

# 基于类前馈解耦的双模糊控制在电站锅炉燃烧系统的仿真研究

张聪彪, 杨巨生

(太原理工大学 电气与动力工程学院, 太原 030024)

**摘要:** 为了进一步提高目前电站锅炉燃烧系统的控制性能, 在分析了某亚临界炉燃烧系统动态特性与影响因素的基础上, 将各回路主控制器采用可以适时调整控制器参数的模糊自适应 PID 控制器, 并且根据前馈补偿解耦原理在各耦合回路间增加类前馈补偿的模糊解耦控制器来实现全新的燃烧系统优化设计; 通过 MATLAB 仿真表明, 采用文章提出的双模糊控制策略相比常规的模糊自适应 PID 控制, 响应时间缩短了 45.2%, 超调量降低了 53.6%, 调节时间减少了 32.7%, 鲁棒性增强, 控制性能有了很大提升。

**关键词:** 锅炉燃烧; 模糊 PID; 模糊解耦; MATLAB 仿真

## Double Fuzzy Control in Power Plant Boiler Combustion System Simulation Research Based on Similar Feedforward Decoupling

Zhang Congbiao, Yang Jusheng

(College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** In order to further improve the control performance of the power plant boiler combustion system, based on the analysis of the dynamic characteristics and influencing factors of a subcritical boiler combustion system, a new combustion system optimization design has been presented, the method got the fuzzy adaptive PID controller which can timely adjust the controller parameters as the main controller of each circuit adopts, in addition, according to the principle of feedforward compensation, the method also added a similar feedforward decoupling fuzzy controller between the coupling circuits. The MATLAB simulation result shows that the proposed double fuzzy control strategy compared with the conventional fuzzy adaptive PID control, response time shortened by 45.2%, overshoot amount was reduced by 53.6%, the regulating time reduced by 32.7%, enhanced the robustness, the control performance was greatly improved.

**Keywords:** boiler combustion; fuzzy PID; fuzzy decoupling; MATLAB simulation

### 0 引言

对于电站锅炉燃烧过程来说, 由于控制变量的强耦合, 非线性以及大滞后性, 在实际生产过程中通常将系统简化为燃料量控制、送风量控制和引风量控制 3 个相对独立的子系统, 并对他们分别进行单独的 PID 调节。这种控制策略虽然满足了一定的生产控制要求, 但是随着系统对象的不确定性增强和控制要求的进一步提高, 传统这种单纯的 PID 调节方式往往不能达到很好的预期控制效果。近些年来, 虽然大量的专家学者也将模糊理论, 神经网络等先进控制理论引入到锅炉燃烧控制的研究中<sup>[1-2]</sup>, 但是绝大多数研究都只是针对单一子系统的控制优化展开, 并不能很全面地考虑到整个燃烧系统的控制优化。本文不仅结合了控制器参数可以实时自行调整的模糊自适应 PID 控制器, 而且从整体出发在各耦合回路间增加了类前馈补偿的模糊解耦控制器, 从而得出了一种全新的双模糊控制方法。采用该控制策略对国内某亚临界炉燃烧系统数学模型进行了过程控制的仿真研究, 控制效果比单一子系统的控制器优化明显改善, 燃烧系统的整体控制性能获得提升。

### 1 电站锅炉燃烧系统的数学模型的建立

通常情况下, 可以把电站锅炉的燃烧系统整体看作一个多输入多输出的复杂对象。在保证既不失一般性又能说明问题的前提下, 根据常规煤粉锅炉燃烧调整原则, 把燃料量、送风量、引风量综合在一起考虑, 根据锅炉燃烧被控对象动态特性曲线, 通过定性和定量分析, 采用曲线拟合的方法, 对煤粉炉燃烧控制系统的动态特性进行了合理简化, 简化后的方框图如图 1 所示<sup>[3]</sup>。

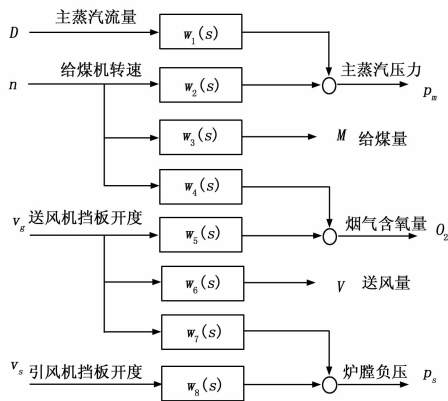


图 1 燃烧对象模型结构框图

收稿日期: 2014-04-27; 修回日期: 2014-05-30。

作者简介: 张聪彪(1988-), 男, 山西吕梁人, 硕士研究生, 主要从事电站锅炉先进控制方向的研究。

根据图 1, 并结合各环节的传递特性, 锅炉燃烧系统的被控对象模型可由如下的传递矩阵来表示:

$$\begin{bmatrix} \rho_m \\ o_2 \\ \rho_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0.0033}{(30s+1)s} & 0 & 0 \\ \frac{-0.3}{5s+1} & \frac{1.8}{30s+1} & 0 \\ 0 & \frac{0.5}{5s+1} & \frac{-1}{5s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_g \\ v_s \\ \rho_s \end{bmatrix}$$

式中,  $\rho_m$ 、 $n$ 、 $o_2$  分别表示主蒸汽压力、给煤机转速和为烟气含氧量, 而  $v_g$ 、 $v_s$ 、 $\rho_s$  分别表示送风机挡板开度、引风机挡板开度和炉膛负压。

利用 Matlab/Simulink 搭建系统仿真框图如图 2。各回路带有 3 s 滞后, 从上到下分别代表燃料量控制回路、送风量控制回路与引风量控制回路。

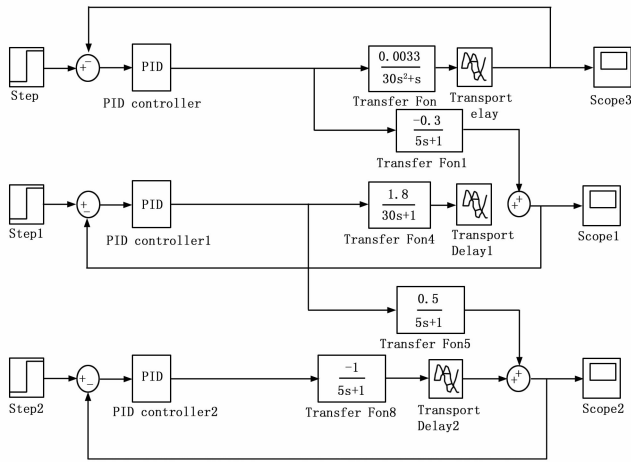


图 2 燃烧模型仿真框图

## 2 燃烧系统控制的主要思想

根据上述对象模型分析可知, 主蒸汽压力主要受燃料量多少的影响, 而烟气含氧量除了主要受到送风量大小的影响, 也受到燃料量变化的影响, 即燃料量子系统和送风量子系统间存在耦合, 与此相似, 炉膛负压不仅主要受到引风量变化的影响, 同时也受到送风量大小的影响, 即送风量子系统和引风量子系统间存在耦合。

通常情况下, 常规的控制策略为根据各子系统被控对象采用 PID 调节器分别单独控制, 根据工程上常用的 Ziegler-Nichols 控制器参数整定方法并结合手动调试确定调节器参数。由于燃料量回路与送风量回路之间存在耦合, 送风量回路与引风量回路之间存在耦合, 通常为了减轻耦合现象采用的方法是前馈补偿解耦。

研究表明, 模糊自适应 PID 控制器可以根据误差变化情况实时调整控制器参数, 可以改善常规 PID 控制器的控制效果。对此锅炉燃烧系统模型, 通过分析其模型的动态特性与锅炉实际运行的影响因素, 提出的类前馈解耦的双模糊控制方法主要思想如下: 首先对于各回路主控制器采用模糊自整定 PID 控制方式, 并且在此基础之上对于存在耦合的回路之间采用模糊解耦控制方式, 该模糊解耦的具体方法概括来说就是通过结合锅炉实际运行经验以及调试分析得到模糊解耦增益来代替常规的前馈补偿解耦增益, 实现被控对象的模糊解耦控制。

## 3 燃烧系统的控制方法分析

### 3.1 模糊自整定 PID 控制器结构

参数自整定模糊 PID 控制器的系统结构主要由参数可调 PID 控制器和模糊控制系统两部分构成, 其结构如图 3 所示。PID 控制器可实现对被控对象的控制, 而 PID 控制器的 3 个参数  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  是由模糊推理系统进行在线整定, 这样就可以实现 PID 控制器参数的自整定调节, 一般情况下, 采用二维模糊推理即将误差  $e$  和误差变化率  $ec$  作为模糊控制器的输入, 来进行模糊控制器的设计<sup>[4-6]</sup>。

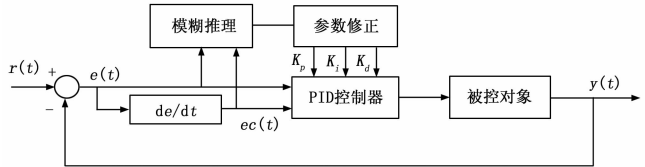


图 3 模糊自整定 PID 控制器结构

简而言之, 模糊自整定 PID 控制器就是要找出 PID 3 个参数与偏差  $e$  和偏差变化率  $ec$  之间的模糊关系, 在运行过程中不断的检测  $e$  和  $ec$  并通过模糊规则来实现对 PID 3 个参数的在线调整, 满足不同  $e$  和  $ec$  时对控制器参数的不同要求, 使得被控对象具有良好的动、静态性能。

如前所述, 实际设计中的模糊自整定 PID 调节器采用二输入三输出的形式, 该二维模糊控制器以误差  $e$  和误差变化率  $ec$  为输入, 以 PID 控制器的 3 个参数的变化量为输出。分别划分输入和输出的模糊子集为负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大, 文中用  $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$  表示。在模糊逻辑编辑器中, 输入量和输出量均选取三角形隶属度函数。根据各模糊子集的隶属度赋值以及模糊规则, 利用下式计算得出 PID 控制器参数的自整定输出值。

$$\begin{cases} Kp = K_p^0 + (E, EC)_p \\ Ki = K_i^0 + (E, EC)_i \\ Kd = K_d^0 + (E, EC)_d \end{cases}$$

式中,  $K_p^0$ 、 $K_i^0$  和  $K_d^0$  是由常规 PID 参数整定方法设定的初始值,  $(E, EC)_p$ 、 $(E, EC)_i$  和  $(E, EC)_d$  表示模糊控制器的 3 个输出。模糊规则是模糊控制设计的核心, 它是在总结工程设计人员的技术知识和实际操作经验的基础上建立。参数自整定模糊规则则如下表 1 所示。(表中内容为  $(E, EC)_p / (E, EC)_i / (E, EC)_d$  格式)

在 Matlab/Simulink 环境下设计的单回路下模糊自整定 PID 控制器仿真图如图 4。

### 3.2 模糊解耦控制方法分析

前文中提到, 常规的解耦控制是利用对角阵解耦方法设计的前馈补偿解耦控制器, 但采用此方法要求有精确的数学模型。由于锅炉燃烧过程的特性函数通常是时变的, 这样就使得耦合部分参数发生变化, 容易导致解耦效果不理想。而模糊控制的突出优势就是它是一种主要依据技术人员的控制经验或专家知识的规则型控制, 并不太依赖被控对象的精确的数学模型。在调试中发现, 解耦控制器的增益变化对解耦效果影响强烈, 经过进一步调试发现, 解耦效果的变化与解耦器增益的调节有规律可循, 所以可以设计合理的模糊控制器, 并用该模糊控制器的输出来近似取代前馈补偿的解耦增益, 实现两个耦合

表 1 模糊自整定规则表

$ec$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PMNM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO
NS	PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PM/NM/NS	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
ZO	PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO
PS	PS/NM/ZO	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO
PM	PS/ZO/PB	ZO/ZO/NS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

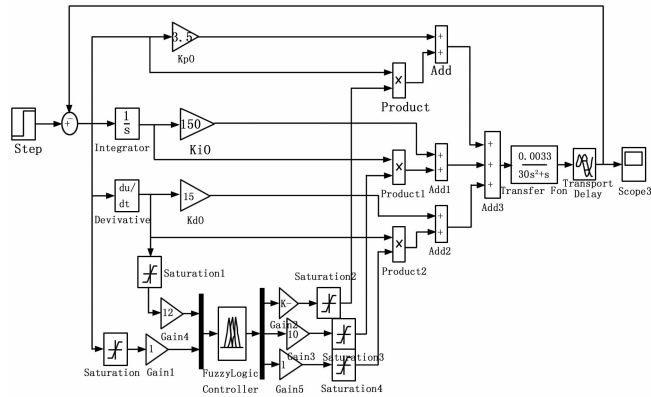


图 4 模糊自整定 PID 结构

对象之间的解耦控制<sup>[7-8]</sup>。

根据上述分析可知，在设计燃料量回路与送风量回路耦合控制系统的模糊解耦控制器时，选定给煤量的变化率和送风量的变化率为模糊控制器的输入，选定与之对应的两个解耦增益为输出，来近似等效前文提到的前馈补偿解耦器。利用 Matlab/Simulink 环境搭建仿真图如图 5 所示。

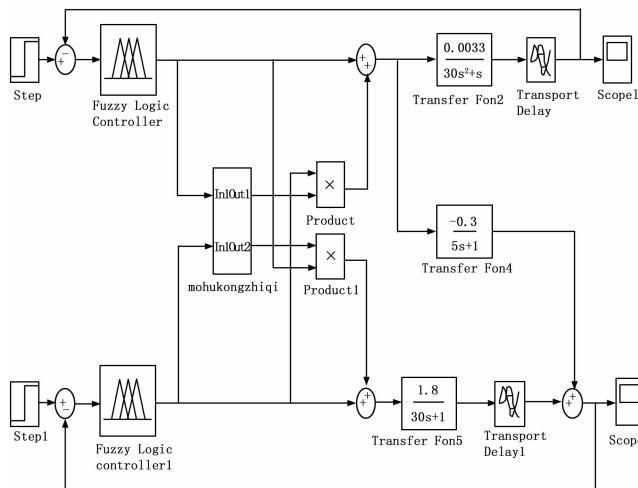


图 5 模糊解耦控制仿真框图

在模糊逻辑编辑器中，输入、输出均选用高斯型隶属函数，根据调试中发现的增益变化对解耦效果的影响，输入模糊子集  $EC_m$  和  $EC_{sf}$  均选用负大、负小、零、正小和正大 5 个模糊代号来划分，在模糊规则表中分别用 {NB, NS, 0, PS, PB} 表示。相应的，解耦增益 K21 和 K12 的输出模糊子集选用负一

级、负二级、零、正二级和正一级 5 个模糊代号来划分，在模糊规则表中分别用 {N1, N2, 0, P2, P1} 表示。模糊规则的合理与否直接决定着模糊控制器的优劣，根据专家知识和实践经验并通过大量的调试观察获得主要模糊控制规则，就该燃烧控制系统而言，主要的逻辑控制思想分析如下<sup>[9-10]</sup>。

首先从给煤量单一变量着手分析，当给煤量变化率为负时，表明调节器正减小给煤量，由于回路间的耦合，给煤量的变小必然会同时影响蒸汽压力和烟气含氧量的变化，为适应变化恢复到原有的解耦平衡状态，这时补偿烟气含氧量回路的解耦增益值就需要相应减小，而变化的程度可根据模糊化后各模糊输出等级合理确定。当给煤量变化率近似不变接近于零时，这时相应的输出解耦增益也须为“零”不变化；当给煤量变化率为正时，表明调节器正加大给煤量，同样地为适应变化恢复到原有的解耦平衡状态，这时补偿烟气含氧量回路的解耦增益值就需要相应增大，而变化的程度也根据模糊化后各模糊输出等级合理确定。

在分析得到给煤量变化与相应解耦增益变化的模糊逻辑关系之后，再加入对送风量变化率的影响分析，当送风量变化率为负时，表明调节器正减小送风量，由于回路间的耦合，送风量的减小必然会同时影响蒸汽压力和烟气含氧量的变化，为适应变化恢复到原有的解耦平衡状态，这时补偿蒸汽压力回路的解耦增益值就需要相应减小，而变化的程度可根据模糊化后各模糊输出等级合理确定。当送风量变化率近似不变接近于零时，这时相应的输出解耦增益也须为“零”不变化；而当送风量变化率为正时，表明调节器正加大送风量，同样地为适应变化恢复到原有的解耦平衡状态，这时补偿蒸汽压力回路的解耦增益值就需要相应增大，而变化的程度也根据模糊化后各模糊输出等级合理确定。

综合上述对经验的总结以及不断的调试和观察分析，就可得到该耦合系统的主要模糊解耦控制规则，模糊规则表如下表 2 所示。（表中内容为 K21/K12 格式）

表 2 燃料量、送风量回路模糊解耦规则表

$EC_{sf}$	NB	NS	0	PS	PB
NB	N1/P1	N1/P1	N2/P2	0/0	P2/N2
NS	N2/P2	N2/P2	N2/P2	N2/P2	0/0
0	0/0	0/0	0/0	N2/P2	0/0
PS	P2/N2	P1/N1	P2/N2	P2/N2	P1/N1
PB	P1/N1	P1/N1	P1/N1	P1/N1	P2/N2

同样的，通过经验总结和调试观察分析设计得到送风量回路与引风量回路的模糊解耦控制器结构。选择送风量的变化率

和引风量的变化率为二维模糊控制器的输入, 两个解耦增益为控制器输出; 输入模糊子集  $EC_{sf}$  和  $EC_{yf}$  均选用负大、负小、零、正小和正大五个模糊代号来划分, 在模糊规则表中分别用  $\{NB, NS, 0, PS, PB\}$  表示。相应的解耦增益  $K21$  和  $K12$  的输出模糊子集选用负一级、负二级、零、正二级和正一级 5 个模糊代号来划分, 在模糊规则表中分别用  $\{N1, N2, 0, P2, P1\}$  表示。输入量和输出量隶属函数均选取高斯型隶属度函数, 而模糊规则如表 3 所示。(表中内容为  $K21/K12$  格式)

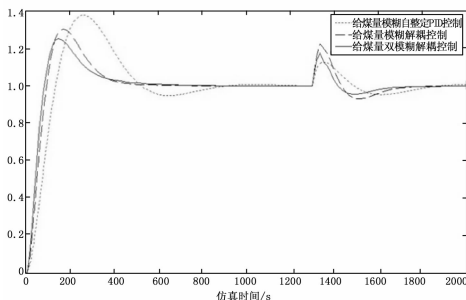
表 3 送风量、引风量回路模糊解耦规则表

$EC_{sf} \backslash EC_{yf}$	NB	NS	0	PS	PB
NB	N1/P1	N1/P1	N2/P2	0/0	P2/N2
NS	N2/P2	N2/P2	N2/P2	N2/P2	0/0
0	0/0	0/0	0/0	N2/P2	0/0
PS	P2/N2	P1/N1	P2/N2	P2/N2	P1/N1
PB	P1/N1	P1/N1	P1/N1	P1/N1	P2/N2

### 4 计算机仿真与结果分析

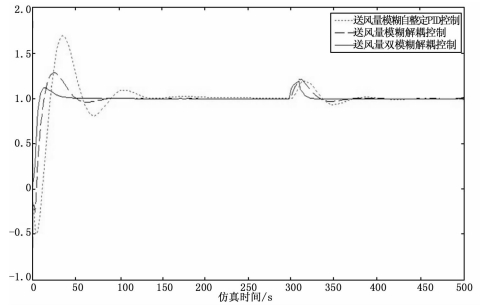
针对文中选用的锅炉燃烧系统模型, 采用类前馈补偿的双模糊解耦控制方案, 利用计算机 Matlab/Simulink 平台进行系统控制仿真分析, 分析方法主要是通过比较不同控制方法在同模型下的阶跃响应曲线性能参数来判断其控制性能优劣, 此外, 因为鲁棒性也是控制系统的重要性能指标, 所以当输出稳定后在输入端加入脉冲信号干扰来分析其鲁棒性。

在模糊自整定 PID 控制器中, 量化因子均选为 1, 比例因子  $K_1=0.1, K_2=10, K_3=1$ , 在燃料量回路主控制器 PID 初始值  $K_p^0=3.5, K_i^0=150, K_d^0=15$ ; 在送风量回路主控制器 PID 初始值  $K_p^0=0.918, K_i^0=6.6, K_d^0=1.5$ ; 在引风量回路主控制器 PID 初始值  $K_p^0=-0.51, K_i^0=6.6, K_d^0=15$ 。在燃煤量回路与送风量回路模糊解耦控制中量化因子与比例因子均选为 1, 由调试得到燃料量变化率基本论域选取为  $[-0.5, 0.5]$ , 送风量变化率论域选取为  $[-0.4, 0.4]$ , 解耦增益  $K21$  的基本论域选为  $[-10, 1]$ ,  $K12$  论域选为  $[-0.1, 0.5]$ ; 在送风量回路与引风量回路模糊解耦控制中量化因子与比例因子均选为 1, 由调试得到送风量变化率基本论域选取为  $[-0.4, 0.4]$ , 送风量变化率论域选取为  $[-0.5, 0.5]$ , 解耦增益  $K21$  的基本论域选为  $[-0.5, 0.5]$ ,  $K12$  论域选为  $[-0.5, 1]$ 。得到仿真结果如图 6 所示。

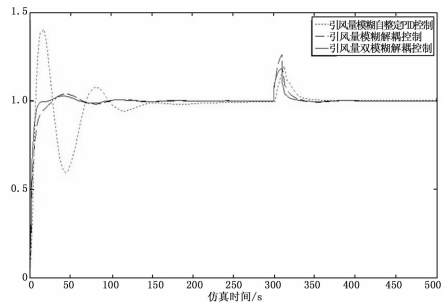


(a) 燃料量回路子系统控制效果对比

仿真结果是采用不同控制方法下的阶跃响应效果对比, 利用 Matlab 图像坐标工具可以计算出, 在燃料量回路子系统的



(b) 送风量子系统控制效果对比



(c) 引风量子系统控制效果对比

图 6 燃烧系统控制效果对比

阶跃响应曲线对比中, 采用类前馈补偿的模糊解耦控制比单纯的采用模糊自整定 PID 控制器的超调量减少了 43.8%, 响应时间缩短了 40.7%, 调节时间缩短了 29.7%, 鲁棒性增强; 而采用基于类前馈补偿解耦的双模糊解耦控制的控制效果最好, 它比只采用模糊自整定 PID 控制器的超调量减少了 53.6%, 响应时间缩短了 45.2%, 调节时间缩短了 32.7%, 鲁棒性增强; 同样的, 在送风量子系统回路和引风量子系统回路的阶跃响应曲线对比中, 采用类前馈补偿解耦的双模糊控制比单个的模糊自整定 PID 控制或者模糊解耦控制控制性能提高更为明显, 鲁棒性也相应增强。

### 5 结论

本文以国内某亚临界电站锅炉燃烧系统模型为研究对象, 采用基于类前馈补偿解耦的双模糊控制方法对整个锅炉燃烧系统控制进行了优化设计分析, 并对其控制效果进行了计算机仿真研究。结果表明, 在稳定工况下, 采用模糊自整定 PID 控制器与类前馈补偿的模糊解耦相结合的双模糊控制相比于单独的使用模糊自整定 PID 控制器超调量减少了 53.6%, 响应时间缩短了 45.2%, 调节时间缩短了 32.7%, 鲁棒性增强, 控制效果明显提升。究其原因, 这种结合模糊控制理论并且结合常规 PID 控制的做法, 可以把控制的简便性、灵活性以及鲁棒性融为一体, 发挥了传统控制与先进控制的各自长处, 具有较强的实际意义。但存在的问题是, 本文研究只针对电站锅炉稳定工况下的仿真分析, 变工况以及变模型下该方法控制效果的普遍性, 还需要更多的深入研究。

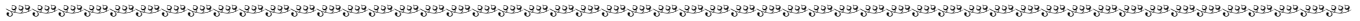
### 参考文献:

[1] 聂云峰, 荣丽红, 商飞, 等. 模糊预测控制在热电厂锅炉燃烧系统中的应用 [J]. 自动化技术与应用, 2008, 27 (2): 19-21.  
 [2] 王富强, 朱凌云, 马海芳. 燃气锅炉燃烧系统的模糊神经网络控

制 [J]. 仪表技术, 2010, 8: 25-26.

- [3] 潘维加. 300MW 单元机组煤粉炉燃烧控制系统的研究及其改进 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (9): 77-79.
- [4] 张根宝, 王荣谱, 等. 基于模糊自适应 PID 的溶解氧控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (9): 1720-1723.
- [5] 殷云华, 樊水康, 陈闯鄂. 自适应模糊 PID 控制器的设计和仿真 [J]. 火力与指挥控制, 2008, 33 (7): 96-99.
- [6] Wang S. Fuzzy self-adaptive PID and realization in electric heating furnace system [J]. Advanced Materials Research, 2011, 651-655.

- [7] Li G. The fuzzy decoupling control of the electric vehicle steering and speed systems [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 284-287.
- [8] 魏莉莉, 余淑荣, 肖林海. 基于 Matlab 的工业锅炉燃烧系统模糊解耦控制设计 [J]. 机械与电子, 2011, 4: 58-60.
- [9] 许乐. 基于模糊解耦的燃煤蒸汽锅炉燃烧控制的仿真研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [10] 张玲, 张文苑, 郑恩让. 一种模糊解耦控制系统的设计与仿真 [J]. 计算机仿真, 2010, 27 (8): 118-121.



(上接第 2780 页)

要获取的主要为经度, 纬度, 时间等数据, 通常选取 GPGGA 格式, 其帧的格式如下: GPGGA, <1>, <2>, <3>, <4>, <5>, <6>, <7>, <8>, <9>, <10>, <11>, <12>, <13>, <14> \* <15> <CR> <LF> 对于本系统而言, 我们只关心日期, 坐标信息, 为了传输的方便, 对 GPGGA 帧做相应的压缩, 如 GPGGA, 022815.000, 2517.1443, N, 11019.775, E, 110, 0.81309, M, -20.1, M, 0000 \* 7B, 首先就是对帧头进行去除, 由于每个帧头都是一致的, 保留 <1>UTC 时间, <2> 纬度在预处理时去掉中点和末尾的符号. <3> 纬度半球默认是北纬, 可以去掉. <4> 经度在预处理时去掉中点和末尾的符号. <5> 经度半球默认是东经可以去掉. 对于上述 GPS 数据经过压缩后, 通过无线网络发送到嵌入式网关。

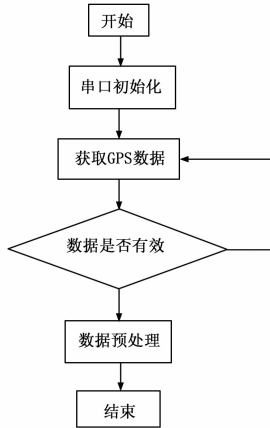


图 5 GPS 数据处理流程图

### 4 实验测试

为了验证方案设计的正确性, 实验地点选择在山体斜坡上, 通过在检测区域来布置 7 个传感器节点分别采集液位值、倾角、GPS 数据。开始实验之前, 在监测区域打孔安放液位传感器, 加水把孔里的液位提高到相应的水平, 系统开始采集数据。标准数据如表 1 所示, 系统测试数据如表 2 所示。实验结果表明, 系统稳定性好, 相对误差控制在 3% 以内, 完全可以实现数据实时采集, 实时传输, 并对可能发生的山体滑坡进行实时监测预报。

### 5 结论

本文针对滑坡监测实施难度大等缺点, 设计了一种山体滑

表 1 标准数据

节点坐标	标准倾角/(°)	水位深度/(m)	
1	(25°1755.7"E, 110°2024.4"N)	0	0
2	(25°1756.3"E, 110°2127.6"N)	5	0.05
3	(25°1758.9"E, 110°2026.9"N)	10	0.10
4	(25°1753.8"E, 110°2023.7"N)	15	0.15
5	(25°1759.5"E, 110°2025.5"N)	20	0.20
6	(25°1754.9"E, 110°2029.7"N)	25	0.25
7	(25°1757.7"E, 110°2028.9"N)	30	0.30

表 2 测量数据

节点坐标	测量倾角(°)	测量水位深度(m)	
1	(25°1755.2"E, 110°2025.1"N)	0.02	0.001
2	(25°1756.3"E, 110°2027.9"N)	5.07	0.052
3	(25°1758.3"E, 110°2026.2"N)	9.97	0.101
4	(25°1753.2"E, 110°2025.7"N)	15.04	0.149
5	(25°1758.6"E, 110°2028.5"N)	19.93	0.200
6	(25°1754.4"E, 110°2028.4"N)	25.14	0.248
7	(25°1757.1"E, 110°2029.5"N)	30.09	0.303

坡无线传感器网络监控系统, 将无线网络传感器技术与 GPS 定位技术应用于滑坡监测, 实验表明, 系统测试数据和真实数据基本一致, 可以有效的实现滑坡的及时监测, 系统运行稳定, 成本低, 可扩展性性强, 对于预防山体滑坡的发生有十分重要的意义。

### 参考文献:

- [1] 杨永毅. 滑坡地质灾害监测技术发展综述 [J]. 国外建材科技, 2008, 29: 84-86.
- [2] 梁山, 胡颖, 王可之, 鲜晓东基于无线传感器网络的山体滑坡预警系统设计 [J]. 传感技术学报, 2010, (8): 1186-1188.
- [3] 李忠成. 基于无线传感器网络的环境监测系统研究与设计 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (7): 929-931.
- [4] 崔振萍. 无线倾角传感器滑坡监测网络及预警发布研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2012.
- [5] 李宗醒, 闰超, 丁建宁, 等. 基于 Super-Zig Bee 的高大建筑物台风监测系统 [J]. 仪表技术与传感器, 2011, (10): 44-45.
- [6] 季鹏, 俞阿龙, 贾芳芳. 基于 Zig Bee 的混凝土施工信息无线监测系统 [J]. 传感器与微系统, 2013, (11): 83-84.
- [7] 谭泽富, 雷国平. GPRS 在三峡库区滑坡监测系统中的应用 [J]. 重庆三峡学院学报, 2007, 3 (23): 8-10.
- [8] Li B, Li S, Chen L, et al. Design and Realization of Wireless Remote Image Monitoring System Based on GSM/GPRS [A]. Third International Forum on Strategic Technologies [C]. 2008: 260-263.