

文章编号: 1001-0920(2004)04-0459-03

一类非自衡加纯滞后系统的双预测 PI 控制

任正云, 邵惠鹤, 张立群

(上海交通大学 自动化系, 上海 200030)

摘要: 提出了一类基于非自衡加大纯滞后过程的双预测 PI 控制器的结构形式。这种控制器结构简单, 可调参数少, 参数的调节方便、直观。仿真结果表明: 在干扰和模型失配的情况下, 此类控制器仍具有良好的控制性能和鲁棒稳定性, 是一种值得在实际工程中推广应用的新型控制器。

关键词: 双预测 PI(DPPI); 非自衡加纯滞后; Smith 预估器

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Double predictive PI control for integrator plus time delay processes

REN Zheng-yun, SHAO Hui-he, ZHANG Li-qun

(Department of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China. Correspondent: REN Zheng-yun, E-mail: renzhengyun@163.com)

Abstract: A kind of double predictive PI (DPPI) controller for integrator plus time delay process is proposed. The proposed controller has the advantages of the simple structure, small number of tuning parameters, and the easily tuning method. Illustrative examples show the good performance and robust stability of DPPI controller under the disturbance and model-process mismatch, and the DPPI controller is suitable for practical application.

Key words: double predictive PI (DPPI); integrator plus time delay; Smith predictor

1 引言

对于非自衡系统, 运用 Smith 预估器来控制该过程时, 控制性能受模型失配的影响严重, 且在输入干扰存在时, 系统输出存在余差。一些文献^[1~6]对这类系统提出了各式各样的控制算法, 但这些算法或多或少存在如下问题: 1) 控制器设计比较复杂, 现场实施困难; 2) 控制器的整定较为繁琐, 参数无直观的物理意义; 3) 对模型失配非常敏感, 鲁棒性能差; 4) 控制器输出极不稳定, 易发生严重的振荡现象。

Watanabe 和 Ito^[1]提出了主控制器为 PI 或 PD 的预估补偿器方法, 仿真显示: 主控制器为 PI 时, 闭环响应和抗干扰能力都非常缓慢; 主控制器为

PD 时, 闭环响应和抗干扰能力增强了, 但控制器输出出现了明显的振荡。Astrom-Hang 方法^[2]具有快速的设定点跟踪能力和良好的抗干扰特性, 控制器的结构也比较简单, 其主要考虑了如何将设定点响应和干扰响应进行解耦。然而这种控制器参数较多 (共有 5 个), 且没有直观的物理意义, 没有合适的整定方法, 参数设置较困难。

同样, Zhang 和 Sun^[3]给出了 Astrom-Hang 方法中的补偿器的最小阶形式, 仅有 2 个参数, 并提供了简单设置参数的方法, 系统的鲁棒稳定性和动态性能直接与这两个参数有关。但该控制器中补偿器的结构较为复杂, 阶次较高, 不易实施。

收稿日期: 2003-03-03; 修回日期: 2003-05-28

基金项目: 国家 863 计划项目 (2001-AA 413130)。

作者简介: 任正云 (1969—), 男, 湖南汉寿人, 博士生, 从事先进过程控制、模型预测控制等研究; 邵惠鹤 (1936—), 男, 浙江宁波人, 教授, 博士生导师, 从事复杂工业过程建模、优化与控制等研究。

M antausek 和M icic^[4]对A strom-Hang 方法的控制结构略加改进,同时修改了补偿器的结构,将其简化为一个常数 这种方法参数少,结构简单,参数整定方便,可直接根据过程参数进行设定,但抗干扰能力较差 为了提高抗干扰的响应速度,M antausek 和M icic 在文献[5]中对补偿器作了进一步的修改,将其改进为一微分环节 但这种控制器在模型失配的情况下,易造成振荡,甚至不稳定

Chien 和 Peng^[6]等提出了将设定值通过PI环节的一种新型 Smith 预估控制器 这种控制器在模型匹配时和模型失配时均有较好的动态性能和抗干扰能力,但在模型失配时,控制器输出发生振荡,不利于实际工程应用

本文提出了一种针对积分加纯滞后这类非自衡系统的双预测PI(DPPI)控制器,该控制器由内环和外环两个预测PI控制器叠合而成,而每个预测PI控制器均由两部分组成:PI控制项和预测控制项 内环预测PI控制器将系统闭环为稳定的一阶加纯滞后过程,而外环预测PI控制器针对该一阶加纯滞后稳定过程设计而成 这种DPPI控制器的可调参数少,而且参数具有明确的实际意义,设置不同的参数,便有不同的闭环响应速度

仿真结果表明,DPPI控制器抑制干扰能力强;在模型失配时仍能保持良好的控制特性,鲁棒稳定性好;控制作用平滑,振荡小

2 双预测PI控制系统的结构

考虑以下积分加纯滞后对象,其模型具有如下传递函数:

$$G(s) = \frac{K}{s} e^{-Ls}, \quad (1)$$

其中 K 和 L 为不确定性参数

在正常工作状态下,(1)所对应的标称模型为

$$G(s) = \frac{K}{s} e^{-Ls}. \quad (2)$$

控制器的设计基于对象的标称模型,假设所期望系统的闭环传递函数为

$$G_{q1}(s) = \frac{1}{\lambda s + 1} e^{-Ls}, \quad (3)$$

λ 为可调参数,其值越大所期望的闭环响应速度越慢;反之则越快 因此,控制器的传递函数可表示为

$$G_{c1}(s) = \frac{s}{K(\lambda s + 1 - e^{-Ls})}. \quad (4)$$

控制器 $G_{c1}(s)$ 的输入输出关系为

$$u_1(s) = \frac{1}{K\lambda} e_1(s) - \frac{1 - e^{-Ls}}{\lambda s} u_1(s). \quad (5)$$

其中等号右边第 1 项具有比例控制器的结构形式,第 2 项可解释为:在 t 时刻系统的输出预测值基于于时间区间 $(t - L, t)$ 上的控制作用 尽管这里没有积分作用,但为了方便起见,称该控制器为预测PI控制器(PPI).

PPI控制器有着良好的闭环响应性能和鲁棒稳定性,但在干扰存在时,设定值和过程输出存在静态余差,没有实际应用的价值 针对这种情况,将上述整个预测PI控制系统视为一个对象,其传递函数同(3),对该对象设计预测PI控制器 假如所期望的闭环传递函数为

$$G_{q2}(s) = \frac{1}{\lambda s + 1} e^{-Ls}, \quad (6)$$

控制器的传递函数可由

$$G_{c2}(s) = \frac{\lambda s + 1}{\lambda s + 1 - e^{-Ls}} \quad (7)$$

来表示 控制器 $G_{c2}(s)$ 的输入输出关系为

$$u_2(s) = \frac{\lambda s + 1}{\lambda s} e_2(s) - \frac{1 - e^{-Ls}}{\lambda s} u_2(s). \quad (8)$$

从式(8)可看出, $G_{c2}(s)$ 为典型的预测PI控制器,将 $G_{c1}(s)$, $G_{c2}(s)$ 和对象 $G_p(s)$ 所构成的新型控制系统,称之为双预测PI控制系统(DPPI), $G_{c2}(s)$ 为主控制器, $G_{c1}(s)$ 为副控制器,其结构如图 1 所示

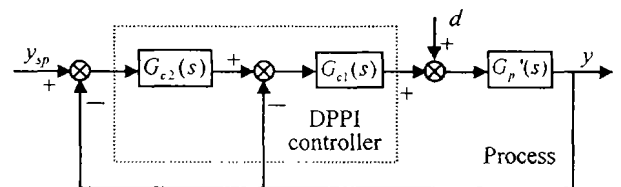


图 1 积分加纯滞后对象双预测PI控制系统的结构

系统对设定点 y_{sp} 响应的传递函数为

$$H_r(s) = \frac{G_{c2}(s)G_{c1}(s)G_p(s)}{1 + G_{c1}(s)G_p(s) + G_{c2}(s)G_{c1}(s)G_p(s)} \quad (9)$$

将(1),(4),(7)代入(9),可得

$$H_r(s) = \frac{[K(\lambda s + 1)e^{-Ls}]/\{K[\lambda\lambda s^2 + (\lambda + \lambda)s + 1 - \{(\lambda + \lambda)s + 2\}e^{-Ls} + e^{-2Ls}]\}}{K e^{-Ls}(\lambda s + \lambda s + 2 - e^{-Ls})}. \quad (10)$$

系统对干扰 d 响应的传递函数为

$$H_d(s) = \frac{G_p(s)}{1 + G_{c1}(s)G_p(s) + G_{c2}(s)G_{c1}(s)G_p(s)} \quad (11)$$

将(1), (4), (7) 代入(11) 可得

$$H_d(s) = \frac{K K (\lambda_1 s + 1 - e^{-L_1 s}) \cdot s \{ K [\lambda_1 \lambda_2 s^2 + (\lambda_1 + \lambda_2) s + 1 - \{ (\lambda_1 + \lambda_2) s + (\lambda_2 s + 1 - e^{-L_2 s}) e^{L_2 s} \}] \}}{2 [e^{-L_1 s} + e^{-2L_1 s}] + K e^{-L_1 s} (\lambda_1 s + \lambda_2 s + 2 - e^{-L_1 s})}, \quad (12)$$

且

$$\lim_{s \rightarrow 0} H_r(s) = 1, \lim_{s \rightarrow 0} H_d(s) = 0 \quad (13)$$

所以系统输出在稳态时不存在余差

在无模型失配时, 即 $K = K, L = L$, 系统对设定点和干扰的响应分别为

$$H_{r0}(s) = \frac{e^{-Ls}}{\lambda_1 s + 1},$$

$$H_{d0}(s) = \frac{K (\lambda_1 s + 1 - e^{-Ls}) (\lambda_2 s + 1 - e^{-Ls}) e^{-Ls}}{s (\lambda_1 s + 1) (\lambda_2 s + 1)} \quad (14)$$

$G_{e1}(s)$ 的参数 λ_1 和抗干扰强弱有关, λ_1 越小, 系统的抗干扰能力越强, 但系统的鲁棒稳定性变差; λ_1 越大, 系统的抗干扰能力越弱, 而系统的鲁棒稳定性增强

3 仿真比较

在这一节, 将对双预测 PI 控制器的控制性能和其他控制器的性能进行仿真比较。在 $t = 0$ 时, 设定值进行单位阶跃; 在 $t = 70$ 时, 引入 $d(s) = -0.1/s$ 干扰。考虑具有如下传递函数的过程对象:

$$G(s) = \frac{1}{s} e^{-5s} \quad (15)$$

Watanabe 控制器的参数为 $G_1(s) = 1/(5s^2 + s)$, 当主控制器为 PI 的结构形式时, $C(s) = 0.1(1 + 1/27s)$; 当主控制器为 PD 的结构形式时, $C(s) = 1.5(1 + 1/10s + 2s)$ 。Astrom 控制器的参数设置为 $K = 0.5, M(s)$ 中的参数分别为 $k_1 = 4, k_2 = 3, k_3 = 0.6, k_4 = 6$ 。Zhang 方法中的参数设置为 $K = 0.5, M(s) = s(13s + 1)/\{(4s + 1)^2 - (13s + 1)e^{-5s}\}$ 。DPPI 方法的参数设置为 $\lambda_1 = 5.5, \lambda_2 = 6$ 。

从图 2 可以看出, Watanabe-PI 方法对设定值响应有明显的超调, 抗干扰能力差; Watanabe-PD 方法虽然抗干扰速度快, 但对设定值响应超调严重; Astrom 方法对设定值响应快速且无超调, 有较好的抗干扰特性; Zhang 方法和 DPPI 方法的动态特性基本一致, 它们的抗干扰能力要比 Astrom 方法稍差一些。

假如对象模型的增益从 1 变为 1.1, 滞后时间从 5 增加到 5.5, 但控制器的参数不作任何改变, 即实际模型和估计模型失配, 它们的设定值响应和干扰响应见图 3。从图中可见 Watanabe-PD 所控制的系统不稳定; Watanabe-PI 方法仍对设定值响应有明显的超调, 抗干扰能力差; Astrom 方法对干扰响应有较大的超调, 控制作用发生了振荡 (见图 4), DPPI 方法对设定值响应快, 消除干扰较为迅速, 控制平滑, 而且无超调; Zhang 方法除了对设定值响应超调稍大一点外, 响应曲线和 DPPI 方法是一致的。图 3 和图 4 的各曲线含义同图 2 一致。

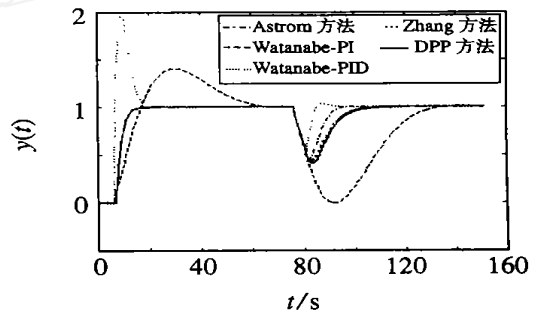


图 2 标称模型下的响应曲线

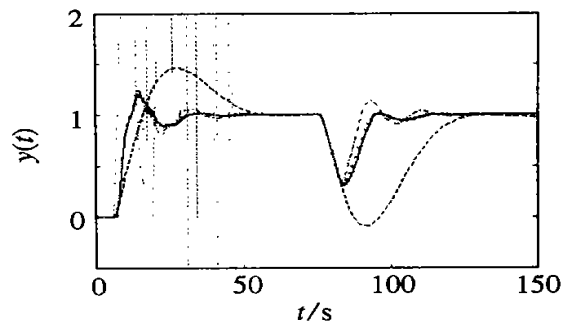


图 3 在模型失配时的响应曲线

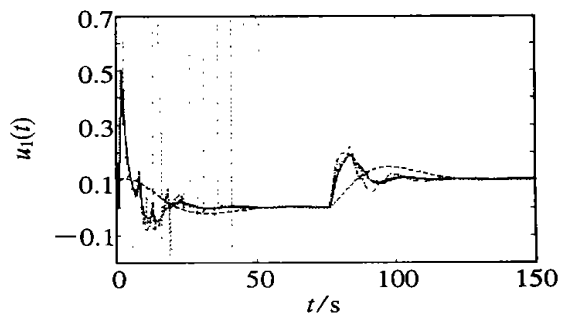


图 4 在模型失配时控制器的输出

综合考虑, DPPI 控制方法对积分加纯滞后系统是一种行之有效的方法, 跟踪设定值快, 抗干扰能力强, 控制作用平缓, 鲁棒性能好。

(下转第 473 页)

$$Y_i := \begin{bmatrix} (\Phi_{pp}^i)_k & (\Phi_{pl}^i)_k & (\Theta^i)_k \\ (\Phi_{lp}^i)_k & (\Phi_{ll}^i)_k & (\Theta^i)_k \\ (\Delta_p^i)_k & (\Delta_l^i)_k & \Psi_{ik} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

$$\beta_p^i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \Theta_p^i \\ I & 0 & 0 \end{bmatrix}, \beta_l^i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \Theta_l^i \\ 0 & I & 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

$$\alpha_p^i = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & 0 \\ \Delta_p^i & 0 \end{bmatrix}, \alpha_l^i = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & 0 \\ \Delta_l^i & 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

其中 $i \in V$. 每一个子系统的顺序是 $\pi_i = \pi_i^k + \pi_i$ 对每一个对称矩阵 $\eta \in R^{\pi_i \times \pi_i}$ 分块, 有

$$\eta = \begin{bmatrix} \eta & \eta_k \\ \eta_k & \eta \end{bmatrix}. \quad (9)$$

其中: $\eta \in R^{\pi_i \times \pi_i}, \eta_k \in R^{\pi_i \times \pi_i}$. 同样, 若 $\eta_{ij} \in R^{l_{ij} \times l_{ij}}$, 划分它为了适应执行器和控制器的交联输入和输出, 即

$$(\eta_{ij})_c = \begin{bmatrix} (\eta_{ij})_f & (\eta_{ij})_{fk} \\ (\eta_{ij})_{kf} & (\eta_{ij})_k \end{bmatrix}. \quad (10)$$

其中: $(\eta_{ij})_f \in R^{l_{ij} \times l_{ij}}, (\eta_{ij})_k \in R^{l_{ij} \times l_{ij}}$. 注意到, 若 $(\eta_{ij})_{kf} = (\eta_{ij})_{fk}^T$, 则 $(\eta_{ij})_c$ 是对称的

4 结 语

本文得到了一类大系统分布控制比较简单的充分条件, 通过本方法可以利用线性矩阵不等式解决网络通讯中的一类控制问题

参考文献(References):

[1] Zhai D, Zhang Q L. The decentralized control for

composite systems with input saturation [J]. *Control Theory and Application*, 2003, 20(2): 280-282

[2] 张庆灵. 广义大系统的分散控制与鲁棒控制[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1997.

[3] 张庆灵. 广义交联系统的鲁棒分散控制[J]. *控制与决策*, 1995, 10(1): 70-74
(Zhang Q L. Decentralized robust control for interconnected descriptor systems [J]. *Control and Decision*, 1995, 10(1): 70-74)

[4] Yang G H, Zhang S Y. Decentralized robust control of interconnected systems with time-varying uncertainties [J]. *Automatica*, 1996, 32(11): 1603-1608

[5] Yang G H, Wang J L, Soh Y C. Decentralized control of symmetric systems [J]. *Systems and Control Letters*, 2001, 42(2): 145-149

[6] Bamieh B, Paganini F, Dahleh M. Distributed control of spatially invariant system [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47(7): 1091-1118

[7] 陈欣, 张国强, 曹曙光, 等. 分布控制系统中一种控制器参数优化方法[J]. *控制与决策*, 1996, 11(5): 571-579
(Chen X, Zhang G Q, Cao S G, et al. An optimization method of controller parameter in distributed control system [J]. *control and Decision*, 1996, 11(5): 571-579)

[8] 戴一奇, 胡冠章, 陈卫. 图论与代数结构[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995

[9] 约翰逊 D E, 约翰逊 J R. 图论与工程应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1982

(上接第 461 页)

4 结 语

对于积分加纯滞后系统, 几种不同形式的 Smith 预估算法均存在这样或那样的不足, 针对这一情况, 本文提出了一种新的双预测 PI 控制算法, 给出了它的结构形式和性能分析. 这种方法控制结构简单, 可调参数少, 而且参数有明显的物理意义, 便于参数的整定. 它有良好的跟踪性能和抗干扰性能, 鲁棒稳定性能好. 仿真结果表明, 这种算法优于其他算法

参考文献(References):

[1] Watanabe K, Ito M. A process model control for linear system with delay [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1981, 26(6): 1261-1266

[2] Astrom K J, Hang C C, Lim B C. A new Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead time [J]. *IEEE Trans on Automatic*

Control, 1994, 39(2): 343-345

[3] Zhang W D, Sun Y X. Modified Smith predictor for controlling integrator/time delay process [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1996, 35(8): 2769-2772

[4] Mantausek M R, Micic A D. A modified Smith predictor for controlling process with an integrator and long dead-time [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1996, 41(8): 1199-1203

[5] Mantausek M R, Micic A D. On the modified Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead-time [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1999, 44(8): 1603-1606

[6] Chien IL, Peng S C, Liu J H. Simple control method for integrating processes with long deadtime [J]. *J of Process Control*, 2002, 12(3): 391-404