

基于诱导有序加权平均算子的 最优组合短期负荷预测

黎静华, 韦化

(广西大学 电气工程学院, 广西壮族自治区 南宁市 530004)

An Optimal Combinational Model for Short-Term Load Forecasting Based on Induced Ordered Weighted Averaging Operator

LI Jinghua, WEI Hua

(School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China)

ABSTRACT: To improve forecasting accuracy and remedy the defects of single forecasting methods consisting of existing combinational forecasting methods that the weighting coefficients at different forecasted points are regarded as constant, a new optimal combinational method for short-term load forecasting based on induced ordered weighted averaging operator (IOWA) is proposed. In allusion to the fact that the forecasted results are different by the same forecasting method at different time, the ordered weighting is applied to each single forecasting method according to its forecasting accuracy at different time to implement the complementation of their merits and demerits to reduce the dependence of forecasted result on a certain forecasting method and to improve the forecasting accuracy. According to the proposed forecasting method based on IOWA operator, an optimal forecasting model with corresponding weighting coefficients is built and the process and procedures of solving the proposed model by modern interior point method are given. Practical application results show that the proposed method can effectively improve the accuracy by combinational forecasting, and the computation time is shortened.

KEY WORDS: load forecasting; combinational forecasting; optimization model; induced ordered weighted averaging operator (IOWA)

摘要: 为提高预测精度, 弥补现有组合预测方法中单项预测方法在各预测点的加权系数恒定等不足, 提出了一种新的组合预测方法——基于诱导有序加权平均算子(induced ordered weighted averaging operator, IOWA)的短期负荷最优组合预测方法。该方法针对同一预测方法在不同时刻的预测

效果不同, 按照各单项方法在不同时刻预测精度的高低进行有序赋权, 实现方法的优缺点互补, 降低预测结果对某一方法的依赖性, 达到提高预测精度的目的。文中基于 IOWA 算子的组合预测方法, 建立相应的确定权系数的优化模型, 给出采用现代内点法解算该优化模型的过程及步骤。实际应用结果表明, 该方法能有效提高组合预测精度且计算时间短。

关键词: 负荷预测; 组合预测; 优化模型; 诱导有序加权平均算子

0 引言

目前已有大量的数学方法应用于短期负荷预测中, 如改进时间序列、支持向量机、决策树、粗糙集和神经网络等^[1-5]。研究发现: 由于影响负荷的随机因素太多, 单一预测方法难以取得良好的效果, 若能正确地结合多种单项预测方法, 将大大降低预测结果对某单个较差预测方法的敏感程度, 从而提高负荷预测的精度。然而, 现有组合预测方法^[6-10]大都与实际的预测情况不符, 主要表现在: 传统组合预测模型中, 同一个单项预测方法在各个时点的加权平均系数是相同的, 而实际的情况是同一个单项预测方法在不同时间的表现并不相同, 即在某个时点上预测精度较高, 在另一时点上预测精度低, 因此, 传统的组合预测模型与实际情况不相符。针对此, 本文引入诱导有序加权平均算子(induced ordered weighted averaging operator, IOWA), 依据单项预测方法在样本区间上各个时刻的预测精度从高到低按顺序赋予权系数, 以误差平方和为准则建立新的组合预测模型, 并给出基于现代内点理论的 IOWA 算子组合预测模型求解方法及步骤, 最后

基金项目: 国家自然科学基金项目(50907012, 50867001)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC)(50907012,50867001).

通过广西电网公司短期负荷预测的应用结果验证所提模型及方法的有效性。

1 IOWA 算子

2003 年，美国学者 Yager 提出了 IOWA^[11]。IOWA 均是介于最大算子和最小算子之间的一种信息集成方法，常规的加权算术平均算子是其特例。IOWA 算子的定义如下^[11-14]：

设 $(v_1, a_1), (v_2, a_2), \dots, (v_m, a_m)$ 为 m 个二维数组，令

$$I_{OWA}[(v_1, a_1), (v_2, a_2), \dots, (v_m, a_m)] = \sum_{i=1}^m \omega_i a_{v_{index(i)}} \quad (1)$$

式中： $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)^T$ 为与 IOWA 有关的加权向量，满足 $\sum_{i=1}^m \omega_i = 1, \omega_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m$ ； $v_{index(i)}$ 为 v_1, v_2, \dots, v_m 中按从大到小的顺序排列的第 i 个大的数的下标，简称为 IOWA 算子， v_i 称为 a_i 的诱导值。

式(1)表明，IWAO 算子是对诱导值 v_1, v_2, \dots, v_m 按从大到小的顺序排序后所对应的 a_1, a_2, \dots, a_m 中的数进行有序加权平均， ω_i 与数 a_i 的大小和位置无关，而与其诱导值所在位置有关。

2 基于 IOWA 算子的组合负荷预测模型

2.1 预测模型的建立

设有 m 种方法对 t 时刻 N 天的预测值为 $m \times N$ 阶矩阵

$$\begin{bmatrix} x_{11t} & \dots & x_{1nt} & \dots & x_{1Nt} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{i1t} & \dots & x_{int} & \dots & x_{iNt} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{m1t} & \dots & x_{mnt} & \dots & x_{mNt} \end{bmatrix}$$

其中： $i = 1, 2, \dots, m, n = 1, 2, \dots, N, x_{int}$ 为第 i 种预测方法对第 n 天 t 时刻的预测值。设 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)^T$ 为 m 种单项预测在组合预测中的加权系数，它满足 $\sum_{i=1}^m \omega_i = 1, \omega_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m$ 。假设 r_{int} 为第 i 种预测方法第 n 天 t 时刻的预测精度，即

$$r_{int} = \begin{cases} 1 - |(x_{nt} - x_{int}) / x_{nt}|, & |(x_{nt} - x_{int}) / x_{nt}| < 1 \\ 0, & |(x_{nt} - x_{int}) / x_{nt}| \geq 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中： x_{nt} 为第 n 天 t 时刻的实际负荷值； $i = 1, 2, \dots, m; t = 1, 2, \dots, T; n = 1, 2, \dots, N; r_{int} \in [0, 1]$ 。

将 r_{int} 看成预测值 x_{int} 的诱导值，这样 m 种单项预测方法 n 天第 t 时刻预测精度及其预测值就构成了 m 个二维数组 $(r_{1nt}, x_{1nt}), (r_{2nt}, x_{2nt}), \dots, (r_{mnt}, x_{mnt})$ ，将预测精度序列 $r_{1nt}, r_{2nt}, \dots, r_{mnt}$ 按从大到小的顺序排

列，设 $r_{index(i)}$ 是第 i 个大的预测精度的下标。根据式(1)计算则得到 n 天第 t 时刻由预测精度序列所产生的 IWAO 算子组合预测值

$$I_{OWAL} = [(r_{1nt}, x_{1nt}), (r_{2nt}, x_{2nt}), \dots, (r_{mnt}, x_{mnt})] = \sum_{i=1}^m \omega_i x_{r_{index(i)}} \quad (3)$$

可见，组合预测的赋权系数与单项预测方法在各时点上的预测精度的大小密切相关，这就是基于 IWAO 算子组合预测的特点。综上，以误差平方和为准则的基于 IWAO 算子的最优组合预测模型为

$$\begin{aligned} \min \quad & f = \sum_{n=1}^N (x_{nt} - \sum_{i=1}^m \omega_i x_{r_{index(i)}})^2 \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \sum_{i=1}^m \omega_i = 1 \\ \omega_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

2.2 模型的求解

采用现代内点法^[15-16]对式(4)进行求解，具体求解过程如下：

1) 式(4)中，未知量 ω 为一 m 维向量，共有 1 个等式约束和 m 个不等约束，引入松弛变量 $l \in \mathbf{R}^m \geq 0$ ，则式(4)转化为

$$\begin{aligned} \min \quad & f(\omega) \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} A\omega = 1 \\ \omega - l = 0 \\ l \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

式中： $f(\omega)$ 为目标函数； $A = [1, 1, \dots, 1]_{1 \times m}$ 。

2) 构造与式(4)相联系的拉格朗日函数

$$L(\omega, l; y, z, \tilde{z}) \equiv f(\omega) - y(A\omega - 1) - z^T(\omega - l) - \tilde{z}^T l \quad (6)$$

式中 y, z, \tilde{z} 为拉格朗日乘子。

3) 由 KKT 一阶最优性条件，导出 KKT 方程

$$\begin{bmatrix} L_\omega \\ L_y \\ L_z \\ L_{\tilde{z}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nabla f(\omega) - A^T y - z \\ A\omega - 1 \\ \omega - l \\ LZe \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中： L, Z 为对角矩阵； $e = [1, 1, \dots, 1]_{m \times 1}$ 。

4) 为有效求解式(7)，引入扰动因子 $\mu > 0$ 用以松弛式(7)中的互补条件，得

$$\begin{bmatrix} L_\omega \\ L_y \\ L_z \\ L_{\tilde{z}}^\mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nabla f(\omega) - A^T y - z \\ A\omega - 1 \\ \omega - l \\ LZe - \mu e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中： $\mu > 0; (l, z) \geq 0; y \neq 0$ 。

5) 根据牛顿法，得到式(8)修正方程为

$$\Delta l = \Delta \omega \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta^2 f & -A^T & -e \\ A & 0 & 0 \\ Z & 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\omega 0} \\ L_{y 0} \\ L_{z 0} \end{bmatrix} \quad (10)$$

6) 基于现代内点算法求解, 步骤为:

①初始化参数。令中心参数 $\sigma \in (0, 1)$, 允许误差 $\varepsilon = 10^{-6}$, 选择原始变量 $l > 0$, 对偶变量 $y = 0, z > 0$ 。设 k 为迭代次数的标记, k_{\max} 为最大迭代次数。

②计算互补间隙 $G_{ap} = \sum_{i=1}^m z_i l_i$, 如果 $G_{ap} < \varepsilon$, 则输出最优解, 停机。

③计算扰动因子 $\mu = \sigma G_{ap} / 2m$ 。

④解修正式(9), 求得 $\Delta Q^{(k)}$

$$\Delta Q^{(k)} = [\Delta \omega, \Delta l; \Delta y, \Delta z] \quad (11)$$

⑤确定原始和对偶步长的最大值:

$$\theta_p = \min \left\{ \min_i \left[\frac{-l_i}{\Delta l_i} : \Delta l_i < 0 \right], 1 \right\}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

$$\theta_D = \min \left\{ \min_i \left[\frac{-z_i}{\Delta z_i} : \Delta z_i < 0 \right], 1 \right\}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

形成步长矩阵为

$$\theta^{(k)} = 0.99995 \text{diag}[\theta_p, \theta_D, \theta_D]^{(k)} \quad (14)$$

⑥用下式更新原始和对偶变量

$$Q^{(k+1)} = Q^{(k)} + \theta^{(k)} \Delta Q^{(k)} \quad (15)$$

⑦ $k = k + 1$, 返回②。

2.3 预测结果的获取

通过求解如式(4)所示模型可获得针对 N 天 t 时刻历史样本区间上组合负荷预测 IOWA 最优权系数, 设为 $\omega' = (\omega'_1, \omega'_2, \dots, \omega'_m)^T$, 根据预测连贯性原则, 可以用它来进行第 $N+2$ 天 t 时刻的 IWOA 组合负荷预测, 因为预测当天的负荷是不完整的, 即 $N+1$ 天的负荷是未知的, 因此, 只能根据前 N 天的负荷预测第 $N+2$ 天的负荷, 计算公式为

$$I_{OWA\omega}[(r_{1(N+2)t}, x_{1(N+2)t}), (r_{2(N+2)t}, x_{2(N+2)t}), \dots, (r_{m(N+2)t}, x_{m(N+2)t})] = \sum_{i=1}^m \omega'_i x_{r_{\text{index}(t)}}, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (16)$$

式中: 第 $N+2$ 天 t 时刻的预测精度序列 $r_{1(N+2)t}, r_{2(N+2)t}, \dots, r_{m(N+2)t}$ 的大小采用第 i 种预测方法在前 N 天 t 时刻的拟合平均精度, 即 $r_{i(N+2)t} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N r_{ijt}$ 。

2.4 计算示例

为更清楚演示算法的实现过程, 本节采用一个简单例子详细介绍上述计算过程, 数据如表 1 所示。假设已知如表 1 所示的 3 种预测方法对连续 4d 同一时刻的负荷预测结果和实际负荷, 需对该时刻次日进行预测。具体预测过程如下:

表 1 负荷实际值和各单项预测方法的预测值

Tab. 1 Fact load and forecasting load by single method MW

项目	第 1 天	第 2 天	第 3 天	第 4 天
实际负荷	8 314	8 428	8 376	8 218
多元回归方法	8 527	8 537	8 508	8 488
时间序列方法	8 427	8 437	8 408	8 388
灰色预测方法	8 491	8 505	8 476	8 456

1) 根据表 1 计算各单项预测方法的预测精度, 结果如表 2 所示。

表 2 各项单项预测方法预测精度

Tab. 2 Forecasting precision of single method

项目	第 1 天	第 2 天	第 3 天	第 4 天
多元回归方法	0.9744	0.9871	0.9842	0.9672
时间序列方法	0.9864	0.9989	0.9962	0.9793
灰色预测方法	0.9787	0.9909	0.9881	0.9710

2) 按式(3)计算该时刻每天的 IOWA 组合预测值, 结果如下:

$$\text{第 1 天 } I_{OWA\omega} = 8427\omega_1 + 8491\omega_2 + 8527\omega_3$$

$$\text{第 2 天 } I_{OWA\omega} = 8437\omega_1 + 8505\omega_2 + 8537\omega_3$$

$$\text{第 3 天 } I_{OWA\omega} = 8408\omega_1 + 8476\omega_2 + 8508\omega_3$$

$$\text{第 4 天 } I_{OWA\omega} = 8388\omega_1 + 8456\omega_2 + 8488\omega_3$$

3) 将其代入式(4)中, 得到如下优化模型:

$$\begin{aligned} \min \quad & f(\omega_1, \omega_2, \omega_3) = (8314 - 8427\omega_1 - 8491\omega_2 - 8527\omega_3)^2 + (8428 - 8437\omega_1 - 8505\omega_2 - 8537\omega_3)^2 + \\ & (8376 - 8408\omega_1 - 8476\omega_2 - 8508\omega_3)^2 + \\ & (8218 - 8388\omega_1 - 8456\omega_2 - 8488\omega_3)^2 \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1 \\ \omega_1 \geq 0, \omega_2 \geq 0 \end{cases} \end{aligned}$$

4) 根据现代内点法计算步骤, 计算该组合模型。

①初始化参数: 中心参数 $\sigma = 0.01$, 允许误差 $\varepsilon = 10^{-6}$, 最大迭代次数 $k_{\max} = 50$, 原始变量 $\omega = (0.5, 0.5, 0.5)^T$, $l = (0.5, 0.5, 0.5)^T$, 对偶变量 $y = 1, z = (1, 1, 1)^T$ 。

②根据初始化参数, 计算初始互补间隙 $G_{ap} = 1.5$, 扰动因子 $\mu = 0.0025$ 。

③计算第 1 次迭代的对应于式(9)修正方程

$$\begin{aligned} A_1[\Delta \omega, \Delta y, \Delta z]^T &= B_1 \\ \Delta l &= \Delta \omega \end{aligned}$$

其中

$$A_1 = \begin{bmatrix} 5.67 \times 10^8 & 5.71 \times 10^8 & 5.73 \times 10^8 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 5.71 \times 10^8 & 5.67 \times 10^8 & 5.78 \times 10^8 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 5.73 \times 10^8 & 5.78 \times 10^8 & 5.8 \times 10^8 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = [-2.9 \times 10^8, -3 \times 10^8, -3 \times 10^8, -0.5, -0.4975, -0.4975, -0.4975]^T$$

5) 求解该修正方程得第 1 次迭代的修正量为

$$\begin{bmatrix} \Delta\omega_1 \\ \Delta\omega_2 \\ \Delta\omega_3 \\ \Delta y \\ \Delta z_1 \\ \Delta z_2 \\ \Delta z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.8070 \\ 8.9451 \\ -7.6381 \\ -6.4500 \\ 2.6191 \\ -18.8852 \\ 14.2811 \end{bmatrix}$$

依次循环迭代可获得基于 IOWA 算子的组合预测模型的最优权系数为 $\omega_1=1, \omega_2=0, \omega_3=0$ 。

从图 1 可以看出, 利用内点法求解式(5)的模型收敛效果好、速度快, 第 3 次迭代后其互补间隙已小于 10^{-4} 。此外, 组合预测模型的 IWOA 最优权系数表明: 未来的组合预测是把 3 个单项预测方法中的预测精度的最高预测值作为它们的组合预测值。

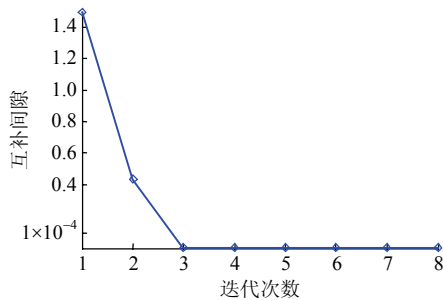


图 1 基于现代内点法的迭代收敛曲线

Fig. 1 Convergence curve with interior point method

6) 根据所得的最优组合权值 $\omega'_1=1, \omega'_2=0, \omega'_3=0$ 对该点次日负荷进行预测。假设各单项方法对该时刻次日负荷预测结果为(8 307,8 360,8 220), 各单项方法的预测精度 $r_{1(N+2)}, r_{2(N+2)}, r_{3(N+2)}$ 为

$$r_{1(N+2)} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N r_{1n} = \frac{1}{4} (0.9744 + 0.9871 + 0.9842 + 0.9672) = 0.9782$$

$$r_{2(N+2)} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N r_{2n} = \frac{1}{4} (0.9864 + 0.9989 + 0.9962 + 0.9793) = 0.9902$$

$$r_{3(N+2)} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N r_{3n} = \frac{1}{4} (0.9787 + 0.9909 + 0.9881 + 0.9710) = 0.9822$$

即预测精度序列 $r_{1(N+2)}, r_{2(N+2)}, r_{3(N+2)}$ 为(0.9782, 0.9902, 0.9822)。将组合最优权值、各单项方法的预测值及预测精度代入式(13)即可预测得次日负荷为

$$I_{OWA\omega'}[(r_{1(N+2)}, x_{1(N+2)}), (r_{2(N+2)}, x_{2(N+2)}), (r_{3(N+2)}, x_{3(N+2)})] = x_{\text{Index}[\max(a_{1(N+2)}, a_{2(N+2)}, a_{3(N+2)})](N+2)} = 8360$$

3 应用实例分析

为了验证基于 IOWA 的组合预测模型的有效性, 以广西电网 2009-01-01—2010-01-31 96 点网区负荷作为测试样本, 将 2009-01-01—2009-01-31 96 点负荷数据作为训练样本, 2010-01-01—2010-01-31 96 点负荷数据作为验证样本。

测试过程中, 运用多元线性回归法(简称方法 1)、时间序列法(简称方法 2)、灰色预测(简称方法 3)、混沌理论预测(简称方法 4)等 4 种单一方法对训练样本分别建立 96 点负荷预测模型进行预测; 建立基于预测误差平均和最小的线性组合预测模型(简称组合预测 1)和基于 IOWA 算子的组合优化预测模型(简称组合预测 2); 利用现代内点法分别求解组合预测模型 1 和组合预测模型 2, 得到对应的加权系数; 最后, 将所得的权系数和各单一方法的预测精度代入式(10)即可求解计算可得各点的 IOWA 组合预测值。

表 3 为广西电网 2010-01-07 96 点 IOWA 组合负荷预测情况。可以看出, 所采用的单一预测方法在不同点上互补性差异较大, 某些点只取决于预测精度最大的方法, 如第 1 点, 第 4 点等; 某些点是 2 种方法的互补结合, 如第 2 点, 第 3 点等。通过建立并求解 96 个优化模型, 表 3 显示了各种单一表 3 广西电网 2010 年 1 月 7 日 96 点基于 IOWA 组合模型预测情况

Tab. 3 Load forecasting condition of Guangxi network on 2010-01-07 based on IOWA combinational model

点数	ω'_1	ω'_2	ω'_3	ω'_4	实际负荷/MW	预测负荷/MW	精度/%
1	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	8220	8460	97.09
2	0.9008	0.0992	0.0000	0.0000	8341	8469	98.46
3	0.8629	0.1371	0.0000	0.0000	8224	8354	98.42
4	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	8157	8218	99.25
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
21	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	7692	7698	99.93
22	0.9649	0.0351	0.0000	0.0000	7788	7765	99.70
23	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	7815	7807	99.90
24	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	7893	7826	99.14
25	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	7994	7894	98.75
26	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	8140	7955	97.72
27	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	8233	8061	97.91
28	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	8448	8127	96.21
29	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	8588	8184	95.29
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
94	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	9170	9112	99.36
95	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	9021	8892	98.57
96	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	8765	8607	98.20

方法的最优组合权系数(由于篇幅原因,只显示部分结果)。从预测精度看,该天 96 点的最低预测精度为 95.13%,其出现在第 29 点,即 7:30;最高预测精度为 99.93%,出现在第 21 点,即 5:30。当天 96 点平均预测精度为 98.2%,达到了电网公司“优秀”的考核等级。

图 2 为 2 种组合方法对 2010-01-07 的 96 点负荷预测情况。从图中可见,除在 05:00—10:00 时间段内 2 曲线几乎重合外,在其他时间段内,组合预测 2 曲线均较组合预测 1 曲线更贴近实际负荷曲线。可见,基于 IOWA 优化组合模型具有更好的预测效果。

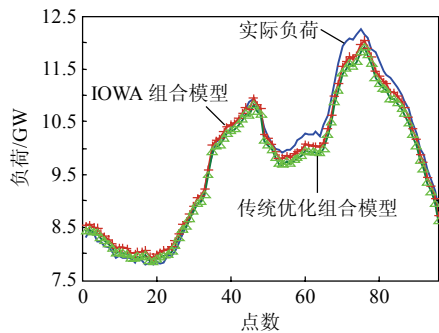


图 2 2 种组合预测方法预测负荷曲线对比
Fig. 2 Comparison of load forecasting curves with two kinds of combinational method

图 3 为 2 种组合预测方法的预测精度对比图,图中带标志的曲线为组合预测 2 的预测精度,未带标志的曲线为组合预测 1 的预测精度。从图中可以看出,除 2010-01-06 传统组合模型的预测精度为 99.2%,略高于本文所提方法 99%外,其余均是 IOWA 组合模型占优势。

表 4 为各单项预测方法及 2 种组合预测方法对广西电网网区负荷 2010-01-01—2010-01-07 一周内的预测精度对比情况。从表中可以看出,2 种组合预测模型的预测精度明显优于各单一方法。此点正体现了组合预测模型能综合各单一方法的优缺点,

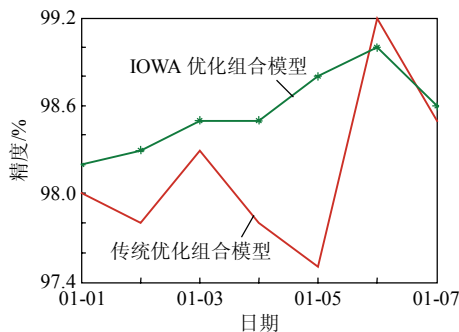


图 3 2 种组合预测方法精度对比
Fig. 3 Comparison of load forecasting prediction curves with two kinds of combinational method

表 4 2010-01-01—2010-01-07 预测精度对比

Tab. 4 Load forecasting precision from 2010-01-01 to 2010-01-07

日期	单项预测精度/%				组合预测 1/%	组合预测 2/%
	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4		
01-01	95.7	94.8	94.8	97.2	98.0	98.2
01-02	93.3	98.0	97.9	96.5	97.8	98.3
01-03	98.5	98.1	97.3	96.9	98.3	98.5
01-04	95.5	95.9	96.5	98.3	97.8	98.5
01-05	94.9	95.9	96.7	98.7	97.5	98.8
01-06	99.4	97.5	99.4	98.2	99.2	99.0
01-07	98.3	98.1	98.3	98.3	98.3	98.3

实现优缺点互补。且基于 IOWA 算子的组合模型预测精度大都高于或等于基于预测误差平均和最小的线性组合预测模型,从而验证所提模型的有效性。

4 结论

1) 本文采用基于诱导有序加权平均算子的最优组合预测方法对电力负荷进行预测,该算子充分考虑了各单一预测方法在不同时间的预测精度,更好地综合各方法的优缺点,弥补传统组合方法考虑过于单一的不足,使所建立的预测模型更贴近实际情况。

2) 现代内点法有收敛速度快、精度高等优势,适用于求解基于 IOWA 算子的预测模型,可提高调度部门负荷预测工作的效率。

参考文献

- [1] 栗然, 刘宇, 黎静华, 等. 基于改进决策树算法的日特征负荷预测研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(23): 36-41.
Li Ran, Liu Yu, Li Jinghua, et al. Study on the daily characteristic load forecasting based on the optimized algorithm of decision tree[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(23): 36-41(in Chinese).
- [2] 黎静华, 栗然, 顾雪平, 等. 网格化的电力系统短期负荷预测的 MDRBR 模型[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 27-31.
Li Jinghua, Li Ran, Gu Xueping, et al. Grid model for short-term load forecasting based on MDRBR algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 27-31(in Chinese).
- [3] 黎静华, 栗然, 牛东晓. 基于粗糙集的默认规则挖掘算法在电力系统短期负荷预测中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 18-23.
Li Jinghua, Li Ran, Niu Dongxiao. Application of mining default rules based on rough set in power system short-term load forecasting[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 18-23(in Chinese).
- [4] 陈刚, 周杰, 张雪君, 等. 基于 BP 与 RBF 级联神经网络的日负荷预测[J]. 电网技术, 2009, 33(12): 101-105.
Chen Gang, Zhou Jie, Zhang Xuejun, et al. A daily load forecasting method based on cascaded back propagation and radial basis function neural networks[J]. Power System Technology, 2009, 33(12): 101-105(in Chinese).
- [5] 周建中, 张亚超, 李清清, 等. 基于动态自适应径向基函数网络的概率性短期负荷预测[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 37-41.
Zhou Jianzhong, Zhang Yachao, Li Qingqing, et al. Probabilistic short-term load forecasting based on dynamic self-adaptive radial

- basis function network[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 37-41(in Chinese).
- [6] 唐杰明, 刘俊勇, 杨可, 等. 基于灰色模型和最小二乘支持向量机的电力短期负荷组合预测[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 63-68. Tang Jieming, Liu Junyong, Yang Ke, et al. Short-term load combination forecasting by grey model and least square support vector machine[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 63-68(in Chinese).
- [7] 牛东晓, 陈志业, 刑棉. 具有二重趋势性的季节型电力负荷预测组合优化灰色神经网络模型[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 29-32. Niu Dongxiao, Chen Zhiye, Xing Main. Combined optimum gray neural network model of the seasonal power load forecasting with the double trends[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 29-32(in Chinese).
- [8] 丁巧林, 潘学华, 杨薛明. 最优组合预测方法在电力负荷预测中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(13): 127-130. Ding Qiaolin, Pan Xuehua, Yang Xueming. Optimal combined forecasting method used in power load forecasting[J]. Power System Technology, 2008, 32(13): 127-130(in Chinese).
- [9] 龙瑞华, 毛弋, 毛李帆, 等. 基于诱导有序加权平均算子和马尔可夫链的中长期电力负荷组合预测模型[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 150-156. Long Ruihua, Mao Yi, Mao Lifan, et al. A combination model for medium-and long-term load forecasting based on induced ordered weighted averaging operator and Markov chain[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 150-156(in Chinese).
- [10] 李蔚, 盛德仁, 陈坚红, 等. 双重 BP 神经网络组合模型在实时数据预测中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(17): 94-97. Li Wei, Sheng Deren, Chen Jianhong, et al. The application of double BP neural network combined forecasting model in real-time data predicting[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(17): 94-97(in Chinese).
- [11] Yager R R. Induced aggregation operators[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2003(137): 59-69.
- [12] 陈华友, 蔡正高. 诱导有序加权平均的组合预测模型及其应用[J]. 安徽大学学报: 自然科学版, 2005, 29(1): 1-6. Chen Huayou, Cai Zhenggao. Combined forecasting model based on induced ordered weighted averaging operator and its application[J]. Journal of Anhui University: Natural Science Edition, 2005, 29(1): 1-6(in Chinese).
- [13] 陈华友, 陈启明, 李洪岩. 一类基于 OWA 算子的组合预测模型及性质[J]. 运筹与管理, 2006, 15(6): 34-39. Chen Huayou, Chen Qiming, Li Hongyan. A kind of combination forecasting model and its properties based on ordered weighted averaging (OWA) operator[J]. Operations Research and Management Science, 2006, 15(6): 34-39(in Chinese).
- [14] 陈华友, 刘春林. 基于 IOWA 算子的组合预测方法[J]. 预测, 2003, 22(6): 61-65. Chen Huayou, Liu Chunlin. A kind of combination forecasting method based on induced ordered weighted averaging (IOWA) operators[J]. Forecasting, 2003, 22(6): 61-65(in Chinese).
- [15] Wei H, Sasaki H, Kubokawa J, et al. A interior point nonlinear programming for optimal power flow problems with a novel data structure[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(3): 870-877.
- [16] 黎静华, 韦化. 基于内点法的机组组合模型[J]. 电网技术, 2007, 31(24): 28-34. Li Jinghua, Wei Hua. A unit commitment model based on interior point method[J]. Power System Technology, 2007, 31(24): 28-34(in Chinese).



黎静华

收稿日期: 2011-01-26.

作者简介:

黎静华(1982), 女, 讲师, 博士研究生, 研究方向为人工智能在电力系统中的应用、电力系统优化运行与控制, E-mail: happyjinghua@163.com;

韦化(1954), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为现代内点最优理论及其在电力系统中的应用。

(责任编辑 褚晓杰)