

文章编号: 1672-2892(2011)03-0393-06

基于加权递推滤波模糊算法的工艺风力控制

尹嘉娃¹, 戴石良¹, 张振峰¹, 马 臣², 何广言³

(1.南华大学 衡阳三力高科技开发公司, 湖南 衡阳 421001; 2.青岛卷烟厂, 山东 青岛 266061; 3.郴州卷烟厂, 湖南 郴州 423000)

摘 要: 针对工艺风力控制系统存在的问题, 提出了一种新的模糊控制算法。该算法采用离线计算与在线查表结合加权递推平均滤波的方式, 运算量小, 既具有传统比例—积分—微分(PID)的控制经验的优点, 也有模糊控制的自适应性, 还能克服输出模糊量变化时控制量的跳变。通过实践证明, 该算法具有响应快、超调小、稳态精确度高、抗干扰和自适应能力强等优点, 并明显减少了风压和流量的超调量以及调节时间, 降低超调量至少 1.2%, 减少调节时间至少 1.3 s, 对于工程技术人员如何利用 PLC 实现高级控制方法具有较好的指导意义。

关键词: 工艺风力; 模糊控制; 加权滤波; 可编程序控制器; 结构化控制语言

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

Control of centralized-air-supplying based on weighted recursive filter fuzzy algorithm

YIN Jia-wa¹, DAI Shi-liang¹, ZHANG Zhen-feng¹, MA Chen², HE Guang-yan³

(1.Sunny High-Tech R&D Company, Nanhua University, Hengyang Hunan 421001, China; 2.Qingdao Cigarette Factory, Qingdao Shandong 266061, China; 3.Chenzhou Cigarette Factory, Chenzhou Hunan 423000, China)

Abstract: According to the problems existing in the control of centralized air supplying system, a new fuzzy algorithm is presented in this paper. The algorithm adopts offline computation, online lookup table and the weighted recursive average filter algorithm, which has small computation amount. It bears not only the traditional PID experiences, but also the self-adaptive characteristic of fuzzy control. It can solve the problem of the jumping of control system when the fuzzy output changes. The practice proves that this algorithm offers many advantages including rapid response, small overshoot, high accuracy, and strong ability of anti-jamming and self-adaptation, etc. The undulation and the adjust time of the pressure and flow have been decreased obviously. The undulation has been decreased over 1.2%, and the adjust time has been decreased over 1.3 s. It is useful for realizing senior technique of control with PLC in the field of industry.

Key words: centralized air supplying; fuzzy-control; weighted filter; Programmable Logic Controller (PLC); Structured Control Language(SCL)

卷接机组的工艺风力是指通过负压风机产生的负压, 为卷烟过程中的送丝、除尘以及在接咀等过程提供动力, 以实现烟丝的输送、烟丝粉尘的吸除以及烟支与咀棒的接合等工艺过程。每台机组的风路支管以并联的方式接入风力总管, 工艺风力参数按卷接机组本身的工艺要求及其数量来设定^[1-3]。

可编程序控制器(PLC)具有优越的实时性、高度的可靠性和面向工业控制对象等特点, 因而工艺风力控制系统中采用 PLC 不失为一种合理选择。工艺风力控制系统是一种非线性、时变大、强耦合的多变量系统^[1-3]。目前, 工艺风力普遍采用 PID 控制器进行控制, PID 参数整定值往往凭经验给定, 不容易达到系统最好的控制效果。将智能控制理论应用于工艺风力控制, 不需求解系统复杂的数学模型, 可以取得较好的控制效果。然而 PLC 在实现复杂控制算法时, 开发工作量大, 因此, 用 PLC 实现先进控制算法仍然是控制领域的一个难点^[4-6]。针对以上情况, 本文提出了一种新的模糊算法, 它是建立在模糊查询表的基础上, 结合加权递推平均滤波法的优势, 再应

用数学插值的方法来实现的。其算法简单明了，运算量小，完全能够在 PLC 上加以实现，使工艺风力的控制精确度达到满意的效果。

1 加权滤波模糊算法的设计思想

模糊控制利用隶属函数和模糊合成法则思想，巧妙地综合了人们的直觉经验，模拟人的思维决策过程来选择控制规则和策略，从而基本上摆脱了对控制对象数学模型的严重依赖，并且由于其控制规则本质上是非线性的，对过程参数变化不灵敏，鲁棒性好，这些优点使得它在一些传统控制理论不太奏效的场合，能取得令人满意的控制效果^[4-7]，因此在工业过程控制中得到了越来越广泛的应用。

1.1 加权滤波模糊控制的基本原理

加权滤波模糊控制的基本原理如图 1 所示。

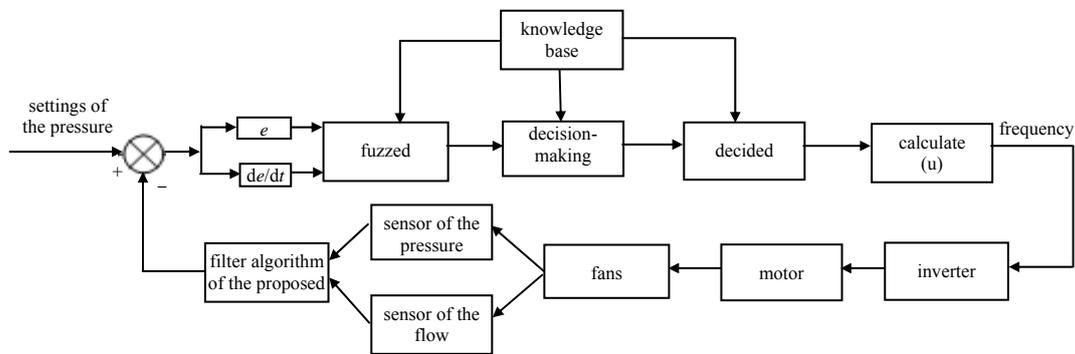


Fig.1 Block scheme of the proposed algorithm
图 1 加权滤波模糊控制原理图

1.2 模糊控制的实现

本文的模糊控制方法是经典的二维模糊控制，需要设计一个双输入单输出的模糊控制器^[4-7]。

如图 1 所示，模糊变量为：误差 e ，误差变化率 de/dt 和控制量 u ，在模糊控制规则表和查询表中分别表示为 E, EC 和 U 。取 $e, \Delta e$ 以及 u 的论域为 $[-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6]$ ，其模糊集合都为： $[NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB]$ ，隶属度函数取高斯函数 $\mu_E(x) = e^{-(x-a)^2/b^2}$ 。

根据工艺风力系统的具体要求，结合各参考文献及众多专家和长期工作在生产一线的工程师的实际经验，总结出工艺风力系统风压的模糊控制规则表，见表 1。然后，通过离线计算获得模糊查询表，实际应用时通过查表的方法获得系统的控制输出。

在使用查表法实现模糊控制时，首先要将输入的精确定量转换到模糊量各自的论域之中，为了实现查表功能，还需要将经过尺度变换得到的值经过四舍五入变为整数量，这就是量化功能。

变量在系统中的实际变化范围称为基本论域，

具有清晰性。基本论域和语言变量模糊状态的论域往往不一致^[7]，因此必须引入相应的变化因子，以完成所需的运算和控制。

本文定义 4 个比例因子，分别为误差变换因子 $K1$ ，误差变化率因子 $K2$ ，输出量变换因子 $K3$ ，为了实现查表，需要将论域中的 $[-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6]$ 变为 $[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]$ ， $K4$ 为查表变换因子。

有关离线计算的内容本文中省略，请参考文献^[4-7]等相关资料，本文只给出计算后得到的模糊控制查询表，如表 2 所示。因电机采用变频控制，表 2 中计算所得值均为调节电机转速所需的频率变化值，实际控制中，需要在前一时刻的控制量基础上加上该值。

表 1 工艺风力控制系统模糊控制规则表

Table1 Fuzzy control rules

| | | EC | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | | NB | NM | NS | ZE | PS | PM | PB |
| E | U | | | | | | | |
| | NB | NB | NB | NB | NB | NS | NS | ZE |
| | NM | NB | NB | NS | ZE | ZE | ZE | PS |
| | NS | NB | NS | ZE | ZE | ZE | PS | PS |
| | ZE | NB | NS | ZE | ZE | ZE | PS | PS |
| | PS | NS | NS | ZE | ZE | ZE | PS | PB |
| | PM | NS | ZE | ZE | ZE | PS | PB | PB |
| PB | ZE | PS | PS | PB | PB | PB | PB | |

表2 工艺风力控制系统模糊控制查询表
Table2 Fuzzy control query

| E | EC | | | | | | | | | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | -6 | -5 | -4 | -3 | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| -6 | -3.50 | -3.50 | -3.49 | -3.49 | -3.45 | -3.29 | -2.95 | -2.46 | -1.88 | -1.30 | -0.76 | -0.35 | -0.11 |
| -5 | -3.39 | -3.39 | -3.38 | -3.37 | -3.32 | -3.15 | -2.80 | -2.32 | -1.76 | -1.18 | -0.65 | -0.24 | 0.01 |
| -4 | -3.18 | -3.18 | -3.16 | -3.13 | -3.04 | -2.84 | -2.48 | -2.00 | -1.46 | -0.90 | -0.37 | 0.03 | 0.25 |
| -3 | -2.93 | -2.91 | -2.87 | -2.78 | -2.63 | -2.38 | -2.00 | -1.52 | -0.97 | -0.41 | 0.11 | 0.48 | 0.68 |
| -2 | -2.71 | -2.67 | -2.56 | -2.38 | -2.12 | -1.81 | -1.43 | -0.94 | -0.37 | 0.22 | 0.72 | 1.06 | 1.23 |
| -1 | -2.50 | -2.43 | -2.24 | -1.93 | -1.55 | -1.15 | -0.75 | -0.29 | 0.28 | 0.87 | 1.35 | 1.64 | 1.77 |
| 0 | -2.20 | -2.10 | -1.86 | -1.44 | -0.93 | -0.43 | 0 | 0.43 | 0.93 | 1.44 | 1.86 | 2.10 | 2.20 |
| 1 | -1.77 | -1.64 | -1.35 | -0.87 | -0.28 | 0.29 | 0.75 | 1.15 | 1.55 | 1.93 | 2.24 | 2.43 | 2.50 |
| 2 | -1.23 | -1.06 | -0.72 | -0.22 | 0.37 | 0.94 | 1.43 | 1.81 | 2.12 | 2.38 | 2.56 | 2.67 | 2.71 |
| 3 | -0.68 | -0.48 | -0.11 | 0.41 | 0.97 | 1.52 | 2.00 | 2.38 | 2.63 | 2.78 | 2.87 | 2.91 | 2.93 |
| 4 | -0.25 | -0.03 | 0.37 | 0.90 | 1.46 | 2.00 | 2.48 | 2.84 | 3.04 | 3.13 | 3.16 | 3.18 | 3.18 |
| 5 | 0.01 | 0.24 | 0.65 | 1.18 | 1.76 | 2.32 | 2.80 | 3.15 | 3.32 | 3.37 | 3.38 | 3.39 | 3.39 |
| 6 | 0.11 | 0.35 | 0.76 | 1.30 | 1.88 | 2.46 | 2.95 | 3.29 | 3.45 | 3.49 | 3.49 | 3.50 | 3.50 |

1.3 加权递推平均滤波法

由于算术平均滤波和去极值平均滤波均存在平滑性和灵敏性的矛盾, 采样次数太少, 平滑效果差; 采样次数太多, 灵敏度下降, 对参数的变化趋势不敏感^[8-10]。为协调两者的关系, 采用加权递推平均滤波法, 即对连续 N 次采样值分别乘上不同的加权系数之后再求累加和。加权系数一般先小后大, 以突出后面若干采样的效果, 加强系统对参数变化趋势的辨识。各个加权系数均应是小于 1 的小数, 且满足总和等于 1 的约束条件, 这样, 加权运算之后的累加和即为有效采样值。

加权递推平均滤波法适用于有较大纯滞后时间常数的对象和采样周期较短的系统, 比如工艺风力系统。但对于纯滞后时间常数较小、采样周期较长、变化缓慢的信号的系统则滤波效果差。

1.4 线性插值法

当模糊控制器将实际的连续模拟输入量模糊化时, 会造成大量的信息损失; 其次, 这类控制器在清晰化时, 由于前后 2 个模糊量之间是离散的, 输出的控制量必然会产生一个跃变, 使得控制器的模拟量输出也产生跃变。这种不断的跳变对控制对象可能会产生不良后果。为进一步改善系统性能, 引入线性插值法, 使模糊化和清晰化的值都能够连续地按线性变化, 从而有效地改善系统的控制性能。

线性插值如式(1)所示:

$$Y(X) = Y_i + (Y_{i+1} - Y_i) \frac{X - X_i}{X_{i+1} - X_i} \tag{1}$$

式中假设 X_i, X_{i+1} 是相邻两自变量的模糊值; Y_i, Y_{i+1} 是与之对应的因变量模糊值, 则可将 $\frac{(X - X_i)}{(X_{i+1} - X_i)}$ 看作是 X 对 X_{i+1} 的隶属度, 如式(2)所示:

$$A_{i+1}(X) = \frac{X - X_i}{X_{i+1} - X_i} \tag{2}$$

于是, 式(1)可变为

$$Y(X) = Y_i + (Y_{i+1} - Y_i) A_{i+1}(X) \tag{3}$$

对于表 2 所示的控制量查询表, 设两输入变量的量化值 $E(t) \in [E_i, E_{i+1}]$, 而 $EC(t) \in [EC_j, EC_{j+1}]$, 则控制量 $U(t)$ 可根据式(3)导出的插值算法计算出来:

$$U_1(t) = U_{ij} + (U_{i+1,j} - U_{ij}) A_{i+1}(E) \tag{4}$$

$$U_2(t) = U_{i,j+1} + (U_{i+1,j+1} - U_{i,j+1}) A_{i+1}(E) \tag{5}$$

$$U(t) = U_1(t)[U_2(t) - U_1(t)] A_{j+1}(EC) \tag{6}$$

式中:

$$A_{i+1}(E) = \frac{E(t) - E_i}{E_{i+1} - E_i} \tag{7}$$

$$A_{j+1}(EC) = \frac{EC(t) - EC_j}{EC_{j+1} - EC_j} \tag{8}$$

2 算法的实现

在湖南某卷烟厂采用该算法实现了工艺风力的控制。实际控制系统中,采用西门子 S7-300 系列的 CPU315-2 DP PLC 作为控制系统的核心,由于在 PLC 上实现复杂控制算法时,使用常用的梯形图或语句表语言开发工作量很大,因此,本文采用高级语言——结构化控制语言实现该算法,增强了算法的可读性和可移植性等,提高了开发效率。

首先,建立控制算法所需的 DB 块 DB300,将模糊控制查询表中的内容写入 DB300 中保存,以备查表使用。然后,建立实现控制算法的功能 FC300,具体实现如下:

```
FUNCTION FC300:VOID
VAR_INPUT
    In_Set:REAL;      //设置值
    In_Get:REAL;      //实际值
    E_Percent:REAL;   //误差限 (%)
    In_Control:REAL;  //控制量
END_VAR
VAR_OUTPUT
    OutPut:REAL;      //输出值
END_VAR
IF In_Get<(In_Set+In_Set*E_Percent) AND In_Get>(In_Set-In_Set*E_Percent) THEN
    RETURN;
END_IF;
Time_E:=TIME_TCK()-Time_Old;           //获取时间差
E:=In_Set-In_Get;                       //求取误差
ED:=(E-E_Old)/DINT_TO_REAL(TIME_TO_DINT(Time_E)); //求取误差变化率
Time_Old:=Time_E;                       //存储时间值
E_Old:=E;                                //存储误差值
Row:=DINT_TO_INT(REAL_TO_DINT(E/K_E))+7; //求取行列值, 偏移为 7
Colum:=DINT_TO_INT(REAL_TO_DINT(ED/K_ED))+7;
DB300.Fuz_Control_Value:=In_Control+K_U*DB300.Fuzzy_Control[Row,Colum]; //输出值
```

最后,在 OB1 或者 OB35 中调用 FC300,根据实际系统的运行情况,进行参数的调整即可。

3 算法的使用效果及分析

该卷烟厂共有 3 个工艺风力系统,每个系统均由 1 台高压离心大风机作为风力供给、除尘的动力源,整个系统处于负压工作状态。风机采用变频调速,主风管上设置压力传感器,根据系统风压变化,自动调节风机转速,要求每个系统都能保证风力的稳定性和可靠性。每个系统的基本指标要求如表 3 所示。

为验证算法的有效性和可靠性,分别采用了 PID 算法和加权滤波模糊算法进行工艺风力的控制:将风压设定为 $-11\ 000\ \text{Pa}$,流量设定为 $17\ 000\ \text{m}^3/\text{h}^{[1]}$,在机台全部工作的情况下,100 s 时对某些机台进行关机操作,200 s 时对某些机台进行开机操作,任意采集 1 个系统的性能数据,对结果进行比较和分析,如图 2~图 3 所示。

对于工艺风力系统来说,其最主要的性能指标就是压力和流量的波动范围,这 2 个性能将直接影响到系统的稳定性、生产工艺的可靠性以及烟支质量的合格率等^[1-3]。

综上所述,根据系统的性能指标及生产的具体要求,对所得的数据进行比较和分析,结果如表 4 所示。从表 4 的比较结果可以得出,2 种控制方式均能达到生产的指标要求,但加权滤波模糊算法控制效果明显优

表 3 系统基本指标

| performance | target |
|--|--------|
| undulation of the pressure/(%) | ±3 |
| undulation of the flow/(%) | ±4 |
| adjust time when startup/s | 4 |
| adjust time when stopping/s | 4 |
| overtaking of the pressure when startup/(%) | 5 |
| overtaking of the pressure when stopping/(%) | 5 |

表 4 不同算法控制效果比较

| performance | PID | proposed algorithm |
|--|------|--------------------|
| undulation of the pressure/(%) | ±2.9 | ±1.5 |
| undulation of the flow/(%) | ±3.5 | ±2.3 |
| adjust time when startup/s | 3 | 2 |
| adjust time when stopping/s | 3 | 2 |
| overtaking of the pressure when startup/(%) | 3.9 | 2.6 |
| overtaking of the pressure when stopping/(%) | 4.5 | 3.0 |

于 PID 算法: 加权滤波模糊控制对压力变化和流量变化具有较好的控制效果, 系统稳态性得到了较大改善, 响应时间大大减少, 跟踪性能好, 过渡平稳, 超调也明显变小, 系统能够较快地进入稳定状态。

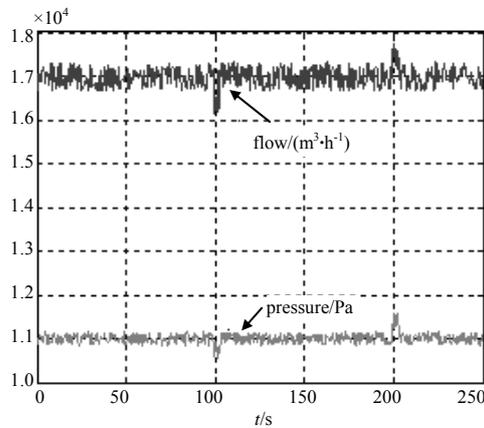


Fig.2 Effect of the PID algorithm
图2 PID算法控制效果图

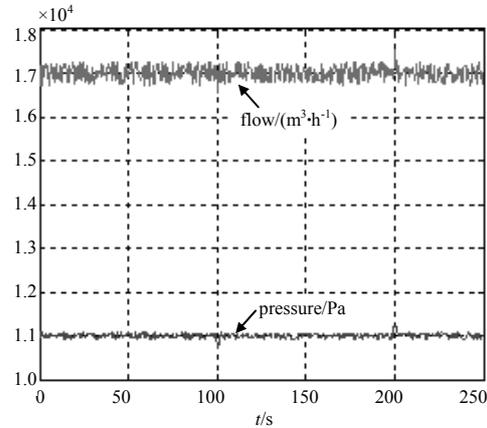


Fig.3 Effect of the proposed algorithm
图3 加权滤波模糊算法控制效果图

4 结论

1) 本文探讨了如何在 PLC 上实现有效的模糊控制, 是对如何将高级控制算法应用于 PLC 中的有益尝试, 对于此类应用具有较好的指导意义。

2) 加权滤波模糊算法既具有传统 PID 的控制经验, 也有模糊控制的自适应性, 可以克服传统控制大滞后性和数学模型难以建立的缺点。

3) 在实际应用中, 该算法只需要进行简单的查表和插值运算, 运算量小, 工艺风力的各指标性能变化显示了较好的控制效果: 系统稳态性能得到了较大的改善, 响应时间减少, 跟踪性能好, 过渡过程平稳, 系统的超调也变小了, 较快进入稳定状态。可见该算法完全适用于通常的多变量耦合的生产过程控制, 具有很好的实用价值。

参考文献:

- [1] 汪洋. 风力与卷烟工艺关系的实验研究[J]. 湖南科技学院学报, 2005,26(7):272-276. (WANG Yang. Experimental Study of the Relationship between Air Supply and Cigarette Making Technology[J]. Journal of Hunan University of Science and Engineering, 2005,26(7):272-276.)
- [2] 戴石良,李国荣,袁国安,等. 卷接机组风力集中供给方式的研究与应用[J]. 烟草科技, 2004(10):10-12. (DAI Shiliang, LI Guorong, YUAN Guoan, et al. Study and Application of Centralized Air Supplying Systems for Cigarette Makers[J]. Tobacco Science, 2004(10):10-12.)
- [3] 张雄. 卷烟厂风力送丝系统输送风速稳定性分析与控制研究[D]. 湖南:南华大学, 2006. (ZHANG Xiong. Air velocity stability analysis and control studies of wind power system in cigarette factory[D]. Hunan:Nanhua University, 2006.)
- [4] Yousef H, Hamdy M, El-Madbouly E. Robust adaptive fuzzy semi-decentralized control for a class of large-scale nonlinear systems using input-output linearization concept[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2010,20(1):27-40.
- [5] Rehan Sadiq, Solomon Tesfamariam. Developing environmental indices using fuzzy numbers ordered weighted averaging (FN-OWA) operators[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2008,22(4):495-505.
- [6] Alberto A A-L, Guillermo C R, Blanca E G S, et al. Optimal Design of Multiproduct Batch Plants under Imprecise Demand[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2008,5317:418-428.
- [7] 王耀南. 智能信息处理技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2003. (WANG Yaonan. Intelligent information processing technology[M]. Beijing:Higher Education Press, 2003.)
- [8] 罗凌,林岩. 基于多智体的城市区域交通模糊控制[J]. 信息与电子工程, 2008,6(2):141-145. (LUO Ling, LIN Yan. Fuzzy Control for Urban Region Traffic Based on Multi-agent[J]. Information and Electronic Engineering, 2008,6(2):141-145.)
- [9] 耿妍,张端金. 自适应滤波算法综述[J]. 信息与电子工程, 2008,6(4):315-320. (GENG Yan, ZHANG Duanjin. Survey of Adaptive Filtering Algorithms[J]. Information and Electronic Engineering, 2008,6(4):315-320.)
- [10] 郑海啸,刘珩. 基于自适应滤波的噪声抵消法[J]. 信息与电子工程, 2007,5(6):444-448. (ZHENG Haixiao, LIU Heng. Noise Cancellation Based on Adaptive Filter[J]. Information and Electronic Engineering, 2007,5(6):444-448.)

作者简介:



尹嘉娃(1982-),男,湖南省衡阳市人,硕士,工程师,主要从事工艺风力与风力除尘系统、智能控制、高级过程控制等方面的研究工作.email:arctic012@163.com.

马 臣(1969-),男,山东省青岛市人,工程师,主要从事卷烟厂制丝除尘、卷接除尘及风力送丝的自控研究、设计和管理等工作。

戴石良(1964-),男,长沙市人,博士,研究员,硕士生导师,主要从事工业通风除尘、气力输送及中央空调技术的研究等。

张振峰(1973-),男,湖南省衡阳市人,工程师,主要从事卷烟厂制丝除尘、卷烟除尘及风力送丝的自控研究和设计等工作。

何广言(1969-),男,湖南省郴州市人,工程师,主要从事卷烟厂制丝除尘、卷接除尘及风力送丝的自控研究、设计和管理等工作。

(上接第 372 页)

- [8] Rabbat M, Nowak R. Distributed optimization in sensor networks[C]// Proc.3rd Int. Symp. Information Processing Sensor Networks. Berkeley,CA:ACM Press, 2004:20-27.
- [9] Lawrence E Kinsler, Austin R Frey, Alan B Coppens, et al. Fundamentals of Acoustics[M]. New York:Wiley, 1982.
- [10] Bertsekas D P, Tsitsiklis J N. Parallel and Distributed Computation:Numerical Methods[M]. 2nd ed. Belmont,MA:Athena Scientific, 1999.
- [11] Schizas I D, Ribeiro A, Giannakis G B. Consensus in ad hoc WSNs with noisy links-Part I:Distributed estimation of deterministic signals[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2008,56(1):350-364.

作者简介:



施爱春(1986-),男,江苏省大丰市人,在读硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络.email:082021026@fudan.edu.cn.

李 甲(1974-),男,山东人,在读博士研究生,研究方向为智能信号处理,已发表论文2篇,email:jjiali@mails.gucas.ac.cn.

胡 波(1968-),男,江苏省常州市人,博士,博士生导师,教授,主要研究方向为数字信号处理、数字通信和数字系统设计。