabled = .TRUE.
seismic_analysis_mode = "time_history"    ! 或 "spectrum"
seismic_config_file = "Data\Input\FEM\fixed_owt_seismic_time_history_example.dat"
seismic_combination = "srss"              ! srss | cqc | both
seismic_scale_factor = 1.0
seismic_damping_ratio = 0.05
```

- 时程按时间线性插值，并在固定式瞬态中以 $-M \cdot r \cdot ag(t)$ 的形式加入基底激励，与风、波、流在同一载荷组装流程中叠加。
- 反应谱模式使用固定式模态周期、参与因子和质量信息，对每个方向插值 $S_a(T)$ ，并按 SRSS 或 CQC 组合。

注：地震输出明确标记为 REFERENCE_ONLY，可作为工程响应参考和交叉校核。

G.5.4 牵索塔

牵索塔参数见 1.5.8。映射文件格式为：

```
FAIRLEAD, fairlead_id, fem_node_id
```

注：MooringData 中的导缆点初始坐标建议与映射到的 FEM 节点坐标一致，否则程序会默认用 FEM 节点坐标覆盖 MooringData 中的导缆点初始坐标。当前支持 MooringType = 1 / 4 / 7 的准静态方法和 3/6 动态方法（锚链方法继承浮式风机，见 5.5.4），工程时程结果应视为首期松耦合近似。

G.5.5 成员与土层覆盖文件

(1) soil_model_file: 土层乘子与自定义骨架曲线

```
LAYER, layer_id, property_name, value
CURVE, curve_type, target_depth_m, abscissa, response
```

- `curve_type` 可为 PY、TZ、MT、QZ。曲线横轴 / 纵轴单位分别为：PY 位移 m / 抗力 kN/m；TZ 位移 m / 侧摩阻应力 kPa；MT 转角 rad / 分布弯矩 kN·m/m；QZ 位移 m / 桩端应力 kPa。
- 曲线点必须非负，并在正支上单调。保留同一份 `soil_profile.dat`、只替换某个勘察解释版本或校准版本，便于审计“基础资料”与“计算假设”的差别。

(2) `member_property_file`: 成员级覆盖，共 12 列

`member E(Pa) G(Pa) rho(kg/m3) OD(m) t(m) Cd Cm Ca growth(m) flooded(0/1)`

- 第一列可用成员名或数字单元 ID，未改动的列填 -1。
- 适合表达导管架腿、撑杆、过渡段、桩与塔筒采用不同 `Cd / Cm / Ca`、不同腐蚀裕量、海生物厚度、充水状态的情形。

(3) `group_factor_file`: 桩群深度乘子，共 7 列

`GROUP_FACTOR,pile_id,depth_m,p_factor,t_factor,q_factor,mt_factor`

- `pile_id = 0` 表示对所有桩生效。每根桩的深度序列必须单调不减。
- 省略该文件时所有乘子为 1.0，程序不会自动生成经验性的群桩折减。

G.6 使用建议与注意事项

G.6.1 参数选择建议

项目	建议
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，具体取决于地勘情况。
桩径选择	单桩直径通常为 5~8 m（具体取决于风机功率），需考虑水深、载荷大小与施工能力。
壁厚选择	需满足结构强度和屈曲稳定性要求，通常 40~80 mm（具体取决于直径大小和受力状况）；并应明确腐蚀裕量 <code>corrosion_loss_m</code> 。
网格密度	入土段一般 10~15 个节点、暴露段和塔筒 8~12 个节点；土弹簧过密会显著增加 BNWF 迭代代价。
时间步长	瞬态分析建议 0.02~0.05 s，并同时满足波浪周期与最高阶模态周期的解析要求。
腐蚀与海生物	腐蚀裕量与海生物厚度应同时给出：前者削减结构有效壁厚，后者增加水动力外径与质量。
冲刷	存在冲刷时应设置 <code>scour_depth_m</code> ，并复核冲刷后的有效埋深与桩端状态。

G.6.2 桩土模型选择

通过 `SOIL_CONFIG / soil_coupling_mode` 选择：

类型	解释	适用场景	注意事项
<code>none</code>	不考虑桩土相互作用，桩端全约束。	初步估算、刚性地基假设、结构回归测试。	入土桩几何仍会保留，仅对各桩桩端施加全约束，因此仍包含入土段的结构柔度。

类型	解释	适用场景	注意事项
head_6x6	等效 6×6 桩头刚度矩阵。	结构整体分析、简化桩土模型。	不生成入土段单元，等效刚度施加在腿底或桩头。
head_6x6_fast	简化 6×6 桩头刚度，计算更快。	参数化研究、快速迭代。	同上，刚度来源需项目确认。
bnwf_distributed	沿桩身分布非线性弹簧（完整 BNWF）。	精细桩土分析、设计验算、循环载荷。	计算量最大；应关注收敛记录、土动员率与平衡残差。
bnwf_weak_coupling	FEM ↔ PileSoil 交替求解的弱耦合迭代。	强非线性工况。	需结合 weak_coupling_iterations 判断是否收敛。

G.6.3 常见问题排查

问题	可能原因	处理建议
计算不收敛	时间步长过大、载荷过大或土弹簧强非线性。	减小 transient_dt_s，增大 max_iterations，先用 static 检查平衡，再分段开启 m-t / Hb / Mb 等强非线性项。
桩土反力异常	土层参数不合理或分层深度有间隙。	检查 soil_profile.dat 的深度区间是否连续并覆盖有效埋置段；核对有效重度（= 总重度 - 10）与 su / phi 的取值。
频率结果异常	质量矩阵或边界条件错误。	检查塔顶质量是否重复计入、桩端约束模式是否符合预期、prestressed_modal 与几何刚度设置是否一致。
VTK 文件无法打开	输出路径含特殊字符或目录不存在。	确保 vtk_output_directory 为已存在的英文路径；确认 vtk_enabled 大于 0。
VTP 文件名与预期不符	使用了 vtk_main_structure_file 等字段预期命名。	当前固定式 VTP 名由 case_name 加固定后缀生成，见 G.4.2 与 G.7.1。
屈服比过大	截面尺寸不足、腐蚀裕量偏大或载荷偏大。	增大壁厚或减小环境载荷；同时复核 D/t 与局部屈曲敏感性以及节点连接。
横向位移 unexpected	空间耦合、气动合矩或撑杆刚度。	按 G.6.3 的顺序逐项拆分验证。
改了节点数参数没效果	单桩网格参数当前不参与划分。	见 G.7.1；以终端打印的 dz_embed / dz_exposed 为准。
气动被自动关闭	wind_enabled = .FALSE. 或耦合设置冲突。	严格模式会直接报错；兼容模式会告警并同时关闭转子气动与结构风阻，应显式开启 wind_enabled。

G.6.4 严格模式检查清单

推荐新版工程输入使用：

```
input_schema_version = 2
input_validation_mode = "strict"
write_resolved_input = .TRUE.
```

严格模式会在求解前检查或拒绝：

- 无效的分析类型、波浪模型、海流模式、风源、梁理论、输出级别和规范参考模式。
- 缺失的塔筒、土层、波谱、海流、风场、地震、疲劳或通道文件。
- 负壁厚、壁厚不小于半径、非法桩长、冲刷后无有效埋置。
- 气动与风源冲突、运动-气动耦合与静力分析冲突。
- `vtk_enabled` 与 VTK 参数冲突。
- 需要疲劳曲线但未配置曲线，或需要 SCF 却没有疲劳配置。
- 可识别的重复构件、孤立节点、非法释放、局部轴或高程不连续问题。

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.