

谐波分析在风速数值预报订正中的应用

李雪雪¹ 刘阳²

1. 科右前旗气象局, 中国·内蒙古 兴安盟 137400

2. 兴安盟气象局, 中国·内蒙古 兴安盟 137400

摘要: 风电场风速预报对电厂进行风电功率的调度具有重要作用。论文使用内蒙古乌兰察布某大型风电场风机的实际测风资料和 SCMOC 数值预报模式在该风电场风机高度的预报风速资料, 使用谐波分析方法对数值预报模式的风速预报误差的日变化进行拟合; 提出了基于 BP 神经网络的谐波参数预报模型, 用每日 8~11h 的实际风速误差值作为 BP 神经网络的输入来预测当日的谐波参数, 然后利用谐波参数的预报值得到当日的风速误差预报值, 最终再将风速误差预报值用于数值预报模式风速预报的订正; 通过 16 天的独立样本检验, 主要误差指标均有不同程度的改善。

关键词: 谐波分析; 风电场; SCMOC; BP 神经网络; 订正预报

Application of Harmonic Analysis in Wind Speed Numerical Prediction Correction

Xuexue Li¹ Yang Liu²

1. Meteorological Bureau of Keyouqian Banner, Xing'an League, Inner Mongolia, 137400, China

2. Xing'an League Meteorological Bureau, Xing'an League, Inner Mongolia, 137400, China

Abstract: Wind speed forecasting plays an important role in the scheduling of wind power in power plants. This paper uses actual wind measurement data of wind turbines in a large wind farm in Ulanqab, Inner Mongolia, and the forecast wind speed data of SCMOC numerical forecasting model at the height of the wind turbines in the wind farm. The harmonic analysis method is used to fit the daily variation of the wind speed forecast error of the numerical forecasting model; A harmonic parameter prediction model based on BP neural network was proposed. The actual wind speed error value of 8-11h per day was used as the input of the BP neural network to predict the harmonic parameters of the day. Then, the predicted value of the harmonic parameters was used to obtain the wind speed error prediction value of the day. Finally, the wind speed error prediction value was used to correct the wind speed prediction in the numerical prediction model; Through 16 days of independent sample testing, the main error indicators have shown varying degrees of improvement.

Keywords: harmonic analysis; wind farms; SCMOC; BP neural network; revised forecast

0 前言

随着全球气候环境变化和能源危机的出现, 清洁能源得到了高度重视。近几年来中国大范围发生的电荒、煤荒及空气污染等问题凸显出了当前能源供应的严峻形势及清洁能源使用的迫切性。

风能利用相较于其他新能源技术较为成熟, 满足一定风速要求的区域均可以安装风力电机, 所以风电的发展最为迅速。中国风能资源丰富。中国气象局风能太阳能评估中心开展的第四次中国风能资源的详查和评估指出: 全国陆上 50m 高度层年平均风功率密度大于等于 300 瓦/平方米的风能资源理论储量约 73 亿千瓦, 其中 70m 高度风能资源技术可开发量内蒙古自治区最大。论文研究区域是内蒙古典型的草原风电场。

中国的风电行业相较于欧美国家起步较晚, 不过发展速度相对较快。预计在 2030 或 2040 年前后, 中国的风力发电装机容量可望超过 1 亿千瓦, 成为继火电和水电之后的第三大发电能源。截至 2010 年, 中国的装机容量为

42287MW, 居于世界第一位。不过, 在 2020 年各个国家风电的贡献中, 中国则是 1.17%。造成中国风电贡献率不高的原因很大一部分在于风电并网的困局。

风电的输出功率决定于空气密度、风能转化率和风速, 其中风速是最主要的影响因子。因为风速的不稳定性和随机性, 导致了风力发电的不稳定性和随机性, 大的风电波动对于电网的稳定性运行极为不利。所以, 在风电功率的日常调度中, 风电场风速的预报具有重要的作用。

目前风电场的超短期预报方法的研究主要使用的是统计预报方法, 该方法主要使用风电场的历史实际测风资料进行建模, 主要使用的统计理论包括: 持续法、卡尔曼滤波法、时间序列法、空间相关法、模糊逻辑法以及人工神经网络方法等人工智能方法。

因为风速的变化是由大气运动所影响的, 所以风电场短期以及中长期风速预报则必须考虑数值天气预报的风速预报结果。很多学者对数值天气预报风电场风速预报的适用性进行了研究, 表明使用统计方法对数值模式的预报结果进

行订正是改善气象数值模式预报结果的有效办法。

论文拟利用 2021 年 11~12 月内蒙古乌兰察布某大型风电场 132 台风机的实际测风资料和与中央气象台下发的国家级智能网格预报产品（以下简称 SCMOC）在该风电场风机高度的预报风速资料，在对 SCMOC 数值预报模式风电场的风速预报误差的日变化进行分析的统计基础上，使用谐波分析方法对其进行拟合，提出了基于 BP 神经网络的谐波参数预报模型，然后利用谐波参数的预报值得到当日 24h 的风速误差预报值，最终再将风速误差预报值用于 SCMOC 数值预报模式风速预报的订正，得到 24h 的风电场短期风速预报值，希望可以提高 SCMOC 数值预报模式在该风电场风机高度的短期风速预报的精度，为大型风电场的短期风速预报提供技术参考。

1 资料简介

2014 年开始，中国气象局开始智能网格预报业务研究，首先研发了全国分辨率为 10km 的格点指导产品，该产品主要与城镇要素预报相协调；而后逐渐将空间分辨率细化到 5km，并开始发布指导产品，省市级气象局进行本地化订正，最终拼成建立“一张网”的智能预报无缝隙业务新流程。中国智能网格预报业务在 2018 年进入了单轨运行阶段，逐步停止了固定城市及乡镇的定点预报；一年时间就实现了短时滚动与延伸期网格预报同步的业务化试运行，这标志着中国无缝隙网格气象预报产品机制已经初步建立。目前，中国智能网格天气预报业务技术体系采用“分时施策、多源集合”的路线，即各预报时效运用不同的初始场资料和数据后处理方法，并通过优选或权重进行整合。在国家局，对温度等常规资料，主要基于自主研发的（Global Regional Assimilation and Prediction System，简称 GRAPES）模式，在此基础上采用分地区建模方法或格点化 MOS 技术；对于降水格点预报，开发采用了多种数值模式类似分析集合方法，集合最优的百分位方法，频率拟合修订技术，并进行主客观一体化的智能平台研制，形成全国性的无缝隙定量降水气象预报业务。在省、市一级气象局，根据当地实际情况和气候特点，开发了各类后处理方法，如福建省吴启树等人开发了最优 TS 评分预报修订算法；陕西省王建鹏等人开发了动态交叉最优预报技术；黑龙江省气象局王承伟等人采用多模式融合预报手段；上海市的王海宾等采用了“平均数递减”等本地化智能网格预报技术。因此，在中国气象预报服务统一数据来源“一张网”的前提下，智能网格预报业务也正式上线启用，使用者可随时随地获得基于位置的精细化气象服务，这也意味着中国气象预报技术已经实现了从传统站点向格点预报的开拓性转变。中国智能网格预报业务在时间精度上实行 24h 内逐小时更新预报，甚至部分地区实现了分钟级预报，2~10d 内逐 3h 预报。在空间精度上，全国陆地为 5km × 5km，责任海区范围内为 10km × 10km。

实测研究资料采集于内蒙古乌兰察布草原的某大型风电场，该风电场共有 132 台 S48/750 型风力发电机。研究采集实测资料时段为 2021 年 11 月 1 日到 2021 年 12 月 31 日，要素包括各风机位置 50m 高度风速，采样时间间隔为 15min。风电场实测风速资料为 50m 高度的数值预报网格点资料，时间间隔为 1h，预报时效为 24h。实测风电场的风速取 132 台风机的平均风速作为场平均风速，将 15min 进行平均求得 1h 分辨率的数据，模式风速是将 SCMOC 模式的格点数值预报风速插值到各个风机位置，并计算得场平均模式预报风速。

2 SCMOC 模式风电场风速预报误差分析

图 1 是场平均风机实测风速与场平均模式预报风速的相关散点图，SCMOC 模式对于风电场 50m 风机高度的风速预报具有一定的精度，两者的线性相关系数为 0.6432。图 2 是场平均风机实测风速与场平均模式预报风速的曲线图，从图中可以看到，SCMOC 模式经常会高估风电场 50m 风机高度的风速，且对于一些风速高值和风速低值区的预报效果较差。

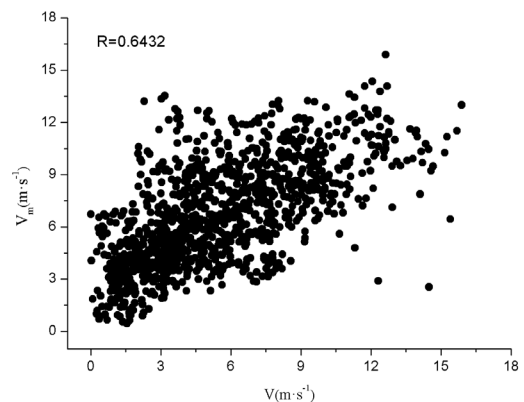


图 1 场平均风机实测风速与场平均模式预报风速的相关散点图

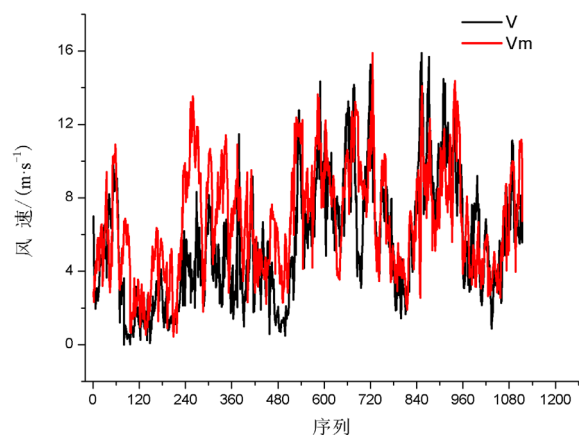


图 2 场平均风机实测风速与场平均模式预报风速的曲线图

SCMOC 模式的风速预报误差由公式（1）求得， v_t 是 50m 高度的场平均风机实测风速， v_{NWPt} 是插值到各个风机

后的场平均模式预报风速。

$$\Delta v_t = v_t - v_{NWPt} \quad (1)$$

使用公式 (2) ~ (4) 计算出场平均风机实测风速相对于 SCMOC 模式的风速预报的平均误差、平均绝对误差以及平方根误差得到表 1。平均误差可以在一定程度上代表模式的系统性偏差，场平均风机实测风速相对于 SCMOC 模式的风速预报的平均误差为 $-1.1728\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，说明模式对于场的平均风速经常高估，模式有着一定的系统性偏差；场平均风机实测风速相对于 SCMOC 模式的风速预报的平均绝对误差达到了 $2.2701\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，说明模式对于场平均风速的预报精度较差，而且不能满足风电场短期风电调度的精度需求；场平均风机实测风速相对于 SCMOC 模式的风速预报的均方根同样达到了 $2.9138\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从上述统计分析可知，SCMOC 模式对该风电场的场平均风速预报精度较低，预报能力有一定的改善空间。

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_t - v_m \quad t=1,2,3,\dots,N \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |v_t - v_m| \quad t=1,2,3,\dots,N \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_t - v_m)^2} \quad t=1,2,3,\dots,N \quad (4)$$

表 1 场平均风机实测风速相对于 SCMOC 模式的风速预报的误差指标

平均误差 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	平均绝对误差 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	均方根误差 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
-1.1728	2.2701	2.9138

3 基于谐波分析和 BP 神经网络的 SCMOC 模式短期风速订正方法

3.1 谐波分析简介与 SCMOC 模式短期风速预报误差的谐波分析

谐波分析是一种应用广泛的周期分析方法，在气象研究中也有广泛的应用。由傅里叶级数理论可知：一个基本周期为 T 的函数或者序列，在一定条件下总能表示成一些不同相位和振幅的正弦波叠加。谐波分析主要思想是将所要研究不规则要素序列的周期成分视为正弦波，从而可以使用若干谐波分量来拟合或者逼近所需要研究的要素序列，分析其主要周期的统计特征和变化情况。

对 SCMOC 模式风速数值预报误差进行日变化特征的分析 (见图 3)，近地层风速的 SCMOC 模式数值预报误差呈现明显的日变化特征，日变化曲线出现明显的两个波峰和两个波谷的特征，所以将 SCMOC 模式数值预报误差逐时平均值以三角级数展开：

$$\Delta \bar{v}(t) = C_0 + \sum_{k=1}^2 C_k \sin\left(\frac{2\pi kt}{T} + \varphi_k\right) \quad (t=1 \dots 24; T=24) \quad (5)$$

计算结果为 $C_0=-1.13$, $C_1=0.28$, $C_2=0.56$, $\varphi_1=121.81^\circ$,

$\varphi_2=2.81^\circ$ ，第一谐波的方差贡献率约为 12.65%，第二谐波的方差贡献率约为 49.93%。两阶波的累计方差贡献率约达到 62.58%，可以使用两阶波去拟合 SCMOC 模式风速数值预报误差的日变化。

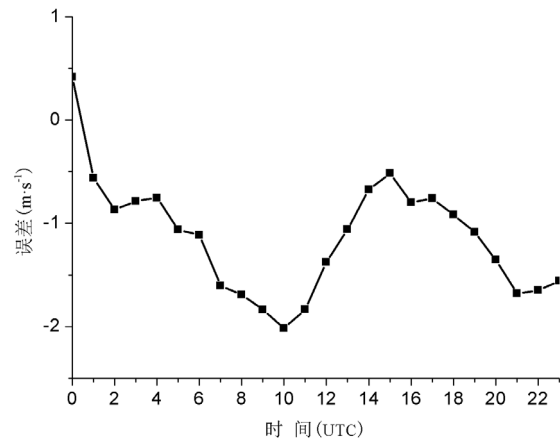


图 3 SCMOC 模式风速数值预报误差的日变化

3.2 BP 神经网络简介以及谐波参数的 BP 神经网络预报模型

BP 神经网络是一种人工智能学习算法，主要思想是以误差的反向传播来不断调整网络的权重和阈值，广泛应用于各研究领域。BP 网络包括输入层、隐含层和输出层，它模仿人工神经元的工作原理，给出模型的输入和输出，网络会找出输入和输出的映射关系，因此它特别适用于非线性系统的研究。在气象领域，也常使用 BP 网络进行气象预报的研究与应用。

SCMOC 模式风速数值预报误差的谐波参数各序列具有典型时间序列的高度非线性，分析表明使用二阶谐波对其进行拟合是合理的。但在选择预报模型时，应考虑几个谐波参数的匹配性，论文选用 BP 神经网络来建立预报模型，其具有很强的非线性映射和自适应能力，而且它可以一次性输出多个值，可以有效避免对 5 个谐波参数分别建立预报模型导致参数重组的不匹配问题。数值模式自身的特点使得数值预报初始场起报阶段的误差对于其后的预报误差有着重要的影响，从大气的混沌性角度，也可以认为其所包含的混沌信息较多。所以对于 BP 模型的输入因子采用当天起报阶段的若干时次风速数值预报误差值 Δv_t ，目标输出则是当天的谐波参数。以 2021 年 11~12 月 SCMOC 模式在内蒙古乌兰察布某大型风电场的风速数值预报误差 45d 的样本为训练集，16d 作为模型的验证集 (预报集)，经过 BP 神经网络模型的多次试验，最终 BP 模型的相关参数如表 2 所示。

表 2 BP 模型参数

输入节点	网络层数	隐含层节点	输出节点	传递函数	训练方法
4	3	5	5	logsig、 线性函数	L-M 方法

4 订正预报效果分析

将上述模型预报出每天 24h 周期的谐波参数代入公式 (5) 求得 $\Delta\hat{v}_t$ ，然后利用公式 (6) 得到 24h 的短期风速预报。

$$\hat{v}_t = \Delta\hat{v}_t + v_{NWPt} \quad (6)$$

计算了验证样本 16d 的订正预报值、原始 SCMOC 模式风速数值预报与场平均实测风机风速值的误差指标得到表 3。使用模型进行统计订正后的使得 SCMOC 模式风速数值预报的预报能力得以提升，平均偏差有明显的改善，说明使用订正模型进行统计订正后使得 SCMOC 模式的风速预报系统性误差得以减小；预报精度也有明显改善，平均绝对误差相对原始的 SCMOC 模式风速数值预报值减小 27.4%；均方根误差相对原始的 SCMOC 模式风速数值预报值减小 20%。图 4 是实测风速、SCMOC 模式风速数值预报值和订正预报值的变化曲线图，对于实测风速波峰和波谷的预报能力相较于原始 SCMOC 模式的风速预报有一些提高，但是提高的不是很明显。

表 3 订正预报值、原始 SCMOC 模式风速数值预报
分别与场平均实测风机风速值的误差指标

	平均误差 (m·s ⁻¹)	平均绝对误差 (m·s ⁻¹)	均方根误差 (m·s ⁻¹)
SCMOC 模式风速数值预报	-2.37	2.77	3.50
订正预报风速	-1.31	2.01	2.80

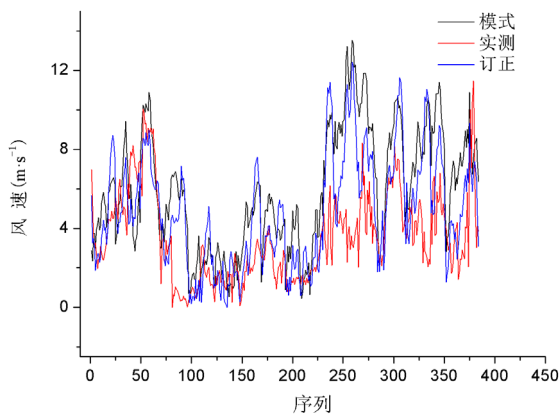


图 4 实测风速、SCMOC 模式风速数值预报和订正预报值的变化曲线

5 结论

风电场短期风速预报对电力调度中心进行风电功率的调度和优化所用电能的配置具有重要作用。论文使用内蒙古乌兰察布某大型风电场风机的实际测风资料和 SCMOC 数值预报模式在该风电场风机高度的预报风速资料，对 SCMOC 数值预报模式风电场的风速预报误差的日变化进行分析，使用谐波分析等统计方法对 SCMOC 数值预报模式在该风电场风机高度 (50m) 的预报风速进行订正，建立风电场所需的

0~24h 短期风速预报模型，得到以下结论：

① SCMOC 模式对于场的平均风速经常高估，系统性偏差明显，模式的风速预报的平均误差为 $-1.17\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，场平均风机实测风速相对于 SCMOC 模式的风速预报的平均绝对误差达到了 $2.27\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，模式对于场平均风速的预报精度较差。②经过统计分析发现，SCMOC 数值预报模式风电场的风速预报误差具有明显的两阶谐波日变化特征，使用二阶波进行风速误差日变化拟合是合理的，谐波分析的第一、第二谐波的贡献率分别达到 12.65%、49.93%，两谐波累计方差贡献率 62.58%。③提出了基于 BP 神经网络的谐波参数预报模型，通过 16 天的独立样本检验，场平均的短期风速预测的平均绝对误差由 2.77m/s 下降到 2.01m/s，其他主要误差指标均有不同程度的改善。

参考文献：

- [1] 韦青,代刊,林建,等.2016—2018年全国智能网格降水及温度预报检验评估[J].气象,2020,46(10):1272-1285.
- [2] 赵声蓉.SKM格点化气象要素预报产品业务化运行技术报告[R].北京:中国气象局,2015.
- [3] 沈文海.“智慧气象”内涵及特征分析[J].中国信息化,2015,2(1):80-91.
- [4] 赵声蓉,赵翠光,赵瑞霞,等.我国精细化客观气象要素预报进展[J].气象科技进展,2012,3(5):12-21.
- [5] 金荣花,代刊,赵瑞霞,等.我国无缝隙精细化网格天气预报技术发展与挑战[J].气象,2019,42(4):445-457.
- [6] 曾少军.全球能源与环境现状及前景[J].国际经济分析与展望,2012:183-195.
- [7] 孙川永.风电场风电功率短期预报技术研究[D].兰州:兰州大学,2009.
- [8] 中国气象局风能太阳能评估中心.中国风能资源的详查和评估[J].风能,2011(8):26-30.
- [9] 罗承先.世界风力发展现状与前景预测[J].中外能源,2012,17(3):24-31.
- [10] 林万涛,王建国,张文煜,等.基于数值模拟和统计分析及智能优化的风速预报系统[J].气候与环境研究,2012(5):646-658.
- [11] 伍玉梅,何宜军,孟雷.利用卫星资料反演月平均近海面气温和湿度[J].海洋与湖沼,2008(6):546-551.
- [12] 何慧,金龙,覃志年,等.基于BP神经网络模型的广西月降水量降尺度预报[J].热带气象学报,2007(1):72-77.
- [13] 吴建生,刘丽萍,金龙.粒子群-神经网络集成学习算法气象预报建模研究[J].热带气象学报,2008(6):679-686.
- [14] 张韧,彭鹏,洪梅,等.近赤道海温对西太平洋副高强度的影响机理—模糊映射诊断[J].大气科学学报,2013(3):267-276.

作者简介：李雪雪 (1993-)，女，蒙古族，中国内蒙古突泉人，硕士，工程师，从事天气预报与气象服务研究。