

基于数据分层预处理的短期风功率预测研究

章 伟, 邓院昌, 魏 桢

(中山大学 工学院, 广东 广州 510006)

摘要: 良好的风速和风功率预测是解决风电并网问题的关键。针对样本数据中的无效点影响风功率建模问题, 采用分层统计法对风功率进行统计分析后获得了风速—功率关系带, 对功率进行修正, 根据修正后的数据应用灰色—马尔可夫链模型进行预测, 并与比恩法和经验公式法进行对比分析。结果表明, 风功率分层统计法可有效地消除坏点数据, 预测精度高。

关键词: 数据分层; 预处理; 风功率预测; 分层统计法; 灰色—马尔可夫链模型

中图分类号: TM614

文献标志码: A

随着风电技术的日渐成熟, 风电并网容量大幅增加, 大规模的风电并网对电力系统的影响日益明显。良好的风功率预测是解决风电并网问题的关键, 其在电力调度、风电场运行中的地位日趋重要。风速预测方法有多种, 如数值天气预报法^[1]、持续法^[2]、时间序列法^[3]、人工神经网络法^[4]等, 但这些方法建模时需较多的样本数据, 计算复杂。而灰色理论建模所需数据量少, 目前已用于风速预测领域^[5], 风速的随机性特点也适合于马尔可夫链模型。在风速预测的前提下进行风电功率预测, 常用的预测方法是根据风功率的经验公式求得预测功率^[6], 也有基于历史数据的风功率建模方法(如比恩法^[7]), 这些都是基于一条功率曲线进行延伸预测, 未考虑功率分布的杂散性。为此, 本文将灰色理论与马尔可夫链相结合, 利用少量样本, 先通过灰色理论预测出风速值, 再根据马尔可夫链的状态转移矩阵, 得出风速误差数据的预测值, 最后得出风速预测结果; 并采用风速功率关系带分层法^[8]建模, 建立关系带, 用于提取有效功率点进行功率预测。

1 灰色—马尔可夫链预测模型

1.1 灰色模型

灰色预测是一种对含有不确定因素的系统进行预测的方法, 通过对部分已知信息的分析, 再从中提取有价值的信息, 实现对系统运行状态的正

确描述和有效监控。风速具有较大的随机性, 同时也存在不确定因素, 因此可将风速序列视为一个灰色系统进行研究。模型建立的基本步骤如下。

步骤 1 对原始风速序列 $x^{(0)}(k)$ 进行一阶累加生成后得到序列 $x^{(1)}(k)$ 。

步骤 2 用累加后的序列生成紧邻均值序列:

$$\begin{cases} Z^{(1)}(k) = 0.5x^{(1)}(k) + 0.5x^{(1)}(k-1) \\ k = 2, 3, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

步骤 3 建立灰色模型的微分方程:

$$dx^{(1)}/dt + ax^{(1)} = b \quad (2)$$

式中, a 、 b 均为参数, 可用最小二乘法求得。

因此, 微分方程的解为:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = (x^{(0)}(1) - b/a)e^{-ak} + b/a \quad (3)$$

步骤 4 对风速序列进行累减还原得到预测值:

$$\begin{cases} \hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (4)$$

1.2 马尔可夫链模型

马尔可夫链是指对任一随机过程, 当在某一时刻所处状态已知时, 此后的状态仅与该状态有关, 而与该时刻前状态无关。预测的基本思路是对数据序列求得状态转移矩阵, 根据转移矩阵对未来的变化趋势做出估计, 从而达到预测的目的。

设随机过程 $\{u_n\}$ 和离散的状态集 $I = \{i_0, i_1, \dots, i_n\}$, 若

$$\begin{aligned} p\{u_{n+1} = i_{n+1} \mid u_0 = i_0, u_1 = i_1, \dots, u_n = i_n\} = \\ p\{u_{n+1} = i_{n+1} \mid u_n = i_n\} \end{aligned} \quad (5)$$

则称 $\{u_n\}$ 为马尔可夫链, 并记 $p_{ij(k)} =$

收稿日期: 2013-03-11, 修回日期: 2013-04-19

作者简介: 章伟(1988-), 女, 硕士研究生, 研究方向为风资源评估与风速、风功率预测, E-mail: zhangweizd@yeah.net

通讯作者: 邓院昌(1972-), 男, 副教授, 研究方向为风能资源评估与风电场选址等, E-mail: dengych@mail.sysu.edu.cn

$p\{u_{m+k} = j | u_m = i\}$ 为在 m 时刻系统处于状态 i 前提下, 在 $m+k$ 时刻系统处于状态 j 的概率。

将数据序列分为若干种状态, 记为 E_1, E_2, \dots, E_n , 则状态转移概率为:

$$p_{ij(k)} = M_{ij(k)} / M_i \quad (6)$$

式中, $M_{ij(k)}$ 为数据序列从状态 E_i 经 k 步到状态 E_j 的转移个数; M_i 为数据序列处于状态 E_i 的原始数据个数。

构成相应的 k 步状态转移矩阵:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11(k)} & p_{12(k)} & \cdots & p_{1n(k)} \\ p_{21(k)} & p_{22(k)} & \cdots & p_{2n(k)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{n1(k)} & p_{n2(k)} & \cdots & p_{nn(k)} \end{bmatrix}$$

一般的马尔可夫链模型在确定了状态转移矩阵后, 便以当前点转移概率最大的值作为下一步的转移值, 忽略了其他转移概率发生的可能性。在此以当前点转移概率的期望值作为下一步的转移值, 因而 $k+1$ 时刻的状态转移值为:

$$y(k+1) = p_{k1}(s_1^- + s_1^+)/2 + p_{k2}(s_2^- + s_2^+)/2 + \cdots + p_{kn}(s_n^- + s_n^+)/2 \quad (7)$$

式中, $p_{k1}, p_{k2}, \dots, p_{kn}$ 为预测对象所处状态 k 的概率; $s_1^-, s_1^+, \dots, s_n^-, s_n^+$ 为对应状态的变动区间, 取区间的中点为预测值。

1.3 灰色—马尔可夫链模型

采用灰色—马尔可夫链模型进行风速预测是指根据灰色模型获得风速预测的相应值, 再利用马尔可夫链模型对预测误差序列进行分析, 得出最终的风速预测值, 具体步骤如下。

步骤 1 根据灰色模型得到风速的拟合和预测结果, 求得拟合数据与实际数据间的残差序列:

$$\begin{cases} e = [e_1, e_2, \dots, e_n] \\ e_k = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k) \end{cases} \quad (8)$$

步骤 2 对残差序列进行分析, 根据残差向量的分布情况进行状态划分, 再根据多次试验结果将其划分为 6 个状态, 并构造一步状态转移概率矩阵, 将每个状态用转移矩阵表示:

$$[s_1, s_2, \dots, s_6] = [(-\infty, -0.50), (-0.50, -0.25), (-0.25, 0), (0, 0.25), (0.25, 0.50), (0.50, +\infty)] \quad (9)$$

步骤 3 根据最后一个残差的状态和一步状态转移概率矩阵, 求出残差预测点所处的状态, 然后以此状态的概率期望值作为其可能的变化值 $y(k+1)$ 。

步骤 4 根据灰色预测值及残差预测值求得风速预测结果 $\hat{x}(k+1) = \hat{x}(k+1) + y(k+1)$, 再更新原始风速数据序列继续预测。

2 关系带的分层统计法

基于数理统计方法, 将风速功率散点图按功率分层和风速分层的方法统计风速和功率概率较集中的点得出风速功率关系带。所选风力机额定功率 850 kW, 切入风速 3 m/s, 额定风速 12 m/s, 切出风速 21 m/s。根据多次试验结果得出分层统计规则: 功率以 5 kW 分层, 风速以 0.1 m/s 分层, 图 1 为功率分层与风速分层后的结果。每条直线代表风速—功率对应点密集程度为 80% 的细长区域。由图 1 可看出: ①不同功率层和风速层对应的分布宽度大体保持不变, 分布范围随风速和功率的增长而保持一定的增长; ②在风速分层图中, 某些分层情况下细长区域较长, 主要是因为该风速区间对应的功率数据分布较分散, 密集度不明显。

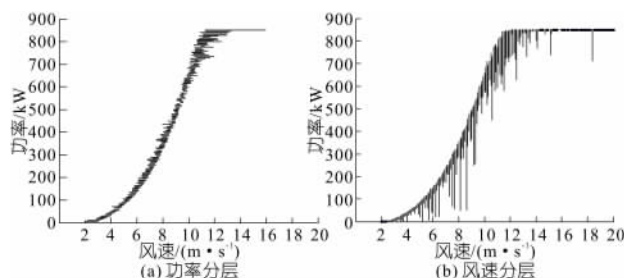


图 1 功率分层与风速分层

Fig. 1 Wind power and wind speed layered statistics graph

再对两种分层方式进行合并, 对合并中的公共区域进行平滑处理, 采用拟合方法得到两条包络关系带, 见图 2。所有落在关系带中的点将作为预测过程中的有效功率点。

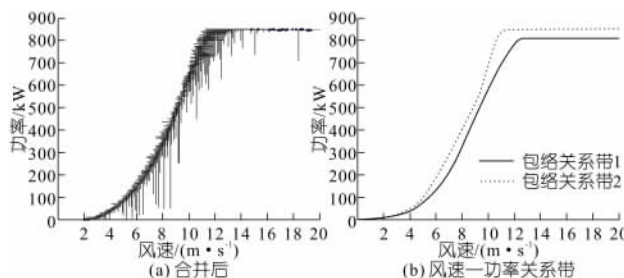


图 2 分层方法合并后的图及风速功率关系带

Fig. 2 Layered method graph and wind speed and wind power relations graph

基于分层统计法的风功率预测流程步骤如下。

步骤 1 起始预测时, 历史风功率数据先经过关系带的检测。当实际功率大于关系带上限值时, 令实际功率等于上限功率; 当实际功率小于关系带下限值时, 令实际功率等于下限功率。

步骤 2 采用灰色—马尔可夫链模型预测出

风速后查找其所在的风速层,得出对应的理想功率变化范围。

步骤 3 预测该时刻的功率值,并与对应的风速—功率关系带进行比较,看是否在允许变化范围的 10% 以内。

步骤 4 若功率超出变化范围,回到步骤 1 进行校正,更新功率数据继续预测。

3 实例分析

以某风力机实测风速和风功率数据为例,选取有坏点和无坏点两种情况的风速和功率序列进行分析。有坏点的风速序列是指在切入风速与额定风速之间,风力机输出功率不准确;无坏点情况是指风力机输出功率正常。以 6 个风速数据为历史数据序列进行建模,采用灰色—马尔可夫链模型对未来 1 h 的风速进行预测,结果见图 3。以平均绝对百分比误差 E_{MAPE} 和均方根误差 E_{RMSE} 表示预测的精度, E_{MAPE} 和 E_{RMSE} 的值越小,表示模型精度越高。表 1 为灰色—马尔可夫链模型预测风速误差结果。

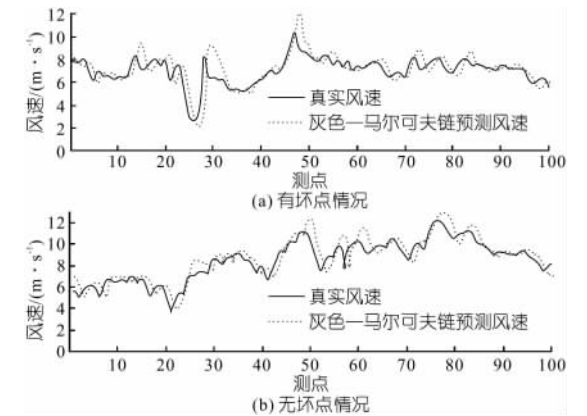


图 3 风速预测结果

Fig. 3 Wind speed prediction

表 1 风速预测误差

Tab. 1 Wind speed prediction error

风速预测方法	风速类型	$E_{MAPE}/\%$	$E_{RMSE}/(m \cdot s^{-1})$
灰色—马尔可夫链模型	有坏点情况	10.68	1.08
	无坏点情况	8.81	0.87

由图 3、表 1 可看出,采用灰色—马尔可夫链模型预测结果较好,预测数据趋势大体与实际相符。

对有坏点与无坏点两种情况下的历史功率数据进行关系带修正,结果见图 4。由图 4(a)可看出,在风速约为 8 m/s 时,风力机可能由于受多种条件的影响,输出功率不正常,不足 200 kW,不能代表此时的风功率,采用关系带法进行修正以便后续的风功率预测。对风速的预测值及修正后的功率用关系带分层法得出风功率预测值,并与比

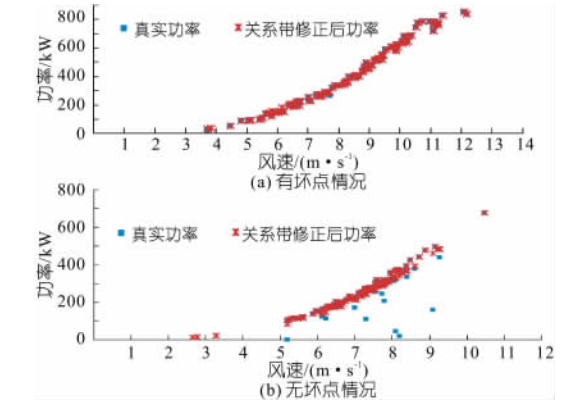


图 4 真实功率与经过关系带修正后的功率

Fig. 4 Actual wind power and modified wind power after layered statistics relationships

恩法^[7]及经验功率曲线模型^[6]进行比较,结果见图 5。不同风功率预测方法的误差见表 2。

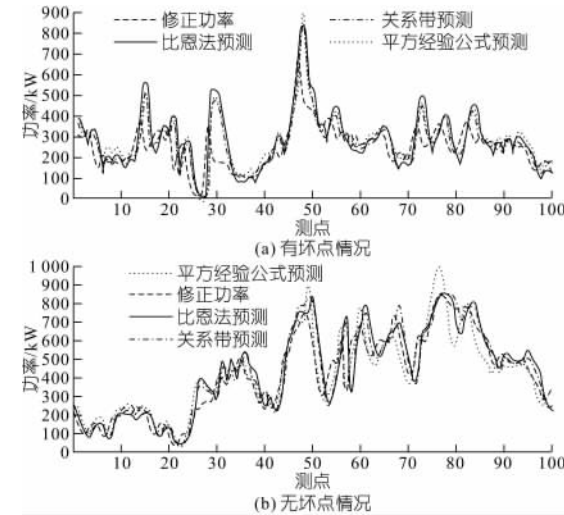


图 5 不同风功率预测方法及实际值

Fig. 5 Different wind power prediction method and actual value

表 2 不同风功率预测方法的误差

Tab. 2 Different methods of wind power prediction error

风速类型	风功率预测方法	$E_{MAPE}/\%$	E_{RMSE}/kW
有坏点情况	关系带分层法预测	31.52	95.736
	比恩法预测	36.56	107.297
	经验公式预测	38.88	102.684
无坏点情况	关系带分层法预测	22.05	92.745
	比恩法预测	22.68	99.241
	经验公式预测	23.89	99.880

由图 5 及表 2 可看出:①风功率预测数据趋势大体与实际相符;②对风功率的预测采用比恩法优于经验功率曲线模型。这是因为风功率受多种因素的影响,经验功率曲线不能精确反映风力机功率的实际情况,而比恩法用到了所有历史功率数据;③采用关系带分层法最精确。因为关系带分层法考虑了功率分布的杂散性,所建模型反映了功率的实际分布情况,因此预测效果更佳。④对于有坏点的数据,关系带分层统计法更优于

其他两种方法。主要基于关系带分层法对功率进行了修正,功率值更符合实际情况。

4 结语

将灰色与马尔可夫链模型相结合,对风速和风功率进行短时预测,并采用关系带分层统计法建立了功率曲线模型,比较了风功率在不同方法下的预测精度。结果表明,采用比恩法进行功率预测优于经验公式法预测,采用关系带分层法预测风功率精度更高。

参考文献:

- [1] 孙川永,陶树旺,罗勇,等. 高分辨率中尺度数值模式在风电场风速预报中的应用[J]. 太阳能学报, 2009,30 (8):1 097-1 099.
- [2] 李丽,叶林. 基于改进持续法的短期风电功率预测

- [J]. 农业工程学报, 2010,26(12):182-187.
- [3] 栗然,柯拥勤,张孝乾,等. 基于时序—支持向量机的风电场发电功率预测[J]. 中国电力,2012,45(1): 64-68.
- [4] 陈忠. 基于 BP 神经网络与遗传算法风电场超短期风速预测优化研究[J]. 可再生能源, 2012,30(2): 32-36.
- [5] 李俊芳,张步涵,谢光龙,等. 基于灰色模型的风速—风电功率预测研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010,38(19):151-159.
- [6] 张国强,张伯明. 基于组合预测的风电场风速及风电机功率预测[J]. 电力系统自动化,2009,33(18): 92-95,109.
- [7] 章伟,邓院昌,曾雪兰. 小型风力发电机应用分析及评价[J]. 电网与清洁能源,2012,28(5):82-86.
- [8] 易春燕,李俊芳,张步涵. 基于风速功率关系带的时间序列法预测研究[J]. 湖北工业大学学报,2012, 27(1):9-13.

Short-term Wind Power Prediction Based on Data Stratification Pretreatment

ZHANG Wei,DENG Yuanchang,WEI Zhen

(School of Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Wind speed and wind power prediction are the keys to solve the wind power connected-grid problem. The invalid sample data affects the wind power model. To get the relationships between wind speed and wind power, layered statistics method is adopted to modify the wind power curve. Combination of Grey model and Markov model is used to predict wind power with corrected data. Compared with BIN method and empirical formula method, the results show that the layered statistics method can eliminate the invalid data effectively and improve the accuracy of the prediction.

Key words: data stratification; pretreatment; wind power prediction; layered statistics; grey-Markov chain model

(上接第 108 页)

- [12] Rinaldi V A,Cuestas G A. Ohmic Conductivity of a Compacted Silty Clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2002,

- 128(10): 824-835.
- [13] 庄艳峰,王钊. 电渗的电荷累积理论[J]. 岩土力学, 2005, 26(4):629-632,649.

Study on Electro-osmotic Consolidation Efficiency Test by Using Inclined Electrodes

SUN Beibei^{1,2},CHEN Haifeng³,CHEN Yonghui^{1,2},PAN Dongqing^{1,2}

(1. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. MOE Key Laboratory for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Shaoxing Highway Management Office, Shaoxing 312000, China)

Abstract: In the process of electro-osmotic consolidation, due to partial detachment of the contact interface between soil mass and electrodes, a fraction of electrical potential is wasted at the electrodes interface, which leads to “potential drop” and waste of power energy. To incline the electrodes in soil mass will reduce the detachment, where the soils and electrodes tend to stick together by gravity. An experimental model is established and a comparison is conducted between two different electrode installations, i. e. , vertical and inclined installation. The reduction of voltage drop and the change of current and water discharge are analyzed. The results show that the electrical resistance and current are effectively maintained within a favorable range if the electrodes are inclined. The inclined electrodes will bring more water discharge and take less electrical power in an equal time during the process of electro-osmosis consolidation.

Key words: electro-osmotic consolidation; inclined electrode; voltage drop; water discharge; conductivity; moisture content