

风电场短期风速的改进 Volterra 自适应预测法

罗海洋, 刘天琪, 李兴源

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要:欲提高含大量风电机组电网的安全稳定性及降低其运行成本, 高精度的短期风速预测是一种有效的手段。首先在对具有混沌属性的风速时间序列进行相空间重构的基础之上, 使用一种混沌时间序列的 Volterra 自适应滤波预测法对风速进行了预测; 然后针对该方法滤波系数不易收敛及预测结果存在时延的缺点, 改进了自适应算法的系数更新方法, 从而加快了收敛并提高了预测精度。算例分析结果验证了该方法的可行性和有效性。

关键词: 风力发电; 风速预测; Volterra 级数; 自适应预测

Abstract: To ensure the security and stability and also to reduce the operation cost of a power grid which has a great portion of wind power, a precise forecasting of the short-term wind speed would be an effective method. Firstly, the phase space reconstruction is carried out for the wind speed time series, and then a Volterra adaptive forecasting method is used to forecast the short-term wind speed. Aiming at the shortages of this method that it is not easy to converge and there exists delay in the forecasting result, a modification in the updating method of the filtering coefficients is proposed, by which the convergence speed of the training progress of the filtering coefficients is accelerated and the precision of the forecasting result is improved. Finally, the forecasting result of an example case shows the feasibility and validity of the proposed forecasting method.

Key words: wind power generation; wind speed forecasting; Volterra series; adaptive forecasting

中图分类号: TM762 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0019-04

随着传统化石燃料的日渐枯竭, 世界各国纷纷采取措施调整本国能源结构, 以风电为代表的可再生清洁能源得到越来越多的重视和发展, 近年以来中国的风电装机容量快速增加^[1~3]。

为平抑含大量风电的电网中风电出力的波动给电网带来的冲击, 需相应地增加常规机组的旋转备用容量, 这样会增加系统的运行费用及煤耗量^[4]。若能对短期风速进行比较准确的预测, 进而根据风机的功率特性曲线预测其功率出力, 则调度部门可根据风电出力预测对调度计划进行实时调整, 从而在保持较少旋转备用容量下既可以有效地减轻风电对电网安全稳定带来的影响, 又可以降低系统运行成本^[1, 3, 5]。

目前国内外风速预测研究主要使用物理预测模型和时间序列预测模型。前者需要使用包括风速、风向、气温、气压等数值天气预报数据, 同时考虑地形及地表粗糙度等情况的影响, 其预测精度较高, 但使用的数据多, 且依赖于准确完善的天气预报服务, 预测成本较高。而时间序列模型仅使用历史风速数据即可进行建模预测, 实现简便。常用时序预测法有卡尔

曼滤波法、时间序列法、人工神经网络法、混沌时间序列法等^[1, 2, 5, 6, 9]。其中, 卡尔曼滤波法的状态和测量方程推导较困难; 时间序列法如采用低阶模型则预测精度低而高阶模型参数估计又较困难; 人工神经网络法存在输入数据的选取及网络结构不易确定等问题。现有风电场风速预测方法的误差在 25% ~ 40%^[1, 3], 精度有待进一步提高。

文献 [10] 验证了风电出力时间序列具有混沌属性。根据非线性动力学中的相关理论, 混沌时间序列在短期内是可以预测的^[11], 而目前尚未见使用混沌预测方法进行风速预测的报道, 因此, 尝试将混沌方法引入风速预测研究中来, 以期提高风速预测的精度。基于混沌时间序列相空间重构的基本思想和非线性系统的 Volterra 级数展开式, 使用时间正交 (time domain orthogonality, TDO) 自适应算法对风速时间序列进行了预测; 并改进了 Volterra 自适应滤波器系数的更新算法, 加快了训练过程的收敛, 提高了预测精度。

1 风速时间序列的相空间重构

混沌时间序列的判定与预测都是以相空间重构

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50577044); 教育部博士点基金项目 (20070610109)

为基础的。根据 Takens 的嵌入定理, 对于一个时间序列, 只要 $m \geq 2d + 1$ (m 是嵌入维数, d 是动力系统的关联维数), 在该 m 维重构空间里即可把吸引子恢复出来, 重构空间中的相轨迹与原动力系统的微分同胚, 重构空间与原动力系统拓扑等价^[11]。对于风速时间序列, 若嵌入维数为 m , 时间延迟为 τ 则重构相空间为

$$Y(i) = \{x(i), x(i + \tau), x(i + 2\tau), \dots, x(i + (m - 1)\tau)\},$$
$$(i = 1, 2, \dots, N; N = n - (m - 1)\tau) \quad (1)$$

因此, 风速混沌时间序列相空间重构的关键是嵌入维数 m 及时间延迟 τ 的选取。

1.1 求时间延迟

求时间延迟的常用方法有自相关法及互信息法。自相关法主要是提取时间序列的线性相关性, 而互信息法是两个随机变量间一般性随机关联的度量, 包括线性和非线性, 在延迟时间的选取上要优于自相关法^[11]。下面介绍互信息法原理。

令 $\{x(i), i = 1, 2, \dots, K\}$ 表示一组信号, 设点 $x(i)$ 的概率密度为 $P_x[x(i)]$; 令 $\{y(j), j = 1, 2, \dots, K\}$ 表示另一组信号, 在点 $y(j)$ 处的概率密度为 $P_y[y(j)]$; 两组信号的联合概率, 即同时测得 $x(i)$ 、 $y(j)$ 的概率为 $P_{xy}[x(i), y(j)]$ 。对两组信号 $\{x(i), y(j)\}$, 给定 $x(i)$ 的一个测量值, 预测 $y(j)$ 的平均信息量为互信息函数

$$I(x, y) = H(x) + H(y) - H(x, y)$$
$$H(x) = -\sum_i P_x[x(i)] \ln\{P_x[x(i)]\} \quad (2)$$
$$H(x, y) = -\sum_{ij} P_{xy}[x(i), y(j)] \ln\{P_{xy}[x(i), y(j)]\}$$

式中: $H(x)$ 是信号 $\{x(i)\}$ 的熵, 表示对指定系统的 K 个 $x(i)$ 测量得到的平均信息量; $H(y)$ 定义与 $H(x)$ 类似; $H(x, y)$ 是联合熵。

在风速时间序列相空间重构中关心的是 $x(t + \tau)$ 值对 $x(t)$ 值的依赖性。因此可以求 $\{x(t)\}$ 和 $\{x(t + \tau)\}$ 两个序列的互信息。为得到互信息 I 与时间延迟 τ 的函数关系, 将 τ 取值从 1 逐渐增加, 分别求得每个 τ 对应的 I 值。这样互信息函数 I 取第一个极小值时对应的 τ 为最佳延迟时间。

1.2 嵌入维数的确定

使用 G-P 算法计算重构相空间嵌入维数。定义 m 维重构相空间中两相点间的关联积分为

$$C_m(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N(N-1)} \sum_{\substack{i, j=1 \\ i \neq j}}^N \theta(r - |Y(i) - Y(j)|) \quad (3)$$

式中: $|Y(i) - Y(j)|$ 为两相点间的距离; r 代表某一距离阈值; N 为相点数; $\theta(x)$ 是 Heaviside 函数

$$\theta(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$$

$C_m(r)$ 为相空间中吸引子上两点之间的距离小于 r 的概率。对于 r 的适当范围, 吸引子关联维数 d_m 与 $C_m(r)$ 满足以下对数线性关系

$$d_m = \ln C_m(r) / \ln r \quad (4)$$

对某个时间延迟 τ 先选择一个较小的 m 值, 重构相空间。然后对不同的邻域半径 r 分别根据式 (3) 计算相应的 $C_m(r)$, 将这些不同的 r 和 $C_m(r)$ 值代入式 (4) 可拟合出 d_m 。增加 m 的值, 重复以上步骤, 求出一系列的 d_m 值。

若风速观测序列的原动力学系统中存在奇异吸引子, 那么随着嵌入维数 m 的增加, d_m 会逐渐增加并收敛到一个定值 d (d 为分数)。这样可选嵌入维数值为 m , 使 $m \geq 2d + 1$ 。分数维的关联维数也是系统具有混沌属性的一个标志^[11]。

2 短期风速的 Volterra 自适应预测法

2.1 基本原理

设非线性离散系统的输入为 $Y(n) = \{x(n), x(n-1), \dots, x(n-N+1)\}$, 输出 $y(n) = \hat{x}(n+1)$, 则该非线性系统函数的 Volterra 级数展开式为

$$\hat{x}(n+1) = F(Y(n))$$
$$= h_0 + \sum_{m=0}^{+\infty} h_1(m) x(n-m)$$
$$+ \sum_{m_1=0}^{+\infty} \sum_{m_2=0}^{+\infty} h_2(m_1, m_2) x(n-m_1) x(n-m_2)$$
$$+ \sum_{m_1=0}^{+\infty} \sum_{m_2=0}^{+\infty} \dots \sum_{m_p=0}^{+\infty} h_p(m_1, m_2, \dots, m_p)$$
$$\cdot x(n-m_1) x(n-m_2) \dots x(n-m_p) + \dots \quad (5)$$

其中 $Fy(n)$ 为系统演化模型, $h_p(m_1, m_2, \dots, m_p)$ 为 p 阶 Volterra 核。这种无穷级数展开式在实际应用中难以实现, 为便于应用, 必须采用有限截断有限次求和的形式, 最常用的是式 (6) 所示的二阶截断求和的形式, 其能满足一般工程应用的要求^[12~14]。

$$\hat{x}(n+1) = h_0 + \sum_{m=0}^{N_1-1} h_1(m) x(n-m)$$
$$+ \sum_{m_1=0}^{N_2-1} \sum_{m_2=0}^{N_2-1} h_2(m_1, m_2) x(n-m_1) x(n-m_2) \quad (6)$$

式 (6) 中滤波器的长度 N_1 、 N_2 必须合理确定。对于混沌时间序列, 由 Takens 定理可知, 为了能全面描述其动力学特征, 须满足 $m \geq 2d + 1$ (m 是嵌入维数, d 是动力系统的关联维数)。因此, 取 $N_1 = N_2 = m^{[15]}$, 于是用于风速混沌时间序列预测的 Volterra 滤波器为

$$\hat{x}(n+1) = h_0 + \sum_{i=0}^{m-1} h(i)x(n-i) + \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{m-1} h_2(i,j)x(n-i)x(n-j) \quad (7)$$

其状态扩展后的滤波系数为 h_0 、 $h(i)$ ($i=0, 1, \dots, m-1$)、 $h_2(i,j)$ ($i, j=0, 1, \dots, m-1$), 总共有 $M = 1 + m + m(m+1)/2$ 个。

令 Volterra 自适应滤波器的输入矢量 $U(n)$ 为 $U(n) = [1, x(n), x(n-1), \dots, x(n-m+1), x^2(n), x(n)x(n-1), \dots, x(n)x(n-m+1), \dots, x^2(n-m+1)]^T$, 系数矢量为 $H(n) = [h_0, h(0), h(1), \dots, h(m-1), h_2(0,0), h_2(0,1), \dots, h_2(0,m-1), h_2(1,1), \dots, h_2(m-1,m-1)]^T$, 这样式 (7) 可表示为

$$\hat{x}(n+1) = H^T(n)U(n) \quad (8)$$

式 (7) 所示的 Volterra 自适应滤波器的系数可直接利用线性 FIR 滤波器的自适应算法来确定, 对于这种二阶 Volterra 自适应滤波器, 可以采用时间正交 (TDO) 自适应算法^[12, 16]。对于输入矢量和系数矢量分别为 $U(n)$ 和 $H(n)$, TDO 算法可描述如下:

$$\hat{x}(n) = H^T(n-1) \cdot U(n-1)$$

$$H(n) = H(n-1) + \frac{c \cdot e(n-1)}{U^T(n) \cdot U(n)} U(n-1) \quad (9)$$

$$e(n) = x(n) - \hat{x}(n)$$

其中, $x(n)$ 为测量值, $\hat{x}(n)$ 为预测值, c 是控制收敛性能的参数, 在低阶时常取为 $1^{[16]}$ 。

这样, 取风速时间序列重构相空间中的一个相点 $Y(t)$ 作为输入, 其对应的下一个时刻风速值作为输出, 并使用一定数量的已知数据对 Volterra 滤波器进行训练后, 就可以进行风速预测。

2.2 算法改进

使用前述方法进行风速预测时, 在实验中发现训练过程中滤波系数的收敛较慢甚至不收敛, 且预测结果与实际值的变化之间存在一定的延迟。通过分析发现在 TDO 算法中对 $H(n)$ 进行更新时使用的是前一时刻的误差值 $e(n-1)$, 可能是这一步引入了延

迟。于是将算法调整为使用当前时刻的误差 $e(n)$ 来更新 $H(n)$, 改进后的算法描述如下:

$$\hat{x}(n) = H^T(n-1) \cdot U(n-1)$$

$$H(n) = H(n-1) + \frac{c \cdot e(n)}{U^T(n) \cdot U(n)} U(n-1) \quad (10)$$

$$e(n) = x(n) - \hat{x}(n)$$

通过算例分析验证了改进后的算法能一定程度上加快训练过程的收敛, 且减小了预测输出与实际值之间的延迟, 从而提高了预测精度。

Volterra 自适应预测的具体算法为:

- 1) 用第 1 节中的方法计算风速时间序列的嵌入维数 m 及时间延迟 τ 重构相空间;
- 2) 依次使用重构相空间中各已知相点及对应相点的下一个时刻的已知风速值, 对 Volterra 自适应滤波器系数进行训练;
- 3) 使用训练好的系数 $H(n)$, 以及包含当前风速值的输入矢量 $U(n)$, 根据式 (8), 得到需要的下一时刻的风速预测值 $\hat{x}(n+1)$ 。

3 算例分析

中国某风电场一个月的风速测量数据如图 1 所示, 该序列每小时采样一点。用前 29 天的数据进行建模后对第 30 天的风速进行预测研究。

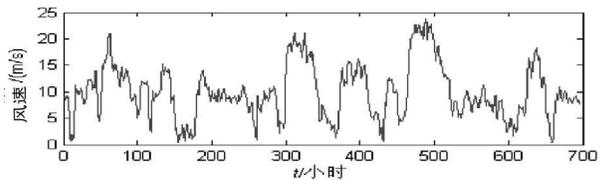


图 1 风电场风速时间序列

对该序列由 1.1 节中的方法依次取 τ 值为 1 至 50, 计算得到 $I-\tau$ 关系如图 2 所示。选互信息函数第一次达到极小值时的时间延迟 6 为 τ 的最佳值。

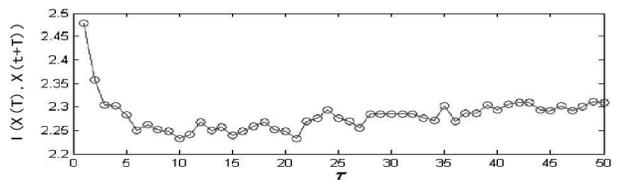


图 2 互信息函数值与时间延迟关系

取 $\tau=6$, m 值依次取 1 至 30, 进行关联维数分析, 得到图 3 所示结果。

将图 3 中每条曲线直线段部分的斜率, 即关联维

数提取出来,得到 $m-d_m$ 关系如图 4 所示,可知随着嵌入维数 m 增加,关联维数 d_m 趋于稳定值 $d \approx 4.6$ 。根据 Takens 嵌入定理有 $m \geq 2d+1$,可以取嵌入维数 $m=11$ 。

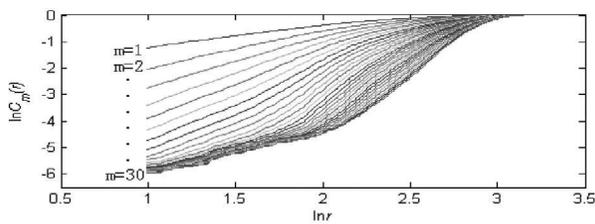


图 3 不同嵌入维数下的 $\ln r - \ln C_m(r)$ 关系图

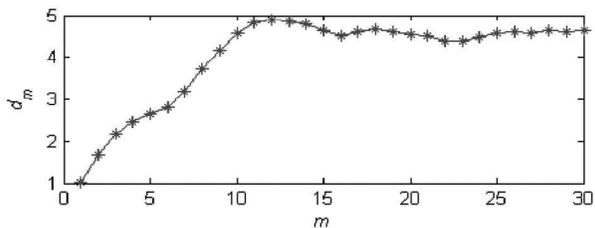


图 4 关联维数与嵌入维数关系

在使用前述算得的嵌入维数 $m=11$ 及时间延迟 $\tau=6$ 重构相空间的基础上,使用原 Volterra 自适应预测法以及前面提出的改进方法对第 30 天的风速进行预测,预测结果如图 5 所示。

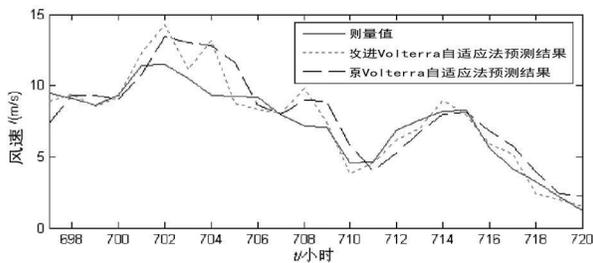


图 5 两种方法的预测结果比较

表 1 不同预测方法的性能比较

	原 Volterra 自适应预测法	改进 Volterra 自适应预测法
平均误差 (%)	18.97	11.87
最大误差 (%)	83.21	41.28

两种预测方法的预测性能列于表 1 中。由表 1 可见, Volterra 自适应预测法比现有其他风速预测方法的精度有所提高,且所提改进 Volterra 自适应预测法一定程度上提高了原方法的预测精度。

4 结 论

在对风速时间序列进行相空间重构的基础上,提出一种改进的 Volterra 自适应预测法进行了风速预

测,该方法使用一种新的滤波系数训练更新方法。通过与原方法的预测结果进行对比,验证了所提改进方法能一定程度上提高风速预测的精度。混沌预测方法在理论上保证了看似随机性很强的风速序列在短期内是可预测的,且只使用风速历史数据进行预测,实现简便、成本低;与其他智能预测算法相比,计算量小、可靠性高。因此具有较强实际应用潜力,值得进一步研究。

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.
- [2] 谷兴凯,范高峰,王晓蓉,等. 风电功率预测技术综述 [J]. 电网技术, 2007, 31(增刊 2): 335-338.
- [3] 吴兴华,周晖,黄梅. 基于模式识别的风电场风速和发电功率预测 [J]. 继电器, 2008, 36(1): 27-32.
- [4] Bart C Ummels Madeleine Gibescu Engbert Pelgum, et al Impacts of Wind Power on Thermal Generation Unit Commitment and Dispatch [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(1): 44-51.
- [5] 潘迪夫,刘辉,李燕飞. 基于时间序列分析和卡尔曼滤波算法的风电场风速预测优化模型 [J]. 电网技术, 2008, 32(7): 82-86.
- [6] George Sideratos Nikos D Hatzigiorgiou An Advanced Statistical Method for Wind Power Forecasting [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(1): 258-265.
- [7] 丁明,张立军,吴义纯. 基于时间序列分析的风电场风速预测模型 [J]. 电力自动化设备, 2005, 25(8): 32-34.
- [8] 温权,张勇传,程时杰. 负荷预报的混沌时间序列分析方法 [J]. 电网技术, 2001, 25(10): 13-16.
- [9] Ioannis G Damousis Minas C Alexiadis John B Theodoris A Fuzzy Model for Wind Speed Prediction and Power Generation in Wind Parks Using Spatial Correlation [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004, 19(2): 352-361.
- [10] 王丽婕,廖晓钟,高爽,等. 并网型大型风电场风力发电功率一时间序列的混沌属性分析 [J]. 北京理工大学学报, 2007, 27(12): 1077-1080.
- [11] 韩敏. 混沌时间序列预测理论与方法 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [12] 张家树,肖先赐. 混沌时间序列的 Volterra 自适应预测 [J]. 物理学报, 2000, 49(3): 403-408.
- [13] Chunfu Li Juebang Yu Volterra-TLS Method for Chaotic Time Series Prediction [C]. International Conference on

(下转第 88 页)

部分传递的热量大部分被蒸汽带走,转子的温度梯度最终应与各级后的蒸汽温度梯度基本一致。对于汽缸而言,蒸汽对汽缸的换热系数应小于蒸汽对转子的换热系数,汽缸与蒸汽的换热面积也相对转子小,即蒸汽对汽缸的冷却作用相对较弱,汽缸自高温部分向低温部分传递的热量较少被蒸汽带走,导致各级汽缸的温度应高于对应的蒸汽温度,汽缸的平均温度高于转子的平均温度,最终的结果是汽缸的绝对膨胀量大于转子的绝对膨胀量,产生负胀差。

2 消除负胀差大的措施

2.1 减小前汽封漏汽对汽缸的加热作用

如果汽封漏汽压力小于或接近抽汽口压力,漏汽就直接被带入加热器而不会返回汽缸,特提出了对漏汽管道进行改造的方案(如图 2)。

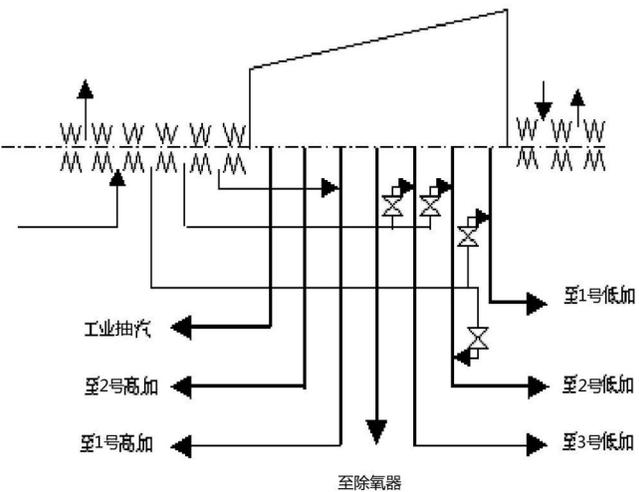


图 2 汽轮机抽汽及轴封漏示意图

- (1) 将前汽封原三档漏汽至 6 抽 (1 号低加) 增加一路到 5 抽 (2 号低加) 并安装截止阀;
- (2) 将前汽封原二档漏汽至 5 抽 (2 号低加) 另增加一路到 4 抽 (3 号低加) 并安装截止阀。

(3) 考虑到原汽封漏汽排放点离抽汽口太近,可将漏汽与抽汽管道汇合点下移。

在运行中改变前汽封漏汽的排放方式,关闭原漏汽至 1 号、2 号低加的截止阀,将三档漏汽排至 5 抽,二档漏汽排至 4 抽。并通过新增的截止阀进行排放量的控制,尽量减少汽封漏汽对汽缸的加热作用。

2.2 提高前轴封汽源温度

该机组原设计轴封供汽的方式为:空负荷采用来自低压减温减压蒸汽(温度约 180~250℃),大负荷采用来自除氧器汽平衡管的饱和蒸汽(温度约 140℃)进入均压箱,由轴封供汽母管分别向前、后轴封供汽,即前、后汽封供汽温度相同。则提出在运行中轴封供汽尽可能采用低减来的蒸汽,保证均压箱的温度在 180℃ 左右,因为提高前轴封的供汽温度是减少负胀差的有效方法。

2.3 降低调节级后蒸汽温度

降低调节级后蒸汽温度,可降低调节级后汽缸金属温度,减少汽缸的绝对膨胀量,可有效减少负胀差。由于该机组为非标机组,是在原武汉汽轮机厂 50 MW 抽汽机组改造而来,改造后各级动叶及隔板都发生了很大变化,使调节级做功能力不够,造成焓降不够。汽轮机制造厂应重新计算、设计调节级的工作参数。但改造调节级工作量太大,只有待机组大修时再作处理。

3 结 论

经过对轴封漏汽管道改造和运行优化后,2 号机组负胀差得到了很好的改善,在正常运行中,胀差可维持在 $-0.4 \sim +0.2$ mm,未再出现负胀差超限现象,同时机组的热膨胀在 12 MW 稳定时从 15 mm 也降到了 13 mm。

(收稿日期: 2008-12-09)

(上接第 19 页)

Communications Circuits and Systems 2008. ICCAS 2008. 25-27 May 2008. Page(s): 48-51.

- [14] Y. S. Zhang D. B. Li Volterra adaptive prediction of multipath fading channel [J]. Electronics Letters 1997, 33(9): 754-755.
- [15] 郭双冰,肖先赐.混沌时间序列的 Volterra 自适应预测滤波器定阶 [J]. 电子与信息学报, 2002, 24(10): 1334-1340.

- [16] 茅于海,苗家林.自适应预测滤波器的一种新算法 [J]. 电子学报, 1983, 11(5): 75-81.

作者简介:

罗海洋 (1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制、电力系统调度自动化;

刘天琪 (1962-), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析计算与稳定控制、高压直流输电、调度自动化;

李兴源 (1945-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电、分散式发电。

(收稿日期: 2008-12-25)