

## 循环流化床锅炉燃烧系统的自抗扰控制器优化设计

陈世和<sup>1</sup>, 张玉文<sup>2</sup>, 李东海<sup>3†</sup>, 老大中<sup>2</sup>

(1. 广东电网公司 电力科学研究院 热工所, 广州 510080; 2. 北京理工大学 宇航学院, 北京 100081;

3. 电力系统国家重点实验室; 清华大学 热能工程系, 北京 100084)

**摘要:** 循环流化床锅炉燃烧系统是典型的具有非线性、大滞后、强耦合特性的系统, 很难建立准确的数学模型, 常规的控制方法难以取得良好的控制效果. 自抗扰控制器具有结构简单, 不依赖被控对象具体模型等优点, 易于工业现场应用. 本文为某国产75 t/h循环流化床锅炉燃烧系统设计自抗扰控制器, 使用非支配排序果蝇算法对控制器参数进行基于ITAE指标、调节时间和最大控制量的多目标优化. 用所设计控制器进行仿真研究, 并与非优化的自抗扰控制器和基于预期动态的PI控制器进行比较. 结果表明, 所设计控制器效果最优, 可以更有效地对通道间的耦合进行估计和补偿, 具有更强的解耦能力.

**关键词:** 循环流化床锅炉燃烧系统; 自抗扰控制器; 解耦控制; 多目标优化; 非支配排序果蝇算法

中图分类号: TK323 文献标识码: A

## Optimized active disturbance rejection controller design for circulating fluidized bed boiler combustion system

CHEN Shi-he<sup>1</sup>, ZHANG Yu-wen<sup>2</sup>, LI Dong-hai<sup>3†</sup>, LAO Da-zhong<sup>2</sup>

(1. Guangdong Power Grid Corporation, Power Test and Research Department, Institute of Engineering Thermo-physics, Guangzhou Guangdong 510080, China;

2. Beijing Institute of Technology, School of Aerospace Engineering, Beijing 100081, China;

3. State Key Lab of Power Systems; Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The control of circulating fluidized bed boiler (CFBB) combustion system is studied. CFBB is a nonlinear system, which has large time delay and coupling and is difficult to establish accurate mathematical model. Therefore, conventional control method can hardly achieve effective control. The active disturbance rejection controller(ADRC) has simple structure and does not rely on accurate model of plant. In this paper, ADRC is designed for a domestic 75t/h CFBB. Multi-objective optimization algorithm(non-dominated sorting fruit fly algorithm) is applied to optimize the controller parameters using the ITAE index, the response time as well as the maximum of the control energy. Simulation results show that the optimized ADRC can effectively estimate and compensate the loop coupling, leading to the strong decoupling ability.

**Key words:** circulating fluidized bed boiler combustion system; active disturbance rejection controller; decoupling control; multi-objective optimization; non-dominated sorting fruit fly algorithm

### 1 引言(Introduction)

#### 1.1 循环流化床锅炉燃烧系统及控制方法 (Control of circulating fluidized bed boiler combustion system)

循环流化床锅炉(circulating fluidized bed boiler, CFBB)燃烧技术是目前广泛使用的洁净煤技术之一. 该技术的突出特点包括燃烧效率高, 可燃用劣质煤种, 可在燃烧过程中直接脱硫等. 考虑到我国煤炭资源分布极不均匀, 优质煤比例较少, 且煤中含硫量较高<sup>[1]</sup>, 使用循环流化床锅炉对于提高我国煤炭资源的利用率, 减轻环境污染意义重大.

循环流化床锅炉与常规煤粉炉的主要区别在于其燃烧系统. 前者的燃料处于流化态燃烧, 动态特性更为复杂, 增加了控制系统设计的难度. 目前, 已有很多学者对CFBB燃烧系统的建模和控制进行了研究. 文[2]研究了燃烧系统的流体动力学特性和传热特性, 以微分方程形式给出了系统稳态模型; 文[3]则基于燃烧系统中物质和能量的动态平衡关系并通过系统辨识方法, 给出了燃烧系统的传递函数矩阵模型. 基于前人的建模工作, 文[4]用BP神经网络对PID参数进行在线优化, 对燃烧系统的非线性具有一定的自适应能力; 文[5]用最小二乘支持向量机原理建立被控对象的

非线性逆模型,实现了燃烧系统的解耦控制.上述研究成果虽然改善了传统PID方法的控制效果,但模糊控制和神经网络算法存在计算繁琐、耗时长弊端.最小二乘支持向量机方法则依赖于对象的精确模型,对于模型参数具有时变性的燃烧系统,在变负荷情况下并不能获得理想的控制效果.

先进控制算法由于结构复杂、计算量大等特点而难以用于工程实践,是控制领域的一个难题.基于此,文[6]提出自抗扰控制器(active disturbance rejection controller, ADRC).在ADRC框架中,干扰、耦合、模型误差等被看作一个外部状态变量用状态观测器来估计得到<sup>[7]</sup>.利用这个额外的信息,对象被简化成一个简单的串联积分形式.这种设计思想,使得自抗扰控制器可以不依赖于对象模型,具有很强的抗干扰能力、解耦能力和鲁棒性<sup>[8-9]</sup>.因此,本文用ADRC作为CFBB燃烧系统的控制器并进行仿真研究.

### 1.2 多目标优化算法(Multi-objective optimization algorithm)

计算机优化算法的本质思想,是使用代码语言描述自然界的进化过程,通过亲子繁殖、精英保留、物种迁徙等等类似自然界进化的方法,把仿生学、进化论的思想应用到抽象的数学模型上,从而通过计算机自动寻找最优解.

文献[10]中提出的果蝇算法具有代码简单,执行效率高,具有很好的鲁棒性等优点,在很多领域得到运用<sup>[11-12]</sup>.果蝇算法原理如图1所示.

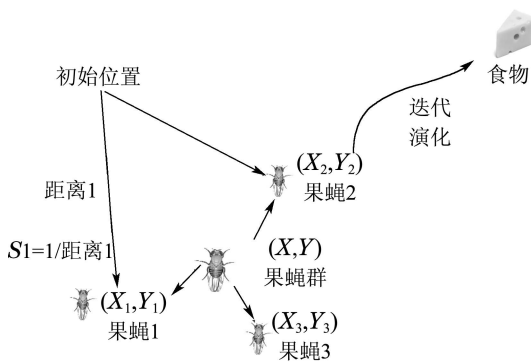


图1 果蝇优化算法原理  
Fig. 1 Fruit fly optimization algorithm

图中,  $S1$ 代表位置浓度,其值为距离1的倒数,将位置浓度作为种群个体的属性值代入目标函数计算,是果蝇算法区别于其他算法最显著的特点<sup>[11]</sup>.

传统的优化算法,使用单一目标作为优化对象,目标明确,可以得到该目标下的准最优解,但单目标优化往往牺牲掉其他指标,因此得到的结果存在着只满足一个目标,但其他指标效果较差的问题.在此情况下,多目标优化算法应运而生.

Pareto最优概念由法国经济学家Pareto于1896年

提出<sup>[11]</sup>,它是建立在集合论基础上对多目标解的一种向量评估方式. Pareto概念定义了个体的支配关系概念,在理论上对多目标最优进行了定义. 1994年, Srinivas N.和Deb K.将Pareto最优概念首次用代码实现,提出了非支配排序遗传算法,并于文[13]中对以上算法进行改进,提出了NSGA-算法.

本文将文[10]中果蝇算法与Pareto最优概念结合,并参考文[13]中非支配排序思想,设计多目标优化果蝇算法,运用于CFB燃烧模型ADRC控制器参数整定中.并与文[13]中提出的非优化的自抗扰控制器和基于预期动态的PI控制器进行比较.

## 2 循环流化床锅炉燃烧系统模型(CFBB combustion system)

CFBB燃烧系统的主要控制目标是,在锅炉安全运行的前提下,使燃料燃烧提供的热量与锅炉对蒸汽负荷的需求相适应.为此,需要控制以下5个变量在合理的范围内保持稳定,分别是:锅炉床温、主汽压力、炉膛负压、烟气含氧量和料层差压.对于后三个变量,其控制方案比较成熟,使用传统的PID控制器即可取得有效地控制.而锅炉床温和主汽压力则是两个互相耦合的变量,二者同时受到给煤量和送风量的影响(送风量包括一次风量和二次风量,前者占主导作用).因此,在进行控制方案设计时,可将燃烧系统简化为以给煤量和一次风量为输入,以锅炉床温和主汽压力为输出的2入2出系统,如图2所示.

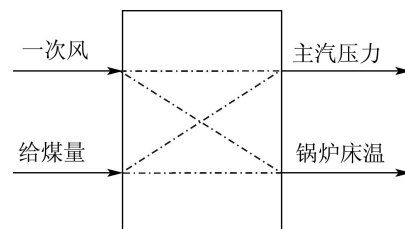


图2 CFBB燃烧系统简化模型  
Fig. 2 Diagram of combustion system

CFBB燃烧系统控制主汽压力的意义在于主汽压力的变化反映了负荷需求的变化.而锅炉床温则决定了锅炉是否能安全稳定地运行.通常情况下,CFBB的床温应该限制在850°C~950°C之间,在该温度区间内,脱硫效率最高,且可有效抑制氮氧化物的产生.床温过高容易导致炉膛料床结焦,过低将影响锅炉出力、甚至熄火<sup>[14]</sup>.

文[15]给出了CFBB燃烧系统的传递函数矩阵:

$$\begin{bmatrix} P(s) \\ T(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{5}{(1+80s)^3} e^{-40s} & \frac{4}{(1+150s)^3} e^{-100s} \\ \frac{-3}{(1+80s)} e^{-50s} & \frac{5}{(1+100s)^2} e^{-60s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(s) \\ M(s) \end{bmatrix}$$

其中:  $P$  为主气压力,  $T$  为床层温度,  $V$  为一次风量,  $M$  为给煤量.

首先, 做出 CFBB 燃烧系统的开环单位阶跃响应曲线, 如图 3 所示.

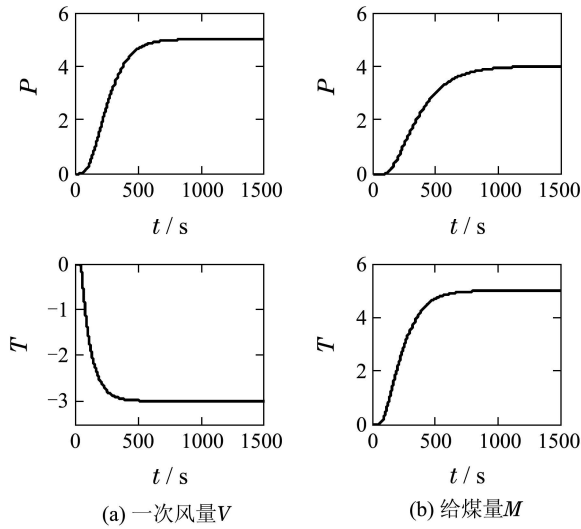


图 3 CFBB 燃烧系统开环单位阶跃响应曲线

Fig. 3 Open loop step response of CFBB combustion system

由图 3 可知, 由于纯滞后和大惯性环节的存在, CFBB 燃烧系统中两回路对象的响应速度都十分缓慢, 在 103 s 数量级才能达到稳定. 因此, 所设计控制器应能有效地处理纯滞后和大惯性环节, 使系统输出快速平稳地跟踪设定值的变化. 同时, 强耦合的存在, 要求控制系统具有一定的解耦能力, 增加了控制难度.

### 3 ADRC 解耦控制器设计及参数优化 (Design of decoupling ADRC controller and parameter optimization)

#### 3.1 ADRC 解耦控制器原理 (Design of decoupling ADRC controller)

使用 Bristol 的 RGA 方法将多变量系统进行输入输出配对, 使其具有对角优势, 可将系统传递函数矩阵写为如下形式:

$$G(s) = G_0(s) + \Delta G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & G_{22}(s) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & G_{nn}(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & G_{12}(s) & \cdots & G_{1n}(s) \\ G_{21}(s) & 0 & \cdots & G_{2n}(s) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{n1}(s) & G_{n2}(s) & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

针对式(1)中的  $G_{11}(s), G_{22}(s), \dots, G_{nn}(s)$  分别设计 ADRC 控制器  $C_1(s), C_2(s), \dots, C_n(s)$ , 即控制

器的  $n \times n$  维传递函数阵  $C(s)$  可表示为

$$C(s) = \begin{bmatrix} C_1(s) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & C_2(s) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & C_n(s) \end{bmatrix} \quad (2)$$

在设计控制器时, 仅考虑主对角元素的传递函数  $G_{11}(s), G_{22}(s), \dots, G_{nn}(s)$ , 将非主对角元素即系统的耦合当作干扰处理, 实现分散控制. 系统示意图如图 4 所示.

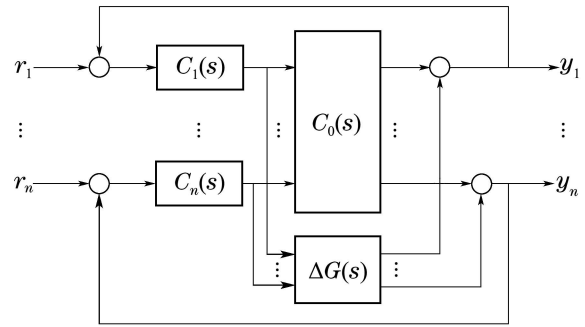


图 4 ADRC 解耦控制示意图

Fig. 4 Diagram of decoupling ADRC system

经典的 ADRC 包含跟踪微分器、扩张状态观测器 (extended state observer, ESO) 以及非线性状态误差反馈控制率, 本文所使用的是参数化的线性 ADRC<sup>[16]</sup>.

对已进行输入输出配对的多变量系统来说, 其中一个通道的输出有如下表达式:

$$Y_i(s) = Y_{i1}(s) + Y_{i2}(s) + \cdots + Y_{ii}(s) + \cdots + Y_{in}(s) = G_{i1}(s)U_1(s) + \cdots + G_{ii}(s)U_i(s) + \cdots + G_{in}(s)U_n(s) = D(s) + G_{ii}(s)U_i(s), \quad (3)$$

其中  $D(s)$  可看成是系统耦合带来的扰动. 假设  $Y_{ii}(s) = G_{ii}(s)U_i(s)$  构成的系统最高阶为  $m$  阶, 并考虑其中的时滞, 写成时域表达式有

$$a_{ii,m}y_{ii}^{(m)}(t) + a_{ii,m-1}y_{ii}^{(m-1)}(t) + \cdots + a_{ii,0}y_{ii}(t) = b_{ii,m'}u_i^{(m')}(t - \tau_{ii}) + b_{ii,m'-1}u_i^{(m'-1)}(t - \tau_{ii}) + \cdots + b_{ii,0}u_i(t - \tau_{ii}). \quad (4)$$

将式(4)改写为

$$\ddot{y}_{ii}(t) = \left[ \frac{1}{a_{ii,2}}(-a_{ii,m}y_{ii}^{(m)}(t) - a_{ii,m-1}y_{ii}^{(m-1)}(t) - \cdots - a_{ii,0}y_{ii}(t) + b_{ii,m'}u_i^{(m')}(t - \tau_{ii}) + b_{ii,m'-1}u_i^{(m'-1)}(t - \tau_{ii}) + \cdots + b_{ii,0}u_i(t - \tau_{ii})) - b_{ii,0}u_i(t) \right] + b_{ii,0}u_i(t), \quad (5)$$

其中  $f(\cdot)$  可看成是主对角元素中的扰动.

同理, 设 $Y_{in}(s) = D(s)$ , 由于不需要知道耦合的具体时域表达式, 仅将其简记为

$$\ddot{y}_{in}(t) = d(\cdot). \quad (6)$$

联立式(3)(5)-(6)得

$$\ddot{y}_i(t) = f(\cdot) + d(\cdot) + b_i u_i(t). \quad (7)$$

为实时的抵消掉 $f(\cdot)$ 与 $d(\cdot)$ 给系统带来的影响, 将多变量系统变成具有积分串联型主对角元素的无耦合系统, 采用三阶ESO来估计总扰动信号. 其数学表达式为

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_i \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix} (y - z_1), \quad (8)$$

其中: 控制信号 $u$ 、系统输出 $y$ 为ESO的输入;  $z_1, z_2$ 与 $z_3$ 为ESO的输出, 分别估计系统输出 $y$ 、系统输出的导数 $\dot{y}$ 和总扰动信号;  $\beta_1, \beta_2$ 和 $\beta_3$ 为ESO的可调参数, 根据参数化的整定方法, 有

$$\beta_1 = 3\omega_o, \beta_2 = 3\omega_o^2, \beta_3 = \omega_o^3, \quad (9)$$

其中 $\omega_o$ 为观测器带宽.

在此基础上, 设计线性状态误差反馈控制律, 即

$$u_i(t) = \frac{1}{b_i} [(r(t) - z_1)\omega_c^2 - z_2 k_d \omega_c - z_3], \quad (10)$$

其中:  $\omega_c$ 为控制器带宽,  $k_d$ 为预期动态调整系数,  $r(t)$ 为系统设定值.

将式(10)代入式(7)得

$$\ddot{y}_i(t) = f(\cdot) + d(\cdot) + (r(t) - z_1)\omega_c^2 - z_2 k_d \omega_c - z_3. \quad (11)$$

若ESO准确整定, 则有

$$z_1 \approx y_i, z_2 \approx \dot{y}_i, z_3 \approx f(\cdot) + d(\cdot). \quad (12)$$

联立式(11)-(12)得

$$\ddot{y}_i(t) = (r(t) - y_i)\omega_c^2 - \dot{y}_i k_d \omega_c. \quad (13)$$

将式(13)转换为传递函数形式有

$$\frac{Y_i(s)}{R_i(s)} = \frac{\omega_c^2}{s^2 + k_d \omega_c s + \omega_c^2}, \quad (14)$$

此为ADRC的预期响应.

综上所述, 可得ADRC的结构如图5所示.

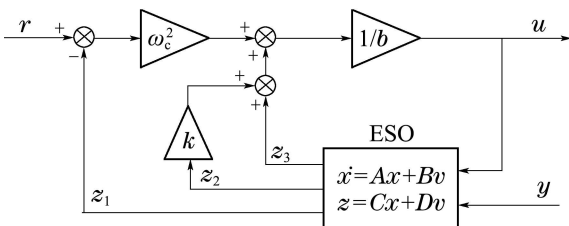


图5 ADRC控制器结构  
Fig. 5 Diagram of ADRC

图5中:  $r$ 是参考输入,  $u$ 是控制量,  $y$ 是系统输出,  $k_d, \omega_c, \omega_o, b$ 是4个待整定参数,  $k = -k_d \times \omega_c$ , ESO表示为标准状态空间形式,  $\{A, B, C, D\}$ 分别为

$$\begin{aligned} A &= [-3 \times \omega_o \quad 1 \quad 0; -3 \times \omega_o^2 \quad 0 \quad 1; -\omega_o^3 \quad 0 \quad 0], \\ B &= [0 \quad 3 \times \omega_o; b \quad 3 \times \omega_o^2; 0 \quad \omega_o^3], \\ C &= [1 \quad 0 \quad 0; 0 \quad 1 \quad 0; 0 \quad 0 \quad 1], \\ D &= [0 \quad 0; 0 \quad 0; 0 \quad 0]. \end{aligned}$$

在整定ADRC的参数方面, 采用多目标果蝇优化算法.

### 3.2 多目标果蝇优化算法设计(Multi-objective fruit fly optimization algorithm)

多目标果蝇优化算法流程如图6所示.

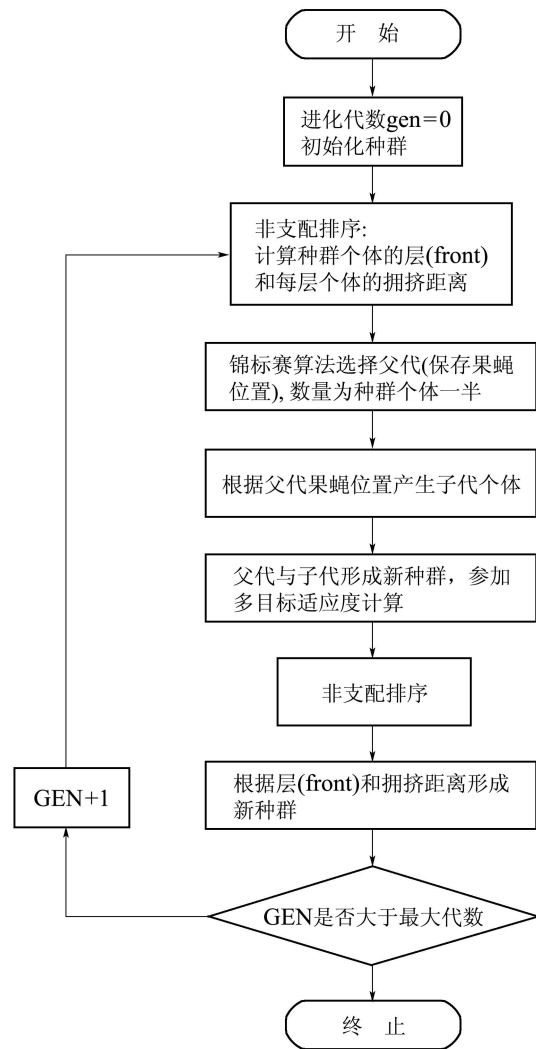


图6 多目标果蝇优化算法流程图  
Fig. 6 Flow chart of multi-objective fruit fly optimization algorithm

在本文中, 将每个通道中ITAE指标、调节时间和控制器输出最大值作为3个优化目标, 使用多目标果蝇算法进行优化. 设置种群大小为50, 优化代数为100代, 计算每一代种群个体各个指标的平均值, 优化过程如图7和图8所示.

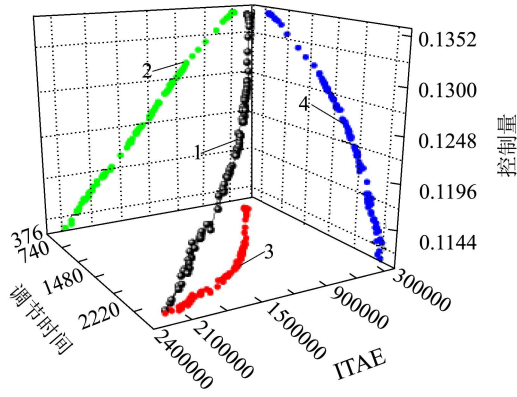


图 7 通道1优化轨迹

Fig. 7 Optimization result of loop1

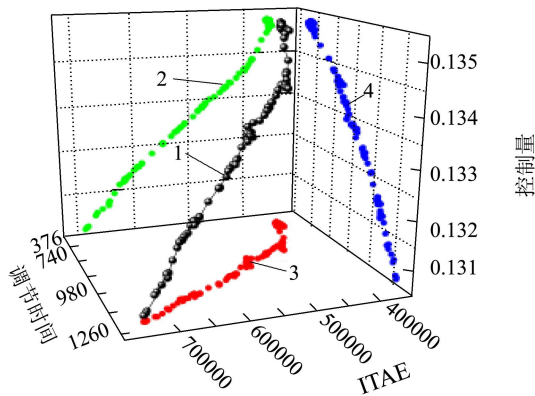


图 8 通道2优化轨迹

Fig. 8 Optimization result of loop2

图中, 三维空间坐标分别表示调节时间 $T$ 、ITAE 指标和控制量最大值. 点集1为优化过程中每一代种群的平均性能指标分布, 即优化轨迹. 点集2, 3, 4分别为优化轨迹在三维空间的投影.

多目标优化算法的结果, 是得到一组互不支配, 但整体表现优秀的种群. 本文从优化结果中, 任意选取一组最终优化自抗扰控制器 (optimized active disturbance rejection controller, OADRC) 参数见表1.

表 1 控制器ADRC参数

Table 1 Controller parameters

通道	$(b, \omega_o, \omega_c, k_d)$
通道1	(0.4001, 0.4803, 0.0750, 15.8891)
通道2	(0.2048, 0.4201, 0.0599, 14.5823)

#### 4 仿真研究(Simulation study)

对于CFBB燃烧系统模型, 文[17]为其设计了ADRC控制器和基于预期动态(desired dynamic equation, DDE)的PI控制器. 将本文优化得到的ADRC控制器用于该模型进行仿真研究, 并与上述两种方法进行比较.

#### 4.1 压力回路设定值阶跃实验(Setpoint change in pressure loop)

在 $t = 0$ s时, 为系统的压力回路加入单位阶跃的设定值 $r_1 = 1$ , 图9给出了3种控制算法下该回路的输出响应曲线, 以及引起温度回路发生的变化曲线.

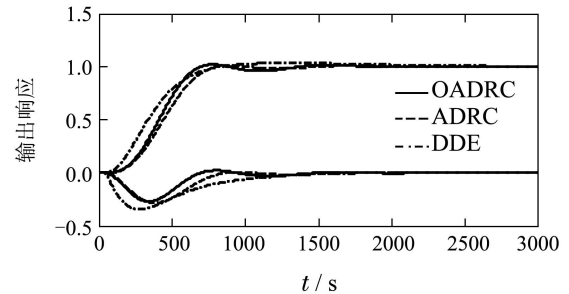


图 9 压力回路输出响应曲线

Fig. 9 Output response to setpoint change pressure loop

#### 4.2 温度回路设定值跟踪实验(Setpoint change in temperature loop)

在 $t = 0$ s时, 为系统的温度回路加入单位阶跃的设定值 $r_2 = 1$ , 图10给出了3种控制算法下该回路的输出响应曲线, 以及引起压力回路发生的变化曲线.

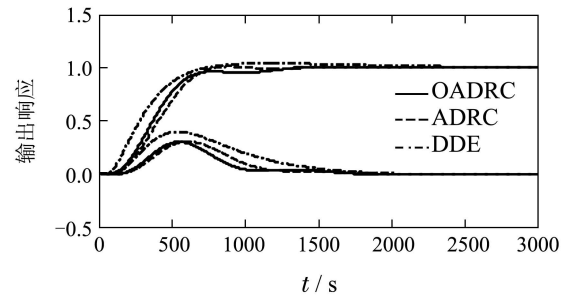


图 10 温度回路输出响应曲线

Fig.10 Output response to setpoint change tempreature loop

图中, 实线为本文所设计控制器的仿真曲线, 点横线是基于预期动态的PI控制器的仿真曲线, 虚线是未经优化的ADRC控制仿真曲线. 可知, 在基于多目标果蝇优化算法的自抗扰控制器作用下, 系统的解耦性能达到最优, 同时输出响应速度较快, 无明显超调.

#### 5 结论(Conclusions)

本文为循环流化床锅炉燃烧系统设计自抗扰控制器, 以ITAE指标, 调节时间和控制量作为优化目标, 使用非支配排序果蝇算法对控制器参数进行优化. 自抗扰控制器可以对多变量系统回路间的耦合以及模型不确定性等进行估计和补偿. 在仿真研究中, 将所设计优化控制器与非优化的ADRC控制器和基于预期动态的PI控制器进行比较. 结果表明, 所设计优化控制器具有最优的解耦能力, 同时输出响应速度较快, 无明显超调. 所设计控制器结构简单, 不依赖于对象精确模型, 便于工业现场应用.

## 参考文献(References):

- [1] 马素霞, 杨献勇. 循环流化床锅炉燃烧系统的动态特性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 1 – 6.  
(MA Suxia, YANG Xianyong. Study on dynamic behavior of the combustion system of a circulating fluidized bed boiler [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2006, 26(9): 1 – 6.)
- [2] WANG Q, LUO Z, LI X, et al. A mathematical model for a circulating fluidized bed (CFB) boiler [J]. *Energy*, 1999, 24(7): 633 – 653.
- [3] ZHANG Y F, HE H J, ZHU H B. Multivariable control strategy for combustion system of circulating fluidized bed boiler [C] // *Power and Energy Engineering Conference. Shanghai*. Shanghai: IEEE, 2012: 1 – 4.
- [4] ZHAO X, LIU C, SONG X, et al. Application and simulation of neural nets in combustion system of circulating fluidized bed boiler [C] // *Seventh International Conference on Natural Computation (ICNC)*. Shanghai: IEEE, 2011: 79 – 82.
- [5] LIU L, WANG H, WANG H L. Adaptive decoupling control systems based on SVM for large supercritical CFB boilers combustion system [C] // *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Beijing: IEEE, 2012: 3401 – 3406.
- [6] 韩京清. 自抗扰控制技术 [J]. 前沿科学, 2007, 1(1): 24 – 31.  
(HAN Jingqing. Auto disturbance rejection control technique [J]. *Frontier Science*, 2007, 1(1): 24 – 31.)
- [7] 黄一, 张文革. 自抗扰控制器的发展 [J]. 控制理论与应用, 2002, 19(4): 485 – 492.  
(HUANG Yi, ZHANG Wenge. Development of active disturbance rejection controller [J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(4): 485 – 492.)
- [8] 阮久宏, 杨福广, 李贻斌. 车辆加速度自抗扰控制 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(9): 1189 – 1194.  
(RUAN Jiuhong, YANG Fuguang, LI Yibin. Active disturbance-rejection control in vehicle acceleration [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(9): 1189 – 1194.)
- [9] 王丽君, 童朝南, 李擎. 热连轧板宽板厚的实用自抗扰解耦控制 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29(11): 1471 – 1478.  
(WANG Lijun, TONG Chaonan, LI Qing. Active disturbance-rejection control in vehicle acceleration [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(11): 1471 – 1478.)
- [10] PAN W T. A new fruit fly optimization algorithm: taking the financial distress model as an example [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2012, 26(1): 69 – 74.
- [11] ZHANG Y W, LI D H, LAO D Z. Smith predictor in the DDE application [C] // *Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*. Taiyuan: IEEE, 2012: 2346 – 2351.
- [12] HAN J, WANG P, YANG X. Tuning of PID controller based on fruit fly optimization algorithm [C] // *Mechatronics and Automation (ICMA)*. Chengdu: IEEE, 2012: 409 – 413.
- [13] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182 – 197.
- [14] 郝玉春, 李东海. 谭文. 循环流化床燃烧系统的PID控制器设计 [C] // 第31届中国控制会议. 安徽, 合肥: IEEE, 2012: 4580 – 4585.  
(HAO Yuchun, LI Donghai, TAN Wen. Design of the PID controller for circulating fluidized bed boiler combustion system [C] // *The 31st Chinese Control Conference (CCC)*. Hefei, Anhui: IEEE, 2012: 4580 – 4585.)
- [15] 席学军, 姜学智, 李东海, 等. 循环流化床锅炉燃烧系统的自抗扰控制 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(11): 1575 – 1579.  
(XI Xuejun, JIANG Xuezhi, LI Donghai, et al. Auto disturbance rejection control for circulating fluidized bed boiler combustion process [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2004, 44(11): 1575 – 1579.)
- [16] GAO Z. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C] // *Proceedings of the American Control Conference*. Minneapolis: IEEE, 2006: 4989 – 4996.
- [17] DONG J, LI D, ZHANG Y. Active disturbance rejection control for TITO systems [C] // *The 32nd Chinese Control Conference (CCC)*. Xi'an: IEEE, 2013: 5455 – 5460.

## 作者简介:

**陈世和** (1965–), 男, 高级工程师, 主要从事电厂生产过程自动化控制系统开发研究, E-mail: chen\_shi\_he@163.com;

**张玉文** (1986–), 男, 硕士研究生, 主要从事航天器姿态控制方面的研究, E-mail: great.mountain@foxmail.com;

**李东海** (1963–), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事复杂热工对象的控制及非线性系统控制等方面的研究, E-mail: lidongh@mail.tsinghua.edu.cn;

**老大中** (1957–), 男, 副教授, 主要从事控制理论分析及其工程化应用方面的研究, E-mail: laodazhong@tsinghua.org.cn.