

含置信区间的改进 ARIMA 电价预测

曾鸣, 刘玮, 汪晓露

(华北电力大学工商管理学院, 北京 102206)

摘要: 电力市场环境下, 电价已日益成为市场参与者关注的焦点。准确的电价预测能为各参与者提供重要的参考。国内外对于电价预测的方法有很多。引用国内外相关理论对现有 ARIMA 预测模型进行了改进。在现有 ARIMA 电价预测模型的基础上, 采用游程检验法判断电价序列的平稳性, 采用 AIC 准则确定 ARMA 模型的阶数, 在误差预测中, 借助统计学的区间估计理论, 给出了一种含置信区间的电价预测方法, 更好地确定了电价序列的上下限, 为发电商的竞价提供参考。

关键词: 电价预测; ARIMA; 置信区间; 预测模型; 误差预测

An improved ARIMA approach on electricity price forecasting with confidence interval

ZENG Ming, LIU Wei, WANG Xiao-lu

(North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In the power market, electricity price has become the focus of attention of market participants. Accurate price forecast for all participants can provide important reference. As there are a lot of ways for price forecasting, this paper improves the existing theory of ARIMA model. On the basis of the current ARIMA price forecasting model, it uses run-length test to determine the sequence of price stability and the AIC criterion to determine the order of ARMA model. In the error forecasting, with an estimated range of statistical theory, this paper gives a confidence interval of the electricity price forecasting to better determine the sequence of the upper and lower price for power generations' bid for reference.

Key words: price forecasting; ARIMA; confidence interval; forecasting model; error forecasting

中图分类号: TM73; F123.9 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)18-0025-07

0 引言

在当前的电力市场环境下, 电价已成为电力系统实行市场化运营的关键。准确的电价预测可以为电力市场中各参与方提供极为重要的参考依据。发电商可以根据准确的预测电价制定出相应的竞标策略, 以追求收益最大而风险最小。同样, 供电企业也需要准确的电价信息决定其电能需求在长期双边合同和现货市场的最优购买分配方案, 而投资者需要参考准确的电价预测信息做出正确的投资决策。因此, 准确的短期电价预测成为了电力市场中各个参与方共同关注的焦点。

本文采用游程检验法判断电价序列的平稳性和 AIC 准则确定 ARMA 模型的阶数, 这是对现有电价预测方法的一种创新。现有电价预测方法一般采用电价曲线图直接判断序列是否存在趋势性变化和周期性变化, 存在一定的主观性, 容易导致预测结果不精确。而在现有的电价预测实际应用方面, 都

采用自相关系数和偏自相关系数来判断模型的阶数, 通过判断托尾和截尾情况来确定模型的阶数。与上述方法相比, AIC 准则比较客观, 判断结果最优。本文在含误差预测的电价预测方法的基础上, 借助统计学中的区间估计理论, 给出一种含置信区间的电价预测方法, 从而得到电价预测序列的上下限, 更好地为发电商竞价提供依据。

1 改进 ARIMA 预测模型描述

随机时间序列按是否平稳划分为平稳随机序列和非平稳随机序列。

设 $\{x_t\}$ 为一随机时间序列, 判断它是否平稳的标准是看它的均值 $E(x_t)$ 、方差 $D(x_t)$ 是否为常数, 自相关函数 $R_t(\tau) = E[x(t)x(t+\tau)]$ 是否仅与 τ 有关而与 t 无关。通过对电价的变化规律进行分析可知, 电价是一个非平稳随机过程。设 $\{P_t\}$ 表

示这一电价序列, 则可以用式 (1) 表示。式中 $f(t)$ 为 P_t 的非周期性增长趋势分量; $g(t)$ 为 P_t 的周期性变化分量; $X(t)$ 为 P_t 中的平稳随机过程分量。

$$P_t = f(t) + g(t) + X(t) \quad (1)$$

式 (1) 说明, 一个非平稳过程在分离出周期性变化趋势和非周期性增长趋势后, 可以转化为平稳随机过程, 然后采用 AR, MA 或 ARMA 进行建模和预测。具体过程如下:

1.1 非平稳性的检验——游程检验法¹

(1) 游程

设电价序列 P_t 的均值为 \bar{P} , 对序列中比 \bar{P} 小的观测值记“-”号, 其余的记为“+”号, 这样相应于原序列就可以得到一个符号序列。在记号序列每一段序列中每一段连续相同的记号序列就叫做一个游程。

(2) 游程检验

设电价序列长度为 N , $N = N_1 + N_2$, N_1 和 N_2 分别是记号序列中“+”与“-”出现的次数, 游程总数为 r 。

对于随机序列, 当 N_1, N_2 大于 15 时, 统计量

$$Z = \frac{r - E(r)}{\sqrt{D(r)}} \quad (2)$$

渐近服从于 $N(0,1)$ 分布, 其中

$$E(r) = \frac{2N_1N_2}{N} + 1 \quad (3)$$

$$D(r) = \frac{2N_1N_2(2N_1N_2 - N)}{N^2(N-1)} \quad (4)$$

因此, 对所检验序列可以计算出统计量 Z , 在给定显著水平 α 下, 若 $|Z| < 1.96$, 则认为序列是平稳的, 否则, 序列是非平稳的。

1.2 数据的平稳化——差分运算²

(1) 用差分算子消除增长趋势

对原序列 $\{P_t\}$ 进行一阶逐期差分计算, 得到新的差分序列 $\{\nabla P_t\}$, 检查 $\{\nabla P_t\}$ 是否已转化为平稳序列, 如果没有, 则继续用差分运算, 直到取得平稳序列。一阶差分可以消除线性增长趋势, 二阶差

分可以消除二次增长趋势。一般增长趋势为 $d \leq 3$ 。

(2) 用周期性差分算子消除周期性变化

如果原序列 $\{P_t\}$ 还存在周期性变化趋势, 例如以 7 天为周期变化, 则经过周期性差分算子, 如转换 $\{(1-B^7)P_t\}$ 或更一般 $\{(1-\theta_7 B^7)P_t\}$ 就可得到消除周期变化的平稳序列。同理, 可用于时、天、月周期的转化。

通过上述两步转换, 可以将非平稳的电价时间序列转化为平稳序列。集成上述两步运算的综合过程可以用 ARIMA 模型描述如下^[1]:

$$\phi(B^s)\nabla_s^D P_t = \Theta(B^s)A_t \quad (5)$$

式中: ∇ 为一阶差分算子, s 为 P_t 的变化周期; D 为增长的阶次;

$$\nabla_s = 1 - B^s; \nabla_s^D = (1 - B^s)^D; \phi(B^s) = 1 - \phi_1 B^s - \phi_2 B^{2s} - \dots - \phi_p B^{ps}; \Theta(B^s) = 1 - \theta_1 B^s - \theta_2 B^{2s} - \dots - \theta_q B^{qs} \quad (6)$$

这里, $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ 和 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ 均是常数; P, Q 是 $\phi(B^s), \Theta(B^s)$ 的阶数; A_t 也是一个 ARIMA 模型, 可进一步转换成平稳的 ARMA 模型, 如式 (7) 所示。

$$\phi(B)\nabla^d A_t = \theta(B)\epsilon_t \quad (7)$$

式中: d 为差分次数;

$$\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p \quad (8)$$

$$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q$$

$\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ 和 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ 均是常数。式 (4) 称为阶数为 (p, d, q) 的 ARIMA 模型。

联合式 (6)、(7) 得到式 (9)

$$\phi(B)\phi(B^s)\nabla^d \nabla_s^D P_t = \theta(B)\Theta(B^s)\epsilon_t \quad (9)$$

式 (9) 称为电价的累积式自回归滑动平均季节性模型, 其阶数为 $(p, d, q) \times (P, D, Q)$, 即经过一系列差分和周期性差分运算, 一个非平稳的电价随机过程 P_t 转化成平稳的随机过程 ϵ_t , 这样就可以用 ARMA 模型进行电价预测。

1.3 模型定阶——AIC 准则³

假定我们用 $ARMA(p, q)$ 模型对随机电价序列 $\{P_t\}$ 进行拟合, $\hat{\sigma}_a^2(p, q)$ 是残差方差, 定义 AIC 函数为:

² 差分算子 B 定义如下: $B = P_t - P_{t-1}$

³ AIC 准则 (Akaike information criterion) 是 1973 年由日本学者赤池提出, 此准则是对 FPE 准则 (用来判别 AR 模型的阶数是否适合) 的推广, 用来识别 ARMA 模型的阶数。

¹ 游程检验最早由 Wald 和 Wolfowitz (1940) 提出, 当初是用来检验两个连续的分布是否是同分布, 现大多用于检验一个取两个值的变量的这两个值的出现是否是随机的。

$$AIC(p, q) = \ln \hat{\sigma}_a^2(p, q) + 2(p+q)/N \quad (10)$$

我们选取不同的 p , q 及模型参数, 对 $\{P_t\}$ 进行拟合, 并用式 (10) 计算该模型相应的 AIC 值。然后改变模型的阶数及参数, 式 (10) 达到极小的模型, 认为是最佳模型。

2 含置信区间的改进 ARIMA 电价预测

由于电价是一个时间序列, 现将时间域表示成: $t \in D^- + D^+$, 其中 D^- 代表历史时域, 在此时域电价的真实值是已知的, 也是建立预测模型的依据; D^+ 是预测时域, 在此时域电价的真实值是未知的。假设数据能够反映电价的变化特性, 则通过分析大量的历史数据 $P^-(t) (t \in D^-)$, 能够建立一个反映数据变化趋势合理的电价预测模型 M 。在利用历史数据验证预测模型的同时, 得到真实值与预测值之间的误差序列 $\{E^-(t), t \in D^-\}$, 该误差序列也可以看成一个随机时间序列, 同样可以建立它的预测模型 (称为误差预测模型 M_{E1})。在确定了电价的预测模型和一个误差预测模型之后, 仍然用历史时间域 $t \in D^-$ 的电价进行预测, 调整误差预测模型, 具体的调节过程为:

(1) 对 t 时刻 $t \in D^-$ 用模型 M 预测出电价 $\tilde{P}^-(t)$;

(2) 用误差预测模型 M_{E1} 预测出 t 时刻的误差 $\tilde{E}^-(t)$, 利用式 (11) 进行校正:

$$P^*(t) = \tilde{P}^-(t) + \tilde{E}^-(t), t \in D^- \quad (11)$$

(3) 计算残差

$$E_1(t) = P^-(t) - P^*(t), t \in D^- \quad (12)$$

检查 $E_1(t)$ 是否达到精度要求, 如果没有达到, 则继续第 (4) 步, 否则第 (6) 步。

(4) 对新的残差 $E_1(t)$ 进一步建立预测模型 M_{E2} 并进行预测, 这时视误差的分布情况决定是采用复杂的回归分析模型, 还是采用简单的加权平均作为预测模型, 得到新的误差预测值 $\tilde{E}_2^-(t)$, 然后按式 (13) 进行校正。

$$P^r(t) = \tilde{P}^-(t) + \tilde{E}_1^-(t) + \tilde{E}_2^-(t), t \in D^- \quad (13)$$

(5) 再次计算 $E_2(t) = P^-(t) - P^r(t)$, 检查 $E_2(t)$ 是否达到精度要求, 如果没有达到, 则参照

第 (4) 步继续建立误差预测模型, 否则到第 (6) 步。

(6) 在时域 $t \in D^-$ 内, 可以迭代形成误差预测模型, 得到准确描述电价变化规律的电价预测模型 M 和电价区间预测模型 M_{Ei} [2]。

在完成上述建模过程后形成综合预测模型: 一个电价预测模型 M , 几个误差预测模型 M_{Ei} 。通过计算电价预测模型和误差预测模型可以确定预测市场的出清价。但是, 这种方法给出的某一时刻的预测值可能大于实际的市场出清价, 这将会使发电商面临无法中标的问题, 最终给发电商带来极大的损失。鉴于此, 借助统计学中的区间估计的理论, 给出一种带置信区间的电价预测方法, 具体预测方法为:

(1) 用模型 M 预测电价 $P^+(t), t \in D^+$;

(2) 用模型 M_{Ei} 预测误差 $E_i^+(t), i=1, 2, \dots$;

(3) 电价上限的确定。

除了盈利以外, 发电商参与竞价的另一目的是占据更大的市场份额。由于发电商在各时段的竞价过高将会失去市场, 因此发电商将以修正后的电价作为其预测电价的上限。用式 (14) 进行校正, 得到电价的上限。

$$\overline{P(t)} = P^+(t) + \sum_i E_i^+(t), t \in D^+, i=1, 2, \dots \quad (14)$$

(4) 电价下限的确定

根据 (3), 可得到新的电价预测序列 $\overline{P(t)}$, $\overline{P(t)}$ 近似的服从正态分布。由于方差未知, 根据概率统计中区间估计这部分理论, 可得:

$$t = \frac{M(\overline{P(t)}) - \mu}{S/\sqrt{n}} \sim t(n-1) \quad (15)$$

其中: $M(\overline{P(t)})$ 是电价序列的样本均值, S 为样本方差, n 为样本个数, μ 为误差的均值。

在给定的置信度 $1-\alpha$, 确定分数位 $t_{\alpha/2}(n-1)$, 使

$$P\left\{\frac{M(\overline{P(t)}) - \mu}{S/\sqrt{n}} \leq t_{\alpha/2}(n-1)\right\} = 1 - \alpha \quad (16)$$

从而, 得到电价序列的下限为:

$$\underline{P(t)} = \overline{P(t)} - \frac{S}{\sqrt{n}} t_{\alpha/2}(n-1) \quad (17)$$

综合上述, 电价序列的置信区间为:

$$\left[P(t), \overline{P(t)} \right]$$

3 基于改进 ARIMA 模型的电价预测实证分析

本文现以 PJM 市场 2002 年 5 月 31 至 6 月 10 日的 24 点电价为例说明含误差预测的 ARIMA 电价预测模型的预测过程。本文以 Matlab 工具建立 ARIMA 模型, 对模型进行误差分析并进行短期预测。

3.1 数据的特征分析

将表 1 中的数据绘制成折线图, 如图 1 所示, 序列是非平稳的, 并包含周期为 24 h 的周期性波动。

表 1 PJM 市场 2002 年 5 月 31~6 月 10 日的 24 点电价数据

Tab.1 24 points price data on May 31-June 10, 2002 of PJM market

时\日期	market					
	2002 0531	2002 0601	2002 0602	2002 0603	2002 0604	2002 0605
1	15.02	18.30	17.75	16.18	15.00	15.86
2	13.60	15.21	15.47	13.13	13.13	13.60
3	13.01	14.55	13.78	13.00	12.81	13.13
4	12.82	13.52	13.01	12.76	12.27	12.94
5	13.00	13.57	13.01	13.03	12.81	13.06
6	14.00	13.53	13.01	15.84	15.80	16.42
7	19.00	14.43	13.52	18.88	18.48	21.21
8	21.01	18.04	15.51	20.31	20.11	23.00
9	23.14	21.12	18.00	22.24	23.01	27.75
10	26.65	28.20	21.00	26.21	26.95	35.52
11	32.78	32.30	24.15	27.45	29.78	45.36
12	36.88	33.86	27.00	29.22	31.49	45.38
13	38.21	38.64	31.00	31.37	32.10	46.05
14	45.16	39.68	31.06	36.93	36.19	51.20
15	45.08	43.78	36.00	37.46	37.63	52.59
16	45.30	44.17	38.00	37.42	40.01	57.40
17	46.37	45.32	39.38	37.97	40.33	59.52
18	44.45	44.16	35.00	35.93	39.27	60.30
19	39.44	38.38	28.00	30.39	33.44	49.37
20	35.48	29.29	25.00	27.39	29.36	40.51
21	35.31	31.20	27.00	29.02	30.49	39.82
22	33.31	35.15	26.00	26.33	30.05	36.42
23	22.49	22.33	19.95	19.16	20.96	30.15
24	17.35	17.91	16.75	17.00	17.55	22.28

时\日期	2002	2002	2002	2002	2002	2002
	0606	0607	0608	0609	0610	0611
1	19.71	15.68	14.00	12.01	14.00	17.12

2	17.37	13.01	13.00	7.20	12.00	14.99
3	16.00	12.75	12.43	5.77	10.00	13.90
4	15.00	12.01	9.00	5.00	9.61	13.54
5	15.24	12.52	8.00	5.00	9.91	13.54
6	17.00	14.01	9.00	5.00	13.50	15.05
7	22.01	18.48	12.81	5.00	17.00	18.70
8	22.67	20.26	14.36	9.06	22.24	24.26
9	26.46	22.83	17.05	15.04	25.46	31.59
10	32.59	26.42	18.74	16.23	30.10	43.61
11	36.44	28.13	20.10	19.14	35.99	48.44
12	41.65	27.83	20.88	21.21	40.28	55.33
13	40.62	27.78	21.05	23.25	40.31	58.59
14	44.19	27.74	20.46	23.28	44.73	64.45
15	48.23	27.42	20.13	25.25	49.93	70.27
16	46.97	25.17	20.15	27.35	50.00	75.85
17	43.81	24.17	20.20	29.30	49.87	79.79
18	35.51	21.59	19.14	29.02	48.13	76.97
19	30.72	20.91	18.98	26.32	43.86	65.03
20	26.55	20.36	18.42	22.81	40.37	51.63
21	27.63	21.54	22.36	23.94	39.14	49.42
22	29.80	20.98	19.04	24.02	38.41	44.79
23	20.96	18.05	16.47	18.94	27.25	36.25
24	16.45	15.00	14.00	16.12	17.58	23.15

上述数据表明, 每日 24 点电价序列变化较大, 基本呈先升后降的趋势, 一般在 15~18 时达到最大。5 月 31~6 月 10 日每日电价数据也存在差异, 且存在明显的周期性和趋势性, 因此, 需要对电价序列进行周期性和趋势性处理, 将非平稳序列化为平稳序列。

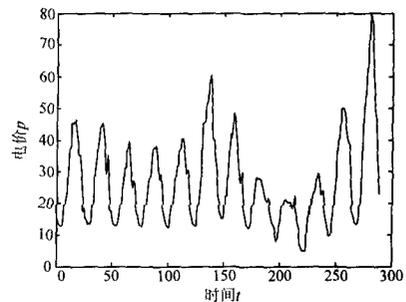


图 1 美国 PJM 市场 2002 年 5 月 31 日至 6 月 10 日的电价曲线图

Fig.1 Price curve from May 31 to June 10 in 2002 years of PJM market in United States

从图 1 可看出, 电价是变化较为剧烈的随机过程, 且具有明显的周期性, 周期为 24 时, 为消除序列的周期性变化, 对原序列进行周期性差分

$\{(1-B^{24})P_t\}$, 可以得到一组新的电价序列, 如图 2。

经过周期性处理后, 电价序列仍为非平稳的, 存在趋势性变化, 如图 2。由于通过图 2 判断序列的趋势变化存在一定的主观性, 在此引入游程检验法。游程检验法分析结果表明, 电价序列存在线性趋势, 因此, 通过一阶差分可将非稳定序列平稳化, 见图 3。

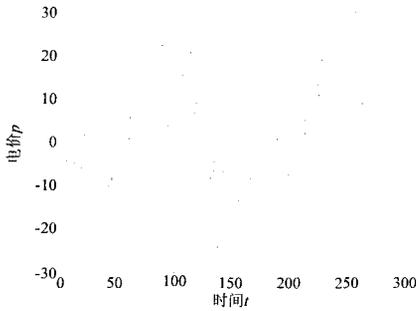


图 2 消除周期性后的电价曲线图

Fig.2 Price curve after eliminating the cyclical

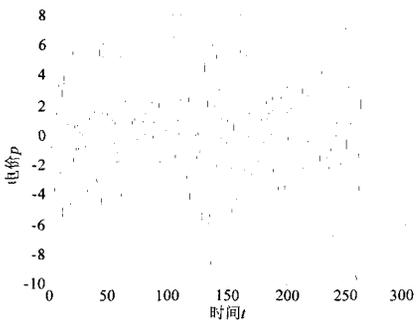


图 3 消除周期性和趋势性后的平稳的电价曲线

Fig.3 Smooth curve of electricity after eliminating the cyclical and the trends

3.2 模型的参数估计

经过一阶周期性差分, 周期性基本消除, 故增长的阶次 $D=1$, 变化周期 $s=24$; 经过一阶逐期差分, 序列趋势消除, 故 $d=1$ 。经过这一系列的处理, 将非平稳序列化为平稳序列, 下面就可以采用 ARMA 模型进行误差分析和电价预测, 在此用 5 月 31 日至 6 月 5 日电价数据建立模型。根据 AIC 定阶准则, 可知模型 $ARMA(p, q)$ 中的 $p=15$, $q=14$ 时, AIC 达到最小值, 即 $AIC=1.3291$, 因而选用 $ARMA(15, 14)$ 模型。其展开式为:

$$\phi(B)P_t = \Theta(B)e_t \quad (18)$$

其中:

$$\begin{aligned} \phi(B) = & 1 - 0.4123B + 0.8767B^2 - 0.4929B^3 - 0.2963B^4 - 0.5395B^5 + 0.1288B^6 - \\ & 0.4372B^7 + 0.6186B^8 - 0.1209B^9 + 0.47B^{10} - 0.3136B^{11} + 0.5112B^{12} - \\ & 0.3159B^{13} + 0.1561B^{14} + 0.01254B^{15} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \Theta(B) = & 1 - 0.5634B + 1.107B^2 - 0.5956B^3 - 0.2865B^4 - 0.4669B^5 + 0.2534B^6 - \\ & 0.2963B^7 + 0.5015B^8 - 0.04472B^9 - 0.07616B^{10} - 0.782B^{11} + \\ & 0.7485B^{12} - 0.8093B^{13} + 0.649B^{14} \end{aligned} \quad (20)$$

e_t 是经过变化后的残差序列, 也是误差预测要处理的随机数列。

3.3 模型的适应性检验

经过对电价序列平稳化处理, 利用模型 $ARMA(15, 14)$ 对自 6 月 1 日第 2 小时起的 120 样本数据进行模型的适应性检验。

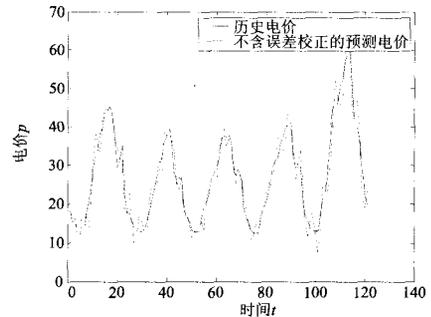


图 4 历史电价和 ARMA 预测的电价曲线图

Fig.4 History of electricity price and price curve of ARMA forecast

从图 4 中观测可得, 模型 $ARMA(15, 14)$ 整体的预测精度较高, 这说明所建的模型是适合的。但是, 图中仍有个别数据预测存在较大的偏差, 因此, 采用误差修正的模型对预测数据进行修正, 使预测达到更高的精度。

3.4 误差预测模型的建立

利用历史数据验证预测模型的同时, 得到真实值与预测值之间的误差序列 e_t , 该序列也是一个随机时间序列, 同样建立它的预测模型。由游程检验法可知, 随机误差序列是平稳的, 因此可直接用 ARMA 模型对序列建模。根据 AIC 定阶准则, 可知模型 $ARMA(p, q)$ 中的 $p=4$, $q=2$ 时, AIC 达到最小值, 即 $AIC=1.2048$, 因而选用 $ARMA(4, 2)$ 模型。其展开式为:

$$A(B)e_t = C(B)\epsilon_t \quad (21)$$

其中:

$$A(B) = 1 - 0.5347B + 1.201B^2 - 0.2002B^3 + 0.1458B^4 \quad (22)$$

$$C(B) = 1 - 0.4979B + 0.8909B^2 \quad (23)$$

ε_t 是误差的残差序列。

建立误差校正模型后，模型得预测精度更高。用误差预测值对上述预测电价进行校正，校正后的预测曲线如图 5 所示，可以看到校正后的预测曲线已经非常接近真实曲线，此时残差为白噪声达到了精度要求。

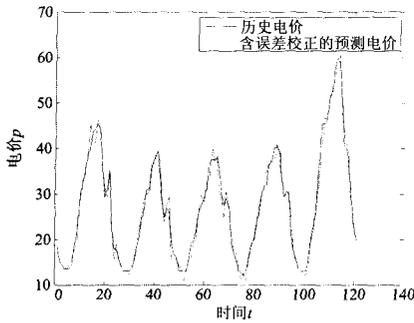


图 5 历史电价和含误差校正的预测电价曲线

Fig.5 History of electricity price and the forecast price curve with error correction

以 2002 年 6 月 2 号为例来分析误差校正前后的电价的预测值及绝对误差率，见表 2。

表 2 误差预测及校正值

Tab.2 Error forecast and correction value

6 月 2 日 24 时	实际电 价	初始预测电价	初始误 差率	修正后的 预测电价	修正后的 误差率
1	17.75	22.81643556	0.18598824	19.06856231	0.048404264
2	15.47	15.35885066	0.00408028	14.8119576	0.024156657
3	13.78	9.979088867	0.13953099	14.20487219	0.015597007
4	13.01	12.25199858	0.02782614	13.85327382	0.03095648
5	13.01	16.70460706	0.13562858	13.34836027	0.012421165
6	13.01	14.92237279	0.07020297	12.19859796	0.029786471
7	13.52	12.48041076	0.0381632	14.78619101	0.04648172
8	15.51	12.10786117	0.12489211	15.46320989	0.001717659
9	18	20.4100507	0.08847267	19.98538609	0.072883284
10	21	25.95169714	0.18177621	22.09517619	0.040203786
11	24.15	25.74834015	0.05871573	25.3005124	0.04227603
12	27	25.09835132	0.06980929	28.80798525	0.066370921
13	31	27.8453777	0.1158058	30.01707161	0.036083183
14	31.06	32.41674649	0.049806	30.12173869	0.03444346
15	36	38.29054631	0.08408568	34.79966069	0.044064311
16	38	37.52017063	0.01761448	38.51703037	0.018980122
17	39.38	34.44423921	0.18119118	38.04642333	0.048955439
18	35	36.62786327	0.05975866	37.30546712	0.08463342

19	28	33.45334896	0.20019178	29.42247149	0.052218757
20	25	25.30394791	0.01115789	23.91512324	0.039825695
21	27	23.87114326	0.11485995	27.4035829	0.01481548
22	26	26.96966232	0.03559619	29.32076915	0.121905036
23	19.95	18.14923023	0.06610604	15.90207286	0.148598918
24	16.75	17.63924252	0.03264399	15.4629721	0.047246639
平均误差为		0.046793			

3.5 预测的结果及分析

通过上面的分析和验证，可知建立的电价预测模型 $ARMA(15,14)$ 和误差修正模型 $ARMA(4,2)$ 适合，由此进行电价的预测，6 月 6 日预测结果见表 3。

表 3 置信概率为 95% 的 6 月 6 日预测电价

Tab.3 Forecasting price for confidence level of 95% probability on June 6

时 刻	预测电价的 下限	预测电价的 上限	时 刻	预测电价的 下限	预测电价的 上限
1	19.06404	19.3714	13	41.05918	41.3666
2	14.39682	14.7042	14	44.66658	44.9740
3	13.19429	13.5017	15	48.011	48.3184
4	14.25313	14.5605	16	52.91893	53.2263
5	14.42057	14.7280	17	48.67402	48.9814
6	19.9248	20.2322	18	44.25804	44.5654
7	20.5586	20.8660	19	31.83105	32.1384
8	24.70416	25.0116	20	23.23449	23.5419
9	27.70179	28.0092	21	24.45348	24.7609
10	35.46081	35.7682	22	25.0963	25.4037
11	43.58769	43.8951	23	18.98832	19.2957
12	36.59148	36.8989	24	15.25404	15.5614

由以上分析可见，新的判别平稳性和定阶方法的采用大大提高了电价预测精度，绝对平均百分误差仅有 4.68%，已经到达国际的领先水平。随着市场化改革的深入，竞价上网成为各发电企业参与、赢得市场的一个关键的环节，准确的电价预测为各发电企业的实际的竞价提供了科学的依据。对于个别点，预测误差达到了 10% 多，这可能是市场意外的事件的发生，如非计划机组检修、网络问题和天气的突变等。

4 结论

本文在现有电价预测的基础上，引用游程检验法对 $ARIMA$ 模型的非平稳性进行检验，并用 AIC 准则对模型进行定阶，是对 $ARIMA$ 模型的改进和创新。在误差预测中，提出含置信区间的误差预测方法，确定了电价序列的上下限，为更好地进行电价预测提供了参考。通过实证分析证明，新的判别

平稳性和定阶方法的采用可以显著提高电价预测的精确度。本文提供的改进 ARIMA 模型电价预测方法具有一般性,为各发电商的竞价提供了参考依据。

参考文献

- [1] 周明, 严正, 倪以信, 等. 含误差预测校正的 ARIMA 电价预测新方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 63-68.
ZHOU Ming, YAN Zheng, NI Yi-xin, et al. A Novel ARIMA Approach on Electricity Price Forecasting with the Improvement of Predicted Error[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12):63-68.
- [2] 周明, 聂艳丽, 李庚银, 等. 基于小波分析的短期电价 ARIMA 预测方法[J]. 电网技术, 2005, 29(9): 50-55.
ZHOU Ming, NIE Yan-li, LI Geng-yin, et al. Wavelet Analysis Based ARIMA Hourly Electricity Prices Forecasting Approach[J]. Power System Technology, 2005, 29(9):50-55.
- [3] Liu J Y, Li L, Wang H F. Congestion Management of N-1 Contingency with the Participation of Load Bidding[A]. in: UPEC[C]. UK: 2002.
- [4] Marannino P, Vaiati R, Zanellini, et al. OPF Tools for Optimal Pricing and Congestion Management in a Two Sided Auction Market Structure[A]. in: 2001 IEEE Porto Power Tech Conference[C].2001.1-7.
- [5] 胡峰, 彭力. 基于时间序列模型的电价预测方法[J]. 继电器, 2008,36(2):41-46.
HU Feng, PENG Li. Electricity Price Forecasting Solution Based on Time Series Models[J]. Relay, 2008,36(2):41-46.
- [6] 秦磊, 邹斌. 基于小波神经网络的电价滚动预测模型[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2008,(2):48-52.
QIN Lei, ZOU Bin. Electricity Price Forecasting Model Based on Wavelet-neural Network[J]. Journal of Jiangnan University(Natural Science Edition), 2008,(2):48-52.
- [7] 胡峰, 彭力. 基于分时多模型的短期电价预测[J]. 华东电力, 2008,(6):24-28.
HU Feng, PENG Li. Short-term Price Forecast Models Based on Period-decoupled Price Sequence[J]. East China Electric Power, 2008,(6):24-28.

收稿日期: 2008-10-11; 修回日期: 2008-12-27

作者简介:

曾 鸣 (1957-), 男, 教授, 主要从事电力市场领域的研究与教学工作; E-mail:wqlwxl@hotmail.com

刘 玮 (1966-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力市场理论与实务。

(上接第 19 页 continued from page 19)

参考文献

- [1] Tylavsky D J, Crouch P E, Jarriel L F. The Effects of Precision and Small Impedance Branches on Power Flow Robustness [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(1): 6-14.
- [2] 西安交通大学, 等. 电力系统计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1978.
- [3] 姚玉斌, 鲁宝春, 陈学允. 小阻抗支路对牛顿法潮流的影响及其处理方法[J]. 电网技术, 1999, 23(9): 27-31.
YAO Yu-bin, LU Bao-chun, CHEN Xue-yun. A Method to Deal with the Effect of Small Impedance Branches to Prevent Divergence in Newton Raphson Load Flow[J]. Power System Technology, 1999, 23(9): 27-31.
- [4] 姚玉斌, 蔡兴国, 陈学允, 等. PQ 分解法潮流求解含有小阻抗支路系统的收敛性分析[J]. 继电器, 2000, 28(4): 6-12.
YAO Yu-bin, CAI Xing-guo, CHEN Xue-yun, et al. Analysis of Convergence of PQ Load-flow for System with Small Impedance Branches [J]. Relay, 2000, 28(4): 6-12.
- [5] 许可, 郎兵. 快速解耦法潮流计算针对小阻抗支路处理方法的研究[J]. 北京交通大学学报, 2005, 25(9): 107-110
XU Ke, LANG Bing. Method to Deal with Small Impedance Branches Based on Fast Decoupled Load Flow Algorithm[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2005, 25(9): 107-110.
- [6] 于继来, 王江, 柳焯. 电力系统潮流算法的几点改进[J]. 电机工程学报, 2001, 21(9): 88-93.
YU Ji-lai, WANG Jiang, LIU Zhuo. Improvements on Usual Load Flow Algorithms of Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 88-93.
- [7] 姚玉斌, 刘东梅, 陈学允. 求解含有小阻抗支路系统潮流的一种新方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001, 33(4): 525-529.
YAO Yu-bin, LIU Dong-mei, CHEN Xue-yun. New Load-flow Method to Deal with System with Small Impedance Branches [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2001, 33(4): 525-529.
- [8] 诸骏伟. 电力系统分析(上册)[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
ZHU Jun-wei. Power System Analysis, Part One[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.
- [9] 电力系统分析综合程序 6.0 版 EPRI-36 算例说明[Z]. 中国电力科学院。

收稿日期: 2008-10-08; 修回日期: 2008-11-24

作者简介:

韩 平 (1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: integrity_99@163.com

刘文颖 (1955-), 女, 教授, 研究方向为电力系统分析与控制及电力系统智能调度;

吴 琼 (1979-), 男, 研究方向为电力系统分析与控制及电力规划。