中长期日负荷曲线预测的研究*

康重庆　夏　清　相年德　刘　梅
（清华大学电机系·100084·北京）

【摘　要】　针对我国电力部门所积累的基础数据，提出了一种基于用电结构分析的日负荷曲线预测方法，在建模时引进了灰色系统的思想，对原始数据作了生成处理，所建立的数学模型物理意义明确、表达方式简捷，并针对其特点提出了有效的求解方法，通过实例计算表明算法的有效性。

【关键词】　电力系统规划　灰色系统　日负荷曲线预测

1　引言

负荷预测是电力系统规划的基础，其内容包括需电量预测、最大负荷预测与负荷曲线预测[1]。长期以来，大量论文对需电量及最大负荷的预测进行了详尽的研究，而对负荷曲线预测的研究很少。实际上，中长期负荷曲线预测对电源结构优化具有重要意义，日负荷曲线是在时序负荷曲线下进行电力系统生产模拟的基础，系统内各机组带负荷位置、系统调峰容量是否足够以及互联系统错峰效益的大小等，都取决于日负荷曲线的形状。

日负荷曲线的变化是有规律的，例如同年同月中各日曲线形状接近，不同年份相同月份的典型日负荷曲线形状相似。日负荷率 γ 和最小负荷率 β 等特征参数可以反映曲线的特点与形状，并且均与社会用电结构、各部门分班用电制有着密切的关系。例如系统中第二产业比重大，则 γ、β 值较高，反之则 γ、β 值低。根据这一特点，并考虑到我国电力部门对历史资料的积累情况，本文提出了一种新的日负荷曲线预测方法。该方法将预测过程分解为两步，第 1 步基于用电结构分析进行特征参数预测，第 2 步以特征参数及基准负荷曲线为依据进行曲线预测。本文据此建立了物理意义明确、表达方式简捷的数学模型，并针对问题的特点，提出了快速有效的算法。该方法已应用于东北电网负荷预测软件，取得了良好的效果。

2　基准日负荷曲线的确定

在以往的电力系统规划中，通常仅由人工编制各水平年的冬、夏季典型日负荷曲线。但随着 1995 年 5 月 1 日起我国实行五天工作制，休息日数目增多，且其特征与正常工作日差别较大，因此对它的分析已经不能忽视。本文按每月一条典型工作日和休息日曲线加以研究，并可以单独考虑元旦、春节、五一、十一等典型节假日。各月代表日的选取应排除拉闸限电、事故等不正常因素的影响，尽量接近实际情况。也可以对历史上各年该月的典型曲线作综合分析比较，例如进行加权综合（近期的曲线应占较大的权重），确定该月的代表曲线。各典型日数据采取如下分析方法。

令 $T=24$（表示时段数），设待分析日的负荷数据为 $l_i(i=1、2、\cdots、T)$，当天最大负荷为 l_0，

---

* 1995－07－14 收稿，1995－11－24 改回。

康重庆，男，1969 年生，在读博士生，研究方向为电力系统规划。
夏　清，男，1957 年生，博士，副教授，主要从事电力系统规划及计算机技术应用的研究工作。

以 l_0 对 l_i 进行标幺化，得到当日负荷曲线 $d_i(i=1、2、\cdots、T)$，则成立如下关系式：

$$l_0 = \max\, l_i \qquad 1 \leqslant i \leqslant T \tag{1}$$

$$d_i = l_i / l_0 \tag{2}$$

当日的特征参数计算如下：

$$\gamma = \frac{1}{T}\sum_{i=1}^{T} d_i \tag{3}$$

$$\beta = \min\, d_i \qquad 1 \leqslant i \leqslant T \tag{4}$$

3　日特征参数 γ、β 的预测

采用常规的回归分析、动平均法、指数平滑法等手段，显然可以预测未来的 γ、β 值。本文进一步提出基于用电结构分析的预测方法。对多种方法的预测结果进行综合分析，可设置各方法的权重进行加权综合，得出最终的特征参数预测值。用电结构分析的预测结果应取较大权重。

设预测样本起始、终止年分别为 Y_1、Y_2，规划期起始、终止年分别为 Y_3、$Y_4(Y_3 = Y_2 + 1)$。记 $\gamma_{y,m}$、$\beta_{y,m}$ 为 y 年 m 月日负荷率和最小负荷率。与国民经济结构的分类相对应，设可以将用电负荷分为 N 类(如按产业途径可分为一、二、三产用电和居民生活用电，则 $N=4$)，记 $E_{i,y,m}$ 为第 i 类用电负荷在 y 年 m 月的用电量，$E_{y,m}$ 为全社会电量，满足 $E_{y,m} = \sum\limits_{i=1}^{N} E_{i,y,m}$。对于历史年份，即 $Y_1 \leqslant y \leqslant Y_2$ 时，$E_{i,y,m}$ 及 $\gamma_{y,m}$、$\beta_{y,m}$ 均已知；规划年份的 $E_{i,y,m}$ 可以通过电量预测得出，相应特征参数预测方法如下：

用 $E_{y,m}$ 对 $E_{i,y,m}$ 进行标幺化处理，有：

$$E_{i,y,m}^{(\mathrm{p.u})} = E_{i,y,m} / E_{y,m}, \qquad Y_1 \leqslant y \leqslant Y_4 \tag{5}$$

满足：

$$\sum_{i=1}^{N} E_{i,y,m}^{(\mathrm{p.u})} = 1, \qquad Y_1 \leqslant y \leqslant Y_4 \tag{6}$$

以月份为分类标准，对第 m 月可建立如下的多元线性相关模型：

$$\sum_{i=1}^{N} \left(E_{i,y,m}^{(\mathrm{p.u})} \cdot X_{i,m}^{(\gamma)} \right) = \gamma_{y,m}, \qquad Y_1 \leqslant y \leqslant Y_2 \tag{7}$$

$$\sum_{i=1}^{N} \left(E_{i,y,m}^{(\mathrm{p.u})} \cdot X_{i,m}^{(\beta)} \right) = \beta_{y,m}, \qquad Y_1 \leqslant y \leqslant Y_2 \tag{8}$$

其中　$X_{i,m}^{(\gamma)}$、$X_{i,m}^{(\beta)}$ 分别为第 i 类用电负荷与日负荷率、最小负荷率的相关系数。

当历史年份较多，即 $Y_2 - Y_1 + 1 \geqslant N$ 时，可通过最小二乘法求出(7)、(8)两式的解，记为 $\hat{X}_{i,m}^{(\gamma)}$、$\hat{X}_{i,m}^{(\beta)}$，从而未来年份的日特征参数可由下式计算：

$$\hat{\gamma}_{y,m} = \sum_{i=1}^{N} \left(E_{i,y,m}^{(\mathrm{p.u})} \cdot \hat{X}_{i,m}^{(\gamma)} \right), \qquad Y_3 \leqslant y \leqslant Y_4 \tag{9}$$

$$\hat{\beta}_{y,m} = \sum_{i=1}^{N} \left(E_{i,y,m}^{(\mathrm{p.u})} \cdot \hat{X}_{i,m}^{(\beta)} \right), \qquad Y_3 \leqslant y \leqslant Y_4 \tag{10}$$

4　典型日负荷曲线的预测

下面在已知基准日负荷曲线及待预测日特征参数的情况下进行该日负荷曲线的预测。已知基准曲线标幺值为 $d_i^{(0)}(i=1、2、\cdots、T)$，待预测日特征参数为 γ、β $(0<\beta<\gamma<1)$。假设待预测日曲线标幺值为 $d_i(i=1、2、\cdots、T)$，d_i 与 $d_i^{(0)}$ 有着相似的形状。

4.1 原始数据生成处理

为了弱化原始数据的随机性，并为建立数学模型提供中间信息，这里引进灰色系统的基本思想[2]，首先对原始数据 $d_i^{(0)}$ 作数据生成处理：

第 1 步：排序处理，即将 $d_i^{(0)}$ 由大到小排序后成为序列 $y_j^{(0)}$，相应地，d_i 排序后记为 $y_j(j=1、2、\cdots、T)$，排序后两序列对应的原始下标记为 h_j，则有：

$$1=y_1^{(0)}\geqslant y_2^{(0)}\geqslant\cdots\geqslant y_T^{(0)}>0 \tag{11}$$

$$1=y_1\geqslant y_2\geqslant\cdots\geqslant y_T=\beta>0 \tag{12}$$

$$y_j^{(0)}=d_{hj}^{(0)}\quad(j=1、2、\cdots、T) \tag{13}$$

$$y_j=d_{hj}\quad(j=1、2、\cdots、T) \tag{14}$$

第 2 步：差数处理，将 $y_j^{(0)}$、y_j 相邻两项求差值，得到 $x_i^{(0)}$、$x_i(i=1、2、\cdots、T-1)$，有

$$x_i^{(0)}=y_i^{(0)}-y_{i+1}^{(0)}\geqslant 0,\quad(i=1、2、\cdots、T-1) \tag{15}$$

$$x_i=y_i-y_{i+1}\geqslant 0,\quad(i=1、2、\cdots、T-1) \tag{16}$$

$$y_j^{(0)}=1-\sum_{i=1}^{j-1}x_i^{(0)},\quad(j=2、3、\cdots、T) \tag{17}$$

$$y_j=1-\sum_{i=1}^{j-1}x_i,\quad(j=2、3、\cdots、T) \tag{18}$$

x_i 与该日特征参数的关系为：$\gamma=\frac{1}{T}\sum_{j=1}^{T}y_j=\frac{1}{T}\left[T-\sum_{i=1}^{T-1}(T-i)x_i\right]$　(19)

$$\beta=y_T=1-\sum_{i=1}^{T-1}x_i \tag{20}$$

4.2 数学模型

通过生成处理，问题转化为使 x_i 与 $x_i^{(0)}$ 的差别尽可能地小，数学模型如下：

$$\min Z=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{T-1}(x_i-x_i^{(0)})^2 \tag{21}$$

$$\text{s.t.}\ \sum_{i=1}^{T-1}(T-i)\cdot x_i=T\cdot(1-\gamma)$$

$$\sum_{i=1}^{T-1}x_i=1-\beta\qquad x_i\geqslant 0\qquad(i=1、2、\cdots、T-1)$$

令　$X^{(0)}=\begin{bmatrix}x_1^{(0)}\\ \cdots\\ x_{T-1}^{(0)}\end{bmatrix}$，$X=\begin{bmatrix}x_1\\ \cdots\\ x_{T-1}\end{bmatrix}$，$A=\begin{bmatrix}T-1 & T-2 & \cdots & 1\\ 1 & 1 & \cdots & 1\end{bmatrix}$，$b=\begin{bmatrix}T(1-\gamma)\\ 1-\beta\end{bmatrix}$

则问题的矩阵描述为：

$$\min Z=\frac{1}{2}(X-X^{(0)})^{\mathrm T}\cdot(X-X^{(0)}) \tag{22}$$

$$\text{s.t.}\ AX=b,\qquad X\geqslant 0$$

4.3 日负荷曲线预测模型的求解

式(22)是一个典型的二次规划问题，通常可化为线性规划，用单纯形法求解[3]，但需要引入多个松驰变量或人工变量，使问题规模变得较大。鉴于此问题有如下的特点：目标函数的海森阵为单位阵，等式约束为线性约束，本文提出了如下的简捷求解方法。

引入 Lagrange 乘子 $W^{\mathrm T}=[w_1, w_2, \cdots, w_{T-1}]$ 和 $V^{\mathrm T}=[v_1, v_2]$，并记由 $w_i(i=1、2、\cdots、T-1)$ 形成的对角阵为 $W_0=\mathrm{diag}\{w_i\}$，令 $e^{\mathrm T}=[1, 1, \cdots, 1]$，则 $W_0\cdot e=W$。建立如下 Lagrange 函数：

$$L(X, W_0, V)=\frac{1}{2}(X-X^{(0)})^{\mathrm T}\cdot(X-X^{(0)})-(W_0\cdot e)^{\mathrm T}\cdot X-V^{\mathrm T}\cdot(AX-b) \tag{23}$$

二次规划作为凸规划的特例，$K-T$ 条件为充分必要条件，可表述为，在最优点 $X^{(*)}$ 处：

$$X^{(*)} - X^{(0)} - W_0 \cdot e - A^{\mathrm{T}} V = 0 \tag{24.1}$$

$$AX^{(*)} - b = 0 \tag{24.2}$$

$$W_0 \cdot X^{(*)} = 0 \tag{24.3}$$

$$X^{(*)} \geqslant 0 \tag{24.4}$$

$$W_0 \geqslant 0 \tag{24.5}$$

在(24.1)式两端左乘 A，并结合(24.2)可得：$V = (AA^{\mathrm{T}})^{-1} \cdot [b - A \cdot (X^{(0)} + W_0 e)]$　(25)

其中　$(AA^{\mathrm{T}})^{-1}$ 为常数矩阵。

式(24.1～24.5)的迭代求解过程如下：

①置初值 $W_0 = 0$(零矩阵)，迭代次数 $k = 1$，给定收敛条件 $\varepsilon(\varepsilon > 0)$；

②由(25)式计算 V；

③先计算 $X^{(*)} = X^{(0)} + A^{\mathrm{T}} V$，然后判断各分量 $x_i^{(*)}(i = 1、2、\cdots、T-1)$：若 $x_i^{(*)} \geqslant 0$，则置 $w_i = 0$；否则，令 $w_i = -x_i^{(*)}$，置 $x_i^{(*)} = 0$。由此解得 $X^{(*)}$、W_0；

上述各式只含有低维矩阵及向量，计算量很少，一般在很少几次迭代之后即可收敛，得到最优解 $X^{(*)}$及相应的 Lagrange 乘子。

④判断(24.2)是否成立，可转化为判断如下收敛条件：$\| AX^{(*)} - b \|_2 / \| b \|_2 < \varepsilon$? 这里 $\| \cdot \|_2$ 表示取范数。若成立，则结束迭代，得最优解；否则，置 $k = k + 1$，转步骤②继续迭代。

4.4　求解结果的逆生成处理

下面需要对求解结果作逆生成处理，即由 $X^{(*)}$ 求 d_i，从而得到最终的预测结果。

第 1 步：逆差数处理，由(12)式及(16)式，得：

$$y_1 = 1.0 \tag{26}$$

$$y_{i+1} = y_i - x_i^{(*)},\ i = 1、2、\cdots、T-1 \tag{27}$$

第 2 步：逆排序处理，即用序列对应的原始下标 h_j 进行恢复，由(14)式得：

$$d_{hj} = y_j, \qquad j = 1、2、\cdots、T \tag{28}$$

至此，完成了由 $d_i^{(0)}$、γ、β 对 d_i 的预测。

类似地，应用前述方法，令时段数 T=12，可以进行年负荷曲线的预测。

5　研究算例

这里主要说明日负荷曲线预测算法的有效性，特征参数的预测略去。

已知华北电网 1992 年和 1993 年 3 月的典型日负荷曲线(均选为 13 日)。为了说明算法的有效性，本文以前者为基准，在已知后者特征参数的情况下，对该日的日负荷曲线作预测。利用前述算法，给定收敛条件 ε=0.000 01，迭代 1 次后即收敛，预测结果如表 1 所示。预测曲线与实际曲线的最大相对误差为 1.77%，取得了令人满意的效果。

表 1　日负荷曲线预测结果

Table　The results of daily load curve forecasting

小时	基准曲线	预测曲线	实际曲线	预测与实际相对误差/%
1	0.821 52	0.816 34	0.803 85	1.554 00
2	0.814 17	0.811 14	0.804 85	0.782 00
3	0.793 27	0.795 27	0.795 26	0.001 00
4	0.790 38	0.795 26	0.799 65	−0.549 00
5	0.799 68	0.799 05	0.805 35	−0.782 00
6	0.835 87	0.827 11	0.842 01	−1.770 00
7	0.932 60	0.921 24	0.911 51	1.067 00
8	0.926 98	0.916 80	0.917 59	−0.086 00
9	0.972 18	0.962 33	0.970 23	−0.814 00
10	0.978 52	0.970 16	0.978 57	−0.859 00
11	0.967 20	0.955 11	0.968 79	−1.412 00
12	0.940 10	0.927 80	0.924 36	0.372 00
13	0.945 22	0.931 76	0.926 93	0.521 00
14	0.962 52	0.949 15	0.939 09	1.071 00
15	0.968 14	0.957 05	0.943 10	1.479 00
16	0.948 25	0.934 58	0.941 97	−0.785 00
17	0.958 70	0.945 06	0.953 19	−0.853 00
18	0.962 95	0.950 10	0.956 88	−0.709 00
19	0.984 86	0.978 23	0.995 80	−1.764 00
20	1.000 00	1.000 00	1.000 00	0.000 00
21	0.996 32	0.993 87	0.989 10	0.482 00
22	0.985 51	0.980 84	0.967 91	1.336 00
23	0.941 61	0.928 61	0.913 83	1.617 00
24	0.826 42	0.819 34	0.816 38	0.363 00
β	0.790 38	0.795 26	0.795 26	
γ	0.951 81	0.944 23	0.944 23	

6 结论

本文提出的方法，可以有效地进行长期典型日负荷曲线预测，其特点为：

(1) 充分考虑我国国情，针对我国电力部门负荷预测数据的积累情况，预测过程与电网的用电结构、生产工作制度直接相关，符合现实，预测结果合理。

(2) 引进灰色系统的基本思想，首先对原始数据作了数据生成处理，从而弱化原始数据的随机性，并为建立数学模型提供了中间信息。

(3) 以负荷曲线的变化规律为基础，建立了物理意义明确的预测模型，并针对模型特点，提出了简捷有效的求解方法。

参考文献

1 电力工业部规划计划司. 电力需求预测工作条例(试行). 北京：电力出版社，1995

2 邓聚龙. 灰色预测与决策. 武汉：华中理工大学出版社，1986

3 陈宝林. 最优化理论与方法. 北京：清华大学出版社，1989

THE STUDY ON LONG—TERM DAILY LOAD CURVE FORECASTING

Kang Chongqing, Xia Qing, Xiang Niande, Liu Mei

(Tsinghua University, 100084, Beijing, China)

Abstract According to the available data in China, a new method of daily load curve forecasting (DLCF) is proposed. By using generating operation of Grey System method, the model of DLCF is obtained. Some definite physical concepts are considered in this model and a convenient algorithm with high computational speed is given. Case study shows its efficiency.

Keywords power system planning grey system daily load curve forecasting