

一种多变量预测控制的分程控制策略实现方法

邹涛^{1†}, 孙浩杰^{1,2}, 张鑫¹, 王景杨¹, 师云³

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所 中国科学院网络化控制系统重点实验室, 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国石油天然气股份有限公司 抚顺石化分公司, 辽宁 抚顺 113008)

摘要: 针对包含分程控制回路的控制系统具有非线性特征, 提出一种适用于多变量模型预测控制的分程控制实现方法. 在分程控制的各线性区间内根据各分程阀的不同动作组合建立预测模型, 通过在线比较控制器输出信号值与相应定义的中间阈值选择模型, 模型发生切换时保留切换前模型中的输出预测值作为当前模型下的初始输出预测值; 解决了控制过程存在分程控制需求时, 多变量预测控制器的设计问题, 提高了线性预测控制器的适用范围. 仿真结果验证了所提出方法的有效性.

关键词: 模型预测控制; 分程控制; 动态矩阵控制; 模型建立; 模型切换

中图分类号: TP273

文献标志码: A

An implementation of split control strategy for multi-variable predictive control

ZOU Tao^{1†}, SUN Hao-jie^{1,2}, ZHANG Xin¹, WANG Jing-yang¹, SHI Yun³

(1. Key Laboratory of Networked Control System of CAS, Shenyang Institute of Automation of Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Fushun Petrochemical Company of CNPC, Fushun 113008, China)

Abstract: The control system with the split control loop always has nonlinear characteristics, therefore, a method of split control implementation is proposed for multi-variable model predictive control. In each linear interval of the split control loop, the predictive models are established respectively according to different combination of the split valves. The control models are chosen by comparing the controller signal output values with the predefined middle threshold. After the control models being switched, the predicted output values of the old control model are regarded as the original output predicted values of the proposed model. The design problems of the multi-variable model predictive controller are solved when the process is needed to be split-range control, which enhances the applicability of the linear MPC. Finally, the simulation examples are given to verify the effectiveness of the proposed method.

Keywords: model predictive control; split-range control; dynamic matrix control; model building; model switch

0 引言

模型预测控制(MPC)产生于20世纪70年代,是一类基于模型的计算机控制算法的总称^[1]. 早期的模型预测控制算法以 Richalet 等^[2]提出的模型预测启发控制(MPHC)、Cutler 等^[3]提出的动态矩阵控制(DMC)以及 Clarke 等^[4]提出的广义预测控制(GPC)为代表. 模型预测控制首先在流程行业的过程控制中取得了成功应用^[5-6], 之后引起学术界的高度关注, 现已广泛应用于石化、炼油、造纸、电力、冶金、环境、医

疗、航空等行业^[7-10].

分程控制是指将一个控制器的输出信号分段分别控制两个或两个以上分程阀^[11]. 分程控制可以提高调节阀的控制精度, 有效改善控制效果, 还可以控制两种不同的介质以适应工艺上的一些特殊要求, 在工业控制中广为应用^[12]. 常规PID控制适用于对单个输出变量进行分程的简单控制^[13], 人们在此基础上进行了算法改进, 将PID算法与一些先进控制算法结合, 从而解决了两个分程阀在切换过程中出现的非

收稿日期: 2016-01-08; 修回日期: 2016-07-07.

基金项目: 国家863计划项目(2014AA041802); 国家自然科学基金项目(61533015, 61374112); 中国科学院网络化控制系统重点实验室基金项目(WLHKZ2014010); 浙江省控制科学与工程重中之重一级学科开放基金项目.

作者简介: 邹涛(1975—), 男, 研究员, 博士生导师, 从事工业过程实时优化和模型预测控制等研究; 孙浩杰(1990—), 男, 硕士, 从事模型预测控制理论与应用的研究.

†通讯作者. E-mail: zoutao@sia.cn

线性和扰动等问题,并在实际工业过程中得到了成功应用^[14-16].

本文首先对分程控制系统的结构和机理进行简单介绍,阐明分程控制具有非线性特征,包含分程回路的控制系统属于一类特殊的非线性系统,基于线性叠加原理的模型预测控制技术无法直接运用于该类系统的控制;然后不同于采用非线性模型预测控制算法来解决一般非线性对象的控制方案,本文针对多变量控制系统中包含分程回路的问题提出一种在线性预测控制框架下的解决策略;最后通过仿真验证了所提出控制策略的可行性和有效性.

1 分程控制系统

分程控制系统是指一个控制器的输出信号分段分别控制两个或两个以上分程阀的控制系统.在实际工业过程控制中,一路控制信号通常被分为两个区间实施控制,特殊情况下分为3个区间.本文以常见的一个分程回路包含两个控制区间进行论述,分程控制结构框图如图1所示.

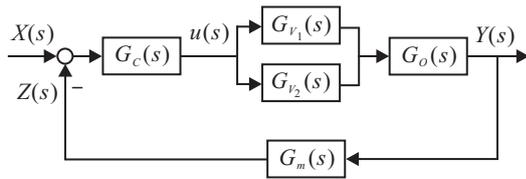


图1 分程控制结构

图1中: $G_C(s)$ 为控制器传递函数, $u(s)$ 为控制器输出控制信号, $G_{V_1}(s)$ 、 $G_{V_2}(s)$ 表示控制器控制的两个分程阀 V_1 、 V_2 的传递函数, $G_O(s)$ 为被控对象传递函数, $G_m(s)$ 为检测回路传递函数.分程控制是指将控制信号 $u(s)$ 分成两个独立的信号区间分别控制两个分程阀 V_1 、 V_2 动作.

在分程控制系统中一般采用线性分程阀,各分程阀的流量特性在各个分程信号区段内呈线性特征.但是,在分程阀同向动作的分程控制系统中,采用流量特性不同的分程阀组合使用时,在其分程点处呈现非线性特征;在分程阀异向动作的控制系统中,分程点处的非线性特征表现得尤为明显.

假设图1所示的分程控制中, V_1 、 V_2 两阀为线性气开式同向分程阀,图2(a)和图2(b)分别为 V_1 、 V_2 阀的流量特性,图2(c)为分程阀总的流量特性.由图2可见,原各具线性的分程阀组合在一起后,总的流量特性呈现出非线性特征.

假设图1所示的分程控制中, V_1 、 V_2 两阀为异向线性分程阀,阀 V_1 为气闭式,阀 V_2 为气开式,图3(a)和图3(b)分别为阀 V_1 、 V_2 的流量特性,图3(c)为分程阀

总的流量特性.由图3可见,总的流量特性呈现出强非线性特征.

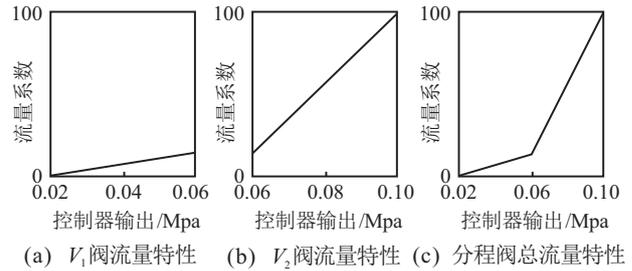


图2 两只同向线性阀组成的分程系统综合流量特性

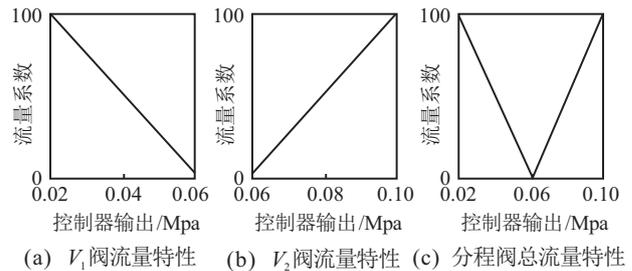


图3 两只异向线性阀组成的分程系统综合流量特性

2 多变量模型预测控制算法

MPC使用模型和当前过程的测量值来计算操纵变量的未来动作,其算法主要由预测模型、滚动优化、反馈校正3部分构成.DMC采用线性阶跃响应为数学模型,是应用最为广泛的一种MPC算法.

1) 预测模型.

对于 m 个输入 n 个输出的控制过程,假设预测时域为 P ,控制时域为 M ,模型长度为 N ,该多变量DMC的数学模型为

$$a_{ij} = [a_{ij}(1), \dots, a_{ij}(N)],$$

$$i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

多变量系统的一步和多步预测模型为

$$\tilde{y}_{N1}(k) = \tilde{y}_{N0}(k) + \bar{A}u(k), \quad (2)$$

$$\tilde{y}_{PM}(k) = \tilde{y}_{P0}(k) + A\Delta u_M(k). \quad (3)$$

其中: $\tilde{y}_{PM}(k) \in R^{n \times P \times 1}$ 为预测输出, $\tilde{y}_{P0}(k) \in R^{n \times P \times 1}$ 为当前时刻的初始预测输出, $\Delta u_M(k) \in R^{m \times M \times 1}$ 为控制增量, \bar{A} 和 A 可由模型 a_{ij} 得到.

2) 滚动优化.

在滚动优化过程中,每一个控制周期都需极小化如下性能指标:

$$J(k) = \|w(k) - \tilde{y}_{PM}(k)\|_Q^2 + \|\Delta u_M(k)\|_R^2. \quad (4)$$

其中: $w(k)$ 为被控输出的设定点, Q 为输出变量误差加权矩阵, R 为输入增量控制加权矩阵.

在无约束情况下,将多步预测模型(3)代入性能指标(4)中可计算出最优控制增量

$$\Delta \mathbf{u}_M(k) = (\mathbf{A}^T \mathbf{Q} \mathbf{A} + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{Q} (\mathbf{w}(k) - \tilde{\mathbf{y}}_{P0}(k)). \quad (5)$$

3) 反馈校正.

假设在 $k+1$ 时刻的各实际测量输出为 $y_i(k+1)$, 上时刻对该时刻的预测输出值为 $\tilde{y}_{i,1}(k+1|k)$, 可得误差向量

$$\mathbf{e}(k+1) = \mathbf{y}_i(k+1) - \tilde{\mathbf{y}}_{i,1}(k+1|k), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

利用式(2)误差信息可得校正的预测向量

$$\tilde{\mathbf{y}}_{\text{cor}}(k+1) = \mathbf{y}_{N1}(k) + \mathbf{H} \mathbf{e}(k+1). \quad (7)$$

$\tilde{\mathbf{y}}_{\text{cor}}(k+1)$ 移位后构成 $k+1$ 时刻的初始预测值

$$\tilde{\mathbf{y}}_{N0}(k+1) = \mathbf{S}_0 \tilde{\mathbf{y}}_{\text{cor}}(k+1). \quad (8)$$

注1 式(6)~(8)中相关符号的定义参见文献[6].

3 多变量模型预测控制的分程控制实现

控制系统中有一个或多个变量需进行分程时,通常多个变量之间以及多个分程回路之间均存在耦合关系,运用常规PID进行单个分立的控制很难满足控制要求.模型预测控制技术具有处理多变量、有约束、强耦合控制问题的特点,鉴于基于线性叠加原理的模型预测控制技术无法直接用来解决包含分程回路的控制系统问题,本节针对该问题给出解决方案.

3.1 模型预测分程控制策略

相较于常规PID控制,模型预测控制通过建立预测模型对系统未来输出进行预测,在每个控制周期内通过优化性能指标得出最优的控制增量.由图2和图3可以看出,在每个分程的区间内,各分程阀具有线性特征,故可在每个线性分程区间内分别建立预测模型,实施控制时根据需要在模型间进行切换.

利用模型预测控制对包含分程回路的控制系统进行控制时采用以下步骤:

- 1) 对进行分程的控制输入变量根据被划分的区间数量设定中间阈值;
- 2) 在各分程线性区间内分别对被控对象建立预测模型;
- 3) 根据规则在模型预测算法中选择对应的模型对未来输出进行预测,并计算控制增量,模型切换时保留切换前模型中的输出预测值作为当前模型下的初始输出预测值;
- 4) 在线检测控制器的输出信号并与相应的中间阈值进行比较,确定控制信号在哪个区间内,进而驱动对应的分程阀执行动作.

以下着重讨论运用模型预测技术对包含一个二分程回路的控制系统进行控制时,多变量预测模型的建立和模型切换规则的确定,包含多个分程回路的多变量控制系统可按照所提出方案拓展应用.

3.2 模型建立

考虑一个 m 输入 n 输出的多变量控制系统,假定根据工艺设计要求对第 i 路输入 u_i 进行二区间分程, u_i 分程后在两个对应分程区间内分别控制分程阀 $[V_{i0}, V_{i1}]$, 输出为 y_k , 构成一个分程回路.

不失一般性,以控制系统中包含一个二分程回路为例,根据执行机构的分程区间数引入相应的控制输入变量,即对第 i 路进行二区间分程的回路引入两个输入变量 $[u_{i0}, u_{i1}]$, 不进行分程的引入一个输入变量 u_i . $[u_{i0}, u_{i1}]$ 对应于控制分程阀 $[V_{i0}, V_{i1}]$. 其中: u_{i0} 、 u_{i1} 为互斥变量,即在任一时刻,两个变量中有且只有一个变量起控制作用; $[V_{i0}, V_{i1}]$ 为互斥分程阀,即在任一时刻,有且只有一个阀执行动作.

对控制系统中进行二分程操作的第 i 个输入变量 u_i 定义中间阈值 u_{s_i} . 设输入变量 u_i 的上下限为 $[u_{i \min}, u_{i \max}]$, 通过在线检测 u_i 值并与中间阈值 u_{s_i} 比较以确定 u_i 在互斥变量 u_{i0} 、 u_{i1} 中的取值: 当 $u_{i \min} \leq u_i \leq u_{s_i}$ 时, 变量 u_{i0} 起作用并驱动对应的分程阀 V_{i0} 动作; 当 $u_{s_i} < u_i \leq u_{i \max}$ 时, 变量 u_{i1} 起作用并驱动对应的分程阀 V_{i1} 执行动作.

根据分程阀的不同动作组合建立预测模型,对包含一个二分程回路的多变量控制系统建立两个模型 $\text{Mdl}_j (j = 1, 2)$, 如表1所示.

表1 模型标记

Mdl_j	V_{i0} 动作	V_{i1} 动作
Mdl_1	1	0
Mdl_2	0	1

表1中, V_{i0} 取1表示该分程阀动作,取0表示该阀不动作; Mdl_1 模型表示 V_{i0} 动作, V_{i1} 不动作; Mdl_2 模型表示 V_{i1} 动作, V_{i0} 保持不动.

在分程控制系统每一分程模式下,分别在被控对象的输入端人为加载单位阶跃信号,在系统输出端按一定的频率采样,可得到该运作模式下被控对象的阶跃响应系数 \mathbf{a}_{ij} , 通过对系统输入输出端信号数据进一步分析处理可建立分程系统被控对象的动态模型.

3.3 模型切换规则

根据3.2节中所述,按照分程阀不同的动作组合建立多变量模型 Mdl_j , 第 j 个预测模型表达式为

$$\tilde{\mathbf{y}}_{PM}^j(t) = \tilde{\mathbf{y}}_{P0}^j(t) + \mathbf{A}^j \Delta \mathbf{u}_M(t), \quad j = 1, 2.$$

其中: $\tilde{y}_{P0}^j(t)$ 表示在第 j 个模型下的初始输出预测序列, $\tilde{y}_{PM}^j(t)$ 表示第 j 个模型下的输出预测序列, A^j 表示第 j 个模型的动态矩阵。

在每一个控制周期内, 利用 DMC 算法计算出该时刻的控制量, 具体步骤如下:

1) 在 t 时刻检测各输出的实际值 $y_l(t)$, 通过 $t-1$ 时刻对当前时刻的预测输出 $\tilde{y}_{l,PM}^j(t|t-1)$ 计算预测误差 $e_l(t) = y_l(t) - \tilde{y}_{l,PM}^j(t|t-1)$, $l = 1, 2, \dots, n$ 。

2) 利用预测误差计算 t 时刻的预测输出校正量 $\tilde{y}_{cor}^j(t)$, 由式(7)可得

$$\tilde{y}_{cor}^j(t) = \tilde{y}_{PM}^j(t-1) + H^j e(t).$$

3) 通过移位矩阵计算 t 时刻的初始预测值, 由式(8)可得

$$\tilde{y}_{P0}^j(t) = S_0 \cdot \tilde{y}_{cor}^j(t).$$

4) 通过极小化如下性能指标:

$$J(t) =$$

$$\|w(t) - \tilde{y}_{P0}^j(t) - A^j \Delta u_M(t)\|_Q^2 + \|\Delta u_M(t)\|_R^2$$

计算出最优控制增量

$$\Delta u_M(t) =$$

$$[(A^j)^T Q (A^j) + R]^{-1} (A^j)^T Q [w(t) - \tilde{y}_{P0}^j(t)].$$

5) 计算 t 时刻控制输入值

$$u_i(t) = u_i(t-1) + \Delta u_{i,M}(t).$$

将计算所得的分程回路控制量与相应定义的中间阈值比较后, 选择相应的预测模型 Mdl_j 对系统的输出进行预测. 该周期内所选预测模型与上个周期不同时, 保留上个模型对未来输出的预测值作为当前模型下的初始输出预测值。

以控制系统中包含一个二分程回路为例, 假设需要将模型 Mdl_1 切换至模型 Mdl_2 下, 将预测模型 Mdl_1 下的输出预测序列 $\tilde{y}_{P0}^1(t)$ 经校正后作为当前模型 Mdl_2 的初始输出预测序列 $\tilde{y}_{P0}^2(t+1)$ 对系统未来输出进行预测。

4 仿真实验

下面给出利用模型预测控制策略解决一个包含二分程回路系统的控制问题。

在某化工生产过程中, 冷物料的加热方式有两种, 即通过热交换器用热水(工业废水)和热蒸汽加热, 当热水加热不能满足出口温度要求时, 再同时使用蒸汽加热, 从而减小能源损耗, 提高经济效益. 为此设计了如图4所示的温度分程控制系统, 其中热水阀 V_1 和蒸汽阀 V_2 均为气开式分程阀。

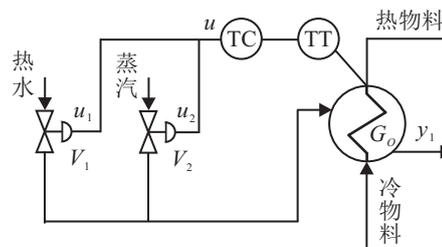


图4 温度分程控制系统

图4中: u 为控制器的输出信号, 分程后分别控制热水阀 V_1 和蒸汽阀 V_2 ; 假设阀 V_1 输入信号对输出 y_1 的传递函数为 $\frac{0.5}{2s+1}$; 阀 V_2 输入信号对输出 y_1 的传递函数为 $\frac{1}{2s+1}$. 定义输出参考值为: $0 \sim 50$ s 时间段内, 输出为 1; $50 \sim 100$ s 时间段内, 输出为 3; $100 \sim 150$ s 时间段内, 输出为 0.5; $150 \sim 200$ s 时间段内, 输出为 4。

利用多变量模型预测控制技术, 按照本文思路进行求解。

1) 首先针对分程需求, 引入控制变量 $[u_1, u_2]$, 分别控制两个分程阀 $[V_1, V_2]$, 形成两入一出的控制系统. 其中: u_1 对 y_1 的传递函数为 $\frac{0.5}{2s+1}$; u_2 对 y_1 的传递函数为 $\frac{1}{2s+1}$ 。

2) 定义控制器输出信号 u 的中间阈值

$$u_{s1} = 2.$$

3) 根据模型建立规则建立模型, 如表2所示。

表2 根据模型建立规则建立模型

Mdl _j	分程阀动作情况
Mdl ₁	V_1 动作, V_2 保持关闭不动
Mdl ₂	V_2 动作, V_1 保持最大开度不动

4) 将控制器的输出控制信号 u 值与所定义的中间阈值 u_{s1} 比较, 确定预测模型 Mdl_j , 当预测模型较上周期发生改变时, 按照模型切换规则切换预测模型, 利用 DMC 算法计算出实时控制增量。

5) 将控制器的输出控制信号 u 与所定义的中间阈值 u_{s1} 比较, 驱动相应的阀执行动作, 即当:

$u \leq u_{s1}$ 时, u_1 起控制作用驱动阀 V_1 执行动作;
 $u_{s1} < u$ 时, u_2 起控制作用驱动阀 V_2 执行动作。

6) 图5为模型预测控制下, 控制系统的输出曲线和控制输入信号曲线. 由图5可知: 当控制器输出信号 u 值小于等于中间阈值 u_{s1} 时, 只有控制变量 u_1 起作用; 当控制器输出信号 u 值大于中间阈值变量 u_{s1} 时, 控制变量 u_2 开始起控制作用, u_1 保持在中间阈值 ($u_1 = u_{s1} = 2$) 不变. 输出曲线 y_1 表明输出可达到预期设定值。

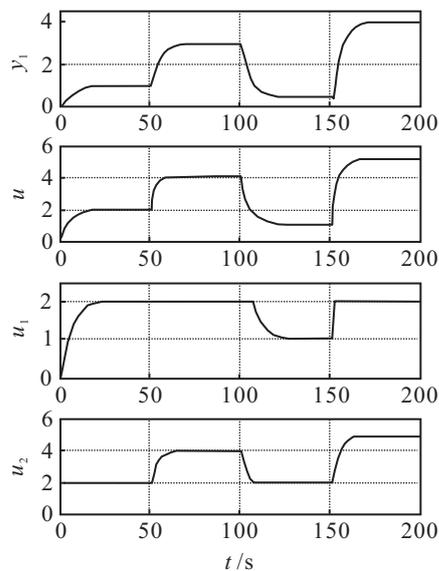


图5 输出曲线及控制信号曲线

5 结论

本文针对包含分程回路的控制系统具有非线性特征而无法直接使用模型预测控制技术的问题,提出了一种多变量模型预测控制的分程控制实现方法,着重论述了如何进行多变量预测模型的建立以及模型的切换规则,强调在模型切换时保留模型切换前对输出的预测序列作为当前模型下的初始输出预测序列。最后对一个含有二分程回路的温度控制系统进行仿真,验证了本文方法的有效性。包含更多分程回路的复杂控制系统可以根据本文所提出的控制方案进行推广应用。

参考文献(References)

- [1] 席裕庚. 预测控制[M]. 第2版. 北京:国防工业出版社, 2013: 51-72.
(Xi Y G. Predictive control[M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 51-72.)
- [2] Richalet J, Rault A, Testud J L, et al. Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes[J]. Automatica, 1978, 14(5): 413-428.
- [3] Cuter C R, Ramaker B L. Dynamic matrix control—A computer control algorithm[C]. The 86th AIChE National Meeting. Houston: IEEE, 1979.
- [4] Clarke D W, Mohtadi C. Properties of generalized predictive control[J]. Automatica, 1989, 25(6): 859-873.
- [5] Qin S J, Badgwell A. A survey of industrial model predictive control technology[J]. Control Engineering Practice, 2003, 7(11): 733-764.
- [6] 邹涛,丁宝苍,张端. 模型预测控制工程应用导论[M]. 北京:化学工业出版社, 2010: 1-10.
(Zou T, Ding B C, Zhang D. MPC: An introduction to industrial application[M]. Beijing: Chemical Industrial Press, 2010: 1-10.)
- [7] 席裕庚,李德伟,林姝,等. 模型预测控制——现状与挑战[J]. 自动化学报, 2013, 39(3): 222-236.
(Xi Y G, Li D W, Lin S, et al. Model predictive control—Status and challenges[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(3): 222-236.)
- [8] Keviczky T, Balas G J. Receding horizon control of an F-16 aircraft: A comparative study[J]. Control Engineering Practice, 2006, 14(9): 1023-1033.
- [9] Salsbury T, Mhaskar P, Qin S J. Predictive control methods to improve energy efficiency and reduce demand in buildings[J]. Computers and Chemical Engineering, 2013, 51: 77-85.
- [10] Silani E, Lovera M. Magnetic spacecraft attitude control: A survey and some new results[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(3): 357-371.
- [11] 冯晓玲. 关于分程控制系统的研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2012(6): 1-2.
(Feng X L. The study of split control system[J]. Automation & Instrumentation, 2012(6): 1-2.)
- [12] 张娜,柏宁娟,胡茜. 浅谈分程控制系统在工业自动化中的应用[J]. 工业仪表与自动化装置, 2013(5): 76-79.
(Zhang N, Bai N J, Hu Q. Discussion on the application of split-ranging control system in industrial[J]. Automation Industrial Instrumentation & Automation, 2013(5): 76-79.)
- [13] Smith C L. Advanced process control: Beyond single-loop control[M]. Hoboken: Wiley, 2010: 86-113.
- [14] 邓小龙,张建林,陆锦军,等. 纺织空调系统的模糊PID控制研究及应用[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(4): 763-768.
(Deng X L, Zhang J L, Lu J J, et al. Research and application of air conditioning system in textile industry based on fuzzy PID[J]. Chinese J of Scientific Instrument, 2011, 32(4): 763-768.)
- [15] Rodolpho Rodrigues Fonseca, Jones Erni Schmitz, Ana Maria Frattini Fileti. A fuzzy-split range control system applied to a fermentation process[J]. Bioresource Technology, 2013(142): 475-482.
- [16] van Schoor G, Breed D G, du Rand C P. Fuzzy logic controller with neural network signal predictors for complex split-range control of a hybrid actuator[J]. Sensors and Actuators, 2013, 199: 216-226.

(责任编辑:李君玲)