

# 基于灰色傅里叶变换残差修正的电力负荷预测模型

黄元生,方伟

(华北电力大学 经济管理学系,河北 保定 071000)

**摘要:** 提出基于灰色傅里叶变换残差修正的负荷预测模型,首先运用滑动平均法对原始数列进行改进,减弱异常值的影响;然后运用傅里叶变换对一般灰色预测模型进行改进,通过对残差进行修正,消除样本数据中偶然因素的影响。算例分析表明,与一般灰色预测模型和马尔可夫残差修正模型相比,该模型的预测精度有所提高,证明了该模型的有效性和实用性。

**关键词:** 负荷预测;模型;傅里叶变换;残差修正;灰色理论

**中图分类号:** TM 732

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.09.019

## 0 引言

只有保证电能供需的平衡,才能有效地保证电网安全稳定运行,而电力负荷预测是保证电力供需平衡的重要前提,因此,合理的电力负荷预测是保证电网安全稳定运行的重要技术。当前电力负荷预测方法主要有传统的回归模型<sup>[1]</sup>、时间序列模型<sup>[2,3]</sup>和智能的人工神经网络模型<sup>[4-5]</sup>、小波分析模型<sup>[6]</sup>、模糊逻辑模型<sup>[7-8]</sup>、支持向量机预测模型<sup>[9-10]</sup>等。

电力负荷影响因素较多且难以分析各种因素对负荷特性的影响程度。各种电力负荷预测方法都存在各自的优缺点,其中,神经网络以其自适应、自学习、高容错能力等优点,在电力负荷预测建模中得到广泛应用并取得了很好的效果,但该方法存在易陷入局部极小、收敛速度慢等缺点,限制了其进一步应用。传统的时间系列法运算量较小、运算速度较快,但预测误差较大且不具备自适应学习能力。传统的灰色系统理论主要解决少数据、小样本、信息不完全和经验缺乏的不确定性问题<sup>[11-12]</sup>,但存在着预测精度不高,误差趋势增大等缺点。

在时间系列预测模型中,运用了很多误差改进方法,如灰色马尔可夫模型<sup>[13]</sup>,该模型在灰色GM(1,1)模型预测的基础上,利用残差进行二次灰色预测并建立状态转移概率矩阵确定残差符号,得到最后的预测结果。该模型假设残差值都是按照固定的状态转移矩阵延展,缺少动态性。

基于以上分析,本文在灰色GM(1,1)模型预测的基础上,提出傅里叶变换残差修正模型。傅里叶变换是一系列不同频率正弦波的无限叠加,可提取出频率成分。将残差作为一个能量有限的时间系列,运用傅里叶变换强大的降噪音能力,提取出残差中反映负荷本质的信息。因此,理论上运用傅里叶变换对残差进行改进具有可行性。算例结果表明,灰色傅里叶变换预测精度相比单一的灰色预测和灰色马尔可夫预测有所提高。

## 1 GM(1,1)模型<sup>[14-15]</sup>

由于负荷数据是多种因素共同影响的结果,因此,有必要对历史数据进行预处理,过滤掉历史数列中异常值的干扰,本文采用滑动平均法减弱异常值的影响。

设原始数列  $x^{(0)} = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)]$ , 滑动平均值计算公式为:

$$x^{(0)}(t) = \frac{x^{(0)}(t-1) + 2x^{(0)}(t) + x^{(0)}(t+1)}{4} \quad (1)$$

该数据既增加了当年数据的权重,又避免了数值过度波动。对于两端点的数据,计算公式为:

$$\begin{aligned} x^{(0)}(1) &= \frac{3x^{(0)}(1) + x^{(0)}(2)}{4} \\ x^{(0)}(n) &= \frac{x^{(0)}(n-1) + 3x^{(0)}(n)}{4} \end{aligned} \quad (2)$$

GM(1,1)模型是最常用的一种灰色模型,它由一个只包含单变量的一阶微分方程构成,是电力负荷预测的有效模型。经过预处理后的数据为:

$$x^{(0)} = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)] \quad (3)$$

进行一次累加生成处理,得到:

$$x^{(1)} = [x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)] \quad (4)$$

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i) \quad (4)$$

由于序列  $x^{(1)}(k)$  具有指数增长规律,而一阶微分方程的解恰是指数增长形式,因此可以认为序列  $x^{(1)}$  满足下列一阶线性微分方程模型。

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u \quad (5)$$

为求  $a$  与  $u$  的值,把式(1)离散化得到  $x^{(0)}(k+1) + \frac{1}{2}a[x^{(1)}(k+1) + x^{(1)}(k)] = u$ , 取不同的  $k$  值得到:

$$\begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)] & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} \quad (6)$$

简记为  $Y_n=BA$ , 且有:

$$Y_n = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[x^{(1)}(1)+x^{(1)}(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(2)+x^{(1)}(3)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(n-1)+x^{(1)}(n)] & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

利用矩阵求导公式可得:

$$\hat{A} = (B^T B)^{-1} B^T Y_n = \begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{u} \end{bmatrix} \quad (8)$$

根据求得的  $\hat{a}, \hat{u}$  值, 得到  $\hat{x}^{(0)}$  的灰色预测模型为:

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = (1-e^{-\hat{a}}) \left( x^{(0)}(1) - \frac{\hat{u}}{\hat{a}} \right) e^{-\hat{a}k} \quad (9)$$

其中,  $k=0, 1, 2, \dots$ 。

## 2 傅里叶变换残差修正模型

设  $f(x)$  是一个能量有限的模拟信号, 则其傅里叶变换即为  $f(x)$  的频谱。因此将随机序列  $x$  的  $n$  个观测数据视为一能量有限的时间序列, 对其作傅里叶变换得到观测数据的频谱, 频谱的中心是低频段, 外围是高频段, 一般认为低频段是反映系统本质的信息, 高频段反映的是系统数据的噪声。采集到的电力负荷时间序列数据一般都含有很大的噪声, 作傅里叶变换可将其滤除, 选择反映电力负荷本质的信息<sup>[16]</sup>。

鉴于傅里叶变换强大的降噪功能, 运用傅里叶变换对灰色 GM(1,1) 的预测残差进行修正, 能够滤除电力负荷时间序列数据中的噪声, 从而提高了预测精度。下面介绍具体建模过程。

构建残差时间序列。由数据的就近原则, 最近的数据反映电力负荷的本质, 所以构建的残差时间序列如下:

$$\eta = [\eta(1), \eta(2), \dots, \eta(n)]$$

$$\eta(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k) \quad (10)$$

$$\eta(1) = 0$$

傅里叶变换残差表示为:

$$\eta(k) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} \left[ a_n \cos\left(\frac{2\pi i}{T} k\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi i}{T} k\right) \right] \quad (11)$$

其中,  $k=2, 3, \dots, n; T=n-1$ 。

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-2/T}^{2/T} \eta(k-1) \cos\left(\frac{2\pi}{T} k\right) d_k =$$

$$\frac{2}{T} \int_{-2/T}^{2/T} [x^{(0)}(k-1) - \hat{x}^{(0)}(k-1)] \cos\left(\frac{2\pi}{T} k\right) d_k \quad (12)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-2/T}^{2/T} \eta(k-1) \sin\left(\frac{2\pi}{T} k\right) d_k =$$

$$\frac{2}{T} \int_{-2/T}^{2/T} [x^{(0)}(k-1) - \hat{x}^{(0)}(k-1)] \sin\left(\frac{2\pi}{T} k\right) d_k \quad (13)$$

把  $\eta(1)=0$  代入式(11), 得到:

$$a_0 = -2 \sum_{i=1}^{\infty} \left[ a_n \cos\left(\frac{2\pi i}{T} k\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi i}{T} k\right) \right] \quad (14)$$

将电力负荷实际值代入式(12)~(14)求得  $a_n, b_n, a_0$ , 进而求得傅里叶变换残差序列  $\eta$ 。

因此得到傅里叶变换残差改进的电力负荷预测值为:

$$X_k = \hat{x}^{(0)}(k) + \hat{\eta}(k) \quad (15)$$

其中,  $X_k$  为最终预测值,  $\hat{x}^{(0)}(k)$  为一般灰色 GM(1,1) 预测值,  $\hat{\eta}(k)$  为随机误差。

## 3 实证分析

本文选取某市从 1997 年到 2004 年 8 年的电力负荷值建立模型, 该历史数据如表 1 所示。

表 1 电力负荷历史数据  
Tab.1 Historic power load data

年份	实际值/MW	年份	实际值/MW
1997	117.195	2001	157.908
1998	122.256	2002	169.258
1999	135.296	2003	178.029
2000	144.347	2004	186.589

利用上述 8 年的历史数据建立模型, 并以接下来 4 年的历史数据与预测值作比较, 验证所建改进预测模型的有效性。

首先建立一般的 GM(1,1) 模型, 利用滑动平均法对历史负荷数据进行预处理, 得到处理后的负荷值为  $x^{(0)} = [118.4603, 124.2508, 134.2988, 145.4745, 157.3553, 168.6133, 177.9763, 184.4490]$  MW, 进行一次累加得到  $x^{(1)} = [118.4603, 242.7110, 377.0098, 522.4843, 679.8395, 848.4528, 1026.4290, 1210.8780]$  MW。

用 MATLAB 编程计算得  $\hat{a} = -0.066, \hat{u} = 114.9634$ , 代入式(9)得到电力负荷预测值为  $\hat{x}^{(0)} = [118.4603, 126.9160, 135.5692, 144.8123, 154.6855, 165.2320, 176.4975, 188.5310, 201.3850, 215.1154, 229.7820, 245.4485]$  MW。根据式(10)得到残差序列为  $\eta = [0, -2.6652, -1.2704, 0.6622, 2.6698, 3.3812, 1.4787, -4.0820]$  MW。

把  $\eta(9) = x^{(0)}(8) - \hat{x}^{(0)}(8) = -4.0820$  MW 代入式(12)—(14), 得到  $a_n = 3.254 \times 10^{-3}$ ,  $b_n = 0$ ,  $\alpha_0 = 1.968 \times 10^{-9}$ 。

由式(11)对  $i$  反复取值运算, 使预测值更接近真实值, 进而求得傅里叶变换残差  $\hat{\eta}(9) = -3.956$  MW。

最终得到 2005 年残差修正的电力负荷预测值为  $X_9 = \hat{x}^{(0)}(9) + \hat{\eta}(9) = 201.385 + (-3.956) = 197.429$  (MW)。由 2005 年的真实值和预测值, 得到  $\eta(10) =$

$196.35 - 197.429 = -1.079$  (MW), 求得  $\hat{\eta}(10) = 4.367$  MW,  $X_{10} = \hat{x}^{(0)}(10) + \hat{\eta}(10) = 215.115 + 4.367 = 219.482$  (MW)。同理求得  $\hat{\eta}(11) = 3.973$  MW,  $\hat{\eta}(12) = 3.564$  MW, 进而得到  $X_{11} = 230.755$  MW,  $X_{12} = 250.013$  MW。

傅里叶变换 GM(1,1)模型计算得到的结果与一般 GM(1,1)、马尔可夫 GM(1,1)模型计算得到的结果进行比较与分析, 如表 2 所示。

表 2 预测结果

Tab.2 Forecasting results

年份	真实值/ MW	一般 GM(1,1)模型		马尔可夫 GM(1,1)模型		傅里叶变换 GM(1,1)模型	
		预测值/MW	相对误差/%	预测值/MW	相对误差/%	预测值/MW	相对误差/%
2005	196.350	201.3850	-2.564	197.648	-0.661	197.429	-0.550
2006	217.112	215.1154	0.920	219.382	-1.046	219.482	-1.092
2007	229.281	226.7820	1.089	234.655	-1.035	230.755	-0.643
2008	248.187	245.4485	1.103	251.012	-1.138	249.013	-0.333

由表 2 可知, 傅里叶变换残差修正模型的预测值比一般 GM(1,1)模型和马尔可夫 GM(1,1)模型更接近于真实值, 预测精度较高。

## 4 结论

a. 在对样本值进行预处理时, 运用滑动平均法滤除异常值的干扰, 处理后的样本值对负荷的预测更科学、合理。

b. 提出的基于傅里叶变换残差修正的电力负荷预测模型, 克服了马尔可夫残差修正缺乏动态性的缺陷。

c. 通过不同方法对同一样本值的预测可知, 傅里叶残差修正模型与马尔可夫残差修正模型相比, 其预测值与真实值的差距较小, 预测精度有所提高, 证明了该模型的有效性。

## 参考文献:

[1] LIU B. Uncertainty theory[M]. New York, USA: Springer-Verlag, 2007.

[2] 杨正瓴, 张广涛, 林孔元. 时间序列法短期负荷预测准确度上限估计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(2): 36-39.

YANG Zhengling, ZHANG Guangtao, LIN Kongyuan. Upper limit estimating of short term load forecasting precision by time series analysis[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2004, 16(2): 36-39.

[3] 林辉, 郝志峰, 蔡瑞初. 基于双时间序列神经网络的短期电网负荷预测[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(32): 218-219.

LIN Hui, HAO Zhifeng, CAI Ruichu. Short-term load forecasting based on two-time-series neural network model[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(32): 218-219.

[4] 陈建华, 周浩. 基于小脑模型关节控制器神经网络的短期电价预测[J]. 电网技术, 2003, 27(8): 16-20.

CHEN Jianhua, ZHOU Hao. Short-term electricity price forecasting based on cerebellar model articulation controller neural network[J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 16-20.

[5] 董福贵, 张世英, 谭忠富, 等. 基于遗传算法的小波神经网络在电

价预测中的应用[J]. 计算机工程, 2005, 31(4): 32-34.

DONG Fugui, ZHANG Shiyong, TAN Zhongfu, et al. Electricity price forecast based on application of wavelet neural network and genetic algorithm[J]. Computer Engineering, 2005, 31(4): 32-34.

[6] 苏娟, 杜松怀, 李才华. 基于多因素小波分析的神经网络短期现货电价预测方法[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(11): 26-29.

SU Juan, DU Songhuai, LI Caihua. Short-term spot price forecast based on multi-factor wavelet analysis neural network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(11): 26-29.

[7] 赵宇红, 肖金凤, 陈忠泽. 混合模糊神经网络在短期负荷预测中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(2): 99-104.

ZHAO Yuhong, XIAO Jinfeng, CHEN Zhongze. Application of hybrid fuzzy neural network in short-term load forecasting[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 18(2): 99-104.

[8] 王楠, 刘晨光, 马立肖. 基于模糊逻辑和神经网络的电力负荷预测[J]. 微计算机信息, 2007, 23(2-1): 313-314, 266.

WANG Nan, LIU Chenguang, MA Lixiao. ANN and fuzzy logic based short-term load forecasting[J]. Microcomputer Information, 2007, 23(2-1): 313-314, 266.

[9] 高伟. 基于模糊最小二乘支持向量机的系统边际电价预测[J]. 水利水电科技, 2008, 3(2): 6-13.

GAO Wei. System marginal price based on fuzzy least square support vector machine prediction[J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 2008, 3(2): 6-13.

[10] 杜京义, 侯媛彬. 基于遗传算法的支持向量回归机参数选取[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(9): 1430-1433.

DU Jingyi, HOU Yuanbin. Parameters of genetic algorithm based on support vector regression machine[J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(9): 1430-1433.

[11] 肖新平, 宋中民, 李峰. 灰技术基础及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 24-31.

[12] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 2版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005: 2-12.

[13] 牛勇, 王震宇, 王红军. 改进灰色模型在中长期电力负荷预测中的应用[J]. 东北电力大学学报: 自然科学版, 2009, 29(2): 64-68.

NIU Yong, WANG Zhenyu, WANG Hongjun. Application of improved grey model for mid and long-term power demand fore-

(下转第 112 页 continued on page 112)

- [9] 鲁文军,刘觉民. 同期装置导前时间误差分析[J]. 电力自动化设备,2012,32(1):112-115.  
LU Wenjun,LIU Juemin. Analysis of lead time error for synchronization device[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012,32(1):112-115.
- [10] 潘书燕,程利军,刘维锋,等. 同期功能应用于线路保护测控单元[J]. 电力自动化设备,2005,25(12):73-76.  
PAN Shuyan,CHENG Lijun,LIU Weifeng,et al. Application of synchronization function to line protection & control unit [J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(12):73-76.
- [11] 海涛,闭耀宾,骆武宁,等. 准同期并网中三相不平衡问题的优化[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(18):70-73.  
HAI Tao,BI Yaobin,LUO Wuning,et al. Optimized strategy of

- three-phase unbalance in synchronized grid-connected[J]. Power System Protection and Control,2009,37(18):70-73.
- [12] 周斌,张斌,闫承志. 数字化变电站同期功能的实现[J]. 电力系统自动化,2009,33(9):59-60,76.  
ZHOU Bin,ZHANG Bin,YAN Chengzhi. Realization of quasi-synchronization function in digitalized substations[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(9):59-60,76.

#### 作者简介:

韩 晋(1978-),女,湖北孝感人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统自动化(E-mail:jhan@wiscom.com.cn);  
黄 健(1970-),男,江苏南通人,教授级高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统自动化。

## Improvement and implementation of sync-capture algorithm

HAN Jin,HUANG Jian

(Wiscom System Co.,Ltd.,Nanjing 211100,China)

**Abstract:** Two common sync-capture algorithms are analyzed. Algorithm 1 predicts the closing time according to the relationship among phase angle difference,slip frequency and slip frequency acceleration,while algorithm 2 applies the contemporary forecast theory to predict the closing time based on the phase angle difference order. Both are improved. For algorithm 1,the phase angle difference between short time interval is estimated with interpolation principle and the closing command is issued if the closing condition is satisfied,otherwise continue the algorithm. For algorithm 2,the parabolic curve fitting prediction algorithm combined with the residual analysis is added,which is more accurate than linear fitting,and the measuring system of phase angle difference,which has direct influence on algorithm,is improved by acquiring the original data at the zero-crossing-point of square wave and by increasing the data density through data interpolation. Experimental results prove that the improved algorithms enhance obviously the quality of synchronous closing.

**Key words:** synchronization; leading time; forecasting; segmentation identification; interpolation; extrapolation; residual analysis

(上接第 107 页 continued from page 107)

- casting[J]. Journal of Northeast Dianli University:Natural Science Edition,2009,29(2):64-68.
- [14] 邓聚龙. 灰色预测与决策[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1992:54-73.
- [15] 牛东晓,曹树华,张文文,等. 电力负荷预测技术及其应用[M]. 北京:中国电力出版社,2009:163-169.
- [16] 甘丽珍,张铭鑫,刘明周,等. 基于傅里叶变换的质量预测动态残差修正模型[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2009,32(6):806-810.  
GAN Lizhen,ZHANG Mingxin,LIU Mingzhou,et al. Research on the dynamic model of error amendment for quality predic-

tion based on Fourier transform[J]. Journal of Hefei University of Technology:Natural Science,2009,32(6):806-810.

#### 作者简介:

黄元生(1958-),男,山东青岛人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为企业战略管理、技术经济及管理、产业经济学;  
方 伟(1985-),男,河北保定人,硕士研究生,研究方向为技术经济及管理(E-mail:fangweizhencang@163.com)。

## Power load forecasting model with residual error correction based on gray Fourier transform

HUANG Yuansheng,FANG Wei

(Economic and Management Department,North China Electric Power University,Baoding 071000,China)

**Abstract:** A load forecasting model with residual error correction is presented based on the gray GM(1,1) model and the Fourier transform. Firstly,the sliding average method is applied to process the original data sequence for reducing the influence of abnormal values. Then,the Fourier transform is used to improve the general gray prediction model for removing the incidental factors from the sample data by correcting the residual. Case analysis shows the forecasting precision of the proposed model is better than that of the general grey model or the Markov error correction model,which proves its validity and practicability.

**Key words:** electric load forecasting; models; Fourier transforms; error correction; gray theory