

文章编号: 1671-7848(2007)04-0426-04

## 发电厂综合型协调控制系统的设计与应用

韩忠旭<sup>1,2</sup>, 冯 健<sup>2</sup>, 齐小红<sup>3</sup>, 李英魁<sup>2</sup>, 考志强<sup>2</sup>

(1. 中国电力科学研究院, 电厂自动化研究所, 北京 100085;

2. 北京国电智深控制技术有限公司, 北京 100085;

3. 东北电力大学 能源与机械工程学院, 吉林 吉林 132012)



**摘 要:** 采用状态空间统一描述基于增量式函数观测器 IFO- $K\Delta x$  的状态反馈 + PID 综合型协调控制系统, 通过数学分析, 给出了控制系统稳定的充分条件。在一台 600 MW 机组机炉协调控制的工程实践中取得实际效果表明, 在协调方式累计降负荷 375 MW, 机前压力从 16.5 MPa 滑压减至 13.0 MPa, 当负荷指令以 18 MW/min 和 8 MW/min 两种速率变化时, 实际负荷和机前压力均接近同样的速率达到目标值。这有效地解决了机炉协调受控对象所具有的非线性、参数慢时变、迟滞与大惯性以及耦合等难以控制的问题, 证明了该设计方案和理论分析的正确性。

**关 键 词:** 增量式观测器(IFO- $K\Delta x$ ); 状态反馈; 机炉协调控制; 慢时变; 大惯性; 大迟滞  
中图分类号: TP 273 文献标识码: A

## Design and Application of Synthetic Coordinated Control System to Power Plant

HAN Zhong-xu<sup>1,2</sup>, FENG Jian<sup>2</sup>, QI Xiao-hong<sup>3</sup>, LI Ying-kui<sup>2</sup>, KAO Zhi-qiang<sup>2</sup>

(1. Power Plant Automation Department, China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China;

2. Beijing Guodian Zhishen Control Technology Ltd, Beijing 100085, China;

3. College of Energy Sources and Mechanical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

**Abstract:** The state-space method is used to describe the synthetic coordinated control system that is combined with state feedback based on incremental function observer(IFO- $K\Delta x$ ) and PID controller. The sufficient condition of the control system stabilization is given by mathematical analysis. It is applied to a boiler-turbine coordinated control system of 600 MW generator unit. The engineering application result shows that, when total changing active power of 375 MW with 18 MW/min or 8 MW/min of different load change rate, and steam pressure from 16.5 MPa to 13.0 MPa. The power and pressure all reach the targets with the rate of set-points respectively. So the difficult problems, that the controlled object has characters of non-linear, parameters slow time variable, the great inertia, the large time lag and regulate coupling, are solved effectively. And the correctness of the design scheme and theory analysis is all testified.

**Key words:** IFO- $K\Delta x$ ; state feedback; boiler-turbine coordinated control; slow time variable; great inertia; large time lag

### 1 引 言

随着火力发电机组在电网中所占的比例越来越大以及大容量单元机组的日益增多, 电网对单元机组的负荷适应性能也提出了更高的要求。代表性的研究工作<sup>[1-3]</sup>指出, 单元机组机炉协调控制系统的被控对象通常是具有非线性、参数慢时变、以及迟滞与大惯性并存的多变量系统, 从而给控制系统的设计与实现带来许多困难。这是一项综合性很强的技术工作, 同时具有理论意义和应用价值。

基于观测器的状态反馈控制系统在热控领域的应用, 已经取得了一些实践成果<sup>[4-8]</sup>, 在理论研究

方面, 文献[9,10]提出基于增量式函数观测器(IFO- $K\Delta x$ )的非线性状态反馈控制系统的设计概念, 文献[11]对状态反馈极点配置的简易设计方法进行了理论研究, 文献[12]分析了大惯性受控对象状态观测器的鲁棒性, 文献[13]定义了代数等价观测器(AEO)并对其进行了数学分析, 文献[14]则进一步探讨了 IFO- $K\Delta x$  成立的充要条件。

本文以单元机组综合型协调控制系统的设计为实例, 借鉴线性系统理论的经典成果<sup>[15]</sup>, 给出综合型协调控制系统的状态空间描述, 并基于此描述对稳定性进行数学分析, 给出了在一台 600 MW 机组的实际应用效果。

## 2 综合型协调控制系统的设计

综合型协调控制系统的优化控制方案，如图 1 所示。

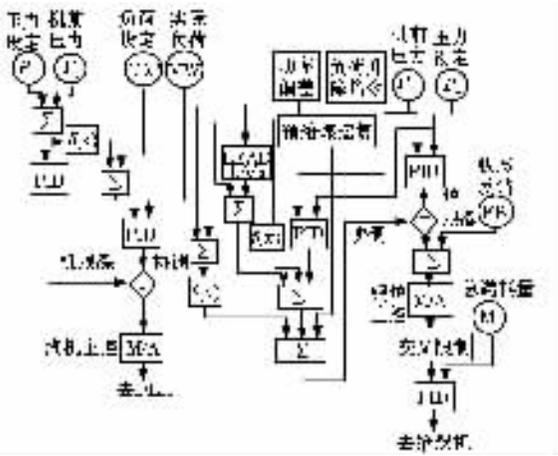


图 1 综合型协调控制系统设计方案

Fig.1 Design scheme of the synthetic coordinate control system

该协调控制系统主要特点和设计概念在相关工程<sup>[4~7]</sup>中曾得到不同组合式的应用，在此，运用状态空间法对其稳定性进行理论分析。

## 3 控制系统的状态空间描述

协调控制系统的受控对象可由能控线性系统和一组非线性函数的联立来表示。

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu & x(t_0) = x_0 \\ y = Cx \end{cases} \quad (1)$$

$$u = f(v) \quad (2)$$

式中， $x \in \mathbf{R}^n$ ； $A, B, C$  为适当阶的实矩阵； $v, y, u$  为适当维的输入输出向量； $f$  代表适当维的非线性函数关系。

图 1 所示控制系统可由如下状态方程描述：

$$\begin{cases} \dot{z} = Fz + G\Delta\hat{y} + H\Delta u, & z(t_0) = z_0 \\ w = Mz + N\Delta\hat{y} \\ w_1 = f_{w1}(\Delta\hat{y}, R_{DMD}) \\ w_2 = -w + \Delta\hat{y}_{2PID} + w_1 \\ \Delta\hat{u} = v - f_v(R_{DMD}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} -\Delta\hat{y}_{1PID} = IB_1 \cdot \Delta\hat{y}_1 + IB_2 \cdot z_1 + IB_3 \cdot \Delta\hat{y}_{10} \\ \dot{z}_1 = (k+1) \cdot \Delta\hat{y}_1, & z_1(t_0) = z_1 \\ \Delta\hat{y}_1 = y_1 - w_2 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} -\Delta\hat{y}_{2PID} = IB_4 \cdot \Delta\hat{y}_2 + IB_5 \cdot z_2 + IB_6 \cdot \Delta\hat{y}_2 \\ \dot{z}_2 = (k+1) \cdot \Delta\hat{y}_2, & z_2(t_0) = z_2 \\ \Delta\hat{y}_2 = y_2 - f_v(R_{DMD}) \end{cases} \quad (5)$$

式中， $z \in \mathbf{R}^p$ ； $F, H, G, N, M$  为适当阶的实矩阵； $w, w_1, w_2, \Delta\hat{u}, \Delta\hat{y}, \Delta\hat{y}_1, \Delta\hat{y}_2, \Delta\hat{y}_{1PID}$ ,

$\Delta\hat{y}_{2PID}$  为适当维的中间结果计算向量； $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6$  为适当维的调节器 PID 参数向量； $I$  为单位阵； $z_1, z_2$  为适当维的状态向量； $y_1, y_2$  为适当维的、隶属于输出向量  $y$  中的被调参数向量，且要求变量  $R_{DMD}$  可以通过测量得到； $f_{w1}, f_v$  和  $f_y$  代表适当维的非线性函数关系，且  $[FM]$  能观。

式(3)~式(5)的联立构成了单元机组非线性受控对象式(1),式(2)的一个 IFO- $K\Delta x$  + PID 型的机炉协调控制系统,这个多变量综合型的控制系统是通过式(6)将控制系统与受控对象联系起来,形成闭环控制的。

$$v(s) = G(s) \Delta\hat{y}_{1PID}(s) \quad (6)$$

式中， $G(s)$  是用传递函数表示的执行器动态特性。

在图 1 所示的情形下， $\Delta\hat{y}_{2PID}$  分别代表炉侧的主蒸汽压力调节器和机侧的有功功率调节器，相应的  $\Delta\hat{y}_2$  分别代表主汽压力偏差和有功功率偏差； $\Delta\hat{y}_{1PID}$  代表炉侧的总燃料调节器和机侧的第一级压力(调速级)调节器， $\Delta\hat{y}_1$  代表总燃料偏差和第一级压力偏差，而对于图 1 中机侧不存在一级压力调节器的情形，通过设置式(4)中  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  的参数，并令  $\Delta\hat{y}_1 = y_1 - w_2$  中相应位置的变量  $y_1(2) = 0$  即可； $w_1$  代表前馈、预给煤运算<sup>[7,16]</sup>逻辑中的“正踢”(相当于初始冲量)“反踢”(类似于“刹车器”)作用和“加速”回路等智能控制算法； $R_{DMD}$  取图 1 中的负荷设定值 LDC 信号，此时  $\Delta\hat{y}_2$  中与有功功率设定值相应的  $f_y$  直接取线性函数关系  $f_y(R_{DMD}) = R_{DMD}$ 。

## 4 控制系统的稳定性分析

从火电机组的运行要求系统稳定的前提出发，在线性系统理论<sup>[15]</sup>以及增量式函数观测器相关定理<sup>[9,14]</sup>的基础上，给出综合型协调控制系统稳定的充分条件如下。

定理 1 若联立系统式(1),式(2)能观，同时还已知一矩阵  $K \in \mathbf{R}^{r \times n}$ ，则能观联立系统式(3)~式(5)称为联立系统式(1),式(2)的一个基于 IFO- $K\Delta x$  的状态反馈 + PID 调节综合型协调控制系统，并在满足下述充分条件时：

① 矩阵  $F$  非奇异且  $\text{Re}\lambda(F) < 0$

②  $\lim_{t \rightarrow \infty} |\Delta\hat{u}| = \lim_{t \rightarrow \infty} |v - f_v(R_{DMD})| = \xi_1 \leq \omega_1$   
 $\lim_{t \rightarrow \infty} v = \alpha$  ( $\xi_1, \alpha, \omega_1$  均为实数向量)

③  $y_{DMD} = f_y(R_{DMD}) = Cx_0$ ，且存在适当阶的实矩阵  $T$  使得：

④  $TA - FT = GC$

⑤  $MT + NC = K$ ，且：

⑥  $\lim_{t \rightarrow \infty} f_{w1}(\Delta\hat{y}, R_{DMD}) = f_v(R_{DMD})$

$$\textcircled{7} \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta \hat{y}_{2PID} = -MF^{-1}H\xi_1 + N\Delta \hat{y} + \xi_1$$

则由式(1)~式(6)表示的整个闭环控制系统渐近稳定。

证明 :令 :

$$z_3 = z + F^{-1}H\xi_1 \quad (7)$$

$$w_3 = w + MF^{-1}H\xi_1 = Mz_3 + N\Delta y \quad (8)$$

$$\varepsilon = z_3 - T\Delta x, e = w_3 - K\Delta x \quad (9)$$

则由定理 1 条件①矩阵  $F$  非奇异及式(9),式(7),式(3)和式(1),可得 :

$$\dot{\varepsilon} = F\varepsilon + G\Delta \hat{y} + (FT - TA)\Delta x + H\Delta \hat{u} - TB\Delta u - H\xi_1 \quad (10)$$

如果记 :

$$\Delta \hat{y} = C\Delta x + I\delta_1 \cdot C\Delta x \quad (11)$$

式中  $\delta_1$  为未知的摄动元素组成的向量。

则有 :

$$\dot{\varepsilon} = F\varepsilon + [G(I + I\delta_1)C + FT - TA]\Delta x + H\Delta \hat{u} - TB\Delta u - H\xi_1 \quad (12)$$

再注意到式(9),式(8),式(3),式(1)和式(11),进而可知 :

$$e = M\varepsilon + [N(I + I\delta_1)C + MT]\Delta x - K\Delta x \quad (13)$$

当定理 1 条件③成立,同时由中值定理,则 :

$$\dot{\varepsilon} = F\varepsilon + [GC + FT - TA]\Delta x + H\Delta \hat{u} - TBf(\xi)\Delta v - H\xi_1 \quad (14)$$

$$e = M\varepsilon + [NC + MT - K]\Delta x \quad (15)$$

当定理 1 中条件式④和式⑤成立时,式(14)和式(15)化为

$$\dot{\varepsilon} = F\varepsilon + H\Delta \hat{u} - TBf(\xi)\Delta v - H\xi_1 \quad (16)$$

$$e = M\varepsilon \quad (17)$$

由定理 1 中条件①和②可知 :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} [z_3(t) - T\Delta x(t)] = 0 \quad (18)$$

进而有 :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} [w_3(t) - K\Delta x(t)] = 0 \quad (19)$$

于是证得观测器稳定。

再证明整个系统的稳定性,由式(4)PID 调节器的性质及定理 1 的条件②可知 :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} w_2 = \lim_{t \rightarrow \infty} y_1 = \lim_{t \rightarrow \infty} v = \alpha \quad (20)$$

由式(20),式(3)和定理 1 的条件⑥,有 :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta y_{2PID} = \lim_{t \rightarrow \infty} (w_2 - w_1 + w) = \lim_{t \rightarrow \infty} v - f_t(R_{DMD}) + \lim_{t \rightarrow \infty} w \quad (21)$$

将定理 1 的条件⑦和②代入式(21),有 :

$$-MF^{-1}H\xi_1 = \lim_{t \rightarrow \infty} Mz \quad (22)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} z = -F^{-1}H\xi_1 \quad (23)$$

注意到式(7),式(9),式(18),进而有 :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} z_3 = \lim_{t \rightarrow \infty} (z + F^{-1}H\xi_1) = 0 \quad (24)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} T\Delta x = \lim_{t \rightarrow \infty} (z_3 - \varepsilon) = 0 \quad (25)$$

由于  $T$  不为 0,若要式(25)恒成立,只能有 :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta x = 0 \quad (26)$$

定理 1 证毕。

推论 1 预给煤控制算法不影响综合型协调控制系统的稳定性,当且仅当定理 1 条件⑥成立。

推论 2 当下述条件成立时 :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} I\beta_5 \cdot z_2 = -MF^{-1}H\xi_1 + N\Delta \hat{y} + \xi_1 \quad (27)$$

控制系统的最终被调量  $y_2$  无差,即  $\Delta \hat{y}_2 = 0$ 。

定理 1 给出的综合型协调控制系统稳定充分条件是一个数学期望,可作为控制系统设计目标。

### 5 控制系统的实际应用效果

大唐韩城第二发电厂 2 号 600 MW 单元机组协调控制系统将负荷从 615 MW 依次减至 240 MW 的趋势图,如图 2 所示。

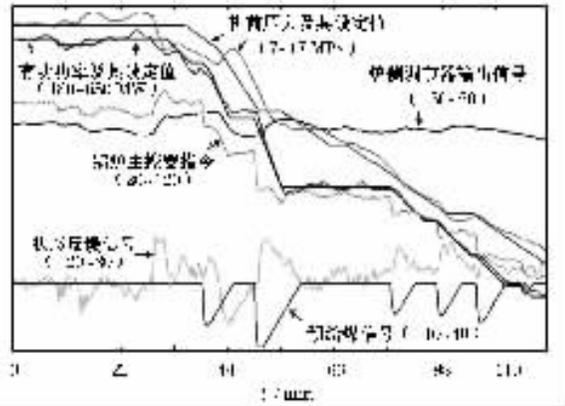


图 2 协调控制减负荷趋势图 (从 615~240 MW)  
Fig.2 Trend of changing active power of 375 MW with 18 MW/min or 8 MW/min of different change rate

### 6 结 语

对于经典控制和现代控制,可以采用状态空间统一描述,应用此方法设计了一台 600 MW 机组的综合型协调控制系统,通过数学分析,由定理 1 给出了系统稳定的充分条件,同时得到相关推论。

所设计的综合型协调控制系统,取得实际效果表明,协调方式降负荷累计 375 MW,机前压力从 16.5 MPa 滑压减至 13.0 MPa,在 18 MW/min 和 8 MW/min 两种负荷速率下,实际负荷均接近同样的速率达到目标值。为克服锅炉的大迟滞和大惯性,有效提高协调控制系统的负荷响应速率提供了一个典型的成功范例。

致谢:本文研究工作的应用,得到大唐韩城第二发电厂的大力支持。在此,谨向大唐韩城第二发电厂致以诚挚谢意!并向党增奎,梁振武,薛建宏所给予的协助致以衷心的感谢!

## 参考文献 (References) :

- [1] 柴天佑,刘红波,张晶涛,等.基于模糊推理和自适应控制的协调控制系统设计新方法及其应用[J].中国电机工程学报,2000,20(4):14-18.(Chai Tianyou, Liu Hongbo, Zhang Jingtao, et al. Novel design method for the coordinated control system based on fuzzy reasoning and adaptive control and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(4):14-18.)
- [2] 罗毅,田涛,杨志远,等.具有可调增益前移的自适应预估控制及其在电厂 DCS 中的应用[J].中国电机工程学报,2000,20(10):84-88.(Luo Yi, Tian Tao, Yang Zhiyuan, et al. Adaptive predictive controller with controllable gain ahead and its applications to DCS in power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(10):84-88.)
- [3] 吕剑虹,陈来九,陈建勤,等.基于模糊规则的热工过程非线性模型的研究[J].中国电机工程学报,2002,22(11):132-137.(Lü Jianhong, Chen Laijiu, Chen Jianqin, et al. A study on fuzzy rules based and nonlinear models for thermal processes[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11):132-137.)
- [4] 韩忠旭,黄焕袍,张智,等.基于状态观测器的状态反馈控制在 300 MW 单元机组协调控制系统中的应用[J].中国电力,2004,37(4):60-65.(Han Zhongxu, Huang Huanpao, Zhang Zhi, et al. Application of state feedback based on state observer in the coordinated control system of 300 MW unit plant[J]. China Electric Power, 2004, 37(4):60-65.)
- [5] 韩忠旭,王毓学,曲云,等.基于 IFO-K $\Delta x$  的状态反馈在平凉 4 $\times$ 300 MW 单元机组中的应用[J].中国电机工程学报,2004,24(12):233-237.(Han Zhongxu, Wang Yuxue, Qu Yun, et al. Application of state feedback based on IFO-K $\Delta x$  in 4 $\times$ 300 MW generator unit of Pingliang power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12):233-237.)
- [6] 韩忠旭,齐小红,潘钢,等.本生直流炉炉协调控制系统的设计新方法及其工程应用[J].中国电机工程学报,2005,25(21):121-127.(Han Zhongxu, Qi Xiaohong, Pan Gang, et al. A new design method of coordinate control system for once-through boiler and its engineering application[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21):121-127.)
- [7] 韩忠旭,张智,刘敏,等.北仑 1 和 2 号 600 MW 单元机组协调控制系统的设计与应用[J].中国电机工程学报,2006,26(18):126-132.(Han Zhongxu, Zhang Zhi, Liu Min, et al. Application and design

of coordinated control system for No.1 & 2 600 MW unit of Beilun power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18):126-132.)

- [8] Han Z X, Qi X H, Zhou G. Feed-water control scheme design of two different structure double-hearth benson once-through boilers and its application[C]. Singapore in Proc the 1st IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA 2006), 2006.
- [9] 韩忠旭.增量式函数观测器的概念及其状态反馈控制系统的应用[J].中国电机工程学报,2004,24(4):210-216.(Han Zhongxu. Concept of increment function observer and its application in state feedback control[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4):210-216.)
- [10] 韩忠旭.基于 IFO-K $\Delta x$  的非线性状态反馈控制系统的几个设计概念[J].中国电机工程学报,2004,24(9):262-266.(Han Zhongxu. Some design concepts of nonlinear state feedback control system based on IFO-K $\Delta x$ [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9):262-266.)
- [11] 韩忠旭,孙颖.高阶惯性环节状态反馈极点配置的一种简易方法[J].中国电机工程学报,2002,22(4):118-121.(Han Zhongxu, Sun Ying. A simple method for state feedback's pole-placement in high-order inertia link[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4):118-121.)
- [12] 韩忠旭,吕秀红,韩莉.过热器蒸汽温度状态观测器的鲁棒性分析[J].中国电机工程学报,2003,23(4):177-180.(Han Zhongxu, Lü Xiuhong, Han Li. The robustness analysis of the state observer in the boiler super-heater temperature control[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4):177-180.)
- [13] 韩忠旭,齐小红.代数等价观测器的定义及其数学分析[J].中国电机工程学报,2006,26(20):124-129.(Han Zhongxu, Qi Xiaohong. Concept of algebra equivalent observer and its mathematical analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20):124-129.)
- [14] 韩忠旭,齐小红.增量式函数观测器成立的充要条件[J].中国电机工程学报,2006,26(23):78-82.(Han Zhongxu, Qi Xiaohong. The sufficient and necessary conditions of increment function observer[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(23):78-82.)
- [15] 段广仁.线性系统理论[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004.(Duan Guangren. Line system theory[M]. Harbin: Harbin University of Industry Press, 2004.)
- [16] 韩忠旭,齐小红,孙颖.采用模拟柔性模糊预给煤控制提高 AGC 响应速率的方法及其应用[J].电网技术,2006,30(增刊 2):1-6.(Han Zhongxu, Qi Xiaohong, Sun Ying. The method heightening response rate to AGC by analog flexible fuzzy pre-feed coal control and its application[J]. Power System Technology, 2006, 30(2):1-6.)

(上接第 425 页)

表 3 模型参数不精确时的三种控制性能指标

Table 3 Performance parameter of three control methods with non-precise model

控制方法	超调量/%	调节时间/s	稳态误差
Smith 预估控制	10	1 300	0
模糊自适应 Smith 控制	0	900	0
模糊 Smith 智能控制	0	500	0

从表 2 和表 3 可以看出,模糊自适应 Smith 控制比常规 Smith 预估控制具有更好的效果,它使系统具有较好的动态特性;不仅调节时间短,而且超调量小,具有较理想的稳态品质,稳态过程无振荡,控制精度较高;当被控过程参数发生变化时,控制系统仍然保持较好的适应能力和鲁棒性。模糊 Smith 智能控制方法与 Smith 预估控制相比,在模型参数不变时调节时间缩短 1/3,在模型参数变化时调节时间缩短非常明显(由 1300 s 至 500 s);模糊 Smith 智能控制方法与其他两种方法相比,在超调和调节时间等性能指标方面都有明显的提高。

## 4 结语

模糊自适应 Smith 预估器与模糊参数自整定

PID 相结合的模糊 Smith 智能控制方法,除具有模糊 PID 和 Smith 预估控制的优点外,还可以对自适应 Smith 预估控制的滤波时间常数进行模糊自调整。通过针对绝大部分温控对象的纯滞后环节进行补偿,提高了系统的快速性,改善了系统的稳定性。

## 参考文献 (References) :

- [1] 金以慧.过程控制[M].北京:清华大学出版社,1993.(Jin Yihui. Process control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.)
- [2] 邵惠鹤.工业过程高级控制[M].上海:上海交通大学出版社,2003.(Shao Huihe. Advanced control of industrial process[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1993.)
- [3] Tan W. Tuning of a modified Smith predictor for processes with time delay[J]. Control Theory & Applications, 2003, 20(2):297-301.
- [4] Zhang A B. Parameter tuning for predictive PID controller based on fuzzy mode[J]. Journal-Xiamen University Natural Science, 2002, 41(3):427-430.
- [5] Yu C C. Auto-tuning of PID controllers[M]. London: Springer-Verlag London Limited, 1999.
- [6] 韩如成,李宵峰,王亚惠.大时滞系统模糊自整定 Smith 预估补偿控制方案的研究[J].钢铁,1999,34(4):52-55.(Han Rucheng, Li Xiaofeng, Wang Yahui. Smith predictive method with fuzzy self-adjusting for time-delay system[J]. Iron & Steel, 1999, 34(4):52-55.)
- [7] 刘红波,李少远,柴天佑.一种基于模糊切换的模糊复合控制器及其应用[J].控制与决策,2003,18(5):615-618.(Liu Hongbo, Li Shaoyuan, Cai Tianyou. Fuzzy hybrid controller based on fuzzy switching and its application[J]. Control and Decision, 2003, 18(5):615-618.)