



团体标准

T/CEATEC XXX—2025

大型海上风电一体化数值仿真设计软件技术规范

Technical specification for integrated numerical simulation design software
of large-scale offshore wind power

2025-X-XX 发布

2025-X-XX 实施

中国欧洲经济技术合作协会 发布

目 次

前言	II
1 范围	3
2 规范性引用文件	3
3 术语和定义	4
4 符号和缩略语	5
5 总体要求	5
5.1 软件定位	5
5.2 技术路线	6
5.3 性能目标	6
6 功能要求	6
6.1 多物理场仿真模块	6
6.2 数字化设计模块	7
6.3 数据管理与可视化	8
7 性能要求	8
7.1 计算效率	8
7.2 精度要求	9
7.3 扩展性要求	9
8 数据管理规范	10
8.1 数据格式	10
9 验证与确认 (V&V)	11
9.1 验证方法	11
9.2 确认方法	12
10 文档要求	12
10.1 用户文档	12
10.2 开发文档	13
参考文献	15

前言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出并归口。

本文件主要起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次编制。

大型海上风电一体化数值仿真设计软件技术规范

1 范围

本文件规定了大型海上风电一体化数值仿真设计软件的符号和缩略语、总体要求、功能要求、性能要求、数据管理规范、验证与确认、文档要求。

本文件适用于海上风电场规划、设计、施工及运维阶段的数值仿真软件系统。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 22239 信息安全技术 网络安全等级保护基本要求

GB/T 35273 信息安全技术 个人信息安全规范

ISO 8601-1 日期和时间—信息交换表示—第1部分：基本规则（Date and time — Representations for information interchange — Part 1: Basic rules）

ISO 10303-1 工业自动化系统与集成—产品数据表示与交换—第1部分：概述和基本原则（Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 1: Overview and fundamental principles）

ISO 14306 工业自动化系统与集成—用于三维可视化的JT文件格式规范（Industrial automation systems and integration — JT file format specification for 3D visualization）

ISO 19115-1 地理信息—元数据—第1部分：基础（Geographic information — Metadata — Part 1: Fundamentals）

ISO/IEC 27001 信息安全、网络安全与隐私保护—信息安全管理体系—要求（Information security, cybersecurity and privacy protection — Information security management systems — Requirements）

ISO/IEC 27017 信息技术—安全技术—基于ISO/IEC 27002的云服务信息安全控制实践规范（Information technology — Security techniques — Code of practice for information security controls based on ISO/IEC 27002 for cloud services）

ISO/IEC 27018 信息安全、网络安全与隐私保护—公共云作为PII处理方时个人可识别信息（PII）保护指南（Information security, cybersecurity and privacy protection — Guidelines for protection of personally identifiable information (PII) in public clouds acting as PII processors）

IEC 61400-1 风力发电机组 第1部分：设计要求（Wind energy generation systems — Part 1: Design requirements）

IEC 61400-3-1 风力发电机组 第3-1部分：海上风力发电机组设计要求（Wind energy generation systems — Part 3-1: Design requirements for fixed offshore wind turbines）

IEC 61400-3-2 风力发电机组 第3-2部分：浮式海上风力发电机组设计要求（Wind energy generation systems – Part 3-2: Design requirements for floating offshore wind turbines）

IEC 61400-15-1 风力发电机组 第15-1部分：场址评估（Wind energy generation systems – Part 15-1: Site suitability input conditions for wind power plants）

IEC TS 61400-26-4 风力发电机组 第26-4部分：可靠性评估（Wind energy generation systems – Part 26-4: Reliability for wind energy generation systems）

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

一体化仿真 integrated simulation

集成多物理场（流体动力学、结构力学、电磁学等）、多尺度（微观材料到宏观系统）的联合仿真技术，实现气动-水动-结构-控制（Aero-Hydro-Servo-Elastic, AHSE）全耦合分析。

3.2

数字孪生 digital twin

通过数值模型、传感器更新、运行历史等数据，实时映射海上风电场物理实体的虚拟模型，实现全生命周期的动态仿真与优化。

3.3

多物理场耦合 multi-physics coupling

同时考虑空气动力学、水动力学、结构动力学、土壤力学、控制系统等多个物理场之间的相互作用和反馈机制。

3.4

设计载荷工况 design load cases (DLCs)

根据 IEC 标准定义的用于确定风力发电机组极限载荷和疲劳载荷的标准化载荷组合工况。

3.5

验证与确认 verification and validation (V&V)

验证（Verification）：确定计算模型是否正确实现了数学模型的过程。确认（Validation）：评估计算模型是否准确表征真实物理世界的过程。

3.6

不确定性量化 uncertainty quantification (UQ)

系统性地识别、表征和传播模型输入、参数和数值方法中的不确定性，评估其对仿真结果的影响。

3.7

代理模型 surrogate model

基于有限的高保真仿真数据，构建的快速近似模型，用于替代计算成本高昂的原始仿真模型，实现快速预测和优化。

4 符号和缩略语

下列符号和缩略语适用于本文件：

- a) AHSE: Aero-Hydro-Servo-Elastic（气动-水动-伺服-弹性）；
- b) AEP: Annual Energy Production（年发电量）；
- c) BEM: Blade Element Momentum（叶素-动量理论）；
- d) CFD: Computational Fluid Dynamics（计算流体力学）；
- e) DLC: Design Load Case（设计载荷工况）；
- f) FEA: Finite Element Analysis（有限元分析）；
- g) FSI: Fluid-Structure Interaction（流固耦合）；
- h) GCI: Grid Convergence Index（网格收敛指数）；
- i) HPC: High Performance Computing（高性能计算）；
- j) LCOE: Levelized Cost of Energy（平准化度电成本）；
- k) LES: Large Eddy Simulation（大涡模拟）；
- l) MMS: Method of Manufactured Solutions（制造解方法）；
- m) RAO: Response Amplitude Operator（响应幅值算子）；
- n) RANS: Reynolds-Averaged Navier-Stokes（雷诺平均纳维-斯托克斯）；
- o) SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition（数据采集与监控系统）；
- p) SSI: Soil-Structure Interaction（土壤-结构相互作用）；
- q) UQ: Uncertainty Quantification（不确定性量化）；
- r) V&V: Verification and Validation（验证与确认）；
- s) VAWT: Vertical Axis Wind Turbine（垂直轴风力发电机）；
- t) WRF: Weather Research and Forecasting（天气研究与预报模型）。

5 总体要求

5.1 软件定位

本软件系统应定位为大型海上风电项目全生命周期一体化仿真平台，具备以下核心能力：

a) 全生命周期覆盖：支持海上风电场从前期规划、详细设计、施工安装到运营维护的完整生命周期仿真分析，包括场址选择、资源评估、微观选址、机组选型、基础设计、电气系统设计、施工方案模拟、运维策略优化等全部环节；

b) 多学科耦合仿真：实现气动-水动-结构-土壤-控制系统（Aero-Hydro-Servo-Elastic-Soil）的全耦合分析能力，支持单向耦合、双向耦合和强耦合等多种耦合方式，耦合时间步长可调，最小支持 0.001 秒级别的瞬态耦合；

c) 极端工况模拟：具备台风（最大风速 70m/s，阵风系数 1.4-1.6）、地震（峰值地面加速度 0.5g）、海冰（压缩强度 2-5MPa）、极端海况（有义波高 20m，最大波高 35m）等极端环境条件的仿真能力，支持多种极端工况的组合分析；

d) 数字孪生支持：提供实时数据同化接口，支持 SCADA 系统数据接入（采样率 $\geq 1\text{Hz}$ ），实现物理-数字模型的动态校准，模型更新频率可达分钟级别，支持基于机器学习的状态预测和故障诊断。

5.2 技术路线

软件系统应采用以下技术路线：

a) 模块化架构设计：应采用模块化架构设计，各功能模块独立运行且可灵活替换。模块间通过标准化接口进行通信，支持功能的动态扩展和按需加载，并具备完善的版本兼容性管理机制；

b) 开放式求解器集成：应具备开放的求解器集成能力，能够统一管理和调度多种类型的求解器，并提供标准化接口支持第三方求解器接入。系统应支持本地、集群和云端等多种计算环境，实现不同学科求解器的协同工作；

c) 工程建模要求：应支持标准化的系统建模方法，实现从需求到设计再到仿真的全过程模型追溯。应具备模型版本管理、变更控制以及一致性验证功能，支持多学科、多尺度的复杂系统建模。

d) 计算性能要求：应具备高性能计算能力，支持分布式并行、多线程并行以及异构计算加速等技术。应根据计算任务特点自适应分配计算资源，满足大规模数值仿真和优化计算需求。

5.3 性能目标

软件系统应达到以下性能指标：

a) 计算效率提升：应显著提升计算效率，在大规模风电场仿真场景下，计算速度应达到工程实用水平。通过并行计算、代理模型、GPU 加速等技术手段，实现计算效率的数量级提升，满足工程设计迭代和实时分析需求；

b) 仿真精度要求：仿真结果应达到工程精度要求，包括载荷预测、疲劳寿命评估、功率性能计算、尾流损失分析、动态响应预测等关键指标，均应满足行业标准和工程验收要求，并能够与实测数据良好吻合；

c) 模型规模支持：应支持从单机到整场、从部件到系统的多尺度建模分析，能够处理大规模有限元模型和流场网格，支持长时间序列的动态仿真，覆盖全频段的振动分析，满足大型海上风电场的整体仿真需求。

6 功能要求

6.1 多物理场仿真模块

6.1.1 风资源评估

风资源评估模块应具备以下功能：

a) 系统应支持多尺度嵌套的气象模拟能力，具备适用于海上边界层的模拟方案，支持不同时间分辨率和长期历史回算。应能够融合多源再分析数据，并支持现场观测数据的同化修正；

b) 应提供高精度的微尺度 CFD 模拟能力，支持多种湍流模型和大气稳定度修正方法，能够考虑复杂地形和环境因素的影响；

c) 应具备完整的尾流模拟与分析功能，支持多种工程尾流模型和 CFD 方法，能够进行尾流优化控制；

d) 应支持极值风速分析和长期统计分析，提供符合国际标准的风速分级评估能力。

6.1.2 水动力分析

水动力分析模块应包含：

a) 应支持多种波浪理论，能够根据不同海况条件选择合适的波浪模型；

b) 应具备 Morison 方程和修正方法的完整实现，支持各类海洋结构物的载荷计算；

c) 应提供势流理论分析能力，支持大尺度浮式基础的水动力分析；

d) 应支持流固耦合计算，提供不同耦合强度的分析选项。

6.1.3 结构力学分析

结构力学分析功能应包括：

a) 应提供完整的有限元建模能力，支持多种单元类型和自适应网格技术；

b) 应支持多种材料本构模型，包括金属、复合材料、混凝土等海上风电常用材料；

c) 应具备全面的动力学分析功能，包括模态分析、动力响应分析和随机振动分析；

d) 应提供疲劳损伤评估功能，支持相关设计标准和规范要求的疲劳分析方法。

6.1.4 系统耦合分析应实现：

a) 气动弹性耦合分析能力：应支持叶片弹性变形与气动载荷的实时耦合计算；应能模拟风机控制系统（变桨、偏航、扭矩控制）与气动力的相互作用；应具备塔架-叶片动力学相互作用分析功能；应支持气动阻尼和气动失稳现象的评估；

b) 水弹性耦合分析能力：应支持波浪载荷与结构动力响应的耦合分析；应能考虑自由液面效应和非线性波浪作用；应具备海底边界条件的处理能力；应支持系泊系统与浮式基础的耦合动力分析；应能计算二阶波浪效应；

c) 土壤-结构相互作用分析能力：应支持桩基-土壤的非线性相互作用分析；应提供多种土壤本构模型和边界条件；应能考虑循环载荷对土壤特性的影响；应具备冲刷效应的评估能力；应支持群桩效应分析；

d) 控制系统耦合仿真能力：应支持完整的风机控制策略仿真；应能与结构动力学模型实时耦合；应提供控制系统性能评估功能；应支持用户自定义控制算法接入；应具备故障工况下的控制响应模拟。

6.2 数字化设计模块

6.2.1 参数化建模

参数化建模功能应包括：

a) 风机主要部件的几何参数化建模：应支持叶片翼型、弦长、扭角等关键参数的定义和修改；应提供塔筒、轮毂、机舱等部件的参数化建模；应支持基础结构（单桩、导管架、浮式平台）的参数化设计；应能处理部件间的装配关系和约束；应支持参数驱动的几何更新；

b) 载荷条件的参数化定义：应支持风载荷参数（风速、风向、湍流度、风剪切）的灵活定义；应提供波浪和海流载荷的参数化输入；应支持运行工况和极端工况的批量定义；应能考虑载荷的时空分布特性；应提供载荷组合工况的管理功能；

c) 完整的材料参数库：应提供海上风电常用材料的标准参数库；应支持用户自定义材料属性；应包含材料的力学、疲劳和环境退化特性；应支持复合材料的层合结构定义；应提供材料属性的温度和时间依赖性设置；

d) 参数敏感性分析功能：应支持局部和全局敏感性分析方法；应能识别对系统性能影响显著的关键参数；应提供参数相关性分析；应支持多目标的敏感性评估；应具备敏感性结果的可视化展示。

6.2.2 优化设计

优化设计功能应提供：

a) 多种优化算法集成：应提供梯度类优化算法用于连续变量优化；应集成智能优化算法处理离散和混合变量问题；应支持多目标优化的 Pareto 解集求解；应提供混合优化策略以平衡效率和精度；应支持并行计算加速优化过程；

b) 优化目标定义：应支持成本目标（投资成本、运维成本、度电成本）的优化；应提供性能目标（发电量、容量系数、可利用率）的定义；应支持结构目标（重量、强度、刚度、频率）的优化；应能定义可靠性和安全性相关目标；应允许多目标的权重设置和平衡；

c) 约束条件处理：应支持相关设计规范和标准的约束要求；应提供几何尺寸和空间限制的约束定义；应考虑制造、运输和安装的可行性约束；应包含环境影响和社会接受度约束；应支持用户自定义约束条件；

d) 代理模型优化方法：应提供多种代理模型构建方法；应支持自适应采样策略提高模型精度；应具备代理模型精度评估功能；应支持多精度模型的协同优化；应提供代理模型的更新和管理机制。

6.3 数据管理与可视化

6.3.1 数据库管理

数据库管理功能包括：

a) 海量时序数据管理：应支持数据的实时采集和存储；应提供高效的数据压缩和索引机制；应支持多维度数据的快速查询和检索；应具备数据质量控制和清洗功能；应支持长期历史数据的归档管理；

b) 模型和仿真数据支持：应兼容主流 CAD 和 CAE 软件格式；应支持仿真结果的结构化存储；应提供模型版本控制和比较功能；应支持大规模网格和结果文件的处理；应具备元数据管理和检索能力；

c) 项目数据组织管理：应提供分层的项目结构管理；应支持工况和方案的批量管理；应具备数据关联和追溯功能；应提供团队协作和权限管理；应支持项目模板和知识复用；

6.3.2 结果可视化

可视化功能应提供：

a) 三维可视化能力：应支持大规模模型的实时渲染；应提供多种物理场的云图显示；应支持动画演示和时程回放；应具备剖切和透明显示功能；

b) 数据分析图表：应提供时域和频域分析图表；应支持统计分析和分布展示；应具备多变量相关性分析；应提供对比分析和趋势展示；应支持交互式数据探索；

c) 报告生成功能：应支持可定制的报告模板；应提供自动化报告生成流程；应支持多种输出格式；应具备图表和数据的自动提取；应满足认证和审查要求；

d) 远程协同可视化：应支持基于 Web 的远程访问；应提供移动设备的适配方案；应支持多用户协同浏览和标注；应具备云端渲染和流媒体传输；应保证数据传输的安全性。

7 性能要求

7.1 计算效率

7.1.1 并行计算能力

并行计算能力要求如下：

a) 分布式并行：应支持大规模分布式并行计算，在千核级规模下保持高并行效率和良好扩展性；

b) 共享内存并行：应支持灵活可配置的多线程并行计算，线程计算效率应满足工程应用需求；

c) 硬件加速：应支持主流硬件加速设备，满足高性能浮点运算和数据吞吐量需求；

d) 混合并行：应支持多级混合并行计算模式，具备负载均衡和任务调度能力。

7.1.2 求解器性能

求解器性能要求如下：

a) 流体求解器：应支持高效的隐式和显式求解方案，计算收敛速度应满足工程应用需求；

b) 结构求解器：应采用高效的数值求解算法，支持多种加速技术和求解策略；

c) 时域仿真：应支持变步长时间积分，满足长时程仿真的计算效率要求。

7.1.3 内存管理

内存管理要求如下：

a) 内存使用：应实现高效的内存分配和管理策略，控制峰值内存占用在合理范围内；

b) 数据访问优化：应优化数据访问模式，提高缓存利用率，支持向量化计算；

c) 大规模数据处理：应支持超出内存容量的问题求解，实现高效的数据分块和并行读写。

7.2 精度要求

7.2.1 气动仿真精度

气动仿真精度要求如下：

a) 功率曲线：与实测偏差 $<3\%$ （年平均），分档误差 $<5\%$ （ 0.5m/s 间隔），不确定性范围 $\pm 2\%$ （95%置信度）；

b) 推力系数：误差 $<5\%$ （ 0.1 精度），动态失速模型精度 $\pm 10\%$ ；

c) 尾流预测：速度亏损 $\pm 8\%$ （ $3D-10D$ 范围），湍流强度 $\pm 15\%$ ，尾流偏移 $\pm 0.5D$ 。

7.2.2 水动力精度

水动力精度要求如下：

a) 波浪力：一阶波浪力误差 $<5\%$ ，二阶波浪力误差 $<10\%$ ，极值载荷误差 $<15\%$ ；

b) 运动响应： RAO 误差 $<10\%$ （ $0.05-0.3\text{Hz}$ ），相位误差 $<10^\circ$ ，非线性响应误差 $<20\%$ 。

7.2.3 结构响应精度

结构响应精度要求如下：

a) 静态变形：误差 $<3\%$ （与 FEA 基准对比），应力集中系数 $\pm 5\%$ ；

b) 动态响应：固有频率 $\pm 2\%$ ，振型 $MAC > 0.95$ ，动态放大因子 $\pm 10\%$ ；

c) 疲劳损伤：等效载荷误差 $<10\%$ ，损伤累积误差 $<15\%$ ，寿命预测 $\pm 20\%$ 。

7.2.4 极限载荷精度

极限载荷精度要求如下：

a) 极限强度：特征值误差 $<10\%$ ，95%分位数误差 $<10\%$ ，设计载荷保守度 $5-15\%$ ；

b) 极端响应：50 年一遇响应 $\pm 15\%$ ，100 年一遇响应 $\pm 20\%$ 。

7.3 扩展性要求

7.3.2 功能扩展性

功能扩展性要求如下：

a) 扩展接口：应提供标准化的应用程序接口（API）和软件开发工具包（SDK），支持功能模块的动态加载、版本管理和依赖关系处理，提供完善的接口文档和开发指南，支持第三方开发者生态系统建设；

b) 用户定制：应支持用户自定义控制策略、材料本构、失效准则、载荷模型和边界条件。

7.3.3 部署扩展性

部署扩展性要求如下：

a) 本地部署：应支持在单机工作站、小型计算服务器、部门级集群到企业级高性能计算中心的灵活部署，自动识别硬件配置并优化计算资源利用，支持异构计算环境和不同操作系统平台；

b) 云端部署：应支持主流公有云平台部署、企业私有云环境搭建、混合云架构的灵活配置，实现计算资源的动态分配、自动扩缩容和负载均衡，支持多租户隔离和资源配额管理；

c) 架构灵活性：应支持容器化部署实现环境一致性和快速部署，微服务架构实现功能模块解耦和独立升级，支持分布式计算框架和边缘计算场景，提供高可用性和容错机制。

7.3.4 数据扩展性

数据扩展性要求如下：

a) 存储能力：应支持 TB 到 PB 级海量数据存储需求，兼容本地文件系统；

b) 应支持实时数据流处理满足在线监测需求、批量数据处理。

8 数据管理规范

8.1 数据格式

8.1.1 几何模型格式

几何模型格式包括：

a) CAD 格式兼容：应支持主流 CAD 软件的原生格式和中性格式导入导出，保持几何拓扑完整性、装配关系、参数化信息和设计意图，支持大型装配体的轻量化加载和特征识别，确保不同 CAD 系统间的数据交换准确性；

b) 网格格式支持：应支持结构化、非结构化和混合网格等多种网格类型的读写，兼容主流 CFD 和 FEA 软件的网格格式，保持网格质量信息、边界条件定义和材料属性，支持网格分区信息和并行计算域分解数据的完整传递；

c) 可视化格式：应提供轻量化三维模型格式用于快速预览和协同评审，支持多级细节层次和渐进式加载，包含纹理、材质和动画信息，确保在不同终端设备上的显示一致性和交互流畅性。

8.1.2 仿真结果格式

仿真结果格式包括：

a) 层次化存储：应采用支持大规模数据集的层次化存储格式，实现数据的高效压缩和快速访问，支持并行读写和部分数据加载，提供灵活的数据组织结构适应不同类型仿真结果，确保数据存储的可扩展性和向后兼容性；

b) 标准化输出：应遵循行业认可的数据交换标准和约定，包含完整的维度定义、变量描述、单位标注和时空参考信息，支持多维数组、时间序列和空间场数据的规范化表达，实现远程访问和分布式存储能力；

c) 专用格式兼容：应支持风电行业专用仿真软件的结果格式读取和转换，保持载荷时程、功率曲线、模态信息等关键数据的完整性，提供格式转换过程中的数据校验和质量保证机制。

8.1.3 时序数据格式

时序数据格式包括：

a) 高效存储格式：应采用适合时序数据特点的存储格式，实现高压缩比和快速查询性能，支持列式存储提高分析效率，提供内存映射和零拷贝机制降低数据处理开销，确保大规模时序数据的存储经济性；

b) 采样规范管理：应支持多种采样频率的数据管理，包括常规运行数据的统计值记录、动态响应的高频采样和故障捕捉的瞬态记录，提供采样策略配置和数据重采样功能，确保不同时间分辨率数据的协调使用。

8.3.4 合规性要求

合规性要求如下：

a) 国家标准：应符合 GB/T 22239 中三级安全要求，应符合 GB/T 35273 的要求；

b) 国际标准：应符合 ISO/IEC 27001、ISO/IEC 27017 和 ISO/IEC 27018 的要求；

c) 行业规范：应符合电力行业网络安全要求、工业控制系统安全要求和知识产权保护要求。

9 验证与确认 (V&V)

9.1 验证方法

9.1.1 代码验证

代码验证要求如下：

a) 制造解方法：应采用严格的数学方法验证代码实现的正确性，通过构造已知精确解的问题验证数值算法的准确性，确保误差收敛率符合理论预期，验证方法应适用于软件中实现的所有控制方程和算法模块；

b) 网格收敛性研究：应通过系统的网格加密研究验证计算结果的网格无关性，采用公认的误差估计方法量化离散误差，使用多套不同密度的网格验证解的渐近收敛行为，网格收敛指标应满足工程精度要求；

c) 基准算例测试：应选择行业公认的标准算例进行验证，包括具有完整实验数据的风机测试案例、国际合作项目的基准模型、行业标准参考算例，软件计算结果应与基准数据一致。

9.1.2 算法验证

算法验证要求如下：

a) 数值稳定性：应验证算法在各种条件下的数值稳定性，满足稳定性判据要求，验证长时间积分的稳定性和守恒性，守恒系统应确保守恒量的误差控制在可接受范围内；

b) 收敛性检验：应验证迭代算法的收敛特性，监测和记录残差下降历程，建立明确的收敛判据和收敛标准，验证不同初始条件下的收敛一致性和鲁棒性；

c) 精度阶验证：应验证数值方法的时间和空间精度阶，实际精度与理论设计精度应一致，通过系统的精度测试验证不同精度格式的正确实现，提供精度阶的定量验证结果。

9.1.3 软件测试

软件测试要求如下：

a) 单元测试：应对所有关键代码模块进行单元测试，代码覆盖率应达到行业标准要求，测试边界条件和异常处理逻辑，进行内存管理和资源泄漏检测，建立完善的单元测试用例库；

b) 集成测试：应验证模块间接口的正确性和兼容性，测试数据在模块间的传递和处理，验证并发和同步机制的正确性，进行系统集成后的性能基准测试；

c) 系统测试：应进行完整的端到端功能测试，实施压力测试验证系统的负载能力，进行长时间连续运行的稳定性测试，验证系统在不同软硬件环境下的兼容性。

9.1.4 回归测试

回归测试要求如下：

- a) 自动化测试框架：应建立持续集成和自动化测试体系，实现代码提交后的自动构建和测试，维护全面的测试用例库覆盖所有功能模块，确保测试的可重复性和一致性；
- b) 版本对比：应进行新旧版本计算结果的对比验证，功能升级不应影响已有功能的正确性，监测版本间的性能变化，验证功能的完整性和向后兼容性；
- c) 问题追踪：应建立完善的缺陷管理和追踪系统，实施问题分级和优先级管理机制，建立问题发现、修复和验证的闭环流程，维护问题知识库支持持续改进。

9.2 确认方法

9.2.1 实验数据对比

实验数据对比要求如下：

- a) 风洞实验：应与公开发表的风洞实验数据进行对比验证，包括压力分布、载荷系数等关键参数的对比，确保气动特性预测的误差在工程可接受范围内，验证不同工况下的模拟准确性；压力分布误差 $<10\%$ ，载荷系数误差 $<5\%$ ；
- b) 水池实验：应与海洋工程水池实验数据进行对比，验证运动响应和载荷预测的准确性，水动力特性模拟应满足海洋工程设计要求，覆盖不同海况条件的验证；运动 RAO 误差 $<15\%$ ，载荷误差 $<20\%$ ；
- c) 现场测试：应与实际风电项目的现场测试数据对比，包括运行数据、载荷测量和性能参数，验证功率预测、载荷计算等关键指标的准确性，确保仿真结果的工程实用性。功率曲线偏差 $<3\%$ 。

9.2.2 标准算例验证

标准算例验证要求如下：

- a) IEA Wind 基准：Task 29 (Mexnext 项目)，Task 30 (OC3-OC6 项目)，Task 37 (系统工程)，结果偏差在参与者平均值的 $\pm 10\%$ 内；
- b) 认证机构算例：DNV GL 认证测试，BV (法国船级社) 算例，CCS (中国船级社) 标准，满足认证精度要求。

10 文档要求

10.1 用户文档

10.1.1 操作手册

操作手册应包含以下内容：

- c) 软件安装部署：应提供详细的系统配置要求说明，包括硬件配置、操作系统和依赖软件要求，提供分步骤的安装指导和配置说明，包括单机和集群环境的部署方案，涵盖许可证管理、环境配置和系统优化建议；
- d) 界面操作指南：应详细说明软件界面布局和功能分区，提供各功能模块的操作流程和使用方法，包括项目管理、建模、求解设置和后处理等核心功能的操作说明，配备充分的截图和操作示例便于用户理解；
- e) 典型应用案例：应提供覆盖主要应用场景的完整案例，包括陆上、海上固定式和浮式风电项目的分析案例，每个案例应包含从建模到结果分析的完整流程，提供输入参数设置和结果解读的详细指导；
- f) 常见问题解答：应涵盖安装、配置、计算和结果等各环节的常见问题，提供问题诊断方法和解决方案，包括错误信息解释和处理建议，提供性能优化和最佳实践指导。

10.1.2 理论手册

10.1.2.1 控制方程与数值方法

控制方程与数值方法如下：

a) 流体力学方程：应详细说明采用的流体控制方程及其假设条件，阐述湍流模型的理论基础和适用范围，说明边界条件处理和特殊流动现象的建模方法，提供方程无量纲化和特征参数定义；

b) 结构力学方程：应说明结构分析的理论基础和基本假设，阐述线性和非线性分析的理论框架，说明动力学分析方法和数值积分格式，提供材料模型和失效准则的理论依据；

c) 多物理场耦合：应阐述流固耦合、气动弹性等耦合问题的理论基础，说明耦合界面的处理方法和信息传递机制，描述不同物理场间的相互作用模型，提供耦合稳定性和收敛性的理论分析。

10.1.2.2 物理模型假设

物理模型假设如下：

a) 气动模型：应说明气动分析采用的基本理论和假设条件，阐述各种修正模型的物理背景和适用条件，说明三维效应、动态失速等复杂现象的处理方法，提供模型参数的物理意义和取值依据；

b) 水动力模型：应说明波浪理论的基本假设和适用范围，阐述波浪载荷计算方法的理论基础，说明流体粘性、非线性效应的处理方式，提供波流相互作用的建模方法；

c) 材料模型：应说明材料本构关系的基本假设，阐述线性和非线性材料行为的建模方法，说明疲劳和断裂分析的理论基础，提供复合材料等特殊材料的处理方法。

10.1.2.3 算法原理说明

算法原理说明如下：

a) 离散化方法：应详细说明空间和时间离散化的数学原理，比较不同离散格式的特点和适用性，阐述数值精度和稳定性分析方法，提供网格生成和自适应技术的算法原理；

b) 求解算法：应说明线性和非线性方程组的求解方法，阐述迭代求解器的收敛理论和加速技术，说明特征值问题和优化问题的求解算法，提供并行算法和领域分解方法的原理。

10.1.2.4 验证算例

验证算例如下：

a) 解析解对比：应提供具有解析解的标准问题验证，展示数值解与解析解的对比结果，分析误差来源和收敛特性，验证算法实现的正确性和精度；

b) 基准测试：应提供行业标准基准算例的验证结果，与公开发表的数据进行详细对比，分析偏差原因和模型适用性；

c) 收敛性分析：应展示网格收敛性和时间步收敛性研究结果，提供离散误差的定量评估，验证数值方法的精度阶，证明计算结果的可靠性。

10.2 开发文档

10.2.1 架构设计文档

10.2.1.1 架构设计

架构设计应包括：

a) 总体架构：应提供软件系统的整体架构设计，包括分层结构、模块划分和组件关系，说明架构模式选择的依据和优势，提供系统部署架构和扩展性设计，确保架构的清晰性和可维护性；

b) 技术栈：应说明前端、后端、数据存储等各层采用的技术框架，提供技术选型的依据和比较分析，说明各技术组件的版本要求和兼容性，确保技术栈的先进性和稳定性；

10.2.1.2 模块接口定义

模块接口定义如下：

- a) 接口规范：应制定统一的接口设计规范和命名约定，定义请求响应格式和数据交换标准，提供错误处理和异常返回机制，建立接口版本管理和兼容性策略；
- b) 应明确定义接口的输入输出参数规格，说明数据类型、取值范围和约束条件，提供数据验证和转换规则，包含完整的接口使用示例和说明；

10.2.2 测试报告

10.2.2.1 V&V 过程记录

V&V 过程记录如下：

- a) 验证要求：应详细记录代码验证的步骤和结果，包括数值方法验证、网格收敛性研究和基准算例测试，提供定量的误差分析和精度评估，建立验证过程的可追溯性；
- b) 确认要求：应记录与实验数据和现场数据的对比验证结果，包括第三方独立验证和认证测试记录，提供统计分析和相关性评估，证明软件的工程适用性；
- c) 评审记录：应保存所有内部和外部评审的记录文档，包括技术评审会议纪要和专家意见，记录问题整改和验证情况，建立持续改进的闭环机制。

10.2.2.2 基准案例数据

基准案例数据如下：

- a) 标准算例库：应建立包含行业标准算例的完整数据库，提供详细的输入参数和边界条件设置，保存原始计算结果和后处理数据，支持结果的复现和对比分析；
- b) 验证数据集：应提供完整的验证数据集和配置文件，包含输入输出文件和运行脚本，记录计算环境和软件版本信息，确保验证过程的可重复性；
- c) 性能基准：应记录不同规模问题的计算性能数据，包括计算时间、内存占用和并行效率，分析性能瓶颈和优化效果，提供性能基准和优化建议。

参考文献

- [1] DNV-RP-C203 Fatigue design of offshore steel structures