

基于改进 Smith 预估控制结构的二自由度 PID 控制

尹成强¹ 高洁¹ 孙群¹ 赵颖¹

摘要 针对工业过程中的二阶不稳定时滞过程, 基于改进史密斯预估控制结构提出了一种简单的两自由度控制方案. 设定值跟踪控制器和扰动抑制控制器采用同一设计程序, 并基于内模控制原理提出了控制器解析设计方案. 设定值跟踪控制器和扰动抑制控制器可分别通过单性能参数独立调节和优化, 每个控制器都具有 PID 形式, 给出了控制器调整参数的选择范围和扰动抑制闭环保证鲁棒稳定性的条件. 仿真实例验证了提出方法对于近期其他方法的优越性.

关键词 改进史密斯预估控制, 二自由度, 二阶不稳定过程, PID 控制器

引用格式 尹成强, 高洁, 孙群, 赵颖. 基于改进 Smith 预估控制结构的二自由度 PID 控制. 自动化学报, 2020, 46(6): 1274–1282

DOI 10.16383/j.aas.2018.c170596



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Two Degree of Freedom PID Control Based on Modified Smith Predictor Control Structure

YIN Cheng-Qiang¹ GAO Jie¹ SUN Qun¹ ZHAO Ying¹

Abstract A simple two degree of freedom control scheme is proposed for second-order unstable processes with time delay based on modified Smith predictor control structure. The set point tracking controller and the disturbance rejection controller are designed with the same procedure, and analytical design method on the basis of the internal model control (IMC) design principle is adopted for the two controllers. The controller for setpoint response and the controller for disturbance can be adjusted and optimized independently, and the two controllers are designed as PID form respectively. Suitable values for the adjustable parameters of two controllers and conditions holding the closed loop robust stability are recommended. Simulation examples demonstrate the superiority of the proposed method over recent other approaches.

Key words Modified Smith predictor control, two degree of freedom, second-order unstable process, PID controller

Citation Yin Cheng-Qiang, Gao Jie, Sun Qun, Zhao Ying. Two degree of freedom PID control based on modified Smith predictor control structure. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(6): 1274–1282

实际生产中, 大多数的工业过程都是稳定或临界稳定的, 但同时也存在着少数的不稳定过程, 它们难以控制, 尤其在系统存在明显时滞情况下. 其主要原因在于不稳定极点容易导致很大的超调和较长的过渡时间, 并且系统输入输出的平衡状态很容易被外界干扰破坏^[1].

针对不稳定时滞过程, 专家学者进行了大量的研究, 也取得了一系列的研究成果. 其中, 基于单位反馈基础上提出的改进 PID 控制方法不断被提出.

最近, 文献针对不稳定时滞对象采用直接合成法设计了 PID 控制器, 并基于灵敏度函数给出了参数调整方法^[2]. 文献 [3] 针对二阶不稳定时滞对象给出了简单的 PID 调整方法, 采用了三个尺度参数计算传统 PID 控制器的比例、微分、积分三个参数. Zhang 等^[4–5] 针对二阶和多阶不稳定时滞对象, 基于单位反馈控制结构和镜像方法设计的控制器, 系统抗扰动性能和鲁棒稳定性能有了明显提高. 基于内模控制的 PID 控制不仅保持了传统 PID 控制特点, 而且具有内模控制的所有优点, 自提出以来就得到学者专家的青睐. 针对不稳定时滞对象, 国内外众多专家学者在这个领域做了很多研究, 也有很多方法已应用到实际生产中, 取得较好的控制效果^[6–11]. 随着智能控制技术的发展和先进算法研究的深入, 多种智能算法被应用于 PID 控制器参数整定^[12–17], 与普通整定方法比, 其在设定值精确、快速跟踪方面性能更优, 但对控制器的处理能力要求更高. 为确保控制系统同时具有良好的设定值跟踪性能和抗扰动性

收稿日期 2017-10-26 录用日期 2018-03-16
Manuscript received October 26, 2017; accepted March 16, 2018
国家自然科学基金(61703192), 山东省重点研发计划(2016GNC112014), 山东省高等学校科技计划(J15LB09) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61703192), Shandong Province Key Technologies Research and Development Program (2016GNC112014), and Science and Technology Funds of Shandong Education Department (J15LB09)
本文责任编辑 孙健

Recommended by Associate Editor SUN Jian
1. 聊城大学机械与汽车工程学院 聊城 252059
1. School of Mechanical and Automobile Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059

能, 针对不稳定时滞对象的二自由度控制方案相继被提出: 利用 Smith 预估控制和内模控制的优势, 对其做结构上的改进, 提出了两自由度的 Smith 控制^[18-20] 和两自由度的内模控制^[21-24], 也获得了比较满意的控制效果. 另外, 针对不稳定时滞对象, 文献 [25] 提出一种基于并行控制结构和直接合成法的控制方案. 文献 [26-27] 采用简单串级控制结构设计了不稳定时滞对象的控制方案, 其中内环用于稳定被控对象, 外环用于提高系统性能. 针对不稳定时滞对象提出的这些二自由度控制方案都取得了不错的控制效果.

目前在二自由度控制系统设计过程中, 大都需要针对不同控制对象设计不同的设定值跟踪控制器和扰动抑制控制器, 并且通常设定值跟踪控制器和扰动抑制控制器的设计程序不同, 从而增加了控制器设计程序的任务量. 为此本文在改进 Smith 预估控制基础上提出了一种简单二自由度控制方案, 基于内模原理形成了 PID 控制器整定方法, 此整定方法可用于三类二阶不稳定时滞对象的设定值跟踪控制器和扰动抑制控制器的设计. 通过仿真研究可以看出, 提出的控制方案不仅可以大大减少控制器设计过程的复杂程度, 而且系统的设定值跟踪性能和抗扰动性能都优于近期文献中的控制效果. 设计的控制器容易在过程控制的分布式控制系统 (Distributed control system, DCS) 或可编程序逻辑控制器 (Programmable logic controller, PLC) 中实现, 便于工程操作.

不失一般性, 本文针对工业过程中典型的 3 类二阶不稳定时滞对象, 研究控制器的设计方法, 它们的传递函数分别为

$$P_1(s) = \frac{ke^{-\theta s}}{s(T_1s - 1)} \quad (1)$$

$$P_2(s) = \frac{ke^{-\theta s}}{(T_1s - 1)(T_2s + 1)} \quad (2)$$

$$P_3(s) = \frac{ke^{-\theta s}}{(T_1s - 1)(T_2s - 1)} \quad (3)$$

针对以上 3 类不稳定时滞对象, 提出的二自由度控制结构如图 1 所示, 其中 $P_m(s)$ 为被控对象 $P(s)$ 的数学模型, $K_1(s)$ 为设定值跟踪控制器, $K_2(s)$ 为扰动抑制控制器. $d_i(s)$ 和 $d_o(s)$ 分别为混入被控对象的输入干扰和输出干扰. 在标称情况下, 即对象模型和实际对象完全匹配时, 由图 1 可以得到设定值跟踪响应的传递函数

$$H_r(s) = \frac{y(s)}{r(s)} = \frac{P(s)K_1(s)}{1 + P(s)K_1(s)} \quad (4)$$

在标称情况下, 从输入干扰 d_i 、输出干扰 d_o 到

过程输出 y 的传递函数分别为

$$H_{d_i}(s) = \frac{y(s)}{d_i(s)} = \frac{P(s)}{1 + K_2(s)P(s)} \quad (5)$$

$$H_{d_o}(s) = \frac{y(s)}{d_o(s)} = \frac{1}{1 + K_2(s)P(s)} \quad (6)$$

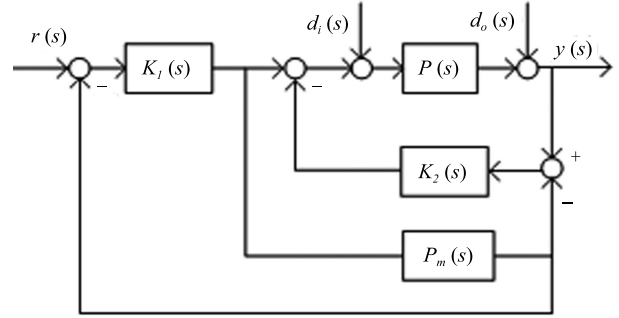


图 1 改进 Smith 控制结构

Fig. 1 Modified Smith predictor structure

可以看出, 该控制结构的设定值跟踪响应和负载扰动响应完全解耦, 可以分别通过调节 $K_1(s)$ 和 $K_2(s)$ 达到需要的控制效果.

同时也可以得到被控制过程负载干扰抑制闭环的补灵敏度函数

$$T(s) = \frac{K_2(s)P(s)}{1 + K_2(s)P(s)} \quad (7)$$

1 控制器的设计

由式 (4) 和式 (7) 可以看到, 设定值跟踪响应函数和补灵敏度函数具有相同的形式, 其中的 $K_1(s)$, $K_2(s)$ 分别完成系统设定值跟踪和抗扰动功能. 为减少设计过程的复杂度, 对设定值跟踪控制器和扰动抑制控制器采用相同的设计方法. 内模控制因其设计思路简单, 控制性能优越, 便于实施等优点, 在工业过程控制中已得到广泛应用. 在此采用基于内模控制的单位负反馈方法设计设定值跟踪控制器 $K_1(s)$ 和扰动抑制控制器 $K_2(s)$. 以 $P_3(s)$ 为基本研究对象, 首先给出设定值跟踪控制器的详细设计方法.

图 2 和图 3 分别为内模控制结构图和基于内模控制器的单位反馈控制结构图.

图 2 中, $C(s)$ 为标准内模控制器, $K_1(s)$ 为基于内模原理的控制器, 可视为提出的改进 Smith 控制结构中的设定值跟踪控制器或扰动抑制控制器. 根据内模控制器设计方法^[28], 过程模型 $P_m(s)$ 分为两部分, $P_m(s) = P_{m-}(s)P_{m+}(s)$, $P_{m-}(s)$ 和 $P_{m+}(s)$ 分别为 $P_m(s)$ 的最小相位部分和非最小相位部分. 对于控制对象 $P_3(s)$, 则 $P_{m-}(s) = k/(T_1s$

$-1)(T_2s - 1)$, $P_{m+}(s) = e^{-\theta s}$. 标准内模控制器设计为

$$C(s) = P_{m-}(s)f(s) \quad (8)$$

其中, $f(s)$ 为内模控制器滤波器. 根据内模控制系统内稳定的充要条件, $(1 - P(s)C(s))P(s)$, $C(s)$, $P(s)C(s)$ 必须是稳定正则的实有理传递函数. 因此为保证闭环系统内部稳定, 设计滤波器形式为^[29]

$$f(s) = \frac{b_2s^2 + b_1s + 1}{(\lambda_1s + 1)^4} \quad (9)$$

其中, λ_1 为设定值跟踪控制器的可调整参数, b_1 和 b_2 的值分别为

$$b_1 = \frac{T_2^2(\frac{\lambda_1}{T_2} + 1)^4 e^{\frac{\theta}{T_2}} - T_1^2(\frac{\lambda_1}{T_1} + 1)^4 e^{\frac{\theta}{T_1}} + T_1^2 - T_2^2}{T_2 - T_1}$$

$$b_2 = T_2^2 \left[\left(\frac{\lambda_1}{T_2} + 1 \right)^4 e^{\frac{\theta}{T_2}} - 1 \right] - b_1 T_2$$

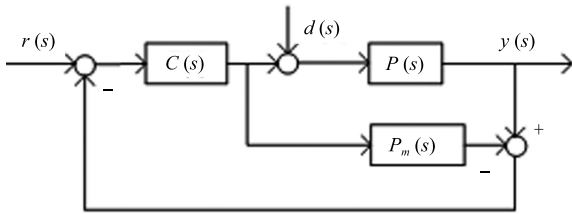


图2 内模控制结构

Fig.2 IMC control structure

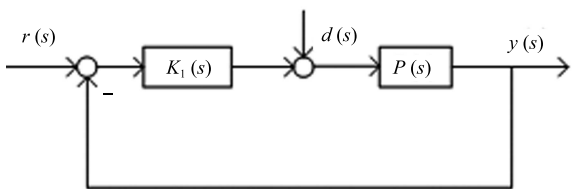


图3 单位反馈控制结构

Fig.3 Feedback control structure

根据基于内模控制原理的单位反馈控制器设计方法, 可由下式得到控制器 $K_1(s)$

$$\frac{K_1(s)P(s)}{1 + K_1(s)P(s)} = P(s)C(s) \quad (10)$$

联合式 (7)~(10), 可得到 $K_1(s)$ 的具体形式

$$K_1(s) = \frac{(T_1s - 1)(T_2s - 1)(b_2s^2 + b_1s + 1)}{k[(\lambda_1s + 1)^4 - e^{-\theta s}(b_2s^2 + b_1s + 1)]} \quad (11)$$

将上式逼近为 PID 形式

$$K_1(s) = k_{k1} \left(1 + \frac{1}{\tau_{i1}s} + \tau_{d1}s \right) \frac{1 + \delta_1s}{1 + \beta_1s} \quad (12)$$

其中, $k_{k1} = b_1/(k(4\lambda_1 + \theta - b_1))$, $\tau_{i1} = b_1$, $\tau_{d1} = b_2/b_1$, $\beta_1 = \frac{b_1\theta/2 - b_2 + 2\lambda_1\theta + 6\lambda_1^2}{\theta + 4\lambda_1 - b_1} + T_1 + T_2$, $\delta_1 = 0.5\theta$.

由式 (4) 和式 (10) 可以得到设定值跟踪响应传递函数的具体形式

$$H_r(s) = \frac{b_2s^2 + b_1s + 1}{(\lambda_1s + 1)^4} e^{-\theta s} \quad (13)$$

由上式可以看出, 系统的设定值跟踪响应存在超调, 响应过程中分子的 $b_2s^2 + b_1s + 1$ 将导致不期望的超调. 为此设计滤波器

$$F(s) = \frac{1}{b_2s^2 + b_1s + 1} \quad (14)$$

按照与 $K_1(s)$ 同样的设计程序, 可以得到扰动抑制控制器 $K_2(s)$

$$K_2(s) = k_{k2} \left(1 + \frac{1}{\tau_{i2}s} + \tau_{d2}s \right) \frac{1 + \delta_2s}{1 + \beta_2s} \quad (15)$$

其中, $k_{k2} = b_1/k(4\lambda_2 + \theta - b_1)$, $\tau_{i2} = b_1$, $\tau_{d2} = b_2/b_1$, $\beta_2 = \frac{b_1\theta/2 - b_2 + 2\lambda_2\theta + 6\lambda_2^2}{\theta + 4\lambda_2 - b_1} + T_1 + T_2$, $\delta_2 = 0.5\theta$.

上述设计过程是针对控制对象 $P_3(s)$ 给出的控制器设计方法. 对于对象 $P_1(s)$ 和 $P_2(s)$, 只需经过简单变换将其转换成与 $P_3(s)$ 一致的形式即可. 对象 $P_1(s)$ 可转换为 $P_1(s) = k'e^{-\theta s}/((T's - 1)(Ts - 1))$, 其中 T' 的选取满足 $T' \geq 100k$ 即可, 同时也可得到相应的 $k' = T'k$; 对于控制对象 $P_2(s)$ 可转换为 $P_2(s) = -ke^{-\theta s}/((T_1s - 1)(-T_2s - 1))$. 控制器 $K_1(s)$, 其性能整定参数为 λ_1 , 调小 λ_1 可使给定值响应加快, 但是所需控制器的输出能量要增大. 对于控制器 $K_2(s)$, 其性能整定参数为 λ_2 , 减少 λ_2 可提高系统的抗负载扰动能力, 减少因负载扰动造成的输出误差, 但同时会降低系统的鲁棒稳定性, 所以 λ_2 的选取应在满足控制闭环的抗扰动性和鲁棒稳定性之间折衷. 经过大量仿真试验, λ_1 可取值 $0.5\theta - 1.5\theta$, λ_2 可取值 $0.75\theta - 1.6\theta$, 用 $0.1\beta_2$ 代替 β_2 会提高系统的抗扰动性能; 当 $\lambda_1 < \theta$ 时, 用 $0.1\beta_1$ 代替 β_1 会提高系统的跟踪性能.

2 系统稳定性分析

2.1 内部稳定性分析

根据系统内部稳定性判别方法^[30], 如果系统含 n 个对象, 其传递函数分别为 $g_i(s)$, $i = 1, 2, \dots, n$, 各函数的特征多项式为 $p_i(s)$, $i = 1, 2, \dots, n$, 定义

$$J(s) = \Delta \prod_{i=1}^n p_i(s) \quad (16)$$

$$\Delta = 1 - \sum_i L_{1i} + \sum_j L_{2j} - \sum_k L_{3k} + \dots \quad (17)$$

其中, L_{1i} 是回路增益, L_{2j} 是两个不接触回路的增益乘积, L_{3k} 是三个不接触回路增益的乘积, 推而广之. 由图 1 可知设计的控制系统包含 4 个子系统: $p_1(s) = K_1(s)$, $p_2(s) = P(s)$, $p_3(s) = K_2(s)$, $p_4(s) = P_m(s)$; 以及两个回路: $L_1: -K_1(s)P_m(s)$, $L_2: -K_2(s)P(s)$. L_1 和 L_2 互不接触, 得到

$$\Delta = 1 - L_1 - L_2 + L_1L_2 = [1 + K_1(s)P_m(s)][1 + K_2(s)P(s)] \quad (18)$$

令 $K_1(s) = a(s)/b(s)$, $P(s) = d(s)/c(s)$, $K_2(s) = e(s)/f(s)$, $P_m(s) = \hat{d}(s)/\hat{c}(s)$, 代入式 (16), 得到

$$J(s) = \Delta(s) \prod_{i=1}^6 p_i(s) = [1 + K_1(s)P_m(s)][1 + K_2(s)P(s)] \times b(s) \times c(s) \times f(s) \times \hat{c}(s) = [b(s)\hat{c}(s) + a(s)\hat{d}(s)][f(s)c(s) + e(s)d(s)]$$

系统保持内部稳定的充要条件是 $J(s)$ 的所有根都位于左半平面. 由上式可以看出, 多项式 $b(s)\hat{c}(s) + a(s)\hat{d}(s)$ 反映由控制器 $K_1(s)$ 决定 $P_m(s)$ 的稳定性; 多项式 $f(s)c(s) + e(s)d(s)$ 反映由控制器 $K_2(s)$ 决定 $P(s)$ 的稳定性. 在标称情况下, $P(s) = P_m(s)$, 并且控制器 $K_1(s)$ 与 $K_2(s)$ 的设计程序相同, 所以根据式 (12) 和式 (15), 以及三类二阶不稳定时滞对象传递函数 (1)~(3) 可以计算得到 $b(s)\hat{c}(s) + a(s)\hat{d}(s)$ 和 $f(s)c(s) + e(s)d(s)$ 的根均位于左半平面, 能够保证系统内稳定性, 所以整个控制系统是稳定的.

2.2 鲁棒稳定性分析

根据小增益定理, 控制系统保证鲁棒稳定性的充要条件是 $\|T(s)l_m\|_\infty < 1$, 其中 $T(s)$ 为负载干扰抑制闭环的补灵敏度函数, $l_m(s)$ 表示实际被控过程的乘性不确定性界^[31]

$$l_m(s) = \frac{P(s) - P_m(s)}{P_m(s)} \quad (19)$$

对于控制对象 $P_3(s)$, 如果模型的 4 个参数皆存在不确定性, 即

$$P'(s) = \frac{(k + \Delta k)e^{-(\theta + \Delta\theta)s}}{(T_1s - 1)(T_2s - 1)(\Delta Ts + 1)} \quad (20)$$

可以得到过程的乘性不确定性界

$$l_m(s) = \left| \frac{P'(s) - P(s)}{P(s)} \right| = \frac{(1 + \frac{\Delta k}{k})e^{-\Delta\theta s}}{(\Delta Ts + 1)} - 1$$

进而可得到调整参数时的约束条件

$$\left\| \frac{b_2s^2 + b_1s + 1}{(\lambda_2s + 1)^4} \right\|_\infty < \frac{1}{\left\| \frac{(1 + \frac{\Delta k}{k})e^{-\Delta\theta s}}{(\Delta Ts + 1)} - 1 \right\|_\infty} \quad (21)$$

如果只有时滞存在不确定性时, 则控制器调整参数的约束条件可表示为

$$\left\| \frac{b_2s^2 + b_1s + 1}{(\lambda_2s + 1)^4} \right\|_\infty < \frac{1}{|e^{-j\Delta\theta\omega} - 1|} \quad (22)$$

如果只有增益存在不确定性时, 控制器调整参数的约束条件为

$$\left\| \frac{b_2s^2 + b_1s + 1}{(\lambda_2s + 1)^4} \right\|_\infty < \frac{k}{|\Delta k|} \quad (23)$$

另外, 根据鲁棒控制理论, 整定参数 λ_2 只能在满足该控制闭环的鲁棒稳定性和标称性能之间折衷, 还必须满足约束条件

$$|l_m(s)T(s)| + |W(s)(1 - T(s))| < 1 \quad (24)$$

其中, $W(s)$ 为闭环灵敏度函数权重. 对于控制器 $K_2(s)$, λ_2 增大时系统鲁棒稳定性增强, 但系统扰动抑制能力被削弱; 相反, 减小 λ_2 可增强系统的扰动抑制能力, 但会降低系统的鲁棒稳定性.

3 仿真研究及分析

针对三类二阶不稳定时滞对象, 本文方法与国内外最新研究成果进行了仿真比较. 为便于量化比较, 本文引入绝对误差积分 (IAE)、误差绝对值与时间乘积积分 (ITAE)、系统输出峰值 (PV) 和输出波动总和 (TV) 四个性能指标, 其中

$$IAE = \int_0^\infty |e(t)|dt$$

$$ITAE = \int_0^\infty t|e(t)|dt$$

$$TV = \sum_{n=0}^N |y_{n+1} - y_n|$$

例 1. 考察 Kumar 等^[32] 和 Ghousiya 等^[33] 研究的工业过程 $e^{-0.2s}/s(s-1)$. 应用本文的设计方法, 首先将传递函数近似为 $P_m(s) = 100e^{-0.2s}/(100s - 1)(s - 1)$, 取控制参数 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.3$, 得到控制器 $K_1(s)$, $K_2(s)$ 和 $F(s)$ 分别为

$$K_1(s) = 4.8356 \left(1 + \frac{1}{1.3971s} + 0.7811s \right) \times \frac{0.1s + 1}{0.0632s + 1}$$

$$K_2(s) = 4.8356 \left(1 + \frac{1}{1.3971s} + 0.7811s \right) \times \frac{0.1s + 1}{0.00632s + 1}$$

$$F(s) = \frac{1}{1.0913s^2 + 1.3971s + 1}$$

Kumar 等^[32] 和 Ghousiya 等^[33] 提出的控制方案具有较好的控制效果, 在其仿真验证中也显示优于其他控制方法, 在此将本文方法和它们进行比较. 分别在设定点输入处加上单位阶跃信号, $t = 10\text{ s}$ 时在对象输入端负载干扰处加上反向单位阶跃信号, 标称系统输出如图 4 所示, 控制响应如图 5 所示.

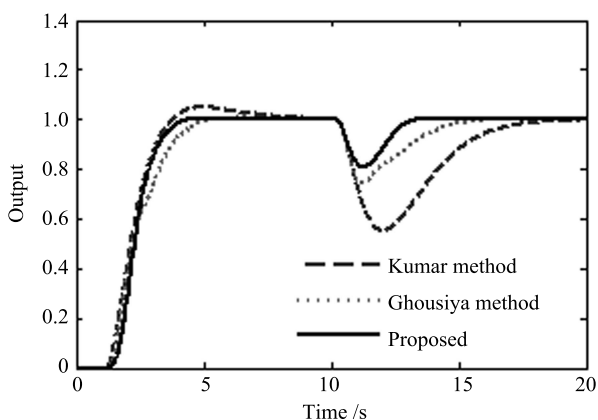


图 4 例 1 标称系统阶跃响应

Fig. 4 Step responses for Example 1 (normal)

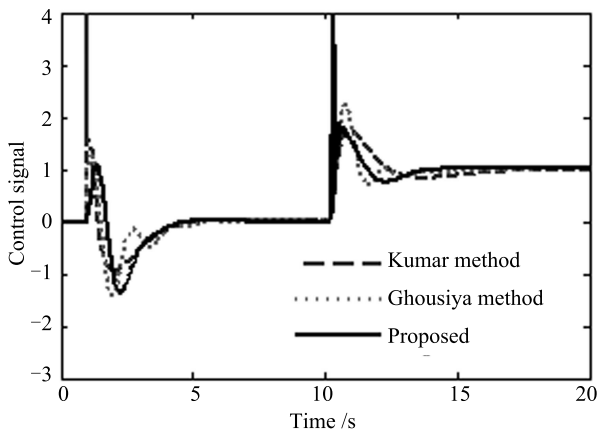


图 5 例 1 标称系统控制响应

Fig. 5 Control signals for Example 1 (normal)

此外, 当假设实际对象的延迟时间和增益常数都增加 20% 时, 得到的摄动系统的输出响应如图 6

所示, 控制输出如图 7 所示. 由图 4~6 可以看出, 本文方法的标称系统响应和扰动响应都优于其他两种方法. 特别地, 当系统存在不确定性时, 控制器响应平滑, 没有大的波动现象. 标称系统响应和扰动系统响应下的三种方法的性能指标见表 1, 由表 1 可以

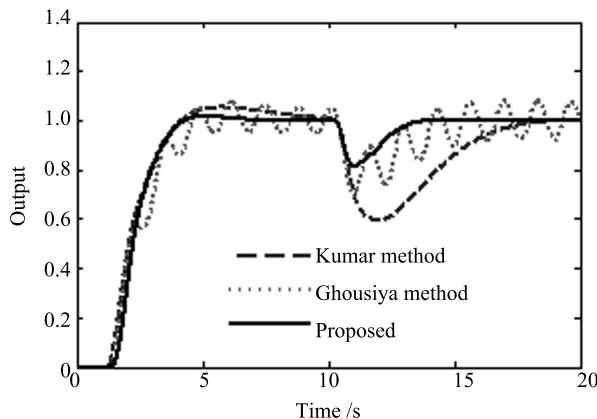


图 6 例 1 扰动系统阶跃响应

Fig. 6 Step responses for Example 1 (perturbed)

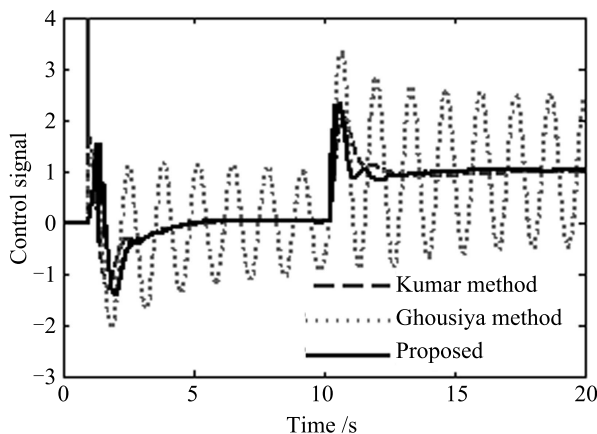


图 7 例 1 扰动系统控制响应

Fig. 7 Control signals for Example 1 (perturbed)

表 1 例 1 的性能指标

Table 1 Performance measures for Example 1

方法	IAE	ITAE	OV	PV
标称响应				
本文方法	1.40	2.58	1.00	1.0091
Kumar 方法 ^[32]	1.41	3.13	1.05	1.1042
Ghousiya 方法 ^[33]	1.52	3.14	1.01	1.0226
扰动响应				
本文方法	1.75	7.75	1.02	1.4168
Kumar 方法 ^[32]	3.01	31.09	1.05	1.9253
Ghousiya 方法 ^[33]	2.90	27.29	1.08	6.2813

看出本文方法的各性能指标都优于 Kumar 等^[32] 和 Ghousiya 等^[33] 的方法。

例 2. 考察二阶不稳定时滞对象

$$P_m(s) = \frac{e^{-0.939s}}{(5s-1)(2.07s+1)}$$

应用本文的设计方法, 首先将传递函数近似为 $P_m(s) = -e^{-0.939s}/((5s-1)(-2.07s-1))$, 分别取控制参数 $\lambda_1 = 0.65$, $\lambda_2 = 0.85$, 得到控制器 $K_1(s)$, $K_2(s)$ 和 $F(s)$

$$K_1(s) = 9.7971 \left(1 + \frac{1}{3.9413s} + 1.1358s \right) \times \frac{0.4685s + 1}{0.0122s + 1}$$

$$K_2(s) = 7.3841 \left(1 + \frac{1}{5.0187s} + 1.217s \right) \times \frac{0.4685s + 1}{0.02s + 1}$$

$$F(s) = \frac{1}{4.4764s^2 + 3.9413s + 1}$$

许多文献都曾针对该对象进行了研究, 现选取近期提出的 Ajmerin 等^[25] 方法和 Wang 等^[28] 方法与本文方法进行比较. 在 $t = 1s$ 时于设定点输入处加上单位阶跃信号, $t = 30s$ 时在对象输入端负载干扰处加上反向阶跃信号, 标称系统输出如图 8 所示, 可以看出, 本文方法略优于其他两种方法。

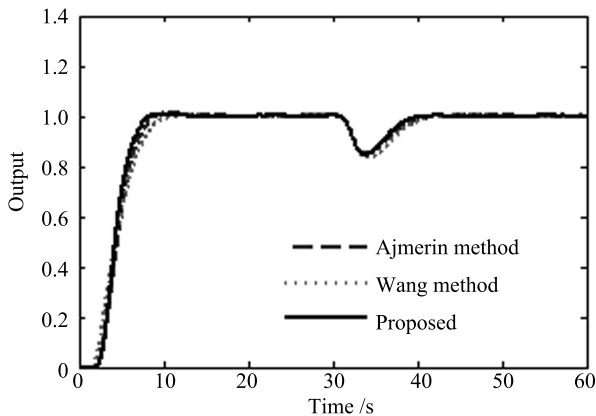


图 8 例 2 标称系统阶跃响应

Fig. 8 Step responses for Example 2 (normal)

为验证系统的鲁棒性, 将实际对象的延迟时间和增益常数都增加 10% 的不确定性, 同时两个时间常数都减少 10% 时, 得到的扰动系统的输出响应如图 9 所示, 三种方法的性能指标如表 2. 由仿真曲线和性能指标可以看出, 在系统模型失配时, 本文方法仍能保持良好的系统性能。

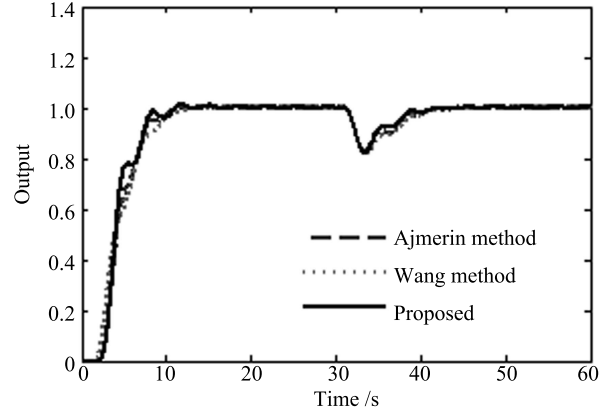


图 9 例 2 扰动系统阶跃响应

Fig. 9 Step responses for Example 2 (perturbed)

表 2 例 2 的性能指标

Table 2 Performance measures for Example 2

方法	IAE	ITAE	OV	PV
标称响应				
本文方法	3.57	10.94	1.00	1.0144
Ajmerin 方法 ^[25]	3.71	12.15	1.00	1.0083
Wang 方法 ^[28]	3.75	12.51	1.00	1.0052
扰动响应				
本文方法	4.37	36.80	1.01	1.590
Ajmerin 方法 ^[25]	4.67	41.29	1.01	1.535
Wang 方法 ^[28]	4.70	44.70	1.00	1.381

例 3. 考察 Vanavil 等^[34] 研究的二阶不稳定时滞对象

$$P_m(s) = \frac{2e^{-0.3s}}{(3s-1)(s-1)}$$

应用本文的设计方法, 控制参数取为 $\lambda_1 = 0.35$, $\lambda_2 = 0.3$, 根据式 (12), (14) 和 (15) 得到设定值跟踪控制器、扰动抑制控制器和滤波器为

$$K_1(s) = 3.5671 \left(1 + \frac{1}{1.491s} + 1.3364s \right) \times \frac{0.15s + 1}{0.0577s + 1}$$

$$K_2(s) = 4.6264 \left(1 + \frac{1}{1.3537s} + 1.1093s \right) \times \frac{0.15s + 1}{0.0045s + 1}$$

$$F(s) = \frac{1}{1.9926s^2 + 1.491s + 1}$$

同时引入最近 Ajmerin 等^[25] 的方法进行比较. 在 $t = 1\text{s}$ 时在设定点输入处加上单位阶跃信号, $t = 20\text{s}$ 时在对象输入端负载干扰处加上反向的阶跃信号, 标称系统输出、控制响应分别如图 10 和图 11 所示. 可以看出, 本文方法略优于其他两种方法. 为验证系统的鲁棒性, 将实际对象的延迟时间增加 10%, 增益常数增加 40%, 时间常数 T_1 增加 33% 的摄动即 $P(s) = 2.8e^{-0.33s} / (4s - 1)(s - 1)$ 时, 得到的摄动系统的输出响应如图 12 所示, 控制响应如图 13 所示. 三种方法的性能指标见表 3. 由性能指标及图 10 和图 12 可以看出, 本文方法不仅提高了系统的抗干扰能力而且能够使系统具有很强的鲁棒稳定性, 同时图 11 和图 13 也显示了本文方法控制器输出的平稳程度. 图 14 为例 1~3 中本文方法的灵敏度函数幅值曲线.

4 结束语

针对三类二阶不稳定时滞对象提出了一种二自由度改进 Smith 预估控制方案, 基于内模控制原理提出的 PID 控制器解析设计方案不仅应用于设定值跟踪控制器设计而且也用于扰动抑制控制器的设计,

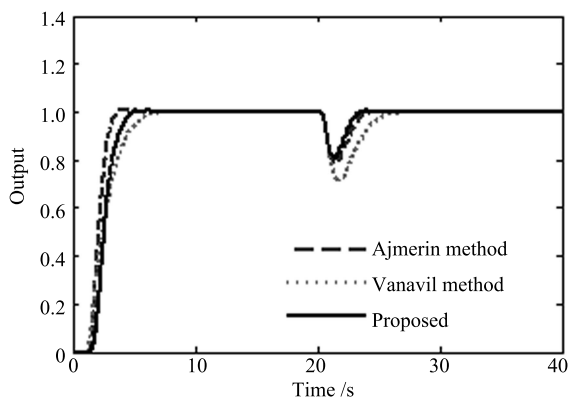


图 10 例 3 标称系统阶跃响应

Fig. 10 Step responses for Example 3 (normal)

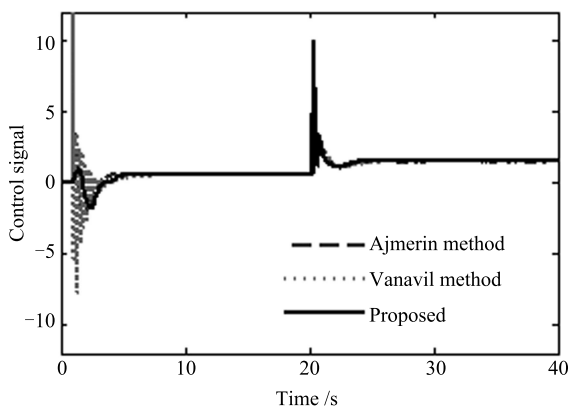


图 11 例 3 标称系统控制响应

Fig. 11 Control signals for Example 3 (normal)

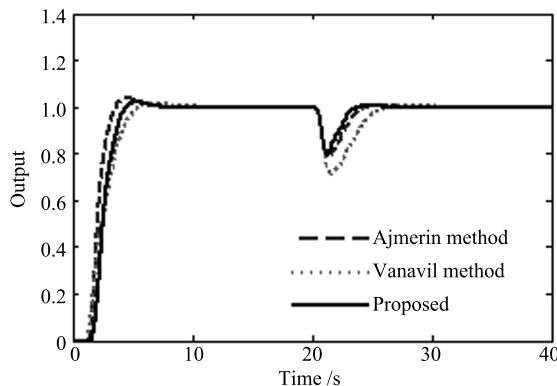


图 12 例 3 扰动系统阶跃响应

Fig. 12 Step responses for Example 3 (perturbed)

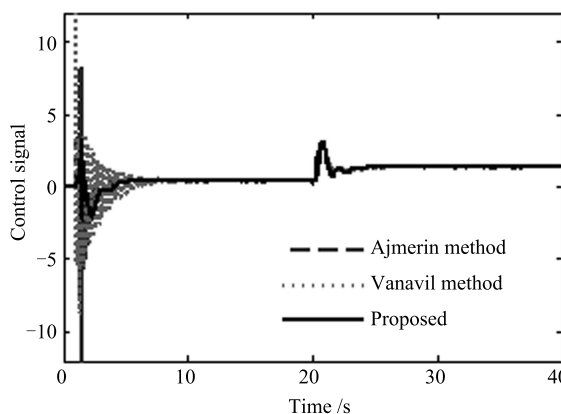


图 13 例 3 扰动系统控制响应

Fig. 13 Control signals for Example 3 (perturbed)

表 3 例 3 的性能指标

Table 3 Performance measures for Example 3

方法	IAE	ITAE	OV	PV
标称响应				
本文方法	1.71	3.47	1.00	1.0121
Ajmerin 方法 ^[25]	1.23	2.13	1.01	1.0230
Vanavil 方法 ^[34]	1.75	3.88	1.00	1.0034
扰动响应				
本文方法	2.04	11.82	1.02	1.4628
Ajmerin 方法 ^[25]	1.70	13.36	1.04	1.5220
Vanavil 方法 ^[34]	2.51	24.77	1.02	1.6185

并且该控制器解析设计方案可适用于三类二阶不稳定时滞对象, 可在很大程度上减少控制器设计复杂性. 系统标称设定值响应和扰动抑制响应完全解耦, 可通过单参数独立调整节和优化. 仿真结果和性能指标表明本文提出的控制方案不仅能提高控制系统的设定值跟踪性能, 而且能够大大提高系统的抗干扰能力和鲁棒稳定性.

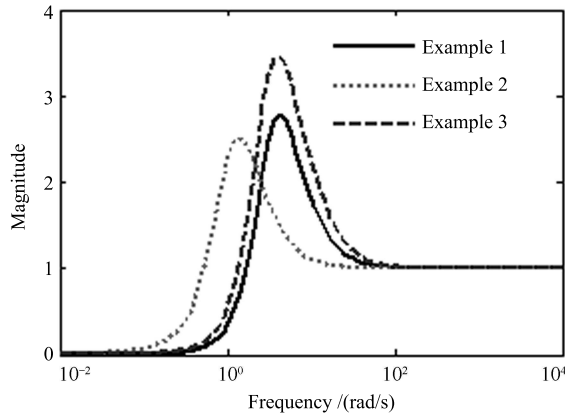


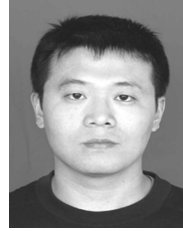
图 14 例 1~3 本文方法灵敏度函数幅值

Fig. 14 Magnitude plots of the proposed sensitivity function for Examples 1~3

References

- Liu T, Gao F R. Enhanced IMC design of load disturbance rejection for integrating and unstable processes with slow dynamics. *ISA Transactions*, 2011, **50**(2): 239–248
- Vanavil B, Chaitanya K K, Rao A S. Improved PID controller design for unstable time delay processes based on direct synthesis method and maximum sensitivity. *International Journal of Systems Science*, 2015, **46**(8): 1349–1366
- Seer Q H, Nandong J. Stabilization and PID tuning algorithms for second-order unstable processes with time-delays. *ISA Transactions*, 2017, **67**: 233–245
- Zhang G Q, Zhang X K, Zhang W D. Robust controller synthesis for high order unstable processes with time delay using mirror mapping technique. *ISA Transactions*, 2015, **59**: 10–19
- Zhang G Q, Zhang X K, Guan W. Stability analysis and design of integrating unstable delay processes using the mirror-mapping technique. *Journal of Process Control*, 2014, **24**(7): 1038–1045
- Xiao Qiang, Xie Wei. A GIMC architecture for timed- delay systems. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(4): 464–470
(肖强, 谢巍. 针对时滞系统的一般化内模控制方法. *自动化学报*, 2011, **37**(4): 464–470)
- Wang Q G, Hang C C, Yang X P. Single-loop controller design via IMC principles. *Automatica*, 2001, **37**(12): 2041–2048
- Skogestad S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning. *Journal of Process Control*, 2003, **13**(4): 291–309
- Vanavil B, Anusha A V N L, Perumalsamy M, Seshagiri Rao A S. Enhanced IMC-PID controller design with lead lag filter for unstable and integrating processes with time delay. *Chemical Engineering Communications*, 2014, **201**(11): 1468–1496
- Begum K G, Rao A S, Radhakrishnan T K. Maximum sensitivity based analytical tuning rules for PID controllers for unstable dead time processes. *Chemical Engineering Research and Design*, 2016, **109**: 593–606
- Tang Zhao-Jian, Jiang Bei-Yan, Jin Qi-Bing. A novel IMP-PID tuning method based on stability margin. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science)*, 2017, **44**(5): 105–110
(汤赵建, 蒋北艳, 靳其兵. 基于稳定裕度的新型 IMC-PID 整定方法. *北京化工大学学报 (自然科学版)*, 2017, **44**(5): 105–110)
- Das S, Pan I. On the mixed H_2/H_∞ loop-shaping tradeoffs in fractional-order control of the AVR system. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, **10**(4): 1982–1991
- Zeng G Q, Chen J, Dai Y X, Li L M, Zheng C W, Chen M R. Design of fractional order PID controller for automatic regulator voltage system based on multi-objective extremal optimization. *Neurocomputing*, 2015, **160**: 173–184
- Zeng G Q, Chen J, Chen M R, Dai Y X, Li L M, Lu K D, et al. Design of multivariable PID controllers using real-coded population-based extremal optimization. *Neurocomputing*, 2015, **151**(p3): 1343–1353
- Srivastava S, Pandit V S. A 2-Dof LQR based PID controller for integrating processes considering robustness/performance tradeoff. *ISA Transactions*, 2017, **71**: 426–439
- Huang De-Xian, Jiang Yong-Heng, Jin Yi-Hui. Present research situation, major bottlenecks, and prospect of refinery industry process control. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(6): 902–916
(黄德先, 江永亨, 金以慧. 炼油工业过程控制的研究现状、问题与展望. *自动化学报*, 2017, **43**(6): 902–916)
- Xu Feng, Wei Xiao-Li, Ren Li-Hong, Luo Xiong-Lin. A control structure selection method based on multivariable generalized predictive control for unstable processes. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(9): 1547–1551
(许锋, 魏小丽, 任丽红, 罗雄麟. 基于多变量广义预测控制的不稳定系统控制结构选择方法. *自动化学报*, 2013, **39**(9): 1547–1551)
- Zhang W D, Gu D Y, Wang W, Xu X M. Quantitative performance design of a modified Smith predictor for unstable processes with time delay. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2004, **43**(1): 56–62
- Rao A S, Chidambaram M. Analytical design of modified Smith predictor in a two-degrees-of-freedom control scheme for second order unstable processes with time delay. *ISA Transactions*, 2008, **47**(4): 407–419
- Mataušek M R, Ribic A I. Control of stable, integrating and unstable processes by the modified Smith predictor. *Journal of Process Control*, 2012, **22**(1): 338–343
- Tan W, Marquez H J, Chen T W. IMC design for unstable processes with time delays. *Journal of Process Control*, 2003, **13**(3): 203–213
- Liu Tao, Zhang Wei-Dong, Gu Dan-Ying. Analytical design of robust control for unstable chemical and industrial processes with time delay. *Control and Decision*, 2005, **20**(5): 575–578
(刘涛, 张卫东, 顾诞英. 化工不稳定时滞过程鲁棒控制的解析设计. *控制与决策*, 2005, **20**(5): 575–578)
- Li Min, Wang Qi, Jin Qi-Bing. Analytical design of optimal robust two-degree-of-freedom controller for unstable processes with time delays. *Information and Control*, 2016, **45**(3): 313–319
(李敏, 王琪, 靳其兵. 不稳定时滞对象的最优鲁棒二自由度控制器解析设计. *信息与控制*, 2016, **45**(3): 313–319)

- 24 Zhang Jing-Gang, Qin Na-Na. Design method of IMC controllers for unstable cascade processes with time delay. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2017, **46**(1): 38–45
(张井岗, 秦娜娜. 串级不稳定时滞过程的内模控制器设计. 电子科技大学学报, 2017, **46**(1): 38–45)
- 25 Ajmerin M, Ali A. Two degree of freedom control scheme for unstable processes with small time delay. *ISA Transactions*, 2015, **56**: 308–326
- 26 Padhy P K, Majhi S. Relay based PI-PD design for stable and unstable FOPDT processes. *Computers and Chemical Engineering*, 2006, **30**(5): 790–796
- 27 Vijayan V, Panda R C. Design of PID controllers in double feedback loops for SISO systems with set-point filters. *ISA Transactions*, 2012, **51**(4): 514–521
- 28 Wang Q, Lu C H, Pan W. IMC PID controller tuning for stable and unstable processes with time delay. *Chemical Engineering Research and Design*, 2016, **105**: 120–129
- 29 Shamsuzzoha M, Lee M Y. Analytical design of enhanced PID filter controller for integrating and first order unstable processes with time delay. *Chemical Engineering Science*, 2008, **63** (10): 2717–273
- 30 Wang Q G, Lee T H, He J B. Internal stability of interconnected systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1999, **44**(3): 593–596
- 31 Morari M, Zafriou E. *Robust Process Control*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989.
- 32 Kumar D B, Padma S R. Tuning of IMC based PID controllers for integrating systems with time delay. *ISA Transactions*, 2016, **63**: 242–255
- 33 Ghousiya B K, Rao A S, Radhakrishnan T K. Enhanced IMC based PID controller design for non-minimum phase (NMP) integrating processes with time delays. *ISA Transactions*, 2017, **68**: 223–234
- 34 Vanavil B, Rao A S. Improved performance with PID filter controllers for unstable processes involving time delays. In: *Proceedings of the 2011 International Conference on Process Automation, Control, and Computing*. New York, USA: IEEE, 2011. 1–6

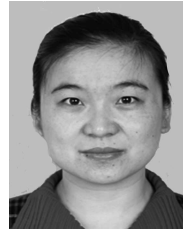


尹成强 聊城大学机械与汽车工程学院副教授. 主要研究方向为过程控制与计算机控制. 本文通信作者.

E-mail: shtjycq@163.com

(YIN Cheng-Qiang Associate professor at the School of Mechanical and Automobile Engineering, Liaocheng University. His research interest covers

process control and computer control. Corresponding author of this paper.)



高洁 聊城大学机械与汽车工程学院副教授. 主要研究方向为交通控制与交通规划. E-mail: gaojie7983@163.com

(GAO Jie Associate professor at the School of Mechanical and Automobile Engineering, Liaocheng University. Her research interest covers traffic control and transportation planning.)

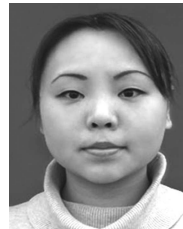


孙群 聊城大学机械与汽车工程学院教授. 主要研究方向为机器人技术与控制.

E-mail: sunxiaoqun97@163.com

(SUN Qun Professor at the School of Mechanical and Automobile Engineering, Liaocheng University. His research interest covers robotics, measurement,

and control.)



赵颖 聊城大学机械与汽车工程学院教授. 主要研究方向为机器视觉, 机器人技术. E-mail: zhaoying@lccu.edu.cn

(ZHAO Ying Professor at the School of Mechanical and Automobile Engineering, Liaocheng University. Her research interest covers machine vision and robotics.)