

# 免疫内模控制及其在过热汽温系统的应用

袁桂丽, 刘吉臻, 牛玉广

(华北电力大学 控制与计算机学院, 北京 102206)

**摘要:** 针对火电厂过热汽温系统采用传统 PID 控制效果较差的问题, 设计免疫内模控制器, 采用免疫反馈控制与内模控制相结合, 有效缓解了内模固定滤波器时间常数的鲁棒性和快速性之间的矛盾, 对参数变化有很好的自适应能力。将设计的控制器应用到过热汽温系统中, 通过免疫内模控制器与内模控制器在给定阶跃响应、加入扰动阶跃信号、延时增加/减少 5 %、惯性时间常数增加/减少 5 %、比例增益增加/减少 5 % 等情况下的仿真, 结果表明, 所设计的免疫内模控制器性能优于内模控制器。

**关键词:** 免疫控制; Smith 预估控制; 内模控制; 过热汽温; 火电厂

**中图分类号:** TM 621; TP 273

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2010)09-0089-04

过热蒸汽温度是衡量锅炉运行质量的重要技术指标之一, 采用基于线性、精确模型的常规 PID 控制比较困难, 控制效果较差<sup>[1]</sup>。近年的研究表明<sup>[2]</sup>, Smith 预估器对解决大时滞问题起到了很大的作用, 但此法对模型的精确性要求高, 当模型不匹配时控制效果明显变差, 不能发挥其优势。内模控制改善了模型和过程对象失配的缺点, 但控制效果与滤波器时间常数的选取有很大关系, 抗高频干扰能力差<sup>[3]</sup>。免疫控制是借鉴生物系统的免疫机理而设计出的一种非线性控制, 它充分利用了免疫系统的快速性和免疫稳定性, 控制过程中显示出具有良好适应性的智能行为<sup>[4-5]</sup>。本文采用免疫反馈控制与内模控制相结合, 充分发挥二者的优势, 既具有内模结构又能发挥免疫自适应的功能, 在线调整滤波器时间常数。仿真结果表明, 采用此种控制方式提高了系统鲁棒性, 同时也获得了很好的快速性。

## 1 Smith 内模控制器

内模控制由 Garcia 和 Morari 于 1982 年首先正式提出, 是一种基于过程数学模型进行控制器设计的控制策略。内模控制以其结构简单、跟踪调节性能好、鲁棒性强、能消除不可测干扰等优点, 为控制理论界和工程界所重视。

### 1.1 内模控制结构

内模控制结构如图 1 所示, 图中  $G_p(s)$  为被控对象,  $\hat{G}_p(s)$  为内部模型,  $\hat{G}_I(s)$  为内模控制器,  $Y(s)$ 、 $R(s)$

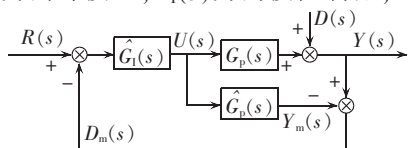


图 1 内模控制结构

Fig.1 Structure of internal model controller

分别为被控对象的输出量和输入量,  $D(s)$  为外部不可测干扰。

### 1.2 内模控制器设计

理论上内模控制器取  $G_I(s) = \hat{G}_p(s)^{-1}$  控制效果最好。实际上由于对象通常含有容积迟延和传输迟延等纯迟延, 按理想内模控制器设计将无法实现, 同时模型也不可能完全匹配。通常设计内模控制器分为 2 个步骤。

a. 将模型分解。

$$\hat{G}_p(s) = \hat{G}_{p+}(s) \hat{G}_{p-}(s)$$

其中,  $\hat{G}_{p-}(s)$  为最小相位部分;  $\hat{G}_{p+}(s)$  为非最小相位部分, 包括纯滞后和  $s$  右半平面的零点、极点。

b. 设计滤波器。内模控制较传统反馈控制虽然容易获得较好的动态特性, 能同时兼顾稳定性和鲁棒性, 但需要被控对象模型精确。当模型失配或有干扰存在时, 闭环系统未必能获得期望的动态特性和鲁棒性, 甚至使系统不稳定。简单而有效的办法是引入滤波器, 设滤波器传递函数为  $G_I(s)$ 。

$$G_I(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^n} \quad (1)$$

其中, 阶次  $n$  取决于内模控制器的实现性;  $\lambda$  为系统要整定的滤波器系数。因此, 所设计的内模控制器为

$$G_I(s) = \hat{G}_{p-}(s)^{-1} G_I(s) \quad (2)$$

从内模控制器设计可看出只有一个可调节参数  $\lambda$ , 设计简单。

### 1.3 Smith 内模控制器结构

Smith 内模控制器结构如图 2 所示。

内模控制和图 2 中 Smith 控制在结构上有相似性,  $G_c(s)$  为 Smith 预估控制器,  $G_d(s)$  为外部不可测扰动信号的传递函数。  $G_p(s)$ 、 $\hat{G}_p(s)$ 、 $\hat{G}_{p+}(s)$ 、 $\hat{G}_{p-}(s)$  含义与内模控制结构相同。Smith 预估控制没有考虑

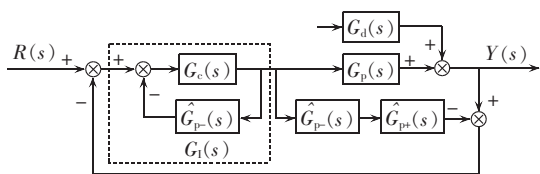


图 2 Smith 内模控制结构

Fig.2 Structure of Smith-internal model controller

到模型失配时的鲁棒性和可实现性,而内模控制则充分考虑到这一点,图 2 所示虚线框部分就相当于内模控制器的传递函数,即

$$G_I(s) = \frac{G_c(s)}{1 + \hat{G}_{p-}(s)G_c(s)} \quad (3)$$

#### 1.4 基于 Smith 预估原理的 IMC 控制器设计

张卫东教授基于一阶 Pade 近似,分别从  $H_2$  控制理论和  $H_\infty$  控制理论的角度讨论了自衡对象 Smith 预估器解析设计问题,但是严格讲,这些设计方法并没解决这个问题,因为在这些方法中纯滞后是用低阶有理近似来代替的<sup>[6]</sup>。

文献[6]采用  $n$  阶全通 Pade 近似表示滞后,具有很好的性质,可进行任意的逼近,则

$$e^{-\theta s} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{Q_m(-\vartheta s)}{Q_m(\vartheta s)}$$

$$Q_m(\vartheta s) = \sum_{j=0}^n \frac{(2n-j)!n!}{(2n)!j!(n-j)!} (\theta s)^j$$

即

$$Q_m(\vartheta s) = 1 + a_1 s + a_2 s^2 + \cdots + a_n s^n \quad (4)$$

因为  $a_j > 0$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ), 根据 Pade 近似的性质可知,全通 Pade 近似的极点均在  $s$  左半平面,零点均在  $s$  右半平面,在此基础上由文献[6]设计的 Smith 内模控制器为

$$G_I(s) = \hat{G}_{p-}(s)^{-1} G_I(s) \quad (5)$$

对应的 Smith 预估器:

$$G_c(s) = \frac{\hat{G}_{p-}(s)^{-1}}{(\lambda s + 1)^n - 1} \quad (6)$$

对于热工控制系统中常见的广义被控对象传递函数为

$$G_p(s) = \frac{k}{\tau s + 1} e^{-\tau_y s} \quad (7)$$

设过程模型的传递函数为

$$\hat{G}_p(s) = \frac{k_m}{\tau_m s + 1} e^{-\tau_{m_y} s} \quad (8)$$

式(7)(8)中参数  $k$ 、 $\tau$ 、 $\tau_y$  和  $k_m$ 、 $\tau_m$ 、 $\tau_{m_y}$  分别为对象和模型的比例系数、惯性时间常数和延迟时间常数。

根据内模控制器设计方法,滤波器传递函数取:

$$G_I(s) = \frac{1}{\lambda s + 1}, \text{ 即式(5)(6)取 } n=1.$$

根据第 1.2 节内模控制器设计,内模控制器的传递函数应为

$$G_I(s) = \hat{G}_{p-}(s)^{-1} G_I(s) = \frac{\tau_m s + 1}{k_m} \frac{1}{\lambda s + 1} \quad (9)$$

对应 Smith 内模结构的控制器为

$$G_c(s) = \frac{\hat{G}_{p-}(s)^{-1}}{(\lambda s + 1)^n - 1} = \frac{\tau_m s + 1}{k_m \lambda s} = \frac{\tau_m}{k_m \lambda} + \frac{1}{k_m \lambda s} = \frac{1}{\lambda} \left( \frac{\tau_m}{k_m} + \frac{1}{k_m s} \right) \quad (10)$$

由式(9)(10)设计的结果与由式(2)(3)设计的结果完全一致。从式(10)的控制器结构上看,基于内模的 Smith 预估控制器实际就是 PI 控制,其中,  $k_m$ 、 $\tau_m$  都为对象模型的已知参数,只要适当调整滤波器系数  $\lambda$  即可,这样既简化了 Smith 预估控制器的整定,同时又改善了 Smith 预估控制系统性能,具有了内模控制结构及内模控制的全部优点。

## 2 免疫内模控制器设计

### 2.1 免疫系统的反馈机理

免疫是生物体的一种特性生理反应,可以通过免疫反馈机理对抗原的快速反应和稳定免疫系统来完成<sup>[1-9]</sup>。

### 2.2 免疫 P 控制

根据免疫系统  $T$  细胞的反馈调节机理,设第  $\tau$  代的抗原数量为  $\varepsilon(\tau)$ ,由抗原刺激的  $T_H$  细胞的输出为  $T_H(\tau)$ ,  $T_S$  细胞对  $B$  细胞的影响为  $T_S(\tau)$ ,则  $B$  细胞接收的总刺激为<sup>[1,9]</sup>

$$S(\tau) = T_H(\tau) - T_S(\tau) \quad (11)$$

$$T_H(\tau) = k_1 \varepsilon(\tau), T_S(\tau) = k_2 f[\Delta S(\tau)] \varepsilon(\tau) \quad (12)$$

若以抗原的数量  $\varepsilon(\tau)$  作为偏差  $e(\tau)$ ,  $B$  细胞接收的总刺激  $S(\tau)$  作为控制输入  $u(\tau)$ ,将式(12)代入式(11),则有如下反馈控制规律:

$$u(\tau) = [k_1 - k_2 f(\Delta u(\tau))] e(\tau) = K[1 - \eta f(\Delta u(\tau))] e(\tau) = k_{p1} e(\tau) \quad (13)$$

其中,  $k_{p1} = K[1 - \eta f(\Delta u(\tau))]$ ;  $K = k_1$  为增益,控制系统反应速度系数;  $\eta = k_2/k_1$  为控制稳定效果;  $f(\cdot)$  为一选定的非线性函数。与常规 PID 控制器对比就可发现,基于免疫反馈控制机理的控制器实质上是一个非线性比例控制器 P,其比例增益为  $k_{p1}$ ,随着控制器输出的变化而变化。控制器的性能很大程度上依赖于参数  $K$ 、 $\eta$  和非线性函数  $f(\cdot)$  的选取。

### 2.3 免疫 Smith 内模控制

将免疫控制和 Smith 内模控制器结合起来,由式(10)(13)就可得免疫 Smith 内模控制器:

$$G_c(s) = \frac{1}{\lambda} \left( \frac{\tau_m}{k_m} + \frac{1}{k_m s} \right) = k_{p1} \left( \frac{\tau_m}{k_m} + \frac{1}{k_m s} \right) \quad (14)$$

令  $k_{p1} = \frac{1}{\lambda} = K[1 - \eta f(\Delta u(\tau))]$ , 而  $k_{p1}$  则正是免

疫 P 控制器的比例环节,自动完成内模控制器滤波器系数  $\lambda$  的在线调整,即形成免疫 Smith 内模控制。

### 2.4 $T$ 细胞调节作用函数

$T$  细胞在免疫响应过程中起着很关键的作用,根据免疫系统与控制系统的类比,详细探讨免疫响应过程中抗原浓度变化对抗体产生的影响,取:

$$f(\Delta u) = 1 - \exp(-\Delta u^2/a) \quad (15)$$

无论  $a$  取何值,对于非线性函数  $f(\Delta u)$  都存在  $0 < f(\Delta u) < 1$ 。 $a$  的取值决定了  $f(\Delta u)$  的输入/输出关系以及  $f(\Delta u)$  曲线的形状, $a$  越大  $f(\Delta u)$  曲线越平滑。

### 3 主汽温控制系统控制器设计

主汽温控制系统通常采用串级控制,副回路通常采用比例 P 控制,被控对象模型引用于文献[10]中,导前区传递函数  $G_1(s) = 32 / (8.26s + 1)^2$ ,惰性区传递函数  $G_2(s) = 0.85 / (20.65s + 1)^3$ ,副回路比例控制器为  $k_p = 0.05$ ,将副回路及惰性区传递函数通过曲线拟合得广义被控对象:

$$G(s) = \frac{0.845}{30s + 1} e^{-40s} \quad (16)$$

后面内模控制以及免疫内模控制仿真中以此对象进行设计。免疫内模控制器实现结构图如图3所示(图中,  $1/z$  为延迟单元),相当于图2中的  $G_1(s)$ 。图3中免疫内模控制器虚线框实现免疫 P 的作用,相当于实现  $k_{pi} = K[1 - \eta f(\Delta u(\tau))] = 1/\lambda$  的作用。图中,  $f(\Delta u)$  按式(15)设计。

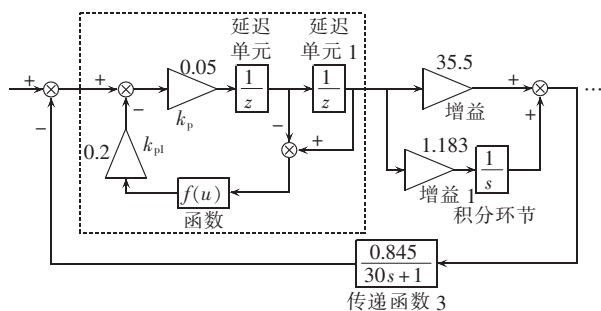


图3 免疫内模控制器结构图

Fig.3 Structure of immune internal model controller

### 4 仿真研究

根据内模控制器设计式(5),内模控制经过试凑,取控制器滤波器系数  $\lambda = 10$ ,则内模控制器为

$$G_1(s) = \frac{30s + 1}{0.845} \frac{1}{\lambda s + 1} = (35.5s + 1.18) \frac{1}{10s + 1}$$

免疫内模控制方式经过试凑,参数整定为  $K = 0.05$ ,  $\eta = 0.2$ ,  $a = 100$ 。由式(10)(14)(15)(16),按图3所示的内模控制结构,在给定阶跃及扰动阶跃输入下,进行仿真研究。

图4、5中,实线为免疫内模控制,虚线为内模控制;下同。从给定阶跃响应仿真曲线可以看出,免疫内模控制的响应平稳,调节速度远快于内模控制,超调量小。对于外部扰动输入,免疫内模控制同样从调

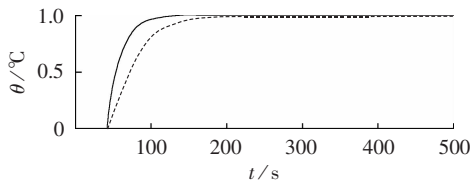


图4 给定阶跃响应时系统的仿真对比

Fig.4 Simulated system response to step change of input

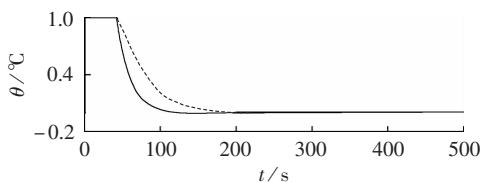


图5 加入扰动阶跃信号时的仿真对比

Fig.5 Simulated system response to step change of disturbance

节时间、自平衡能力上好于内模控制。

将对象的比例增益  $k$ 、惯性时间常数  $\tau$ 、延迟时间常数  $\tau_y$ ,分别增大或减小5%,内模控制和本文设计的免疫内模控制的仿真曲线对比如图6~11所示。从仿真曲线对比可见,不论哪一参数的增大或减

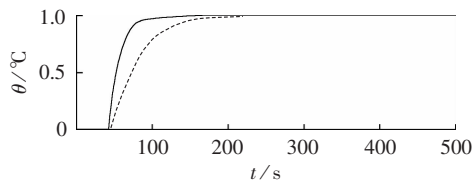


图6 延迟时间常数增加5%时的仿真曲线

Fig.6 Simulated system response to 5% increase of delay time

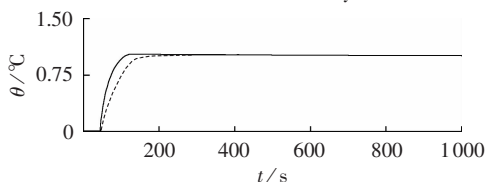


图7 惯性时间常数  $\tau$  增加5%时的仿真曲线

Fig.7 Simulated system response to 5% increase of inertia time constant  $\tau$

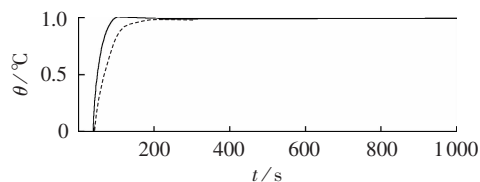


图8  $k$  增加5%时的仿真曲线

Fig.8 Simulated system response to 5% increase of proportional gain  $k$

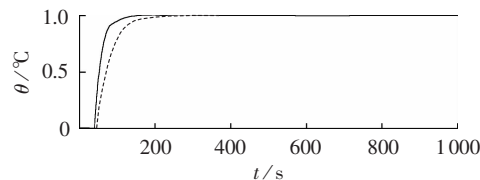


图9 延迟时间常数减小5%时的仿真曲线

Fig.9 Simulated system response to 5% decrease of delay time

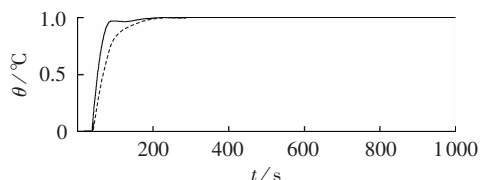


图10  $\tau$  减小5%时的仿真曲线

Fig.10 Simulated system response to 5% decrease of inertia time constant  $\tau$

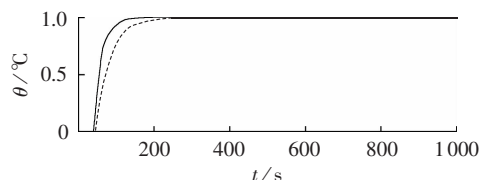


图 11  $k$  减小 5 % 时的内扰仿真曲线  
Fig.11 Simulated system response to 5 % decrease of proportional gain  $k$

小,所设计的免疫内模控制都较内模控制响应快,调节时间短,平稳性、鲁棒性和稳态性能好等。

## 5 结论

本文针对主汽温系统数学模型的特点,设计了基于免疫反馈原理的免疫内模控制器,充分发挥内模控制的鲁棒性,同时利用免疫反馈控制的快速性和免疫稳定性,实时调整内模控制器的滤波器时间常数,有效克服了内模控制固定滤波器时间常数情况下鲁棒性和快速性之间的矛盾。仿真实验表明不论是外扰还是内扰,免疫内模控制都比内模控制响应更快,超调量小,系统的鲁棒性、适应性更好,而且结构简单,控制精度高,易于实现。

## 参考文献:

- [1] 谈英姿,沈炯,吕震中. 免疫 PID 控制器在汽温控制系统中的应用研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(10):148-152.  
TAN Yingzi, SHEN Jiong, LÜ Zhenzhong. Study of immune PID controller for superheated steam temperature control system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10): 148-152.
- [2] 郑恩让,张玲. 内模控制在造纸生产定量控制中的应用[J]. 化工自动化及仪表,2001,28(3):23-24.  
ZHENG Enrang, ZHANG Ling. IMC and its application to the paper basis weight control[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2001, 28(3): 23-24.
- [3] 尚继良,王晓燕,蒋金星. 内模控制滤波器时间常数模糊自整定及其应用[J]. 化工自动化及仪表,2008,35(2):7-9.  
SHANG Jiliang, WANG Xiaoyan, JIANG Jinxing. Fuzzy self-adjusting of filter time constant of internal model control and app-

lication[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2008, 35(2): 7-9.

- [4] 丁永生,任立红. 人工免疫系统理论与应用[J]. 模式识别与人工智能,2000,13(1):52-59.  
DING Yongsheng, REN Lihong. Principles and application of artificial immune systems[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2000, 13(1): 52-59.
- [5] 莫宏伟,左兴权,毕晓君. 人工免疫系统研究进展[J]. 智能系统学报,2009,4(1):21-29.  
MO Hongwei, ZUO Xingquan, BI Xiaojun. Advances in artificial immune systems[J]. Caa Transactions on Intelligent Systems, 2009, 4(1): 21-29.
- [6] 张卫东,何星,许晓鸣. 自衡和非自衡时滞对象 Smith 预估器解析设计[J]. 自动化学报,2000,26(4):485-490.  
ZHANG Weidong, HE Xing, XU Xiaoming. Smith predictor design for self-regulating and non-self-regulating plants[J]. Acta Automatica Sinica, 2000, 26(4): 485-490.
- [7] 彭道刚,杨平,王志萍,等. 火电厂主汽温控制系统的免疫 PID 串级控制[J]. 动力工程,2005,25(2):234-238.  
PENG Daogang, YANG Ping, WANG Zhiping, et al. Immune PID cascade control of fresh steam temperature control of fresh steam temperature control system in fossil-fired power plant[J]. Power Engineering, 2005, 25(2): 234-238.
- [8] 丁永生,任立红. 一种新颖的模糊自调整免疫反馈控制系统[J]. 控制与决策,2000,15(4):443-446.  
DING Yongsheng, REN Lihong. A new fuzzy self-tuning immune feedback control system[J]. Control and Decision, 2000, 15(4): 443-446.
- [9] 刘久斌,李德桃. 电厂锅炉燃烧系统的模糊免疫 PID 控制[J]. 动力工程,2005,25(5):673-675.  
LIU Jiubin, LI Detao. Fuzzy-immune control of combustion systems of utility boilers[J]. Power Engineering, 2005, 25(5): 673-675.
- [10] 常趁,罗嘉. 基于 Matlab 的主汽温系统中控制策略分析[J]. 计算机仿真,2004,21(8):169-171.  
CHANG Chen, LUO Jia. Analysis of control programs in main steam temperature system based on Matlab[J]. Computer Simulation, 2004, 21(8): 169-171.

(编辑: 汪仪珍)

## 作者简介:

袁桂丽(1971-),女,内蒙古赤峰人,副教授,博士研究生,主要从事信息控制、先进控制策略及其在电站控制中的应用研究(E-mail: guili\_yuan@163.com)。

## Immune internal model control and its application in superheated steam temperature system

YUAN Guili, LIU Jizhen, NIU Yuguang

(Control and Computer College, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** To improve the control effect, the controller combining internal model control and immune feedback control is applied, instead of traditional PID controller, to the superheated steam temperature system of power plant, which effectively mitigates the contradiction between the robustness and the rapidity of the fixed time constant of internal model filter and better adapts to the parameter change. The responses of immune internal model controller and internal model controller to following changes are simulated: step change of input signal, step change of disturbance, 5 % increase or decrease of delay time, 5 % increase or decrease of inertia time constant, and 5 % increase or decrease of proportional gain. The simulative results show that the performance of immune internal model controller is superior to that of internal model controller.

This work is supported by the 863 Project of Ministry of Science and Technology(2007AA04Z163).

**Key words:** immune control; Smith predictor control; internal model control; superheated steam temperature; power plant