

# 基于混沌理论的电网售电量预测研究

曲正伟, 王云静, 贾清泉

(燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 对具有混沌特性的电网售电量时间序列重构相空间, 计算相空间的饱和嵌入维数和最大 Lyapunov 指数, 并利用计算得到的饱和嵌入维数指导建立 T-S 模糊神经网络预测模型。采用递阶遗传算法对 T-S 模糊神经网络的结构和权值进行训练, 可确定最适合的预测模型结构, 提高神经网络的收敛速度, 使其具有良好的泛化能力。在此基础上, 对秦皇岛电力公司售电量数据进行预测, 结果表明, 该方法可精确地再现售电量时间序列的混沌动力学行为, 在可预报尺度范围内, 能对售电量作高精度的预测, 且具有很强的适应能力。

关键词: 混沌; 模糊神经网络; 相空间; 最大 Lyapunov 指数; 售电量; 预测

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2006)17-0063-04

## 0 引言

电网售电量预测是电力市场中的一项基本工作, 做好售电量的预测分析工作, 为供电企业提供营销决策支持, 对于指导发电厂、输电网的合理运行, 推动电力市场的发展和建设都具有十分重要的意义。目前提出的很多预测算法, 如时间序列法、神经网络法、专家系统法等, 在收敛性和适用性上均有不同程度的局限, 并且由于影响售电量变化的众多随机因素很难用数学模型描述, 给预测的准确性带来了很大困难。

混沌是一种非线性动力学行为, 混沌时间序列具有内部确定的规律性, 其重构出混沌吸引子相空间具有高精度的短期预测性, 它为售电量的高精度预测开辟了崭新的天地。本文利用具有混沌特性的电网售电量时间序列重构相空间, 计算重构相空间的饱和嵌入维数和最大 Lyapunov 指数。用相空间的饱和嵌入维数来指导建立神经网络预测模型<sup>[2]</sup>, 同时采用递阶遗传算法对预测模型的结构和权值分别进行训练, 避免预测模型结构选取的盲目性, 具有良好的泛化能力, 可精确地再现电网售电量系统的混沌非线性行为, 在系统的可预报尺度范围内, 能对电网售电量系统作高精度的预测。将该方法用于秦皇岛电力公司的实际数据进行计算, 结果表明该方法不但精度高而且通用性强。

## 1 基于混沌理论的神经网络预测模型

### 1.1 重构相空间

设电力系统售电量混沌时间序列为

$$\{x(t_j)\}, \quad j=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

其中: 时间间隔为  $t$ , 将式 (1) 时间序列用 Takens 嵌入定理重构成  $m$  维相空间

$$Y(t_j) = (x(t_j), x(t_j + \tau), \dots, x(t_j + (m-1)\tau)) \quad (2)$$

这里  $\tau = k \cdot t$  ( $k=1, 2, \dots$ ) 为延迟时间,  $m$  为相空间的饱和嵌入维数, 式 (2) 构成的  $m$  维相空间中有  $p = n/k - (m-1)$  个相点。可见, 在重构相空间时, 只要确定饱和嵌入维数  $m$  和延迟时间  $\tau$  即可。本文选取最大的  $m$  而得到最小的  $\tau$ , 即  $\tau = t, k$  取 1。

任取一  $m$  构造相空间, 对所有的  $p$  个相点, 若给定一个任意小的数  $\epsilon$ , 计算所有相点之间的欧氏距离, 然后比较有多少个点对之间的距离  $|Y(t_i) - Y(t_j)| < \epsilon$ 。把距离小于  $\epsilon$  的点对数占总点对数  $p^2$  之比记作  $C(\epsilon)$ , 即

$$C(\epsilon) = \frac{1}{p^2} \sum_{i,j=1}^p (1 - |Y(t_i) - Y(t_j)| / \epsilon)$$

其中:  $H(x)$  为 Heaviside 函数<sup>[2]</sup>。

在一段区域内, 当  $\epsilon$  充分小时,  $C(\epsilon)$  满足如下关系

$$\ln C(\epsilon) = \ln(C) + D \ln(\epsilon)$$

式中:  $C$  为常数,  $D$  为一种维数:  $D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln C(\epsilon)}{\ln(\epsilon)}$ , 通常称  $D$  为关联维数。在双对数坐标中得到一条  $\ln C(\epsilon)$  和  $\ln(\epsilon)$  曲线, 曲线的直线段斜率即为  $D$ , 随着  $m$  的增大,  $D$  逐渐收敛,  $D$  收敛时对应的维数  $m$  即为饱和嵌入维数。

### 1.2 最大 Lyapunov 指数的求取

1) 在延拓的  $m$  维相空间中取初始相点  $A(t_1)$

为参考点,根据下式

$$L_{nbt} = \min [ |i - j| ] \quad (3)$$

求得  $A(t_1)$  的最近邻点  $B(t_1)$ 。其中  $\min$  为取最小函数,  $L_{nbt}$  表示在欧氏意义上的  $A(t_1)$  与其最近邻点  $B(t_1)$  的距离即  $L(t_1)$ 。

2) 设在  $t_2 = t_1 + t$  时,  $A(t_1)$  点演化到  $A(t_2)$  点, 同时  $B(t_1)$  点演化到  $B(t_2)$  点, 其间距  $A(t_2) \cdot B(t_2) = L(t_2)$ 。如用  $\lambda_1$  表示在此时间内线段的指数增长率, 则有

$$L(t_2) = L(t_1) \cdot 2^{\lambda_1 t} \quad \text{即} \quad \lambda_1 = \frac{1}{k} \log_2 \frac{L(t_2)}{L(t_1)} \quad (4)$$

$t=1(\text{单位})$

在  $A(t_2)$  的若干最近邻点中找出一个满足  $\lambda$  角很小的近邻点  $C(t_2)$  (若无法满足小  $\lambda$  和近邻两条条件, 仍用  $B(t_1)$  点)。

3) 设在  $t_3 = t_2 + k$  时  $A(t_2)$  发展到  $A(t_3)$ ,  $C(t_2)$  发展到  $C(t_3)$ , 且  $C(t_3)A(t_3) = L(t_3)$ ,  $C(t_2) \cdot A(t_2) = L(t_2)$ , 则有

$$\lambda_2 = \frac{1}{k} \log_2 \frac{L(t_3)}{L(t_2)} \quad (5)$$

将上述过程一直进行到点集  $\{t_i, i=1, 2, \dots, p\}$  的终点, 然后取指数增长率  $\lambda_i$  的平均值为最大 Lyapunov 指数估计值, 即

$$LE_1(m) = \frac{1}{N} \frac{1}{k} \sum_{i=1}^N \log_2 \frac{L(t_i)}{L(t_i - i)}, \quad N = \frac{p}{k} \quad (6)$$

4) 依次增加嵌入维数  $m$ , 重复上述 2)、3) 步骤, 直到使  $LE_1(m_0) = LE_1(m_0 + 1) = \dots = LE_1$  成立, 则此时得到的  $LE_1$  就是最大 Lyapunov 指数值。

Lyapunov 指数是一个谱系  $\lambda_i (i=1, 2, \dots, p-1)$ , 若谱系中只有最大 Lyapunov 指数为正值, 则系统为一维混沌; 若谱系中具有两个或两个以上正的 Lyapunov 指数, 则系统为多维混沌或超混沌, 否则系统为非混沌。最大 Lyapunov 指数可以度量混沌系统对初值敏感程度, 即其值越大, 混沌特性越强, 对初值的敏感性也越强; 反之敏感性越弱。正是由于对初值的敏感性, 混沌系统的长期预测是不可能的。最大 Lyapunov 指数的倒数可作为系统的可预报尺度<sup>[3]</sup>, 即只有在该预报尺度范围内, 才能对系统作高精度预测。

### 1.3 基于混沌理论的神经网络预测模型

Takens 嵌入定理指出, 混沌时间序列内部具有确定的规律性, 其重构出混沌吸引子的相空间具有高精度短期预测性。即预测相点  $Y(t_{p+1})$  可由重构相空间相点  $Y(t_j) (j=1, 2, \dots, p)$  求取, 由于相点

$Y(t_{p+1})$  只含有一个未知的分量  $x(t_{p+1})$ , 因此存在一映射  $F$ , 使得

$$x(t_{j+1}) = F(x(t_j)), \quad j=1, 2, \dots, n$$

由上可知, 混沌时间序列内部存有确定性函数  $F$  模型, 要想进行精确预测, 问题的关键在于  $F$  的求取。对于具有混沌特性的时间序列建立神经网络模型, 其输入变量的选取和相空间的饱和嵌入维数  $m$  有着密切的关系, 经验证明, 采用等同于相空间饱和嵌入维数的输入变量组合对非线性混沌系统建模, 可有效地反映系统的全部动力特性, 并且具有良好的外推能力, 即泛化能力<sup>[4]</sup>。本文采用 T-S 模型的模糊神经网络<sup>[5]</sup>逼近  $F$ 。

#### T-S 模糊模型

$$R_j: \text{if } x_1 \text{ is } A_{1j} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{2j} \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_{nj}$$

$$\text{Then } y_j(k) = \theta_j + \lambda_{1j}x_1 + \dots + \lambda_{nj}x_n \quad (7)$$

其中:  $A_{ij} (i=1, 2, \dots, n)$  为输入变量的个数, 这里令其等于相空间的饱和嵌入维数  $m$ ;  $j=1, 2, \dots, l$  为模糊规则数) 是第  $i$  个输入变量  $x_i$  的第  $j$  个语言变量值, 它是定义在论域  $U_i$  上的一个模糊集合, 其相应隶属度函数为  $M_{ij}$ , 对于每一条规则, 可计算其规则的适应度为

$$\mu_j = M_{1j}(x_1) \cdot M_{2j}(x_2) \cdot \dots \cdot M_{nj}(x_n)$$

则 T-S 模糊模型对预测模型  $F$  的逼近  $y_m(k)$  就是每条规则输出的加权平均

$$y_m(k) = \frac{\sum_{j=1}^l \mu_j y_j(k)}{\sum_{j=1}^l \mu_j}$$

T-S 模糊模型神经网络如图 1 所示, 模糊神经网络分为前件网络和后件网络两部分。分别对应于模糊规则的前部和后部。

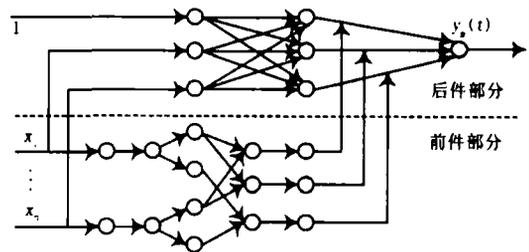


图 1 T-S 模型模糊神经网络结构  
Fig 1 T-S model fuzzy neural network

本文采用递阶遗传算法对前件网络的结构和权值分别进行训练, 具体思路是: 首先, 将不同层数和不同隐层节点数的每个神经网络作为遗传算法的每个个体。为了限制个体数, 同时保证实现模糊逻辑控制的模糊化、规则推理和逆模糊三个步骤, 本文参考其它文献的计算公式及某些经验<sup>[6,7]</sup>, 选取神经

网络的层数一般为 3~6,对应三个模糊逻辑层的节点数分别为输入变量论域的划分个数、模糊规则数和输出数,其它隐层节点数一般为 4~21。将每个个体都随机赋予  $[-1, 1]$ 之间的初始权值,根据混沌时间序列样本数据,计算它们的适应度,再进行复制、交叉和变异等操作对神经网络的结构进行优化。然后,在优化获得的网络结构上,再进行权值优化。对后件网络只进行权值训练。该算法克服了传统训练时,结构事先假定的缺陷,提高了网络收敛速度和收敛性能,建立的神经网络模型更能准确快速地逼近真实系统,为售电量的高精度预测提供了保证。

## 2 售电量预测及结果分析

取  $t=1$ ,用秦皇岛市区 1994~2003年 120组售电量数据作为原始的时间序列,重构相空间,计算其饱和嵌入维数  $m=5$ 。仍用这 120组数据,采用递阶遗传算法对图 1所示五输入单输出的模糊神经网络进行训练,得前件部分的网络结构为 5层。将 2004年的 12组数据作为测试点,用训练后的模糊神经网络进行售电量预测。图 2为混沌理论指导下的售电量模糊神经网络预测值、直接神经网络预测值与实际值对比图,单位为千瓦时。图 3为混沌理论指导下的模糊神经网络预测误差与直接神经网络预测误差对比图。

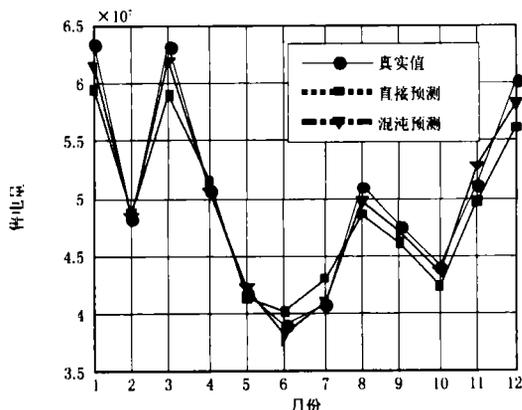


图 2 售电量的真实值和预测值

Fig 2 Actual and forecasted value of electricity sales

对秦皇岛其它地区售电量预测同样也取得了理想的结果,表明混沌理论指导下的神经网络预测方法比直接神经网络预测法具有更强的适应能力和更高的精确度。

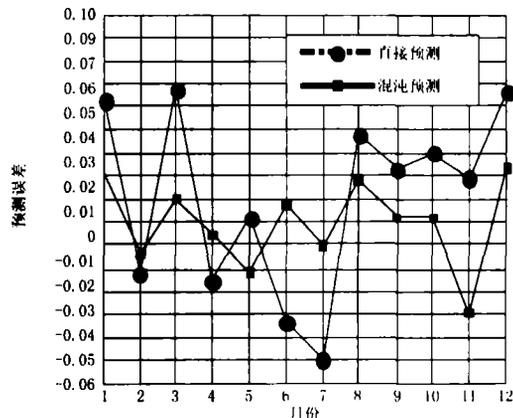


图 3 售电量预测的百分误差

Fig 3 Percentage error of electricity sales

## 3 结论

电力系统的售电量受气象、气温、人类活动等众多因素影响,其运动特征既有确定性的一面,又有随机性的一面,呈现出明显的混沌特性。运用混沌理论指导下建立的神经网络模型对电力系统售电量进行预测是一种全新的思路,它从混沌时间序列内在的规律出发,摒弃了许多不可靠的因素,极大地提高了预测精度。然而,将混沌理论应用于电力系统售电量预测毕竟为时尚短,还有许多值得改进的地方,对其更加深入的研究将使预测精度进一步得到提高。

## 参考文献:

- [1] 窦春霞. 基于混沌理论预测模型的模糊控制决策及应用[J]. 动力工程, 2004, 24(4): 518-521.  
DOU Chun-xia Measures of Fuzzy Controll and Its Application Based on Forecast Model by Chaos Theory[J]. Power Engineering, 2004, 24(4): 518-521.
- [2] 郭刚, 史忠科, 戴冠中. 基于混沌理论进行股票市场的多步预测[J]. 信息与控制, 2000, 29(2): 177-181.  
GUO Gang, SHI Zhong-ke, DAI Guan-zhong Stock Market Multi Step-Forecast Using Chaos Theory[J]. Information and Control, 2000, 29(2): 177-181.
- [3] 梁志珊, 王丽敏, 付大鹏, 等. 基于 Lyapunov指数的电力系统短期负荷预测[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(5): 368-371.  
LIANG Zhi-shan, WANG Limin, FU Da-peng, et al Electric Power System Short-term Load Forecasting Using Lyapunov Exponents Technique[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(5): 368-371.
- [4] 郭刚, 史忠科, 戴冠中. 依据混沌理论进行非线性系

- 统建模变量个数的最优选取 [J]. 控制与决策, 2000, 15(2): 233-235.
- GUO Gang, SHI Zhong-ke, DA I Guan-zhong. Select Optimal Number of Variable to Nonlinear Modeling with Chaotic Theory [J]. Control and Decision, 2000, 15(2): 233-235.
- [5] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy Identification of Systems and Its Application to Modeling and Control [J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, 1985, 15(1): 116-132.
- [6] 金先级. 人工神经网络导论讲义 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996.
- JN Xian-ji Teaching Materials of Neural Network [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1996.
- [7] Roger Jang J S. ANFIS: Adaptive-Neuro-Based Fuzzy Inference System [J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, 1993, 23(3): 665-685.

收稿日期: 2006-04-14; 修回日期: 2006-06-25

作者简介:

曲正伟 (1979 - ), 男, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为混沌理论在电力系统中的应用和现代电磁测量技术及仪器。E-mail: ysuwyj@sina.com

### Study of electricity sales forecast based on chaos theory

QU Zheng-wei, WANG Yun-jing, JIA Qing-quan

(College of Electric Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** The phase space is reconstructed using the electricity sales time series of the power system which has chaotic characteristics in this paper. After calculating saturated embedded dimension and maximal Lyapunov exponent of the reconstructed phase space, a T-S fuzzy neural network forecasting model is constructed under the instruction of the saturated embedded dimension. The hierarchy genetic algorithm, which is employed for training the structure and weight of the T-S fuzzy neural network, is very helpful to choose the most appropriate predicting model, increase the convergent speed and enhance the generalization capability of the neural network. Based on the above, the proposed method is employed to forecast time series of electricity sales of Qinhuangdao Power Company. The predicted results show that this method accurately can represent the chaotic dynamics behaviors of the chaos time series of electricity sales, and make precision forecast in the range of predicible scale with strong adaptive ability.

**Key words:** chaos; fuzzy neural network; phase space; maximal Lyapunov exponent; electricity sales; forecasting

(上接第 58 页 continued from page 58)

- [7] 郭小鹏, 李存斌. Visual C++ 高级编程及其项目开发 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- GUO Xiao-peng, LI Cun-bin. Visual C++ High Programming and Application Design [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [8] 沈金官. 电网监控技术 [M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1995.
- SHEN Jin-guan. Electric Power Network Supervisory and Control Technique [M]. Beijing: China Water Power Press, 1995.
- [9] 盛寿磷. 电力系统远动技术 [M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1996.
- SHEN Shou-lin. Electric Power System Telecontrol Technique [M]. Beijing: China Water Power Press, 1996.

收稿日期: 2006-03-22; 修回日期: 2006-04-27

作者简介:

鞠阳 (1963 - ), 男, 硕士, 副教授, 主要从事电网监视与控制方面的教学和研究工作; E-mail: juyang\_nj@yahoo.com.cn

张惠刚 (1957 - ), 男, 硕士, 教授, 系主任, 主要从事电网监视与控制方面的教学和研究工作。

### Design and application of IEC60870-5-104 telecontrol protocol

JU Yang, ZHANG Hui-gang

(Dept of Electric Power, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 210013, China)

**Abstract:** The international standard IEC60870-5-104 telecontrol protocol is explained, which is based on TCP/IP and enacted by the International Electric Technical Commission (IEC). The paper analyses frame format, architecture reference model and transmission procedures of IEC60870-5-104 telecontrol protocol. According to the engineering experience, the implementation of IEC60870-5-104 and the key points are analyzed. The design and application of the protocol in the studying and training system of electric power network monitoring and controlling are introduced in detail. The key techniques and solutions are given. Finally, the applications of IEC60870-5-104 in electric power network dispatching system in future are analyzed.

**Key words:** IEC60870-5-104; telecontrol protocol; SCADA; TCP/IP protocol