

基于相关分析的中长期电力负荷综合预测方法

虞璋¹, 程浩忠¹, 王旭², 杨宗麟³

(1. 上海交通大学电气工程系; 上海 200030; 2 江苏省电力公司, 江苏 南京 210024; 3 华东电网有限公司, 上海 200002)

摘要: 为使中长期电力负荷预测的各种误差指标皆得到不同程度的改善, 从相关性分析 (相关系数、灰关联度、Theil 不等系数) 的角度进行综合预测方法的研究。不直接考虑预测误差的大小, 提出了一种综合预测新思路, 取得了较为满意的结果。

关键词: 负荷预测; 综合模型; 相关分析; 灰关联度; Theil 不等系数

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)15-0049-04

0 引言

中长期电力负荷预测与一般负荷预测相比, 受经济、社会、气候等不确定因素的影响更大, 没有任何一种方法能保证任何情况下都能获得满意的结果, 有时误差会很大。建立负荷预测综合模型, 充分利用各个负荷预测模型的有用信息, 提高预测精度, 是解决中长期负荷预测的必要途径^[1,2]。

纵观国内外研究现状可以发现, 现有的综合预测方法都是基于直接改善某种拟合误差, 这不是研究综合预测方法的唯一途径, 也未必就是最佳途径。根据预测惯例, 预测效果的评价应该从平方和误差 (SSE)、平均绝对误差 (MAE)、均方误差 (MSE)、平均绝对百分比误差 (MAPE)、均方百分比误差 (MSPE) 等 5 个方面进行全方位的综合衡量。任何一种仅以其中某个误差指标为最优进行综合预测的方法都是不全面的。因此, 有必要研究新的综合预测方法以便能使各种误差指标皆得到改善。本文拟从相关性指标 (如相关系数、灰关联度、Theil 不等系数等) 的角度进行综合预测方法的研究。该预测方法不直接考虑预测误差的大小, 与传统的综合预测方法有较大的区别。

1 综合模型基本原理

假设在某一负荷预测问题中, 在历史时段 $1 < t < n$ 的实际值依次为 $y_t (t=1, 2, \dots, n)$, 对未来时段 $n+1 \sim t \sim N$ 用 m 种方法进行预测, 其中, 利用第 i 种方法对 t 时段的预测值为 $\hat{y}_{it} (i=1, 2, \dots, m, t=1, 2, \dots, N)$, 综合预测方法就是寻求一组权重系数

$W = [w_1, w_2, \dots, w_m]^T$, 满足 $\sum_{i=1}^m w_i = 1$, 综合预测模型可表示为:

$$\hat{y}_t = \sum_{i=1}^m w_i \hat{y}_{it} \quad (t = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

相应地, 样本期内预测的实际误差和相对误差分别为:

$$e_t = y_t - \hat{y}_t \quad (2)$$

$$r_t = e_t / y_t \times 100\% \quad (3)$$

引进范数性能指标:

$$\min J_1 = \left(\sum_{i=1}^n |e_t|^p \right)^{1/p} \quad (4)$$

$$\min J_2 = \left(\sum_{i=1}^n |r_t|^p \right)^{1/p} \quad (5)$$

则求解最优综合模型问题将转化为以下条件的极值问题:

$$\begin{cases} \min J & (J = J_1 \text{ 或 } J_2) \\ \sum_{i=1}^m w_i = 1 \\ W \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

由以上推导可知, 传统的综合模型, 本质在于寻求一组最优的加权系数, 使得历史数据的预测值和实际值的某种拟合误差最小。

2 基于灰关联度及 Theil 不等系数的相关分析

2.1 灰关联度

灰关联度是灰关联分析的重要指标, 是离散序列接近程度的测度。灰关联度在离散函数中的作用。与作为连续函数测度的欧氏空间的范数是对应的。应用灰关联度的灰关联分析是一种着眼于序列总体发展趋势接近程度的比较分析方法, 适用于受

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50177017); 高等学校教师科研奖励计划资助项目

不确定因素影响较大的预测和决策问题^[3~5]。

对于序列 $X_0 = \{x_0(i) | i=1, 2, \dots, n\}$, $X_j = \{x_j(i) | i=1, 2, \dots, n\}$, 灰关联度 定义为:

$$= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [x_0(k), x_j(k)] \quad (7)$$

其中 $[x_0(k), x_j(k)]$ 为灰关联系数,

$$[x_0(k), x_j(k)] = \frac{\min_k \min_j |x_0(k) - x_j(k)| + \max_k \max_j |x_0(k) - x_j(k)|}{|x_0(k) - x_j(k)| + \max_k \max_j |x_0(k) - x_j(k)|} \quad (8)$$

灰关联系数实质是两点间距离的反映, 是分辨系数, $0 \leq 1$ 。

2.2 Theil不等系数

Theil不等系数是一种量度两个离散时间序列一致性的指标^[3], 对于单输出的时间序列定义为:

$$u = \frac{\sqrt{\frac{1}{Nn} \sum (P_i - A_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{Nn} \sum P_i^2} + \sqrt{\frac{1}{Nn} \sum A_i^2}} \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (9)$$

其中: n 是采样点的数目; $P_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为预测输出结果序列; $A_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为实际结果序列。

当 $P_i = A_i$, 对于所有 $i (i=1, 2, \dots, n)$ 成立时, $u=0$ 表示两个时间序列完全一致; u 越接近于 0, 则表示两个序列越一致, u 越接近于 1, 则表示两个序列越不一致。

3 基于相关分析的中长期电力负荷预测综合模型的建立

3.1 相关系数法

应用综合模型进行中长期负荷预测时, 希望综合预测值 \hat{y}_t 越接近于实际值 y_t 。当从相关系数角度考察综合预测问题的时候, 也就是希望综合预测值 \hat{y}_t 与实际值 y_t 两个序列之间是高度线性相关, 相关系数愈大, 表明综合预测效果愈佳。当它们在时段内完全吻合时, 相关系数达到理想的最大值 1, 但这实际上是不可能的。为此, 令:

$$R_i = \frac{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})(y_{it} - \bar{y}_i)}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{t=1}^n (y_{it} - \bar{y}_i)^2}} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

$$R = \frac{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})(\hat{y}_t - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{t=1}^n (\hat{y}_t - \bar{\hat{y}})^2}} \quad (11)$$

其中: R_i 为单个预测方法预测值 y_{it} 与实际值 y_t 两个序列之间的相关系数, $-1 < R_i < 1$; R 为综合预测值 \hat{y}_t 与实际值 y_t 两个序列之间的相关系数; $\bar{y}, \bar{y}_i, \bar{\hat{y}}$ 分别为 y_t, y_{it}, \hat{y}_t 的平均值。为了得到最佳的综合预测效果, 求解如下最优化模型可得到最优综合权向量 W 。

$$\max R = \frac{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})(\hat{y}_t - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{t=1}^n (\hat{y}_t - \bar{\hat{y}})^2}} \quad (12)$$

$$s.t. \begin{cases} e^T W = 1 \\ W \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

3.2 灰关联度法

根据灰关联度定义, 若综合预测结果与实际数据完全一致 (即 100% 准确), 则模型预测值与实际值两个序列 $\{\hat{y}_t\} \{y_t\}$ 之间的灰关联度必为 1 (即达到最大值), 也就是说, 模型越准确, 灰关联度越大。因此, 可以令综合预测模型结果与实际数据两个序列之间的灰关联度最大为最优目标, 以此为基础来建立相关性综合预测方法。令:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{\min_i \min_t |y_t - y_{it}| + \max_i \max_t |y_t - y_{it}|}{|y_t - y_{it}| + \max_i \max_t |y_t - y_{it}|} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

其中: r_i 为单个预测方法预测值 y_{it} 与实际值 y_t 两个序列之间的关联度, 可知 $0 < r_i < 1$ 。为分辨率系数, $r_i \in (0, 1)$ 。综合预测值 \hat{y}_t 与实际值 y_t 两个序列之间的关联度为:

$$= \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{\min_i \min_t |y_t - y_{it}| + \max_i \max_t |y_t - y_{it}|}{|y_t - \hat{y}_t| + \max_i \max_t |y_t - y_{it}|} \quad (15)$$

很显然, 灰关联度 r 是综合权向量 W 的函数, 为了得到最佳的综合预测效果, 灰关联度 r 应该愈大愈好。为此, 构造如下最优化模型:

$$\max r = \frac{1}{n} \cdot \frac{\sum_{t=1}^n \min_i \min_t |y_t - y_{it}| + \max_i \max_t |y_t - y_{it}|}{|y_t - \hat{y}_t| + \max_i \max_t |y_t - y_{it}|} \quad (16)$$

$$s.t. \begin{cases} e^T W = 1 \\ W \geq 0 \end{cases} \quad (17)$$

3.3 Theil不等系数法

对于 Theil不等系数 u , 当两个序列完全一致时 $u=0$; u 越接近于 0, 则表示两个序列越一致。因此

建立基于 Theil不等系数的综合模型:

$$u = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2} + \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{y}_i^2}} \quad (18)$$

u 为综合预测值 \hat{y}_i 与实际值 y_i 两个序列之间的 Theil不等系数,显然,Theil不等系数总是愈小愈好。因此,为了得到最佳的综合预测效果,构造如下最优化模型:

$$\min u = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2} + \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{y}_i^2}} \quad (19)$$

$$s.t. \begin{cases} e^T W = 1 \\ W \geq 0 \end{cases} \quad (20)$$

解此最优化模型,可得到最优综合权向量。

4 算例分析

本文采用某地区十五规划的电量预测为算例,分别用逐步回归、灰色群模及模糊指数平滑三种模型做了预测,并在这些预测结果的基础上,运用相关系数法、灰关联度法及 Theil不等系数法建立综合预测模型。预测结果及评价如表 1、表 2所列。

表 1 预测结果表

Tab 1 Results of bad forecast kW h

年份	历史值	单一模型			综合模型		
		逐步回归模型	灰色递阶模型	模糊指数平滑模型	相关系数	灰关联度	Theil不等系数
1987	337	327	347	337	337	337	336
1988	362	369	373	372	372	371	371
1989	374	397	404	388	393	396	396
1990	415	410	438	388	403	410	411
1991	457	454	474	453	458	460	460
1992	516	499	514	498	501	503	503
1993	570	563	557	573	568	565	565
1994	644	621	604	625	620	617	617
1995	703	700	655	715	700	693	692
1996	749	764	709	764	753	748	748
1997	777	813	769	796	794	793	794
1998	788	843	833	808	820	826	828
1999	850	855	903	801	833	848	850
2000	973	921	979	907	924	933	933
2001	1 080	1 053	1 060	1 090	1 076	1 070	1 068

表 2 不同模型的分析 and 比较表

Tab 2 Comparison and analysis of different models

方法		SSE	MAE	MSE	MAPE	MSPE
单一模型	逐步回归模型	9.581	19.16	6.525	0.029	0.009
	灰色递阶模型	12.920	24.35	7.578	0.040	0.012
	模糊指数平滑模型	9.755	19.02	6.584	0.029	0.009
综合模型	相关系数	5.481	14.04	4.935	0.022	0.006
	灰关联度	5.052	13.53	4.738	0.021	0.007
	Theil不等系数	5.225	13.67	4.819	0.021	0.007

其中: SSE(平方和误差)、MAE(平均绝对误差)、MSE(均方差)、MAPE(平均绝对百分比误差)、MSPE(均方百分比误差)

两表中灰关联度的计算均是在分辨率系数取 $\rho=0.5$ 时的计算结果。实际研究中对分辨率系数从 0.1 到 1.0 取了 10 组数据分别进行了测算,发现综合权向量 w 对分辨率系数的变化极不敏感。在整个 $(0.1, 1)$ 的区间内,最佳组合权向量 w 几乎不变,这也就是灰色系统理论推荐使用 $\rho=0.5$ 的缘故。另外,从表 2 的预测评价可以看出,各种误差指标皆得到不同程度的改善。基于相关性的综合

预测效果是令人满意的,运用该方法进行中长期电力负荷预测,从理论上和实践上都是可行的。

5 结论

综合模型是中长期电力负荷预测的必要途径。

1) 基于相关分析的综合模型引入了相关系数、灰关联度及 Theil不等系数等相关性指标,以序列间相关性最大为目标函数建立综合模型,不直接考虑

预测误差的大小,提出了与传统的综合预测方法不同的新思路。

2) 基于相关分析的综合模型,不仅仅改善某个单一误差指标,而是使各种误差指标(平方和误差、平均绝对误差、均方误差、平均绝对百分比误差、均方百分比误差)皆得到不同程度的改善。

3) 基于相关分析的综合模型,在求解时,皆可转化为线性约束非线性规划模型,采用简约梯度法求解甚为方便,也可采用 Matlab 等数学软件编程求解。易于计算,便于应用。

4) 实际算例证明,本方法取得了较为满意的结果。

参考文献:

- [1] 谢敬东,唐国庆,等.组合预测方法在电力负荷预测中的应用[J].中国电力,1998,31(6):1-3
XIE Jing-dong, TANG Guo-qing, et al The Application of the Combined Forecasting Method in the Power Load Forecast[J]. Electric Power, 1998, 31(6): 1-3
- [2] Schmittlein D C. Combining Forecasts: Operational Adjustments to Theoretically Optimal Rules[J]. Management Science, 1990, 36: 1044-1448
- [3] 唐小我.经济预测与决策新方法及其应用研究[M].

成都:成都电子科技大学出版社,1997.

TANG Xiao-wo. The New Method of Economy Forecast and Decision and Application Research [M]. Chengdu: Chengdu University of Electronic Science and Technology, 1997.

- [4] 陈举华,赵建国,郭毅之.电力系统可靠性研究的灰关联和模糊贴近度分析方法[J].中国电机工程学报,2002,22(1):59-63
CHEN Ju-hua, ZHAO Jian-guo, GUO Yi-zhi Grey Relational and Fuzzy Neanness Analysis on the Reliability Study of Power System [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 59-63
- [5] LI Er-guo, YU Jin-shou. Grey Correlation Analysis-based Method for Fault Diagnosis [A]. The 2002 International Conference on Control and Automation, ICCA. 2002

收稿日期: 2004-11-30; 修回日期: 2005-01-24

作者简介:

虞瑄(1979-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统优化规划及电力系统负荷预测;

程浩忠(1962-),男,博士,教授,博导,主要从事电力系统规划、电压稳定性、电力系统谐波和电力市场等领域的科研和教学工作。E-mail: hzcheng@sjtu.edu.cn

A combined power system mid-long term load forecast method based on the correlation analysis

YU Xuan¹, CHENG Hao-zhong¹, WANG Xu², YANG Zong-lin³

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Jiangsu Electric Power Corporation, Nanjing 210024, China; 3. East China Company, Shanghai 200002, China)

Abstract: To reduce power system mid-long term load forecasting error, this paper presents a combined method based on correlation analysis like correlation coefficient, grey correlation degree and Theil coefficient. The new forecast methods, which don't consider the forecast error directly, have difference with conventional forecast method. The application example shows that this method is practical, accurate and efficient.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50177017).

Key words: load forecasting; combined method; correlation coefficient; grey correlation degree; Theil coefficient

(上接第 36 页 continued from page 36)

Comparison and study of preconditioning methods of Jacobian matrix of power flow calculation

LIXiao-hua¹, LIJi-wen¹, ZHANG Lin-xin², YANG Yan-chun³

(1. Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. North China Electric Power University, Baoding 071000, China)

Abstract: The improved algorithm preconditioning jacobian matrix can improve convergence and quicken its speed, inside of which the choice of preconditioning matrix is most important. The paper compares and analyses preconditioning methods using Matlab, the result of simulation indicates P-Q method is the most effective method so far, and the more the system is bigger, the better the P-Q method is effective.

Key words: condition numbers; spectrum; precondition; LU; power flow calculation