



## 基于CFD-CSD耦合仿真的风力机气弹稳定性及载荷分析

王硕 吕品 王虎 高传强

### Analysis of aeroelastic stability and loads of wind turbines based on CFD-CSD coupled simulation

Wang Shuo, Lyu Pin, Wang Hu, Gao Chuanqiang

引用本文:

王硕, 吕品, 王虎, 等. 基于CFD-CSD耦合仿真的风力机气弹稳定性及载荷分析[J]. 空气动力学学报, 2026, 44(6): 101–112. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2026.0042

Wang Shuo, Lyu Pin, Wang Hu, et al. Analysis of aeroelastic stability and loads of wind turbines based on CFD-CSD coupled simulation[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2026, 44(6): 101–112. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2026.0042

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2026.0042>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于致动线方法的5 MW海上风力机气动弹性分析

Aeroelastic analysis of a 5 MW offshore wind turbine based on actuator line method

空气动力学学报. 2022, 40(4): 203–209 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2022.0048>

#### 考虑流固耦合效应的压气机叶片气动性能研究

Research on the aerodynamic performance of compressor blades considering fluid–structure interaction effects

空气动力学学报. 2025, 43(8): 119–129 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2025.0115>

#### 高速跨介质入水多相流动与流固耦合特性研究综述

Review of multiphase flow and fluid–structure interaction of high-speed water entry

空气动力学学报. 2024, 42(1): 68–85 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2023.0197>

#### 大型结构风效应流固耦合机器学习研究进展

Advances in machine learning for wind-induced fluid–structure interaction of large-scale structures

空气动力学学报. 2025, 43(5): 53–77 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2025.0061>

#### 翼伞后缘偏转过程的流固耦合动力学特性

Fluid–structure interaction dynamic characteristics of parafoil under trailing-edge deflection

空气动力学学报. 2023, 41(5): 68–75 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2021.0397>

#### 一种基于浸没边界-大涡模拟的降落伞流固耦合计算方法

Fluid–structure interaction simulation of parachute inflation based on an immersed boundary method and large eddy simulation

空气动力学学报. 2025, 43(2): 96–109 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2024.0079>

地址: 四川省绵阳市二环路南段8号11信箱9分箱

电话: 0816-2463375

Email: [kqdlxxb@163.com](mailto:kqdlxxb@163.com)



关注微信公众号

获得更多资讯信息

文章编号: 0258-1825(2026)06-0101-12

# 基于 CFD-CSD 耦合仿真的风力机气弹稳定性及载荷分析

王 硕<sup>1, 2, 3</sup>, 吕 品<sup>2, 3</sup>, 王 虎<sup>2, 3</sup>, 高传强<sup>1, \*</sup>

(1. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072;

2. 金风科技股份有限公司, 乌鲁木齐 830026;

3. 北京金风科创风电设备有限公司, 北京 100176)

**摘要:**针对超大型风力机轻量化发展面临的强非线性气动弹性瓶颈、传统叶素动量理论在大攻角分离流动工况下仿真精度不足以及现有流固耦合研究工况覆盖不全的工程痛点, 本文构建了高精度、高稳定性的双向 CFD-CSD 耦合仿真方法。方法基于通用 CFD 求解器与自主研发的多体动力学软件 GTSim 搭建耦合框架, 融合改进延迟分离涡湍流模型、铁木辛柯梁结构理论与渐进自适应多层次 B-Spline 动网格技术, 实现了风力机叶片堆场、停机空转、并网发电等全工况下气弹响应精细化模拟, 并通过多维度试验与对比开展算法验证。结果表明, 本文方法对翼型气动力系数的仿真结果与实测结果的相对偏差小于 5%, 结构挠度仿真结果与行业标准 Bladed 软件偏差小于 4.9%, 常规发电工况载荷仿真结果与实测结果的相对偏差小于 10%。同时 CFD-CSD 方法可精准捕捉极端工况下传统方法无法预测的气弹失稳与耦合振动特征, 突破了传统方法的固有限制, 可为大型风力机气弹设计与安全评估提供可靠技术支撑。

**关键词:**超大型风力机; CFD-CSD; 流固耦合; 气弹稳定性; 气弹载荷

中图分类号: TM315 文献标识码: A doi: 10.7638/kqdlxxb-2026.0042

## Analysis of aeroelastic stability and loads of wind turbines based on CFD-CSD coupled simulation

Wang Shuo<sup>1, 2, 3</sup>, Lyu Pin<sup>2, 3</sup>, Wang Hu<sup>2, 3</sup>, Gao Chuanqiang<sup>1, \*</sup>

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Goldwind Science & Technology Co., Ltd., Urumqi 830026, China;

3. Beijing Goldwind Science & Creation Windpower Equipment Co., Ltd., Beijing 100176, China)

**Abstract:** To address the strong nonlinear aeroelastic bottleneck in the lightweight development of ultra-large wind turbines, as well as the insufficient simulation accuracy of the traditional blade element momentum (BEM) theory under large-angle separated flow conditions and the incomplete coverage of working conditions in existing fluid-structure interaction studies, this paper developed a high-precision and high-stability bidirectional CFD-CSD coupled simulation method. A coupling framework was established using a general-purpose CFD solver and the self-developed multi-body dynamics software GTSim. By integrating the improved delayed detached eddy simulation (IDDES) turbulence model, Timoshenko beam theory, and a progressive adaptive multi-level B-Spline dynamic mesh technique, the proposed method enabled refined aeroelastic response simulations of wind turbine blades across full operating conditions, including blade stacking, parked idling, and

收稿日期: 2026-03-19; 修订日期: 2026-04-07; 录用日期: 2026-04-14; 网络出版时间: 2026-04-28

基金项目: 国家自然科学基金 (12372271, 12522211); 国家重点研发计划 (2022YFB4201200); 中央高校基本科研业务费专项资金

作者简介: 王硕, 研究方向: 风力机气弹与风能利用. E-mail: wangshuonuaa@163.com

通信作者: 高传强\*, 研究方向: 气动弹性力学, 流动控制. E-mail: gaocq@nwpu.edu.cn

引用格式: 王硕, 吕品, 王虎, 等. 基于 CFD-CSD 耦合仿真的风力机气弹稳定性及载荷分析[J]. 空气动力学学报, 2026, 44(6): 101-112.

Wang Shuo, Lyu Pin, Wang Hu, et al. Analysis of aeroelastic stability and loads of wind turbines based on CFD-CSD coupled simulation[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2026, 44(6): 101-112(in Chinese). doi: 10.7638/kqdlxxb-2026.0042

grid-connected power generation. The method was validated through multi-dimensional experiments and comparisons. Results show that the relative deviation of the aerodynamic force coefficients calculated by the proposed method from experimental measurements is less than 5%, and the calculated structural deflection deviates by less than 4.9% from that obtained using the industry-standard software Bladed. Under normal power generation conditions, the relative deviation of load predictions from measured data is within 10%. Moreover, the method accurately captures aeroelastic instability and coupled vibration characteristics under extreme conditions that cannot be predicted by traditional methods. This approach overcomes the inherent limitations of conventional methods and provides reliable technical support for the aeroelastic design and safety assessment of large wind turbines.

**Keywords:** ultra-large wind turbine; CFD-CSD; fluid-structure interaction; aeroelastic stability; aeroelastic load

## 0 引言

全球能源转型进程的加速推动风力发电技术向超大型化、轻量化方向快速演进。叶片作为风力机能量捕获的核心部件,长期承受着复杂流场扰动诱发的气动载荷与结构惯性载荷的耦合作用<sup>[1]</sup>,由此引发的气动弹性问题已成为制约机组设计安全性、运行稳定性及能量转换效率的主要瓶颈<sup>[2-3]</sup>。近年来,随着风力机单机容量与叶片尺寸持续提升,弯扭耦合效应与非定常流场的相互作用进一步加剧了气弹响应的非线性特征,气弹失稳、叶片疲劳损伤等工程问题的发生频次与危害程度显著上升<sup>[4-5]</sup>,这对气弹仿真的精度、计算稳定性及复杂工况适配能力提出了极高的要求<sup>[6-7]</sup>。

气动弹性仿真的核心在于精准刻画流体载荷场与结构位移场的双向耦合机制,现有仿真方法面临两大核心挑战:结构层面,轻量化设计带来的叶片柔性提升易引发显著的几何大变形,使得传统小变形假设不再适用;流动层面,停机、堆场等工况下叶片表面极易发生严重的流动分离,流场呈现强非定常性,偏离了理想附着流动的简化场景。目前风电行业主流的叶素动量(blade element momentum, BEM)理论,因依赖准定常、二维截面、附着流动三大核心假设,无法精准捕捉流场非线性与强分离流动特征,在大攻角分离流动、颤振等复杂工况下仿真精度大幅下降<sup>[8-9]</sup>,难以适配超大型风力机的气弹特性研究需求。

计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)与计算结构动力学(computational structural dynamics, CSD)耦合的方法可精细描述复杂流态与结构非线性响应,成为解决风力机强非线性气弹问题的核心技术路径。相较于单向耦合仅考虑气动载荷对结构的作用、忽略结构变形的流场反馈,双向 CFD-CSD 耦合能真实还原“流场扰动-结构变形-流场重构”的动态循环,可精准复现流动分离与结构非线性耦合下的

气弹响应过程,为叶片失速、颤振等关键气弹现象的预测提供了可靠理论支撑<sup>[10-12]</sup>。国内外学者围绕该方法展开了大量研究,在耦合框架构建、求解器协同、数据传递策略及动网格技术四大方向取得了阶段性进展。Della Posta 等<sup>[13]</sup>在 NREL 5MW 机组上的对比研究表明,单向耦合因忽略结构变形速度对攻角的反馈而缺失了关键的挥舞气动阻尼,导致结构振动被放大、气动载荷与功率被持续高估;Sun 等<sup>[14]</sup>构建了多物理场统一求解框架,为流体与固体提供统一的数学表达,实现了 CFD 与结构动力学的联立求解,保证了边界条件的一致性;Ntreliia<sup>[15]</sup>在流体与结构子系统中采用不同时间步长并在耦合界面进行异步更新,从而减少高成本 CFD 求解的调用频率,使气动弹性仿真的总体计算成本大幅降低;Lu 等<sup>[16]</sup>采用多重参考系(multiple reference frame, MRF)方法模拟叶片刚性旋转,结合局部网格变形技术表征叶片柔性变形,并通过二维插值实现流固界面的节点数据映射,完成了结构位移向流体计算域的动态传递。

尽管现有研究已取得系列进展,但面向超大型风力机全工况强非线性气弹仿真需求,仍存在三大核心研究缺口与工程应用瓶颈。其一,适用场景受限,难以覆盖全工况仿真需求。Lu 等提出的方法基于 MRF 准静态刚性旋转假设,无法准确复现堆场静置、极端大风停机等大攻角强非定常工况下的流固强耦合气弹响应,而这些强非定常工况恰是气弹失稳与振动失效的高发场景,直接决定了风力机全生命周期的结构安全<sup>[17]</sup>。其二,数值性能难以兼顾计算效率与鲁棒性。Sun 等<sup>[14]</sup>联立求解运动方程保障了耦合边界的一致性,而流体与固体控制方程在变量体系、微分类型、矩阵结构、界面约束上存在本质差异,联立求解易带来系统自由度激增,计算量巨大,数值收敛困难等问题,限制其在工程上的应用;Ntreliia 等<sup>[15]</sup>提出的异时间步长异步更新策略,本质上增大了 CFD 的时

间步长,虽然降低了计算开销,但丢失了气弹耦合过程的时间精度;Lu 等<sup>[16]</sup>采用的局部网格变形技术在叶片大变形工况下易出现网格畸变,限制了该方法在极端工况下的仿真稳定性。其三,验证体系不完善,工程适用性缺乏系统验证。现有研究大多仅开展单一维度的仿真对标,如 Della Posta 等<sup>[13]</sup>仅针对 NREL 5MW 基准机组的常规发电工况开展验证,缺乏从翼型、单叶片到整机的全尺度、多工况系统验证,方法的工程化应用能力未得到充分论证。

针对上述研究瓶颈,本文提出一种高精度、高鲁棒性的双向 CFD-CSD 耦合气动弹性仿真方法,可系统弥补现有方法的核心短板。首先,基于通用 CFD 求解器与自主研发的多体动力学软件 GTSim 构建松耦合交互框架,完整还原叶片变形速度对攻角的动态反馈机制。该框架具备良好的通用求解器兼容性,既解决了流固联立求解框架兼容性差、计算成本过高的缺陷,又规避了异时间步长异步更新策略易引发的耦合数值失稳问题,兼顾了计算效率与数值鲁棒性。其次,融合改进延迟分离涡模拟(improved delayed detached eddy simulation, IDDES)湍流模型、铁木辛柯梁结构理论与渐进自适应多层级 B-Spline 动网格技术,突破了准静态刚性旋转假设与局部网格变形技术的应用限制,无需依赖准定常、附着流动假设,即可实现叶片堆场静置、整机大风停机以及并网运行全工况下气弹响应的精细化模拟,同时有效解决了叶片大变形工况下的网格畸变问题。在此基础上,通过与翼型风洞试验结果、行业基准软件 Bladed 仿真结果及

多场景现场实测数据进行对比,构建了从翼型、单叶片到整机的全尺度系统验证体系,全面论证了所提方法在气动载荷预测、结构变形响应计算及气弹稳定性判别中的准确性与工程适用性。

## 1 CFD-CSD 耦合方法

### 1.1 交互耦合框架

本文依托通用 CFD 求解器与金风科技股份有限公司自主研发的 CSD 多体动力学仿真软件 GTSim 构建了适用于风力机全工况分析的高精度双向 CFD-CSD 耦合仿真方法,以实现风力机整机气弹响应的精细化模拟,方法整体框架和核心交互流程如图 1 所示。该框架以松耦合交互策略为核心设计原则,兼顾求解器兼容性、计算效率与数值稳定性,在每个仿真时间步内完成流体气动力与结构变形响应的双向数据闭环传递,保障流固耦合过程的时间同步与物理一致性。

为提升耦合系统的交互高效性与数值鲁棒性,本文通过 API 二次开发接口实现两项核心关键技术的统一集成:1)流体网格单元与结构梁单元节点的映射绑定技术,通过空间插值算法建立流固耦合界面的精准映射关系,保障流体网格与结构梁体的运动同步性,消除因运动偏差引发的计算误差与网格畸变;2)叶片网格六自由度(6DOF)运动解析技术,通过构建旋转/平动变换矩阵,精准求解叶片在气弹响应过程中的空间姿态,为流体网格的动态更新提供准确的运动边界条件。

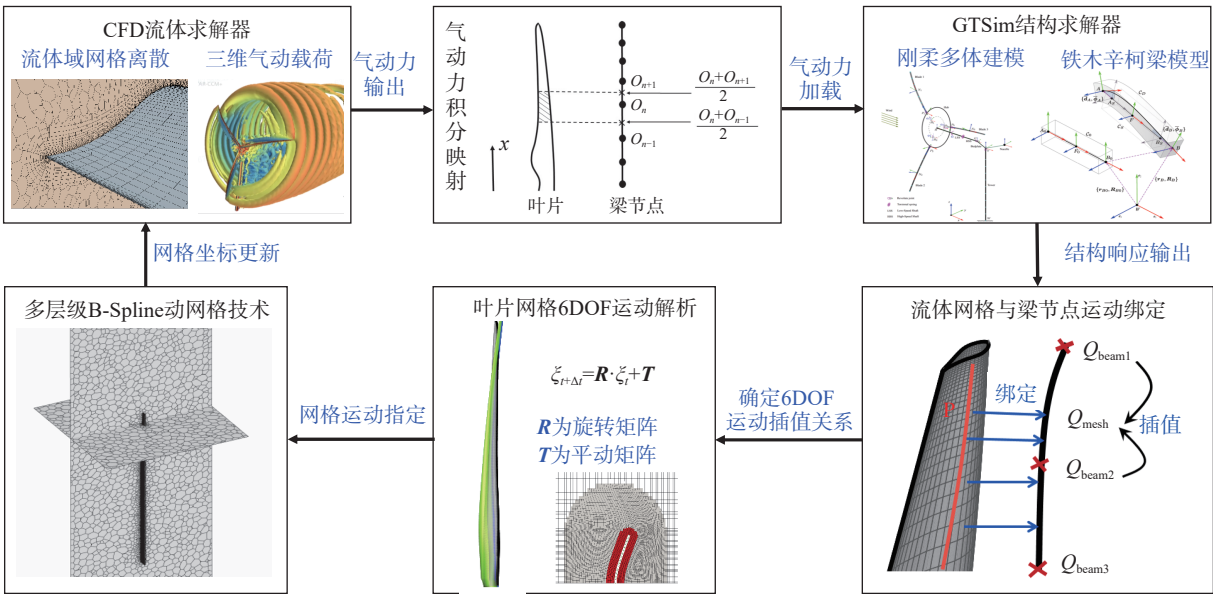


图 1 CFD-CSD 双向交互耦合方法框架示意图

Fig. 1 Schematic of the CFD-CSD bidirectional interactive coupling method framework

针对大范围网格运动易引发的网格畸变、计算中断问题,该框架引入渐进自适应多层次 B-Spline 动网格技术<sup>[18]</sup>,可在叶片大变形、大位移工况下自适应调整网格节点位置,维持流体网格的正交性、光滑性与离散精度,保障耦合仿真方法的连续稳定运行。同时,流体计算域采用“壁面边界层结构化+全域多面体非结构化”的混合网格形式,既能保证叶片、塔架壁面附近的网格分辨率,提升壁面气动力的计算精度,又能兼顾整体流场的网格生成效率与收敛速度。

该耦合方法的完整双向数据传递与迭代求解流程如下:首先,CFD 流体求解器完成流体域网格离散与非定常流场求解,输出三维气动载荷场,对风力机壁面网格单元的气动力进行面积分,得到流固耦合界面的集中气动载荷,再通过已建立的空间映射关系,将气动载荷按结构梁节点间距插值分配至对应三维叶素段,完成流体域到结构域的气动载荷加载。随后,GTSim 结构求解器基于铁木辛柯梁理论完成风力机刚柔多体系统建模。该理论可同时考虑结构剪切变形与转动惯量的影响,相较于经典欧拉梁理论,更适用于风力机大柔性叶片的结构响应高精度求解。GTSim 基于加载的气动载荷完成动力学求解,得到叶片、塔架的结构变形与节点位移响应。最后,将结构求解得到的梁节点位移,通过流固界面的预绑定关系反馈至流体域,经 6DOF 运动解析确定网格运动的插值关系后,通过多层次 B-Spline 动网格技术完成流体域全网格的坐标更新,为下一时间步的流场求解提供更新后的计算域。

其中叶片、塔架壁面的气动力求解采用面积分方式,如式(1)所示:

$$F_{\text{fluid}} = \iint_S (p\mathbf{n} + \boldsymbol{\tau}_w) dS \quad (1)$$

式中, $p$  表示壁面压强, $\mathbf{n}$  为壁面网格单元单位矢量, $\boldsymbol{\tau}_w$  表示壁面网格单元剪切应力矢量。

通过上述单时间步内“气动载荷传递—结构响应求解—网格动态更新—下一步气动载荷求解”的双向闭环迭代,可精准捕捉风力机气弹运动过程中的非定常气动力,最终获得风力机整机的气弹响应特性与全工况载荷分布规律。塔架的流固耦合实现逻辑与叶片一致,此处不再赘述。

## 1.2 CFD 求解器

流体动力学求解可基于通用 CFD 工具(如 FLUENT、STAR-CCM+、OpenFoam 等)。湍流模型采用 IDDES 模型<sup>[19]</sup>,该模型融合了壁面模化大涡模拟(wall-modelled large eddy simulation, WMLES)与延迟分离涡模拟

(delayed detached eddy simulation, DDES)的技术优势,可有效改善传统 DES、DDES 模型中存在的对数层不匹配与网格诱导分离问题,能精准捕捉壁面附近的黏性流动特征与分离区的非定常涡结构,是兼顾计算精度与效率的高保真湍流模拟方法,适用于风力机复杂气弹工况的流场仿真。IDDES 湍流模型的长度尺度为:

$$L_{\text{IDDES}} = \tilde{f}_d(1 + f_e)L_{\text{RANS}} + (1 - \tilde{f}_d)L_{\text{LES}} \quad (2)$$

式中: $\tilde{f}_d$  为延迟混合函数,用于控制雷诺平均纳维-斯托克斯(Reynolds averaged Navier-Stokes, RANS)方程与大涡模拟(large eddy simulation, LES)的过渡; $f_e$  为增强函数,用于在强剪切或分离流等复杂流动中调整 RANS 部分的贡献; $L_{\text{RANS}}$  为雷诺平均湍流长度尺度,其表达式见式(3); $L_{\text{LES}}$  为 LES 的滤波尺度,其表达式见式(4)。

$$L_{\text{RANS}} = \sqrt{k}/(\beta^*\omega) \quad (3)$$

式中, $k$  为湍动能, $\omega$  为湍流比耗散率, $\beta^*$  为模型参数。

$$L_{\text{LES}} = C_{\text{DES}}\Delta_{\text{IDDES}} \quad (4)$$

式中: $C_{\text{DES}}$  为 DES 模型的一个常数,其值通常取 0.65; $\Delta_{\text{IDDES}}$  为 IDDES 模型的亚格子模型长度尺度,其表达式如式(5)所示:

$$\Delta_{\text{IDDES}} = \min(\max(C_w d_w, C_w h_{\max}, h_{\text{wn}}), h_{\max}) \quad (5)$$

式中: $C_w$  是经验参数,取为 0.15; $d_w$  是距离壁面的距离; $h_{\max}$  为网格单元中心和相邻网格单元中心之间的最大距离; $h_{\text{wn}}$  是网格在物面沿法向方向的尺度。

针对风力机实际运行工况(来流马赫数均不超过 0.3),本文基于不可压缩黏性流体假设开展气弹耦合数值模拟。流场求解采用叶片与塔架全尺寸精细化几何离散,数值方法采用 SIMPLEC 算法实现速度-压力解耦,对流项采用混合有界中心差分格式,时间推进采用二阶隐式向后差分格式,可兼顾求解精度、收敛效率与数值稳定性。非定常计算时间步长设为 0.005 s,每个时间步内执行 10~20 次迭代,直至控制方程归一化残差下降至少 4 个数量级后再进入下一计算步。

图 2 为叶片 CFD 网格划分示意图,本次计算采用混合网格离散方案:叶片壁面棱柱层采用结构化网格,流域体网格采用多面体非结构化网格;其中叶片展向离散为 1273 个单元,翼型周向离散为 303 个单元。为保障气弹模拟的时空精度,支撑 IDDES 湍流模型对非定常流动的精准解析,近壁面网格  $y^+ < 1$ ,

以完全解析边界层流动特征,壁面首层网格高度设为  $1 \times 10^{-5} \text{ m}$ ,叶片尾流区网格尺度控制在泰勒微尺度以下,体网格增长率取 1.1。受限于篇幅,本文已完成网格无关性验证,相关方法与结果参见文献 [10],此处不再赘述。

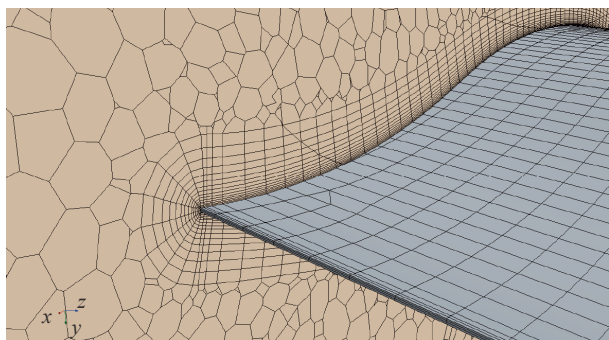


图2 叶片 CFD 网格划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of CFD meshing for blade

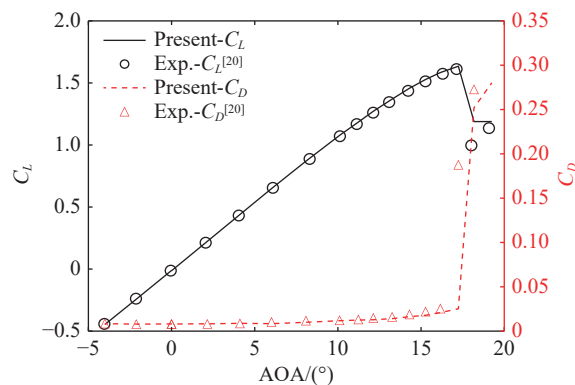
为验证本文 CFD-CSD 耦合方法对气动力系数(升力系数  $C_L$ 、阻力系数  $C_D$ 、压力系数  $C_p$ )的预测精度,以 NACA0012 三维翼型为研究对象,在雷诺数为  $6 \times 10^6$  工况下开展数值模拟,并与风洞试验<sup>[20]</sup>结果进行对比以验证本文方法的可靠性,结果如图 3 所示。由图可知,本文方法预测的翼型  $C_L$ 、 $C_D$  与试验值高度吻合,误差均小于 5%;  $0^\circ$ 、 $10^\circ$  攻角下的壁面压力系数分布与试验结果几乎完全吻合,说明本文方法可精准复现翼型表面的压力变化特征。上述验证结果表明,本文方法具备优异的气动力预测精度,可为后续风力机结构变形与气弹响应求解提供准确、可靠的气动载荷输入。

### 1.3 CSD 求解器

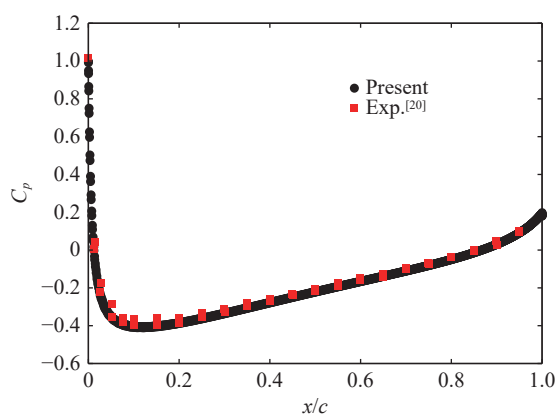
本文结构动力学建模与求解基于铁木辛柯梁理论开展,在多体运动学框架下为梁节点,赋予六自由度(6DOF)运动学描述,充分考虑风力机叶片、塔架的质量非均匀分布、非线性变截面、非线性变刚度、弹性主轴旋转、剪力偏移及弹心偏移等工程实际结构特征,完成风力机整机全局质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵的精细化装配,最终构建出适用于柔性构件大变形响应求解的多自由度体系结构动力学控制方程,其表达式为:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{F}(t) \quad (6)$$

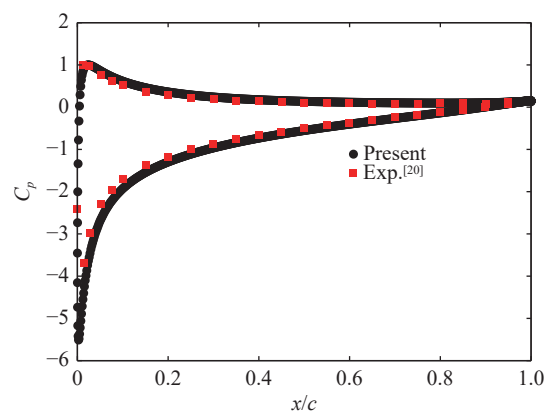
式中:  $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ 、 $\mathbf{F}$  分别为风力机全局的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵与荷载向量,其推导过程参见文献 [21];  $\ddot{\mathbf{X}}$ 、 $\dot{\mathbf{X}}$ 、 $\mathbf{X}$  分别为梁节点加速度向量、速度向量、位移向量。



(a) 翼型升阻力系数对比



(b)  $0^\circ$  攻角下压力分布对比



(c)  $10^\circ$  攻角下压力分布对比

图3 本文方法的翼型气动力系数预测结果与试验结果<sup>[20]</sup>对比

Fig. 3 Comparison of predicted aerodynamic coefficients of the airfoil by the proposed method with experimental results<sup>[20]</sup>

时序积分采用 Newmark- $\beta$ 法,假定加速度在  $[t, t + \Delta t]$  时间段内是一个常量,则速度增量、加速度增量分别为:

$$\Delta \dot{x}_i = \ddot{x}_i \Delta t + \gamma \Delta \ddot{x}_i \Delta t \quad (7)$$

$$\Delta x_i = \dot{x}_i \Delta t + \ddot{x}_i \frac{\Delta t^2}{2} + \beta \Delta \ddot{x}_i \Delta t^2 \quad (8)$$

式中,  $\gamma = \frac{1}{2}$ ,  $\beta = \frac{1}{4}$ 。

求解式(8),可得加速度增量  $\Delta \ddot{x}_i$  (式(9)),再将  $\Delta \ddot{x}_i$  表达式代入式(7),可得式(10):

$$\Delta \ddot{x}_i = \frac{1}{\beta \Delta t^2} \Delta x_i - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{x}_i - \frac{1}{2\beta} \ddot{x}_i \quad (9)$$

$$\Delta \dot{x}_i = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \Delta x_i - \frac{\gamma}{\beta} \dot{x}_i + \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right) \ddot{x}_i \Delta t \quad (10)$$

将式(9、10)代入增量平衡方程  $m\Delta \ddot{x}_i + c_i \Delta \dot{x}_i + k_i \Delta x_i = \Delta F_i$ , 可得:

$$\bar{k}_i = k_i + \frac{m}{\beta \Delta t^2} + \frac{c_i \gamma}{\beta \Delta t} \quad (11)$$

$$\Delta \bar{F}_i = \Delta F_i + m \left( \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{x}_i + \frac{1}{2\beta} \ddot{x}_i \right) + c_i \left[ \frac{\gamma}{\beta} \dot{x}_i - \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right) \ddot{x}_i \Delta t \right] \quad (12)$$

$$\Delta x_i = \frac{\Delta \bar{F}_i}{\bar{k}_i} \quad (13)$$

则下一时刻的加速度为:

$$\ddot{x}_{i+1} = \frac{1}{m} (F_{i+1} - c_{i+1} \dot{x}_{i+1} - f_{s,i+1}) \quad (14)$$

$$f_{s,i+1}(x_{i+1}, \dot{x}_{i+1}) = k_{s,i+1} x_{i+1} + R_{i+1} \quad (15)$$

式中,  $f_{s,i+1}$  为  $i+1$  时刻结构的恢复力,  $k_{s,i+1}$ 、 $R_{i+1}$  为  $i+1$  时刻的结构刚度和非线性恢复力。

Bladed 软件作为风力机结构动力学建模与载荷分析的行业标准工具, 其有效性被广泛认可, 可将其计算结果作为工程验证基准<sup>[22]</sup>。为验证本文方法的结构求解精度与可靠性, 以同型号风力机叶片为研究对象, 对比本文方法与 Bladed 软件在叶片挥舞(Flapwise)、摆振(Edgewise)、扭转(Torsion)3个方向的挠度计算结果, 如图4所示。从图中可知, 两种方法的计算结果高度吻合, 其中扭转方向挠度的相对偏差最大, 为4.9%, 但对应的绝对偏差仅为0.15°, 对于百米级叶片而言可忽略不计; 挥舞方向与摆振方向的挠度相对偏差均小于3%。上述验证结果充分证明本文方法可精准求解气动力作用下风力机叶片的结构变形响应, 为双向CFD-CSD耦合仿真提供了可靠的结构位移反馈。

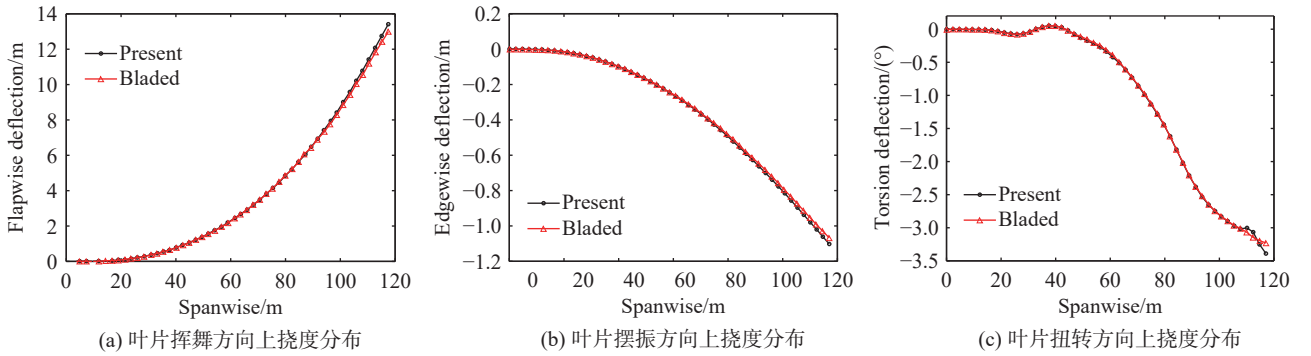


图4 叶片挠度计算结果对比

Fig. 4 Comparison of blade deflection calculated results

#### 1.4 动网格算法

本文针对风力机气弹响应过程中叶片大变形、大位移引发的流体网格畸变问题, 采用渐进自适应多层级 B-Spline 动网格技术实现流体网格的动态更新, 通过基函数拟合网格节点的运动轨迹, 在保证网格光滑性与正交性的同时, 实现结构位移向流体网格的精准传递。

图5展示了一个简单的一维网格案例示意图。在一维网格模型中, 沿网格分布方向设置若干 B-Spline 控制系数(标记为0~3), 参数  $s$  为控制区间内的标准化距离, 表征网格节点在 B-Spline 拟合区间内

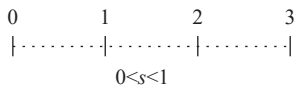


图5 一维网格动态更新示意图

Fig. 5 Schematic of one-dimensional mesh dynamic update

的相对位置。对于中心区间1~2的三次 B-Spline 曲线拟合, 至少需4个相邻的控制系数, 则拟合曲线  $f(x)$  的表达式为:

$$f(x) = \sum_{k=0}^3 B_k(s) \phi_k \quad (16)$$

式中,  $\phi_k$  为节点  $k$  处的 B-Spline 系数值, 本文  $k=0, 1, 2, 3$ ;  $B_k(s)$  为权重系数, 为均匀基函数, 表达式如式(17)所示:

$$\begin{aligned} B_0(s) &= (1-s)^3/6 \\ B_1(s) &= (3s^3 - 6s^2 + 4)/6 \\ B_2(s) &= (-3s^3 + 3s^2 + 3s + 1)/6 \\ B_3(s) &= s^3/6 \end{aligned} \quad (17)$$

权重函数满足归一化约束条件  $\sum_{k=0}^3 B_k = 1$ 。

一维 B-Spline 拟合方法可直接扩展至二维与三维网格场景,其表达式分别为:

$$f(x, y) = \sum_{k=0}^3 \sum_{l=0}^3 B_k(s) B_l(t) \phi_{kl} \quad (18)$$

$$f(x, y, z) = \sum_{k=0}^3 \sum_{l=0}^3 \sum_{m=0}^3 B_k(s) B_l(t) B_m(v) \phi_{klm} \quad (19)$$

式中,  $B_k(s)$ 、 $B_l(t)$ 和  $B_m(v)$ 分别为  $x$ 、 $y$  和  $z$  坐标方向上的基函数。

在本文仿真方法的交互过程中,流体域叶片网格的变形需与 GTSim 求解得到的结构梁节点位移保持实时同步,其随动变形规律如图 6 所示。图中左侧洋红色叶片为未发生变形的预弯初始状态,彩色云图为叶片气弹变形后的形态分布,红色圆点为叶片三维空间中的结构梁节点。由图可知,随着梁节点在气动力作用下发生空间位移,叶片表面的流体网格节点将严格跟随梁节点完成三维六自由度(平动+转动)协同变形,变形后叶片表面的流体网格无畸变、穿刺,保持良好的光滑性与质量,充分验证了本文提出的动网格算法在位移传递、插值计算方面的准确性与可靠性。

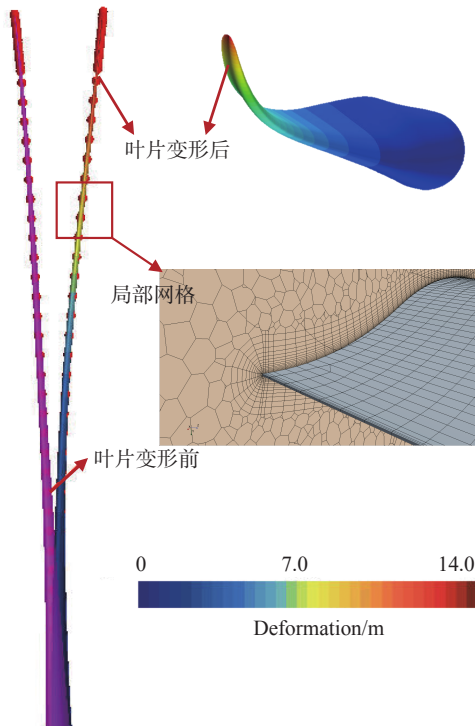


图 6 叶片网格与梁节点随动变形示意图

Fig. 6 Schematic of follower deformation between blade mesh and beam nodes

### 1.5 数值收敛性

残差是数值方法稳定性的“量化标尺”,CFD

求解特定变量(包含连续性、 $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向动量、湍动能 TKE、比耗散率 SDR)的绝对误差  $r$  的表达式如式(20)所示:

$$r = \left| \frac{\partial}{\partial t} \int_V \alpha_i \rho \chi \phi_j dV + \oint_{\partial V} \alpha_i \rho \chi \phi_j (\mathbf{v} - \mathbf{v}_g) \cdot d\mathbf{a} - \left\{ \oint \left[ \alpha_i \chi \left( \frac{\mu}{\sigma} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \nabla \phi_j \right] \cdot d\mathbf{a} + \int_V S \phi_j dV \right\} \right| \quad (20)$$

式中,第一项为瞬态项,第二项为对流项,第三项为扩散项,第四项为源项。

GTSim 求解牛顿迭代方程组,线性化之后的系统方程如下:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} - h\gamma\mathbf{C} - h^2\beta\mathbf{K} & \mathbf{C}_q^T \\ \mathbf{C}_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{a} \\ -\Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\alpha+1} \mathbf{M}\mathbf{a}_{\text{new}} + (\mathbf{f}_{\text{new}} + \mathbf{C}_q^T \lambda_{\text{new}}) - \frac{\alpha}{1+\alpha} (\mathbf{f}_{\text{old}} + \mathbf{C}_q^T \lambda_{\text{old}}) \frac{1}{\beta h^2} \mathbf{C}_{\text{res}} \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中: $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$  分别为风力机全局的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵,  $\mathbf{C}_{\text{res}}$  为约束方程的残差向量,  $\mathbf{C}_q$  为系统约束矩阵,  $h$  为时间步长,  $\mathbf{f}$  为系统外力向量,  $\Delta$  为系统增量,  $\mathbf{a}$  为系统加速度,  $\lambda$  为拉格朗日乘子,  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  为计算参数,下标“new”和“old”表示当前时间步和上一时间步。

力平衡方程的残差  $R_c$  如式(22)所示:

$$R_c = -\frac{1}{\alpha+1} \mathbf{M}\mathbf{a}_{\text{new}} + (\mathbf{f}_{\text{new}} + \mathbf{C}_q^T \lambda_{\text{new}}) - \frac{\alpha}{1+\alpha} (\mathbf{f}_{\text{old}} + \mathbf{C}_q^T \lambda_{\text{old}}) \quad (22)$$

约束方程的残差  $Q_c$  如式(23)所示:

$$Q_c = \frac{1}{\beta h^2} \mathbf{C} \quad (23)$$

系统加速度状态增量的 L2 范数  $Da$  如式(24)所示:

$$Da = \Delta\mathbf{a} \quad (24)$$

系统拉格朗日乘子增量的 L2 范数  $DI$  如式(25)所示:

$$DI = -\Delta\lambda \quad (25)$$

图 7 给出了 CFD、GTSim 数值收敛残差示意图,可以发现,在长时间瞬态仿真中,本文方法在流场与动力学求解中均可在每个时间步实现稳定收敛,残差无累积抬升趋势,全程未出现数值振荡与发散现象,充分验证了方法的数值鲁棒性与高稳定性。

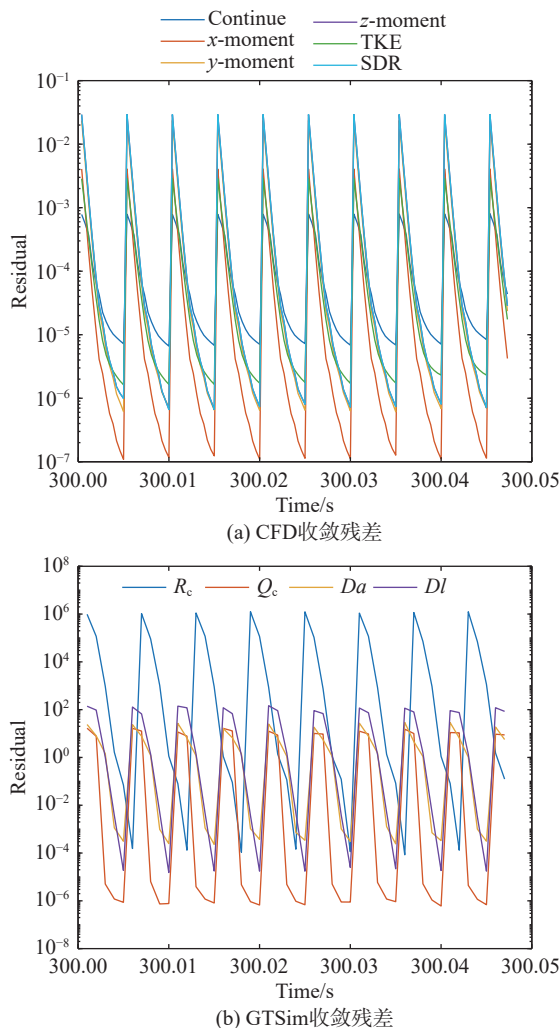


图7 数值收敛残差对比

Fig. 7 Comparison of numerical convergence residuals

## 2 气弹载荷分析

基于前文构建的双向 CFD-CSD 耦合仿真方法,从单叶片与整机两个维度开展风力机气弹载荷与响应特性分析。首先针对叶片堆场这一典型非发电工况,探究大攻角分离流动下的单模态气弹失稳机制与载荷演化规律;而后,再以现阶段主流大兆瓦级整机为研究对象,对比分析并网发电常规工况与高风速停机极端工况下的气弹载荷分布、耦合振动特征及流场演化机理。最后,在工况边界条件完全一致的前提下,将本文方法的仿真结果与基于 BEM 理论的 Bladed 软件的计算结果、对应工况的现场实测数据进行对比,系统验证本文方法对全工况气弹仿真的精度与工程适用性。

### 2.1 单叶片气弹分析

桨距角(pitch)是决定叶片堆场姿态下攻角分布的核心参数,不同桨距角下叶片攻角沿叶展方向的分

布如图8所示。从图中可以看出,82°~90°桨距角堆放时,叶片呈拟静态变形特征,处于翼型气动 Polars 曲线小攻角线性段的稳定区,此时0.4~1.0倍叶展部分是承受载荷和发生变形的核心区域;60°桨距角堆放时,叶片全叶展均处于大攻角失速状态。

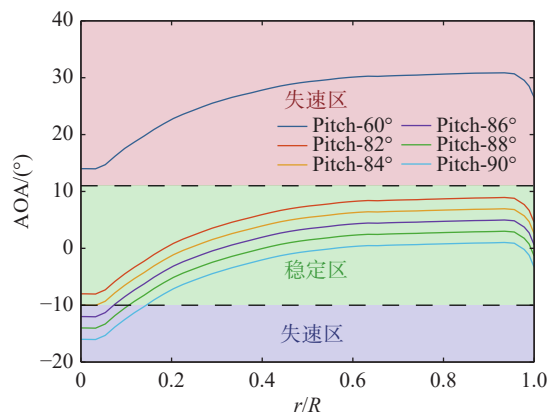


图8 叶片攻角沿叶展方向分布示意图

Fig. 8 Schematic diagram of blade angle of attack distribution along the span direction

82°~90°桨距角堆放工况下,本文提出的 CFD-CSD 双向耦合方法与 Bladed 软件计算得出的叶尖变形结果对比如图9所示。可以看出,当叶片处于小攻角稳定区时,二者对叶片挥舞、摆振方向位移的计算结果吻合较好,仅在82°桨距角工况下出现了最大相对偏差,为4%。

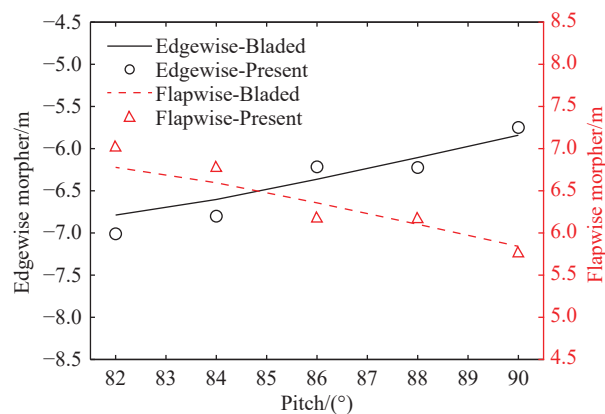


图9 82°~90°桨距角下,本文方法与 Bladed 软件计算得出的叶尖变形结果对比

Fig. 9 Comparison of blade tip deformation results between the proposed method and Bladed software at 82°~90° pitch angles

叶片堆场姿态下翼型截面长期处于大攻角状态,极易诱发一阶摆振失稳。该现象是超大型风力机在非发电工况下高发的典型气弹风险,其本质为大攻角分离流动主导的单模态失稳问题<sup>[23]</sup>。本文以国内5MW机组叶片为研究对象,开展该类失稳现象的仿真与实际测量。现场测试风速为15 m/s,来流风向与叶片展向垂直,叶片堆放桨距角为60°。基于视频识别算法<sup>[24]</sup>

提取实测叶尖摆振位移时序，叶片堆场姿态的振动测量现场和实测结果如图 10 所示。由实测结果可知，叶片振动以一阶摆振失稳模态为主，呈典型的单频主导失稳特征。

将叶尖摆振位移的实测结果与本文方法和 Bladed 的计算结果进行对比，结果如图 11 所示。需要说

明的是，由于 Bladed 软件未复现现场的振动时序，图 11(b)仅展示了本文方法计算得出的频域结果。可以看出，本文方法可精准复现叶片堆场一阶摆振失稳全过程，时域上叶尖摆振位移振幅呈指数型发散特征，最终收敛于极限环振动幅值 7 m 附近；频域上振动主导频率无明显时变与漂移，符合单频主导失稳的典型特征。而基于 BEM 理论的 Bladed 软件，因忽略了大攻角下的边界层流动分离效应，仅将气动力等效为与攻角相关的拟静态升阻力，无法捕捉失稳过程中的气动阻尼非线性变化与流固耦合能量传递机制，最终仅能得到拟静态变形结果，无法预测该类发散型气弹失稳现象<sup>[25]</sup>。

**2.2 整机气弹分析**

本小节以国内某 8MW 三叶片水平轴风电机组为整机测试对象，机组核心参数如下：额定转速 9 r/min，切入风速 2.5 m/s，切出风速 25 m/s，叶片长度 90 m，叶片最大弦长 4.78 m，塔架高度 110 m。现场测试风速为 9.98 m/s，叶轮正对来流风，湍流强度为 5.3%，风剪切指数为 0.16。

为量化表征载荷预测精度，引入仿真精度指标  $P$ ，其定义如式(26)所示， $P$  值越接近 1，代表仿真值与实测值的一致性越高。

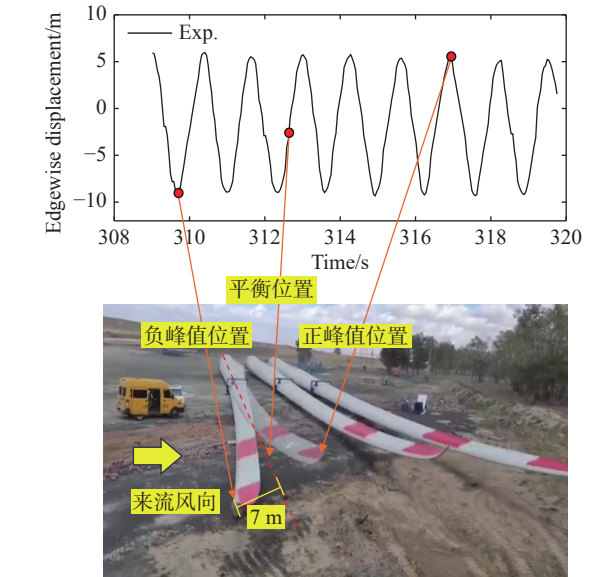


图 10 叶片堆场姿态的振动实测结果

Fig. 10 Measured vibration results of the blade in the stacking attitude

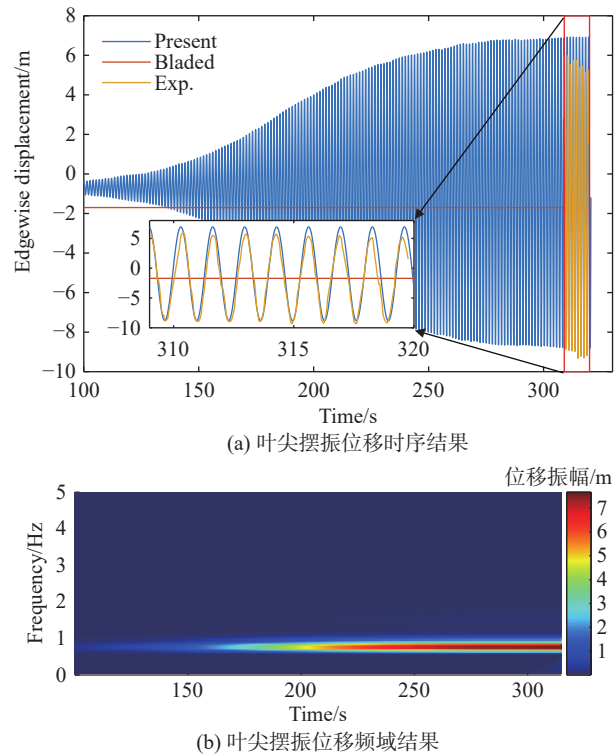


图 11 60°桨距角堆放姿态下，叶尖摆振位移结果对比

Fig. 11 Comparison of blade tip edgewise deflection results at a stacking attitude with 60° pitch angle

$$P = \frac{V_{\text{sim}}}{V_{\text{exp}}}$$

(26)

式中， $V_{\text{sim}}$ 、 $V_{\text{exp}}$ 为载荷仿真值和实测值。

并网发电是风电机组全生命周期内的主要运行状态，叶片与塔架均呈拟静态变形特征，其中测试数据时长 600 s，采样频率 50 Hz，整机载荷的仿真结果与 Bladed 软件计算结果的精度对比如表 1 所示。由表可知，本文 CFD-CSD方法与 Bladed 软件均可精准复现实测载荷水平，以实测值为基准，二者对三支叶

表 1 发电工况下，CFD-CSD 方法和 Bladed 软件对叶片、塔架载荷计算精度对比

Table 1 Comparison of calculation accuracy for blade and tower loads between the CFD-CSD method and Bladed software under power generation conditions

| 载荷/(kN·m)     | Max                 |                      | Min                 |                      | Mean                |                      | Std                 |                      |
|---------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
|               | $P_{\text{Bladed}}$ | $P_{\text{CFD-CSD}}$ | $P_{\text{Bladed}}$ | $P_{\text{CFD-CSD}}$ | $P_{\text{Bladed}}$ | $P_{\text{CFD-CSD}}$ | $P_{\text{Bladed}}$ | $P_{\text{CFD-CSD}}$ |
| blade1: $M_x$ | 0.94                | 0.92                 | 1.17                | 1.10                 | 0.92                | 0.96                 | 1.02                | 1.01                 |
| blade1: $M_y$ | 0.94                | 0.95                 | 0.92                | 0.99                 | 0.92                | 0.95                 | 1.00                | 0.87                 |
| blade2: $M_x$ | 0.96                | 0.92                 | 1.18                | 1.11                 | 0.93                | 0.94                 | 1.03                | 1.02                 |
| blade2: $M_y$ | 0.96                | 0.94                 | 0.94                | 1.00                 | 0.94                | 0.97                 | 0.93                | 0.82                 |
| blade3: $M_x$ | 0.96                | 0.94                 | 1.14                | 1.04                 | 0.91                | 0.90                 | 1.02                | 1.01                 |
| blade3: $M_y$ | 0.92                | 0.94                 | 0.90                | 0.99                 | 0.90                | 0.95                 | 0.95                | 0.84                 |
| tower: $M_x$  | 1.13                | 0.96                 | -0.13               | 0.40                 | 0.91                | 0.92                 | 1.08                | 1.11                 |
| tower: $M_y$  | 1.01                | 1.04                 | 0.97                | 1.06                 | 0.99                | 1.04                 | 1.09                | 0.99                 |

片及塔架前后方向弯矩  $M_x$ 、左右方向弯矩  $M_y$  载荷极值的预测精度  $P$  均趋近于 1, 整体相对偏差控制在 10% 以内, 其中本文方法对叶片与塔架载荷均值和最小值的预测精度略优。

针对高风速整机切出停机这一极端危险工况, 本文开展了风速 32 m/s、30° 对风偏差下叶片载荷对比研究, 如图 12 所示。从图 12(a) 的现场实测结果可以

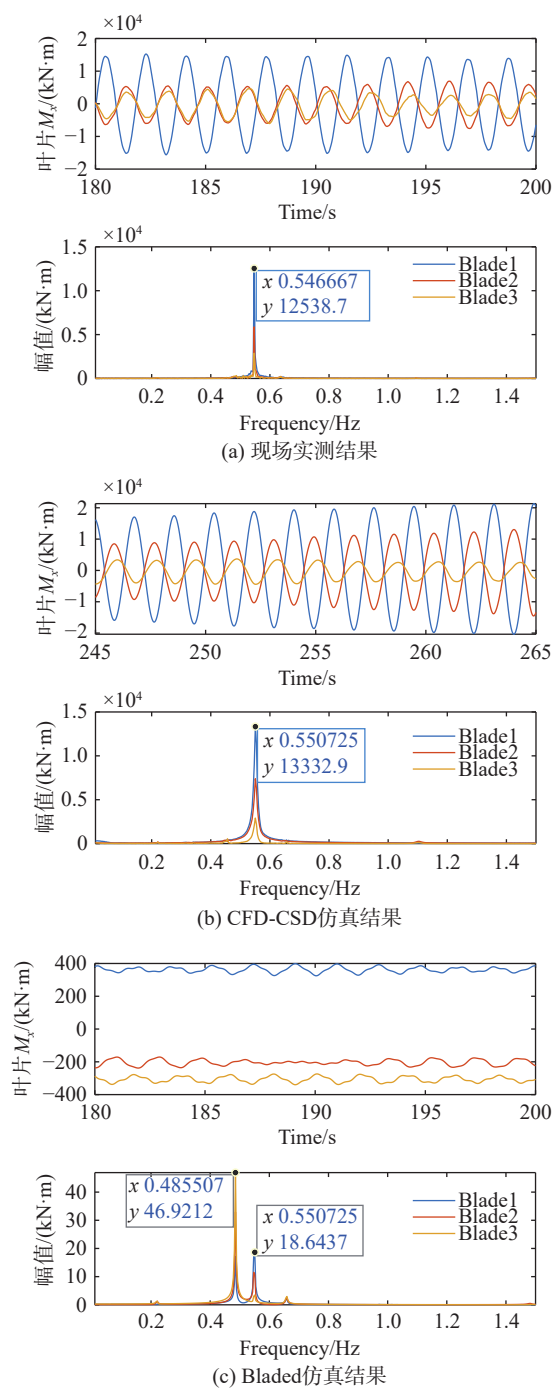


图 12 停机工况下, 叶片载荷的仿真结果与实测结果和 Bladed 软件计算结果对比

Fig. 12 Comparison of blade load simulation results using CFD-CSD with measured results and Bladed software calculation results under parked conditions

看出, 该工况下三支叶片呈现显著的耦合振动特征, 其中叶片 1 振幅最大, 叶片 2、3 依次递减, 且叶片 1 与叶片 2、3 振动相位相反, 耦合振动主导频率为 0.55 Hz, 对应剧烈的动态时序载荷。从图 12(b) 可以看出, 本文方法计算得到的叶片耦合振动规律与实测结果一致, 可完整还原叶片振幅排序, 且得到的主导振动频率与实测结果一致, 为 0.55 Hz, 体现了 CFD-CSD 方法在极端工况下对强非线性气弹响应的高精度捕捉能力。而基于 BEM 理论的 Bladed 软件仿真得到的叶片载荷振幅显著偏低(图 12(c)), 与实测的强耦合振动特征差异较大, 且也无法识别该工况下的危险振动模态。

图 13 为基于  $Q$  准则提取的整机尾流涡核云图, 该云图可明确揭示常规发电工况与极端停机工况的流场差异, 以及两类工况下气弹行为差异的物理本质。从图 13 可见, 发电工况下, 叶片截面处于小攻角拟稳态二维附着流动状态, 气动力载荷稳定, 无发散型气弹振动的诱发条件, 该流动特征与 BEM 方法的准定常、附着流动核心假设高度契合, 因此 BEM 方法在该工况下具备足够的预测精度; 在停机工况下,

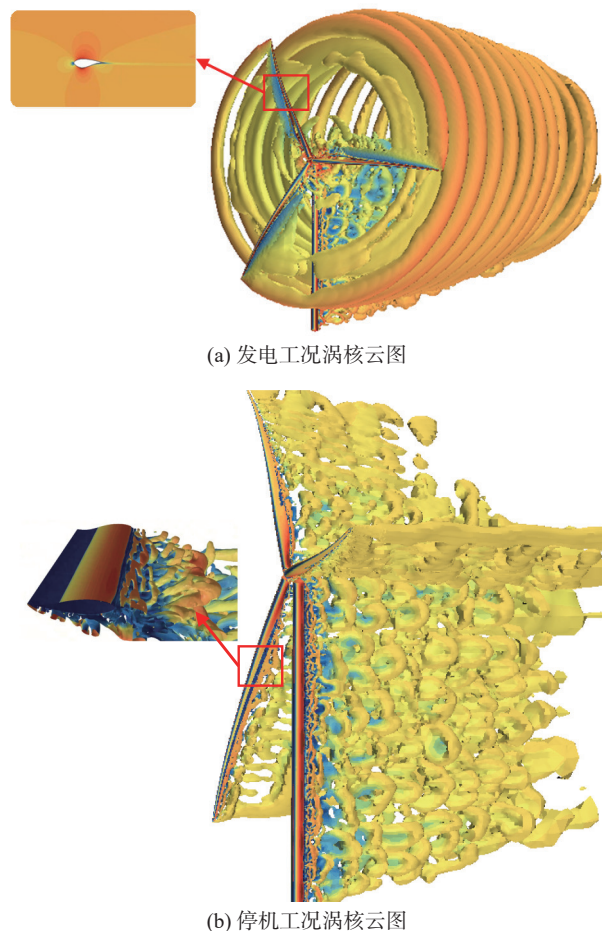


图 13 风力机整机尾流涡核云图

Fig. 13 Contours of wind turbine wake vortex core

受来流风向与叶轮停机姿态的耦合作用, 叶片截面极易进入大攻角、强非定常三维流动分离状态。叶片表面的非定常涡脱会诱发复杂的动态气动载荷, 此时流场特性已显著偏离 BEM 的基本假设, 直接导致 BEM 方法的预测精度大幅下降。这一现象表明, 针对大攻角强分离的极端停机工况, 开展气弹安全性评估时, BEM 方法存在局限, 可采用本文提出的高保真双向 CFD-CSD 流固耦合方法, 以保证计算可靠性与评估精度。

### 3 结 论

针对大型风力机强非线性气动弹性仿真的工程需求与传统方法的固有局限, 本文构建了一种高精度双向 CFD-CSD 耦合气弹仿真方法, 完成了耦合框架搭建、求解器适配与动网格技术优化, 并通过与翼型风洞试验、行业标准软件 Bladed 结果对比, 系统验证了方法的预测精度与工程适用性。主要结论如下:

1) 本文提出的双向 CFD-CSD 耦合方法具备优异的计算精度与数值稳定性。基于 IDDES 湍流模型与铁木辛柯梁理论实现了流场与结构场的高精度求解, 通过渐进自适应多层级 B-Spline 动网格技术解决了大变形工况下的网格畸变问题; 翼型气动力仿真结果相对偏差小于 5%, 叶片结构挠度仿真结果与行业标准软件 Bladed 结果的最大相对偏差仅 4.9%, 实现了流固双向闭环数据的稳定传递。

2) 本文在全工况范围内均具备优异的预测性能。并网运行常规工况下, 叶片与塔架载荷的仿真结果相对偏差控制在 10% 以内, 与传统 BEM 方法精度相当; 在堆场静置、高风速停机等大攻角强分离流动极端工况下, 可精准复现传统 BEM 方法无法捕捉的发散型气弹失稳、多叶片耦合振动等强非线性气弹响应, 突破了 BEM 方法准定常、二维附着流动假设的固有局限。

3) 叶片攻角与流动状态是决定气弹仿真方法精度的核心控制因素。小攻角附着流动与 BEM 方法的核心假设高度契合, BEM 在常规发电工况下具备足够的预测精度; 而大攻角三维分离流动完全突破了 BEM 方法的假设边界, 其非定常涡脱落与流固耦合效应主导了气弹响应, 此类极端工况建议采用高保真双向 CFD-CSD 耦合方法开展气弹安全评估。

本文研究揭示了大攻角分离流动下的叶片气弹失稳机理与流固耦合振动规律, 追溯了超大型风力机的复杂振动起因。提出的双向耦合 CFD-CSD 方法可覆盖风力机全生命周期典型工况的气弹仿真需求, 为大型风力机的气弹优化设计、极端工况风险防控提供了可靠的理论依据与技术支撑。然而, 实际尺度三维

整机在采用双向 CFD-CSD 进行仿真并遍历大批量设计工况时, 将面临巨大的资源消耗。后续将基于本征正交分解与数据驱动方法构建气弹降阶模型, 在保证计算精度的前提下大幅提升计算效率, 推动该方法的规模化工程应用。

### 参 考 文 献:

- [1] 王同光, 田琳琳, 钟伟, 等. 风能利用中的空气动力学研究进展 I: 风力机气动特性[J]. 空气动力学学报, 2022, 40(4): 1-21.  
Wang Tongguang, Tian Linlin, Zhong Wei, et al. Aerodynamic research progress in wind energy I: wind turbine aerodynamic characteristics[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2022, 40(4): 1-21(in Chinese).  
doi: 10.7638/kqdlxxb-2021.0114
- [2] Veers P, Dykes K, Lantz E, et al. Grand challenges in the science of wind energy[J]. Science, 2019, 366(6464): eaau2027.  
doi: 10.1126/science.aau2027
- [3] Guma G, Bangga G, Lutz T, et al. Aeroelastic analysis of wind turbines under turbulent inflow conditions[J]. Wind Energy Science, 2021, 6(1): 93-110.  
doi: 10.5194/wes-6-93-2021
- [4] Huang J Y, Zhang H, Zhou C, et al. Nonlinear structural vibration of multi-megawatt vertical axis wind turbine blades-part 1: derivation of motion equations[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2024, 24(12): 2450135.  
doi: 10.1142/s0219455424501359
- [5] Wang L, Liu X W, Kolios A. State of the art in the aeroelasticity of wind turbine blades: aeroelastic modelling[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 64: 195-210.  
doi: 10.1016/j.rser.2016.06.007
- [6] Zhao X, Jiang X, Zhu W D, et al. Semi-analytic solutions for the bending-bending-torsion coupled forced vibrations of a rotating wind turbine blade by means of Green's functions[M]//Advances in Nonlinear Dynamics, Volume I. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024: 85-96.  
DOI:10.1007/978-3-031-50631-4\_8.
- [7] Shi Z J, Gao C Q, Zhang W W. Data-knowledge-driven dynamic stall modeling guided by stall patterns and semi-empirical model[J]. Physics of Fluids, 2025, 37(4): 045106.  
doi: 10.1063/5.0263116
- [8] 冷峻, 郇志腾, 郑小波, 等. 基于致动线方法的 5 MW 海上风力机气动弹性分析[J]. 空气动力学学报, 2022, 40(4): 203-209.  
Leng Jun, Gao Zhiteng, Zheng Xiaobo, et al. Aeroelastic analysis of a 5 MW offshore wind turbine based on actuator line method[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2022, 40(4): 203-209(in Chinese).  
doi: 10.7638/kqdlxxb-2022.0048
- [9] 吴鸿鑫, 柯世堂, 王同光, 等. 基于 BEM-GEBT-HBM 嵌套的风力机叶片三维时变气动阻尼高效求解方法[J]. 力学学报, 2025, 57(10): 2319-2331.  
Wu Hongxin, Ke Shitang, Wang Tongguang, et al. An efficient method for solving three-dimensional time-varying aerodynamic damping of wind turbine blades based on nested bem-gebt-hbm framework[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2025, 57(10): 2319-2331(in Chinese).  
doi: 10.6052/0459-1879-25-232
- [10] Pirrung G R, Grinderslev C, Sørensen N N, et al. Vortex-induced vibrations of wind turbines: from single blade to full rotor simulations[J]. Renewable Energy, 2024, 226: 120381.  
doi: 10.1016/j.renene.2024.120381

- [11] Santoni C, Khosronejad A, Yang X L, et al. Coupling turbulent flow with blade aeroelastics and control modules in large-eddy simulation of utility-scale wind turbines[J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35: 015140.  
doi: [10.1063/5.0135518](https://doi.org/10.1063/5.0135518)
- [12] Sarsenov E, Batay S, Baidullayeva A, et al. High fidelity 2-way dynamic fluid-structure-interaction (FSI) simulation of wind turbines based on arbitrary hybrid turbulence model (AHTM)[J]. *Energies*, 2025, 18(16): 4401.  
doi: [10.3390/en18164401](https://doi.org/10.3390/en18164401)
- [13] Della Posta G, Leonardi S, Bernardini M. A two-way coupling method for the study of aeroelastic effects in large wind turbines[J]. *Renewable Energy*, 2022, 190: 971–992.  
doi: [10.1016/j.renene.2022.03.158](https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.158)
- [14] Sun Y J, Lu Q S, Liu J. A parallel solver framework for fully implicit monolithic fluid-structure interaction[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2024, 41(2): 324074.  
doi: [10.1007/s10409-024-24074-x](https://doi.org/10.1007/s10409-024-24074-x)
- [15] Ntrelia K, Vandewalle S, Meyers J. Multirate time stepping for aeroelastic simulations of wind turbines using the actuator line model[J]. *Computers & Fluids*, 2025, 291: 106574.  
doi: [10.1016/j.compfluid.2025.106574](https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2025.106574)
- [16] Lu N Y, Lam J K, Lin Y, et al. Aeroelastic simulation of full-machine wind turbines using a two-way fluid-structure interaction approach[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12(12): 2271.  
doi: [10.3390/jmse12122271](https://doi.org/10.3390/jmse12122271)
- [17] 刘荣祥, 高传强, 张伟伟. 基于气动弹性降阶模型的风力机翼型摆振失稳机理研究[J]. *力学学报*, 2026, 58(3): 556–568.  
Liu Rongxiang, Gao Chuanqiang, Zhang Weiwei. Study on the instability mechanism of wind turbine airfoil edgewise vibration based on the aeroelastic reduced order model[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2026, 58(3): 556–568 (in Chinese).  
doi: [10.6052/0459-1879-25-297](https://doi.org/10.6052/0459-1879-25-297)
- [18] Lee S, Wolberg G, Shin S Y. Scattered data interpolation with multilevel B-splines[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1997, 3(3): 228–244.  
doi: [10.1109/2945.620490](https://doi.org/10.1109/2945.620490)
- [19] Shur M L, Spalart P R, Strelets M K, et al. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2008, 29(6): 1638–1649.  
doi: [10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.07.001](https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.07.001)
- [20] Ladson C L. Effects of independent variation of Mach and Reynolds numbers on the low-speed aerodynamic characteristics of the NACA0012 airfoil section: NASA-TM-4074[R]. NASA, 1988.
- [21] Przemieniecki J S. Theory of matrix structural analysis[M]. New York: McGraw-Hill, 1968.
- [22] Xing Z T, Jia Y, Zhang L, et al. Research on wind turbine blade damage fault diagnosis based on GH bladed[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(6): 1126.  
doi: [10.3390/jmse11061126](https://doi.org/10.3390/jmse11061126)
- [23] Wu X Y, Liu R X, Li Y, et al. Numerical simulation method for the aeroelasticity of flexible wind turbine blades under standstill conditions[J]. *Energies*, 2024, 17(14): 3395.  
doi: [10.3390/en17143395](https://doi.org/10.3390/en17143395)
- [24] Marušić D, Popović S, Kalafatić Z. Template matching in images using segmented normalized cross-correlation[C]//Proc of the 2025 MIPRO 48th ICT and Electronics Convention, Opatija, Croatia. IEEE, 2025: 36–42.  
doi: [10.1109/MIPRO65660.2025.11131796](https://doi.org/10.1109/MIPRO65660.2025.11131796)
- [25] Schmidt S J, Bernal L P, Friedmann P P. Modeling unsteady loads on wind-turbine blade sections from periodic structural oscillations and impinging gusts[PP/OL]. V5. (2022-12-30)[2024-06-15].  
<https://arxiv.org/abs/2212.14517>

(本文责编: 张兴焕)