

文章编号: 1001-0920(2002)04-0500-03

## 积分时滞过程的数字 PD 控制

张 晴, 王仍容, 刘 翔, 孙优贤

(浙江大学 工业控制技术国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘 要:** 对积分时滞过程提出一种数字 PD 控制结构, 通过一个内部反馈回路对积分时滞过程进行预稳定控制, 并给出了数字 PI 控制器的设计算法。仿真结果显示该控制结构具有良好的设定值跟踪特性, 并且对时滞偏差具有很强的鲁棒性能。最后简要讨论了抗负载干扰的控制结构。

**关键词:** 积分; 时滞; 数字控制器; 鲁棒性

**中图分类号:** TP 13      **文献标识码:** A

### Discrete PD control for integrator processes with time delay

ZHANG Qing, WANG Reng-rong, LIU Xiang, SUN You-xian

(National Laboratory of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** A new discrete PD control scheme is proposed for integrator processes with dominant time delay. It uses a local feedback to prestabilize the process which contains two discrete controllers. Simulations show that the proposed controller has good setpoint tracking and robust performance for the deviation of the time-delay. Finally, the control scheme for the load disturbance rejection is discussed briefly.

**Key words:** integrator; time delay; discrete controller; robustness

## 1 引 言

工业过程中时常遇到积分时滞过程, 这类过程在系统性能和稳定性方面易受时滞的影响, 难以得到满意的控制效果。近年来, 许多学者对此做了大量研究工作, 并已取得了丰富的成果。文献[1]对积分时滞过程提出一种 PD 控制器设计算法, 并给出了简明的整定规则。其闭环系统的性能受一个可调节的性能参数的控制, 此参数的选择直接关系到闭环系统的响应速度。[2]通过一个内部比例反馈回路对不稳定对象进行预稳定控制。[3]在[2]的基础上提出一种新的控制方法: 通过比例控制器  $K_0$  预稳定

开环不稳定的积分时滞过程, 再用控制器  $G_0$  消除  $K_0$  对设定值跟踪响应的影响。[4]在一个新论证定理的基础上, 对典型的时滞过程设计数字 PD 控制器, 算法使闭环系统的极点在最优位置附近随时滞变化, 实现了大范围时滞失配鲁棒稳定。然而, 该算法有一个重要的实现条件, 即控制对象必须是开环稳定的, 因此并不适用于积分时滞过程。

本文针对积分时滞过程提出一种数字 PD 控制。首先通过两个数字 PI 控制器将积分过程转换为二阶时滞过程, 获得一个稳定的对象; 然后采用文献[4]的控制算法设计闭环系统的控制器, 最终得到理想的控制性能和对时滞失配的鲁棒性能。

收稿日期: 2001-05-21; 修回日期: 2001-09-19

作者简介: 张晴(1971—), 女, 江西南昌人, 博士生, 从事鲁棒控制、预测控制等研究; 孙优贤(1940—), 男, 浙江诸暨人, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 从事鲁棒控制、容错控制等研究。

## 2 控制结构

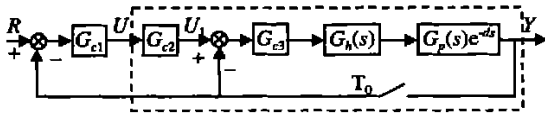


图 1 闭环控制系统结构

整个闭环系统的控制结构如图 1 所示, 其中  $R$  和  $Y$  分别表示输入设定值和系统输出。考虑积分时滞过程  $G_p(s)e^{-ds} = (K_p/s)e^{-ds}$ , 其中  $d$  表示系统时延,  $G_h(s) = (1 - e^{-T_0s})/s$  为零阶保持器,  $T_0$  为采样周期。针对控制对象不稳定的特点, 引入一个内部闭环回路, 实现对开环不稳定积分过程的预稳定控制。首先, 在闭环回路中设计一个 PI 控制器  $G_{c3}$ , 得到从  $U_1$  到  $Y$  的传递函数

$$H_0 = \frac{Y}{U_1} = \frac{G_{c3}(G_h G_p)z^{-d}}{1 + G_{c3}(G_h G_p)z^{-d}} \quad (1)$$

然后, 为了消除  $G_{c3}$  对系统性能的影响, 在内部闭环回路中引入一个控制器  $G_{c2}$ , 并将其取为  $H_0$  的分母部分, 即

$$G_{c2} = 1 + G_{c3}(G_h G_p)z^{-d} \quad (2)$$

于是该闭环回路从  $U$  到  $Y$  的传递函数为

$$H_1 = G_{c2}H_0 = G_{c3}(G_h G_p)z^{-d} \quad (3)$$

至此, 图 1 中虚框内所示内部反馈控制回路在两个控制器  $G_{c2}$  和  $G_{c3}$  的作用下, 已将积分时滞过程转换为稳定的一阶时延过程。

## 3 控制器设计

### 3.1 $G_{c2}$ 和 $G_{c3}$ 的设计

由式(3)知,  $G_{c3}$  在内部反馈回路中是一个重要的控制器, 其作用主要在于消除控制对象中的积分环节, 同时也是设计  $G_{c2}$  的一个关键部分。由式(2)知,  $G_{c3}$  确定之后,  $G_{c2}$  即可直接由式(2)推导得到。

实际控制对象的离散化表示为

$$(G_h G_p)z^{-d} = K_p T_0 \frac{z^{-d-1}}{1 - z^{-1}} \quad (4)$$

其中  $1/(1 - z^{-1})$  为积分环节。根据实际控制对象的这种特点, 设计控制器  $G_{c3}$  为

$$G_{c3} = \frac{1 - z^{-1}}{1 - e^{-T_0}z^{-1}} \quad (5)$$

以此对消控制对象的积分因子。内部反馈回路的传递函数为

$$H_1 = K_p T_0 \frac{z^{-d-1}}{1 - e^{-T_0}z^{-1}} \quad (6)$$

最后, 由式(2)和式(5)推导出控制器

$$G_{c2} = 1 + K_p T_0 \frac{z^{-d-1}}{1 - e^{-T_0}z^{-1}} \quad (7)$$

### 3.2 $G_{c1}$ 的设计

在此引用文献[4]中论证的定理设计控制器  $G_{c1}$ , 并对一般的  $z$ - 变换加以修改, 取  $t$  等价于  $z$ - 变换中的复因子  $z^{-1}$ 。相应地, 认为一个稳定的实有理系统的所有特征根均在单位圆外。

**定理 1**<sup>[4]</sup> 实系数多项式  $f = \hat{b}t^d + M\hat{a}(1 - t)$ , 其中  $b = b_0 + b_1t + \dots + b_m t^m, \hat{a} = a_0 + a_1t + \dots + a_n t^n$ , 有限正整数  $d > 0$ , 多项式  $\hat{a}$  的所有特征根均在单位圆外。则总存在一个足够大的正实数  $M_0 > 0$ , 使得当正实数  $M > M_0$  时, 多项式  $f$  的所有特征根均在单位圆外的充要条件是  $\hat{a}(1)\hat{b}(1) > 0$ 。

根据文献[4]对定理 1 的论证过程, 设在多项式  $\hat{a}$  的所有特征根中, 最接近单位圆的根是  $1 + \epsilon(\epsilon > 0)$ , 于是  $M$  与  $\epsilon$  及正整数  $d$  之间存在如下关系

$$M = \frac{\hat{b}(1)(1 + \epsilon)^d}{\epsilon \hat{a}(1)} \quad (8)$$

显然, 在指定的摄动小参数  $\epsilon$  下, 对于一个正整数  $d_0$ , 可确定一个相应的正实数  $M_0$ , 使多项式  $f$  的所有特征根均在单位圆外, 其中  $d_0$  表示系统时滞的最大时变上界。对于实际的时延  $d$ , 当满足条件  $d > d_0$  时,  $f$  的所有特征根也在单位圆外。

闭环系统的特征方程为  $1 + G_{c1}H_1 = 0$ , 其中  $H_1$  按照变换的  $z$ - 变换调整为

$$H_1 = K_p T_0 \frac{t}{1 - e^{-T_0}t^d} = \frac{\hat{b}}{a} t^d \quad (9)$$

取  $G_{c1} = \frac{k_c(c_0 + c_1t)}{1 - t}$ , 并代入系统的特征方程, 得

$$\frac{1}{k_c} \hat{a}(1 - t) + (c_0 + c_1t)\hat{b}t^d = 0 \quad (10)$$

利用定理 1 及式(8), 并取  $c_0 + c_1 = \hat{a}(1)$ , 最终得到

$$k_c = \frac{1}{M_0} = \frac{\epsilon}{|\hat{b}(1)|(1 + \epsilon)^{d_0}} \quad (11)$$

至此, 由给定的摄动小参数  $\epsilon$  以及最大的时变上界  $d_0$ , 最终确定出控制器  $G_{c10}$ 。

## 4 实例仿真

考虑积分时滞过程  $G(s) = \frac{1}{s}e^{-18s}$ 。对于单位阶跃输入信号, 设计控制器  $G_{c1}, G_{c2}$  和  $G_{c3}$ 。考虑零阶保持器, 取采样周期  $T_0 = 3 \text{ min}$ 。

控制对象离散化后的传递函数为

$$(G_h G_p)z^{-d} = 3 \frac{z^{-7}}{1 - z^{-1}}$$

根据式(5)和式(7),内部反馈回路的控制器可分别取

$$G_{c2} = 1 + 3 \frac{z^{-7}}{1 - 0.05z^{-1}}$$

$$G_{c3} = \frac{1 - z^{-1}}{1 - 0.05z^{-1}}$$

如式(9)所述,一阶时滞过程可表示为

$$H_1 = \frac{b}{a} t^d = \frac{3t}{1 - 0.05t}$$

取  $d_0 = 6$ ,  $\epsilon = 0.01$ ,代入式(11),设计控制器  $G_{c1}$ ,得  $k_c = 3.14 \times 10^{-3}$ 。另外,取  $c_0 + c_1 t$  为  $\hat{a}(t) = 1 - 0.05t$ ,最终得到

$$G_{c1} = 3.14 \times 10^{-3} \frac{1 - 0.05z^{-1}}{1 - z^{-1}}$$

闭环系统在  $t = 1$  时刻加入单位阶跃的作用,仿真结果如图2中实线所示。图3中的实线是按文献[3]提出的方法得出的仿真结果。从仿真结果看,本文方法的跟踪响应比较缓慢,在实际工程中可通过增大比例因子加快响应,但容易增大超调量,如图2中的虚线所示。

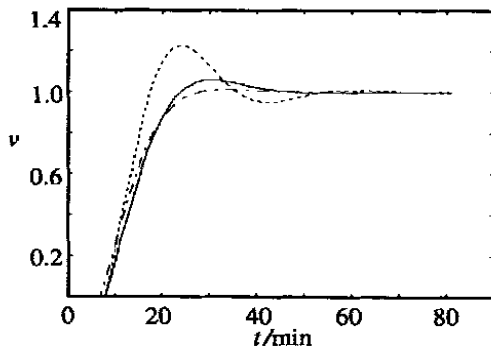


图2  $G(s) = e^{-18s}/s$  的仿真曲线

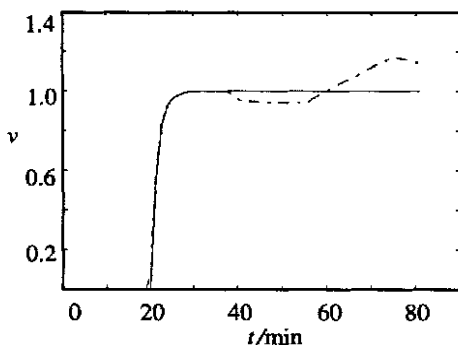


图3 文献[3]的仿真曲线

考虑到实际控制过程中存在时滞不确定性,在不改变控制器参数的情况下,修改控制对象的时滞项,以验证整个闭环系统对时滞不确定性的鲁棒性能。由于采用3 min采样,本文方法对采样周期以内的时滞偏差具有很强的鲁棒性能。图2中的点划线显示了  $t = 15$  时的仿真曲线。文献[3]在时滞较小时(采用  $t = 5$  的时滞),具有10%的鲁棒性,而在本例  $t = 18$  的时滞下却无法得到相似的鲁棒性能。图3中的虚线表示对象时滞为17.8时的仿真曲线。

## 5 抗负载干扰性能的讨论

以上论述并没有涉及到抗负载干扰性能的讨论。实际上,负载干扰对积分时滞过程有很大的影响。近年来,为了补偿负载扰动对时滞系统的影响,许多研究人员重点采用具有二自由度的MC结构。文献[5]在Smith预估器中成功地运用MC结构,解耦了闭环系统输出中的设定值响应和负载扰动响应,从而针对这两种输出响应,实现了两个控制器的单独设计和整定。

在本文论述的控制结构中,也可采用同样的MC结构以补偿负载干扰的影响。相应的控制器设计算法可参阅相关文献,在此不作详细讨论。

## 6 结论

在工业过程控制中,积分时滞系统是较常见的一类控制系统。本文提出一种新的数字PD控制结构,并给出了3个PI控制器的具体设计方法。仿真结果显示该结构具有良好的设定值跟踪性能和时滞时变的鲁棒性能。本文算法设计过程简洁,适用于工程中的过程控制系统。

### 参考文献(References):

- [1] L Wang, W R Cluett. Tuning PD controllers for integrator processes[J]. *IEE Proc Control Theory Appl*, 1997, 144(3): 385-391.
- [2] Tian Yuchu. Controlling integrator processes with long delay[J]. *Control Theory & Appl*, 1999, 16(3): 396-400.
- [3] Yu-Chu Tian, Furong Gao. Control of integrator processes with dominant time delay[J]. *Ind Eng Chem Res*, 1999, 38(5): 2979-2983.

(下转第512页)

和实验免疫学界还存在着一定的分歧,免疫的某些重要特性至今还没有一个令人信服的解释<sup>[2]</sup>。这些都决定了由模拟生物体的免疫系统发展起来的人工免疫系统,其理论和实践方法还很不成熟,大量具有开创性的工作正等待人工智能领域的学者们作进一步的研究。作为一种独特的实体 agent,免疫 agent 的提出,为从认知、行为、思维、学习等人工智能的角度进行自治免疫 agent 的研究,提供了一种可行的思路,这将十分有助于借鉴免疫机理解决实际问题。

本文提出的多免疫 agent 的形式化模型及其免疫 agent 算法,只是利用了免疫系统的一部分机理,但对进一步研究人工免疫系统的应用具有一定的启发性。鉴于 AIS 和 InA 的研究尚处于起步阶段,我们认为应在以下几个问题上进行深入研究:

- 1) 理性免疫 agent 的信念、愿望、意图等意识状态模型;
- 2) 单个免疫 agent 的防御、记忆、耐受、学习以及维持自平衡等行为特性实现算法;
- 3) 多免疫 agent 之间合作、支援、对话、分享等集体目标行为的协调机理及其形式化语义描述;
- 4) 扩展多免疫 agent 的应用领域,特别是在分布式过程监控、故障诊断、计算机病毒防治等领域的

应用,实现一些示范性应用工程。

#### 参考文献(References):

- [1] Jennings N R, Sycar K, Wooldridge M. A roadmap of agent research and development [J]. *Auton Agents & Multi-agent Syst*, 1998, 1: 7-38
- [2] 漆安慎,杜婵英. 免疫的非线性模型[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 1998
- [3] Jerne N K. Towards a network theory of the immune system [J]. *Ann Immunol*, 1974, 125: 373-389
- [4] Ishiguro A, Watanabe Y, Ichikawa S, et al. Gait control of hexapod walking robots using mutual-coupled immune network [J]. *Advanced Robotics*, 1996, 10(2): 179-195
- [5] Tang Z, Yamaguchi T, Tashima K, et al. Multiple-valued immune network model and its simulations[A]. *Proc 27th Int Symp on Multiple-valued Logic* [C]. Autogonish, 1997. 233-238
- [6] Herzenberg L A, Black S J. Regulatory circuits and antibody response[J]. *European J of Immun*, 1980, 10: 1-11.
- [7] Kaiser M, Dillmann R, Friedrich H, et al. Learning coordination skills in multi-agent system [A]. *IEEE / RSJ Int Conf on Intell Robots & Syst*[C]. Osaka, 1996. 3: 1488-1495

(上接第 502 页)

- [4] Liu Xiang, Wang Wenhai, Sun Youxian. Robust PID control for uncertain system with dead-time [J]. *Infors & Control*, 1999, 28(S): 273-277.
- [5] Astrom K J, Hang C C, Lim B. C. A new Smith pre-

dictor for controlling a process with an integrator and long dead-time [J]. *IEEE Trans on Autom Contr*, 1994, 39(2): 343-345

(上接第 508 页)

- [4] 陈增强, 赵天航, 袁著祉. 基于 Tank-Hopfield 神经网络的有基约束多变量广义预测控制器 [J]. *控制理论与应用*, 1998, 15(6): 847-852  
(Chen Zengqiang, Zhao Tianhang, Yuan Zhuzhi. Multi-variable general prediction controller based on Tank-Hopfield neural networks [J]. *Control Theory & Appl*,

- 1998, 15(6): 847-852 )
- [5] 金元郁. 基于 ARMAX 模型的新型广义预测控制 [J]. *控制理论与应用*, 1992, 9(4): 426-431  
(Jin Yuanyu. New general prediction control based on ARMAX model [J]. *Control Theory & Appl*, 1992, 9(4): 426-431 )