

# 基于 ERA5 的海上测风数据插补方法

余文博<sup>1</sup>, 柯科腾<sup>1</sup>, 马沛嘉<sup>2</sup>, 孟祥余<sup>2</sup>

(1. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200335; 2. 青岛镭测创芯科技有限公司, 山东青岛 266101)

**摘要:** [目的]海上风速观测常面临数据缺失问题, 限制了风资源评估与风电运行管理的准确性。[方法]基于 ERA5 再分析资料与近海漂浮式测风激光雷达实测数据, 提出一种适用于海上风速缺测场景的比值插补方法。以某近海浮标 100 m 高度风速数据为例, 评估该比值法在全年尺度、季节变化、风力等级及典型极端天气过程下的插补性能。[结果]结果表明, 该方法在风速时序趋势还原方面具有较好一致性, 全年平均相关系数达 0.839; 但在风速幅值恢复上存在系统性低估, 误差随风速增大而显著扩大, 尤其在夏季强对流和台风影响期间, 插补精度明显下降。与传统线性回归法相比, 比值法在趋势保持与误差控制方面表现更优, 且在风速剧烈波动或极端天气条件下展现出更高的稳定性与鲁棒性。[结论]总体而言, 比值法在风速平稳、变化规律清晰的环境中具有较好适用性, 适合用于中长期风资源评估与观测数据修复; 但在极端天气条件下, 仍应引入更高分辨率数据或融合方法, 以提升插补精度和适应性。

**关键词:** 风速插补; 比值法; ERA5; 漂浮式测风激光雷达; 台风

**中图分类号:** P467 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbgc.2026.03.20

## ERA5-Based Offshore Wind Data Interpolation Method

YU Wenbo<sup>1</sup>, KE Keteng<sup>1</sup>, MA Peijia<sup>2</sup>, MENG Xiangyu<sup>2</sup>

(1. Shanghai Investigation, Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200335, China; 2. Qingdao Leice Transient Technology Co., Ltd., Qingdao 266101, Shandong, China)

**Abstract:** [Purpose] Offshore wind speed observations often suffer from data gaps, limiting the accuracy of wind resource assessment and wind farm operation. [Method] A ratio-based interpolation method for reconstructing missing wind speed data using ERA5 reanalysis and floating LiDAR observations is proposed. Taking 100 m wind speed data from a coastal buoy as a case study, the method is evaluated across annual scale, seasonal variability, wind speed levels, and typical extreme weather events. [Result] Results show that the method effectively captures temporal wind speed trends, with an annual average correlation coefficient of 0.839. However, it tends to underestimate wind speed magnitudes, with errors increasing notably under high wind conditions, especially during convective summer periods and typhoon events. Compared to traditional linear regression methods, the ratio method performs better in maintaining trends and controlling errors, and it demonstrates greater stability and robustness under conditions of severe wind speed fluctuations or extreme weather. [Conclusion] Overall, the ratio method demonstrates good applicability in stable wind environments and is suitable for long-term wind resource evaluation and data reconstruction. Nevertheless, its accuracy under extreme weather remains limited, suggesting the need for integration with high-resolution simulations or multi-source data fusion approaches.

**Key words:** wind speed interpolation; ratio method; ERA5; floating lidar system; typhoon

收稿日期: 2025-04-29; 修回日期: 2025-08-03

基金项目: 上海勘测设计研究院有限公司科研项目 (2022FD(83)-001)

作者简介: 余文博 (1990—), 男, 硕士、高级工程师。研究方向: 新能源。

## 0 引言

海上风电作为一种清洁可再生能源,近年来在全球范围内快速发展。中国海岸线超过18 000 km,拥有6 000多个岛屿,海上风能资源较为丰富,具备优越的海上风电发展条件<sup>[1-2]</sup>。风能资源观测与评估是制订风电发展规划和实施风电场工程建设的首要前提,准确评估海上风资源是风电场选址、设计和运行优化的关键环节<sup>[3-4]</sup>。然而,由于海洋环境复杂及测量设备受限<sup>[5-6]</sup>,海上测风数据往往存在缺失。数据缺失不仅会降低风资源评估的准确性,还会影响风电场的发电量预测与运行管理。因此,开展有效的风速数据插补研究具有重要的工程应用价值。

随着海上漂浮式激光雷达技术的兴起,海上测风手段得到显著拓展。该技术已在国内外的多项研究中被验证具备较高的测量精度,能满足海上风电场风资源评估的要求<sup>[7-11]</sup>。尽管如此,受风浪、漂移及系统故障等因素影响,浮标平台在长期观测中仍不可避免地出现数据缺失和异常,须借助可靠、科学的数据插补方法进行修复。

近年来,针对测风数据缺失问题,学者提出了多种插补方法,主要包括线性回归法、空间插值法及再分析资料驱动法等。高洁等<sup>[12]</sup>和韩二红等<sup>[13]</sup>研究表明,线性插补、最小二乘法、加权平均法、神经网络等方法在内陆平原和山地风电场中取得了不同程度的成功,其中最小二乘法在多地形环境下表现稳定,神经网络方法在复杂地形中效果显著。顾正强等<sup>[14]</sup>和刘霄等<sup>[15]</sup>分别利用线性拟合结合风切变指数方法、人工神经网络结合遗传算法建立插补模型,有效提高了缺测风速数据的重构精度。许昌等<sup>[16]</sup>和刘崇波等<sup>[17]</sup>研究表明,再分析数据与测风塔数据具有良好的相关性,基于再分析数据的插补方法准确可行,尤其在缺少参考数据时具有优势。贾晓红等<sup>[18]</sup>和于佳鹤等<sup>[19]</sup>通过对比分析多种插补方法,发现随机森林和深度神经网络等人工智能方法在风速数据插补中表现优异,并建议根据实际情况选择合适方法。王远等<sup>[20]</sup>和谢建华等<sup>[21]</sup>分别采用分风向扇区线性相关法和非线性分析方法,提高了风速数据插补的准确性和合理性。尹旭等<sup>[22]</sup>和刘志远等<sup>[23]</sup>进一步研究了测风时长、相关性及不同插补方法对不确定度的影响,发现测风时长和相关性的增加可降低不确定度,建议根据实际情况选择合适的插补策略。除国内研究外,国际上亦有诸多关于风速数据插补方法的探索。SHUKUR等<sup>[24]</sup>提出基于自回归模型(Autoregressive Model, AR)与人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)相结合的混合模型,针对风速数据的非线性特征,实现了对缺失值的精准插补。LIU等<sup>[25]</sup>提出C-WGAIN模型结合卷积网络(Convolutional Neural Network, CNN)与

Wasserstein生成对抗网络(Wasserstein Generative Adversarial Network, GAN),可在测风数据的高缺失率下实现精准插补。FLORES等<sup>[26]</sup>评估了多种循环神经网络(Recurrent Neural Network, RNN)模型,发现其在风速数据插补中整体效果不及传统移动平均法。KATJA<sup>[27]</sup>比较了12种插值方法,认为回归与克里金插值相结合的回归克里金法表现最佳。CHEN等<sup>[28]</sup>基于自监督学习提出WindFix框架,利用改进的Transformer模型和多重掩码技术,实现了对多类型缺失数据的高效插补,在太平洋风速数据集上的均方误差低至0.002,显示出良好的性能和广泛适用性。这些研究丰富了风速数据重建的技术路径。

现有方法仍存在以下共性问题:1)依赖多站点实测资料,数据获取难度大;2)在复杂气象条件下,如强对流、台风等极端天气中插补效果不稳定;3)部分方法模型结构复杂、训练成本高,不利于工程推广。因此,急需探索结构更简明、物理基础更明确、适应性更强的新型风速数据插补方法。

此背景下,本文提出一种基于ERA5再分析资料与周边漂浮式激光雷达实测数据构建的比值插补方法。通过构建再分析数据与实测数据间的时间序列比例因子,在无须复杂建模和大量样本训练的前提下,实现对缺测风速数据的高效插补。比值法具有计算简便、物理意义明确、对观测点布局要求低的特点,特别适用于海上单点或小样本环境下的风速数据重建任务。本文以东海某近海浮标100 m高度风速数据为例,系统评估该方法在全年尺度、季节变化、风力等级和典型极端天气过程中的插补性能,并与传统线性回归法进行对比分析,验证其在风速趋势保持和误差控制方面的精度优势。研究结果有助于提高海上风速观测数据的完整性与可信度,为风电场风资源评估、功率预测及运行优化提供技术支撑。

## 1 数据来源

### 1.1 浮标系统及数据

本文所用浮标系统由青岛镭测创芯科技有限公司提供(见图1)。该系统是针对海上测风需求专门设计制造的海上任务平台,可搭载多种传感器,对目标海域的风、浪、流、温、湿、压、光和雨等多维度、多层级气象水文数据进行探测。整个系统主要由5个部分构成:测风激光雷达系统、水文探测系统、太阳能供电系统、气象传感系统、远程控制通信系统及浮标本体。其中,测风激光雷达系统包括相干激光雷达主体和卫星惯导姿态系统。卫星惯导姿态系统提供雷达的实时姿态信息,用于风场反演时的姿态校正;相干激光雷达基于实时姿态信息进行风场反演,并实时存储相应数据。



图1 漂浮试测风激光雷达实物图

Fig. 1 Physical Model of Floating Test-Flight Wind Lidar

该型号漂浮式测风激光雷达已通过挪威船级社 (Det Norske Veritas, DNV) 分级认证等多个国际权威机构的精度认证, 激光雷达技术参数见表1。

表1 激光雷达技术参数表

Tab. 1 Technical Parameters of LIDAR

参数	数值
探测高度	40 m~350 m
观测高度	40 m、50 m、60 m、70 m、80 m、90 m、100 m、110 m、120 m、130 m、140 m、150 m、160 m、170 m、180 m、220 m、240 m、280 m、320 m、330 m、350 m
激光波长	1 550 nm, 人眼不可见且人眼安全
时间分辨率	10 min
风速精度	$\leq 0.1$ m/s
风向精度	$< 3^\circ$ (平均风速 $> 2$ m/s)
扫描方式	多波束扫描/VAD
数据产品	秒级风速和风向, 平均风速和风向, 最大、最小水平平均风速、风向, 风速均方差 (湍流强度)、垂直风速、SNR 信噪比数据、GPS 位置、时间、地面大气温度、湿度、气压数据等
通信方式	Ethernet/4G/3G/北斗
环境保护	IP67

## 2 数据插补及误差分析方法

### 2.1 比值法

基于参考实测数据与ERA5再分析资料, 本文构建了一种比例系数插补方法。具体步骤如下。

1) 提取ERA5数据: 分别提取浮标1和浮标2对应位置在相同时刻ERA5的100 m高度 $U$ 分量和 $V$ 分量逐小时风场资料, 并通过预处理合成逐小时风速数据, 分别记为 $V_{\text{ERA5-1}}$ 、 $V_{\text{ERA5-2}}$ , 用于后续的插补计算。风速合成公式为

$$V_{\text{ERA5}} = \sqrt{U^2 + V^2} \quad (1)$$

式中:  $U$ 和 $V$ 分别为ERA5再分析资料中100 m高度的纬向和经向风速分量;  $V_{\text{ERA5}}$ 为合成后的风速。

2) 计算比例系数: 以ERA5-1与ERA5-2的逐小时风速数据为基础, 计算两者的风速比值, 得到一个随时间变化的比例因子序列 $k(t)$ , 计算公式为

$$k(t) = V_{\text{ERA5-1}}(t) / V_{\text{ERA5-2}}(t) \quad (2)$$

本文选取部署在中国东海海域的两个浮标测风站点作为数据来源, 分别为浮标1和浮标2。其中, 浮标1作为待验证数据点位, 选取其100 m高度层的实测风速数据作为插补目标, 模拟在该高度层发生数据缺失的情形并进行数据重建。浮标2作为参考点位, 选取其100 m高度层的实测风速数据, 用于配合ERA5再分析资料对浮标1进行数据插补, 得到待验证数据。

### 1.2 再分析资料

ERA5数据以 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的水平空间分辨率网格覆盖全球, 时间分辨率为1 h, 是一种涉及全球气象和海洋变量的高分辨率历史再分析数据集。选取ERA5数据集中与2个浮标点距离最近的2个格点同期100 m高度的 $U$ 分量和 $V$ 分量逐小时风场资料。

式中:  $V_{\text{ERA5-1}}(t)$ 和 $V_{\text{ERA5-2}}(t)$ 分别为浮标1和浮标2点位的ERA5风速数据序列;  $k(t)$ 为比例因子序列。

3) 构建插补数据: 将比例因子 $k(t)$ 应用于浮标2在相同时刻的实测风速数据 $V_2$ , 计算对应浮标1的估计风速值 $V_1'$ , 计算公式为

$$V_1'(t) = k(t)V_2(t) \quad (3)$$

式中:  $V_2(t)$ 为浮标2实测风速数据序列。

4) 插补结果应用: 在浮标1实测数据 $V_1$ 缺失的时间段内, 用 $V_1'$ 作为插补后的风速值, 构成完整的风速时间序列。

该方法的核心思想是通过ERA5再分析资料揭示2个站点间的风速变化关系, 并将该关系量化为插补因子, 进而将参考站点 (浮标2) 的实测信息映射至目标站点 (浮标1), 以获得较为合理的估计值。

### 2.2 检验方法

为验证比值插补方法在实际应用中的准确性与可靠性, 本文采用“伪缺失”策略对目标点位 (浮

标1) 进行模拟插补检验。假设浮标1在某时间段内的风速观测数据缺失, 屏蔽该时段的实测数据, 作为插补方法的测试样本。由此构建理想化的缺测场景, 便于检验插补方法的有效性。将插补得到的风速值 $V_1'$ 与浮标1的真实实测风速 $V_1$ 进行对比, 采用相关性分析和回归分析等统计方法量化插补后数据与实际数据之间的关系, 评估该插补方法的适用性。

使用相关系数 $R$ 、均方根误差 $R_{RMSE}$ 、平均绝对误差 $R_{MAE}$ 、平均偏差 $R_{BIAS}$ 、平均相对误差 $R_{MRE}$ 等统计指标对插补数据进行检验, 各项检验指标的计算公式为

$$R = \frac{\sum_{t=1}^n [V_1(t) - \bar{V}_1][V_1'(t) - \bar{V}_1']}{\sqrt{\sum_{t=1}^n [V_1(t) - \bar{V}_1]^2 \sum_{t=1}^n [V_1'(t) - \bar{V}_1']^2}} \quad (4)$$

$$R_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n [V_1(t) - V_1'(t)]^2}{n}} \quad (5)$$

$$R_{MAE} = \frac{\sum_{t=1}^n |V_1(t) - V_1'(t)|}{n} \quad (6)$$

$$R_{BIAS} = \frac{\sum_{t=1}^n [V_1'(t) - V_1(t)]}{n} \quad (7)$$

$$R_{MRE} = \left\{ \frac{\sum_{t=1}^n [|V_1'(t) - V_1(t)| / V_1(t)]}{n} \right\} \times 100\% \quad (8)$$

式(4)~式(8)中: $V_1(t)$ 为浮标1点位实测风速数据序列。

### 3 验证与评估

#### 3.1 全年表现及误差特征评估

采用比值法对2024年4月23日—2025年4月22日期间浮标1点位的100 m高度风速数据进行插补。插补数据与实测数据的误差分析指标统计见表2, 浮标实测数据与插补数据的全年时间序列对比见图2。整体来看, 插补结果与实测风速在时序变化趋势上保持一致, 全年平均 $R$ 为0.839, 说明该插补方法能较好地反映风速的演变趋势。但在风速幅值恢复方面仍存在一定偏差, 全年平均 $R_{RMSE}$ 为2.166 m/s, 全年平均 $R_{MAE}$ 为1.605 m/s, 全年平均 $R_{BIAS}$ 为-0.501 m/s, 呈现系统性低估趋势。

表2 误差分析指标统计表

Tab. 2 Statistical Summary of Error Analysis Metrics

时间	平均风速/(m/s)		$R$	$R_{RMSE}/(m/s)$	$R_{MAE}/(m/s)$	$R_{BIAS}/(m/s)$
	实测数据	插补数据				
1月	7.449	7.416	0.888	1.710	1.271	-0.033
2月	7.634	7.363	0.879	1.746	1.345	-0.271
3月	9.418	8.690	0.738	2.674	1.946	-0.729
4月	8.476	7.765	0.816	2.616	1.962	-0.711
5月	7.483	6.751	0.793	2.122	1.604	-0.732
6月	6.515	5.713	0.778	2.306	1.752	-0.803
7月	10.386	9.909	0.775	2.739	2.108	-0.478
8月	6.389	5.820	0.655	2.060	1.576	-0.570
9月	7.931	7.748	0.893	2.039	1.411	-0.184
10月	8.981	8.638	0.783	1.933	1.435	-0.343
11月	8.955	8.423	0.909	1.847	1.396	-0.531
12月	7.671	7.086	0.850	1.868	1.443	-0.585
年度	8.075	7.574	0.839	2.166	1.605	-0.501

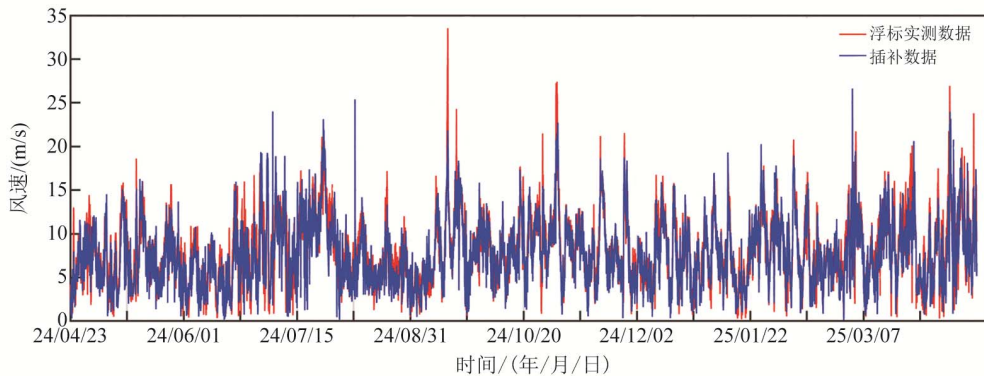


图2 浮标实测数据与插补数据全年时间序列图

Fig. 2 Annual Time Series Plot of Buoy-Measured and Interpolated Data

浮标实测数据与插补数据的逐月日变化曲线见图3, 结合表2和图3可进一步评估逐月插补效果。从季节尺度来看, 春季(3—5月)和夏季(6—8月)误差较为显著,  $R_{RMSE}$  普遍  $> 2$  m/s,  $R_{BIAS}$  接近  $-0.8$  m/s甚至更低, 表明插补风速整体低于实测值。其中, 6月偏差最明显,  $R$  仅为0.778,  $R_{RMSE}$  达2.306 m/s,  $R_{BIAS}$  为 $-0.803$  m/s, 为全年负偏差最大的月份。实测风速在1:00—11:00时段总体稳定, 均值为6.6 m/s~6.9 m/s, 插补风速普遍偏低约1 m/s, 最大偏低至1.5 m/s; 实测风速在12:00—17:00时段虽略有下降, 但仍保持在6.2 m/s~6.5 m/s, 插补结果多为5.3 m/s~5.6 m/s, 偏差进一步扩大。此外, 插补风速在6月夜间(18:00—24:00)未得到显著改善, 实测均值约6.5 m/s, 插补值仅为5.6 m/s~6.0 m/s, 幅值持续偏低, 表明插补方法在6月全天各

时段均存在系统性误差, 尤其在日间风速变化增大时, 模型对高风速的响应能力明显不足。7月问题同样突出。尽管 $R$ 为0.775, 但 $RMSE$ 高达2.739 m/s,  $BIAS$ 为 $-0.478$  m/s。图3进一步显示, 实测风速在13:00—24:00时段多次突破10 m/s, 插补风速在相同时段普遍被低估。8月表现较弱,  $R$ 降至0.655, 为全年最低, 插补效果在时序一致性和幅值恢复方面均有所下降。相较之下, 秋冬季(9月—次年2月)的插补效果明显优于春夏季,  $R$ 普遍  $> 0.85$ ,  $RMSE$ 显著降低,  $BIAS$ 趋近于0。如, 11月插补风速与实测风速的 $R$ 高达0.909,  $BIAS$ 仅为 $-0.531$  m/s, 误差控制较好。从日变化来看, 秋冬季风速变化较为平稳, 昼夜差异小, 插补结果与实测值高度吻合, 能较准确地重建风速的分布形态和变化趋势。

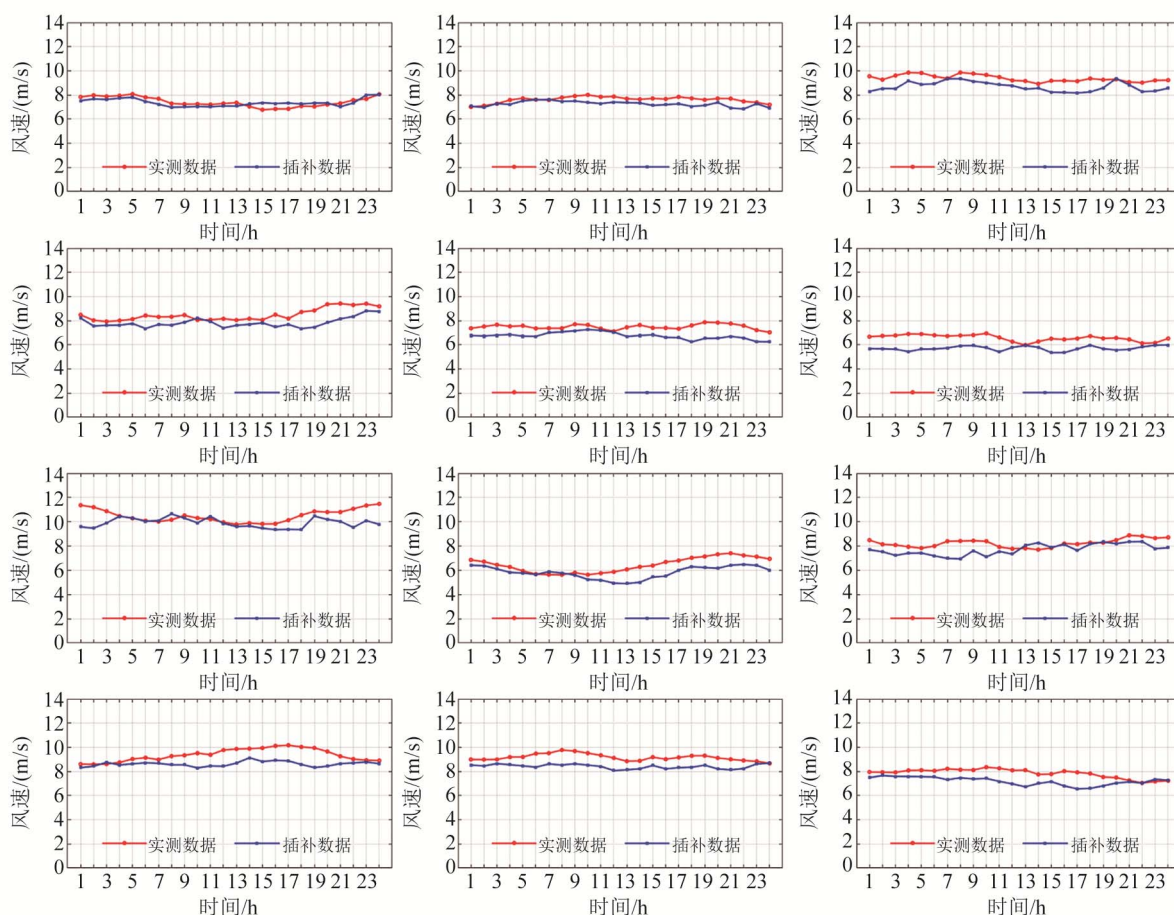


图3 浮标实测数据与插补数据逐月日变化曲线图

Fig. 3 Monthly Diurnal Wind Speed Curves of Buoy-Measured and Interpolated Data

为进一步评估比值法在不同风速区间的插补效果, 以风力等级1~8为划分标准, 对各等级对应的  $R_{RMSE}$ 、 $R_{MAE}$  和  $R_{BIAS}$  进行统计分析(见图4)。结果显示, 插补误差在不同风力等级间存在显著差异, 整体呈现误差随风速增大而上升的趋势。具体来看, 在1级风条件下,  $R_{RMSE}$  为2.67 m/s,  $R_{MAE}$  为2.00 m/s,

$R_{BIAS}$  高达1.96 m/s, 表明低风速时插补效果普遍存在系统性高估, 这可能是由于比例因子对微小风速波动过度放大。随着风力等级提升, 插补偏差逐步减小: 在3级风条件下,  $R_{BIAS}$  已降至0.15 m/s,  $R_{RMSE}$  和  $R_{MAE}$  分别为1.69 m/s与1.27 m/s, 插补效果显著改善。在4~5级风速, 尽管  $R_{RMSE}$  与  $R_{MAE}$  维持在较低水

平(约为1.8 m/s~2.1 m/s), 但 $R_{BIAS}$ 由正转负, 分别为-0.45 m/s和-0.71 m/s, 表明插补效果的评估从高估转为低估。在高速等级(6~8级)下, 误差迅速扩大, 尤其在8级风中,  $R_{RMSE}$ 达到3.80 m/s,  $R_{MAE}$ 为2.78 m/s,  $R_{BIAS}$ 下降至-2.04 m/s, 表明比值法在大风条件下对高速风的响应能力严重不足, 系统性低估现象显著。这可能与该方法的线性比例机制难以捕捉极端风速变化的动力特征有关。

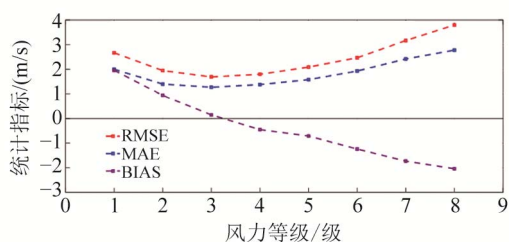


图4 插补数据在不同风力等级下的风速误差

Fig. 4 Wind Speed Error of Interpolated Data by Different Wind Force Level

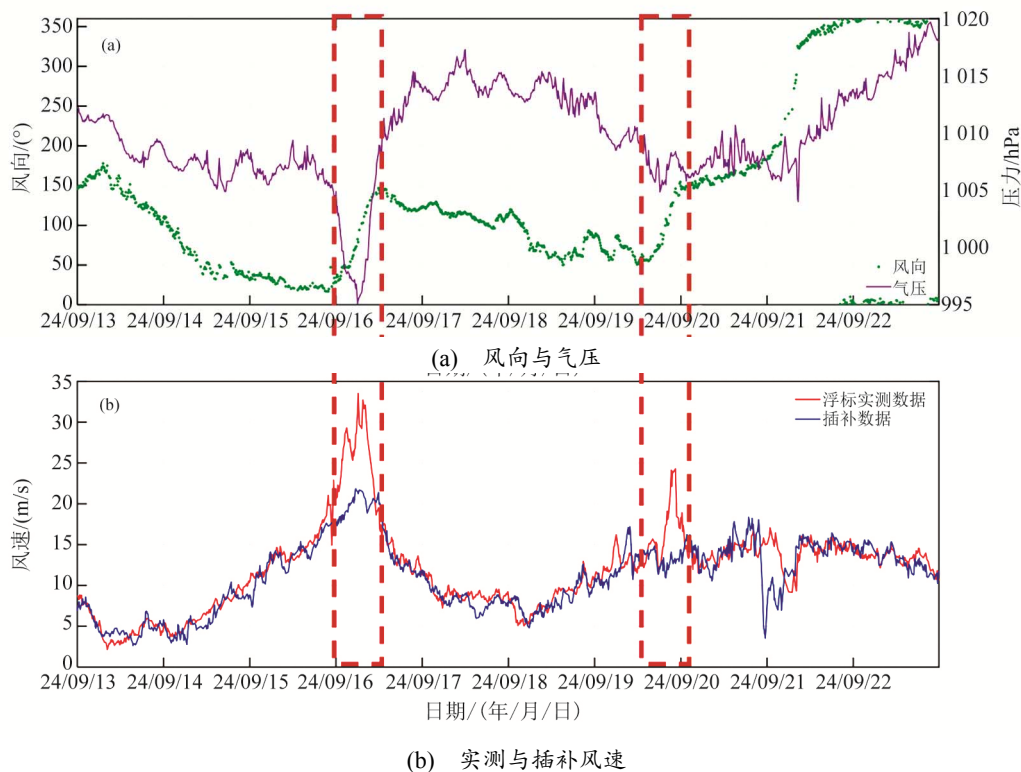
总体而言, 比值法在重建风速的时序结构和演变趋势方面表现较好, 尤其在风速稳定的秋冬季节及深夜至清晨等低波动时段, 插补效果较为理想。然而, 在6—8月对流活动强、风速变幅大的夏季时段, 插补误差显著增加。特别是在6月, 全天各时段均呈现系统性低估, 表明该方法对快速扰动背景下

的高频变化响应能力有限。从风速区间来看, 比值法在中低风速范围(2~5级)插补效果相对较好, 具有较高的稳定性和较小的系统性误差; 在极低风速阶段存在高估倾向, 在高速阶段低估显著, 插补精度大幅下降, 限制了其在极端气象条件下的适用性。

### 3.2 台风期间插补效果分析

为进一步检验比值法在极端天气下的适用性, 本文针对2024年9月13日—22日期间台风贝碧嘉和普拉桑过境时的插补数据进行了深入分析。该时段的风速、风向与气压时间序列见图5, 其中实测风向与气压变化见图5(a), 实测风速与插补风速的对比图见图5(b)。

由图5可见, 台风过境期间风速显著增强, 出现2个明显的峰值, 分别对应2次台风主体影响时段。第1轮风速快速上升出现在9月15日—16日, 随后略有回落, 最大风速>30 m/s; 第2轮高峰出现在9月20日前后, 最大风速>20 m/s。2阶段风速波动剧烈, 且在2次风速极值对应时段风向发生突变, 气压快速下降至最低值后逐步回升, 呈现出典型的台风眼过境特征。插补数据总体上能较好地跟随实测风速的变化趋势, 尤其在风速快速上升与下降过程中仍保持一定的同步, 反映出比值法在捕捉突变趋势方面的能力。



(b) 实测与插补风速

图5 台风期间时间序列图

Fig. 5 Time Series Plot During Typhoon Period

台风期间实测风速与插补风速之间的相关性分析见图6。整体上, 两者在多数时段具有较高的一致性,  $R$ 达到0.85, 表明比值法在台风过程中仍具有一定的稳定性和可用性。然而值得注意的是, 尽管整体趋势吻合较好, 在风速达到高值时段, 特别是风速 $>20$  m/s后, 插补结果与实测数据之间的差距显著扩大。这说明在极端天气条件下, 比值法对高风速环境的响应能力存在局限性。可能的原因包括: 首先, 尽管ERA5再分析资料具有较高的时空分辨率, 但在强对流、剧烈扰动等复杂气象背景下, 其对近地层风场的刻画仍存在偏差; 其次, 实测站点位于特定海域, 受局部地形、海陆风环流及台风结构非对称性等小尺度扰动影响显著, 这些细节往往难以被ERA5资料充分解析; 最后, 在台风快速变化过程中, 风速梯度剧烈波动可能导致比值因子的计算出现滞后或失真, 进而使插补结果偏离实际, 并随时间推移逐渐累积放大误差。

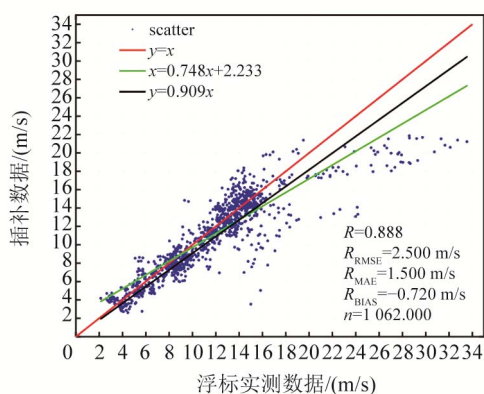
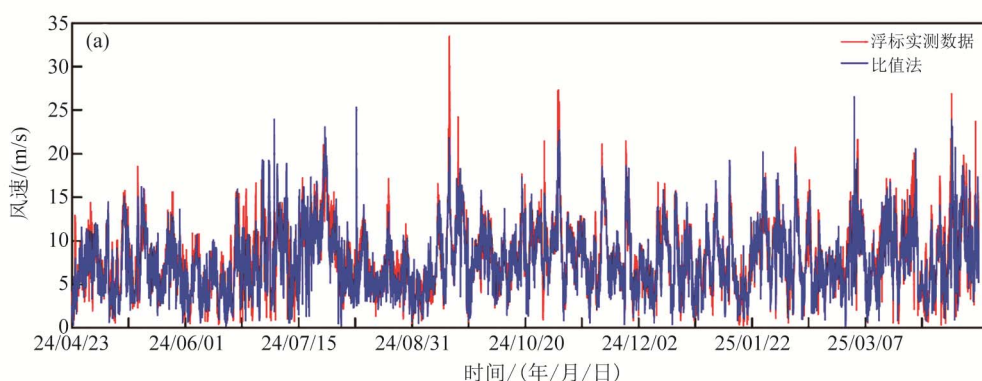


图6 插补数据与实测数据风速相关性分析

Fig. 6 Correlation Analysis of Wind Speed Between Buoy-Measured and Interpolated Data

进一步观察发现, 当风速较低 (如 $<10$  m/s)



(a) 比值法

图7 不同插补方法与浮标实测风速的时间序列对比图

Fig. 7 Time Series Comparison of Interpolated Wind Speeds and Buoy-Measured Data Using Different Methods

时, 实测值与插补值高度聚集, 二者偏差较小, 表明比值法在常规风况下具有良好的插补能力。但随着风速升高, 点位分布逐渐发散, 插补结果的不确定性显著增加。这种误差随风速增大而扩大的特征, 提示在极端风况下比值法存在系统性低估倾向, 对高风速事件的表达能力不足。该问题的研究在实际应用中具有重要意义, 尤其在风电运行安全评估、极端天气预警及海上作业风险研判等场景中, 准确掌握极端风速尤为关键。因此, 为提高比值法在高风速情境下的适用性, 未来研究有必要引入更高分辨率的气象驱动数据, 或借助数据同化、多源融合等手段对插补算法进行优化补偿, 以提升其对极端气象条件的敏感性和响应能力。

### 3.3 与传统插补方法对比分析

为全面评估本文提出的比值法在风速数据插补中的有效性, 以传统线性回归法作为对比基准, 选取浮标1点位全年风速数据构建“伪缺失”样本集, 分别采用2种方法进行插补, 并对插补效果与实测风速进行对比分析。由于本文数据为单点观测, 缺乏空间分布信息, 空间插值类方法不具备适用性; 滑动平均法等时间序列方法多用于短时缺测, 难以适应全年尺度的插补需求, 因此选用线性回归法作为具有代表性的传统插补方法进行比较。2种方法的主要误差指标见表3, 对应的全年风速时间序列对比结果见图7, 其中比值法插补结果见图7(a), 线性回归法插补结果见图7(b)。

表3 比值法与线性插值法误差对比

Tab. 3 Comparison of Errors Between Ratio Method and Linear Interpolation Method

方法	$R$	$R_{RMSE}/$ (m/s)	$R_{MAE}/$ (m/s)	$R_{BIAS}/$ (m/s)	$R_{MRE}/$ %
比值法	0.839	2.166	1.605	-0.501	25.87
线性回归法	0.691	2.748	2.109	-0.003	40.17

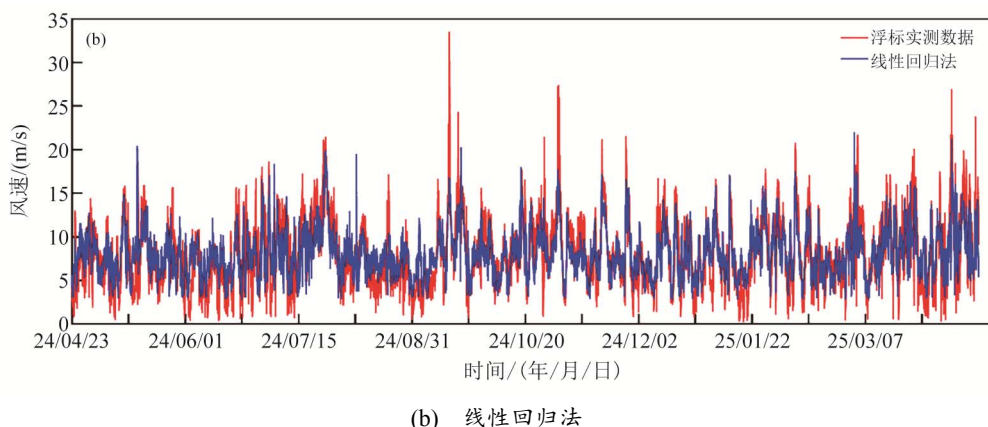


图7 不同插补方法与浮标实测风速的时间序列对比图(续)

Fig. 7 Time Series Comparison of Interpolated Wind Speeds and Buoy-Measured Data Using Different Methods (Continued)

由表3可知,比值法在多项统计指标上整体优于线性回归法。比值法的 $R$ 为0.839,显著高于线性回归法的0.691,表明其在风速时序趋势的拟合方面表现更优;比值法的 $R_{RMSE}$ 和 $R_{MAE}$ 分别为2.166 m/s和1.605 m/s,均低于线性回归法的2.748 m/s和2.109 m/s,反映出比值法具有更高的插补精度。需要指出的是,虽然比值法存在一定的系统性低估(比值法的 $R_{BIAS}$ 为 $-0.501$  m/s,线性回归法的 $R_{BIAS}$ 接近0,为 $-0.003$  m/s),但这并不代表其实际效果不佳。这可能是因正负误差在统计过程中相互抵消所致,即高风速时低估、低风速时高估,导致整体平均值呈现“假性无偏”。因此,单独使用BIAS指标并不能全面反映插补性能。

为进一步衡量插补方法在相对误差尺度上的总体表现,本文引入平均相对误差 $R_{MRE}$ 作为补充评价指标。结果显示,比值法的 $R_{MRE}$ 为25.87%,明显低于线性回归法的40.17%,说明前者在控制相对误差幅度方面更具优势。综合 $R$ 、 $R_{RMSE}$ 、 $R_{MRE}$ 、 $R_{BIAS}$ 及 $R_{MRE}$ 等5项指标来看,比值法在风速数据插补中的拟合能力、一致性和精度均优于线性回归法,尤其适用于风速波动剧烈或极端天气条件下的插补需求。

图7的时间序列对比进一步验证上述结论。图7(a)显示,比值法插补结果在多数时段能较好地跟踪实测风速的变化趋势,尽管在风速快速上升或极值阶段仍存在一定响应滞后和低估现象,但整体走势与实测值较为一致,能较好地反映风速的动态变化特征。相比之下,图7(b)中线性回归法的插补结果波动幅度明显收敛,曲线呈现显著平滑化趋势,反映出其对风速高频波动的响应能力较弱。这种“平滑”效应在一定程度上解释了其 $R_{BIAS}$ 值较低的原因:通过压低极值使正负误差在全年尺度上相互抵消,从而掩盖实际的插补偏差。

综上所述,尽管比值法在高风速阶段仍存在一定的响应滞后问题,但其在风速趋势保持、误差控

制及整体拟合性能方面均优于传统线性回归法。特别是在风速变化剧烈或极端天气背景下,比值法表现出更高的稳定性与鲁棒性,验证了其在复杂海洋风场条件下的适用性与工程实用价值。

#### 4 结论

本文基于ERA5再分析资料和海上漂浮式测风激光雷达实测数据,提出了一种适用于海上风速缺测场景的比值插补方法,结合某近海浮标实测风速资料,围绕全年尺度、季节变化、风力等级及典型极端天气过程开展了系统性评估。主要结论如下:

1) 在全年尺度上,插补风速与实测值的相关系数为0.839,能较好地反映风速的时序演变趋势,但在幅值恢复方面仍存在偏差, $R_{RMSE}$ 为2.166 m/s, $R_{BIAS}$ 为 $-0.501$  m/s,整体呈现系统性低估特征。

2) 季节性对比显示,秋冬季(9月—次年2月)风速稳定,插补效果较好,误差较小;而夏季(6—8月)对流活跃、风速波动剧烈,插补误差显著增大,尤其在6月和7月全天各时段均出现明显低估,表明比值法在强扰动环境下的适应性有限。

3) 不同风力等级下的插补性能存在差异。在中低风速区间(2~5级)插补效果较好,误差控制较为理想;极低风速时易出现高估,高风速(6级以上)下误差迅速扩大,插补结果普遍偏低,限制了其在极端风速条件下的适用性。

4) 台风过程分析进一步印证了比值法在高风速情境下的响应局限性。尽管整体趋势与实测一致,但在台风风速快速增长和剧烈波动阶段,插补值明显低于实测值,表现为相关性下降、误差扩大,说明该方法对极端天气过程的捕捉能力仍需提升。

5) 与传统线性回归法的对比表明,比值法在风速插补的一致性、趋势保持及误差控制方面整体表现更优,尤其在风速剧烈波动或极端天气条件下具有更高的稳定性与鲁棒性,工程适应性更强。

总体而言, 比值法作为一种基于物理意义明确、实现简便的风速插补方法, 在风速平稳、变化规律清晰的海域环境中展现出良好的适用性, 尤其适用于秋冬季节和中低风速区间, 可用于中长期风资源评估与观测数据修复。然而, 在对流强盛、风速剧烈波动的夏季及台风等极端天气影响期间, 插补误差明显增大, 准确性不足。未来研究可在比值法基础上, 结合高分辨率数值模拟资料、机器学习方法或多源资料融合策略, 提升其在复杂风场环境下的动态适应能力与插补精度。

### 参考文献:

- [1] 徐乾耀, 康重庆, 张宁, 等. 海上风电出力特性及其消纳问题探讨[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 54-59.  
XU Q Y, KANG C Q, ZHANG N, et al. Discussion on the Output Characteristics and Consumption Issues of Offshore Wind Power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 54-59.
- [2] 张雪芝, 王维庆, 王海云. 风电场的风资源评估及产能预估[J]. 可再生能源, 2017, 35(12): 1876-1880.  
ZHANG X Z, WANG W Q, WANG H Y. Wind Resource Assessment and Capacity Estimation of Wind Farms[J]. Renewable Energy, 2017, 35(12): 1876-1880.
- [3] 全国能源基础与管理标准化技术委员会新能源和可再生能源分技术委员会. 风电场风能资源评估方法: GB/T 18710—2002[S]. 2002.  
China National Technical Committee for Energy Fundamentals and Management Standardization, Subcommittee for New and Renewable Energy. Wind Farm Wind Energy Resource Assessment Method: GB/T 18710—2002 [S]. 2002.
- [4] 李泽椿, 朱蓉, 何晓凤, 等. 风能资源评估技术方法研究[J]. 气象学报, 2007(5): 708-717.  
LI Z C, ZHU R, HE X F, et al. Research on Wind Energy Resource Assessment Techniques[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2007(5): 708-717.
- [5] 陆艳艳, 刘树洁, 王涛. 海上风能资源测量及评估中几个关键问题分析[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(2): 170-178.  
LU Y Y, LIU S J, WANG T. Analysis of Key Issues in Offshore Wind Energy Resource Measurement and Assessment[J]. Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 170-178.
- [6] 李正泉, 宋丽莉, 马浩, 等. 海上风能资源观测与评估研究进展[J]. 地球科学进展, 2016, 31(8): 800-810.  
LI Z Q, SONG L L, MA H, et al. Research Progress on Offshore Wind Energy Resource Observation and Assessment[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(8): 800-810.
- [7] 易侃, 李肖雅, 朱碧泓, 等. 基于漂浮式测风激光雷达观测数据的海上预报风速订正[J]. 热带气象学报, 2024, 40(2): 226-236.  
YI K, LI X Y, ZHU B H, et al. Correction of Offshore Forecast Wind Speed Based on Floating Lidar Observation Data[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2024, 40(2): 226-236.
- [8] 王浩, 易侃, 杜梦蛟, 等. 漂浮式激光雷达海上测风可靠性及影响因素研究[J]. 海洋预报, 2022, 39(5): 70-83.  
WANG H, YI K, DU M J, et al. Study on the Reliability and Influencing Factors of Offshore Wind Measurement by Floating Lidar[J]. Marine Forecasts, 2022, 39(5): 70-83.
- [9] 姚若军, 颜伟, 王从保, 等. 海上风电测风方式比较及数据浅析[J]. 红水河, 2022, 41(4): 68-73.  
YAO R J, YAN W, WANG C B, et al. Comparison of Offshore Wind Measurement Methods and Brief Analysis of Data[J]. Hongshui River, 2022, 41(4): 68-73.
- [10] GERRIT W, OLIVER B, JULIA G. Analysis of Wind Speed Deviations Between Floating Lidars, Fixed Lidar and Cup Anemometry Based on Experimental Data[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2362(1): 0110360.
- [11] GOTTSCHELL J, WLIKEN-MöHLMANN G, VIERGUTZ T, et al. Results and Conclusions of a Floating-Lidar Offshore Test[J]. Energy Procedia, 2014: 53156-53161.
- [12] 高洁, 胡己坤, 刘雨佳, 等. 再分析资料在风速数据插补延长中的应用方法研究[J]. 风能, 2019(7): 62-68.  
GAO J, HU J K, LIU Y J, et al. Study on the Application Methods of Reanalysis Data in Wind Speed Data Interpolation and Extension[J]. Wind Energy, 2019(7): 62-68.
- [13] 韩二红, 温新龙, 王彬滨, 等. 气象再分析资料在复杂山地风电场测风塔数据的插补应用[J]. 江西科学, 2017, 35(2): 200-205.  
HAN E H, WEN X L, WANG B B, et al. Application of Meteorological Reanalysis Data in Interpolation of Wind Measurement Tower Data in Complex Mountainous Wind Farms[J]. Jiangxi Science, 2017, 35(2): 200-205.
- [14] 顾正强, 龚强, 沈历都, 等. 辽宁省典型地形测风塔缺测数据线性计算适用性分析[J]. 气象与环境学报, 2021, 37(6): 93-99.

- GU Z Q, GONG Q, SHEN L D, et al. Applicability Analysis of Linear Calculation of Missing Data from Typical Terrain Wind Measurement Towers in Liaoning Province[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2021, 37(6): 93-99.
- [15] 刘霄, 赖旭, 郑付明. 基于再分析数据的测风数据插补方法[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(7): 78-83.
- LIU X, LAI X, ZHENG F M. Wind Measurement Data Interpolation Method Based on Reanalysis Data[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 45(7): 78-83.
- [16] 许昌, 吉晓红, 胡会永, 等. 利用再分析数据插补测风数据的准确性分析[J]. *风能*, 2017(5): 100-104.
- XU C, JI X H, HU H Y, et al. Accuracy Analysis of Wind Measurement Data Interpolation Using Reanalysis Data[J]. *Wind Energy*, 2017(5): 100-104.
- [17] 刘崇波, 文雯, 盛科. 风电场测风数据插补方法适用性研究[J]. *风能*, 2021(7): 64-70.
- LIU C B, WEN W, SHENG K. Study on the Applicability of Wind Measurement Data Interpolation Methods in Wind Farms[J]. *Wind Energy*, 2021(7): 64-70.
- [18] 贾晓红, 石岚, 郝玉珠. 基于风电场片区风速的人工智能插补方法对比[J]. *太阳能学报*, 2025, 46(1): 168-175.
- JIA X H, SHI L, HAO Y Z. Comparison of Artificial Intelligence Interpolation Methods Based on Wind Speed in Wind Farm Areas[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2025, 46(1): 168-175.
- [19] 于佳鹤, 崔杰, 王风涛. 风电场测风数据插补方法研究及插补结果偏差分析[J]. *太阳能*, 2021(2): 26-35.
- YU J H, CUI J, WANG F T. Research on Wind Measurement Data Interpolation Methods in Wind Farms and Analysis of Interpolation Result Bias[J]. *Solar Energy*, 2021(2): 26-35.
- [20] 王远, 钟华. 风电场缺失测风数据插补方法的分析[J]. *可再生能源*, 2012, 30(3): 14-17.
- WANG Y, ZHONG H. Analysis of Interpolation Methods for Missing Wind Measurement Data in Wind Farms[J]. *Renewable Energy*, 2012, 30(3): 14-17.
- [21] 谢建华, 汪萍萍, 张焕宇. 风电场测风数据的插补和修正[J]. *能源工程*, 2010(6): 35-37.
- XIE J H, WANG P P, ZHANG H Y. Interpolation and Correction of Wind Measurement Data in Wind Farms[J]. *Energy Engineering*, 2010(6): 35-37.
- [22] 尹旭, 利昭仪, 朱雨露, 等. 风电场测风数据插补的不确定度研究[J]. *可再生能源*, 2023, 41(5): 625-630.
- YIN X, LI Z Y, ZHU Y L, et al. Study on the Uncertainty of Wind Measurement Data Interpolation in Wind Farms[J]. *Renewable Energy*, 2023, 41(5): 625-630.
- [23] 刘志远, 李良县, 任腊春. 插补测风塔缺测数据的相关性计算方法讨论[J]. *可再生能源*, 2016, 34(9): 1342-1347.
- LIU Z Y, LI L X, REN L C. Discussion on Correlation Calculation Methods for Interpolation of Missing Wind Measurement Tower Data[J]. *Renewable Energy*, 2016, 34(9): 1342-1347.
- [24] SHUKUR B O, LEE H M. Imputation of Missing Values in Daily Wind Speed Data Using Hybrid AR-ANN Method[J]. *Modern Applied Science*, 2015, 9(11): 1.
- [25] LIU K, CAI Y. A Deep Convolutional Generative Adversarial Network for Data Imputation: Application to Wind Speed Time Series[J]. *Advances in Wind Engineering*, 2025, 2(2): 100054.
- [26] FLORES A, TITO H, CENTTY D. Recurrent Neural Networks for Meteorological Time Series Imputation[J]. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 2020, 11(3): 1-10.
- [27] KATJA R, CYRUS S. Comparison of Different Wind Data Interpolation Methods for a Region with Complex Terrain in Central Asia[J]. *Climate Dynamics*, 2018, 51(9-10): 3635-3652.
- [28] CHEN Y R, CAI C D, CAO L L, et al. WindFix: Harnessing the Power of Self-Supervised Learning for Versatile Imputation of Offshore Wind Speed Time Series[J]. *Energy*, 2024: 287128995.