

基于 MATLAB 的时滞对象控制算法仿真分析

胡学军¹, 滕达¹, 胡林文²

(1. 武汉工程大学电气信息学院, 湖北 武汉 430074;

2. 华侨大学机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要:针对工业过程控制中普遍存在的时滞现象,剖析了几种控制方法的特点,讨论了 smith 预估器和各种控制算法之间的联系,仿真研究了模型失配、时滞变化及干扰等因素对系统的影响。仿真结果表明:Dahlin-smith 控制器和 Inner Model Control-smith 控制器具有响应速度快、超调量小,特别是在模型失配情况下,鲁棒性和抗干扰能力表现得尤为突出,为系统克服纯滞后提供了途径。模型失配改进型 smith 结构给系统带来了良好的控制质量,对模型参数敏感度小,但有严格的限制条件。

关键词:时滞现象;smith 预估器;模型失配;敏感度

中图分类号:O231.5

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2010.03.024

0 引言

在冶金、化工、电力、轻工和机械等行业的工业过程控制中,由于物料或能量的传输延迟,大多数被控对象具有时滞性质。时滞会使系统产生较明显的超调量和较长的调节时间^[1]。几十年来,涌现出了大量对时滞过程的控制方法。本文从实际应用出发,选取了普通 PI 控制、smith 预估控制、Dahlin 控制、Dahlin-smith 控制、Imc-smith 控制、模型失配改进型 smith 预估控制等 6 种方法进行分析仿真研究,比较各种算法特点,寻找各种算法之间的联系,目的是能够对时滞现象的控制起到一定的帮助。控制对象取工业系统中常见的含有纯滞后的一阶惯性环节,纯滞后部分采用二阶 padc 近似。

1 时滞系统的控制方法

1.1 Smith 预估控制器

Smith 预估控制器是在 PID 调节回路上加入补偿回路,以抵消对象时滞因素的影响。Smith 预估控制器的特点是预先估计出被控过程在扰动下的动态特性,然后用一个模型加到反馈控制系统中,力图使延迟了的被控量提前反映到控制器,使控制器提前动作^[3],从而使系统的纯滞后明显地减少或降低,使系统的超调量和过渡时间有效地改善,提高系统的控制品质。但是 Smith 预估器在实际应用中仍有不尽人意的地方,主要表现在:1)必须精确地知道被控对象的数学模型,对于对象参数(增益,时滞)发生变化时,预

估补偿效果不理想;2)对于大多数工业过程控制,模型不可能与实际生产过程完全一致,并且实际过程还受外界操作条件,环境等因素的影响,导致预估器结构很复杂,不易实现。

1.2 Dahlin Smith 控制器

Dahlin-Smith 算法设计分两步:第一步对纯滞后对象设计 smith 预估器进行补偿,第二步按照 Dahlin 算法原理设计 Dahlin-Smith 控制器。为了分析方便,考虑系统无干扰且模型精确情况, $T_1 = \alpha T$, $\tau_1 = \tau$, $G_p(s)$ 为不含纯滞后的对象部分, T 为对象的时间常数; $G_m(s)$ 为对象模型非时滞部分, $U(s)$ 表示控制器输出, $E(s)$ 表示控制器输入。计算可得:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{e^{(\tau - \tau_1)s}}{G_p(s) [(1 + \alpha Ts) - e^{(\tau - \tau_1)s}]} = \frac{(Ts + 1)e^{(\tau - \tau_1)s}}{K [(1 + \alpha Ts) - e^{(\tau - \tau_1)s}]}$$

由结果可知,该控制器等效为一个带有滞后的 PI 控制器和一个预估器,通过调节 α 值来调节控制器的参数,从而来克服时滞对系统的影响。此算法的实质类似于 Dahlin 算法,它揭示了 Dahlin 算法和 Dahlin-Smith 算法之间潜在联系,即只要对 Dahlin Smith 控制器进行合适的设计,就能完全实现 Dahlin 算法的控制功能。特别提出的是,模型精确时控制系统中的控制器参数 $\tau_1 = \tau$, Dahlin-smith 控制器的控制效果无异于 Dahlin 控制器,并且二者的传递函数也相同。

1.3 IMC-Smith 控制器

Smith 预估控制系统的内模控制结构^[2]如图 1 所示. 定义内模控制器为

$$C = \hat{G}_+^{-1} \times F$$

F 为可实现因子, 一种低通滤波器, 一般可选择 $F = 1/(\lambda s + 1)^n (n=1, 2, 3, \dots)$, \hat{G}_+ 为模型最小相位部分因子.

对象不含时滞部分传递函数为

$$G_p(s) = K/(Ts + 1)$$

模型传递函数为

$$G_m(s) = K_1/(T_1 s + 1)$$

等效的内模控制器的传递函数:

$$G_{imc}(s) = G_c(s)/[1 + G_c(s)G_m(s)]$$

从而可得

$$G_c(s) = G_{imc}(s)/[1 - G_{imc}(s)G_m(s)]$$

取 $F(s) = 1/(\lambda s + 1)$, 又 $G_{imc} = G_m^{-1}(s) \times F(s)$

代入上式有

$$G_c(s) = \frac{1}{\lambda} \frac{T_1 s + 1}{K_1 s} = \frac{T_1}{\lambda K_1} \left(1 + \frac{1}{T_1 s}\right)$$

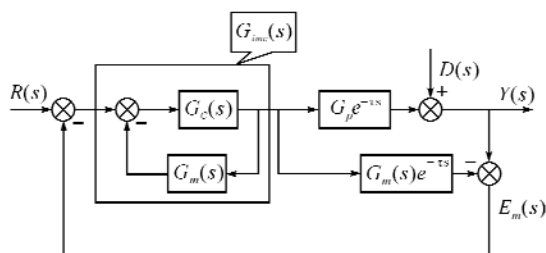


图 1 Smith 预估控制系统的内模控制结构图

Fig. 1 Inner model control construction of Smith predictor

由此可见, 可以用一个 PI 控制器代替 Smith 预估器. 当模型完全匹配时, 仅在主控制器上构成闭环; 当模型失配时, 则系统的反馈信号 $E_m(s)$ 包含了误差信息和模型失配信息, 可通过调节参数来提高闭环系统的稳定性和鲁棒性. IMC-smith 控制与 Smith 预估控制有很多相似之处, 但它明显的优点是: 可对被控制过程输出进行更长时域的预估, 而不仅仅是时滞时间长度.

1.4 Smith 预估器的一种改进结构

从闭环系统的特征方程角度来分析, Smith 预估器的补偿原理就是通过预估项的补偿作用来消除特征方程中的纯滞项, 从而使被控过程的时滞部分排除在闭环控制回路之外, 达到削弱时滞对整个控制的不利影响. 由于适应各种控制系统和精度的要求, 改善 Smith 预估器的各种方法大量出现^[7]. 本文选用的方案是在原控制系统基础上增加一个合适的补偿器, 控制方框图如图 2 所示. 具体做法是将作为补偿器的输入用来构成反馈控制, 这样可以及时将失配信息反馈到控制器,

从而大大减少了时滞影响.

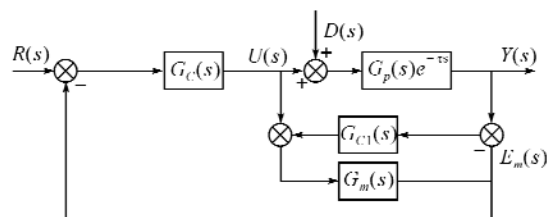


图 2 一种改进的 Smith 预估器方框图

Fig. 2 Block diagram of an improved Smith predictor

输出对给定输入的传递函数为

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)e^{-\tau s}}{[1 + G_c(s)G_m(s)] \frac{1 + G_{cl}(s)G_p(s)e^{-\tau s}}{1 + G_{cl}(s)G_m(s)}}$$

输出对扰动输入的传递函数

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_p(s)e^{-\tau s} \left[1 + \frac{1 + G_c(s)G_m(s)}{1 + G_{cl}(s)G_m(s)}\right]}{[1 + G_c(s)G_m(s)] \frac{1 + G_{cl}(s)G_p(s)e^{-\tau s}}{1 + G_{cl}(s)G_m(s)}}$$

系统的特征方程为

$$[1 + G_c(s)G_m(s)] \frac{1 + G_{cl}(s)G_p(s)e^{-\tau s}}{1 + G_{cl}(s)G_m(s)} = 0$$

当具备严格条件 $G_{cl}(s)$ 模足够小, 有

$$1 + G_{cl}(s)G_p(s)e^{-\tau s} \approx 1$$

$$1 + G_{cl}(s)G_m(s) \approx 1$$

由此可得系统闭环特征方程可近似为

$$1 + G_c(s)G_m(s) = 0$$

由上式可知, 系统的稳定性与补偿器无关, 与对象的时滞部分也无关.

2 仿真参数设置

被控对象为 $G_p(s)e^{-\tau s} = \frac{1}{10s + 1}e^{-10s}$, 考虑模

型匹配和失配情况, 控制器均选择 PI 控制律, 目的是使系统无静差, 仿真时间为 600 s. 按上述方法, 分别构成独自的控制器^[9]. 采用普通 PI 控制, 经参数调整和大量仿真实验表明, 最佳整定参数的控制器为 $G_c(s) = 1.1 \left(1 + \frac{1}{20s}\right)$; 采用 smith 预估器补偿, 重新调整参数, 大量仿真实验表明, 最佳整定参数的控制器^[8]为

$$G_c(s) = 10 \left(1 + \frac{1}{s}\right)$$

Dahlin 控制器 $\alpha = 0.3$

$$G_c(s) = \frac{10s^3 + 7s^2 + 1.8s + 0.12}{3s^3 + 1.8s^2 + 1.56s}$$

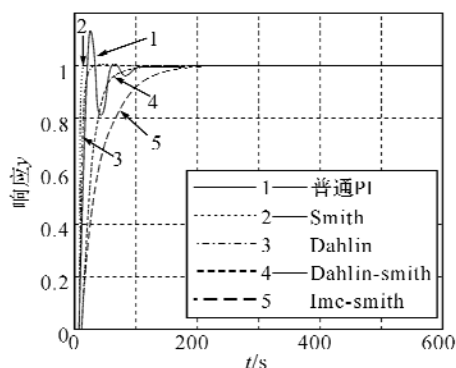
Dahlin-smith 控制器 $\alpha = 1.5$, $\tau_1 = 15$; Imc-smith 控制器中的参数 $\lambda = 35$; 改进的 smith 预估器经补偿器补偿后, 补偿回路控制器的参数为

$K_p=0.8, K_i=0.05$, 主回路控制器参数保持不变. 保持各自控制器和模型参数不变, 改变被控参数对象, 使得模型和对象失配, 即

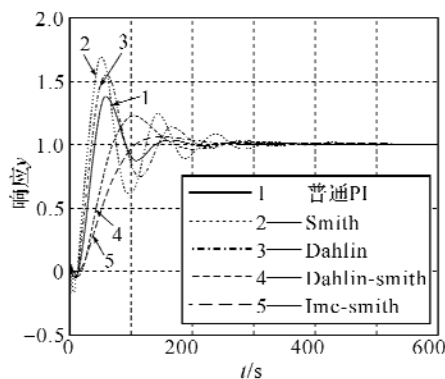
$$G_p(s) = \frac{0.8}{20s+1} e^{-20\tau}$$

干扰输入为给定值的 20%. 用 MATLAB 对

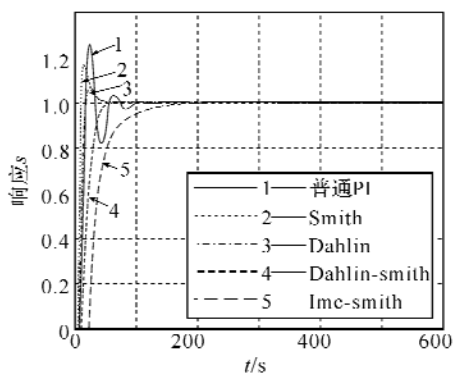
系统进行仿真, 模型匹配和模型失配无干扰情况下的阶跃响应曲线和模型匹配和模型失配有干扰情况下的仿真曲线如图 3 所示. 模型匹配 Smith 预估器, 模型失配 Smith 预估器及模型失配改进型 Smith 预估器阶跃响应曲线如图 4 所示.



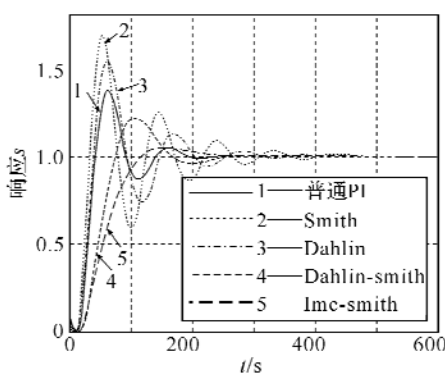
(a) 模型匹配无干扰响应曲线



(b) 模型失配无干扰响应曲线



(c) 模型匹配有干扰响应曲线



(d) 模型失配有干扰响应曲线

图 3 仿真曲线

Fig. 3 Simulation curves

3 结果分析

由仿真结果可知, Smith 预估器和普通 PI 相比, 比例增益约扩大了 9 倍, 积分时间缩小为原来的 1/20, 这表明控制作用有了明显加强. 模型精确时, 只有普通 PI 算法有超调量, 同时将 Dahlin 控制器与 Dahlin-smith 控制器的控制品质相比较, Dahlin 控制器的控制效果更好. Dahlin smith 控制器和 Imc-smith 控制器在模型匹配和模型失配时, 控制效果都还不错, 鲁棒性大大提高, 系统抗干扰能力也显著增强. 改进型 Smith 结构对阶跃输入和干扰方面, 都表现了极佳的控制效果, 特别是和 Smith 模型失配相比, 系统改善了很多, 同时干扰对其影响也很小, 但是它只能适用于某些控制场合, 不像 Smith 预估器那样广泛应用于各种场合.

4 结 语

PI 控制对滞后较大的对象不能得到满意的控

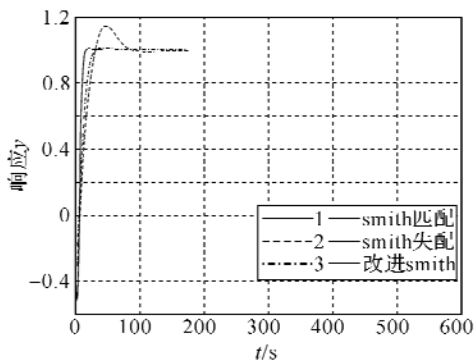


图 4 控制系统阶跃响应曲线

Fig. 4 Step response curve of control system

制质量, 甚至会引起振荡或不稳定, 只适用于时滞短暂的系统. smith 预估器对滞后过程能够提供很好的控制质量, 但是它的控制品质对于模型误差 (纯滞后时间和增益误差) 非常敏感, 特别在模型失配时, 超调量过大, 调节时间过长, 不能适应快速控制场合. Dahlin-smith 控制器和 Imc-smith 控制器响应速度较快, 超调量小, 在模型失配时, 具

有较强的鲁棒性和抗干扰能力,是克服纯滞后比较好的控制方法.改进型 Smith 预估器在系统模型失配很严重且受到干扰时,所得响应很理想,几乎接近模型完全匹配情况,且对模型参数变化的敏感度小,但缺点是对系统的参数有极其严格的限制条件.

参考文献:

- [1] 张峻颖,杨马英,谢启.含有纯滞后系统的控制方法[J].控制工程,2002,9(6):91-93.
- [2] Smith O J. A Controller to Overcome Dead Time [J]. ISA,1959,6(2):28-30.
- [3] 崔士杰,汪建华.基于 MATLAB 的单相全控整流电路功率因数测定[J].武汉工程大学学报,2010,32(1):90-93.
- [4] 刘金琨.先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M].北京:电子工业出版社,2003.
- [5] 郑轲,孙一康.时滞过程控制算法分析[J].北京科技大学学报,2000,22(5):486-488.
- [6] 舒迪前.预测控制系统及其应用[M].北京:机械工业出版社,1996.
- [7] 宋云霞,朱学峰.大时滞过程控制方法及应用[J].化工自动化及仪表,2001,28(4):9-15.
- [8] 王树青.工业过程控制工程[M].北京:化学工业出版社,2002.
- [3] 崔士杰,汪建华.基于 MATLAB 的单相全控整流电

Simulation and analysis to control algorithms of the time-delay object based on MATLAB

HU Xue-jun¹, TENG Da¹, HU Lin-wen²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: Because of the universal existence of time delay phenomenon in industrial process control, his paper analyzes the characteristics of some control methods, discusses the relations between Smith predictor and each control algorithm, and simulated studies the mismatch of model, the change of delay time and the effect of the disturbance to the system. Simulation results show that: Dahlin-smith controller and Inner Model Control smith controller have the advantages of fast response and low overshoot. Especially in the case of the mismatch of model, they have better robustness and stronger anti-interference ability, which provide the methods to overcome the time delay. The improved Smith predictor brings a good quality, which has little sensitivity to the model parameters but with strict restrictions.

Key words: time-delay phenomenon; Smith predictor; the mismatch of model; sensitivity

本文编辑:陈小平