

基于变论域模糊-Smith 的白酒勾调控制

Liquor blending control based on variable universe fuzzy-Smith modle

周永帅^{1,2}庾先国^{1,2}韩 强^{1,2}刘 鑫^{1,2}ZHOU Yong-shuai^{1,2} TUO Xian-guo^{1,2} HAN Qiang^{1,2} LIU Xin^{1,2}

(1. 四川轻化工大学自动化与信息工程学院, 四川 宜宾 644000; 2. 人工智能四川省重点实验室, 四川 宜宾 644000)

(1. School of Automation and Information Engineering, School of Automation and Information Engineering, Yibin, Sichuan 644000, China; 2. Sichuan Provincial Key Laboratory of Artificial Intelligence, Yibin, Sichuan 644000, China)

摘要:目的: 满足白酒勾调控制系统响应无超调的要求, 消除系统时滞性对其控制效果的影响。方法: 提出了一种基于变论域模糊-Smith 的白酒勾调控制算法。对系统的控制过程及特点进行分析并建立近似的数学模型; 引用 Smith 预估器补偿系统存在的时滞性, 利用模糊控制的特点解决系统数学模型建立不精确的问题, 并且结合了变论域方法来消除常规模糊控制精度不高, 存在稳态误差的弊端; 通过 Matlab 实现了该算法的仿真。结果: 与 PID-Smith 以及模糊-Smith 控制算法相比, 该算法在确保系统响应无超调的前提下, 具备更快的调节速度以及鲁棒性。结论: 变论域模糊-Smith 算法能够实现白酒勾调控制系统对流量的精确控制。

关键词: 白酒; 勾调; 时滞; 变论域; 模糊-Smith

Abstract: **Objective:** Meets the requirements of no overshoot in the response of the liquor blending control system, and eliminate the influence of system time lag on its control effect. **Methods:** An algorithm of liquor blending control based on variable universe fuzzy-Smith was proposed. Analyzed the control process and characteristics of the system and establish an approximate mathematical model. Quoting Smith predictor to compensate for the time lag in the system, utilizing the characteristics of fuzzy control to solve the problem of inaccurate system mathematics model, combined with the variable universe method to eliminate the shortcomings of conventional fuzzy control method with steady-state errors due to the poor accuracy. The algorithm was simulated by Matlab. **Results:** Compared with PID-Smith and

fuzzy-Smith control algorithm, on the premise of ensuring that there was no overshoot in the system response, and the proposed algorithm had faster adjustment speed and better robustness.

Conclusion: The variable universe fuzzy-Smith algorithm can realize the precise control of the flow of the liquor blending control system.

Keywords: liquor; blending; time lag; variable universe; fuzzy-smith

与传统的人工勾调相比, 白酒的自动化勾调具有产品质量稳定、生产效率高的优点, 而勾调的精确性也成为系统设计的关键。1997 年中船重工 710 研究所与稻花香集团研制了白酒勾调自动化控制系统, 开启了酒企自动化改造升级的时代^[1]。2005 年衡水老白干集团成功利用计算机技术对传统的人工勾调操作进行了自动化升级, 所开发的智能勾兑系统, 在控制的精度、稳定性以及生产效率上均表现优良, 且成品酒风味质量俱佳^[2]。2010 年贵州茅台酒业为了解决使用小容器进行白酒勾调产品质量不稳定, 生产效率低下的问题, 使用脉冲的气动调和、大容器的自动勾调等技术实现了白酒的规模化、智能化、优质化生产^[3]。综上, 白酒勾调智能化还处于刚刚发展的阶段, 随着中国白酒市场不断扩大, 以及走向国际化, 白酒勾调对于实现品牌化、规模化起到越来越重的作用。

白酒自动化勾调系统在生产过程中, 需要各种原酒及调味酒严格按照成品酒的配方比例, 经过装配有输酒泵、流量计、电动调节阀等设备的管道输送至成品酒罐混合而成所需的成品酒, 酒液的比例稍有不适便会影响到成品酒的口感。目前酒液流量的精确控制存在以下难点: ① 被控对象为累计流量属于过程控制量, 由于管路输送距离等原因, 对控制信号的响应具有时滞性^[4]; ② 具有管路传输过程中管阻, 水锤等非线性以及不确定因素的影响^[5]; ③ 累计流量具备不可回调性, 因此系统具有响应无

基金项目: 四川省科技计划项目 (编号: 2021YFS0339); 特殊环境机器人技术四川省重点实验室 (编号: 17kftk05); 四川省重大科技专项项目 (编号: 2018GZDZX0045)

作者简介: 周永帅, 男, 四川轻化工大学在读硕士研究生。

通信作者: 庾先国 (1965—), 男, 四川轻化工大学教授, 博士。

E-mail: tuoxg@cdu.edu.cn

收稿日期: 2021-09-23

超调的前提要求。

研究拟建立一种适用于白酒自动化勾调系统的流量精确控制算法,采用 Smith 预估补偿器消除时滞性对系统的影响,使用模糊控制解决系统数学模型建立不精确的问题,并且结合论域自适应方法提高模糊控制器的控制精度,以期实现白酒自动化勾调过程中酒液的精确传输。

1 白酒自动化勾调系统数学模型

由于白酒自动化勾调系统具有时滞性,非线性特点,精确模型的建立非常困难,通过等效方法建立近似的数学模型^[6]。白酒自动化勾调过程存在的环节:① 酒液开始在管道中传输至流经流量计之间,此时流量计尚未检测到数据,因此产生一个大滞后环节;② 流经电动调节阀瞬时流量的大小与阀门的开度相关,此时会产生一个一阶惯性环节;③ 由于系统存在大滞后环节,而其他环节的时间常数远远小于滞后时间,故其他的环节均可等效为比例环节;④ 由于系统的被控对象为累计流量,因此需要增加一个积分环节。以上各环节的乘积即为该控制系统的近似数学模型:

$$G(s) = \frac{k}{s(Ts+1)}e^{-\tau s}, \quad (1)$$

式中:

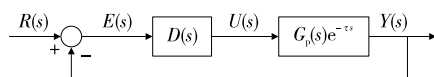
$G(s)$ —— 控制系统的近似数学模型;

k —— 系统的总体增益;

T —— 惯性时间常数;

τ —— 纯滞后环节时间常数(与输送管道的距离以及液体的流速相关)。

系统的闭环框图如图 1 所示。



$R(s)$. 被控对象累计流量的设定值 $E(s)$. 累计流量与设定值的误差 $D(s)$. 需要进行设计的控制器 $U(s)$. 控制器的输出作用 $G_p(s)$. 被控对象去除滞后环节的传递函数

图 1 系统的闭环框图

Figure 1 Closed-loop block diagram of the system

2 控制算法设计

2.1 Smith 预估补偿原理

在工业生产控制过程中,被控对象往往存在着滞后环节,滞后现象的存在会严重影响系统的稳定性。为了改善对系统的不良影响,国内外进行了大量的方法研究,其中最具代表性的是在 1957 年由 Smith 提出的预估控制器,即 Smith 预估器。其补偿原理为:由于滞后环节的存在,造成控制器对系统的调节作用即系统的响应曲线延迟了滞后时间 τ ,而 Smith 预估器却能使控制器提前滞后时间 τ 获知系统在当前控制作用下的响应,进而根据系统的偏差输出控制作用。从原理来看,经过补偿后滞

后环节对系统的影响达到了被消除的效果,并且 Smith 预估器具有结构简单以及算法适用性强的优点,能够有效地解决系统时滞性的问题^[7-10]。

由图 2 可知,其主要方法是设计一个补偿环节 $G_B(s)$ 与控制器 $D(s)$ 进行反并联。

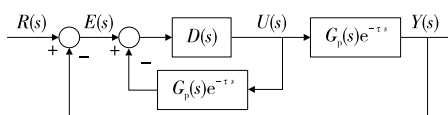


图 2 Smith 预估器补偿系统的闭环框图

Figure 2 A closed-loop block diagram of the smith estimator compensation system

补偿环节的传递函数:

$$G_B(s) = G_p(s)(1 - e^{-\tau s}). \quad (2)$$

Smith 预估器补偿后的系统闭环传递函数为:

$$\Phi(s) = \frac{D(s)G_p(s)}{1 + D(s)G_p(s)}e^{-\tau s}. \quad (3)$$

经过补偿后,系统的等效闭环框图如图 3 所示。

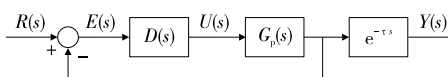


图 3 补偿后系统的等效闭环框图

Figure 3 Equivalent closed-loop block diagram of the system after compensation

从图 3 可以看出,经过 Smith 预估补偿后,系统的滞后环节被排除在闭环回路之外,从而消除了滞后环节对系统稳定性的影响,而滞后环节只是将控制器的调节作用在时间上推迟了滞后时间 τ ,之后再对控制器 $D(s)$ 进行单独设计即可。

2.2 PID-Smith 控制算法设计

传统的 PID 控制算法设计相对简单,在工业生产中控制中被广泛应用。在对被控对象的滞后环节进行 Smith 预估补偿后,对排除滞后环节的部分进行单独的 PID 控制器设计^[11-12],研究拟采用的被控对象传递函数为:

$$G(s) = \frac{10}{s(20s+1)}e^{-20s}, \quad (4)$$

其中:

$$G_p(s) = \frac{10}{s(20s+1)}. \quad (5)$$

由于系统控制要求无超调量,因此应将系统整定为典型的 I 型系统^[13-14],故:

$$D(s) = k_p. \quad (6)$$

由图 3 可知补偿后系统的开环传递函数为:

$$H(s) = D(s)G_p(s) = \frac{10k_p}{s(20s+1)} = \frac{k_p/2}{s(s+0.05)}. \quad (7)$$

由于系统的阶跃响应无超调,因此系统应为临界阻

尼二阶系统,即阻尼比取 1,由式(7)可得: $k_p=0.001\ 25$ 。

2.3 变论域模糊-Smith 控制算法设计

2.3.1 模糊控制器的设计 模糊控制不依赖系统的精确数学模型,而是在现场操作者的经验以及专业人员的知识基础上构建起控制模型,然后根据相关的经验知识通过逻辑推理进行控制决策,最后完成对系统的调节作用,因此具有很强的容错能力^[15-17]。

设计的两输入单输出模糊控制器:

(1) 输入语言变量 E , 表示设定流量 Q_d 与实时累计流量 Q 的误差 $e = Q_d - Q$ 。

(2) 输入语言变量 EC , 表示误差 e 的变化速率 $ec = e_2 - e_1$ 。

(3) 输出语言变量 U , 表示控制器的输出量 u 。

(4) 模糊论域都设定为 $X = [-6, 6]$, 且都具有模糊语言值{正大(PB), 正中(PM), 正小(PS), 零(ZE), 负小(NS), 负中(NM), 负大(NB)}, 对于 E 表示实时累计流量相对设定流量: 非常少、比较少、少一点、正好、多一点、比较多、非常多; 对于 EC 表示实时累计流量变化速度: 减速非常快、减速快、减速慢、不变、增速慢、增速快、增速非常快; 对于 U 表示电动调节阀的开度变化量: 阀门全开、增加量多、增加量少、不变、减小量少、减小量多、阀门全关。模糊语言值隶属度函数均选用高斯函数。

(5) 模糊规则语句的形式类如“if E is NB and EC is NB then U is NB”, 其具体模糊规则如表 1 所示。

(6) 解模糊: 模糊控制器的输出同样为模糊量, 不能在系统中直接使用, 而解模糊用于模糊量的精确化, 清晰化。在解模糊的方法中, 信息包含全面、计算精确的重心法使用频率最高。数学表达式:

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(u_i) \times u_i}{\sum_{i=1}^n \mu(u_i)} \quad (8)$$

2.3.2 变论域算法的设计 在模糊控制器的设计中, 需要根据各个变量在系统中可能变化的范围来确定输入以及输出变量的实际论域, 实际论域选择范围的不准确性

表 1 模糊规则

Table 1 Fuzzy rules

E	EC						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	ZE	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PM
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PM	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NM	ZE	PS	PM	PM	PB
PM	NM	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	ZE	PS	PB	PB	PB	PB

会间接影响到量化因子以及比例因子取值的精度。在系统的控制过程中量化因子以及比例因子取值的不当会间接降低控制器对系统的控制精度, 并且当系统趋于稳定状态时, 输入变量的实际值只在实际论域的某一个很小的范围 $d\delta$ 内进行变化, 如图 4 所示。

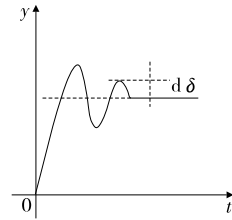


图 4 变量的变化过程

Figure 4 The process of changing variables

由图 4 可知, 在系统趋于稳定状态时, 由于误差以及误差变化率只在实际论域的某一很小范围 $d\delta$ 内变化, 此时采用固定的量化因子只能将输入变量的实际值映射到模糊论域的很小区间内, 不能遍布模糊论域的整个范围, 此时进行模糊推理取得的控制量变化很小甚至保持不变, 因此系统容易产生稳态误差, 并且响应速度较慢。

为了解决此问题, 李洪兴^[18]提出了一种变论域的方法, 即在系统趋向稳定的过程中, 通过“论域伸缩因子”对变量的实际论域进行调节, 当变量的实际值变大时论域变大, 实际值变小时论域变小。量化因子以及比例因子的大小随着实际论域的变化而变化, 实际论域伸缩则因子变大, 实际论域缩小则因子变小。在控制过程中, 使用此方法能将变量的实际值模糊化后充分地分布在整个模糊论域, 文中加以引用设计变论域模糊控制器^[19-21]。

(1) 论域伸缩及论域伸缩因子: 假设变量 x 初始的实际论域为 $[-x_0, x_0]$, 在系统的控制过程中, 具有可变实际论域 $[-\alpha(x)x_0, \alpha(x)x_0]$, 其中论域伸缩因子 $\alpha(x)$ 为关于变量 x 的连续函数, 图 5 为论域的伸缩过程。

且 $\alpha(x)$ 随 x 的变化一般具有如下规律: ① 对于任意给定 x 的增量 Δx , α 的增量 $\Delta\alpha$, Δx 与 $\Delta\alpha$ 呈正比; ② 对于同样大的增量 Δx , x 越大, 则 $\Delta\alpha$ 越大; ③ α 不超过 1, 且 α 越接近 1, $\Delta\alpha$ 越小。

由此可知函数 $\alpha(x)$ 具有如下形式:

$$\alpha(x) = 1 - \exp(-kx^2/2), \quad (9)$$

式中:

k ——常数。

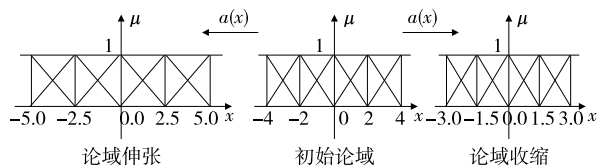


图 5 论域伸缩过程

Figure 5 On the process of domain scaling

k 在一定程度上反映了控制算法的灵敏度大小, k 的取值越大, $\alpha(x)$ 趋近于 1 的速度越快, 算法也就越灵敏, 在 x 趋近于 0 时, $\alpha(x)$ 的取值趋向于 0。

(2) 论域伸缩因子的确定: 取偏差 e 、偏差变化率 ec 和控制输出 u 的实际论域分别为 $[-E_e, E_e]$ 、 $[-E_{ec}, E_{ec}]$ 和 $[-E_u, E_u]$, 其初始实际论域分别为 $[-E_{eo}, E_{eo}]$ 、 $[-E_{eco}, E_{eco}]$ 和 $[-E_{uo}, E_{uo}]$ 。由式(9)取偏差 e 、偏差变化率 ec 的论域伸缩因子为:

$$\alpha_e(e) = 1 - \lambda \exp[-k(e/E_{eo})^2], \quad (10)$$

$$\alpha_{ec}(ec) = 1 - \lambda \exp[-k(ec/E_{eco})^2], \quad (11)$$

式中:

λ ——最小论域取值范围系数(反映系统的控制精度)。

在控制过程中, 控制输出 u 的论域伸缩因子 α_u 同 α_e 与 α_{ec} 的变化相关, 取值公式:

$$\alpha_u = \begin{cases} \alpha_e & \alpha_e \gg \alpha_{ec} \\ \sqrt{(\alpha_e^2 + \alpha_{ec}^2)/2} & e < 0, ec > 0 \text{ 且 } \alpha_e \text{ 与 } \alpha_{ec} \text{ 相当} \\ (\alpha_e + \alpha_{ec})/2 & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

(3) 变论域算法: 取 e 、 ec 以及 u 的模糊论域的最大值均为 $N_{\max}$, e^* 、 ec^* 以及 u^* 分别表示系统的实时测量误差, 误差变化率以及经过比例调整后的实际控制量, 其算法设计:

① 由式(10)~式(12)计算论域伸缩因子 α_e 、 α_{ec} 以及 α_u ;

② 调整 e^* 、 ec^* 以及 u^* 的实际论域:

$$E_e = E_{eo} \cdot \alpha_e, \quad (13)$$

$$E_{ec} = E_{eco} \cdot \alpha_{ec}, \quad (14)$$

$$E_u = E_{uo} \cdot \alpha_u; \quad (15)$$

③ 调整量化因子 q_e 、 q_{ec} 以及比例因子 q_u :

$$q_e = N_{\max}/E_e, \quad (16)$$

$$q_{ec} = N_{\max}/E_{ec}, \quad (17)$$

$$q_u = E_u/N_{\max}; \quad (18)$$

④ 量化 e^* 和 ec^* :

$$e = q_e \cdot e^*, \quad (19)$$

$$ec = q_{ec} \cdot ec^*; \quad (20)$$

⑤ 对模糊控制器的控制输出 u 进行比例调整:

$$u^* = q_u \cdot u, \quad (21)$$

式中:

u^* ——被控对象需要的控制量。

2.3.3 变论域模糊-Smith 控制器结构 在对系统的滞后环节进行 Smith 预估补偿后, 采用图 6 所示的变论域模糊控制器结构。

从图 6 可以看出: 在控制过程中, 通过论域伸缩因子对 e 、 ec 和 u 的实际论域进行了调整, 量化因子以及比例

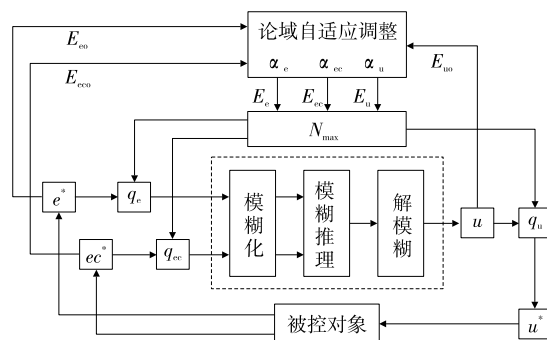


图 6 变论域模糊控制器结构

Figure 6 The structure of variable universe fuzzy controller

因子随之而改变, 使得系统的实时测量值 e^* 以及 ec^* 在模糊化之后能够分布到整个模糊论域, 从而使模糊推理以及决策更为精准, 在消除稳态误差的同时提高了控制器对系统的调节速度。并且此算法独立于模糊控制器之外, 如此便可对相类似的系统设计相同的模糊控制器, 只需对系统中变量的初始实际论域进行调整即可, 简捷且直观。

3 仿真与分析

3.1 仿真参数设定

选用被控对象的传递函数为:

$$G(s) = \frac{10}{s(20s+1)}e^{-20s}. \quad (22)$$

其中滞后时间 $\tau=20$ s, 流量传输目标值为 20。

3 种控制器的设计:

(1) 对于 PID-Smith 控制器, 控制器的 $k_p=0.00125$ 。

(2) 对于常规模糊-Smith 控制器, 模糊控制器按照章节 2.3.1 进行设计, 并且取量化因子 $q_e=0.3$, $q_{ec}=7$, 比例因子 $q_u=0.02$ 。

(3) 对于变论域模糊-Smith 控制器, 模糊控制器同样按照章节 2.3.1 进行设计, 并且结合章节 2.3.2 的变论域算法。取 $E_{eo}=20$, $E_{eco}=1.3$, $E_{uo}=0.12$, $k=20$, $\lambda=0.99$, $N_{\max}=6$, 论域伸缩因子 α_e 、 α_{ec} 按式(10)、式(11)进行计算, α_u 可由式(23)求得。

$$\alpha_u = \begin{cases} \alpha_e & \alpha_e \geq \alpha_{ec} + 0.7 \\ \sqrt{(\alpha_e^2 + \alpha_{ec}^2)/2} & |\alpha_e - \alpha_{ec}| \leq 0.05 \\ (\alpha_e + \alpha_{ec})/2 & \text{其他} \end{cases} \quad (23)$$

3.2 仿真结果对比分析

(1) 快速性: 如图 7 所示, 变论域模糊-Smith 控制算法要优于常规的模糊-Smith 控制算法和 PID-Smith 控制算法, 对系统的调节时间最短, 而 PID-Smith 控制算法的调节时间最长。

为了分析其原因, 将系统在 PID-Smith 控制、模糊-

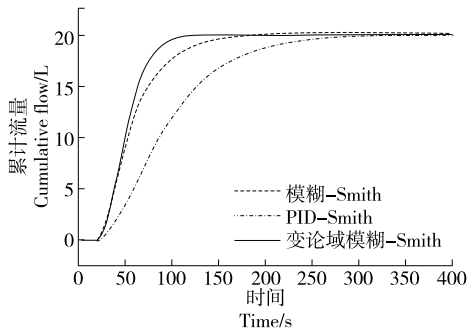


图 7 响应曲线

Figure 7 The response curve

Smith 控制及变论域模糊-Smith 控制 3 种控制算法调节下的瞬时流量进行对比,如图 8 所示。在变论域模糊-Smith 控制算法的调节下,系统的瞬时流量峰值最高且变化速度最快;在 PID-Smith 控制算法的调节下,系统的瞬时流量峰值最低且变化比较平缓;在常规的模糊-Smith 控制算法的调节下,系统的瞬时流量以及变化速度均处于它们之间。因此,系统在变论域模糊-Smith 控制算法的调节下达到稳态的速度最快。

(2) 超调量:为了分析系统在 PID-Smith 控制、模糊-Smith 控制及变论域模糊-Smith 控制 3 种控制算法的调节下是否出现超调量,将图 7 的响应曲线进行放大,如图 9 所示。由图 9 可知,系统在变论域模糊-Smith 控制算法以及 PID-Smith 控制算法的调节下无超调量,而在

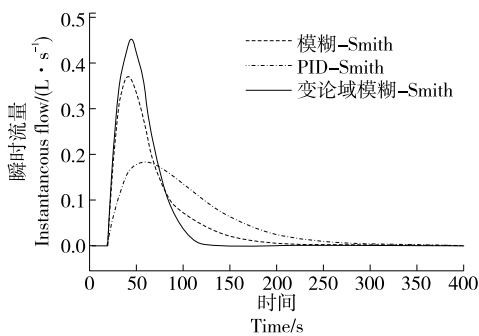


图 8 瞬时流量

Figure 8 Instantaneous flow

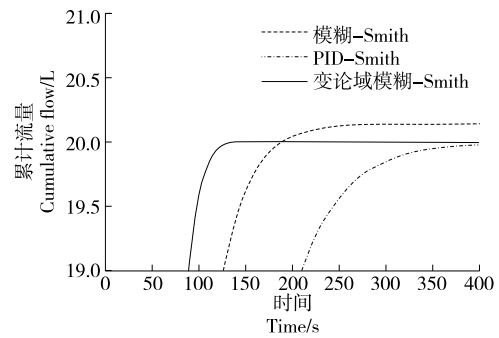


图 9 放大后的响应曲线

Figure 9 The enlarged response curve

常规的模糊-Smith 控制算法的调节下存在稳态误差而形成超调量,无法满足系统响应无超调的要求。

为了分析其原因,将变论域算法对量化因子以及比例因子的修正效果展示如图 10 所示。由图 10 可知,随着误差 e 以及误差变化率 ec 的缩小,量化因子 q_{ec} 在变论域算法的作用下扩大到能使 ec 较好分布到整个模糊论域的数值,使得控制器进行模糊推理以及决策更加精准。而比例因子 q_u 在算法的作用下随着误差趋于零而减小,使得控制输出不至于过大而使得系统的响应变化过快,以致出现超调。因此,系统在变论域模糊-Smith 算法的作用下控制精度更高,避免了稳态误差以及超调量的存在。

(3) 鲁棒性:改变被控对象的传递函数为:

$$G(s) = \frac{5}{s(25s+1)}e^{-20s} \quad (24)$$

改变模型后系统的响应曲线如图 11 所示,系统在变论域模糊-Smith 控制器的作用下响应无超调,而在 PID-Smith 控制器的作用下出现超调。因此,变论域模糊-Smith 控制算法对数学模型的精确度依赖较低,鲁棒性更好。

(4) Smith 预估器的补偿效果:如图 12 所示,在变论域模糊-Smith 控制器移除 Smith 预估器后,系统响应曲线出现振荡,PID-Smith 控制器移除 Smith 预估器后,出现超调量,均无法满足系统的控制需求,由此可见 Smith 预估器对时滞系统滞后环节的补偿作用。

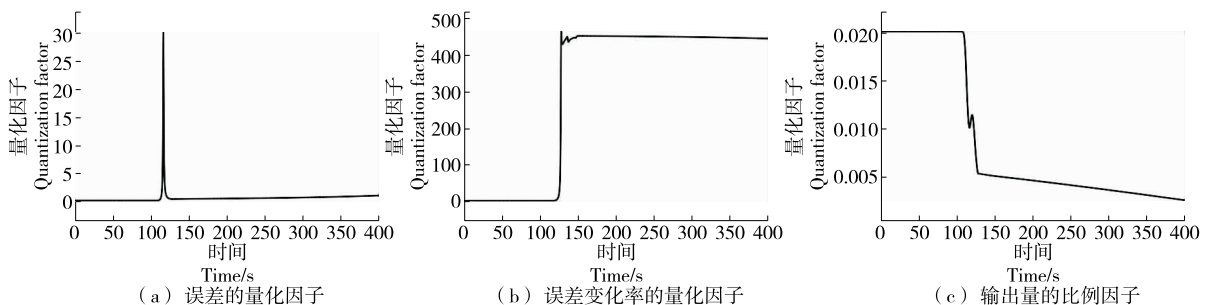


图 10 量化因子以及比例因子的修正

Figure 10 Modification of quantization factor and scale factor

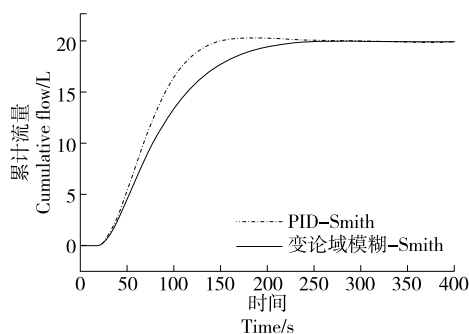
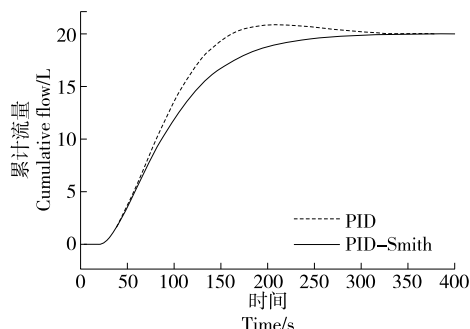
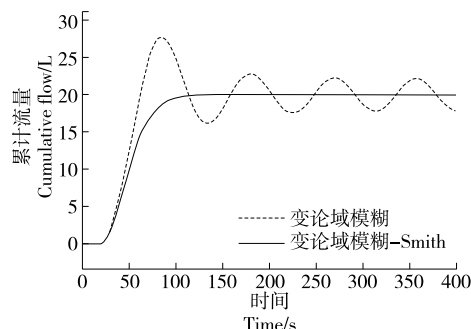


图 11 改变数学模型后的响应曲线

Figure 11 The response curve after changing the mathematical model



(a) PID-Smith控制器的补偿效果



(b) 变论域模糊-Smith控制器的补偿效果

图 12 Smith 预估器的补偿效果

Figure 12 The compensation effect of the Smith predictor

于系统精确的数学模型, 尽管模糊控制器能在一定程度上降低系统数学模型不精确的影响, 但不能完全替代 Smith 预估器的补偿作用。随着人工智能等高新技术的发展, 具有自学习能力的人工神经网络在白酒勾调智能化控制中的应用有待进一步研究。

参考文献

- [1] 谢永文, 李莉. 自动控制系统在白酒生产中的应用[J]. 酿酒科技, 2007(9): 53-58.
XIE Yong-wen, LI Li. Application of the automatic control system in the production of liquors[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2007(9): 53-58.
- [2] 张煜行, 孟庆才, 李泽霞. 白酒规模化勾调智能控制系统开发[J]. 酿酒科技, 2011(4): 112-114.
ZHANG Yu-hang, MENG Qing-cai, LI Ze-xia. Development of Intelligent large-scale liquor blending system[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2011(4): 112-114.
- [3] 谭绍利, 吕云怀. 茅台酒大容器自动化控制勾兑技术应用研究[J]. 酿酒科技, 2010(5): 65-68.
TAN Shao-li, LU Yun-huai. Research on automated blending techniques in large containers[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2010(5): 65-68.
- [4] 范磊, 艾昌文. 时滞过程中流量调节的自适应学习方法研究[J]. 自动化仪表, 2020, 41(9): 64-67.

4 结论

为了实现白酒自动化勾调的流量精确传输, 先建立白酒勾调控制系统的近似数学模型, 再针对系统的特点, 将模糊控制, Smith 预估器以及变论域算法的优点进行了有效结合, 最终设计出一种变论域模糊-Smith 控制算法。通过 Matlab 对 PID-Smith 控制、模糊-Smith 控制以及变论域模糊-Smith 控制 3 种控制算法的调节作用进行了仿真验证, 发现 Smith 预估器能够很好地消除滞后环节对系统的影响, 并且与 PID-Smith 以及模糊-Smith 控制算法相比较, 变论域模糊-Smith 控制算法的快速性以及鲁棒性更好, 而且控制精度更高。由于 Smith 预估器依赖

FAN Lei, AI Chang-wen. Study on adaptive learning method for flow regulation[J]. Process Automation Instrumentation, 2020, 41(9): 64-67.

- [5] 李帅, 魏建华. 带长管道的阀控非对称缸系统非线性控制[J]. 控制工程, 2009, 16(S1): 94-96, 100.
LI Shuai, WEI Jian-hua. Nonlinear control of long-pipe valve-controlled asymmetrical cylinder system[J]. Control Engineering of China, 2009, 16(S1): 94-96, 100.
- [6] 王明歆. 白酒勾调过程自控系统设计[D]. 天津: 天津大学, 2012: 24-26.
WANG Ming-xin. The design of automatic control system for liquor blending[D]. Tianjing: Tianjin University, 2012: 24-26.
- [7] 冯荣荣, 田亮. 柔性 Smith 预估控制在循环流化床机组协调控制系统中的应用设计[J]. 广东电力, 2021, 34(2): 108-114.
FENG Rong-rong, TIAN Liang. Application design of flexible Smith predictive control in coordinated control system of circulating fluidized bed unit[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(2): 108-114.
- [8] 郑仰东. 采用 Smith 预估器模型的时滞系统自适应控制[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(3): 416-424.
ZHENG Yang-dong. Adaptive control for time-delay systems adopting Smith predictor models[J]. Control Theory & Applications, 2021, 38(3): 416-424.
- [9] 杨辰飞, 牛晨旭, 吕蒙. Smith 预估控制器在大延迟系统中的应

- 用[J]. 工业控制计算机, 2019, 32(11): 106-107.
- YANG Chen-fei, NIU Chen-xu, LU Meng. Application of Smith predictive controller in large delay system[J]. Industrial Control Computer, 2019, 32(11): 106-107.
- [10] 高锦, 章家岩, 冯旭刚. 基于 Smith 预估补偿的啤酒发酵温度控制策略[J]. 食品与机械, 2019, 35(8): 115-120.
- GAO Jin, ZHANG Jia-yan, FENG Xu-gang. Control strategy of beer fermentation temperature based on Smith predictable compensation[J]. Food & Machinery, 2019, 35(8): 115-120.
- [11] 单文娟, 汤伟, 王孟效, 等. 基于分数阶 PID 的纸张定量双自由度 Smith 预估控制[J]. 包装工程, 2017, 38(11): 143-147.
- SHAN Wen-juan, TANG Wei, WANG Meng-xiao, et al. Two-degree-of-freedom Smith predictor based on fractional order PID controller in paper basis weight[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(11): 143-147.
- [12] 程俊红, 王军芬, 李薇. 基于 Smith 预估模糊 PID 的电镀废水处理系统改进[J]. 电镀与精饰, 2019, 41(5): 27-32.
- CHENG Jun-hong, WANG Jun-fen, LI Wei. Improvement of electroplating wastewater treatment system based on Smith predictive estimate and fuzzy PID[J]. Plating and Finishing, 2019, 41(5): 27-32.
- [13] 张浩强, 罗相巧, 黄鸿滨, 等. 基于智能算法的白酒发酵罐温度控制 PID 参数整定[J]. 机械研究与应用, 2021, 34(3): 41-43, 47.
- ZHANG Hao-qiang, LUO Xiang-qiao, HUANG Hong-bin, et al. PID parameter tuning of temperature control in liquor fermentation tank based on Intelligent algorithm[J]. Mechanical Research & Application, 2021, 34(3): 41-43, 47.
- [14] 郑斌, 黄璐, 周亮. 基于智能水滴算法的空调水温二阶时滞 PID 控制[J]. 控制工程, 2021, 28(3): 540-545.
- ZHENG Bin, HUANG Lu, ZHOU Liang. Two order time delay PID control of air-conditioning water temperature based on Intelligent water droplet algorithm[J]. Control Engineering of China, 2021, 28(3): 540-545.
- [15] 戴世纪, 王仲根. 基于 Smith 预估型模糊 PID 温度控制系统的设计[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2020, 37(6): 13-18.
- DAI Shi-ji, WANG Zhong-gen. Design of fuzzy-PID temperature control system based on Smith predictive mode[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2020, 37(6): 13-18.
- [16] 刘斌, 谢煜, 孙艺哲, 等. 基于 Smith 预估模糊控制的温室灌溉决策系统设计[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(8): 149-153.
- LIU Bin, XIE Yu, SUN Yi-zhe, et al. Design of greenhouse irrigation decision system based on Smith fuzzy controller[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(8): 149-153.
- [17] 张磊, 王思明. 改进 Smith 预估时延补偿的模糊网络控制系统研究[J]. 现代电子技术, 2020, 43(1): 126-130.
- ZHANG Lei, WANG Si-ming. Research on network fuzzy control system for improved Smith predictive delay compensation[J]. Modern Electronics Technique, 2020, 43(1): 126-130.
- [18] 李洪兴. 从模糊控制的数学本质看模糊逻辑的成功: 关于“关于模糊逻辑似是而非的争论”的似是而非的介入[J]. 模糊系统与数学, 1995, 9(4): 1-14.
- LI Hong-xing. To see the success of fuzzy logic from mathematical essence of fuzzy control: On “The paradoxical success of fuzzy logic”[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 1995, 9(4): 1-14.
- [19] 邱光黎, 徐进钊, 邱炯智, 等. 基于函数型伸缩因子的桥式吊车变论域模糊 PID 控制器设计[J]. 机电工程技术, 2021, 50(2): 156-160.
- QIU Guang-fan, XU Jin-zhao, QIU Jiong-zhi, et al. Design of fuzzy PID controller in variable-universe of bridge crane based on functional contraction-expansion factor[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2021, 50(2): 156-160.
- [20] 文力, 陈志辉, 郭润龙, 等. 变论域模糊 PID 控制在交流发电系统中的应用[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(2): 34-41.
- WEN Li, CHEN Zhi-hui, GUO Run-long, et al. Application of variable universe fuzzy PID control in AC power generation system[J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(2): 34-41.
- [21] 毛君, 刘思阳. 基于变论域模糊 PID 的焊机电弧长度调节控制[J]. 控制工程, 2019, 26(12): 2 188-2 192.
- MAO Jun, LIU Si-yang. Arc length control of welding machine based on variable universe fuzzy PID[J]. Control Engineering of China, 2019, 26(12): 2 188-2 192.
- (上接第 189 页)
- [15] 易笑生, 刘汝宽, 肖志红, 等. 正丁醇提取油茶饼粕中茶油和茶皂素的研究[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(4): 67-71.
- YI X S, LIU R K, XIAO Z H, et al. Extraction of tea oil and tea saponin from camellia oleifera cake by n-butanol[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2016, 31(4): 67-71.
- [16] CAO W T, LIU Ning, WANG Lei, et al. Effects of polyunsaturated fatty acids ratios on rats with DSS-induced colitis[J]. China Journal Public Health, 2013, 29: 538-540.
- [17] KAUR N, CHUGH V, GUPTA A K. Essential fatty acids as functional components of foods: A review[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 10: 2 289-2 303.
- [18] 蒋秀琴, 刘立成, 赵福忠, 等. 常见植物油脂肪酸含量的分析[J]. 饲料博览, 2010(3): 27-30.
- JIANG X Q, LIU L C, ZHAO F Z, et al. Analysis of content in common vegetable oil[J]. Feed Expo, 2010(3): 27-30.
- [19] 杜宇, 王欣林, 朱龙, 等. 甘草色素优化提取及其热裂解产物在卷烟品质评价上的应用[J]. 贵州农业科学, 2015, 43(12): 178-181.
- DU Y, WANG X L, ZHU L, et al. Optimal extraction of licorice pigment and application of its pyrolysis product in quality evaluation of cigarette[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2015, 43(12): 178-181.
- [20] 葛含静. 苹果籽油提取、理化性质测定及脂肪酸分析研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2006: 45.
- GE H J. Research on the extraction, chemical properties and analysis of fatty acid of apple seed oil[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University: 45.