

高阶时滞对象的预测 PI(D) 控制

任正云¹, 张红², 邵惠鹤³

(1. 东华大学 自动化系, 上海 200051; 2. 上海工程技术大学 化工学院, 上海 200065;
3. 上海交通大学 自动化系, 上海 200030)

摘要: 利用频率域模型降阶理论, 提出了高阶时滞对象的预测 PI(D) 控制器两种设计方法. 一种方法是直接将高阶滞后对象在频率域内降阶为低阶滞后对象, 针对低阶滞后对象设计预测 PI(D) 控制器; 另一种方法是按照规定的性能指标设计控制器, 并将该控制器在频率域内降阶为具有预测 PI(D) 控制器的结构形式. 这两种方法设计的控制器均具有结构简单、可调参数少、参数调节方便的特点. 仿真表明: 在模型失配的情况下, 此两类预测 PI(D) 控制器仍然具有良好的控制性能和鲁棒稳定性.

关键词: 预测 PI(D); 高阶时滞对象; 模型降阶

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Predictive PI(D) control for high order processes with time-delay

REN Zheng-yun¹, ZHANG Hong², SHAO Hui-he³

(1. Department of Automation, Donghua University, Shanghai 200051, China;

2. Institute of Chemical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 200065, China;

3. Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Based on the model reduction theory in frequency-domain, two predictive PI(D) controller design methods for high order processes with time-delay are proposed. The first method is that the predictive PI(D) controller is designed by a low order model reduced directly from the process model. The second one is that a controller is first designed by the prescribed performance index, and then the controller is simplified to a predictive PI(D) controller. The advantages of these controllers are simple structure, small number of tuning parameters and easy tuning procedures. Illustrative examples are offered to show the good performance and robust stability of proposed schemes under model-process mismatch.

Key words: predictive PI(D); high order processes with time-delay; model reduction

1 引言 (Introduction)

实际的受控对象, 大多属于高阶、多容、时滞对象, 研究此类系统的控制器具有重要的实际意义. PID 控制器已经广泛的应用到过程控制工业中, 由于具有简单的结构和很好的鲁棒稳定性, 一直是研究的热点. 各种各样的参数自整定方法^[1], 使得该控制器的实施更加容易. 尽管如此, 对于高阶对象、振荡对象和大滞后对象, PID 控制器不能够提供满意闭环响应性能^[2]. 近年来, 一些学者研究了 PID 控制算法的局限性^[3], 并提出了各自的改进算法, 这些算法改善了闭环控制性能, 但增加了设计的难度, 同时控制器的结构也更加复杂了.

Smith 预估算法或 IMC 控制算法对高阶大滞后对象不失为一种很好的控制算法, 然而, 根据这两种

算法设计的控制器不仅结构比较复杂, 而且参数比较多, 现场实施比较困难, 因此很难应用到实际中去. 为了简化控制器的结构, 模型降阶方法便运用到控制器的设计中来了.

本文提出了针对高阶滞后对象控制器的两种设计方法, 这两种方法设计的过程不同, 但最终的控制器具有预测 PI(D) 的结构. 第一种方法是依据一定的准则将高阶滞后对象简化为一阶滞后对象 (FOPDT) 或二阶滞后对象 (SOPDT), 然后再根据简化后的对象设计预测 PI(D) 控制器; 第二种方法是, 根据所期望的闭环控制性能设计控制器, 进一步对所设计的控制器简化、降阶, 使其具有预测 PI(D) 控制器的结构形式. 设计的预测 PI(D) 控制器结构简单、可调参数少, 对高阶大滞后对象非常有效. 仿真

结果表明,该控制器动态性能好、抑制干扰能力强,在模型失配时仍然能够保持良好的控制特性,鲁棒稳定性好.

2 频率域模型降阶方法(Methods of model reduction in frequency-domain)

在复杂系统的控制器设计和分析中,模型降阶对控制器简化和成功应用具有重要的意义.近20年来,模型降阶技术受到控制界的广泛重视,各种各样的模型降阶技术发展起来了,其中主要分为两大类,一类是基于状态空间的方法,另一类为频率域降阶方法.

基于状态空间的方法比较成熟,但不能将高阶模型降阶为低阶滞后模型.而实际生产过程中,高阶多容特性将导致滞后行为,这使得带有时滞的低阶模型结构具有更加广泛的意义.频率域方法克服了上叙局限性,而其中的频率域积分最小二乘方法能够很好的描述原系统的动力学特性,求解方法也比较容易,所以本文采用此类方法来设计高阶系统的预测PI(D)控制器.根据对降阶性能的要求不同,频率域积分最小二乘方法可以依据三类准则进行设计^[4],本文仅介绍其中的积分等式误差准则和信号误差准则两种方法.

假如规定的高阶模型的传递函数为 $G(s)$,其中已知所要求频率范围内一些点的数据 $\{G(j\omega_k); k = 1, 2, \dots, l\}$,并且所期望近似低阶模型的传递函数可以表示如下:

$$\hat{G}(s) = \frac{A(s)}{B(s)} e^{-Ls} = \frac{a_0 + a_1 s + \dots + a_m s^m}{b_0 + b_1 s + \dots + b_{n-1} s^{n-1} + s^n} e^{-Ls}. \quad (1)$$

参数 $(a_0, \dots, a_m, b_0, \dots, b_n, L)$ 用 (a^T, b^T, L) 表示.

2.1 积分等式误差准则(Error criterion of integral equation)

在零初始条件下,式(1)所表示的传递函数用如下积分等式表示:

$$x(t) + b_{n-1} x^{(1)}(t) + \dots + b_1 x^{(n-1)}(t) + b_0 x^{(n)}(t) = a_m r^{(n-m)}(t-L) + \dots + a_1 r^{(n-1)}(t-L) + a_0 r^{(n)}(t-L). \quad (2)$$

其中 $x^{(i)}(t) = \int_0^t x^{(i-1)}(\tau) d\tau, i = 1, 2, \dots, n$.

式(2)中的 $x(t)$ 用 $y(t)$ 来替代,产生一个误差 $e_i(t) =$

$$[y(t) + b_{n-1} y^{(1)}(t) + \dots + b_1 y^{(n-1)}(t) + b_0 y^{(n)}(t)] - [a_m r^{(n-m)}(t-L) + \dots + a_1 r^{(n-1)}(t-L) + a_0 r^{(n)}(t-L)]. \quad (3)$$

选取准则为

$$J_i = \int_0^\infty e_i^2(t) dt. \quad (4)$$

根据差分等式误差准则^[4]推导方法可以得到积分等式误差准则的离散化形式

$$J_i = \sum_{k=1}^l h_k |B(j\omega_k)G(j\omega_k) - A(j\omega_k)e^{-L\omega_k j}|^2 |R(j\omega_k)|^2 / \omega_k^{2n}. \quad (5)$$

2.2 信号误差准则(Error criterion of signal)

假如 $r(t)$ 为输入信号,高阶过程 $G(s)$ 和降阶过程 $\hat{G}(s)$ 的输出信号分别为 $y(t), x(t)$,它们之间的误差 $e_s(t) = y(t) - x(t)$.定义信号误差准则为

$$J_s = \int_0^\infty e_s^2(t) dt. \quad (6)$$

则此准则在一定频率范围内的离散化表达式为

$$J_s = \sum_{k=1}^l h_k \left| G(j\omega_k) - \frac{A(j\omega_k)}{B(j\omega_k)} e^{-L\omega_k j} \right|^2 \cdot |R(j\omega_k)|^2. \quad (7)$$

由于滞后项的存在,以上二种方法的求解均为非线性最小二乘优化问题,运用优化求解工具便可得到在相应准则下的最佳低阶模型参数 (a^T, b^T, L) .这两种方法中,积分等式误差准则有较好的拟合低频和低频数据的能力,所估计的参数能够准确的描述被降阶模型的动态特性;信号误差准则能够精确的估计慢特性节点,但计算量大,有时不能搜索到全局最优解,只能得到局部最优解.本文在对过程降阶时采用积分等式误差准则方法,而在对控制器降阶时采用信号误差准则方法.

选择不同的 $R(s)$,对不同频率的数据点拟合的精度也不相同. $R(s)$ 为脉冲信号时,对高频数据拟合的精度高;而 $R(s)$ 为阶跃信号或斜坡信号时,对低频的数据拟合精度高.

3 预测PI(D)控制算法(Predictive PI(D) control algorithm)

预测PI(D)控制算法的主要思想是将PI(D)功能和预测功能有机的结合起来,对高阶过程来说有两种方法来设计其预测PI(D)控制器的方法,一种是将高阶模型降阶为一阶加纯滞后模型或二阶加纯滞后模型,并称之为过程降阶方法;另一种为根据一定准则设计控制器,然后再将控制器转化为预测PI(D)控制器的结构形式,称之为控制器降阶方法.

3.1 过程降阶设计方法 (Design by process reduction)

对于高阶非振荡过程,一阶加纯滞后模型就能充分的反映其动态特性,一阶加纯滞后模型的传递函数表示如下:

$$\hat{G}(s) = \frac{K}{T_s + 1} e^{-Ls} \quad (8)$$

高阶非振荡过程采用积分等误差准则方法进行降阶,便可以得到降阶模型(8),控制器的设计就依据该模型.假如所期望的系统的闭环传递函数规定如下:

$$G_0(s) = \frac{e^{-Ls}}{\lambda T_s + 1} \quad (9)$$

其中 λ 是可以更改的参数,其越大系统的闭环响应越慢,反之则越快.

因此,控制器的传递函数可由下式来表示:

$$G_c(s) = \frac{T_s + 1}{K(\lambda T_s + 1 - e^{-Ls})} \quad (10)$$

控制器的输入输出关系为

$$U(s) = \frac{1}{\lambda K} \left(1 + \frac{1}{T_s}\right) E(s) - \frac{1}{\lambda T_s} (1 - e^{-Ls}) U(s) \quad (11)$$

$\frac{1}{\lambda K} \left(1 + \frac{1}{T_s}\right) E(s)$ 部分具有 PI 控制器的结构形式,而 $-\frac{1}{\lambda T_s} (1 - e^{-Ls}) U(s)$ 部分可以解释为:在 t 时刻系统的输出预测值是基于在时间区间 $(t - L, t)$ 的控制作用的,所以这种控制器被称之为预测 PI 控制器.

而对于高阶振荡过程,一阶加纯滞后模型不能够完全反映其动态特性,必须用二阶加纯滞后模型来逼近.考虑具有如下传递函数二阶振荡加纯滞后对象

$$\hat{G}(s) = \frac{K}{T_1 s^2 + T_2 s + 1} e^{-Ls} \quad (12)$$

假设所期望的系统的闭环传递函数规定如下:

$$G_0(s) = \frac{e^{-Ls}}{(\lambda s + 1)^2} \quad (13)$$

λ 的意义同上.控制器的传递函数可由下式来表示:

$$G_c(s) = \frac{T_1 s^3 + T_2 s + 1}{K(\lambda^2 s^2 + 2\lambda s + 1 - e^{-Ls})} \quad (14)$$

控制器的输入输出关系为

$$U(s) = \frac{1}{\lambda K} \left(\frac{T_2 \lambda - 0.5}{2} + \frac{1}{2s} + \right.$$

$$\left. \frac{0.25(2T_1 - T_2 \lambda + 0.5\lambda^2)s}{0.5\lambda s + 1} \right) E(s) - \frac{1}{\lambda^2 s^2 + 2\lambda s} (1 - e^{-Ls}) U(s) \quad (15)$$

式(15)右边前部分具有 PID 控制器的结构形式,后半部分为预测部分,称之为预测 PID 控制器.

3.2 控制器降阶设计方法 (Design by controller reduction)

在设计控制器时,不对过程对象进行降阶,而根据要求设计好了的控制器进行降阶.同样,假如高阶过程对象 $G(s)$,所期望的系统的闭环传递函数为 $G_0(s)$,则控制器为

$$G_c = \frac{G_0(s)}{G(s)(1 - G_0(s))} \quad (16)$$

选择适当的 $G_0(s)$ 使 $G_c(s)$ 可以实现.这样设计的控制器阶次比较高,结构也比较复杂,不利于实际工程的应用.如果高阶过程具有振荡特性,将式(16)表示的控制器降阶为式(14)所代表的预测 PID 控制器;如果高阶过程不具有振荡特性,将式(16)表示的控制器降阶为式(10)所代表的预测 PI 控制器.并通过第2节的降阶原则,求得式(10)和(14)中的控制器最优参数.

4 仿真研究 (Simulation studies)

考虑具有振荡特性的高阶滞后对象^[5]

$$G(s) = \frac{(s + 1)}{(s^2 + s + 1)^2 (s + 2)^4} e^{-s} \quad (17)$$

首先,运用过程降阶方法设计控制器.该系统的临界角频率为 $\omega_c = 0.6270$,选取 $\omega = 0.1, 0.2, \dots, 0.6$ 六个点,输入为单位阶跃信号,即 $R(s) = 1/s$.求解(5)使 J_i 最小,得到降阶模型

$$\hat{G}_c(s) = \frac{0.0625}{1.5558s^2 + 1.0873s + 1} e^{-2.9268s} \quad (18)$$

降阶模型和原模型的 Nyquist 曲线见图1.从图中可以发现,在低频时曲线拟合的精度非常高.根据模型(18)设计控制器,按照式(14)并取 $\lambda = 1.3$,得到预测 PID 控制器

$$G_c(s) = \frac{1.5558s^2 + 1.0873s + 1}{0.0625(1.69s^2 + 2.6s + 1 - e^{-2.9268s})} \quad (19)$$

在 $t = 0$ 时,设定值进行单位阶跃;在 $t = 50$ 时在过程的输入引入 $d(s) = -1/s$ 干扰,无模型失配时,该系统的闭环控制性能见图2.假如对象的滞后时间从1增加到2,闭环控制曲线也见图2.从图中可以

看出控制器有很好的动态响应性能、抗干扰性能和鲁棒性能。

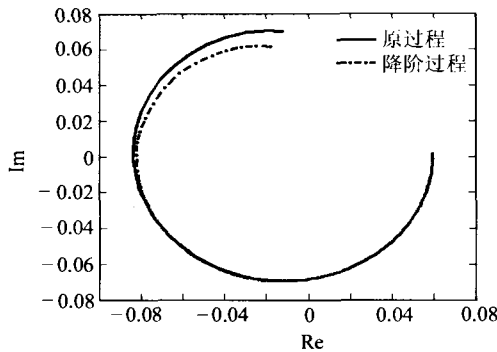


图1 过程的 Nyquist 曲线比较
Fig. 1 Comparison of Nyquist curves

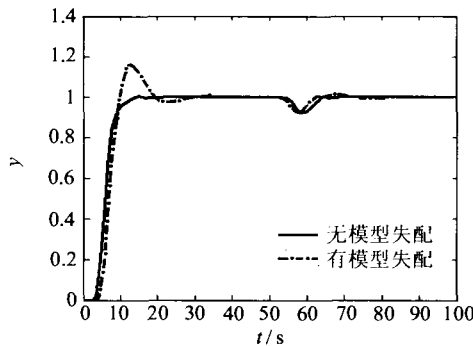


图2 过程降阶方法控制系统的响应曲线
Fig. 2 Responses of control system by process reduction

现在运用第二种方法设计控制器,假如所期望的闭环响应传递函数

$$G_0(s) = \frac{1}{(1.15s + 1)^7} e^{-s}, \quad (20)$$

则控制器具有以下传递函数

$$\hat{G}_c(s) = \frac{(s^2 + s + 1)^2 (s + 2)^4}{(s + 1) \{ (1.15s + 1)^7 - e^{-s} \}}. \quad (21)$$

式(21)表示的控制器结构比较复杂,必须对其进行简化降阶.假定期望的控制器结构为式(14),选取 $\omega = 0.1, 0.2, \dots, 0.6$ 六个点,输入为脉冲信号,即 $R(s) = 1$.求解式(7)使 J_s 最小,得到降阶了的控制器传递函数

$$G_c(s) = \frac{0.5702s^2 + 1}{0.0594 \{ (2.7825s + 1)^2 - e^{-3.9860s} \}}. \quad (22)$$

这样控制器的结构就大大简化了. $\hat{G}_c(s)$ 和 $G_c(s)$ 的 Nyquist 曲线见图 3,从图中可以发现,在中、低频时都有满意的拟合精度.在无模型失配和有模型失配时闭环响应曲线见图 4(其他条件同上).

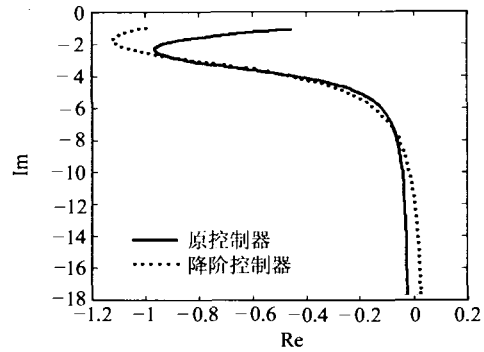


图3 控制器的 Nyquist 曲线比较
Fig. 3 Comparison of Nyquist curves

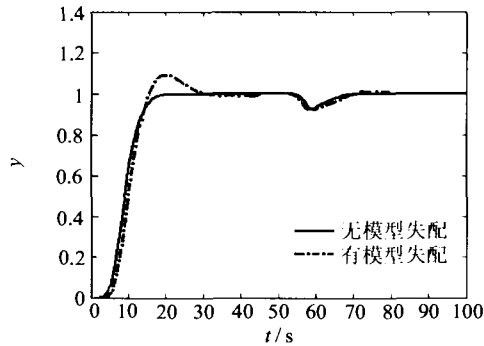


图4 控制器降阶方法系统的响应曲线
Fig. 4 Responses of control system by controller reduction

一般来说,过程降阶方法中对过程拟合的精度比较高,而控制器降阶方法中控制器拟合的精度比较低,这是因为原控制器的动态特性比较复杂,运用简单的预测 PI(D)控制器拟合,难以达到较高的精度.尽管如此,控制器降阶方法的跟踪性能、鲁棒稳定性和抗干扰性和过程降阶方法的同样令人满意.

5 结论(Conclusion)

对于高阶滞后系统,本文提出了两种设计预测 PI(D)控制器的方法,过程降阶方法和控制器降阶方法.和其它控制器比较,这两种算法最主要的特点是,把传统的 PI(D)结构和预测功能有机的结合起来了,结构简单,参数整定方便,实施容易.仿真显示了这两种设计方法的有效性.

参考文献(References):

[1] HO W K, HANG C C, CAO L S. Tuning of PID controllers based on gain and phase margin specifications [J]. *Automatica*, 1995, 31(3): 497 - 502.

[2] WATANABE K, ITO M. A process-model control for linear systems with delay [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1981, 26(6): 1261 - 1269.

参考文献(References):

- [1] ZHOU Shaosheng, LI Hongliang, FENG Chunbo. H-infinite suboptimal control for a class of singular systems with time-delay: an LMI approach [J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(3): 324 - 328.
- [2] FRIDMAN E, SHAKED U. H-infinite control of linear state-delay descriptor systems: an LMI approach [J]. *Linear Algebra and Its Applications*, 2002, 351 - 352: 271 - 302.
- [3] PARK P. A delay-dependent stability criterion for systems with uncertain time-invariant delays [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1999, 44(4): 876 - 877.
- [4] BOYD S, EI GHAOUI L, FERON E, et al. *Linear Matrix Inequality*

in Systems and Control Theory [M]. Philadelphia: SIAM, 1994.

- [5] MAHMOUD M S. Robust stability and stabilization of a class of uncertain nonlinear systems with delays [J]. *J of Mathematical Problems in Engineering*, 1998, 4(2): 165 - 185.

作者简介:

张先明 (1968—),男,中南大学博士研究生,主要研究方向为时滞系统、广义系统的鲁棒控制,E-mail: zhangxmy@yahoo.com.cn;

吴敏 (1963—),男,博士生导师,主要研究方向为鲁棒控制、智能控制和过程控制,E-mail: min@mail.csu.edu.cn;

何勇 (1969—),男,中南大学博士研究生,主要研究方向为鲁棒控制及其应用.

(上接第 648 页)

- [3] PARK J H, SUNG S W, LEE I. An enhanced PID control strategy for unstable processes [J]. *Automatica*, 1998, 34(6): 751 - 756.
- [4] WHITFIELD A H, WILLIAMS N G. Integral least - squares techniques for frequency-domain model reduction [J]. *Int J of Systems Science*, 1988, 19(8): 1355 - 1373.
- [5] WANG Q G, ZHANG Y. A fast algorithm for reduced-order modeling [J]. *ISA Transaction*, 1999, 38(2): 225 - 230.

作者简介:

任正云 (1969—),男,博士,研究方向为先进过程控制、模型预测控制等,E-mail: renzhengyun@163.com;

张红 (1971—),女,讲师,研究方向为化工过程建模与优化、炼油工艺优化等,E-mail: zhanghonglindi@163.com;

邵惠鹤 (1936—),男,教授,博士生导师,研究方向为复杂工业过程建模、优化与控制等,E-mail: hhshao@sju.edu.cn.