

文章编号:1000-582X(2009)12-1456-06

## 改进卡尔曼算法在电子鼻信号处理中的应用

屈剑锋, 柴毅, 郭茂耘, 石为人

(重庆大学 自动化学院, 重庆, 400030)

**摘要:**为了降低的电子鼻测量过程中噪声信号对采样结果的影响,提出一种改进的自适应卡尔曼滤波算法,该方法能自适应调整测量方差以及能够滤除传感器本身具有的非高斯噪声信号。针对电子鼻测量过程中的信号特性,建立了测量数据处理的卡尔曼滤波模型,重点讨论改进卡尔曼滤波算法,并将该算法应用到电子鼻测量数据处理过程中,结果表明该方法能够抑制电子鼻测量过程中产生的噪声,提高电子鼻的测量精度。

**关键词:**电子鼻; 噪声; 改进卡尔曼; 信号处理

中图分类号:TP202+7

文献标志码:A

### Application of improved Kalman filter algorithm for the signal processing of electronic nose

QU Jian-feng, CHAI Yi, GUO Mao-yun, SHI Wei-ren

(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** To reduce the noise signal in the sampled data of the Electronic nose (e-nose), an improved adaptive method based on Kalman filtering algorithm is presented, which can adaptively adjust measurement error variance, while de-noise the Non-Gaussian noise in an e-nose output. A Kalman filtering model for measurement data processing is introduced based on the signal characteristics in the e-nose measurement processing. The improved adaptive filtering method is discussed in detail and applied to e-nose signal processing. The results demonstrate that the proposed method can adaptively reduce the noise signal in the enose measurement data processing and improve the sensitivity of e-nose measurement.

**Key words:** electronic nose; noise; improved Kalman; signal processing

电子鼻是二十世纪以来迅速发展起来的一个研究领域,它是一门涉及传感技术、模式识别、电子技术、计算机技术等交叉学科,电子鼻在环境气体浓度监控方面有着重要作用<sup>[1-5]</sup>。用于电子鼻装置的传感器主要由气体传感器组成,主要用来测定环境中易燃性、恶性臭味以及对人体有害气体的浓度,其中,金属氧化物半导体(MOS)型气体传感器是应用

最普遍一类。当前,电子鼻应用于实际的一个关键因素是能够获取到表示当前气体浓度的高精度的信号数据<sup>[2-6]</sup>,但是MOS气体传感器测定气体浓度时,需要用传感器内的加热阻丝对腔内的气体加热到一定温度,使得测量信号中存在大量的噪声。因此需要采用一定的方法对噪声进行预处理。

对MOS型气体传感器采集信号进行预处理,

收稿日期:2009-08-12

基金项目:国家教育部博士点基金资助项目(20060611010)

作者简介:屈剑锋(1976-),男,重庆大学博士研究生,主要从事信息处理技术、无线传感器网络等方向研究,

(Tel)13752974363;(E-mail)sxbjq@163.com。

柴毅(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)chaiyi@cqu.edu.cn。

可以采用硬件滤波和数字滤波两种方式,硬件滤波中虽然采用低通滤波器可以消除部分低频噪声,但是滤波器电路的加入又增加了其自身的器件噪声,同时受传感器及其接口电路的器件和工艺等因素的限制,当噪声幅值降低到器件和电路本身精度的极限时,要进一步提高测量精度非常困难。数字滤波技术是另一种有效的消除噪声信号的方法<sup>[2]</sup>,卡尔曼滤波是一种计算量小能够实时处理数据中噪声算法<sup>[6-10]</sup>。然而,采用卡尔曼算法滤波时,过程噪声方差和测量噪声方差,严重的影响着卡尔曼滤波器的性能,传统卡尔曼滤波器需要预先精确的过程噪声方差和测量噪声方差数值,这些数值一般是通过经验分析得到或者通过概率的方法取得其近似值。为了克服传统卡尔曼滤波算法限制,现代的研究中提出了基于新息协方差匹配原则,自适应处理噪声比例算法,基于模糊算法自适应卡尔曼滤波等改进方法,但是这些方法运算复杂,不适合实时滤波运算<sup>[10-15]</sup>。

Tian 等人在文献[16]中对 MOS 气体传感器的噪声特性进行了分析研究,表明 MOS 型气体传感器的噪声特性是一种非高斯白噪声,或者是一个直流分量加上高斯白噪声组成。针对金属氧化物型气体传感器的噪声特性,采用一种修正的自适应卡尔曼滤波对气体传感器的浓度进行在线估计。这种方法能够自适应的调整卡尔曼的参数,同时能够滤除气体传感器本身以及采样电路带来的噪声信号。

## 1 测量卡尔曼滤波模型

实际气体浓度信号经采样后的信号为  $x_1, x_2, x_3 \dots x_k$ 。

基于卡尔曼滤波算法的真实气体浓度在线的最优估计状态模型和测量模型建立

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \omega_k, \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{x}_k$  为  $n$  维状态向量;  $n$  为气体传感器的个数;  $\mathbf{x}_k$  为  $k$  时刻真实气体浓度,过程浓度随时间变化较慢,可以认为 2 个采样时刻的值相等,所以  $\mathbf{A}$  为  $n$  维单位矩阵;  $\omega_k$  为系统噪声。

测量模型通过气体传感器得到的数据  $\mathbf{y}_k$  建立

$$\mathbf{y}_k = H_k \mathbf{x}_k + \nu_k \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{y}_k$  为  $n$  维观测向量;是气体传感器测量得到数据;  $\nu_k$  为传感器导入的测量噪声;  $H_k$  为负载电压到传感器阻值的转换系数。同时,系统噪声和测量噪声具有以下特性

$$W_k = E(\omega_k \omega_k^T); E(\omega_k) = 0; \quad (3)$$

$$V_k = E(\nu_k \nu_k^T); E(\nu_k \omega_k) = 0. \quad (4)$$

记  $\hat{\mathbf{x}}_k^-$  为根据  $k$  时刻以前的气体浓度知识对第  $k$  步预先浓度估计,  $\hat{\mathbf{x}}_k$  是合并测量值  $\mathbf{y}_k$  后的得到的对第  $k$  步后期浓度估计,定义预先和后期状态估计误差为

$$e_k^- = \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k^-; \quad (5)$$

$$e_k = \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k. \quad (6)$$

预先估计误差协方差由期望值给出

$$P_k^- = E[e_k^- (e_k^-)^T]. \quad (7)$$

后期估计误差方差由期望值给出

$$P_k = E[e_k (e_k)^T]. \quad (8)$$

状态最优估计  $\hat{\mathbf{x}}_k$  可以看成成为最优预报值  $\hat{\mathbf{x}}_k^-$  与新息  $(\mathbf{y}_k - H_k \hat{\mathbf{x}}_k^-)$  的加权组合,其中权值  $K_k$  为卡尔曼增益

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + K_k (\mathbf{y}_k - H_k \hat{\mathbf{x}}_k^-), \quad (9)$$

$$K_k = P_k^- (P_k^- + V_k)^{-1} = \frac{P_k^-}{P_k^- + V_k}. \quad (10)$$

方程(9)具有明显的物理意义,式中  $\hat{\mathbf{x}}_k^-$  是真实  $x_k$  的最优预报估计,它是根据前  $k-1$  时刻的所有测量值信息得到的对于  $\mathbf{x}_k$  的最优估计,新息  $(\mathbf{y}_k - H_k \hat{\mathbf{x}}_k^-)$  是预测测量值  $\hat{\mathbf{x}}_k^-$  和实际测量值  $\mathbf{y}_k$  之间的差值,它包含了最新测量数据的信息,它根据最新的测量信息  $\mathbf{y}_k$  来对最优预报估计进行加权修正,权值为卡尔曼增益  $K_k$ 。

后期估计误差方差

$$P_k = (1 - K_k) P_k^-, \quad (11)$$

在前期估计不可靠和测量设备不确定的条件下完成后期估计和误差方差,他们被定义为权值因子  $K_k$  一个函数。

## 2 气体浓度估计算法

MOS 型气体传感器的非高斯白噪声信号是一个直流分量加上一个高斯白噪声组成,设为  $v = d + s$ ;  $d$  表示直流分量,  $s$  是高斯白噪声。

$$E(v) = d; \text{var}(v) = R. \quad (12)$$

### 2.1 测量方程的改进

建立以下测量方程

$$\mathbf{y}_k = H_k \mathbf{x}_k + d_k + s_k, \quad (13)$$

$d_k$  为噪声信号中的直流分量值,  $s_k$  高斯白噪声。

记  $\epsilon_k = \mathbf{y}_k - H_k \hat{\mathbf{x}}_k^-$ 。  $(14)$

同时,取  $k$  次采样前的一段有限数量的  $n$  次采样数据做滑窗平均运算,变量  $n$  为窗口大小。得到测量噪声的均值估计为

$$\hat{d}_k = \frac{1}{j} \sum_{n=k-j+1}^k \epsilon_n, \quad (15)$$

$$\mathbf{y}_k - \hat{d}_k = H_k \mathbf{x}_k + s_k, \quad (16)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{y}_k - \hat{d}_k, \quad (17)$$

$$\mathbf{z}_k = H_k \mathbf{x}_k + s_k. \quad (18)$$

这样非高斯噪声的卡尔曼气体浓度最优估计模型由式(1)、(18)组成。

非高斯白噪声下的新息序列和残留序列分别为

$$I_k = \mathbf{z}_k - \hat{\mathbf{x}}_k^-; \quad (19)$$

$$\epsilon_k = z_k - \hat{x}_k \quad (20)$$

为了使滤波器能够正常运行,必须在开始时首先记录  $n$  步的稳定数据,得到滤波器的参数,然后根据式(15)自适应的进行调整参数,达到自适应滤波的目的。窗口的大小影响到收敛真值的程度,越大越能逼近真值,但是太大的窗口对处理系统的资源开销以及动态变化的测量噪声方差带来影响。

### 2.2 测量噪声自适应估计

理想情况下,系统噪声方差  $W_k$  和测量噪声方差  $V_k$  都为常量。在滤波器运行前,测量误差一般情况下是通过测量设备测量得到或者实验采集用概率的方法取得固定值。然而,在实际情况中,测量噪声方差在每一步测量中和运行过程中都在发生变化,给予确定值是不恰当的,需要在线调整  $V_k$  的值。

根据式(19)可以得知  $I_k = z_k - \hat{x}_k^-$ , 根据式(4)测量噪声方差与系统噪声方差正交,即  $E(v_k(x_k - \hat{x}_k^-)) = 0$ , 得

$$E(I_k I_k^T) = E(v_k v_k^T) + H_k E((x_k - \hat{x}_k^-)(x_k - \hat{x}_k^-)^T) H_k^T \quad (21)$$

根据式(3)和(5),

$$E((x_k - \hat{x}_k^-)(x_k - \hat{x}_k^-)^T) = P_k^-; \quad (22)$$

$$E(I_k I_k^T) = E(v_k v_k^T) + H_k \hat{P}_k^- H_k^T, \quad (23)$$

$\hat{P}_k^-$  为  $P_k^-$  的估计值。

$$E(I_k I_k^T) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_k - H_k \hat{x}_k)(z_k - H_k \hat{x}_k)^T, \quad (24)$$

$$\hat{V}_k = E(v_k v_k^T), \quad (25)$$

$$\hat{V}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_k - H_k \hat{x}_k)(z_k - H_k \hat{x}_k)^T - H_k \hat{P}_k^- H_k^T. \quad (26)$$

## 3 滤波参数分析

### 3.1 增益

卡尔曼增益的定义由式(10)给出,式(9)可以看出卡尔曼增益的重要性,它确定新息  $(y_k - H_k \hat{x}_k^-)$  权值的大小。增益的大小由测量误差方差决定,当测量误差方差  $V_k$  变小时,新息  $(y_k - H_k \hat{x}_k^-)$  的权值  $K_k$  增大,当测量误差方差  $V_k$  增加时,新息  $(y_k - H_k \hat{x}_k^-)$  权值  $K_k$  减小。也就是说,当测量误差方差  $V_k$  越小时,说明传感器稳定性高,实际测量值  $y_k$  更高的可信度,预测测量值  $\hat{x}_k^-$  可信度小;当测量误差方差  $V_k$  变大时,实际测量  $y_k$  可信度减小,同预测值  $\hat{x}_k^-$  可信度提高。

### 3.2 测量误差方差 $V_k$ 和系统误差方差 $W_k$ 分析

测量误差一般情况下通过概率的方法取得其近似值而不是真实值,在建立卡尔曼滤波模型的时候需要知道系统的特性,对系统的特性研究越准确,得

到滤波器的性能越好。

变量  $\lambda$  称为噪声方差比例因子 ( $\lambda = V_k/W_k$ )。测量噪声方差可以通过在线自适应方法进行确定,而过程噪声方差很难通过直接观察的方法来测定,但是  $\lambda$  对滤波器的性能有着很大的影响。时间变量系统,可以通过更改  $\lambda$  比值来调整滤波器的系数,当  $\lambda$  接近于零,滤波器将变成低通滤波器,用于平滑滤波,当  $\lambda$  接近于无限大,将会变成一个全通滤波器,这些通过本文仿真试验说明。

## 4 测量设备

基于气体传感器的环境浓度估计的设备如图 1 示。这套设备专门开发为测试环境气体浓度,气体传感器放在气室里面,气体传感器正常运行需要一定的气体流速,真空泵用来调节气室里面气体的流速,信号处理电路放在气室外面。工作原理如下,当真空泵工作时,抽动环境气体进入气室,气室内部的气体传感器阵列感应到气味转换成模拟信号,模拟信号经过 A/D 后转换为数字信号,数字信号经过卡尔曼滤波预处理后,通过无线方式发送控制中心,供用户进行气体浓度处理分析。

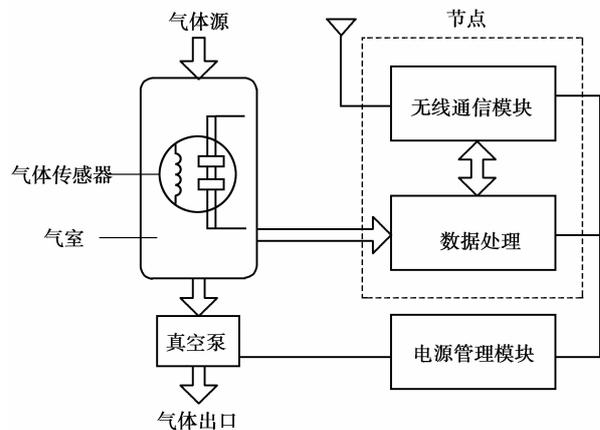


图 1 测量设备

以具有代表性的 TGS813 作为示例说明 MOS 气体传感器工作原理以及电路。TGS813 是一种电导率随着检测气体浓度变化而改变的气敏传感器。当存在能感知到的气体时,传感器的电导率随空气中气体浓度增加而增大。使用简单的电路即可将电导率的变化转换为与该气体浓度相对应的输出信号。TGS813 传感器需要施加两种电压加热器电压  $V_H$  和回路电压  $V_C$ , 由图 2 看到 Pin2 连接  $V_H$ , Pin1 和 Pin3 共同连接  $V_C$ ,  $V_H$  为维持敏感素子处于与对象气体相适应的特定温度而施加在集成的加热器上的电压。 $V_C$  则是用于测定与传感器串联的负载电阻  $R_L$  上的两端电压  $V_L$ 。假如  $V_C$  选择足够恰当,传感器的输出信号足够大足够就可以满足测量电压的需要,为了使得传感器的输出与 A/D 转换器

之间阻抗匹配,在它们之间加入一个电压跟随电路,同时,在传感器输出与 A/D 输入之间实现缓冲和隔离外界干扰的作用。

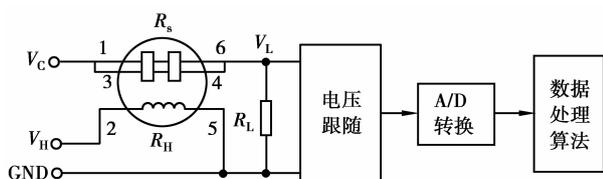


图 2 电子鼻及其电路

负载电阻  $V_{RL}$  到传感器电阻比转换公式

$$R_s = \left( \frac{V_c}{V_L} - 1 \right) \times R_L,$$

$$K = R_s / R_0.$$

$R_0$  为气体浓度在 1 000 PPM 时的阻值,根据  $K$  为传感器电阻比,根据  $K$  值查浓度曲线表即可得到浓度值。

### 5 实验结果及其分析

使用环境气味测量设备采集气味浓度运行大约 500 min,同步取得乙醇气体浓度原始测量值,采用不同  $\lambda$  值执行滤波处理,确定改变参数  $\lambda$  值对滤波效果的影响。正如所期待的,原始数据震动幅值明显大于过滤后的数据,其中横坐标表示采样时间,纵坐标表示传感器电阻比( $K$  值)。

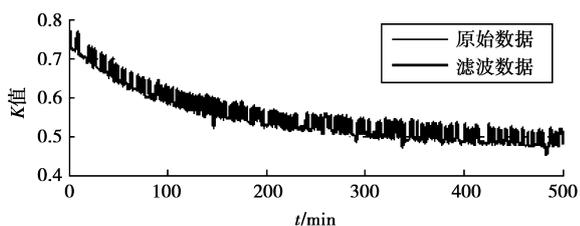


图 3  $\lambda=0.1$  时滤波曲线图

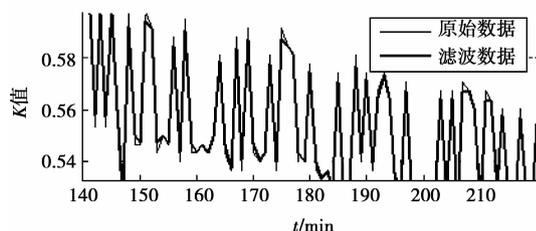


图 4  $\lambda=0.1$  时滤波曲线放大图

观察图 3 当  $\lambda=0.1$  滤波效果剧烈震荡,滤波后的结果与原始数据几乎重合,没有达到滤波的效果,图 4 是图 3 中从 140~220 时刻的局部放大图。

当  $\lambda=1$ (见图 5)和  $\lambda=10$ (见图 6)时滤波后的数据结果虽然比  $\lambda=0.1$  的时候的结果要平滑,但是曲线震荡依旧存在。

当  $\lambda=1\ 000$ (见图 7)滤波后的数据结果过于平滑不能表达曲线的特性,而且在 0~100 数据段出现严重的滞后拖尾,不能实现实时的数据滤波。

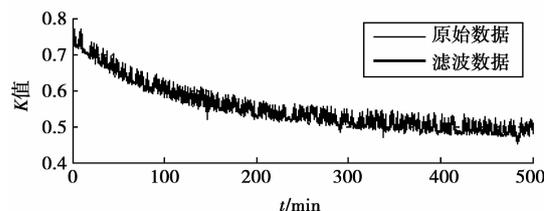


图 5  $\lambda=1$  时滤波曲线图

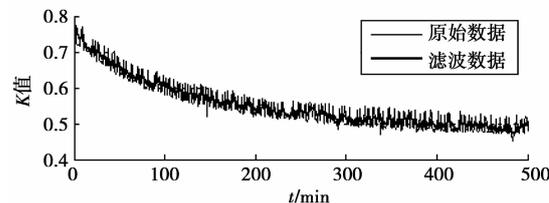


图 6  $\lambda=10$  时滤波曲线图

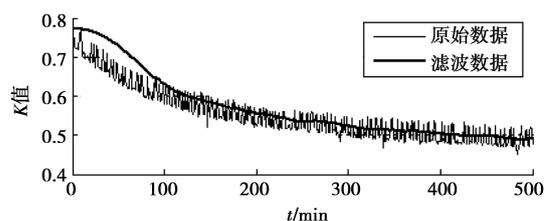


图 7  $\lambda=1\ 000$  时滤波曲线图

当  $\lambda=100$ (见图 8)时滤波后的结果能实时表达曲线特性,而且没有产生滞后拖尾现象。

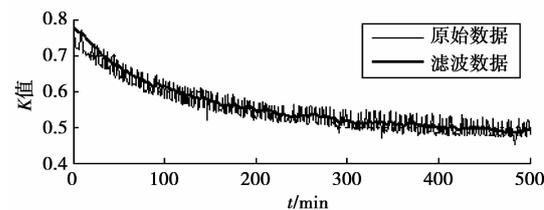


图 8  $\lambda=100$  时滤波曲线图

图 9 为测量噪声方差实时估计值,可以看到  $V_k$  在随着时间的推移发生着改变,而且从开始的振荡趋向于平滑稳定。

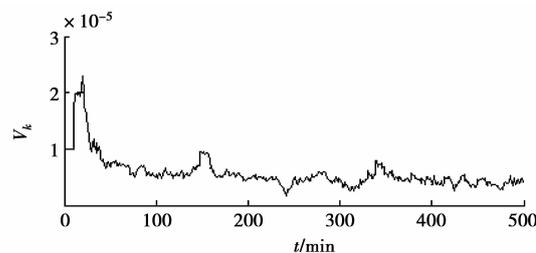


图 9  $\lambda=100$  时测量噪声方差实时估计值

而且经过一系列的实验结果显示,对于不同的气体传感器由于其使用寿命,制造工艺等方面的个体差异,需要适当的调整  $\lambda$  的取值,一般地,当  $\lambda$  取值在 100~200 之间时滤波效果良好。

### 6 结 论

介绍一种基于修正卡尔曼滤波理论的气体浓度

精确估计方法,在气体传感器测量不确定的基础上,从噪声统计和系统参数不确定的角度去考虑,利用测量值不断对浓度状态值进行修正,结合标准卡尔曼滤波和噪声参数自适应估计算法构成的修正卡尔曼滤波理论,可以有效的解决测量噪声和系统带来的不确定性问题。

使用介绍的由 MOS 型气体传感器,气体测量设备等组成硬件设备进行实验,在信号处理模块建立模型形成测量方程和气体浓度状态方程,然后利用修正卡尔曼滤波算法进行处理。利用实验采集数据采用修正卡尔曼滤波时,确定了测量误差方差与系统误差方差的比值  $\lambda$  取 100~200 之间时,滤波效果达到最优。

#### 参考文献:

- [1] WANG L, SU S W, CELLER B G, et al. Modeling of a gas concentration measurement system [C]// Proceedings of the 27th Annual International Conference of the IEEE EMBS, September 1-4, 2005 Shanghai, China. [S. l]: IEEE, 2005: 6695-6698.
- [2] HINES E L, LLOBET E, GARDNER J W. Electronic noses: a review of signal processing techniques [J]. IEE Proceedings Circuits, Devices & Systems, 1999, 146 (6): 297-310.
- [3] OKAJIMA H, KAKUMA S, UCHIDA K, et al. Measurement of methane gas concentration using an infrared LED [C]// International Joint Conference (SICE-ICASE), Oct, 18-21, 2006, Bexco, Busan, Korea. [S. l]: IEEE, 2006: 1652-1655.
- [4] NI N, CHAN C C. Improvement of the measurement accuracy of HCN gas sensor by using digital signal processing technique [C]// International Quantum Electronics Conference 2005 and the Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), Aug, 30-02, 2005, Tokyo, Japan. [S. l]: IEEE, 2005: 1176-1178.
- [5] GAO D Q, CHEN W. Simultaneous estimation of odor classes and concentrations using an electronic nose with function approximation model ensembles [J]. Sensors and Actuators, 2007, 120 (2): 584-594
- [6] LELEUX D P, CLAPS R, CHEN W, et al. Applications of Kalman filtering to real-time trace gas concentration measurements [J]. Applied Physics B Lasers and Optics, 2002, 74 (1): 85-93.
- [7] AVENDANO L E, CASTLLANOS C G, FERRERO J M. Spectrum estimation and adaptive de-noising of electrocardiographic signals using Kalman filters [C]// Proceeding of the 33rd Annual International Conference on Computers in Cardiology, Sep. 17-20, 2006, Valencia, Spain. [S. l]: IEEE, 2006: 925-928.
- [8] 侯青剑, 缪栋, 彭云辉. 卡尔曼滤波在激光陀螺信号处理中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2005, 13(11): 1287-1288.
- HOU QING-JIAN, MIAO DONG, PENG YUN-HUI. Application of Kalman filter in processing laser gyro signal [J]. Computer Measurement & Control, 2005, 13(11): 1287-1288.
- [9] 陈晓荣, 蔡萍, 陈淑芬, 等. 卡尔曼滤波在激光跟踪测量系统中的应用 [J]. 光学技术, 2004, 30(1): 98-100.
- CHEN XIAO-RONG, CAI-PING, CHEN SHI-FEN, et al. Application of Kalman filter in laser tracking measurement system [J]. Optical Technique, 2004, 30(1): 98-100.
- [10] 陈蕾, 刘立龙, 陈东银. 自适应卡尔曼滤波法用于变形监测数据处理 [J]. 测绘工程, 2008, 17(1): 48-54.
- CHEN LEI, LIU LI-LONG, CHEN DONG-YIN. Application of adaptive Kalman filter method to the data processing of deformation monitoring [J]. Engineering Of Surveying and Mapping, 2008, 17(1): 48-54.
- [11] 马野, 王孝通, 付建国. 基于模糊卡尔曼滤波量测噪声自适应校正的方法研究 [J]. 中国惯性技术学报, 2005, 13(2): 24-26.
- MA YE, WANG XIAO-TONG, FU JIAN-GUO. Adaptive adjustment based on measurement noise of fuzzy Kalman filtering [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2005, 13(2): 24-26.
- [12] 焦成柱, 刘国庆, 章俊. 一类线性系统卡尔曼滤波器自适应算法 [J]. 南京工业大学学报: 自然科学版, 2007, 29(4): 30-33.
- JIAO CHENG-ZHU, LIU GUO-QING, ZHANG JUN. Research on the self-adaptive algorithm of the first type Kalman filter in linear system [J]. Journal of Nanjing University of Technology: Natural Science Edition, 2007, 29(4): 30-33.
- [13] 赵长胜, 陶本藻. 有色噪声作用下的抗差卡尔曼滤波 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2007, 32(10): 880-882.
- ZHAO CHANG-SHENG, TAO BEN-ZAO. Robust Kalman filtering of linear system with colored noises [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(10): 880-882.
- [14] 熊伟, 陈立奎, 何友, 等. 有色噪声下的不敏卡尔曼滤波器 [J]. 电子与信息学报, 2007, 29(3): 598-600.
- XIONG WEI, CHEN LI-KUI, HE YOU, et al. Unscented Kalman filter with colored noise [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(3): 598-600.
- [15] XIONG S S, ZHOU Z Y, ZHONG L M, et al. Adaptive filtering of color noise using the Kalman filter algorithm [C]// Proceedings of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC), May. 1-5, 2000, Baltimore, Maryland, USA. [S. l]: IEEE, 2000: 1009-1012.
- [16] TIAN F, YANG S X, DONG K. Circuit and noise analysis of odorant gas sensors in an e-nose [J]. Sensors, 2005, 5(1/2): 85-96.

(编辑 侯湘)

文章编号:1000-582X(2009)12-1461-05

## 计及输电阻塞的发电公司最优竞价模型

张 谦,俞集辉,李春燕

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400030)

**摘 要:**为了实现电力市场环境下发电公司最优竞价,根据对市场内其他机组报价系数的预测,建立计及竞争对手报价的发电公司竞价模型,求取未计及输电容量约束时的最优竞价系数。建立市场出清模型,计算各机组出力期望值,根据上述期望值进行潮流计算。当预测有输电阻塞发生时,将输电阻塞对电力公司竞价策略的影响引入竞价模型中,并基于灵敏度分析以阻塞费用最小为目标确定发电公司出力调整量。通过 Matlab 仿真分析表明,采取上述方法得到的最优竞价系数进行报价时,能实现发电公司利润最大化的目标。

**关键词:**发电公司;竞价模型;输电网络计算;输电阻塞;灵敏度分析

**中图分类号:**TM732

**文献标志码:**A

## Optimal bidding models of power plants considering transmission congestion

ZHANG Qian, YU Ji-hui, LI Chun-yan

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** In order to achieve optimal bidding strategy of power plants in electricity market, the authors build optimal bidding model by predicting the bidding coefficients of competitors, and the optimal bidding coefficient without considering transmission capacity is achieved. Based on the bidding coefficients, the market clearing model is built, and the expected market clearing price is achieved. According to the expected values, the authors calculate the power flow. When forecasting the transmission congestion, this paper presents an optimal bidding model taking transmission congestion into account. Based on sensitivity analysis, the output regulation of power plants with minimum cost of eliminating congestion is achieved. Simulation results demonstrate that the proposed method can help power plants achieve the optimal profit.

**Key words:** power plants; bidding model; transmission network calculations; transmission congestion; sensitivity analysis

随着电力市场改革的推进,如何建立最优的竞价策略已经成为各个发电公司最为关心的问题。因此,电力市场环境下,发电公司的最优竞价策略已成

为近几年来国内外研究热点之一。文献[1]对此做了比较详细的综述。目前,对发电公司竞价策略的研究成果已有很多,大体可以分为 3 个方面:(1)基

收稿日期:2009-07-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50777067)

作者简介:张 谦(1980-),女,重庆大学讲师,博士研究生,主要从事电力市场、电力工程与优化技术方向研究,  
(E-mail)zhangq411@163.com。