

Wöhler 指数对有效湍流强度的影响分析

——以湖南某山地风电场为例

余少梅, 卿 会, 陈荣荣

(中国电建集团城市规划设计研究院有限公司, 广东 广州 511455)

摘 要 风电场有效湍流是风力发电领域的关键参数, 是等效恒定值。有效湍流需要通过系统的计算流程才能得以分析出来。其中系统性的流程主要包含测风数据处理、发电量模型搭建及计算。本文通过湖南某山地风电场的有效湍流强度的求解分析, 得知 Wöhler 指数越大, 对应的低风速段的有效湍流强度越大, Wöhler 指数对高风速段影响较小。Wöhler 指数在求解时, 应结合项目实际进行取值, 从而保证有效湍流取值科学合理。

关键词 Wöhler 指数; 有效湍流强度; 湍流风电场

中图分类号: TM614; O357.5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.019

0 引言

风电场湍流是风电场内空气流动的无序随机三维速度波动, 由大气边界层自然湍流与风机尾流诱发的湍流叠加作用形成, 对风电场安全、经济及寿命至关重要。它引发的高频随机波动载荷会使风机结构承受反复应力, 造成累积疲劳损伤, 限制风机设计并缩短寿命, 还会导致风速不稳, 引发风机功率输出剧烈波动, 影响风电场输出稳定性、挑战电网电能质量, 同时增加控制系统负担、降低运行效率, 且加剧叶片气动噪声^[1]。

描述湍流常用环境湍流强度与有效湍流强度, 后者是风力发电的关键参数, 经标准湍流强度修正扩展而来, 可更准确预测风机在实际风电场的疲劳载荷, 其准确计算对风电场分析意义重大。本文分析有效湍流强度计算中 Wöhler 指数的影响, 并结合项目实例展开研究。

1 有效湍流强度及计算方法

有效湍流强度的计算过程主要包含以下三个步骤:

(1) 确定输入条件: 包括风速、风向的概率分布; (2) 计算每个风向扇区下的等效湍流强度: 对于每一个风向, 计算下游风机在所有风速下承受的湍流强度; (3) 对所有风向扇区进行加权平均: 将每个风向的等效湍流强度按其发生概率进行加权, 得到最终的有效湍流强度^[2]。

计算有效湍流强度首先要计算表观湍流强度。表观湍流强度计算公式如下:

$$I_{app}(\theta, V_h) = \sqrt{I_{amb}^2 + I_{wake}(\theta, V_h)^2} \quad (1)$$

式(1)中, I_{amb} 为环境湍流强度, I_{wake} 为尾流诱导

湍流强度, 通常可以通过模型计算得出。

得到表观湍流强度后, 再计算等效湍流强度:

$$I_{eq}(\theta) = \left[\frac{\sum_{V_h} p(V_h|\theta) \cdot I_{app}(\theta, V_h)^m}{\sum_{V_h} p(V_h|\theta)} \right]^{1/m} \quad (2)$$

式(2)中, $p(V_h|\theta)$ 为在轮毂高度 h 处, 风向为 θ , 风速为 V_h 的联合概率分布, $I_{app}(\theta, V_h)$ 为表观湍流强度。

得到等效湍流强度后, 再进行有效湍流强度的计算。有效湍流强度的计算公式如下:

$$I_{eff} = \left[\frac{\sum_{\theta} p(\theta) \cdot I_{eq}(\theta)^m}{\sum_{\theta} p(\theta)} \right]^{1/m} \quad (3)$$

式(3)中, $I_{eq}(\theta)$ 为等效湍流强度, $p(\theta)$ 为风向发生的概率。公式中的 m 即为 Wöhler 指数。它对有效湍流强度的计算有着决定性的影响。Wöhler 指数是连接材料疲劳特性与外部环境载荷(湍流)的关键桥梁。 m 值越高, 有效湍流强度就越由最恶劣的载荷工况决定, 这就要求工程师在设计中必须充分考虑极端风况的统计概率, 而不能仅仅依赖平均条件^[3]。

2 有效湍流求解方法与思路

2.1 风电场发电量预测、湍流分析模型

本文采用美迪 WT 软件预测风电场发电量, 该软件依托计算流体力学(CFD)技术, 可精准模拟复杂地形下发电量, 核心流程分四大环节^[4]。(1) 预处理: 载入实测地形图、标准化测风数据及风机特性参数, 同时定义模拟区域与网格参数, 常规设水平、垂直分辨率。

(2) 定向计算: 侧重流场模拟与边界条件设置, 基于预处理数据生成贴合地表的计算网格, 设置大气热稳

定度参数,求解生成风速、风向等流场参数分布。(3)综合模拟:核心是发电量计算,先融合测风数据与流场结果推算全场风能分布,再载入风机坐标模拟尾流损失,最后引入折减系数核算年上网电量。(4)结果输出:输出风谱图、报表及 IEC 文件,为项目评估提供依据。

3.2 Wöhler 指数对有效湍流强度的影响分析

通过搭建的模型,计算 $m=1$ 、 $m=4$ 、 $m=10$ 时的有效湍流强度。选择 $m=1$ 、 $m=4$ 、 $m=10$ 为典型代表,核心源于材料疲劳特性的工程分类与实践便利性,这些数值对应不同疲劳损伤机制与应用场景,是长期试验数据与行业经验的凝练总结。

3 实例分析

3.1 风电场基本设置

湖南某山地风电场共 8 个机位,主导风向为 N、NNW、SSE。

3.2 风电场模型设置

风电场输入标准化测风数据,选 8 台 6.25 MW 风机,模型用东西长 4.5 km、南北跨度 2.3 km 地形图,定向参数设步长 100、最小水平/垂直分辨率 25/4、水平/垂直扩展系数 1.1/1.2、垂直参数 0.7、平滑系数 1,森林冠层用散逸模型以更好地模拟地表植被上方湍流。场区风能模拟结合 1:2 000 数字化地形图与软件 NASADEM30 m 矢量数据布置风机,采用软件自带全球粗糙度数据库。

3.3 风电场模型计算结果

通过设置不同的 Wöhler 指数,并进行有效湍流计算,得到 $m=1$ 、 $m=4$ 、 $m=10$ 时的有效湍流强度曲线^[5],如图 1、图 2、图 3 所示。

对比模拟输出的有效湍流曲线,可见 Wöhler 指数 m 与不同风速段有效湍流强度存在关联规律,且该关联呈显著风速区间差异性^[6]。

针对本项目风资源特性与模拟场景,Wöhler 指数 m 对低风速段($1 \sim 9$ m/s)有效湍流强度影响显著: m 值增大时,低风速段有效湍流强度明显上升。核心原因是低风速段气流易受地形扰动、地表粗糙度变化影响,而 m 值作为反映材料疲劳特性与载荷敏感度的关键参数,其增大使气流载荷波动对湍流状态的作用更突出^[7]。在美迪 WT 软件流场模拟中, m 值增大时,软件对低风速区间气流微尺度运动的计算权重调整,进一步放大湍流强度变化幅度,可能间接影响风机低速工况下的启动稳定性与载荷承受能力。

与之相反, m 对高速风速段(20 m/s 以上)有效湍流强度影响较小。高速风速段气流动能大、惯性强,受外界局部扰动弱,流场更稳定;且美迪 WT 软件在高速风速区间的湍流计算侧重宏观气流规律, m 对载荷敏感度的调节作用被强气流主导效应弱化,故即便 m 值变化,高速风速段有效湍流强度仍维持平稳,无明显波动。

4 结论

本文通过分析有效湍流的计算方法学习了有效湍流的意义及计算过程。通过测风数据处理、WT 数值模型搭建过程分析了解风电场分析处理的过程,并结合

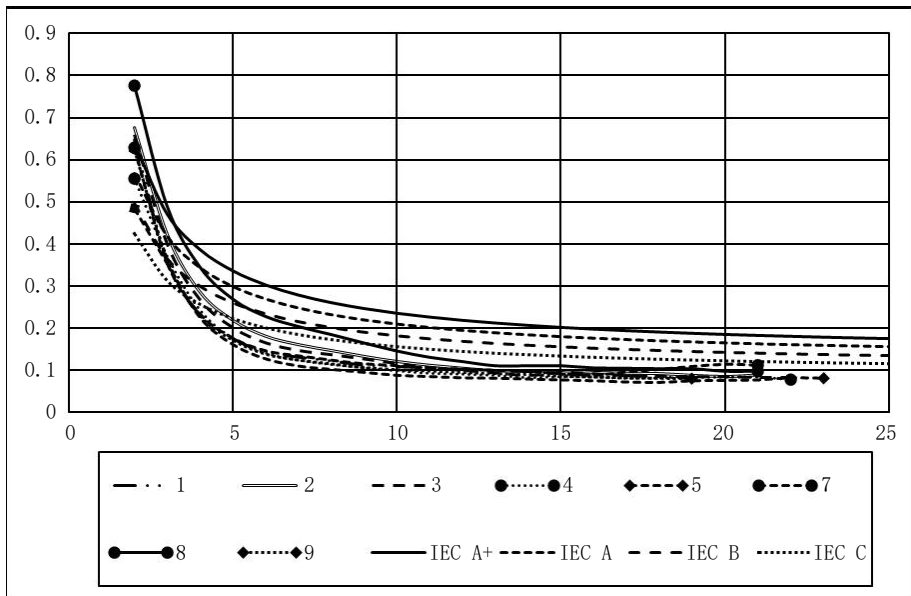
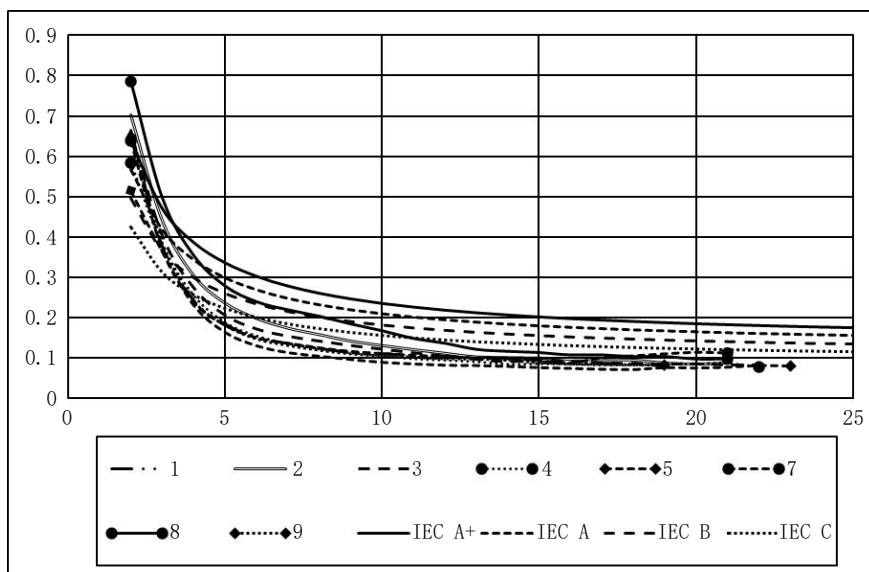
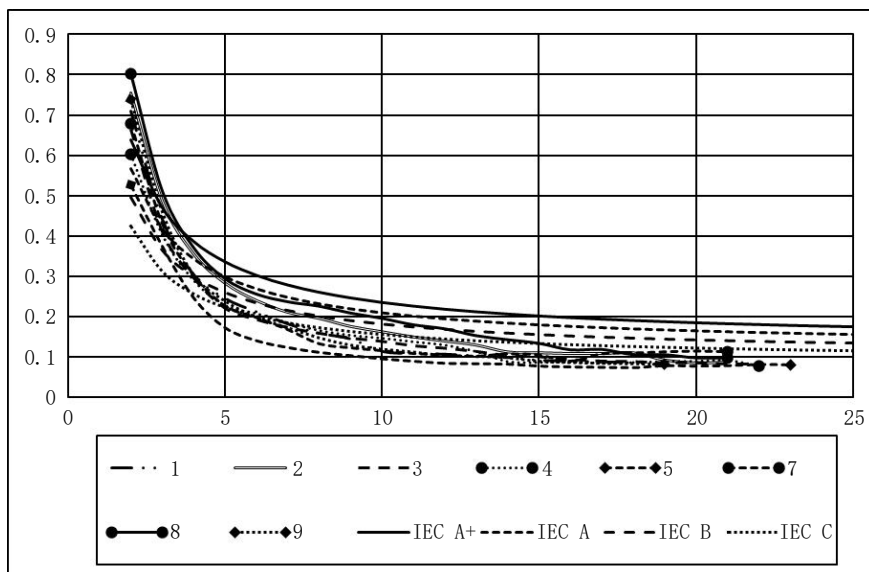


图 1 Wöhler 指数 $m=1$ 时有效湍流曲线与 IEC61400-1-2019 标准曲线对比图

图 2 Wöhler 指数 $m=4$ 时有效湍流曲线与 IEC61400-1-2019 标准曲线对对比图图 3 Wöhler 指数 $m=10$ 时有效湍流曲线与 IEC61400-1-2019 标准曲线对对比图

湖南某山地风电场的实例分析, 得出了初步结论: 对于本例而言, Wöhler 指数 m 越大, 对应的低风速段 ($1 \sim 9 \text{ m/s}$) 的有效湍流强度越大, 相对而言, Wöhler 指数 m 对高风速段 (20 m/s 以上) 影响较小。

参考文献:

- [1] 付剑波, 路永辉, 范守元, 等. 一种高寒山区风电场风能资源评估方法: CN112036663A[P]. 2020-12-04.
- [2] 马晓梅, 王博, 刘永前. 一种基于大气稳定度的风资源评估方法 [J]. 可再生能源, 2020, 38(01): 47-52.

- [3] 20220072-T-604, 风能发电系统风力发电机组塔架和基础设计要求 [S]. 全国风力发电标准化技术委员会, 2022-04-28.

- [4] 乔延辉. 风电场运维效能评价方法与系统开发 [D]. 北京: 华北电力大学 (北京), 2022.

- [5] 刘崇波, 杨畅. 复杂山地风电场湍流过度矫正分析研究 [J]. 风能, 2025(07): 96-100.

- [6] 杜昊天, 杨奎滨, 王其君. 一种基于数值模拟求解机位点湍流算法 [J]. 东方电气评论, 2023, 37(03): 28-32, 39.

- [7] 朱格家, 张景华. 风电场风资源评估与风电机组疲劳载荷计算评估 [J]. 山东工业技术, 2025(04): 118-127.