

# 基于ARCH模型的电价联动建模研究

程 瑜, 张粒子

(电力系统保护与动态安全监控重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

## Electricity Tariff Linkage Modeling Research Based on ARCH

CHENG Yu, ZHANG Li-zi

(Key Laboratory of Power system Protection and Dynamic Security Monitoring and Control Under Ministry of Education(North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China)

**ABSTRACT:** Before the formation of power retail market, the linkage mechanism of electricity tariff and system marginal price has great significance to the risk reduction of the fluctuation of system marginal price. According to the analysis of the risk, this paper proposes a new method to mechanism modeling that based on the response of customer demands. First, the models provide power customers with prospective linkage degree so that it makes the customers be more active in the linkage progress of electricity tariff. These activities can be more helpful to exert the leverage adjust function of electricity tariff to power demand. This function will regulate the fluctuation of system marginal price and reduce the linkage risk that is induced by the time lag between electricity tariff linkage regulation and the fluctuation of system marginal price. And also considering the risk, this paper provides detailed analysis of the fluctuation of system marginal price using auto regressive conditional heteroskedasticity (ARCH) models. Finally, the paper builds risk linkage analysis model and input related data to the model to do the example analysis.

**KEY WORDS:** power market; electricity tariff; tariff linkage risk; auto regressive conditional heteroskedasticity

**摘要:** 在开展电力零售市场竞争前, 销售电价与上网电价的联动机制是在销售侧正确地反映电力市场供需状况和供电成本, 规避由于发电竞价而引起上网电价波动给电网企业所带来的市场风险的重要手段。文中通过对电价联动机制存在的风险进行分析, 提出一种考虑用户需求响应的电价联动机制与建模的新思路。该联动机制中, 电价监管者要在一个电价联动期开始前, 向电力用户公布预期的电价联动水平; 在该联动期结束后, 根据实际上网电价的波动情况和用电情况, 及时制定销售联动电价水平, 对于实行电价联动的用户, 当期按联动后的电价水平进行结算。同时, 该文针对销售电价与上网电价联动存在的风险, 采用自回归条件异方差(ARCH)模型对联动期内平均上网电价的波动情况进行数学描述, 实现了联动模型的具体建模和对联动水平的预测。最

后, 采用实例数据对联动模型进行实证分析。

**关键词:** 电力市场; 销售电价; 电价联动风险; 自回归条件异方差

## 0 引言

随着我国各区域电力市场的建设和发展, 有关电价的研究受到更多的关注, 并取得一定的经验和成果<sup>[1-5]</sup>。市场建设初期, 上网电价由市场竞争形成, 零售市场没有放开, 销售电价采用政府定价的形式, 电网企业作为单一购买者面临着上网电价波动所带来的风险。如何建立长期合理的销售电价与上网电价的联动机制是亟待解决的重大理论和实践问题。销售电价与上网电价联动调整的目的是把上网电价的波动信息传递给需求侧: 一方面有利于电网企业规避上网电价上涨的风险; 另一方面也使用户及时受益于上网电价的下落, 以期引导用户合理用电、促进电力供求平衡。

电价联动包括实时联动和事后联动。文献[6-8]介绍了国外采用实时联动制定动态销售电价的情况。我国电力市场体制和电价机制改革需要逐步完善, 对用户的实时计量、计费还有待实现, 实时的销售电价联动机制短期内无法实现; 现阶段通过事后销售电价联动机制建立的发电市场价格信息传递渠道, 对市场供求矛盾起到一定的缓解作用。但是, 直接根据上一联动期的上网电价波动水平, 决策下一次销售电价联动水平, 从而导致在上一联动期内上网电价的变动不是通过该联动期内销售电量的电价销纳, 而要通过下一联动期内销售电量的电价销纳, 使得电价与需求缺乏相互协调性, 销售电价联动调整对上网电价波动反映的时效性差。考虑到电力用户对电价联动调整的承受能力, 长期采用以上

事后电价联动模型，不利于促进需求与价格的长期均衡，积累和加剧电力供求矛盾，可能出现用户无法销纳销售电价波动的情况，形成电价联动风险。因此，联动机制中必须考虑用户对电价联动调整的需求响应。

## 1 基于需求响应的预期电价联动

根据我国新颁布的销售电价暂行管理办法，销售电价与上网电价的联动是指，根据上网电价水平的波动情况，对除居民和农业用户外的工商业及其它用户，实施最小调整时间间隔为月的销售电价水平调整。

结合我国目前的电力销售按月结算的实际情况，本文提出基于需求响应的预期电价联动机制（如图1所示），即：以月为联动期，每月在一个联动期开始时，对历史上网电价变动情况进行分析，研究上网电价的波动趋势，预估上网电价波动水平，向用户公布下一联动期内销售电价的预期联动水平，即预测的该联动期平均上网电价水平相对于上一联动期平均上网电价的变动幅度；然后，在联动期内，用电需求对预期联动水平做出响应，进而影响上网电价的波动情况；最后，在该联动期结束时，根据该联动期内上网电价的实际波动水平确定执行的销售电价联动水平，调整销售电价，实行电价联动的用户每月按最新调整的销售电价水平进行。

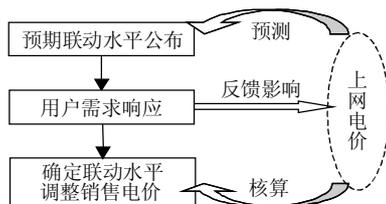


图1 销售电价联动机制示意图

Fig. 1 The sketch map of tariff linkage mechanism

显然，这种联动机制提高了销售电价联动调整与上网电价波动间的协同性：它不是消极地追溯历史销售电价计价成本的变动，而是通过电价监管者向电力用户公布预期电价联动水平和当期实行电价联动的方式，事先向电力用户传递上网电价和市场供求的预期变动情况，使用户能够对预期联动的销售电价产生需求响应，有效发挥销售电价对需求的调节杠杆作用，进而对上网电价波动起到均衡调节的作用。

## 2 联动模型的实现

针对发电侧市场中的价格风险问题已有一些相

关研究：文献[9-10]介绍了市场环境下，如何考虑投资决策中的技术风险和财务风险，进行火电厂投资的风险决策建模研究；文献[11]介绍了如何考虑上网电价波动的不确定性，进行发电商竞价的风险决策建模研究；文献[12]从风险管理的角度出发，基于历史报价与成交价的相关性分析，对各种报价方法带来的风险进行建模研究。针对发电市场开放、零售市场冻结的改革过渡阶段，文献[13]提出建立电价风险基金进行事后价格风险控制。

本文提出的电价联动机制对联动风险的规避能力有赖于预期联动水平的准确性。如果预期联动水平的与实际上网电价波动水平存在较大偏差，可能引起需求侧的过度响应，不利于引导用户合理用电和电力资源的优化配置。

大量的数据显示，上网电价的价格波动明显呈现易变性“聚集”效应，即价格的大幅波动或小幅波动常常相继出现，从而大幅波动聚集在某些时段，而小幅波动聚集在另一些时段。价格波动的聚集效应使得传统的回归模型难以有效、准确地描述价格的变动规律。20世纪80年代，恩格尔开创性地建立了随时间变化的波动率模型，提出自回归条件异方差（ARCH）模型<sup>[14]</sup>，模型假设因变量波动率的随机误差的方差在某一段时间内取决于以前发生的随机误差，从而一个较大的(小的)误差会跟随着一个较大的(小的)误差，实现对价格波动易变性聚集的显著描述。通常采用价格波动水平的方差作为度量价格波动风险指标。ARCH族模型已经发展成为不可或缺且非常有效的市场价格变化的分析工具，广泛应用于金融市场价格波动预测和波动风险分析<sup>[15-17]</sup>。

因此，本文借鉴金融市场中有关价格波动的ARCH族建模预测分析的实践经验，建立电价联动水平的ARCH族预测模型，基本流程如图2。

步骤1：模型变量的设置

由于直接体现预期联动水平的平均上网电价 $P_t$ 的差分序列 $(P_t - P_{t-1})$ 不能满足ARCH族模型对变量序列的稳定性要求，需要先对原始平均上网电价序列 $P_t$ 进行函数处理 $f(P_t)$ 后，再差分，如式(1)，生成稳定的数据序列 $R_t$ ，定义 $R_t$ 为联动水平指数。以 $R_t$ 作为模型中的被解释变量，用其间接反映相邻联动期内平均上网电价水平的变动。

$$R_t = f(P_t) - f(P_{t-1}) \quad (1)$$

式中： $R_t$ 为联动水平指数序列； $P_t$ 为平均上网电价

序列;  $f(P_t)$ 为平均上网电价的函数处理序列。

模型中的解释向量包括内生变量联动水平指数  $R_t$  的一系列滞后值  $R_{t-i}(i=1,2,\dots,n)$ , 也可以包含一些外生变量及其滞后值, 外生变量通常考虑选取用电需求、用电需求变动等。所有的解释变量共同构成模型的解释向量  $X_t$ 。解释向量的构成确定, 需要通过对被解释变量与各解释变量进行相关性检验。

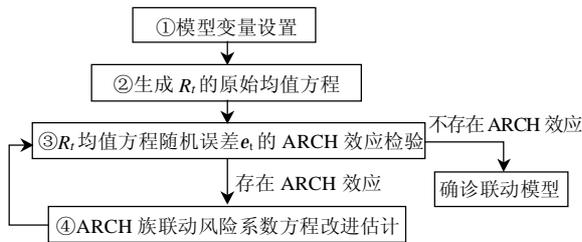


图2 电价联动建模的流程图

Fig. 2 The flow chart of linkage modeling

步骤2: 生成原始联动水平指数  $R_t$  的均值方程

联动水平指数  $R_t$  和其解释向量确定后, 用最小二乘法得到联动水平指数  $R_t$  的原始均值方程如下:

$$R_t = bX_t + e_t \quad (2)$$

式中:  $e_t$  为  $t$  时刻, 联动水平指数  $R_t$  均值方程的随机误差;  $b$  为解释向量  $X_t$  的系数向量  $(b_1, b_2, \dots, b_n)$ ;  $n$  为经过  $t$  检验系数显著不为零的解释向量的个数。

步骤3: 残差序列  $e_t$  的 ARCH 效应检验

检验联动水平指数  $R_t$  的均值方程中的随机误差项  $e_t$  是否存在异方差, 即是否具有易变性“聚集”的特性。一般可以先直接观察残差序列是否有波动聚集现象, 初步判断是否存在条件异方差。常用拉格朗日乘子(LM)检验法, 对随机误差项进行 ARCH 效应检验。

用最小二乘法得到联动水平指数  $R_t$  的均值方程(2)一般是存在 ARCH 效应的。如果首次检验便不存在 ARCH 效应, 则说明联动水平指数  $R_t$  的变动不存在异方差性, 即预期联动水平的偏差恒定, 进而存在的联动风险恒定。很明显, 这种情况在实际市场中是不存在的, 大量数据证实, 平均上网电价  $P_t$  的波动是存在异方差性。当联动水平指数  $R_t$  的均值方程的残差序列存在 ARCH 效应时, 则进入步骤4。

步骤4: ARCH 族联动风险系数方程估计及确诊

金融市场价格波动的风险分析中, 通常用价格波动率均值方程误差项的方差来度量风险。借鉴这一思想, 如果联动水平指数  $R_t$  的均值方程存在异方差性, 就可采用均值方程残差序列  $e_t$  的方差  $h_t$  度量联动风险, 定义  $h_t$  为联动风险系数, 用以反映销售电价预期联动水平对用电需求响应的敏感度。  $h_t$  越

大, 则说明电力用户可以通过需求响应对预期联动水平产生的影响越大。

依据 ARCH 族建模理论, 建立联动水平指数  $R_t$  的 ARCH 方程, 即销售电价联动风险系数方程

$$h_t = a_0 + a_1 e_{t-1}^2 + \dots + a_q e_{t-q}^2 \quad (3)$$

式中:  $h_t$  为联动水平指数随机误差项  $e_t$  的方差, 联动风险系数;  $q$  为 ARCH 方程的阶数, 且,  $a_0 \geq 0, a_i \geq 0, (i=1, \dots, q)$ 。

以上联动水平指数均值方程和联动风险系数方程共同构成销售电价的联动模型。除了式(2)和(3)描述的基本 ARCH( $q$ )模型形式外, ARCH 模型还有很多推广和衍生形式, 其中广义 ARCH (GARCH)模型的应用最为广泛。GARCH 模型是在条件异方差方程中用  $h_t$  的一个时滞结构来修正方程(3), 形成

$$h_t = a_0 + \sum_{i=1}^q a_i e_{t-i}^2 + \sum_{j=1}^p b_j h_{t-j} \quad (4)$$

其中,  $b_j \geq 0, (j=1, \dots, p)$ , 最后得到 GARCH( $p, q$ )模型。

用 ARCH 族模型理论进行联动建模时, 要对比不同形式 ARCH 族模型对上网电价波动的拟合程度, 选取拟合效果最好的 ARCH 族模型。图2中, 步骤4与步骤3之间的循环流程正是不断地对模型进行 ARCH 族复杂改进设定, 估计生成新的联动模型。并对改进了的联动水平指数均值方程的残差序列  $e_t$  进行 ARCH 效应检验, 根据检验结果判断改进了的联动模型是否具有更好的拟合效果, 一直到检验结果显示模型设定的复杂改进不能显著提高模型的拟合效果。实际建模过程中, 最简单和常用的检验方法就是以—个更复杂的设定来估计模型, 然后看新的变量的参数是否显著地不等于 0。如果参数显著为 0, 则该模型可以确诊为最后的联动模型。

### 3 实证分析

本文采用 EViews 软件进行联动模型的实证分析。由于我国电力市场竞价刚起步, 竞价数据还有待积累, 所以本算例采用新英格兰市场 (New England) 1999 年 5 月至 2003 年 2 月间的数据, 以一周为联动采样期, 得到周平均上网电价数据序列  $P_t$ 、上网电量数据序列  $L_t$ , 总共为 200 个联动期。

被解释变量联动水平指数序列  $R_t$  为联动期内平均上网电价序列  $P_t$  ( $\$/MW \cdot h$ ) 的对数差分序列, 即  $R_t = \ln(P_t) - \ln(P_{t-1})$ 。下图显示了联动水平指数  $R_t$  的波动情况, 图中横轴表示以周为单位的时间  $t$ , 为

简便起见，以序号代替；纵轴表示联动水平指数  $R_t$ 。可以看出，联动水平指数存在明显的易变性聚集现象。

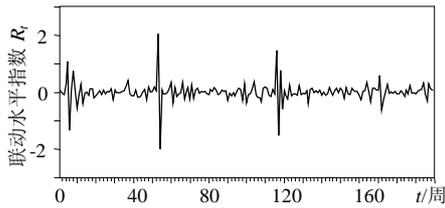


图 3 联动水平指数序列( $R_t$ )曲线图  
Fig. 3 Linkage Index( $R_t$ ) Graph

经过被解释变量与各解释变量进行相关性检验，最后确定的解释变量包括：联动水平指数的滞后序列  $R_{t-1}, R_{t-2}$ ；上网电量对数序列的差分序列  $Q_t$ ，即  $Q_t = \ln(L_t) - \ln(L_{t-1})$ ，以及  $Q_{t-1}$ 。形成原始联动水平指数均值方程如下：

$$R_t = -0.523R_{t-1} - 0.247R_{t-2} + 2.895Q_t + 0.708Q_{t-1} + e_t \quad (5)$$

图 4 为原始联动水平指数均值方程(5)的残差序列  $e_t$  曲线图，可以明显看出序列存在异方差。

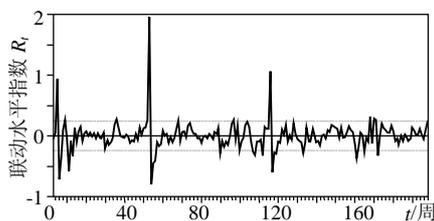


图 4 残差序列  $e_t$  曲线图  
Fig. 4  $e_t$  Graph of Linkage Index

采用拉格朗日 (LM) 检验法对残差序列进行附加 ARCH (1) 效应检验，结果表明联动水平指数的随机扰动项  $e_t$  显著存在异方差性。

通过了初次 ARCH 效应检验，则依据以上模型中的步骤 3 和步骤 4，循环进行联动风险系数方程的估计和 ARCH 效应检验。本算例中，首先用简单的基本 ARCH 模型进行建模，然后用 GARCH 模型进行建模。最后确诊 GARCH (1,1) 为联动模型，模型中具体联动水平指数方程和联动风险系数方程如下：

$$R_t = -0.3698R_{t-1} - 0.1971R_{t-2} + 2.159Q_t - 1.121Q_{t-1} + e_t \quad (6)$$

$$h_t = 0.0053 + 2.367e_{t-1}^2 + 0.0487h_{t-1} \quad (7)$$

利用以上联动模型中的联动水平指数方程(6)，可预期下一联动期( $t=201$ )的联动水平指数  $R_t$ ；同时，利用联动风险系数方程(7)，可测算出该预期联动水平的联动风险系数  $h_t$ 。

对 15 个不同  $t$  值的联动周期分别进行以上联动

建模得到预期联动水平指数  $R_t$  及其对应的联动风险系数  $h_t$ ，如表 1。

表1 联动模型结果表 ( $t=180\sim 194$ 周)  
Tab.1 Calculated results of linkage model ( $t=180\sim 194$  week)

$t$	$R_t$	$h_t$	$t$	$R_t$	$h_t$	$t$	$R_t$	$h_t$
180	-0.082	0.041	185	0.135	0.009	190	-0.178	0.018
181	0.033	0.012	186	-0.139	0.014	191	0.006	0.029
182	0.010	0.021	187	0.197	0.021	192	0.042	0.018
183	0.133	0.010	188	0.045	0.016	193	0.007	0.018
184	-0.185	0.047	189	0.034	0.017	194	0.193	0.036

从图 5 所示的  $h_t$  的变动曲线，可以看出：在这 15 个联动周期内，大部分时间的风险系数的值稳定在图中阴影区范围内，说明这些时段预期联动水平对需求响应的敏感度小；当  $t=180$ 、 $t=184$ 、 $t=194$  时联动风险系数较大，说明这些联动期内的预期联动水平对需求响应的敏感度大，如果用户需求积极响应将能够使电价波动幅度（联动水平指数的绝对值）减小，实际联动水平有可能与预期电价联动水平产生较大偏差。例如，对于  $t=194$  时，预期联动水平指数  $R_t=0.193$ ，表明预期联动水平会有较大幅度上升，但是此时对应  $h_t$  值较大，说明如果用户需求积极响应，则可以较大可能减少实际的电价联动水平。

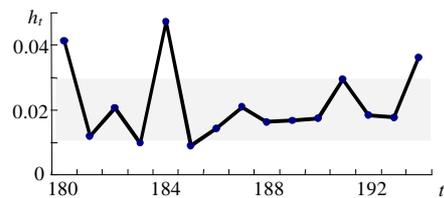


图 5 联动风险系数  $h_t$  曲线图  
Fig. 5  $h_t$  graph of linkage index

以上算例表明上网电价的波动具有显著的异方差性，并验证了采用 ARCH 族模型进行联动建模的有效性。

## 4 结论

结合我国电价改革的实际情况，针对销售电价联动风险，提出建立基于需求响应的预期电价联动模型。模型通过向用户公布预期联动水平，以期及时向终端用户传递价格风险信号、规避事后电价联动机制给电网企业和用户带来的风险，实现对联动风险的“预控制”。

在模型具体建模实现过程中，利用自回归条件异方差 (ARCH) 族模型对联动期平均上网电价的波动情况进行有效描述，用以决策预期联动水平，并采用联动水平指数方程的方差作为联动风险的度

量指标,反映销售电价联动水平对用电需求响应的敏感度。最后采用实例数据进行联动模型实证分析,验证用 ARCH 族模型进行电价联动建模的有效性。

## 参考文献

- [1] 任震,吴国玥,黄雯莹,等. 电力市场中计算输电电价的一种新方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 37-40.  
Ren Zhen, Wu Guoyue, Huang Wenyong, et al. A new method to transmission pricing in electricity market[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 37-40(in Chinese).
- [2] 刘广建,胡三高,戴俊良. 电力系统边际电价的混沌特性及预测[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 6-8, 175.  
Liu Guangjian, Hu Sangao, Dai Junliang. The chaotic property of system marginal price and its forecasting[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 6-8, 175(in Chinese).
- [3] 杨莉,黄民翔,邱家驹,等. 基于模块网络的市场清算价格预测[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 44-48.  
Yang Li, Huang Minxiang, Qiu Jiayu, et al. A market clearing price predictor based on modular network[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 44-48(in Chinese).
- [4] 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 Yixin 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(in Chinese).
- [5] 白利超,康重庆,夏清,等. 不确定性电价分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 36-41.  
Bai Lichao, Kang Chongqing, Xia Qing, et al. Analysis on the Uncertainty of Electricity Price[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 36-41(in Chinese).
- [6] Revaz J M, Storelli S, Pepin J et al. Dynamic tariffing of industrial consumers [C]. Europe Power Delivery, London UK, 1998.
- [7] Sanghvi A P. Flexible strategies for load/demand management using dynamic pricing [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(1): 83-93.
- [8] David A K, Lee Y C. Dynamic Tariffs: Ttheory of Utility-consumer Interaction[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4: 904-911.
- [9] 赵新宇,王锡凡,陈皓勇. 火电厂投资风险决策的算法和灵敏度分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 15-20.  
Zhao Xinyu, Wang Xifan, Chen Haoyong. Strategy decision algorithm and sensitivity analysis of thermal power generation investment [J]. Proceedings of CSEE, 2004, 24(10): 15-20(in Chinese).
- [10] 赵新宇,王锡凡,陈皓勇. 火电厂投资风险决策的模型与整体框架[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 7-11.  
Zhao Xinyu, Wang Xifan, Chen Haoyong. Strategy decision model and framework of thermal power generation investment[J]. Proceedings of CSEE, 2004, 24(8): 7-11(in Chinese).
- [11] 康重庆,白利超,夏清,等. 电力市场中发电商的风险决策[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 1-6.  
Kang Chongqing, Bailichao, Xia Qing, et al. Analysis on the uncertainty of electricity price[J]. Proceedings of CSEE, 2002, 22(5): 36-41(in Chinese).
- [12] 葛朝强,李扬,唐国庆,等. 基于风险的火电厂报价策略评估[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 48: 51.  
Ge Zhaoqiang, Li Yang, Tang Guoqing, et al. Risk based assessment for strategies in thermal power plant bidding [J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 48-51(in Chinese).
- [13] 黎永亮,于渤,叶志瑜. 单边开放电力市场中电价风险基金的数学模型[J]. 东北电力学院学报, 2004, 24(1): 54-57.  
Li Yongliang, Yu bo, Ye Zhiyu. Mathematical model of electric power risk fund in a one-way deregulated power market[J]. Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 2004, 24(1): 54-57(in Chinese).
- [14] Engle R F. Auto-regressive Conditional Heteroskedasticity with Estimates of the Variance of U. K. Inflation [J]. Econometrica, 1982, 50(5): 987-1008.
- [15] 张世英,柯珂. ARCH 模型体系[J]. 系统工程学报, 2002, 17(3): 236-245.  
Zhang Shi-ying, Ke Ke. ARCH modeling system[J]. Journal of Systems Engineering, 2002, 17(3): 236-245(in Chinese).
- [16] 詹姆斯. 汉密尔顿. 时间序列分析[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 1999.
- [17] 邹建军,张宗益,秦拯. GARCH 模型在计算我国股市风险价值中的应用研究[J]. 系统工程理论与实践, 2003, 5: 20-25.  
Zou Jianjun, Zhang Zongyi, Qin Zheng. The application of GARCH model in computing the var of chinese stock market[J]. System Engineering Theory and Practice, 2003, 5: 20-25(in Chinese).

收稿日期: 2005-12-18。

作者简介:

程 瑜,女,博士,讲师,主要研究方向为电力市场及电力经济, [judychengyu@163.com](mailto:judychengyu@163.com);

张粒子,女,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力市场和电力系统分析相关理论及其应用。

(编辑 王彦骏)