

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2012.05.014

# 基于粒子群算法的锅炉主蒸汽压力模糊PID控制

汪阳华

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 采用模糊PID智能控制算法, 对锅炉主蒸汽压力进行控制, 建立锅炉主蒸汽压力控制的MATLAB/Simulink仿真模型, 编写基于MATLAB的粒子群程序优化模糊PID比例因子和量化因子, 并与模糊PID和常规PID控制算法进行比较。仿真结果表明: 与PID控制、模糊PID控制相比, 采用基于PSO优化的锅炉主蒸汽压力控制, 具有较强的适应性、鲁棒性和抗干扰性。

**关键词:** 模糊PID控制; 主蒸汽压力; 粒子群; MATLAB

**中图分类号:** TP273+.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2012)05-0062-05

## Fuzzy PID Control of Boiler Main Steam Pressure Based on PSO

Wang Yanghua

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** Applies fuzzy PID intelligent control algorithm to control boiler main steam pressure and sets up the MATLAB/Simulink simulation model. Writes MATLAB-based particle swarm program to optimize ratio factors and quantitative factors of fuzzy PID controller, and compares with the conventional PID control and fuzzy PID control. The simulation results show that the POS-based control algorithm has strong adaptability, robustness and anti-interference.

**Keywords:** fuzzy PID control; main steam pressure; PSO; MATLAB

## 0 引言

锅炉燃烧过程控制系统一般包括3个子控制系统, 即燃料控制系统、送风控制系统和引风控制系统。燃料控制系统通过调节进入炉膛的燃料量, 维持主蒸汽压力的稳定; 送风控制系统通过调节进入炉膛的送风量, 保持燃料燃烧所需要的空气量和燃烧过程的经济性; 引风控制系统通过调节引风量, 使送、引风量平衡, 保持炉膛压力的稳定。通过调节燃料控制系统维持主蒸汽压力的稳定对整个锅炉系统的运行起着重要作用, 因此, 控制主蒸汽压力的稳定具有重要意义。

常规PID控制的原理简单、稳定性好、可靠性高, 因此长期以来被广泛应用于工业过程控制。由于常规PID需要已知对象的精确数学模型, 在实际工业生产中, 大多数工业过程都不同程度地存在非线性参数时变性和模型不确定性, 而模糊控制不需要建立过程的精确模型。本文针对常规PID控制和模糊控制的各自特点, 将模糊控制与PID控制结合起来, 采用模糊PID控制策略对锅炉主蒸汽压力进行控制, 通过粒子群算法优化模糊PID比例因子和量化因子, 从而达到更好的控制效果。理论分析和仿真结果表明, 粒子群优化的模糊PID控制具有良好的控制性能<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2012-08-10

作者简介: 汪阳华(1985-), 男, 湖北黄石人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为复杂过程建模, 集成优化控制,

E-mail: wangyanghua.1215@163.com

# 1 模糊PID控制的原理

## 1.1 模糊控制原理及框图

模糊控制器是基于专家知识的控制器，它主要由3个部分组成：模糊化处理、模糊推理和解模糊。它将准确的输入量模糊化，以模糊规则来表达控制经验并形成规则库，通过模糊推理调用规则库中的经验知识，将输出量进行解模糊化处理，从而达到控制目的。

$k_p$  为比例系数， $k_i$  为积分系数， $k_d$  为微分系数，设  $k_p, k_i, k_d$  的待整定值为  $k'_p, k'_i, k'_d$ 。用模糊规则进行模糊推理得到  $k_p, k_i, k_d$  的整定值  $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 。利用PID参数整定计算公式得到此时PID控制器的参数。

PID参数  $k_p, k_i, k_d$  的计算公式如下：

$$k_p = k'_p + \Delta k_p, \tag{1}$$

$$k_i = k'_i + \Delta k_i, \tag{2}$$

$$k_d = k'_d + \Delta k_d, \tag{3}$$

再将由式(1)~(3)计算出的  $k_p, k_i, k_d$  代入式(4)计算

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt}. \tag{4}$$

模糊控制框图<sup>[2]</sup>如图1，其中  $e$  表示误差， $ec$  是误差变化率， $d/dt$  表示微分  $d(e)/dt$ ， $r(t)$  表示给定值， $u(t)$  表示被控量。

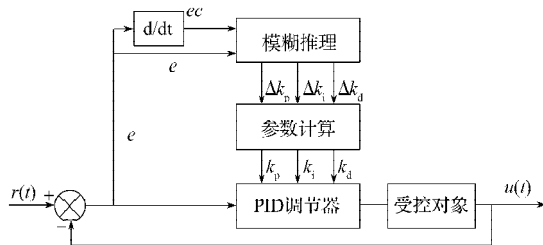


图1 模糊PID控制结构图

Fig. 1 The control structure of fuzzy PID

## 1.2 模糊PID控制的工作流程

在模糊PID过程中，计算机系统通过对模糊逻辑规则的结果进行处理、查表和运算，完成对PID参数的整定<sup>[3]</sup>。其工作流程如图2，其中  $e(k)$  表示误差， $y(k)$  表示输出， $r$  表示给定值。

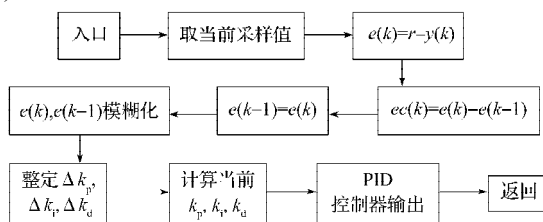


图2 模糊PID控制流程图

Fig. 2 Flow chart of fuzzy PID control

## 1.3 模糊PID控制器的设计

模糊控制器采用二维控制器，控制器中的2个输入量：误差  $e$  和误差变化率  $ec$  的论域为  $[-6,6]$ ，3个输出量： $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$  的论域为  $[-3,3]$ 。误差  $e, ec$  和  $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$  的模糊子集均由7个语言变量值组成，即{负大，负中，负小，零，正小，正中，正大}，一般用英文缩写为{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB}。

误差  $e$  和误差变化率  $ec$  的量化因子  $k_e$  和  $k_{ec}$ ，以及输出量  $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$  的比例因子  $k_1, k_2, k_3$ ，均根据实际情况在仿真器中选择合适的值。输入量  $e$  和  $ec$  的隶属度函数采用高斯函数，输出量  $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$  的隶属度函数采用三角形函数。

输入量  $e$  的隶属度函数如图3，输入量  $ec$  的隶属度函数与输入量  $e$  的隶属度函数相同。

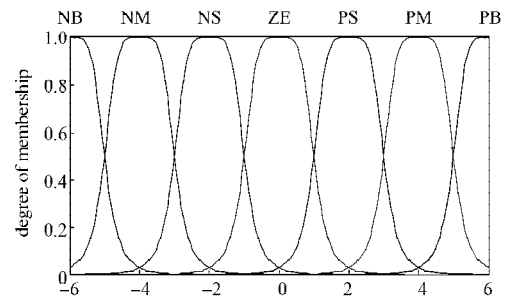


图3 输入量e的隶属度函数

Fig. 3 Membership function of input variables e

输出量  $\Delta k_p$  的隶属度函数如图4，输出量  $\Delta k_i, \Delta k_d$  的隶属度函数与输出量  $\Delta k_p$  相同。

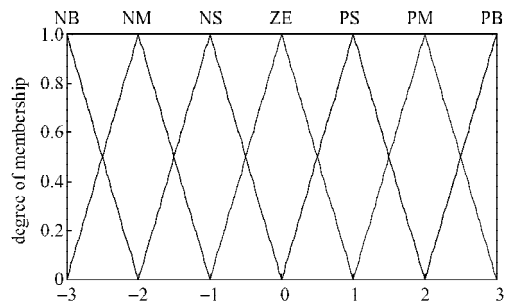


图4 输出量Δkp的隶属度函数

Fig. 4 Membership function of output variables  $\Delta k_p$

模糊控制的控制规则由实际工程经验总结而来，这些经验可用以下规则表示：

If  $e$  is NB and  $ec$  is NB, then  $\Delta k_p$  is PB,  $\Delta k_i$  is NB,  $\Delta k_d$  is PS;

If  $e$  is NB and  $ec$  is NM, then  $\Delta k_p$  is PB,  $\Delta k_i$  is NB,  $\Delta k_d$  is NS;

这些规则共49条，如表1~3所示。

表1  $\Delta k_p$ 的模糊规则  
Table 1 Fuzzy control rules of  $\Delta k_p$

$e$	$ec$						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZE	ZE
NS	PM	PM	PM	PM	ZE	NS	NS
ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZE	ZE	NM	NM	NM	NB	NB

表2  $\Delta k_i$ 的模糊规则  
Table 2 Fuzzy control rules of  $\Delta k_i$

$e$	$ec$						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	ZE
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZE	ZE
NS	NB	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
ZE	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZE	PS	PS	PM	PB
PM	ZE	ZE	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZE	ZE	PS	PM	PM	PB	PB

表3  $\Delta k_d$ 的控制规则  
Table 3 Fuzzy control rules of  $\Delta k_d$

$e$	$ec$						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NS	ZE	NS	NM	NM	NS	NS	ZE
ZE	ZE	NS	NS	NS	NS	NS	PB
PS	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

## 2 基于粒子群的模糊PID参数寻优

### 2.1 粒子群算法

粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 源于对鸟类捕食的研究, 是一种基于群体智能的优化算法, 由 Eberhart 和 Kennedy 于 1995 年提出。

粒子群算法的数学描述如下: 在一个  $n$  维的目标搜索空间中, 将每个粒子看成空间内的一个点, 设群体由  $m$  个粒子构成, 每个粒子坐标位置向量记为

$$\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}), i=1, 2, \dots, m;$$

速度向量记为

$$\mathbf{v}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in}), i=1, 2, \dots, m。$$

粒子搜索到的个体最优值记为

$$\mathbf{p}_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in}), i=1, 2, \dots, m;$$

整个粒子群搜索到的群体最优值记为

$$\mathbf{p}_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gn})。$$

位置迭代公式为

$$\mathbf{x}_{id}^{k+1} = \mathbf{x}_{id}^k + \mathbf{v}_{id}^{k+1}, d=1, 2, \dots, n; \quad (5)$$

式中  $k$  表示迭代次数。

速度迭代公式为

$$\mathbf{v}_{id}^{k+1} = \omega \mathbf{v}_{id}^k + c_1 r_1 (\mathbf{p}_{id} - \mathbf{x}_{id}^k) + c_2 r_2 (\mathbf{p}_{gd} - \mathbf{x}_{id}^k), \quad d=1, 2, \dots, n; \quad (6)$$

式中:  $\omega$  表示惯性权重;  $r_1, r_2$  为  $[0,1]$  之间的随机数;  $c_1, c_2$  为学习因子, 又称加速因子。

随着迭代次数的增加, 减小  $\omega$  的取值, 有利于在粒子的搜索能力和收敛速度之间取得平衡。  $\omega$  值计算公式为

$$\omega(k) = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min})k/k_{\max}, \quad (7)$$

式中:  $k_{\max}$  为最大迭代次数;  $\omega(k)$  为第  $k$  次迭代用的惯性权重;  $\omega_{\max}$  为初始权重;  $\omega_{\min}$  为最终权重。

一般地, 当惯性权重  $\omega_{\max}=0.9$ ,  $\omega_{\min}=0.4$  时算法性能较好。

粒子最大速度为  $\mathbf{v}_{\max}$ , 最小速度为  $\mathbf{v}_{\min}$ 。粒子速度不能过大或者过小, 太大会使粒子跳过最好解, 太小会导致对搜索空间的不充分搜索, 一般取粒子变化范围的 0.1~0.2 倍。位置的取值范围为  $x_{\min} \sim x_{\max}$ 。

速度迭代公式 (6) 的第二项是“认知”部分, 代表粒子对自身的学习能力; 第三项是“社会”部分, 代表种群中粒子间的相互协作。速度迭代公式 (6) 是根据粒子前一次迭代的速度、当前位置和自身最好的经验与种群最好经验之间的距离来更新速度。

粒子群优化算法的流程见图 5。

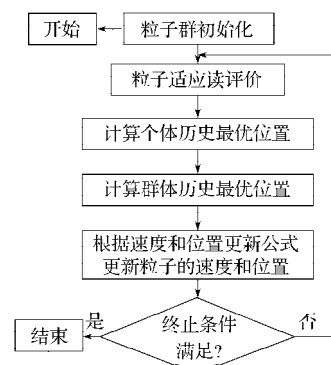


图5 粒子群算法流程图

Fig. 5 Flow chart of particle swarm optimization algorithm

### 2.2 粒子群算法优化模糊PID参数

在模糊控制系统中, 除了模糊规制对控制性能有影响外, 模糊控制器中的量化因子和比例因子均会影响模糊PID的控制效果。由于量化因子和比例因子的确定更多的是凭借人工经验, 难以获得一组最佳参数, 通过粒子群优化量化因子和比例因子可以

获得良好的控制效果。

模糊PID控制器的优化问题,需建立综合评价各项性能指标的目标函数,这里选择ITAE指标<sup>[4]</sup>,即

$$J = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (8)$$

粒子群优化模糊PID流程如图6,其中 $k_1, k_2, k_3$ 为比例因子,  $k_e, k_{ec}$ 为量化因子。

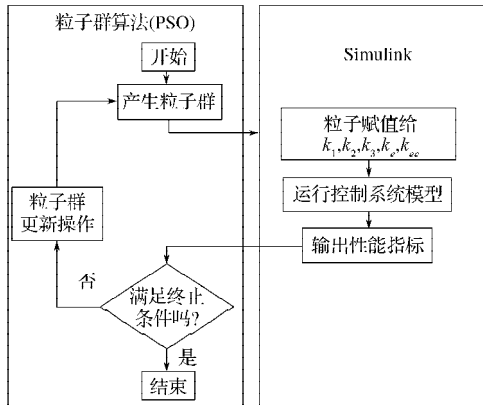


图6 粒子群优化模糊PID流程图

Fig. 6 Flow chart PSO optimizing fuzzy PID

### 3 锅炉主蒸汽压力动态模型及仿真

#### 3.1 锅炉主蒸汽压力控制的动态模型

300 MW 单元机组火焰直吹式燃煤锅炉的主蒸汽压力的数学模型可表示为

$$P_m = \frac{0.0033}{S(30S+1)} V_r \quad (9)$$

式中:  $P_m$  表示主蒸汽压力;

$V_r$  表示一次风挡板开度。

一次风是经过空气预热器预热的空气, 它将磨

制好的煤粉输入到燃烧器, 送入炉膛。通过控制一次风挡板的开度可以控制进入炉膛的燃料量, 送入的燃料量将会直接影响锅炉主蒸汽压力。

#### 3.2 粒子群优化模糊PID参数的仿真

整个优化过程由3部分组成, 第一部分为用MATLAB中m文件编写的粒子群优化程序; 第二部分为连接粒子群优化程序和Simulink仿真模型的程序; 第三部分为Simulink仿真模型图<sup>[5]</sup>。

第一部分 粒子群优化程序通过 feval 函数调用仿真模型的函数句柄, 将优化的5个参数传到 PSO\_PID 文件中, 具体的函数调用程序如下:

ObjFun = @PSO\_PID %函数的句柄

fSwarm(j,:)=feval(ObjFun,Swarm(j,:))

第二部分 建立仿真模型和粒子群之间的关系函数, 即 PSO\_PID.m 文件函数:

```
function z=PSO_PID(x)
assignin('base','k1',x(1));
assignin('base','k2',x(2));
assignin('base','k3',x(3));
assignin('base','ke',x(4));
assignin('base','kec',x(5));
[t,x,y_out]=sim('PID_Model',[0,200]);
z=y_out(end,1);
```

这段程序主要是建立仿真模型和粒子群之间的关系。PSO\_PID 文件通过 assignin 函数将粒子群优化的参数赋值给 Simulink 模型中的参数, 然后通过 sim 函数启动 Simulink 仿真, 最后将 Simulink 仿真结果, 即适应度函数的值, 返回到粒子群程序中, 一直这样循环运算直至满足迭代条件为止。

第三部分 Simulink 的仿真图, 如图7所示。

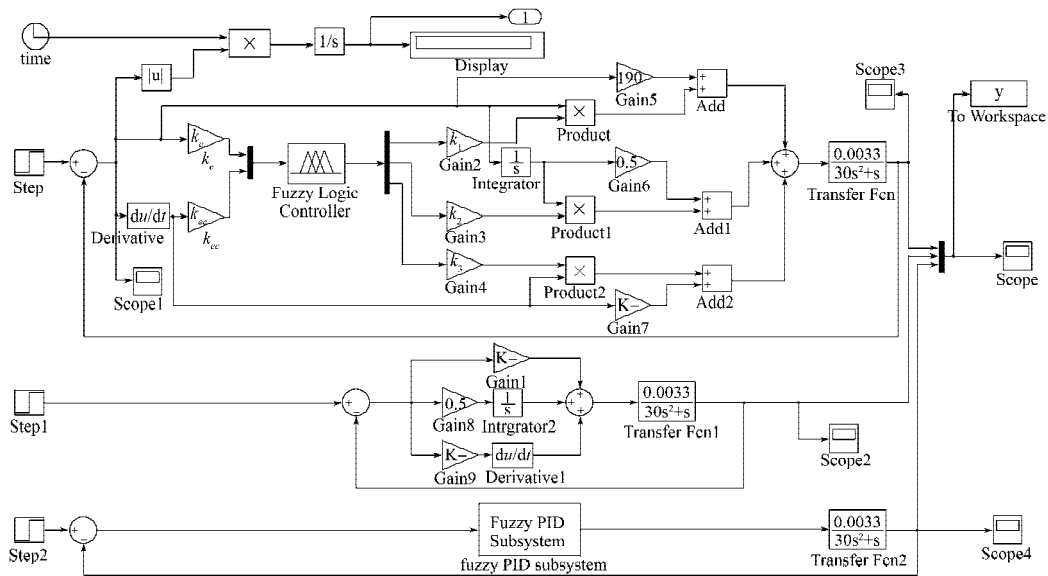


图7 Simulink 仿真图

Fig. 7 The simulation model of Simulink

为了比较粒子群优化效果,将粒子群优化的模糊PID、常规PID、模糊PID三者结合在一起比较。

本文采用30个粒子,50次迭代。粒子和待优化参数采用rand函数随机产生,采用线性权值粒子群(LDIW-PSO)算法。

### 3.3 仿真结果及其分析

量化因子 $k_e$ ,  $k_{ec}$ , 比例因子 $k_1, k_2, k_3$ 以及适应值曲线的仿真结果,如图8~10。

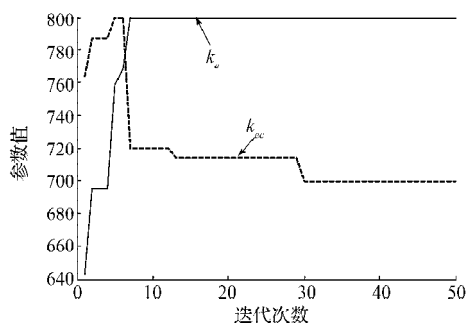


图8  $k_e, k_{ec}$  的优化曲线

Fig. 8 Optimization curve of  $k_e$  and  $k_{ec}$

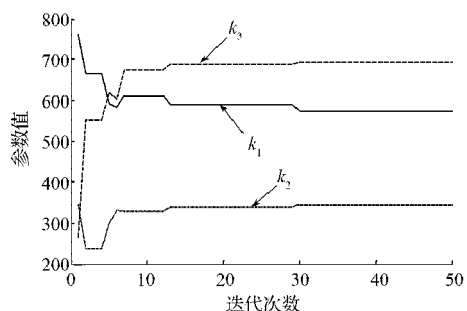


图9  $k_1, k_2, k_3$  的优化曲线

Fig. 9 Optimization curves of  $k_1, k_2$  and  $k_3$

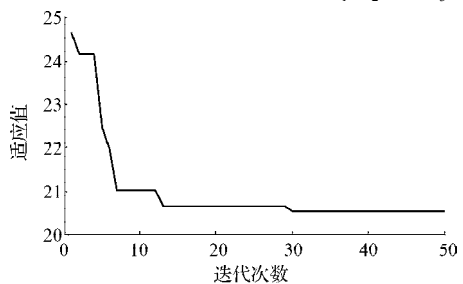


图10 适应值曲线

Fig. 10 Adaptive value curve

粒子群优化得到的参数,参见图8~10:  $k_e=799.12$ ,  $k_{ec}=699.78$ ;  $k_1=572.95$ ,  $k_2=344.91$ ,  $k_3=691.45$ ; 适应度值 $J=20.54$ 。

系统的阶跃响应仿真结果如图11。

由图可知,粒子群优化的模糊PID相对于模糊PID控制和常规PID控制,超调量较小,响应时间较短,进入平衡状态时间较短,稳态误差较小,控制品质较高。

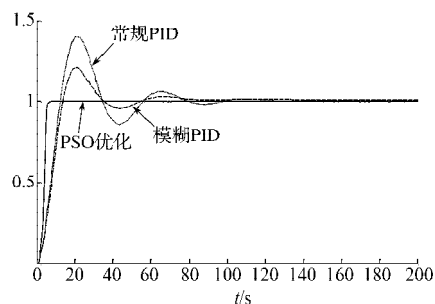


图11 阶跃响应的仿真结果

Fig. 11 The simulation results of step response

## 4 结语

建立 Simulink 模型,采用模糊PID对锅炉主蒸汽压力的控制进行仿真,通过粒子群算法优化模糊PID。仿真结果表明,基于粒子群优化的模糊PID控制算法具有较强的适应性、鲁棒性,这对提高锅炉的效率有一定的参考意义。

### 参考文献:

- [1] 刘志远, 吕剑虹, 陈来九. 智能PID控制器在电厂热工过程控制中的应用前景[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 128-134.  
Liu Zhiyuan, Lu Jianhong, Chen Laijiu. Prospects of Application of Intelligent PID Controller in Power Plant Thermal Process Control[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 128-134.
- [2] 李士勇. 模糊控制·神经控制和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996: 259-280.  
Li Shiyong. Fuzzy Control · Neural Control and Intelligent Control Theory[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1996: 259-290.
- [3] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计: MATLAB语言与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 379-383.  
Xue Dingyu. Computer Aided Design of Control Systems: MATLAB Language and Application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 379-383.
- [4] 陶永华. 新型PID控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 117-119.  
Tao Yonghua. New PID Control and Its Applications[M]. Beijing: China Machine Press, 2002: 117-119.
- [5] 刘金坤. 先进PID控制及其MATLAB仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 102-106.  
Liu Jinkun. Advanced PID Control and MATLAB Simulation[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2003: 102-106.

(责任编辑: 邓光辉)