

一阶时滞系统的智慧PI控制

曾喆昭[†], 刘文珏

(长沙理工大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 针对一阶时滞系统的控制问题, 提出了一种不依赖于受控对象模型和属性的智慧比例-积分(WPI)控制方法. WPI控制方法通过速度因子将比例和积分环节紧密联系在一起形成一个协同控制核心. 理论分析表明, 由WPI控制器构成的闭环控制系统是全局渐近稳定的. 数值仿真实验表明了WPI控制方法不仅响应速度快、控制精度高, 而且还具有良好的抗扰动鲁棒性, 因而是一种有效的控制方法, 在时滞系统控制领域具有广泛的应用价值.

关键词: 时滞系统; 智慧PI控制; 全局稳定性; 增益整定规则; 自适应速度因子

引用格式: 曾喆昭, 刘文珏. 一阶时滞系统的智慧PI控制. 控制理论与应用, 2019, 36(8): 1322–1328

DOI: 10.7641/CTA.2018.80398

Wisdom PI control for first-order systems with time-delay

ZENG Zhe-zhao[†], LIU Wen-jue

(School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan 410114, China)

Abstract: A wisdom proportional-integral (WPI) control method which does not depend on the model and attribute of the controlled objects was proposed for the control problem of first-order systems with time-delay. The WPI control method uses speed factor to closely link the proportional and the integral link to form a collaborative control core. The theoretical analysis showed that the closed loop control system composed of WPI controller is globally asymptotically stable. Numerical simulation results showed that the WPI control method is effective in response to not only fast response speed and high control accuracy, but also good disturbances rejection robustness, which has wide application value in the field of time-delay system control.

Key words: time-delay system; wisdom PI control; global stability; gain tuning rule; adaptive speed factor

Citation: ZENG Zhezhao, LIU Wenjue. Wisdom PI control for first-order systems with time-delay. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(8): 1322–1328

1 引言

在石油、化工、电网、核反应堆、废水处理等工业过程中广泛存在时滞现象. 而这些工业过程往往可以简化为一个或多个一阶加纯滞后系统. 正因为时滞现象的存在, 系统的控制量无法对系统动态的变化做出及时反应, 从而导致整个系统出现超调大、响应时间长的不良现象, 甚至还可能出现振荡现象或者不稳定现象, 给时滞系统控制器的设计带来了很大挑战. 因此解决时滞系统控制问题对目标轨迹的精确跟踪以及系统的稳定性都具有重要意义^[1–4]. 针对时滞系统的控制问题, PID^[5–6]和自抗扰控制(auto disturbances rejection control, ADRC)^[7–10]一直是主流控制方法. 近年来主要使用忽略时滞环节的方法、或将时滞环节用一阶惯性环节近似的方法、或输入预测方法以及输出预测方法等4种控制方法^[11–13], 而这4种方法只

适用于比较小时滞的对象^[9]. 针对大时滞对象, 由于在较长时间内被控对象无有效输出, 因而致使ADRC中观测器的两个输入 y 和 u 不同步. 为此, 文献[10]将控制信号 u 延迟后再进入扩张状态观测器(extended state observer, ESO)来实现与 y 的同步, 然而, 该方法对跟踪设定值初期改善效果不明显, 特别是当时滞时间未知时, 该方法难以实现 y 和 u 的同步问题. 为了解决同步问题, 文献[14–16]提出将Smith预估和ADRC相结合的预测自抗扰控制器(predictive active disturbance rejection control, PADRC). 该方法给出了确保系统稳定的最大时滞摄动范围, 为大时滞系统的控制提供了一定的理论指导. 此外, 针对时滞系统的控制问题, 文献[14]还提出了一种联合算法, 即将PADRC算法和ADRC输入时滞改进算法通过相应的权重结合起来, 在不同阶段, 系统对应两种算法的不同权重, 从

收稿日期: 2018–05–29; 录用日期: 2018–10–11.

[†]通信作者. E-mail: 508984293@qq.com.

本文责任编辑: 夏元清.

湖南省教育厅重点项目(17A006)资助.

Supported by the Funded Project of the Key Subject of Hunan Education Department (17A006).

而实现抗扰阶段以ADRC输入时滞改进算法为主, 而跟踪阶段则以PADRC为主的控制策略. 然而, 在联合算法中权重系数的确定还缺乏有效的理论依据, 而且待整定的参数较多, 在实际应用中存在明显的局限性. 针对大时滞系统的控制问题, 文献[17]采用预测控制来实现对输出进行提前预报以弥补信息不及时的问题, 从而实现一种既有主动补偿总扰动又有信息预估的预测自抗扰控制器. 然而, 该控制方法结构复杂, 计算量较大. 针对ADRC在时滞系统稳定域求解问题, 文献[18]基于双轨迹法获得了LADRC对一阶时滞系统的稳定域, 分析了时滞系统模型参数、观测器和控制器带宽比对稳定域的影响. 然而, 该方法获得的稳定域裕度很小, 且对时滞系统的控制性能十分敏感, 稳定域的微小变化(如0.005)即可能引起系统不稳定. 此外, 该方法的响应速度很慢, 对于时滞时间 $\tau = 60$ s的被控对象, 需要6000 s左右才能进入稳定状态. 为了有效提高时滞系统的响应速度和控制精度, 本文提出了智慧PI(wisdom proportional-integral, WPI)控制方法. 理论分析和仿真结果表明, 本文提出的WPI控制方法不依赖于受控对象模型和时滞时间, 响应速度快、控制精度高, 是一种有效的时滞系统控制方法.

2 智慧PI控制原理

2.1 智慧PI控制律

假定不含时滞环节的一阶对象描述为

$$\dot{y}_1 = f(y_1, d) + bu, \quad (1)$$

其中: y_1 和 u 分别为系统的输出和控制量, d 为未知的外部扰动, b 为系统的增益参数, $f(\cdot)$ 为未知非线性函数, 包括系统的内部动态和外部扰动 d . 显然, 系统(1)是一个一阶非线性不确定系统. 为方便起见, 设总和扰动为 $y_2 = f(y_1, d) + (b - b_0)u$, 且 $|y_2| < \infty$, 其中 b_0 是系统增益参数 b 的估计值(不要求精确), 则系统(1)可改写为

$$\dot{y}_1 = y_2 + b_0 u. \quad (2)$$

显然, 系统(2)是一个线性不确定系统, 并且与系统(1)是等价的. 设期望轨迹为 y_d , 则有跟踪误差 $e_1 = y_d - y_1$, 误差的积分 $e_0 = \int_0^t e_1 d\tau$, 且误差的微分为

$$\dot{e}_1 = \dot{y}_d - \dot{y}_1 = \dot{y}_d - y_2 - b_0 u. \quad (3)$$

定义智慧PI(wisdom proportional-integral, WPI)控制律为

$$u = (\dot{y}_d + z_c^2 e_0 + 2z_c e_1)/b_0, \quad (4)$$

其中 $z_c > 0$ 是速度因子.

由式(4)可知, WPI控制律通过速度因子 z_c 将误差的比例环节和积分环节融为一体来实现被控系统的控制律. 而传统PI控制律则是将误差的比例环节和积分环节分割开来并独立对待, 并通过两个增益参数 k_p

和 k_i 分别对误差的比例环节和积分环节进行加权求和来构成控制律.

与传统PI控制律相比, 本文提出的WPI控制方法的主要创新点如下:

1) 通过速度因子 z_c 建立了比例环节与积分环节之间的内在必然联系, 使两个不同属性(不同量纲)的物理环节成为一个不可分割且有机统一的协同控制核心;

2) 根据速度因子 z_c 建立了WPI控制器的增益整定规则: $k_p = 2z_c$, $k_i = z_c^2$, 有效解决了PI控制器增益整定的世纪难题.

2.2 PID局限性分析

PID(包括PI和PD)是一种基于误差来消除误差的经典控制理论方法, 问世近一个世纪以来, 因其结构简单、对模型误差具有鲁棒性以及容易操作等优点, 在电力、交通、化工、轻工、机械、冶金等广泛的工业控制领域和武器装备控制领域发挥了巨大作用. 然而, PID增益整定问题也一直是困扰控制科学和控制工程领域的世纪难题. 此外, 传统PID和各种改进型PID存在局部稳定的局限性, 一旦工况发生变化、或被控对象模型参数发生变化、或存在未知外部扰动等情况下, PID的增益参数必须重新整定; 尽管各种改进型PID具备非线性控制能力, 然而, 其抗扰能力仍然较差; 尽管模糊PID提高了抗扰能力, 然而却不可避免地出现了高频抖振现象, 而且控制精度有限.

作者认为: 传统PID和各种改进型PID(包括PI)之所以优点突出的同时也伴随着明显的局限性, 其根本原因在于:

1) 独立增益会使PID丧失协同控制行为.

由于PID的3个增益相对独立, 因此, 比例、积分和微分等3个不同属性的物理环节在控制过程中则会表现出彼此独立、各自为阵的不科学、不合理控制行为, 使PID丧失了协同控制的科学思想;

2) 难以准确理解PID控制律的物理意义.

PID问世以来, 在控制工程实践中积累了比较丰富的经验, 并对PID的3个增益赋予了各自明确的物理作用, 然而却缺乏各自明确的物理属性. 因此, 对于由3个不同属性的物理环节进行独立加权求和形成的PID控制律(控制力), 难以从基本算术运算规则去准确理解其物理意义. 从严格意义上而言, 将比例、积分和微分等3个不同属性的环节独立加权求和来形成PID控制律, 违背了基本的算术运算规则.

作者认为: 尽管比例、积分和微分是3个不同属性的环节, 然而却都与误差有关, 因此, 3个不同属性的环节之间一定存在内在的必然关系, 应该是一个不可

分割且有机统一的整体. 作者正是基于有机统一、协同控制的科学思想, 提出了智慧PI控制律, 有效解决了传统PI控制器增益参数的整定难题.

2.3 稳定性分析

为了保证由式(4)定义的WPI控制器组成的闭环控制系统的稳定性, 下面给出稳定性定理.

定理1 假设总和扰动有界: $|y_2| = |f(y_1, d) + (b - b_0)u| < \infty$, 则当且仅当 $z_c > 0$ 时, 由WPI控制器(4)组成的闭环控制系统是全局渐近稳定的, 而且具有良好的抗总和扰动鲁棒性, 理论上可以实现精确控制.

证 1) 稳定性分析.

将式(4)定义的WPI控制律代入式(3), 即得

$$\dot{e}_1 = -y_2 - z_c^2 e_0 - 2z_c e_1. \quad (5)$$

考虑到 $e_0 = \int_0^t e_1 d\tau$, 或 $\dot{e}_0 = e_1$, 结合式(5), 则有闭环控制系统为

$$\begin{cases} \dot{e}_0 = e_1, \\ \dot{e}_1 = -y_2 - z_c^2 e_0 - 2z_c e_1. \end{cases} \quad (6)$$

显然, 系统(6)是一个在总和扰动 y_2 反相激励下的误差动态系统. 考虑到误差初始状态 $e_0^- = 0$, $e_1^- \neq 0$, 对系统(6)取拉普拉斯变换, 则有

$$\begin{cases} sE_0(s) = E_1(s), \\ sE_1(s) - e_1^- = -Y_2(s) - z_c^2 E_0(s) - 2z_c E_1(s). \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)整理, 得

$$E_1(s) = \frac{e_1^- s}{(s + z_c)^2} - \frac{s}{(s + z_c)^2} Y_2(s), \quad (8)$$

其中系统(8)的第1项是零输入响应, 第2项是零状态响应.

误差动态系统的传输函数为

$$H(s) = \frac{E_1(s)}{Y_2(s)} = -\frac{s}{(s + z_c)^2}. \quad (9)$$

根据复频域分析理论可知, 只要 $z_c > 0$, 系统(9)则是全局渐近稳定的, 因而闭环控制系统(6)或(8)是全局渐近稳定的.

2) 抗总和扰动鲁棒性分析.

根据系统(9)可得单位冲激响应为

$$h(t) = (z_c t - 1)\exp(-z_c t), \quad t > 0. \quad (10)$$

由系统(8)可得跟踪控制误差为

$$e_1(t) = -e_1^- h(t) + h(t) * y_2(t), \quad t > 0. \quad (11)$$

其中“*”为卷积积分.

当 $z_c > 0$ 时, 由于 $\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = 0$, 因此, 只要 $|y_2| < \infty$, 则有 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_1(t) = 0$, 即跟踪控制误差 $e_1(t)$ 可以从任意不为零的初始误差状态 $e_1^- \neq 0$ 向稳定的零点趋近, 理论上可以实现精确控制. 由于 $e_1(t) \rightarrow 0$ 只与 $|y_2|$

$< \infty$ 有关, 而与 y_2 的具体模型无关, 因此, WPI控制器具有良好的抗总和扰动鲁棒性.

上述分析表明, 只要 $|y_2| < \infty$, 则当且仅当 $z_c > 0$ 时, 由WPI控制器(4)组成的闭环控制系统(6)或(8)不仅是全局渐近稳定的, 而且可以从任意不为零的初始误差状态 $e_1^- \neq 0$ 向稳定的平衡点零点趋近, 因而WPI控制器(4)具有良好的抗扰鲁棒性, 理论上可以实现精确控制. 证毕.

2.4 自适应速度因子

定理1表明, 当 $|y_2| < \infty$, 且 $z_c > 0$ 时, 不仅闭环控制系统是全局渐近稳定的, 而且WPI控制器具有良好的抗扰动鲁棒性. 为了提高系统的响应速度, 要求速度因子 z_c 越大越好, 然而, 如果 z_c 太大, 则有可能会因积分饱和而引起系统出现超调和振荡现象. 近期研究发现, 只要根据时滞系统的时间常数估计值 T_m 来整定速度因子 z_c , 即可获得良好的控制效果, 即

$$z_c = 1/T_m, \quad (12)$$

其中 T_m 为时滞系统时间常数 T 的估计值(不要求精确), 通常取时间常数 T 的标称值, 便于实际操作.

此外, 在动态响应初期, 特别是在时滞时间之内, 由于误差一直处于最大值, 容易因积分饱和而引起超调和振荡现象, 要求速度因子小一点, 因此, 作者设计了一种基于误差的自适应速度因子, 即

$$z_c = \begin{cases} \exp(-0.5|e_1|)/T_m, & t < 10\tau_m, \\ 1/T_m, & \text{其他}, \end{cases} \quad (13)$$

其中 τ_m 是时滞时间 τ 的估计值, 不要求精确.

3 时滞系统WPI控制方法

3.1 问题描述

工业生产过程中, 常使用一阶加纯滞后的模型来模拟生产过程中的大时滞过程, 其传递函数可表示为

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s}, \quad (14)$$

其中: T 为系统时间常数, τ 为被控对象的时滞时间, K 为系统增益.

设 $b = K/T$, $a = 1/T$, 则时滞系统(14)改写为

$$G(s) = \frac{b}{s + a} e^{-\tau s}. \quad (15)$$

考虑到输入通道受外部扰动的影响, 系统(15)相应的微分方程为

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = -ay_1 + bd + bu, \\ y = y_1(t - \tau), \end{cases} \quad (16)$$

其中: a 和 b 是系统模型参数, d 为外部有界扰动, u 为控制输入, y_1 为系统内部状态, y 为系统输出. 如果系统模型参数不确定, 则设 $b = b_0 + \Delta b$, b_0 是 b 的估计, 不要求准确, 并设总和扰动(扩张状态)为 $y_2 = -ay_1 +$

$bd + \Delta bu$, 则时滞系统(16)改写为

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2 + b_0 u, \\ y = y_1(t - \tau). \end{cases} \quad (17)$$

显然, 系统(17)是一个不确定的时滞系统. 由于系统(17)的第1式与系统(1)或系统(2)具有相同的形式, 因此, 可以使用本文提出的WPI控制方法来实现时滞系统的控制.

根据时滞系统的特性, 当 $t < \tau$ 时, 由于被控对象没有有效输出(假设为0), 因而跟踪控制误差一直处于最大值状态, 即 $e_1 = y_d$; 当 $t \geq \tau$ 时, 被控对象开始存在有效输出, 此时, 跟踪误差为 $e_1 = y_d - y$. 一旦进入稳态后, 则有 $y(t) = y_1(t)$, 理论上 $e_1 = y_d - y = 0$. 显然, 时滞系统的实际输出可分为3个阶段, 即

$$y(t) = \begin{cases} 0, & t < \tau, \\ y_1(t - \tau), & t \geq \tau, \\ y_1(t), & t \geq T_{tr}, \end{cases} \quad (18)$$

其中 T_{tr} 是由动态进入稳态的过渡过程时间.

3.2 时滞系统控制器设计

设跟踪误差 $e_1 = y_d - y$, 误差的积分

$$e_0 = \int_{\tau}^t e_1(\eta) d\eta.$$

根据WPI(4), 则有

$$u = (\dot{y}_d + z_c^2 e_0 + 2z_c e_1)/b_0, \quad (19)$$

其中: 控制器的速度因子由式(13)自适应整定, b_0 是时滞系统模型参数 b 的估计值.

时滞系统的控制原理图如图1所示.

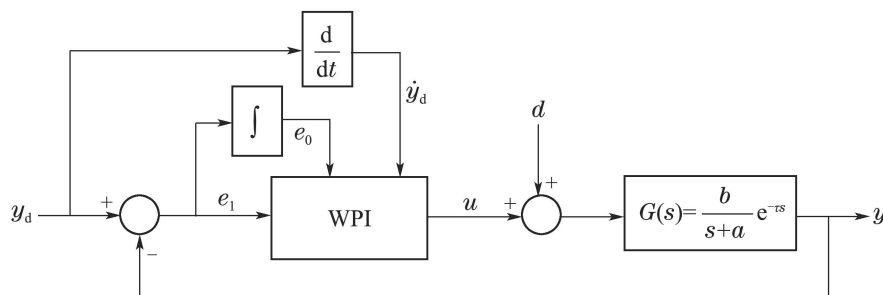


图1 时滞系统控制原理图

Fig. 1 Control schematic diagram of time-delay system

4 仿真分析

为了便于比较分析, 选取文献[18]的一燃烧过程模型, 其传递函数可以表示为一阶惯性加纯滞后环节

$$G(s) = \frac{6.31}{145s + 1} e^{-60s} = \frac{b}{s + a} e^{-60s}, \quad (20)$$

其中:

$$K = 6.31, T = 145 \text{ s}, \tau = 60 \text{ s}.$$

根据系统(20)给定的相关参数, 可得时滞系统的相关模型参数分别为

$$a = 1/T \approx 0.0069, b = K/T \approx 0.0435.$$

设采样频率为 $f_s = 1 \text{ Hz}$, 取

$$T_m = 1.1T \approx 160 \text{ s},$$

$$\tau_m = 1.2\tau = 72 \text{ s},$$

$$b_0 = 1.2b \approx 0.05.$$

根据自适应速度因子(13), 则有

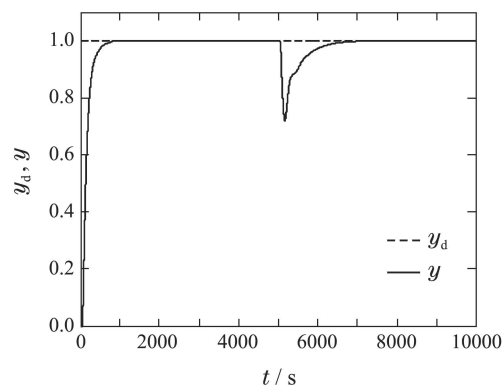
$$z_c = \begin{cases} \exp(-0.5|e_1|)/160, & t < 720 \text{ s}, \\ 1/160, & \text{其他}. \end{cases} \quad (21)$$

为了检验本文控制方法的抗扰动能力, 设5000 s 开始存在幅值为-0.1的扰动. 设期望轨迹为单位阶跃

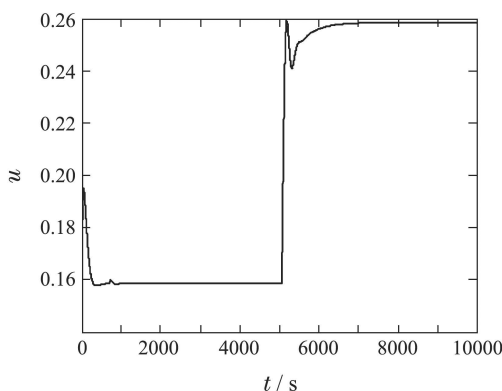
信号, 即 $y_d(t) = 1, \dot{y}_d(t) = 0$. 下列两个仿真实验中, WPI控制器的速度因子都使用式(21), 系统增益估计值都为 $b_0 = 1.2b \approx 0.05$.

实验1 无时变情况下的仿真结果

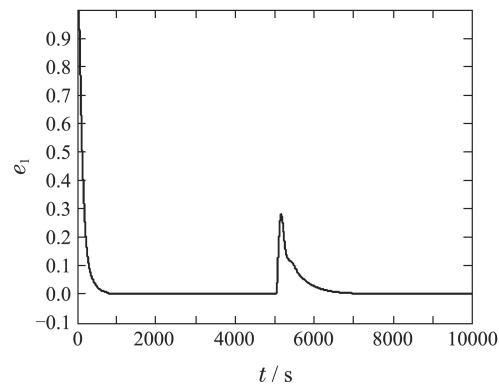
无时变情况下, 使用本文提出的WPI控制方法对时滞系统(20)施加控制, 控制结果如图2所示; 文献[18]的控制结果如图3所示. 由图2可知, 无时变情况下, 使用WPI控制方法对时滞系统(20)施加控制, 不仅响应速度快(约800 s即可进入稳态)、无超调、无振荡, 而且控制精度高; 而文献[18]的控制方法, 在稳定域之内, 即 $\omega_c = 0.0895$ 时, 也需要约8000 s才能进入稳态, 而且存在严重的超调和波动现象, 超调量高达80%; 在稳定域上界时, 系统在10000 s内还没有进入稳态; 如果超出稳定域上界0.005, 即 $\omega_c = 0.0945$ 时, 系统发散. 很显然, 与文献[18]相比, 本文提出的WPI控制方法不仅响应速度提高了10倍以上, 而且无超调、无波动. 由图2(d)的误差放大图可知, 稳态期间, 绝对误差小于 4×10^{-7} , 表明WPI控制方法具有很高的跟踪控制精度. 此外, 在5000 s时刻开始加入幅值为-0.1的阶跃扰动, WPI控制方法具有良好的抗扰动鲁棒性能, 经过约1600 s时间即可恢复到稳定状态, 而文献[18]没有考虑抗扰动情况.



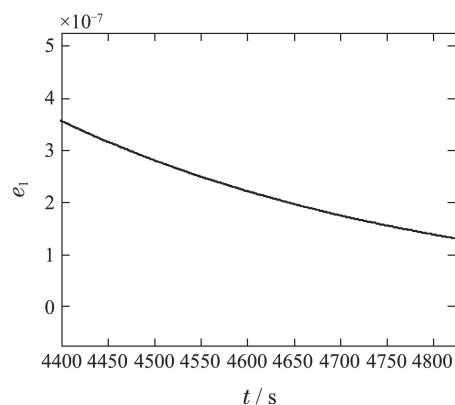
(a) 阶跃跟踪控制结果



(b) 控制输入信号



(c) 跟踪控制误差



(d) 稳态误差放大图

图2 无时变情况下的阶跃响应

Fig. 2 Step response in the case of time-invariant

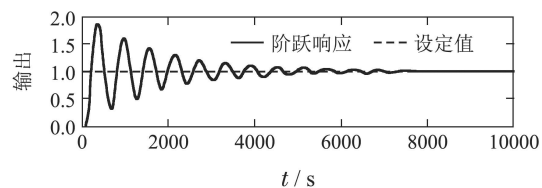
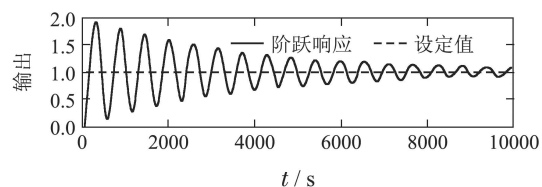
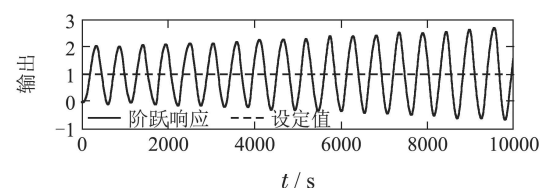
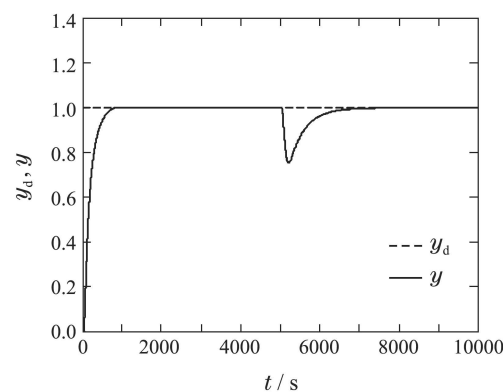
(a) $\omega_c = 0.0895$ (b) $\omega_c = 0.0945$ (c) $\omega_c = 0.0995$

图3 在稳定域上界邻域内的阶跃响应

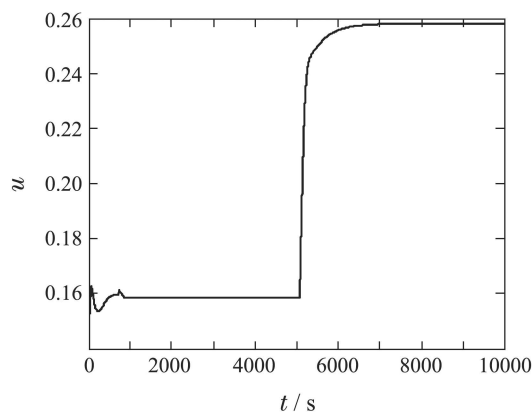
Fig. 3 Step response in the neighbourhood of stability region upper bound

实验2 时间常数时变情况下的仿真结果.

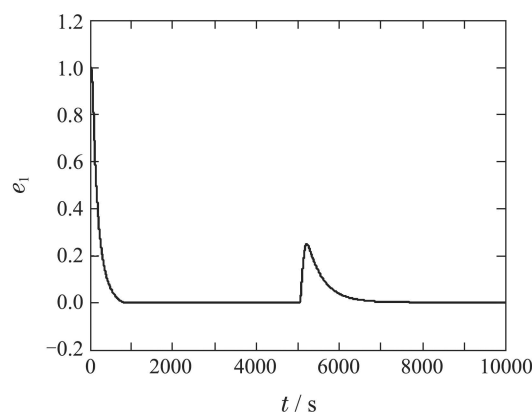
由时滞系统(20)可知, 当系统的时间常数在运行过程中存在时变的情况下, 则是一个典型的不确定时变时滞系统. 假设2000 s时刻开始, 系统时间常数由 $T = 145$ s突变为 $T = 145 \times 1.5 = 217.5$ s, 此时, 系统模型参数则分别由 $a = 1/T = 0.0069 \rightarrow 0.0046$ 和 $b = K/T = 0.0435 \rightarrow 0.029$. 在外扰情况下, 使用本文WPI控制方法的结果如图4所示. 由图4可知, 系统时间常数在2000 s时刻开始存在+50%的时变以及5000 s时刻开始存在扰动情况下, 本文的WPI控制方法仍然取得了很好的控制效果. 由图4(d)的局部放大效果图可知, 在稳态期间, 绝对误差小于 6×10^{-7} , 表明WPI控制方法对时变时滞系统具有很好的时变鲁棒性, 而且具有很高的跟踪控制精度. 由于文献[18]没有考虑时变情况和抗扰动情况, 因此, 无法进行比较分析.



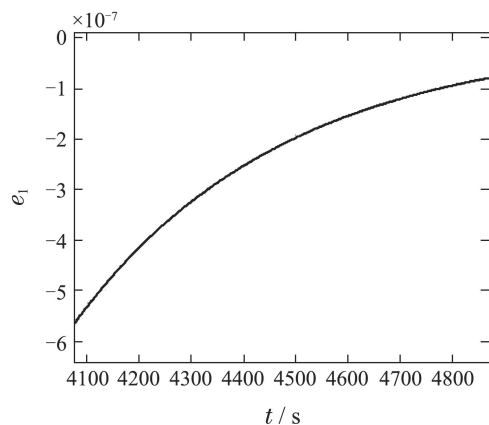
(a) 阶跃跟踪控制结果



(b) 控制输入信号



(c) 跟踪控制误差



(d) 稳态误差局部放大图

图4 时变情况下的阶跃响应

Fig. 4 Step response under time-varying conditions

5 结论

本文创造性提出了时滞系统的WPI控制方法, 理论分析表明, 本文提出的WPI控制方法不仅具有全局渐近稳定的性能, 而且还具有很好的抗扰动鲁棒性, 是一种不依赖于被控对象模型和属性的智慧控制方法. WPI控制器模型结构简单、计算量小, 速度因子 z_c 由系统时间常数的估计值即可整定, 便于实际操作. 特别是根据“小误差大增益、大误差小增益”的积分增益特性, 创造性定义了自适应速度因子(21), 有效提

高了控制系统的动态品质. 仿真结果表明了本文提出的WPI控制方法不仅具有快的响应速度和良好的抗扰动鲁棒性, 而且还能够实现精确控制, 是现有其他控制方法难以媲美的. 由于本文提出的WPI控制方法不依赖于被控对象模型和属性, 因此, 该控制方法不仅在时滞系统特别是大时滞系统的控制领域具有广阔的应用前景, 而且在非线性不确定系统的控制领域也具有广阔的潜在应用价值.

参考文献:

- [1] CHENG Yun, CHEN Zengqiang, SUN Mingwei, et al. Multivariable inverted decoupling active disturbance rejection control and its application to a distillation column process. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(6): 1080 – 1088.
(程赟, 陈增强, 孙明伟, 等. 多变量逆解耦自抗扰控制及其在精馏塔过程中的应用. *自动化学报*, 2017, 43(6): 1080 – 1088.)
- [2] SI Wenjie, DONG Xunde, ZENG Wei. Adaptive output-feedback control of an uncertain strict-feedback time-delay system. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(6): 1325 – 1333.
(司文杰, 董训德, 曾玮. 一类严格反馈时滞系统的自适应输出反馈控制. *系统工程与电子技术*, 2017, 39(6): 1325 – 1333.)
- [3] HONG Qinghui, LIU Qineng, LI Zhijun, et al. LC oscillation of memristor chaotic circuit and its time-delay feedback control. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(3): 398 – 405.
(洪庆辉, 刘奇能, 李志军, 等. LC振荡型忆阻混沌电路及时滞反馈控制. *控制理论与应用*, 2015, 32(3): 398 – 405.)
- [4] LI Guangyin, YANG Yang. Learning control for nonlinear systems with unknown control direction and unknown time-varying delay. *Control Theory & Applications*, 2016, 33(2): 265 – 272.
(李广印, 杨扬. 含有未知控制方向的非线性时滞系统学习控制. *控制理论与应用*, 2016, 33(2): 265 – 272.)
- [5] MARTELLI G. Stability of PID-controlled second-order time-delay feedback systems. *Automatica*, 2009, 45(11): 2718 – 2722.
- [6] WANG D. A PID controller set of guaranteeing stability and gain and phase margins for time-delay systems. *Journal of Process Control*, 2012, 22(7): 1298 – 1306.
- [7] SUN L, LI D, ZHONG Q, et al. Control of a class of industrial processes with time delay based on a modified uncertainty and disturbance estimator. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(11): 7018 – 7028.
- [8] SUN L, LI D, LEE K, et al. On tuning and practical implementation of active disturbance rejection controller: a case study from a regenerative heater in a 1000 MW power plant. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, 55(23): 6686 – 6695.
- [9] WANG Lijun, TONG Chaonan, LI Qing, et al. Practical active disturbance rejection solution for monitoring automatic gauge control system with large time-delay. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(3): 368 – 374.
(王丽君, 童朝南, 李擎, 等. 实用自抗扰控制在大时滞厚度自动监控系统中的应用. *控制理论与应用*, 2012, 29(3): 368 – 374.)
- [10] ZHAO S, GAO Z. Modified active disturbance rejection control for time-delay systems. *ISA Transactions*, 2014, 53 (4): 882 – 888.
- [11] WANG Lijun, LI Qing, TONG Chaonan, et al. Overview of active disturbance rejection control for systems with time-delay. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(12): 1521 – 1533.
(王丽君, 李擎, 童朝南, 等. 时滞系统的自抗扰控制综述. *控制理论与应用*, 2013, 30(12): 1521 – 1533.)

- [12] HAN Jingqing. *Active Disturbance Rejection Control Technique—The Technique for Estimating and Compensating the Uncertainties*. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
(韩京清. 自抗扰控制技术—估计补偿不确定因素的控制技术. 北京: 国防工业出版社, 2013)
- [13] HAN Jingqing, ZHANG Wenge. ADRC control for large time-delay system. *Control and Decision*, 1999, 14(4): 354 – 358.
(韩京清, 张文革. 大时滞系统的自抗扰控制. 控制与决策, 1999, 14(4): 354 – 358.)
- [14] ZHENG Q L. *On bandwidth-constrained disturbance rejection control*. Cleveland: Cleveland State University, 2012: 27 – 28, 42 – 53.
- [15] ZHENG Q L, GAO Z Q. Predictive active disturbance rejection control for processes with time delay. *ISA Transactions*, 2014, 53(4): 873 – 881.
- [16] ZHEN Q L, GAO Z Q. On active disturbance rejection for systems with input time-delay and unknown dynamics. *Proceedings of 2016 American Control Conference*. Boston: IEEE, 2016.
- [17] TANG Decui, GAO Zhiqiang, ZHANG Xuhong. Design of predictive active disturbance rejection controller for turbidity. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(1): 101 – 108.
(唐德翠, 高志强, 张绪红. 浊度大时滞过程的预测自抗扰控制器设计. 控制理论与应用, 2017, 34(1): 101 – 108.)
- [18] LI Dazi, YU Wenlong, JIN Qibing. Stability region analysis of linear active disturbance rejection controllers for first order systems with time delay. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(9): 1244 – 1249.
(李大字, 于文龙, 靳其兵. 一阶时滞系统线性自抗扰控制器参数稳定域分析. 控制理论与应用, 2017, 34(9): 1244 – 1249.)

作者简介:

曾喆昭 博士, 教授, 主要研究方向为智能计算与智能控制,

E-mail: 508984293@qq.com;

刘文珏 硕士研究生, 主要研究方向为智能控制, E-mail: 269766

331@qq.com.