# 电力系统短期负荷的特征指数相空间重构预测法

姜　勇

(江苏省电力公司南京供电公司，江苏 南京 210008)

**摘要**：针对电力负荷变化的特点，提出一种采用特征指数的混沌预测方法，采用相空间重构和局域近似原理建立预测模型，较好地考虑了电力系统负荷波动的日周期性，具有良好的预测效果，最大负荷、最小负荷的预测精度较高，表明这是一种行之有效的短期日负荷预测方法。

**关键词**：短期负荷预测；特征指数；相空间；重构

**中图分类号**：TM715　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1003-4897(2003)03-0011-04

## 1　引言

在电力系统运行管理中，负荷预测决定了发电、输电和电能分配等方面的合理安排问题，对电力系统的安全经济运行与国民经济的发展具有非常重要的影响。随着电力企业逐步走向市场，短期负荷预测将逐步赋予更高的要求。由于电力负荷受政治、环境、气候以及电力工业自身状况等多种因素的影响，因此负荷预测是一项十分复杂的工作。

本文将伪随机现象中有序过程的混沌学理论引入到电力系统负荷预测工作中，提出了新的预测方法，对于提高负荷预测的精度是有利的。

## 2　基于特征指数的相空间重构理论进行短期负荷预测的基本原理

短期负荷序列随时间的演变过程中，存在着多种周期性变化，最明显的是以日为周期的变化。此外由于影响负荷变化的因素较多，以及电力系统本身的非线性，使电力系统负荷在一定程度上呈现貌似随机的特点，因此很难建立精确的数学模型来对其描述。

对于短期负荷序列来说，如果用方程来描述其演变过程的话，所需的变量个数应为多个，但在实际中一般只对电力负荷数据以一定时间采样而得到一个离散时间序列，对此类混沌序列，James P. Grutchfield，J. Doyne Farmer，Norman H. Pachard 及 Robert S. Shaw 四人小组提出了相空间重构理论。其基本思想是：系统中任一分量的演化都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藏在任一分量的发展过程中，为了重构一个“等价”的状态空间，只需考察一个分量，并将它在某些固定的时间延迟点(比如 1 小时前、2 小时前等)上的测量作为新维处理，即延迟值被看成是新的坐标。它们确定了某个多维状态空间中的一点。

设有提取出日周期特征指数从而消除日周期影响的负荷序列 $x_1, x_2, \cdots, x_n$，分别作出 2 维、3 维以至 $m$ 维嵌入，可得到新的维矢量序列 $X_k = (x_k, x_{k-1}, \cdots, x_{k-m+1}) \in R^m$，对此多维序列，可以采用局域近似模型等方法进行预测。

## 3　电力负荷的日周期性和混沌性[1~2]

### 3.1　电力负荷中日周期的存在

在一段时间内，每日负荷变化比较接近，波动变化比较一致，可以认为在电力负荷的变化中存在着以日为周期的季节性趋势，如图 1 所示。

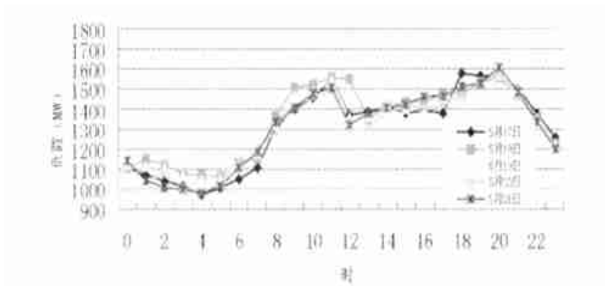


**图 1　负荷变化曲线**

Fig. 1　Load curve

### 3.2　日负荷曲线特征指数的提取

将负荷序列记为 $x_{0,1}, x_{1,1}, x_{2,1}, \cdots x_{23,1}, x_{0,2}, x_{1,2}, x_{2,2}, \cdots, x_{23,2}, \cdots, x_{0,m}, x_{1,m}, x_{2,m}, \cdots x_{23,m}, x_{l,m}$ 表示第 $m$ 天第 $l$ 点负荷值，则日负荷曲线中特征指数的计算如下。

(1) 计算出每日平均值

$$\overline{X}_m = \frac{1}{24}\sum_{l=0}^{23} x_{l,m} \tag{1}$$

(2) 求出每日 24 点的特征指数

$$I_{l,m} = x_{l,m} / \sqrt{X_m} \tag{2}$$

(3) 以各周期中同一时刻的 $I_{l,m}$ 的平均值作为总体特征指数:

$$I_l = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m} I_{l,j} \tag{3}$$

(4) 求出消除周期性影响的新序列 $x'_{l,m}$

现已得到 $I_l$,则得到消除季节性影响的序列为:

$$x'_{l,m} = x_{l,m} / I_l \tag{4}$$

在得到新负荷序列 $x'_{l,m}$ 后,采用混沌学中的相空间重构理论预测出未来时刻的 $x'_{l,m+n}$,则预测日的负荷值为:

$$x_{l,m+n} = x'_{l,m+n} \cdot I_l \qquad n = 1,2,3,\cdots \tag{5}$$

### 3.3 电力系统负荷的混沌特性分析

混沌并不是无序与紊乱,它是非线性系统所产生的复杂的不规则行为,这种不规则现象在大自然中是普遍存在的。

如果时间序列是确定的,则对于恰当的嵌入维数 $m$ 和时间延迟 $\tau$,可以将 $X_k$ 视为由某个连续映射 $F$ 确定的离散动力系统的轨道。对于一个连续映射 $F$,靠在一起的点映射后仍然靠在一起。基于这个事实,可以对时间序列的确定性结构进行检验。设 $X_0$ 是重构相空间中的一个固定向量,$Y_1, Y_2, \cdots Y_n$ 表示其 $n$ 个邻近值,$Z_1, Z_2, \cdots, Z_n$ 是对应的映射值。

定义其传递向量:

$$V_j = Y_j - Z_j \ (j = 1,2,\cdots,n) \tag{6}$$

传递误差:

$$E_t = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{n} \frac{\| V_j - \overline{V} \|}{\| \overline{V} \|} \tag{7}$$

式(7)中 $\overline{V}$ 表示传递向量的平均值:

$$\overline{V} = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{n} V_j \tag{8}$$

如果时间序列是确定的,且 $X_0$ 和其 $n$ 个邻近值在 $m$ 维空间的一个足够小的区域内,则 $V_j$ 几乎相等,而且传递误差 $E_t$ 也很小。对于噪声(完全随机)序列,$E_t$ 将很大。因而可以利用 $E_t$ 的大小对时间序列的确定性结构进行检验。

Lyapunov 指数是对时间序列进行确定性检验的又一种非常重要的方法。在混沌系统中不可能对系统的状态进行长期预测,这是由于在初始状态的微小不确定性将会迅速按指数速度扩大。预测能力的迅速丧失是因为系统有这样的特性,那些初始状态比较接近的轨迹总会指数发散。这种轨迹收敛或发散的比率,称为Lyapunov 指数,它在混沌研究中是非常重要的。正的 Lyapunov 指数意味着混沌,因此求解动力系统Lyapunov 指数是研究混沌现象常用的方法之一。

对于一个时间序列来说,其最大 Lyapunov 指数为:

$$\lambda = \frac{1}{N_m}\sum_{k=1}^{m} \frac{L'_{t_k+1}}{L_{t_k}} \tag{9}$$

式(9)中,$N_m$ 为时间序列在重构相空间中的总点数,$M$ 为($L_{t_k}$,$L'_{t_k+1}$)所构成的组数;$L_{t_k}$ 为点 $X_k = (x_k, x_{k-1}, \cdots, x_{k-m+1})$ 在时刻 $k$ 与其最临近点的距离;$L'_{t_k+1}$ 为时刻 $k+1$ 时 $L_{t_k}$ 的长度。当 $\lambda > 0$ 时,由式(9)可知,$L_{t_k}$ 将指数增加到 $L'_{t_k+1}$,即在 $k$ 时刻的相邻两点将以指数速度分开,故此时系统为混沌的;当 $\lambda = 0$ 时,$L_{t_k}$ 无变化,系统出现周期现象;当 $\lambda < 0$ 时,系统是稳定的。

采用式(9),对消除日周期变化后的时负荷进行了计算,其最大 Lyapunov 指数 $\lambda = 0.094$,此时嵌入维数 $m = 3$。由此可以证明,电网时负荷存在明显的混沌行为。

## 4 基于特征指数的相空间重构预测模型[3]

自 1963 年 Lorenz 首次提出"蝴蝶效应"(即对初始条件的敏感性)以来,将研究非线性变化的混沌理论引入到电力负荷的预测中,提出更加可靠、准确的方法一直是人们研究的课题。非线性是产生混沌序列的根本原因,因此在寻找预测方法时,不应忘记混沌是确定性的,即混沌服从一定的规则,它具有有限的预测能力,并可能比基于一般统计方法的预测更好些。

### 4.1 局域近似模型

根据式(7),可以考虑采用局域近似来进行预测,即仅仅是相空间中当前状态附近的状态被用来进行预测,这样将得到比较柔性的预测方法。

局域近似的方法就是:首先在 $m$ 维空间中找出 $X(t)$ 的 $k$ 个邻近点 $X(t_1), X(t_2), \cdots X(t_k)$,确定这些点的原则是要求满足下式:

$$\| X(t) - X(t_i) \| < \delta, i = 1,2,\cdots,k \tag{10}$$

式(10)中:$\| \cdot \|$ 为在状态空间中定义的距离,且 $t > t_1, > t_2, \cdots, > t_k$。

设 $X(t_i)$ 经过映射 $F[X(t_i)]$ 下一步迭代到点 $X(t_i + 1)$,采用一阶局域线性近似时,有公式:

$$X(t_i+1) = F[X(t_i)] = a + bX(t_i) \qquad (11)$$

写成矩阵形式有:

$$A = BC \qquad (12)$$

其中: $A = \begin{bmatrix} X(t_1+1) \\ \cdots \\ X(t_k+1) \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 1 & X(t_1) \\ \cdots & \cdots \\ 1 & X(t_k) \end{bmatrix}$,

$C = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$, $b = [b_1, \cdots, b_m]$,由最小二乘法可求得 C 矩阵,求得系数为 $\hat{a}$, $\hat{b}$。

则 $X(t)$ 的下一步预测值就是:

$$\hat{X}(t+1) = \hat{a} + \hat{b}X(t) \qquad (13)$$

而 $\hat{X}(t+1) = \{\hat{x}(t+1), \hat{x}(t), \cdots, \hat{x}(t-m+2)\}$ 的第一个分量 $\hat{x}(t+1)$ 就是对 $x(t+1)$ 的预测值。

4.2　计算步骤

①根据式(1)～(4)求出消除日周期影响的时负荷值。

②根据式(12)～(13)求出时负荷的预测值。

③最后由式(5)求出符合电力系统周期性变化的负荷预测值。

## 5　计算实例分析

以预测5月26日的0点负荷为例,先得到消除日周期影响的历史负荷值,

5月25日的负荷值如表1所示。

同样,5月24日、5月23日的0点负荷值在消除日周期影响后分别为:1348.73,1202.10。此时0点特征指数 $I_0$ 为0.8593。

令 $m=3$,可以得到一个相空间重构点为(1285.89,1348.73,1202.10)。

根据式(10)找到最临近的一个点为(1285.89,1284.73,1212.58),其映射点为(1302.18,1285.89,1284.73),由式(12)求得 $\hat{a}=1126.25$, $\hat{b}=0.13$。

由式(13)得到预测值为(1293.42,1301.58,1282.53),则5月26日0点的负荷预测值为 $1293.42 \cdot I_0 = 1111.43$ MW,该时刻实际负荷值为1116 MW。

表1　5月25日负荷值

Tab.1　Load on 5.25

| 时间/H | 负荷原值/MW | 消除周期性后/MW | 时间/H | 负荷原值/MW | 消除周期性后/MW |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1105 | 1285.89 | 12 | 1372 | 1322.04 |
| 1 | 1104 | 1327.53 | 13 | 1388 | 1337.73 |
| 2 | 1032 | 1262.83 | 14 | 1450 | 1363.36 |
| 3 | 1063 | 1330.39 | 15 | 1456 | 1355.39 |
| 4 | 1018 | 1297.27 | 16 | 1410 | 1308.15 |
| 5 | 1045 | 1299.24 | 17 | 1477 | 1333.15 |
| 6 | 1144 | 1333.61 | 18 | 1544 | 1351.89 |
| 7 | 1199 | 1334.78 | 19 | 1510 | 1314.20 |
| 8 | 1343 | 1350.09 | 20 | 1618 | 1357.39 |
| 9 | 1425 | 1315.33 | 21 | 1515 | 1347.05 |
| 10 | 1518 | 1342.73 | 22 | 1371 | 1325.30 |
| 11 | 1561 | 1344.76 | 23 | 1221 | 1303.00 |

在对江苏某市日负荷进行实际预测后,可以发现该方法在负荷平稳的春秋季和负荷波动较大的夏季均有良好的预测效果。以下是应用该方法对江苏某市1999年5月和9月的预测结果,如表2所示。

表2　计算实例

Tab.2　Calculation cases

| 月 | 日 | 平均相对误差/% | 最大负荷的误差/% | 最小负荷的误差/% | 月 | 日 | 平均相对误差/% | 最大负荷的误差/% | 最小负荷的误差/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 1 | 4.29 | -3.15 | -1 | 9 | 1 | 3.57 | -2.79 | 2.58 |
| 5 | 2 | 2.94 | -2.79 | -1.56 | 9 | 2 | 4.94 | -4.03 | -2.98 |
| 5 | 3 | 2.25 | -0.31 | 0.13 | 9 | 3 | 3.09 | -4.31 | -0.73 |
| 5 | 4 | 3.82 | -2.95 | 0.13 | 9 | 4 | 3.81 | -3.65 | 0.24 |
| 5 | 5 | 3.71 | -2.3 | -1.97 | 9 | 5 | 3.06 | -2.39 | 0.79 |
| 5 | 6 | 2.74 | -0.75 | -1.82 | 9 | 6 | 4.36 | -3.25 | -2.76 |
| 5 | 7 | 2.94 | -1.64 | -0.23 | 9 | 7 | 4.33 | -3.54 | -4.51 |
| 5 | 8 | 3.89 | -2.6 | 0.53 | 9 | 8 | 3.41 | -2.27 | -3.61 |
| 5 | 9 | 2.94 | 2.71 | -3.02 | 9 | 9 | 3.85 | -3.88 | -3.91 |
| 5 | 10 | 3.42 | 2.91 | 2.21 | 9 | 10 | 4.26 | -3.86 | -3.85 |
| 5 | 11 | 3.02 | -1.07 | 3.33 | 9 | 11 | 3.13 | -3 | -0.47 |
| 5 | 12 | 3.41 | -2.98 | -1.41 | 9 | 12 | 3.86 | 0.35 | -2.47 |

续表 2

| 月 | 日 | 平均相对误差/% | 最大负荷的误差/% | 最小负荷的误差/% | 月 | 日 | 平均相对误差/% | 最大负荷的误差/% | 最小负荷的误差/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 13 | 2.11 | -2.41 | -2.59 | 9 | 13 | 3.29 | 3.56 | 1.87 |
| 5 | 14 | 1.92 | -2.32 | 3.62 | 9 | 14 | 3.85 | 3.39 | 4.6 |
| 5 | 15 | 2.53 | -3.2 | 1.04 | 9 | 15 | 3.02 | 2.74 | 4.52 |
| 5 | 16 | 3.13 | 2.48 | 0.37 | 9 | 16 | 3.37 | 2.27 | 2.06 |
| 5 | 17 | 2.2 | 1.31 | 2.97 | 9 | 17 | 3.9 | 2.46 | 1.13 |
| 5 | 18 | 2.73 | -0.67 | 1.63 | 9 | 18 | 3.36 | 3.43 | 3.39 |
| 5 | 19 | 3.1 | -2.09 | -0.13 | 9 | 19 | 2.87 | 2.2 | 2.37 |
| 5 | 20 | 2.13 | 0.06 | 1.29 | 9 | 20 | 3.26 | 3.67 | 3.31 |
| 5 | 21 | 3.09 | -2.76 | -0.93 | 9 | 21 | 4.9 | 3.9 | 4.09 |
| 5 | 22 | 3.85 | -2.43 | -2.55 | 9 | 22 | 1.98 | -2.66 | 3.32 |
| 5 | 23 | 2.85 | -2.78 | 2.4 | 9 | 23 | 1.99 | 1.54 | -1.51 |
| 5 | 24 | 3.31 | -0.36 | 1.77 | 9 | 24 | 1.29 | 1.45 | 2.54 |
| 5 | 25 | 2.86 | -3.1 | -1.41 | 9 | 25 | 2.98 | -0.72 | 2.4 |
| 5 | 26 | 1.7 | 1.06 | 2.11 | 9 | 26 | 2.75 | -0.7 | -1.22 |
| 5 | 27 | 3.42 | -3.38 | 0.87 | 9 | 27 | 3.95 | -4.15 | 0.85 |
| 5 | 28 | 2.24 | -1.53 | 0.14 | 9 | 28 | 2.23 | -1.82 | -0.29 |
| 5 | 29 | 2.83 | -0.46 | 0.5 | 9 | 29 | 3.55 | -2.89 | 3.79 |
| 5 | 30 | 2.69 | -1.54 | 2.24 | 9 | 30 | 2.78 | -2.93 | 1.78 |

## 6 结论

准确进行短期负荷预测是电力行业企盼的,本文提出一种基于特征指数的相空间重构短期负荷预测方法。该方法利用了混沌理论来处理负荷预测中的非线性问题,同时考虑了短期负荷变化的日周期性,提取出其特征指数,无论是在负荷平稳的季节还是在负荷波动较大的季节,其总体预测结果是比较令人满意的。与传统负荷预测方法相比,最大、最小负荷的预测精度有较大提高,算例表明了这是一种有效的短期日负荷预测方法。

参考文献:

[1] 牛东晓,曹树华,赵磊,等.电力负荷预测技术及其应用[M].北京:中国电力出版社.1998,10.
[2] 卢侃,孙建华,欧阳容百,等.混沌动力学[M].上海:翻译出版公司,1990.
[3] 王东生,曹磊.混沌、分形及其应用[M].合肥:中国科学技术大学出版社,1995.

收稿日期: 2002-08-09; 修回日期: 2002-09-28

作者简介:
姜 勇(1976-),男,汉族,江苏省兴化市人,硕士,主要研究电力市场和电力系统负荷预测。

**Short-term load forecasting using restructuring algorithm of phase space based on characteristic index**

JIANG Yong
(Nanjing Power Supply Company, Jiangsu Power Company, NanJing 210008, China)

**Abstract**: Aiming at the characteristics of load, a short-term load chaos forecasting technique based on characteristic index is presented, which adopted restructuring algorithm of phase space and Location Approximate Approach. The method takes circle rhythm into account. The results of the experiment, especially the forecasting precision of the peak and the valley of load, are satisfactory.

**Key words**: short-term load forecasting; characteristic index; phase space; restructuring