

基于灰色模型的风速-风电功率预测研究

李俊芳, 张步涵, 谢光龙, 李妍, 毛承雄

(电力安全与高效湖北省重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074)

摘要: 风场中风速变化带来的风电功率波动是影响风电质量的重要因素。基于灰色模型, 对超短时平稳风速进行了一步至四步预测, 并且检验了预测误差情况。对不稳定风和阵风进行风速预测, 以平稳风为例, 根据实际风电功率和对应时序风速的关系建模, 得到了风电功率随风速变化的各类模型下的拟合参数。为了提高风电功率的预测精度, 通过从分段函数和整体建模两个角度比较各种模型的准确程度, 得到了适宜于作为风电功率特性曲线的函数模型。通过预测的超短期风速在两种情况建模时风电功率模拟值与实际值的比较, 得到了更适宜作为风电功率特性的模型。用我国某风场的的数据验证了方法的有效性。

关键词: 风场; 灰色模型; 实时风速预测; 风电功率特性曲线; 信赖域法

Grey predictor models for wind speed-wind power prediction

LI Jun-fang, ZHANG Bu-han, XIE Guang-long, LI Yan, MAO Cheng-xiong

(Electric Power Security and High Efficiency Lab, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: High variability in generated wind power that results from the wind speed is the key factor that impacts power quality. Based on grey predictor models, this paper presents one-step to four-step average ten-minute wind speed forecasting and gives the residual error for steady wind. Wind speed predictions for unsteady wind and gust are also made. Then, taking the steady wind speed for instance, fitting parameters in various models that wind power changes with wind speed are obtained by modelling the relationship between real wind power and sequential wind speed. In order to enhance the forecasting precision of wind power, the function model fitting for wind power characteristic is established through comparing the precision of different models from the aspect of piecewise function and overall model. This paper compares the two modelling methods and finds the appropriate one. Compared the simulated value with actual value, better model fitting for wind power characteristics is obtained. Finally, the actual data from wind farm in China proves that this method is effective.

This work is supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (No.2009CB219702).

Key words: wind farm; grey predictor model; real time wind speed forecasting; wind power characteristic; trust region method

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)19-0151-09

0 引言

随着新能源发电在世界各国的开展, 风能发电由于其具有比传统能源发电更加清洁环保、以及取之不尽用之不竭的特点, 是目前世界上首选的可再生能源发电模式。目前, 国内外关于风力发电的研究越来越深入, 但其中关于研究风速预测和风力发电功率预测方法, 仍然没有达到令人满意的程度^[1]。中长期风速预测的研究方法虽然较多, 但是不一定

适用于短期或超短期风速预测。而在线超短时风速跟踪和功率预测将可以为电力系统 EMS 实时优化运行、风电在线优化调度、储能系统实时抑制风电功率波动等提供决策支持和依据, 所以对超短期风速的预测和用风速-风电功率特性来预测发电功率的研究是有意义的。

由于风能发电具有随机波动的特点, 尤其是大规模风电并网会对系统的电能质量, 诸如线路的潮流、无功补偿、电压和频率带来很多不利影响, 国内外很多学者对此进行了多方面的研究^[1-2], 提出对系统在正常运行条件下的风电穿透功率极限展开研究的紧迫性^[3-5], 希望能有效地减轻风电功率波动对电网的影响。确定风电穿透功率极限, 不可避免地

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2009CB219702); 教育部高等学校博士点基金项目 (200804870035)

需要知道风电功率的输出特性。由于风电功率主要取决于风电场的风速，所以风速-风电功率预测主要受风速预测的准确程度的影响。

灰色系统理论是一种通过研究少量数据、信息量极少且不确定性问题的方法，其建立的灰色模型 GM (1, 1) 广泛应用于电力、交通、生物和计算机科学等领域的预测^[6-11]。目前风速预测方法虽然很多，包括时间序列模型、ARMA 模型、神经网络模型等，但是这些预测方法都需要极大的数据量，灰色模型能对数据量较少的样本建模，可以用来作为快速跟踪实时风速数据情况下预测超短时风速的方法。文献[6]采用四种灰色模型预测了以 1 h 为间隔的平均风速，并指出传统 GM (1, 1) 模型具有比其他模型更高的准确度，但是在克服预测突变点上的效果不如改进的模型。一方面，本文基于灰色模型的 10~40 min 的一步至四步预测效果，认为灰色模型在预测以小时为间隔的平均风速并不能达到很高的准确度，而只有以 10 min 或 15 min 为间隔的两步之内的超短期风速预测的准确度是令人接受的。另一方面，由于目前对不稳定风和阵风进行风速预测的研究非常欠缺，在对稳定风进行风速预测后，本文继续对不稳定风和阵风进行风速预测，并且分析预测效果。本文在用传统灰色模型进行超短期风速预测基础上，对依照风电功率随着风速变化的特点建模的探讨，试图找到某种能更加准确地描述风电功率和风速之间联系的数学模型。

本文以我国某风场为算例，首先研究了对稳定风采用灰色理论的实时预测和以小时为单位的预测两个方面的风速预测。接着，对伴随着阵风的不稳定风进行风速预测。然后，介绍了风速-风电功率特性曲线的拟合情况，最后通过两种风电功率特性曲线对超短时风速和小时风速两个方面预测风速的计算结果讨论了拟合的效果。本文的算例验证了方法的可行性和有效性。

1 灰色理论预测风速

风速受到以下两个因素影响：(1) 天气因素，风速随着温度、湿度、空气流向的变化而变化，由于短时间内温度、湿度和空气流向不会发生剧烈变化，所以风速也不会发生剧烈改变；(2) 空气密度，离地高度、气压和空气湿度是影响空气密度的三个因素，空气密度越小，风速会下降。

1.1 灰色模型预测风速的基本原理

灰色模型预测风速的基本原理在于两个方面：

(1) 风速在短时间内难以发生剧烈变化，这使风速的超短期预测具有可行性；

(2) 灰色理论不同于其他预测理论和方法的区别在于：在样本数据很少、信息量极少的情况下也可以有效预测。

本文用传统灰色模型 GM (1, 1)，预测超短期风速，具体方法：

时序风速为：

$$V^{(0)} = [V^{(0)}(1), V^{(0)}(2), \dots, V^{(0)}(n)] \quad (1)$$

对数列按照传统 GM (1,1) 模型^[12]的算法进行一次累加生成数列 $V^{(1)} = [V^{(1)}(1), V^{(1)}(2), \dots, V^{(1)}(n)]$ ，即

$$V^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k V^{(0)}(i) \quad \forall k = 1, \dots, n \quad (2)$$

构造 GM (1,1) 模型的一阶微分方程：

$$\frac{dV^{(1)}}{dt} + aV^{(1)} = b \quad (3)$$

式 (3) 中，模型系数 a 和 b 可以用最小二乘法求得，即

$$A = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (\beta^T \beta)^{-1} \beta^T Y \quad (4)$$

$$\text{其中：} \beta = \begin{bmatrix} -Z^{(1)}(2) & 1 \\ -Z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & 1 \\ -Z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}; \quad Y = \begin{bmatrix} -V^{(0)}(2) \\ -V^{(0)}(3) \\ \vdots \\ -V^{(0)}(n) \end{bmatrix};$$

$$Z^{(1)}(i) = \frac{V^{(1)}(i-1) + V^{(1)}(i)}{2} \quad (5)$$

预测生成序列 $\hat{V}^{(1)}$ 按式 (6) 计算。

$$\hat{V}^{(1)}(i+1) = \left(V^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-ai} + \frac{b}{a} \quad (6)$$

预测的结果序列按式 (7) 还原。

$$\hat{X}^{(0)}(i+1) = \hat{X}^{(1)}(i+1) - \hat{X}^{(1)}(i), i = 1, \dots, n \quad (7)$$

本文预测步骤为：

(1) 根据历史时序风速数据生成数列 $V^{(0)}$ 。

(2) 对数列进行一次累加生成数列 $V^{(1)}$ 。

(3) 构造 GM (1, 1) 模型的一阶微分方程，然后按照公式 (4) ~ 公式 (5) 的方法计算模型的参数向量矩阵 A 。

(4) 根据式 (6) 计算预测生成序列 $\hat{V}^{(1)}$ 。

(5) 除去预测生成序列中的最老数据，并将预测值保留在原时序风速数列中，继续按照以上步骤生成新数列，直至预测到规定步数为止。

(6) 取后续新时刻的时序风速数据，并将此数据保留在历史时序风速数据列 $V^{(0)}$ 中，除去 $V^{(0)}$ 中的最老数据，继续按照以上步骤生成新数列，直

至预测到规定时刻为止。

1.2 平稳风速预测算例

本文以 Matlab 为试验平台,采用 GM (1, 1) 灰色模型,编制了通用化程序,对我国某风场中额定风速为 12 m/s、额定功率为 850 kW 的风电机组在 2009 年 3 月 18 日 0: 00: 00 时刻至 23: 50: 00 时刻的 10 min 平稳时序风速历史数据按照以下两种情况处理。

(1) 在风电机组每 10 min 间隔的风速数据基础上,以风电机组在 0: 00: 00 时刻至 0: 50: 00 时刻总共 6 个风速数据为历史时序风速数列,即 $n=6$,对此风电机组采用 GM (1, 1) 灰色模型预测从 1: 00: 00 时刻开始的后续的 10、20、30、40 min 的一步预测、两步预测、三步预测和四步预测风速。接着,跟踪风速的实时采集数据不断更新历史时序风速数列,即去掉最老数据,保留实时采集数据,继续完成后续时间的一步至四步风速预测。预测误差 r 为:

$$r = \frac{|\hat{V}^{(1)}(i+1) - V^{(0)}(i+1)|}{V^{(0)}(i+1)} \times 100\% \quad (8)$$

式 (8) 中, $\hat{V}^{(1)}(i+1)$ 是第 $i+1$ 个时刻的预测风速; $V^{(0)}(i+1)$ 是第 $i+1$ 个时刻的实际风速。一日内的实际风速和一步、二步预测结果见图 1 (a), 一步至四步预测结果见图 1 (b), 预测误差见表 1。

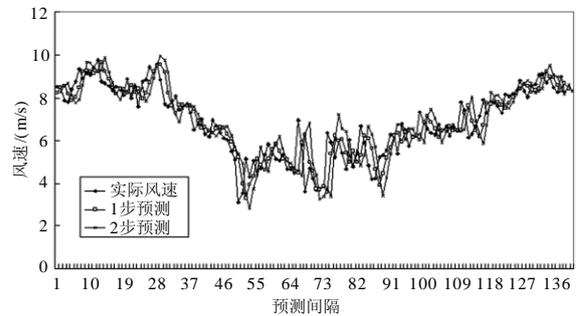
表 1 一日内 10 min 间隔一步至四步预测误差 r

	一步 预测	二步 预测	三步 预测	四步 预测
误差均值/%	8.68	12.74	15.71	18.95
最大误差/%	71.98	73.06	76.86	117.66
最小误差/%	0.01	0.08	0.24	0.06
误差标准差/%	10.6	13.03	15.06	20.43
误差在 10% 以下的概率/%	75.36	56.93	47.79	41.48

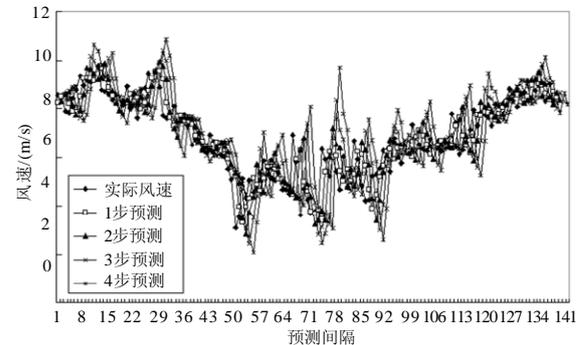
(2) 将每小时内 10 min 风速数据按照公式 (9) 换算成小时平均风速,分别取 $n=4$ 、 $n=5$ 、 $n=6$ 对日风速数据进行 24 h 一步至四步风速预测。为了确定相对误差最小的 n 值,用公式 (10) 得到的实际风速和预测风速的误差平方和的均值 R 见图 1 (c)。由于 $n=5$ 对应的一步至四步风速预测误差平方和的均值 R 最小,故 $n=5$ 。以小时为时间间隔的 $n=5$ 时的一步至四步风速预测值见图 1 (d),对 $n=5$ 时的一步至四步风速预测误差的整理结果见表 2。

$$\bar{V}(j) = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 V(i), \quad \forall j = 1, 2, \dots, 24 \quad (9)$$

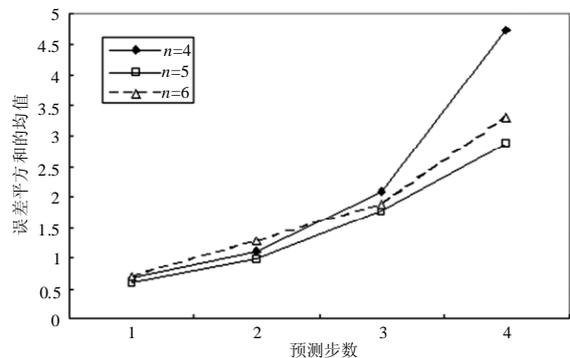
$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V^{(0)}(i) - \hat{V}(i))^2 \quad (10)$$



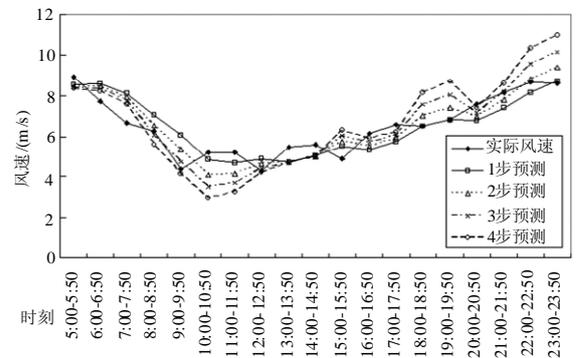
(a) 从 1:00:00 开始的 10 min 间隔一步和二步预测



(b) 从 1:00:00 开始的 10 min 间隔一步至四步预测



(c) $n=4, 5, 6$ 时的小时平均风速四步预测误差平方和均值 R



(d) $n=5$ 时以小时为间隔的一步至四步风速预测值

图 1 各种情况下的风速预测值

Fig.1 Wind speed prediction under all conditions

表 2 $n=5$ 时以小时为间隔的一步至四步预测误差 r

Tab.2 Error of one- and four-step prediction when $n=5$

	一步 预测	二步 预测	三步 预测	四步 预测
误差均值/%	10.94	13.21	18.44	23.58
最大误差/%	38.58	49.3	77.15	87.77
最小误差/%	0.04	2.16	0.87	0.19
误差标准差/%	8.34	11.73	17.47	22.31
误差在 10% 以下的概率/%	42.11	55.56	35.29	31.25

从图 1 可以看出,在不断更新下一个 10 min 风速数据时,进行一步或两步超短时风速预测的误差比三步和四步预测小,其准确度可以接受,这说明灰色模型在超短时风速预测中应用的可行性和有效性。同时,通过对比表 1 和表 2,明显看到,10 min 预测比以小时为间隔的预测的误差均值更小、最小误差更小、误差在 10% 以下的概率更高,这说明 10 min 预测的可信程度更高。从比较最大误差和误差标准差的角度,可以得到:预测过程中存在突变点,即风速变化过大,造成对突变点的预测不够准确。

1.3 不平稳风和阵风的风速预测算例

不平稳风和阵风都具有比平稳风更大的波动幅度。阵风和阵风和阵风的区别在于,阵风一般从零风速起步,期间伴随着较多零风速的时段,而不平稳风具有较多的非零风速的时段,并且在非零风速时段内的波动幅度较大、波动次数较频繁。由于风电场选址时会选择风能资源丰富的地方,所以除了稳定风,风场不太可能长期处于阵风状态,而往往是伴随着阵风的不稳定风为主要状态。以该风场在 2009 年 3 月 22 日、4 月 7 日和 4 月 15 日风速为例,基于灰色模型,并且设置 $n=6$,风速预测结果见图 2,程序的总运行时间近似为 0.135 8 s、0.14 s 和 0.216 4 s。

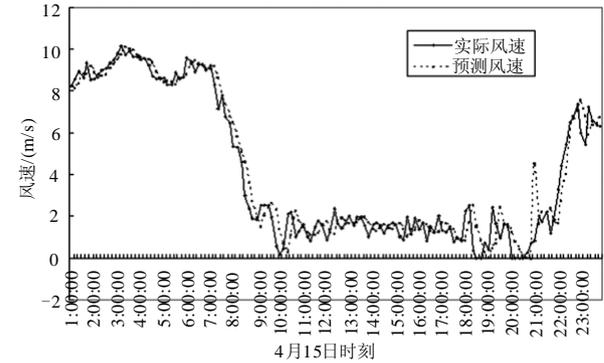
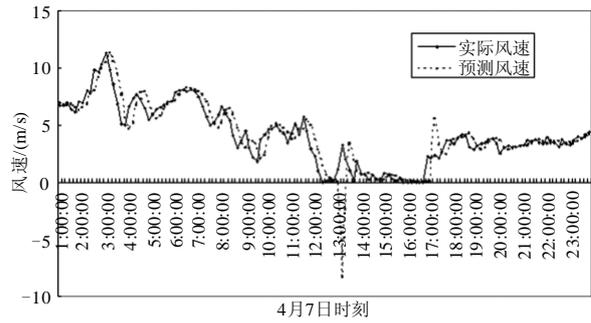
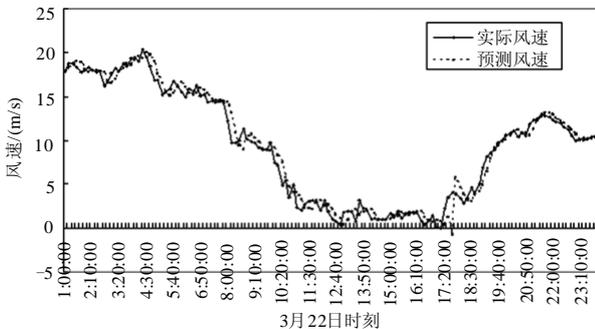


图 2 三种典型伴随阵风的不稳定风的风速预测结果

Fig.2 Wind speed prediction under three states of unsteady wind with gust

在预测过程中,对零风速的处理方式会影响预测精度。本文发现灰色模型更加适合处理非零元的时序数据列,在保留零风速数据时,后续时段的风速预测误差较大。通过对零风速数据设置为 0.000 01 m/s、0.001 m/s 和 0.01 m/s 时预测结果比较,本文发现设置零风速为 0.000 01 m/s 时,对高于切入风速的时段内风速预测已经可以满足预测精度。预测误差超过 20% 的点数比例见表 3。

表 3 预测误差超过 20% 的点数比例

Tab.3 Proportion of prediction error beyond 20%

	3月22日	4月7日	4月15日
全时段内误差超过 20% 的点数比例/%	28.99	39.86	44.20
高于切入风速的时段内预测误差超过 20% 的点数比例/%	16.5	24.04	12.28

从图 2 和表 3 可以看出,在高于切入风速的时段内,对阵风、不稳定风也可以基于灰色模型进行较准确的实时风速预测,运行时间完全满足在线运行的要求。

2 风电有功功率的模型

2.1 风电功率特性曲线

由现场运行的监控系统观测采集的风速和风力

发电功率历史数据可以近似得到单机运行功率特性曲线。以风速为自变量的风功率和风速的关系涉及三个变量：切入风速、额定风速和切出风速^[12]。以我国某风场额定容量为 850 kW 的风力发电机组为例，其切入风速、额定风速、切出风速分别为 3、12、21 m/s，对 3 月至 4 月之间 333 个小时的 1 998 个 10 min 风速数据进行描点，得到此风电机组输出功率和风速的关系图见图 3。

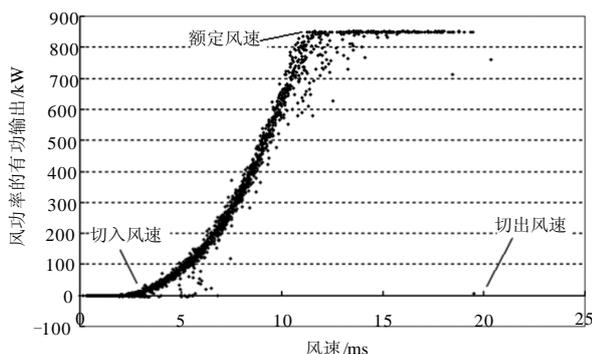


图 3 风电机组输出有功功率和风速的关系图

Fig.3 Wind power output characteristics and wind speed

从图 3 可以看出，对风力发电功率特性曲线的建模，可以从以下几个角度考虑：

(1) 由分段函数表示，模型为^[13]：

$$P(V) = \begin{cases} 0, & 0 \leq V < V_{\text{cut-in}} \\ f(V), & V_{\text{cut-in}} \leq V < V_r \\ P_r, & V_r \leq V < V_{\text{cut-off}} \\ 0, & V \geq V_{\text{cut-off}} \end{cases}$$

风电功率模型由风速决定，当实际风速 V 小于切入风速 $V_{\text{cut-in}}$ 时，表示风速过小，还没有达到风力发电所需的最小风速，风电功率为零；当风速 V 在切入风速 $V_{\text{cut-in}}$ 和额定风速 V_r 之间时，由于风速随着时间不断变化，风力发电功率也不断变化，而且由于没有达到额定风速，风电功率输出也小于额定功率，即处于降额输出功率的状态，在这种状态下风电功率特性曲线为 $f(v)$ ；当实际风速 V 在额定风速 V_r 和切出风速 $V_{\text{cut-off}}$ 之间时，风电输出功率为额定功率 P_r ；当风速 V 超过切出风速 $V_{\text{cut-off}}$ 时，由于风速过猛，超出了风电机组发电所需的有效风速范围，风力发电功率为零。

(2) 从整体特性角度建立模型，即

$$P(V) = \begin{cases} f(V), & 0 \leq V < V_{\text{cut-off}} \\ 0, & V \geq V_{\text{cut-off}} \end{cases}$$

将实际风速处于零和切出风速之间时风速和

电功率之间的联系简化成一个函数模型。

从图 3 中风电功率值聚集的密集程度可以很明显的看到，风电功率特性曲线中最为重要的一段就是处于切入风速和额定风速之间的 $f(v)$ ，由于风速不可能经常保持额定风速运行，所以降额输出功率状态下的风电功率特性曲线对风电功率预测起着决定作用。若描述此段功率的 $f(v)$ 准确程度更高，风电功率预测的准确程度就更高。

2.2 风电功率拟合曲线效果评价

风电功率特性曲线的非线性拟合可以用 Matlab 曲线拟合工具完成。Matlab 曲线拟合工具^[14]的理论基础是最小二乘法。信赖域法是针对非线性拟合的默认方法，其基本原理参见文献[15]。本文基于非线性最小化的信赖域法 (Trust-region) 对图 3 所示的散点图拟合风电功率特性曲线。

工具箱中提供了评价曲线拟合效果的指标，比如残差平方和 (SSE)、决定系数 (R-square)、校正后的决定系数 (Adjusted R-square)、均方根误差 (RMSE)^[14]。

(1) 残差平方和 (SSE)

残差平方和是实际值 y_i 和预测值 \hat{y}_i 之间的偏差加权平方和，用来评价拟合后的预测值和实际值之间的偏离程度，即

$$SSE = \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2$$

式中： w_i 是取值范围为 [0, 1] 的权值， n 为样本数量。一般情况下，若不事先设定 w_i ， $w_i = 1$ ，此时 SSE 为所有数据样本的偏差平方和。

(2) 决定系数 (R-square)

决定系数是用来描述数据变化特性的指标，是指预测值和实际值之间相关系数的平方，又被称为多重相关系数或多重决定系数。决定系数是回归平方和 (SSR) 与总平方和 (SST) 的比值，回归平方和 (SSR) 定义为预测值 \hat{y}_i 和实际值的平均值 \bar{y} 之间偏差的加权平方和，总平方和 (SST) 定义为实际值和平均值之间偏差的加权平方和，即

$$SSR = \sum_{i=1}^n w_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2, \quad SST = \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \bar{y})^2$$

而且， $SST = SSE + SSR$ 。决定系数为

$$R\text{-square} = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

决定系数的取值范围为 [0, 1]，越接近 1 表示拟合效果越好。

(3) 校正后的决定系数 (Adjusted R-square)

这项指标是在定义决定系数的前提下，基于残差自由度对上述 SSE 和 SST 进行校正，即

$$\text{Adjusted } R\text{-square} = 1 - \frac{SSE(n-1)}{SST(v-1)}$$

$$v = n - m$$

式中： n 为样本数量； m 为拟合函数中回归系数的个数； v 为独立信息量个数。该指标的取值范围为不大于 1 的任何数，越接近 1 表示拟合效果越好。

(4) 均方根误差 (RMSE)

均方根误差用来表示回归的标准偏差，即

$$RMSE = \sqrt{\frac{SSE}{v}}$$

该指标越接近于 0 表示拟合效果越好。

信赖域法通过设置置信度，得到拟合结果，并且给出了结果处于给定置信度下的区间范围。不同置信度下的区间上下界的间隔不同，间隔越大，说明该拟合结果置信度越低，不确定程度越高。一般情况下，置信度设为 95%。

2.3 算例

本文基于 MatLab 曲线拟合工具依次用 n 阶多项式函数、正弦函数对该风场某台风电机组按照分段函数建模和整体建模两种思路建立风力发电功率曲线 $f(v)$ ，并且用拟合性能指标 SSE (残差平方和)、 R square (决定系数)、Adjusted R -square (校正决定系数) 和 $RMSE$ (标准差) 对两种建模结果进行比较。

(1) 分段函数建模结果

分段函数建模结果见图 4 和表 4，拟合性能指标见表 5。

从表 5 可以看出，用 5 阶多项式模型拟合风电功率在降额状态时的分段函数模型的 $RMSE$ 最小， R -square 最接近 1，比其他函数模型更好，即

$$f(v) = -0.062 2v^5 + 1.934v^4 - 22.56v^3 + 132.7v^2 - 355.7v + 348.8 \quad (11)$$

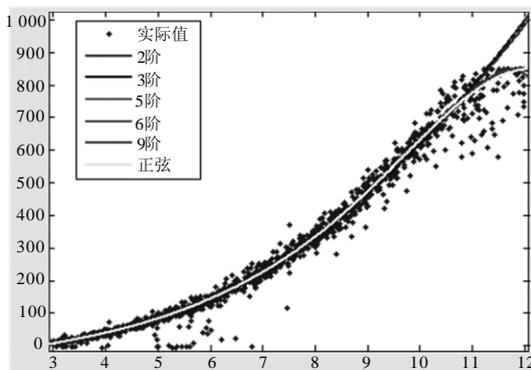


图 4 各种函数模型下的功率曲线拟合

Fig.4 Fitting curve of various function model

表 4 分段函数建模的风电功率拟合曲线

Tab.4 Fitting curve of wind power of piecewise-dunction modeling

拟合函数	$f(v)$
二次函数	$f(v) = 10.75v^2 - 53.42v + 77.98$
三次函数	$f(v) = 0.126v^3 + 8.252v^2 - 38.03v + 48.65$
5 阶多项式	$f(v) = -0.062 2v^5 + 1.934v^4 - 22.56v^3 + 132.7v^2 - 355.7v + 348.8$
6 阶多项式	$f(v) = -0.008 752v^6 + 0.320 1v^5 - 4.785v^4 + 38.09v^3 - 163v^2 + 381.5v - 384.1$
9 阶多项式	$f(v) = -6.196 \times 10^{-4} v^9 + 0.040 75v^8 - 1.166v^7 + 19.01v^6 - 194.6v^5 + 1 294v^4 - 5 587v^3 + 1.509 \times 10^4 v^2 - 2.31 \times 10^4 v - 1.525 \times 10^4$
正弦函数	$f(v) = 786 \sin(0.312 9v - 1.158) + 615.2 \sin(0.538 4v + 0.980 4) + 176.6 \sin(0.717 2v + 3.19)$

表 5 分段函数建模的功率曲线拟合的指标

Tab.5 Indices about fitting performance

函数类型	SSE	R-square	Adjusted R-square	RMSE
二次函数	3.748×10^5	0.995 6	0.995 6	16.23
三次函数	3.588×10^5	0.995 8	0.995 7	15.89
5 阶多项式	3.324×10^5	0.996 1	0.996 1	15.31
6 阶多项式	3.339×10^5	0.996	0.996	15.35
9 阶多项式	3.589×10^5	0.995 8	0.995 7	15.93
正弦函数	3.589×10^5	0.995 8	0.995 7	15.92

(2) 整体建模的拟合结果

整体建模的结果见图 5 和表 6，拟合性能指标分别见表 7。

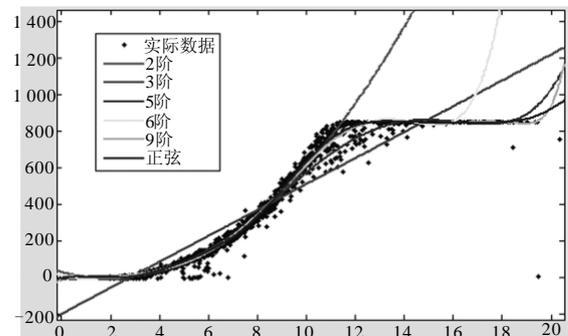


图 5 风电输出有功功率的多项式模型和正弦函数模型

Fig.5 Model of polynomial and sinusoid function

从表 7 可以看出, 正弦函数模型的 R-square 指标最接近 1, 而且 RMSE 指标最小, 拟合效果更好, 即

$$f(v) = 1\ 212 \sin(0.059\ 25v - 0.125\ 3) + 148 \sin(0.485\ 6v + 1.99) + 20.93 \sin(1.044v + 2.534) \quad (12)$$

表 6 整体建模的风电功率拟合曲线

Tab.6 Fitting curve of wind power

拟合函数	$f(v)$
二次函数	$f(v) = 9.5v^2 - 37.08v + 29.94$
三次函数	$f(v) = -0.729v^3 + 19.65v^2 - 76.79v + 70.79$
5 阶多项式	$f(v) = 0.008\ 785v^5 - 0.392\ 4v^4 + 5.461v^3 - 21.56v^2 + 32.7v - 13.51$
6 阶多项式	$f(v) = 0.002\ 55v^6 - 0.109v^5 + 1.622v^4 - 10.28v^3 + 34.69v^2 - 45.56v + 9.395$
9 阶多项式	$f(v) = 4.465 \times 10^{-6}v^9 - 0.000\ 387\ 6v^8 + 0.013\ 86v^7 - 0.263\ 3v^6 + 2.866v^5 - 18.1v^4 + 64.69v^3 - 113.9v^2 + 76.13v - 6.938$
正弦函数	$f(v) = 1\ 212 \sin(0.059\ 25v - 0.125\ 3) + 148 \sin(0.485\ 6v + 1.99) + 20.93 \sin(1.044v + 2.534)$

表 7 整体建模的功率曲线拟合的指标

Tab.7 Indices about fitting performance

函数类型	SSE	R-square	Adjusted R-square	RMSE
二次函数	5.957×10^5	0.996 7	0.996 7	17.28
三次函数	1.166×10^6	0.993 5	0.993 4	24.18
5 阶多项式	5.290×10^5	0.997 0	0.997 0	16.30
6 阶多项式	4.986×10^5	0.997 2	0.997 2	15.83
9 阶多项式	3.459×10^5	0.998 1	0.998 1	13.19
正弦函数	2.575×10^5	0.998 6	0.998 5	11.38

3 风电功率预测实例分析

单台风电机组的功率预测可以用风速预测数据、风力发电功率特性随风速变化的单机运行特性曲线确定风电功率预测值。

本文选取 5 阶多项式函数 (11) 和正弦函数式 (12) 作为风功率预测曲线。当风电机组的有功功率函数的系数确定后, 可以 10 min 短时风速近似预测风功率。3 月 18 日 10 min 实际风电功率和风电功率一步预测结果见图 6。对小时预测风速值依次用 5 阶多项式函数模型和正弦函数模型得出近似的

风功率值, 与实际风功率值对比, 风电功率的相对误差见表 8~表 11。

从表 8~表 11 可以看出, 分段函数建模和整体建模在一步预测未来 10 min 的风电功率时, 与实际风电有功的差距相对较小, 而一步至四步预测未来一小时的平均功率时, 与实际平均功率的差距比较明显。比较表 10 和表 11 的误差, 虽然二步和三步预测的误差均值较小, 但是误差在 10% 之内的概率很小, 这说明置信程度相对较低。所以可以得到结论: 对风电功率的分段函数建模和整体建模都是可行的和有效的, 越短的时间间隔内预测风电功率的拟合误差越小。

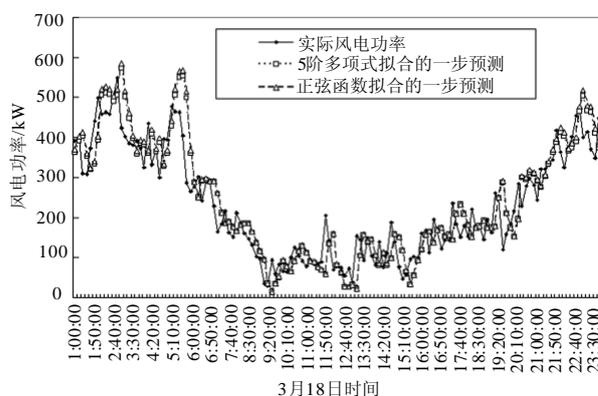


图 6 10 min 实际风电功率和一步预测功率曲线

Fig. 6 Ten-min wind power and one-step power prediction curve

表 8 用 5 阶多项式的 10 min 风电功率误差

Tab.8 Error of ten-min wind power prediction by Eq. (11)

	一步 预测	二步 预测	三步 预测	四步 预测
误差均值/%	25.81	38.32	48.4%	60.55
最大误差/%	150.63	241.35	79.67	604.62
最小误差/%	0.19	0.08	0.23	0.89
误差标准差/%	27.37	40.37	55.67	83.9
误差在 10% 以下的概率/%	28.26	20.44	17.65	16.3

由于风电功率预测涉及短时风速预测和风电功率特性曲线拟合两个过程, 所以预测误差是包括风速预测的误差和拟合误差在内的累积误差。为减小累积误差, 可以采取以下措施:

(1) 缩短风速采集数据和预测的时间间隔, 并且用一步预测或二步预测来减小风速预测误差;

(2) 采用最逼近的分段函数或整体建模的风电功率拟合曲线来减小拟合误差。

表 9 用正弦函数的 10 min 风电功率误差

Tab.9 Error of ten-min wind power prediction by Eq. (12)

	一步 预测	二步 预测	三步 预测	四步 预测
误差均值/%	26.47	38.94	49.42	61.79
最大误差/%	59.1	243.9	381.69	621.79
最小误差/%	0.04	0.15	0.47	1.32
误差标准差/%	28.01	41.4	56.77	85.9
误差在 10% 以下的概率/%	28.26	21.9	18.38	15.56

表 10 用 5 阶多项式的 1 h 风电平均功率误差

Tab.10 Error of an hour wind power prediction by Eq. (11)

	一步 预测	二步 预测	三步 预测	四步 预测
误差均值/%	38.25	22.69	24.92	40.57
最大误差/%	154.29	41.27	36.33	72.74
最小误差/%	0.25	5.66	6.42	7.44
误差标准差/%	43.05	11.35	9.46	22.05
误差在 10% 以下的概率/%	26.32	15.79	10.53	5.26

表 11 用正弦函数的 1 h 风电平均功率误差

Tab. 11 Error of an hour wind power prediction by Eq. (12)

	一步 预测	二步 预测	三步 预测	四步 预测
误差均值/%	41.01	25.84	26.68	42.26
最大误差/%	165.15	48.2	39.81	78.54
最小误差/%	1.45	6.43	2.23	2.89
误差标准差/%	45.74	12.81	10.34	23.19
误差在 10% 以下的概率/%	26.32	10.53	10.53	5.26

4 结论

本文通过采用灰色理论对风速进行超短时一步至四步预测，采用曲线拟合技术建立风电功率特性曲线的分段函数模型和整体模型，并且比较了超短时风速预测值在风电功率特性曲线的两种拟合模型下的风电功率预测值，得到以下结论：

(1) 本文采用灰色模型进行实时一步至四步超短时风速预测后，从整体建模和分段函数建模两个角度拟合的风速-风电功率特性曲线获得风电功率值，实验证明本文的预测方法是有效的。灰色模型可以对稳定风、不稳定风和阵风进行较准确的风速预测。基于灰色模型的风速预测具有程序运行时间短，适合在线运行的优点。

(2) 风电功率预测的准确程度由风速预测和风电功率的特性曲线的准确程度决定。通过减小风速

预测的误差和特性曲线拟合的误差，可以减小风电功率预测的误差。采用非线性最小化的信赖域法来拟合风速-风电功率特性曲线是一个比较有效的方法，并且可以选择拟合误差最小的特性曲线。

(3) 在风速预测中，在预测未来 30 min 以内的风速时，可以得到比预测未来 1 h 的平均风速更小的平均误差。虽然有个别预测突变点存在误差较大的情况，但是由于其数量极少，不影响全部时段预测的效果。另外，对于减小突变点的误差可以通过改进输入数据质量，即缩小时段，收集比较密集的风速时序列的方式来解决。

参考文献

[1] 杨秀媛, 肖洋, 陈树勇. 风电场风速和发电功率预测研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (11): 1-5. YANG Xiu-yuan, XIAO Yang, CHEN Shu-yong. Wind speed and generated power forecasting in wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (11): 1-5.

[2] 孙涛, 王伟胜, 戴慧珠, 等. 风力发电引起的电压波动和闪变[J]. 电网技术, 2003, 27 (12): 62-67. SUN Tao, WANG Wei-sheng, DAI Hui-zhu, et al. Voltage fluctuation and flicker caused by wind power generation[J]. Power System Technology, 2003, 27 (12): 62-67.

[3] 雷亚洲, 王伟胜, 印永华, 等. 一种静态安全约束下确定电力系统风电准入功率极限的优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (6): 25-28. LEI Ya-zhou, WANG Wei-sheng, YIN Yong-hua, et al. An optimization method for determining wind power penetration limit in power system under static security constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (6): 25-28.

[4] 雷亚洲, 王伟胜, 印永华, 等. 基于机会约束规划的风电穿透功率极限计算[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (5): 32-35. LEI Ya-zhou, WANG Wei-sheng, YIN Yong-hua, et al. Wind power penetration limit calculation based on chance constrained programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (5): 32-35.

[5] 郑国强, 鲍海, 陈树勇. 基于近似线性规划的风电场穿透功率极限优化的改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (10): 68-71. ZHENG Guo-qiang, BAO Hai, CHEN Shu-yong. Amending algorithm for wind farm penetrating optimization based on approximate linear programming method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (10): 68-71.

[6] El-Fouly T H M, El-Saadany E F, Salama M M A. Improved grey predictor rolling models for wind power prediction[J]. IET Generation Transmission &

- Distribution, 2007, 6 (1) : 928-937.
- [7] 孙丽萍, 杨江天. 基于离散灰色模型的变压器油中溶解气体浓度预测[J]. 电力自动化设备, 2006, 26 (9) : 58-60.
SUN Li-ping, YANG Jiang-tian. Prediction of gas dissolved in transformer oil using discrete grey model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26 (9) : 58-60.
- [8] 马华林, 李翠凤, 张立燕. 基于灰色模型和自适应过滤的网络流量预测[J]. 计算机工程, 2009, 35 (1) : 130-132.
MA Hua-lin, LI Cui-feng, ZHANG Li-yan. Network traffic prediction based on grey model and adaptive filter[J]. Computer Engineering, 2009, 35(1): 130-132.
- [9] 鲍枫, 唐祯敏. 城市公共交通客运量修正灰色模型[J]. 北京交通大学学报, 2005, 29 (3) : 88-91.
BAO Feng, TANG Zhen-min. Modified grey model of passenger volume of city public traffic[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2005, 29 (3) : 88-91.
- [10] 唐杰明, 刘俊勇, 杨可, 等. 基于灰色模型和最小二乘支持向量机的电力短期负荷组合预测[J]. 电网技术, 2009, 33 (3) : 63-68.
TANG Jie-ming, LIU Jun-yong, YANG Ke, et al. Short-term load combination forecasting by grey model and least square support vector machine[J]. Power System Technology, 2009, 33 (3) : 63-68.
- [11] 沈路, 王瑞, 王春红. 生物降解复合材料降解性能预测灰色模型研究[J]. 天津工业大学学报, 2008, 27(2) : 16-18.
SHEN Lu, WANG Rui, WANG Chun-hong. Grey model of biodegradability prediction of biodegradable composites[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2008, 27 (2) : 16-18.
- [12] 宫靖远, 等. 风电场工程技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [13] Wangdee W, Billinton R. Considering load-carrying capability and wind speed correlation of WECS in generation adequacy assessment[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2006, 21 (3): 734-741.
- [14] Curve Fitting Toolbox for use with MATLAB[M]. The MathWorks. 2002.
- [15] Branch M A, Coleman T F, Li Y. A subspace, Interior, and conjugate gradient method for large-scale bound-constrained minimization problems[J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 1999, 21(1).

收稿日期: 2009-10-19; 修回日期: 2009-12-28

作者简介:

李俊芳 (1982-), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析与规划; E-mail: jflii@126.com

张步涵 (1950-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与规划、电能存储与电力安全等。E-mail: zzbbzh@mail.hust.edu.cn

(上接第 150 页 continued from page 150)

- [6] Kaura V, Blasko V. Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions[J]. IEEE Trans on Ind App, 1997, 33 (1) : 58-63.
- [7] 李彦栋, 王凯斐, 卓放, 等. 新型软件锁相环在动态电压恢复器中的应用[J]. 电网技术, 2004, 24 (8) : 42-45.
LI Yan-dong, WANG Kai-fei, ZHUO Fang, et al. Application of soft phase locked loop technique in dynamic voltage restorer[J]. Power System Technology, 2004, 24 (8): 42-45.
- [8] Naidu S R, Mascarenhas A W, Fernandes D A. A software phase-locked loop for unbalanced and distorted utility conditions[C]. //2004 International Conference on Power System Technology. Singapore: 2004: 1055-1060.
- [9] CHEN Dong-hua, GUO Tao, XIE Shao-jun, et al. Shunt active power filters applied in the aircraft power utility[C].// Power Electronics Specialists Conference. 2005: 59-63.
- [10] 徐立智, 刘海春, 谢少军. 一种动态电压恢复器研究[J]. 电力电子技术, 2008, 42 (9) : 6-8.
XU Li-zhi, LIU Hai-chun, XIE Shao-jun. Study on a dynamic voltage restorer[J]. Power Electronics, 2008, 42 (9) : 6-8.
- [11] 周晖, 齐智平. 动态电压恢复器检测方法和补偿策略综述[J]. 电网技术, 2006, 30 (6): 23-29.
ZHOU Hui, QI Zhi-ping. A survey on detection algorithm and restoring strategy of dynamic voltage restorer[J]. Power System Technology, 2006, 30 (6): 23-29.

收稿日期: 2009-09-25; 修回日期: 2010-01-29

作者简介:

刘海春 (1977-), 男, 讲师, 博士研究生, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用; E-mail: nuaalhc@nuaa.edu.cn

徐立智 (1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术;

谢少军 (1968-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子技术。