

文章编号: 1005-8893 (2006) 01-0049-03

线性时滞系统内模控制的研究

郑明方

(江苏工业学院 计算机科学与工程系, 江苏 常州 213016)

摘要: 内模控制是近年来发展起来的一种新型控制方法, 分析它的原理对于工程应用和理论研究具有重要的意义。从IMC结构分析入手揭示了内模控制的本质, 证明了该系统可实现对阶跃信号的无差跟踪及在阶跃信号扰动下可实现无差控制, 给出了时滞线性系统内模控制器和内模滤波器的设计方法。并基于MATLAB仿真研究表明, 线性时滞过程的内模控制具有较好的鲁棒性, 有一定的应用价值。

关键词: 时滞线性系统; 内模控制; 仿真

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

Study of IMC of Line—Time Delay System

ZHENG Ming—fang

(Department of Computer Science and Technology, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213016, China)

Abstract: Internal Model Control (IMC) is a new control method developed in the past decade. It is important to analyze its theory in applications and in academic researches. In this paper, the essential of IMC is presented based on structural analysis; it proves that the system can track the step signal and be controlled with the perturbation of the step signal accurately. IMC is good for controlling the long time—delay system. The methods of the design of IMC controller and IMC filter are given. Based on MATLAB, simulation results show that internal model control has simple structure and is easy to be designed and re-adjusted, so it has certain application value.

Key words: time—delay system; IMC; simulation

时滞系统在工业生产过程中是很常见但又是很难控制的, 因此, 一直是控制领域的热门课题。Smith 预估器作为控制大时滞系统的一种有效手段, 早在上个世纪 50 年代就提出来了, 但是在实际应用中存在鲁棒性及抗干扰性较差的问题^[1]。

内模控制作为一种实用性很强的控制方法, 在上世纪 80 年代提出后便得到广泛的应用。其主要特点是: 结构简单、设计简便, 特别对于鲁棒性及抗干扰性的改善和时滞系统的控制, 效果尤为显著。

1 内模控制的结构及特性

图 1 为内模控制结构图^[2]。图中 $G_{p(s)}$ 为被控对象, $\tilde{G}_{p(s)}$ 为对象模型, $G_{imc(s)}$ 为控制器, $r(s)$ 为系统输入, $y(s)$ 为系统输出, $d(s)$ 为干扰量, $u(s)$ 为控制器输出控制作用, $G_d(s)$ 为扰动通道传递函数。

$$u(s) = \frac{G_{imc(s)}}{1 + G_{imc(s)} [\tilde{G}_{p(s)} - G_{p(s)}]} [r(s) - d(s)] \quad (1)$$

收稿日期: 2005-07-01

作者简介: 郑明方 (1964—), 女, 江苏靖江人, 副教授, 主要从事控制理论及智能控制等方面的教学与研究工作。

$$y(s) = \frac{G_{\text{imc}}(s) G_p(s)}{1 + G_{\text{imc}}(s) [\tilde{G}_p(s) - \tilde{G}_{p(s)}]} [r(s) - d(s)] + d(s) \quad (2)$$

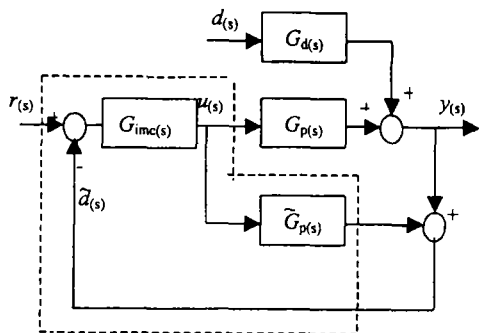


图 1 内模控制结构框图

Fig. 1 IMC structure

系统的特征方程为:

$$1 + G_{\text{imc}}(s) [\tilde{G}_p(s) - \tilde{G}_{p(s)}] = 0 \quad (3)$$

$$\frac{1}{G_{\text{imc}}(s) G_p(s)} + 1 - \frac{\tilde{G}_{p(s)}}{G_p(s)} = 0 \quad (4)$$

当 $\tilde{G}_{p(s)} = G_{p(s)}$ 时, 特征方程为: $\frac{1}{G_{\text{imc}}(s) G_p(s)} = 0$,

则当 $G_{\text{imc}}(s)$, $G_p(s)$ 均稳定时, 内模控制系统必然稳定。

当 $G_{\text{imc}}(s) = \tilde{G}_{p(s)}^{-1}$ 时,

$$y(s) = \frac{G_p(s) G_p(s)}{1 + \tilde{G}_{p(s)}^{-1} G_p(s) - \tilde{G}_{p(s)}^{-1} \tilde{G}_{p(s)}} [r(s) - d(s)] +$$

$$d(s) = r(s) \quad (5)$$

即输出可以完全复现输入。

2 内模控制器的设计^[3~5]

当对象模型完全可逆时, 取控制器 $G_{\text{imc}}(s) = \tilde{G}_{p(s)}^{-1}$, 可实现输出对输入的完全复现。但是当对象模型中含有时滞环节时, 即 $\tilde{G}_{p(s)} = \tilde{G}_{p-(s)} e^{-\tau}$, 其中 $\tilde{G}_{p-(s)}$ 表示模型中最小相位部分。则控制器应取: $G_{\text{imc}}(s) = \tilde{G}_{p-(s)}^{-1} f(s)$ 。其中 $f(s)$ 为低通滤波器。 $f(s)$ 的引入, 主要是为了增加系统的鲁棒稳定性和鲁棒性能。

若对象的传递函数可以用乘性不确定性描述为:

$$G_{p(j\omega)} = \tilde{G}_{p(j\omega)} [1 + l_{m(j\omega)}] \quad (6)$$

$|l_{m(j\omega)}| \leq \bar{l}_{m(j\omega)}$ 为其不确定性所允许的上界。则内模控制的对象应满足:

$$G_{p(j\omega)} \in \Pi = \left\{ G : \left| \frac{G_{p(j\omega)} - \tilde{G}_{p(j\omega)}}{\tilde{G}_{p(j\omega)}} \right| \leq \bar{l}_{m(j\omega)} \right\} \quad (7)$$

并由文献 [6] 可知, 内模控制系统稳定的充要条

件是:

$$|G_{\text{imc}}(j\omega) \tilde{G}_{p(j\omega)}| \bar{l}_{m(j\omega)} < 1 \quad (8)$$

当 $\tilde{G}_{p(j\omega)} = \tilde{G}_{p-(j\omega)} e^{-j\omega\tau}$ 时, 取

$$G_{\text{imc}}(j\omega) = \tilde{G}_{p-(j\omega)} f_{j\omega} \quad (9)$$

则

$$|G_{\text{imc}}(j\omega) \tilde{G}_{p(j\omega)}| \bar{l}_{m(j\omega)} = |\tilde{G}_{p-(j\omega)} f_{j\omega} \tilde{G}_{p-(j\omega)} e^{-j\omega\tau}| \bar{l}_{m(j\omega)} = |e^{-j\omega\tau} f_{j\omega}| \bar{l}_{m(j\omega)} = |f_{j\omega}| \bar{l}_{m(j\omega)} \quad (10)$$

因此, 时滞系统稳定的充要条件为:

$$|f_{j\omega}| \bar{l}_{m(j\omega)} < 1 \quad (11)$$

3 内模滤波器的设计

从式 (11) 可知, 当 $\bar{l}_{m(j\omega)}$ 确定以后, 系统的稳定性由 $f_{j\omega}$ 决定, 通过对 $f_{j\omega}$ 的适当设计, 可使系统对模型误差具有更强的鲁棒性。

因此, 由于对象具有时滞 $e^{-\tau}$, 选取二型滤波器:

$$f(s) = \frac{\left[na - \frac{de^{-\tau}}{ds} \right]_{s=0} s + 1}{(\alpha s + 1)^r} = \frac{(na + \tau) s + 1}{(\alpha s + 1)^r} \quad (12)$$

其中 $r \geq 3$ 。

考虑 $d(s) = 0$ 的情况, 系统的误差方程:

$$e(s) = r(s) - y(s) = \frac{1 - G_{\text{imc}}(s) \tilde{G}_{p(s)}}{1 + G_{\text{imc}}(s) [\tilde{G}_p(s) - \tilde{G}_{p(s)}]} r(s) \quad (13)$$

其中:

$$\tilde{G}_{p(s)} = \tilde{G}_{p-(s)} e^{-\tau} \quad (14)$$

$$G_{\text{imc}}(s) = \tilde{G}_{p-(s)}^{-1} f(s) = \tilde{G}_{p-(s)}^{-1} \frac{(na + \tau) s + 1}{(\alpha s + 1)^r} \quad (15)$$

$$G_p(s) = \tilde{G}_{p(s)} [1 + l_{m(s)}] \quad (16)$$

其中 $l_{m(s)}$ 为建模误差。

稳态误差为: $e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot e_s =$

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{(\alpha s + 1)^r - \left[\frac{(na + \tau) s + 1}{(\alpha s + 1)^r} e^{-\tau} \right] e^{-\tau}}{(\alpha s + 1)^r + l_{m(s)} \left[\frac{(na + \tau) s + 1}{(\alpha s + 1)^r} e^{-\tau} \right]} \cdot r(s) \quad (17)$$

当 $r(s) = \frac{1}{s}$ 时

$$e_{ss} = 0 \quad (18)$$

当 $r(s) = \frac{1}{s^2}$ 时

$$e_{ss} = 0 \quad (19)$$

由式 (18)、式 (19) 可得: 在线性对象中含有大时滞环节 $e^{-\tau}$ 且存在建模误差时, 选用式 (12) 二型滤波器时, 可使系统无静差地跟踪阶跃信号和斜坡信号。

考虑 $r(s)=0$ 的情况:

在干扰量 $d(s)$ 的作用下, 系统的误差方程为:

$$e(s) = r(s) - y(s) = \frac{1 + G_{imc}(s) \tilde{G}_{p(s)}}{1 + G_{imc}(s) [G_{p(s)} - \tilde{G}_{p(s)}]} (-d(s)) \quad (20)$$

该误差形式与式 (13) 相似, 因此可以推导出:

$$\text{当 } r(s) = \frac{1}{s} \text{ 时, } \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot e(s) = 0 \quad (21)$$

$$\text{当 } r(s) = \frac{1}{s^2} \text{ 时, } \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot e(s) = 0 \quad (22)$$

由式 (21)、式 (22) 可得: 当输入阶跃或斜坡形式扰动信号时, 系统可实现无静差克服。由于系统的鲁棒稳定条件为式 (11), 当取 $f(s) = \frac{(n\alpha + \tau)s + 1}{(\alpha s + 1)^r}$ 时, 改变 α 的值, 对系统的鲁棒性有较大的影响, α 越大, 系统的鲁棒性越好, 但同时也会使系统的响应速度变慢。因此, 选取一个合适的 α 值可同时满足其动态及鲁棒稳定性要求。

4 仿真实例

对于典型一阶加片滞后对象, $G_{p(s)} = \frac{K_0}{1 + T_0 s}$

$e^{-\tau_0 s}$, $\tilde{G}_{p(s)} = \frac{K}{1 + T_s s} e^{-\tau s}$, 存在建模误差

$$\left| \frac{G_{p(j\omega)} - \tilde{G}_{p(j\omega)}}{\tilde{G}_{p(j\omega)}} \right| = \frac{|K_0 \sqrt{1 + T^2 \omega^2} - K \sqrt{1 + T_0^2 \omega^2}|}{K \sqrt{1 + T_0^2 \omega^2}} \quad (23)$$

滤波器选为:

$$f(s) = \frac{(3\alpha + \tau)s + 1}{(\alpha s + 1)^3} \quad (24)$$

控制器选为:

$$G_{imc(s)} = \frac{1 + T_s}{K} \cdot f(s) \quad (25)$$

由图 1 所示结构框图, 在 SIMULINK 环境下, 仿真框图如图 2 所示。

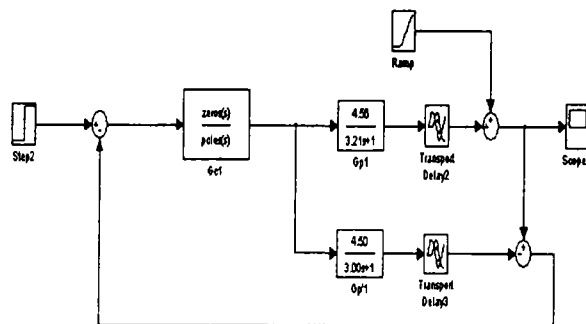


图 2 SIMULINK 仿真框图

Fig. 2 SIMULINK structure

当 $K_0 = 4.56$, $T_0 = 3.21$, $\tau_0 = 1.85$, $K = 4.50$, $T = 3.00$, $\tau = 2.00$ 时, 考虑斜坡扰动, 取 $\alpha = 0.85$, 系统的阶跃响应见图 3。

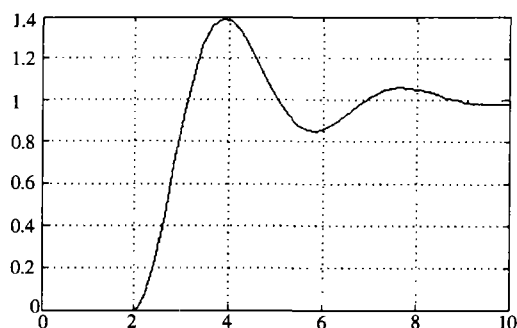


图 3 纯滞后 IMC 系统存在扰动时阶跃响应

Fig. 3 Step response of time-delay IMC system

由图 3 知超调量 M_p 为 0.39, 稳态误差为 0, 调整时间 t_s 为 6.8 min。IMC 系统能无静差地跟踪阶跃信号并在斜坡信号扰动下可实现无差控制, IMC 系统具有较强的鲁棒稳定性能。

参考文献:

- [1] 周涌. 内模控制的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2000.
- [2] 王树青. 先进控制及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2001. 48-54.
- [3] 赵曜. 内模控制发展综述 [J]. 信息与控制, 2000, 29 (6): 526-531.
- [4] 钟庆昌, 谢剑英. 纯滞后对象的内模控制 [J]. 电气自动化, 2000, 1: 23-25.
- [5] CHIU M CUIS. Internal Model Control Design for Transition Control [J]. AIChE Journal, 2000, 46 (2): 309-320.
- [6] ERIC C. Internal Model Predictive Control [J]. Automatica, 1995, 31 (10): 1 471-1 482.