

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.07.023

基于梯度优化自适应指数平滑法的风电场 短期风速预测方法研究

张 君, 薛 莉, 王 波, 关永昌, 赵 鑫
(国网滨州供电公司, 山东 滨州 256610)

摘要:针对传统的三次指数平滑法预测精度不高、自适应遍历三次指数平滑法计算效率低等问题,引入了梯度优化算法,提出了一种基于梯度优化自适应指数平滑法的风电场短期风速预测方法。该方法可以在很短时间内获得最优平滑系数 α ,而且在最优平滑系数下大大提高了预测的准确性,对后续的风速预测精确性有大的提高。将该方法与传统的指数平滑法、灰色预测法、梯度优化指数平滑法等诸多方法作了比较。研究表明,本研究方法在计算效率上,比动态遍历指数平滑法提高近 80%,而在预测精度上,比传统指数平滑法和灰色预测法分别提高了 27% 和 32%,该预测模型在风速变化平缓 and 波动情况下均具有较高的精度,以上结果验证了该方法的准确性和有效性。

关键词: 风速预测; 自适应; 平滑系数; 梯度优化

中图分类号: TM76

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2016)07-0895-05

Research of the method for short-term wind speed forecasting of adaptive index smoothing based on gradient optimization

ZHANG Jun, WUE Li, WANG Bo, GUAN Yong-chang, ZHAO Xin
(State Grid Bin Zhou Power Supply Company, Binzhou 256610, China)

Abstract: Aiming at the problem of traditional three exponential smoothing forecast without high accuracy, and the self-adaptive cubic exponential smoothing method was poor in computational efficiency, this thesis introduced gradient optimization algorithm based on equal-dimensional new information prediction, a method for winds from the short-term forecasting of wind farm based on gradient optimization of the adaptive exponential smoothing was proposed, which the speed of tracking optimum smooth coefficient accelerated, not only the computing efficiency improved, but also got forecasting statistics with high accuracy. By comparing with the traditional cubic exponential smoothing method, gray model and adaptive index smoothing based on gradient optimization forecasting method, the results show that the computational efficiency of this method increases by 80% than self-adaptive traversal cubic exponential smoothing method, the accuracy of this method increases by 27% than traditional exponential smoothing method and increases by 32% than grey prediction method, the prediction model has high accuracy when wind speed changes gently and fluctuations smooth. These results verify the accuracy and validity of the method.

Key words: wind speed forecasting; self-adaptive; smooth parameter; gradient optimized

0 引 言

能源危机和环境污染已成为 21 世纪面临的两大问题。风能作为一种干净、清洁的可再生能源,成为发展的亮点。由于风速具有很高的随机性、波动性和不

可控性,不加处理、预测就将风电大规模并入电网可能会引起各种电能质量问题,如电压波动、频率偏差甚至脱网等。对风速进行准确的预测,能够更加安全、优质和经济运行大电力系统^[1-3]。

风速预测方法根据前提条件不同可以分为很多类

收稿日期: 2015-03-14

作者简介: 张 君(1984-),男,山东滨州人,硕士研究生,主要从事电网调度自动化方面的研究. E-mail: zgm12315@163.com

型,例如物理方法和统计方法、传统方法和智能方法、单一方法和组合方法等。因为传统单一方法总存在这样那样的不足,基于统计或智能方法的组合预测是目前研究的趋势。常用的统计方法有时间序列分析法^[4]、小波分析法^[5]、卡尔曼滤波法^[6]、灰色理论法^[7]、支持向量机(SVM)^[8]、人工神经网络法等^[9]。以上方法都有各自优势,但也存在相应不足,如灰色理论不适合预测非平稳时间序列;支持向量机存在着对大规模训练样本难以实施;神经网络法对样本数据需求大,且推广能力差、易陷入局部最优值和收敛速度慢。三次指数平滑法属于趋势外推法,具有计算简单、方便实用的特点,在加入自适应遍历追踪平滑系数后,使该方法的预测精度进一步提高^[10]。但该方法使用了遍历比较追踪,当对预测精度要求高,平滑系数步长小时,会大大增加计算量,降低计算效率。

针对文献中指数平滑法的不足,本研究提出一种基于梯度优化自适应指数平滑法的风电场短期风速预测。首先笔者使用梯度优化算法,快速追踪到每一段历史数据下的最优平滑系数,得到对应的风速预测值和误差。然后,笔者运用马尔科夫模型对预测风速值进行修正,使该预测模型在风速变化平缓 and 波动情况下均具有较高的精度。本研究的预测方法具有较高的可靠性和精度,优于传统指数平滑法、动态遍历指数平滑法及灰色预测法。

1 指数平滑法

指数平滑法最早由布朗提出,去印证时间序列态势在具有稳定性或规则性的前提下,可以被合理地顺势推延。相比于移动平均法,指数平均法是一种特殊的加权平均算法。权值按照指数递减的方式分配,与当前数据越近,权值越大。根据风速的随机性和非线性特性,适合三次指数平滑法进行预测。

1.1 三次指数平滑法模型

指数平滑法与移动平均法相比而言,它是一种较为特殊的加权平均方法。简单移动平均法通畅情况下所用的是算术平均数方法,近期数据对预测值的影响相比远期数据的影响要更大一些,而且是时间越近的数据影响越大。指数平滑法是基于这一缺点之上,将其权值按指数递减的规律进行分配,对于越接近当前时期的数据,权重选取越大;反之,其权重越小。指数平滑法按照平滑的次数,一般可分为一次指数平滑法、二次指数平滑法和三次指数平滑法等。通畅情况下一次指数平滑法适用于无趋势效应、呈平滑趋势的时间

序列的预测和分析,二次指数平滑法多适用于呈线性变化的时间序列预测。在实际中风速的变化并无明显的规则性,通常呈非线性变化趋势,所以采用三次指数平滑法来预测更为合适。

三次指数平滑模型是在二次指数平滑模型的基础上再进行一次指数平滑预测。设风速实际值时间序列为 $\{x_t\}$ ($t = 1, 2, 3, \dots$),第 n 期风速1次、2次、3次指数平滑值分别记为 $s_{t,1}$ 、 $s_{t,2}$ 、 $s_{t,3}$,各指数平滑值计算公式如下:

$$\begin{cases} s_{t,1} = \alpha x_t + (1 - \alpha) s_{t-1,1} \\ s_{t,2} = \alpha s_{t,1} + (1 - \alpha) s_{t-1,2} \\ s_{t,3} = \alpha s_{t,2} + (1 - \alpha) s_{t-1,3} \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_t —第 t 年的实际风速值; α —平滑系数,且 $0 < \alpha < 1$ 。

即有三次指数平滑法计算公式为:

$$x_{t+m} = a_t + b_t m + c_t m^2 \quad (2)$$

式中: x_{t+m} —第 $t+m$ 期的风速预测值。

风速序列第 t 期预测参数计算公式为:

$$\begin{cases} a_t = 3s_{t,1} - 3s_{t,2} + s_{t,3} \\ b_t = \frac{\alpha}{2(1-\alpha)} [(6-5\alpha)s_{t,1} - 2(5-4\alpha)s_{t,2} + (4-3\alpha)s_{t,3}] \\ c_t = \frac{\alpha^2}{2(1-\alpha)^2} (s_{t,1} - 2s_{t,2} + s_{t,3}) \end{cases} \quad (3)$$

根据以上指数平滑法的公式可知,初始值 $s_{1,1}$ 、 $s_{1,2}$ 、 $s_{1,3}$ 和平滑系数 α 是决定预测精度的关键因素。其中前者依据选取时间序列量的多少,可以将序列第一期的值赋值给初始值或者风速序列前几期的平均值。

1.2 梯度优化平滑系数

平滑系数 α 是预测模型对数据变化速度和平滑能力的反映。 α 值得选取优劣,直接决定着预测值的精度。根据工作经验,在实际应用中, α 取值范围一般为(0.1 ~ 0.8);当序列相对平稳时, α 一般取(0.1 ~ 0.3);当序列剧烈波动时, α 一般为(0.3 ~ 0.5);当序列呈现上升或下降趋势时, α 一般为(0.6 ~ 0.8)。但是,单纯依据经验和定平滑系数会造成较大的误差,所以本研究提出了梯度优化算法来动态追踪平滑系数 α 。

最优平滑系数的优化模型以预测绝对误差和的平均值 e_{MAPE} 最小为目标建立,公式为:

$$e_{MAPE} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |x_t - \hat{x}_t| \quad (4)$$

梯度式变步长法原理如图1所示^[11]。

算法步骤:

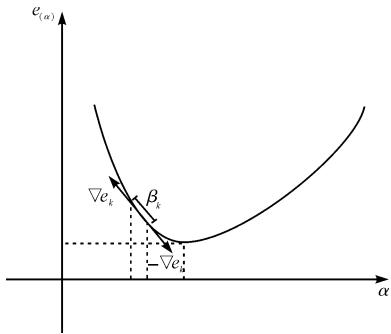


图1 梯度式变步长原理图

- (1) 选取初始平滑系数 α_1 、平滑初值 $s_{1,t}(t = 1、2、3)$ 及允许误差 ε ;
- (2) 若 $e_1 \leq \varepsilon$,则 α_1 就是近似最优平滑系数,代入公式(1~3),求出预测值 $\hat{x}_1$;否则,计算负梯度 $-\nabla e_k$ 及单位向量 $\hat{g}^{(k)} = -\nabla e(\alpha_k)/\|\nabla e(\alpha_k)\|$;
- (3) 沿着负梯度方向搜索,计算最佳步长 β_k ,且令 $\alpha_{k+1} = \alpha_k + \beta_k \hat{g}^{(k)}$;
- (4) 若 $\nabla e_{\alpha_k} \leq \varepsilon$,则此 α_k 是近似最优平滑系数,代入公式(1~3),求出预测值 $\hat{x}_1$;否则,重复上述步骤,指导符合条件为止。

1.3 等维新息指数平滑法预测模型

在指数平滑法风速时间序列中,等维新息是一种利用算法预测一个值^[12],将其补入原始序列,保持序列数量不变的前提下,同时去掉序列中最早的一个数据,然后再次重复上述步骤,直到达到目标为止。

本研究使用等维新息处理数据后的风速预测流程如图2所示。

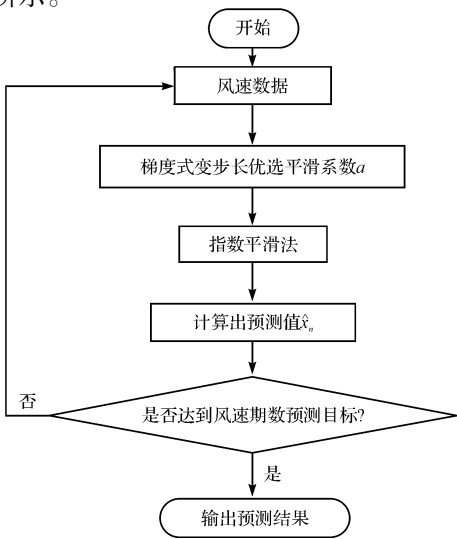


图2 风速预测流程图

2 马尔科夫残差修正模型

马尔科夫链是一种离散状态预测过程^[13],用以描述一个随机时间序列的动态变化过程。本研究使用马尔科夫修正模型处理预测值和实际值的误差组成的残差序列,与指数平滑模型实现优势互补。马尔科夫随机过程具有无后效性,对任意随机序列 $\{x_t\}(t = 1、2、\cdots)$,必须满足: $P\{x(n+p) = i_{n+p} | x(n) = i_n, x(j_m) = i_{j_m}, \dots, x(j_2) = i_{j_2}, x(j_1) = i_{j_1}\} = P\{x(n+p) = i_{n+p} | x(n) = i_n\}$ 式中: m,n,p —任意正整数,递增序列 $j_m(m = 1、2、\cdots)$ 和 $i_{n+p}, i_n, i_{j_m}, \dots, i_{j_2}, i_{j_1}$ —任意非负整数。

而指数平滑法下预测值和实际值之间的残差序列满足马尔科夫链条件。通过对历史误差序列的分析,将误差分为 n 个状态,每一个状态取一个误差修正值 $e_t, (t = 1、2、\cdots, n)$ 。根据历史预测误差统计状态转移概率。

由梯度优化自适应指数平滑法和马尔科夫模型修正组合形成短期风速预测法,其预测值为指数平滑法预测值加上马尔科夫修正值,组合预测表达式:

$$\hat{x}'_t = \hat{x}_t + \nabla e_t$$

(5)

式中: $\hat{x}_t$ —第 t 期指数平滑法预测值, ∇e_t —马尔科夫修正值, $\hat{x}'_t$ —最终预测值。

3 风速预测实例分析

笔者以北方某风电场连续四天96个时刻的实测风速数据作为样本为例,按本研究方法对该风电场的风速进行预测,并对结果进行分析。风速时间序列如图3所示。

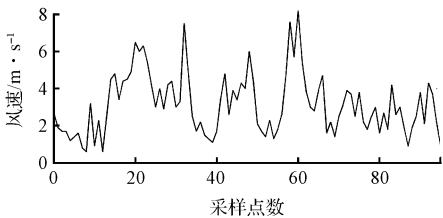


图3 风速时间序列
采样时间间隔为1 h

首先,本研究从计算效率上对表1中的3种方法进行分析,设初始平滑系数值为 $\alpha_0 = 0.1$,平滑系数变化步长 $\nabla \alpha = 0.05$,对应平均相对误差 e_{MAPE} 。当 e_{MAPE} 达到最小值时,表明此时的平滑系数 α 最优。由表1可知,梯度定步长指数平滑法相比较动态遍历指数平滑

法,计算效率上提高了近 70%,而本研究方法又相对于梯度定步长指数平滑法 35% 多。并且,实验结果还表明,当根据样本数据特点和实践经验将初始平滑系数设置的离最优平滑系数越近时,在计算效率上的优越性,会更进一步的体现和提升。

3 种模型寻优时间如表 1 所示。

表 1 3 种模型寻优时间

模型	达到最优所用时间 /s
动态遍历指数平滑法	0.026 5
梯度定步长指数平滑法	0.085 7
本研究方法	0.017 4

然后,从预测精度上分析,本研究以采样数据前 3 天 72 个时间点作为初始样本,利用等维新息原则,分别使用传统指数平滑法、梯度式指数平滑法、灰色预测法和本研究方法预测第四天各时刻的风速值。实验结果如图 4 所示。

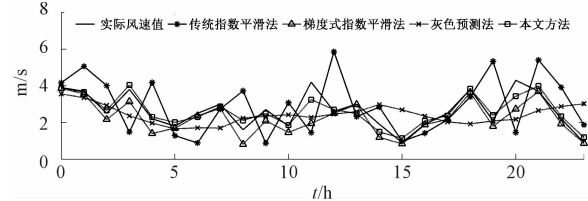


图 4 4 种模型的风速预测输出值

4 种模型的预测误差如表 2 所示。

表 2 4 种模型的预测误差

模型	$e_{MAPE}/\%$	$e_{MSE}/(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$
传统指数平滑法($\alpha = 0.6$)	0.427 3	0.130 8
灰色预测法	0.476 1	0.162 5
梯度优化指数平滑法	0.239 5	0.112 8
本文方法	0.155 3	0.085 8

表 2 中: e_{MAPE} 、 e_{MSE} 分别为国际上通用的两种误差评价指标,即平均相对误差(MAPE)和均方根误差(MSE),其中前者表明样本数据离散度,后者表明预测精度值,公式如下:

$$e_{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - \hat{x}_i}{x_i} \right| \times 100\% \tag{6}$$

$$e_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2} \times 100\% \tag{7}$$

式中: $n, x_i, \hat{x}_i$ —样本个数,实际风速值和预测风速值。

由表 2 可知,本研究方法下的预测指标都优于其他 3 种方法。其中,在预测精度方面,本研究方法的 15.53% 的平均相对误差也是大大低于传统指数平滑法的 42.73%、灰色预测的 47.61% 和梯度优化指数平滑法的 23.95%。并且本研究使用的灰色预测法是

以采样点 58 到 72 共 15 个数据作为最初的样本。尔灰色预测是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。灰色预测是通过鉴别系统因素之间发展趋势的相异程度,即进行关联分析,并对原始数据进行生成处理来寻找系统变动的规律,生成有较强规律性的数据序列,然后建立相应的微分方程模型,从而预测事物未来发展趋势的状况。其用等时距观测到的反应预测对象特征的一系列数量值构造灰色预测模型,预测未来某一时刻的特征量,或达到某一特征量的时间。实验发现,灰色预测对长期的、非平稳序列进行预测误差极大,很不适合。

4 结束语

由于传统指数平滑法和动态遍历指数平滑法,分别存在预测精度和计算效率不足的问题,在此基础上本研究提出了梯度优化平滑系数,既能够加快计算效率也能提高风速预测精度,基于梯度优化自适应指数平滑法的风电场短期风速预测。首先本研究使用梯度优化算法,快速追踪到每一段历史数据下的最优平滑系数,得到对应的风速预测值和误差。然后,本研究运用马尔科夫模型对预测风速值进行修正,使该预测模型在风速变化平缓和波动情况下均具有较高的精度。

实例结果表明,该方法下的预测指标都优于其他 3 种方法。其中,在预测精度方面,本研究方法的 15.53% 的平均相对误差也是大大低于传统指数平滑法的 42.73%、灰色预测的 47.61% 和梯度优化指数平滑法的 23.95%。该模型具有较好的风速预测效果和一定的工程使用价值,并且简单易行,能够有效地用于风速预测。

参考文献(References):

[1] 迟永宁,刘艳华,王伟胜,等. 风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术,2007,31(3):77-81.

[2] WANG X, SIDERATOS G, HATZIARGYRIOU N, et al. Wind speed forecasting for power system operational planning [C]// Proceeding of 8th international conference on probabilistic methods applied to power systems. Ames, Iowa: Iowa State University, 2004:12-16.

[3] 陈树勇,戴慧珠,白晓民,等. 风电场的发电可靠性模型及其应用[J]. 中国电机工程学报,2000,20(3):26-29.

[4] 刘 纯,吕振华,黄越辉,等. 长时间尺度风电出力时间序列建模新方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(1):7-13.

[5] 王晓兰,李 辉. 风电场输出功率年度预测中有效风速预测研究[J]. 中国电机工程学报,2010,30(8):117-122.

[6] 潘迪夫,刘 辉,李燕飞. 风电场风速短期多步预测改进算法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(26):87-91.

[7] 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,2010,386(19):151-159.

[8] 杜 颖,卢继平,李 青. 基于最小二乘支持向量机的风电场风速预测[J]. 电网技术,2008,32(15):62-66.

[9] 武小梅,白银明,文福拴. 基于 RBF 神经网络的风电功率短期预测[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(15):80-83.

[10] 王国权,王 森,刘华勇,等. 基于自适应的动态三次指数平滑法的风电场风速预测[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(15):117-122.

[11] 姚俊峰,杨献勇,彭小奇,等. 基于混沌变量的变步长梯度下降优化算法[J]. 清华大学学报:自然科学版,2003,43(12):1676-1678.

[12] 叶宗斌,周步祥,林 楠,等. 基于等维新息指数平滑法模型的中长期负荷预测[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(18):47-51.

[13] 张 弘,永 佳,范磊磊,等. 基于马尔科夫修正的中长期电力负荷组合区间预测[J]. 华东电力,2014,41(1):33-36.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

张 君,薛 莉,王 波,等. 基于梯度优化自适应指数平滑法的风电场短期风速预测方法研究[J]. 机电工程,2016,33(7):895-899.

ZHANG Jun, WUE Li, WANG Bo, et al. Research of the method for short-term wind speed forecasting of adaptive index smoothing based on gradient optimization [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(7):895-899.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 877 页)

(2)本研究运用 ADAMS 运动仿真技术,得到了不同弓高下的运动学参数,在导针最大绕线速度相同的情况下,弓高 5 mm 效率明显高于 10 mm 及 15mm,但是弓高 5 mm 加速度明显大于 10 mm 及 15 mm,对设备产生较大冲击,所以在效率允许条件下,应设置较大弓高。

(3)本研究设置弓高 15 mm,在电机定子自动绕线机上实测线杆的运动学参数,并与理论值、仿真值对比,三者基本一致,结果表明绕线运动控制策略达到预期要求。

参考文献 (References):

[1] 于克龙. 绕线机排线机构的运动分析与控制[J]. 机械制造与自动化,2005,34(3):102-103.

[2] 潘 骏,许仕伟,陈文华,等. 基于轴向压力补偿的精密排线数学模型和运动控制算法研究[J]. 中国机械工程,2011,22(20):2411-2415.

[3] 翟迎迎,任 锟,叶怀储,等. 排线轴高速折返运动控制算法研究[J]. 机械工程学报,2012,48(07):141-146.

[4] 惠 晶,王 伟. 两轴同步协调控制的绕线机系统[J]. 机床与液压,2013,41(13):71-74.

[5] 李 乐,李慧鹏,石 阳. 绕线机的多轴同步控制算法研究[J]. 测控技术,2014,33(2):87-90.

[6] 张兵辉. 基于 10MC 总线型运动控制器的 16 头高速绕线机[J]. 可编程控制器与工厂自动化,2015(5):39-43

[7] 王艳新,赵春锋. 基于 PLC 的双飞叉绕线机控制系统设计[J]. 组合机床与自动化加工技术,2009(7):72-74,89.

[8] 赖兴余,方少强,鄢春艳. 全自动双飞叉嵌线式转子绕线机控制系统的设计与开发[J]. 机电工程技术,2008,32(2):29-30,104.

[9] 陈文华,张征林,马子魁,等. 数控绕线机高速主轴单元的动力学分析[J]. 机电工程,2007,24(11):32-34,46.

[10] 张 良,潘 骏,陈文华,等. 基于 Pro/TOOLKIT 的绕线机主轴箱参数化设计与分析[J]. 机电工程,2011,28(9):1048-1051.

[11] 杨亮亮,许守金,史伟民,等. 基于牛顿迭代法的 S 形加减速时间算法研究[J]. 中国机械工程,2015,26(7):912-916.

[12] 刘志峰,张 森,蔡力钢,等. 基于粒子群优化五阶段 S 曲线加减速控制算法[J]. 北京工业大学学报,2015,41(5):641-648.

[13] 余匡华,廖秋慧,陶振刚,等. 基于 SolidWorks 及 ANSYS 对等成块优化设计[J]. 轻工机械,2014,32(2):33-36.

[编辑:张 豪]