

加权一阶局域法在电力系统短期负荷预测中的应用*

吕金虎, 张锁春

(中国科学院 数学与系统科学研究院, 北京 100080)

摘要: 在混沌时间序列的基础上提出加权一阶局域法, 并将其应用于电力系统历史负荷数据序列进行预测. 通过对华东某电网实际负荷数据进行预测, 结果令人满意.

关键词: 混沌时间序列; 加权一阶局域法; 负荷预测

中图分类号: O29, TM714

文献标识码: A

Application of adding-weight one-rank local-region method in electric power system short-term load forecast

LÜ Jin-hu, ZHANG Suo-chun

(Academy of Mathematics & Systems Sciences, Academia Sinica, Beijing 100080, China)

Abstract: Adding-weight one-rank local-region method is introduced on chaotic time series. And this method is applied to the forecast of electric power system short-term load. Through the short-term load forecasting of a certain electric network in East China, the result is satisfied.

Key words: chaotic time series; adding-weight one-rank local-region method; load forecasting

1 引言(Introduction)

混沌(chaos)是指确定性系统中出现的一种貌似无规则的、类似随机的现象^[1]. 混沌是 20 世纪物理学第三次最大的革命. 混沌科学与其它科学相互渗透, 如在生物、数学、化学、经济、气象等领域中均得到了广泛的应用.

短期负荷预测是电力系统的一项基本工作, 是调度安排开停机计划的基础, 对电网调度自动控制非常重要, 其预测精度直接影响电力系统的经济效益^[2,3]. 长期以来, 人们致力于电力系统短期负荷预测方法的研究, 并取得了很大的进展. 提出了很多预测方法, 如: 改进的混沌模型法^[3]、时间序列法^[4]、神经网络法^[5]、专家系统法^[6]、模糊神经网络法^[7]以及将各种方法加权组合的方法等. 从时间序列研究混沌, 始于 Packard^[1](1980)提出的重构相空间理论. 在重构相空间的基础上, 人们先后提出了全域法、局域法、加权零阶局域法等预测方法, 本文提出加权一阶局域法, 并将其应用于电力系统短期负荷预测. 计算结果表明, 该方法计算量小、相对容易操作, 并且具有很强的自适应能力和鲁棒性、精度高、通用

性强.

2 加权一阶局域法(Adding-weight one-rank local-region method)

2.1 重构相空间(Reconstruction of phase space)

最初提出相空间重构的目的在于高维相空间中恢复混沌吸引子. 系统任一分量的演化是由与之相互作用着的其它分量所决定的. 因此, 这些相关分量的信息就隐含在任一分量的发展过程中^[8]. 这样, 就可以从某一分量的一批时间序列数据中提取和恢复出系统原来的规律, 这种规律就是高维空间下的一种轨迹. 由于混沌系统的策动因素是相互影响的, 因而在时间上先后产生的数据点也是相关的. Packard^[1]建议用原始系统中的某变量的延迟坐标来重构相空间, Takens^[9]证明了可以找到一个合适的嵌入维, 即如果延迟坐标的维数 $m \geq 2d + 1$, d 是动力系统的维数, 在这个嵌入维空间里可以把有规律的轨迹(吸引子)恢复出来. 也即在重构的 $\mathbb{R}^m$ 空间中的轨线上原动力系统保持微分同胚, 从而为混沌时间序列的预测奠定了坚实的理论基础.

电力负荷是一个多维非线性系统^[2,3], 而在生产

* 基金项目: 国家自然科学基金(10171099)资助项目.

收稿日期: 2000-09-12; 收修改稿日期: 2001-10-08.

实际中容易得到的只是负荷的时间序列. 影响负荷有众多因素^[10], 仅仅依赖某一因素来预测电力负荷显然是有很大的局限性的, 但利用重构相空间的方法预测在理论上是有保障的. 根据实际观测到的电力负荷值序列, 通过相空间重构可以近似恢复原来的多维非线性混沌系统, 然后基于重构的相空间(实际负荷系统的近似)进行预测(主要是利用该系统的轨道发展规律即混沌吸引子来预测). 设负荷序列为 $\{x(t_i), i = 1, 2, \dots, n\}$, 时间间隔为 h , 相空间重构的具体方法如下:

首先根据 Grassberger-Procaccia 方法计算出关联维 d , 再由 $m \geq 2d + 1$ 确定嵌入维 m . 根据时间序列的自相关函数下降到初始值的 $1 - \frac{1}{e}$ 或由互信息第一次到达极小值来确定时间延迟 $\tau = kh$, 其中 k 是一个正整数. 这样, 时间序列 $\{x(t_i), i = 1, 2, \dots, n\}$ 的相空间可以表示为

$$X_i(t) = (x(t_i), x(t_i + \tau), \dots, x(t_i + (m-1)\tau)), \quad i = 1, 2, \dots, M. \quad (1)$$

其中, $X_i(t)$ 是相空间中的点, M 满足条件:

$$M = n - (m-1)k.$$

2.2 加权一阶局域法 (Adding-weight one-rank local-region method)

大量的实际应用和数值实验表明: 一般情况下, 局域法的预测效果好于全域法; 一阶局域法的预测效果好于零阶局域法; 加权零阶局域法的预测效果好于零阶局域法. 据此, 我们提出了加权一阶局域法, 数值实验表明其预测效果要明显优于一阶局域法和加权零阶局域法. 研究表明在所有的给定时间序列点中只有与预报中心点相邻的那些点对预报值影响较大(邻近效应), 而那些边缘(距离上)点对预测值影响很小, 可以忽略. 局域法在预测中将所有相邻的点对预测值的影响视为是相同的, 而我们研究发现不同的邻近点对预测的影响是不同的, 应该给定一个权值, 而这个权值与距离是密切相关的, 因为距离越近影响越大. 加权一阶局域法实际上是在我们原有的局域法上的一种改进, 而且由于引进权值使得比其它局域法有较好的自适应能力和较高的预测精度.

设中心点 X_k (即预测的起始点) 的邻近点为 $X_{ki}, i = 1, 2, \dots, q$ (q 为一个整数, 它依赖于指定的邻近距离的大小), 并且到 X_k 的距离为 d_i , 设 d_m 是 d_i 中的最小值, 定义点 X_{ki} 的权值为:

$$P_i = \frac{\exp(-l(d_i - d_m))}{\sum_{j=1}^q \exp(-l(d_j - d_m))}. \quad (2)$$

l 为参数, 一般取 $l = 1$.

则一阶局域线性拟合为:

$$X_{ki+1} = ae + bX_{ki}, \quad i = 1, 2, \dots, q. \quad (3)$$

其中 $e = (1, 1, \dots, 1)^T$.

即写成向量的形式为:

$$\begin{bmatrix} X_{k1+1} \\ X_{k2+1} \\ \vdots \\ X_{kq+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e & X_{k1} \\ e & X_{k2} \\ \vdots & \vdots \\ e & X_{kq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\text{其中 } e = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}_m.$$

我们仅就 $m = 1$ 的情况进行讨论, $m > 1$ 情况类似, 即:

$$\begin{bmatrix} x_{k1+1} \\ x_{k2+1} \\ \vdots \\ x_{kq+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e & x_{k1} \\ e & x_{k2} \\ \vdots & \vdots \\ e & x_{kq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}. \quad (5)$$

应用加权最小二乘法有:

$$\sum_{i=1}^q P_i (x_{ki+1} - a - bx_{ki})^2 = \min. \quad (6)$$

将(6)式看成是关于未知数 a, b 的二元函数, 两边求偏导得到

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^q P_i (x_{ki+1} - a - bx_{ki}) = 0, \\ \sum_{i=1}^q P_i (x_{ki+1} - a - bx_{ki}) x_{ki} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

即化简得到关于未知数 a, b 方程组得:

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^q P_i x_{ki} + b \sum_{i=1}^q P_i x_{ki}^2 = \sum_{i=1}^q P_i x_{ki} x_{ki+1}, \\ a + b \sum_{i=1}^q P_i x_{ki} = \sum_{i=1}^q P_i x_{ki+1}. \end{cases} \quad (8)$$

解方程组(8)得到 a, b , 然后代入(3)得预测公式. 根据预测公式, 参考向量集为 $X_{ki} (i = 1, 2, \dots, q)$ 的一步预测为 $X_{ki+1}, i = 1, 2, \dots, q$.

3 电力系统短期负荷预测 (Short-term load forecast of power system)

本文根据电力系统历史负荷数据序列进行坐标延迟的相空间重构, 建立起电力系统短期负荷的非线性混沌模型. 然后按照本文提出的加权一阶局域算法和原有的局域法编成软件以华东某电网 1999 年 5 月 2 日 ~ 1999 年 6 月 5 日 (五周) 的 840 个数据为基础进行预测和比较. 为了确保预测精度, 我们只进行一步预测, 每步预测结束后, 重新寻找参考向量集为 $X_{ki}, i = 1, 2, \dots, q$, 然后再进行下一步预测.

我们根据华东某电网 1 月至 9 月电力负荷数据进行大量的计算分析和预测,由于篇幅所限,本文仅给出 6 月 6 日的数据分析如表 1, 图 1, 6 月 6 日~6 月 12 日(一周)的预测结果如表 2. 其预测精度是比较高的, 6 月 6 日的误差基本上控制在 3% 以内, 且误差小于等于 1% 的情况达到 75%. 与其它方法^[3~5]相比,精度有明显的提高,如表 3 给出了一般局域法的预测效果,从表 2 和表 3 的对比可知这种加权一阶局域法的改进是有效的.

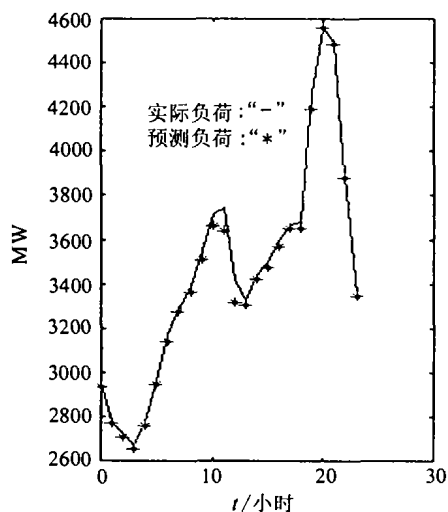


图 1 华东某电网 1999 年 6 月 6 日实际和预测电力负荷值

Fig. 1 Actual and forecasted load data of a electric network in East China on June 6, 1999

表 1 1999 年 6 月 6 日的实际预测结果(单位:兆瓦时)

Table 1 The actual forecast results of June 6, 1999

小时	实测	预测	误差/(%)
0	2953.27	2932.60	0.7
1	2778.36	2767.20	0.4
2	2720.42	2704.1	0.6
3	2669.83	2651.1	0.7
4	2777.7	2761.0	0.6
5	2959.34	2947.5	0.4
6	3175.47	3140.5	1.1
7	3280.58	3277.3	0.1
8	3393.87	3363.3	0.9
9	3551.8	3509.2	1.2
10	3717.08	3661.3	1.5
11	3745.84	3641.0	2.8
12	3421.59	3315.5	3.1
13	3329.77	3306.5	0.7
14	3435.83	3422.1	0.4
15	3496.76	3475.8	0.6
16	3599.88	3567.5	0.9
17	3666.71	3648.4	0.5
18	3680.28	3650.8	0.8
19	4261.09	4188.7	1.7
20	4561.11	4556.5	0.1
21	4494.52	4481.00	0.3
22	3890.03	3878.4	0.3
23	3351.56	3344.9	0.2

表 2 1999 年 6 月 6 日~6 月 12 日(一周)的预测结果误差(加权一阶局域法)

Table 2 The errors of forecast of one week from June 6 to June 12, 1999
(adding-weight one-rank local-region method)

误差	6 日	7 日	8 日	9 日	10 日	11 日	12 日	合计
< 1%	75.00	70.83	66.67	66.67	66.67	45.83	45.83	62.5
1%~3%	20.83	25.00	29.16	25.00	25.00	41.67	41.67	29.76
> 3%	4.17	4.17	4.17	8.34	8.34	12.5	12.5	7.74

表 3 1999 年 6 月 6 日~6 月 12 日(一周)的预测结果误差(局域法)

Table 3 The errors of forecast of one week from June 6 to June 12, 1999 (local-region method)

误差	6 日	7 日	8 日	9 日	10 日	11 日	12 日	合计
< 1%	70.83	66.66	66.66	66.67	62.50	45.83	45.83	60.71
1%~3%	20.83	25.00	25.00	20.83	25.00	33.34	33.34	26.19
> 3%	8.34	8.34	8.34	12.5	12.5	20.83	20.83	13.10

4 小结(Conclusion)

本文在混沌时间序列的基础上提出了加权一阶局域法,并将其应用于电力系统短期负荷预测.通过对华东某电网实际负荷数据进行预测和传统的局

域法预测效果进行比较分析,结果表明加权一阶局域法不仅预测精度高,而且操作方便,具有较好的实用性和广阔的应用前景.值得提出是本文预测方法受气候等不定因素的影响比较小,因而比较可靠,但

该方法还有一些地方值得进一步改进,如怎样选择权值更加合适等.

参考文献(References)

- [1] Packard N H. Geometry from a time series [J]. Physics Review Letters, 1980, 45(9):712-718
- [2] Liang Z S, Wang L M. Short-term load forecast of power system based on Lyapunov exponent [J]. Proceeding of the Chinese Society for Electrical Engineering, 1998, 18(5):368-375 (in Chinese)
- [3] Lü J H, Zhan Y, Lu J A. The non-linear chaotic improved model of electric power system short-term load forecasting [J]. Proceeding of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2000, 20(12):80-83 (in Chinese)
- [4] Hagan M T, Behr S M. The time series approach to short term load forecasting [J]. IEEE Trans. on Power System, 1987, 2(3):25-30
- [5] Liang Z S. The Short-term load forecast of power system based on adaptive neural network [J]. J. of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 1994, 14(1):27-35 (in Chinese)
- [6] Rahama S, Bhatnagar R. An expert system based algorithm for short

term load forecast [J]. IEEE Trans. on Power System, 1988, 3(2):392-399

- [7] Bakirtzis A G, Theocharis J B, Kiartzis S J, et al. Short term load forecasting using fuzzy neural networks [J]. IEEE Trans. on Power System, 1995, 10(3):1518-1524
- [8] Lü J H, Lu J A, Chen S H. Chaotic Time Series and Its Application [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002 (in Chinese)
- [9] Takens F. Determining strange attractors in turbulence [A]. In Lecture Notes in Mathematics, Vol. 898: Dynamical Systems and Turbulence [M]. Berlin: Springer, 1981
- [10] Lai X P, Zhou H X, Yun C X. Application of compound model neural network in short-term load forecast of power system [J]. Control Theory & Applications, 2000, 17(1):43-49 (in Chinese)

本文作者简介

吕金虎 1974 年生. 2002 年 6 月获中国科学院数学与系统科学研究院博士学位. 主要研究方向为混沌控制与同步, 混沌时间序列分析, 复杂系统控制. Email: lvjinh@amss.ac.cn

张锁春 1940 年生. 中国科学院应用数学研究所研究员, 博士生导师, 中国计算物理学会副理事长. 主要研究方向为计算物理, 应用数学.

(上接第 766 页)

- [4] Wang Guangyuan, Wang Wenquan. Mathematical programming with general fuzzy constraints [J]. Fuzzy Mathematics, 1986, 6(1):1-8 (in Chinese)

本文作者简介

顾佳晨 1970 年生. 1998 年硕士研究生毕业, 现为西安交通大学系统工程专业博士研究生. 研究领域为大系统智能优化控制.

万百五 见本刊 2002 年第 1 期第 79 页.

管晓宏 1955 年生. 1982 年和 1985 年分获清华大学工学学士和工学硕士学位, 1993 年获美国康涅狄格大学博士学位. 现任西安交通大学制造系统国家重点实验室主任, 系统工程研究所所长江特聘教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 并任 Automatica 编委. 目前研究方向包括电力市场下综合资源竞标与调度, 市场预测, 基于因特网的资源竞标以及计算机网络安全.