

文章编号: 1002-0411(2000)06-0526-05

内模控制发展综述

赵 曜

(四川大学自动化系 成都 610065)

摘 要: 本文概述了内模控制(IMC)的产生、发展及研究现状, 分析比较了各种 IMC 设计方法的优劣, 并对 IMC 的发展前景和改进策略提出了看法。

关键词: 内模控制, Smith 预估器, 前馈控制器, 反馈滤波器

中图分类号: TP13

文献标识码: A

1 前言

内模控制(IMC)是 80 年代初提出的^[1], 其产生的背景主要有两个方面: 一是为了对当时提出的两种预测控制算法 MAC 和 DMC^[2,3]进行系统分析; 其次是作为 Smith 预估器的一种扩展, 使设计更为简便, 鲁棒及抗扰性大为改善。

IMC 是一种实用性很强的控制方法, 其主要特点是结构简单、设计直观简便, 在线调节参数少, 且调整方针明确, 调整容易。特别是对于鲁棒及抗扰性的改善和大时滞系统的控制, 效果尤为显著。因此自从其产生以来, 不仅在慢响应的过程控制中获得了大量应用^[4-6], 在快响应的电机控制中也能取得了比 PID 更为优越的效果^[7-9]。经过十多年的发展, IMC 方法不仅已扩展到了多变量和非线性系统^[10,11], 还产生了多种设计方法, 较典型的有零极点对消法^[10]、预测控制法^[12]、针对 PID 控制器设计的 IMC 法^[13]、有限拍法^[14]等。IMC 与其他控制方法的结合也是很容易的, 如自适应 IMC^[15,16], 采用模糊决策、仿人控制、神经网络的智能型 IMC 等^[17-20]。值得注意的是, 目前已经证明, 已成功应用于大量工业过程各类预测控制算法本质上都属于 IMC 类^[1,6], 在其等效的 IMC 结构中特殊之处只是其给定输入采用了未来的超前值(预检控制系统), 这不仅可以从结构上说明预测控制为何具有良好的性能, 而且为其进一步的深入分析和改进提供了有力的工具。

下面从三个方面讨论 IMC。首先将 IMC 与 Smith 预估器进行比较, 然后对几种常用的设计方法进行说明, 并分析其优劣, 最后讨论直接影响鲁棒及抗扰性的反馈滤波部分, 指出现有方法的局限性和改进的基本思路。

2 IMC 与 Smith 预估器

Smith 预估器作为控制大时滞系统的一种有效手段, 早在 50 年代就提出来了, 但实际应用时主要存在鲁棒及抗扰性差的问题。Laughlin 等人提出了增加低通滤波器来改善鲁棒性的方案^[21], 其实质就是 IMC。IMC 可以看作 Smith 预估器很自然的一种扩展。

Smith 预估控制和 IMC 系统的结构如图 1 和图 2 所示, 其中 P 为控制对象, P_M 为对象模型, 可表示为 $P_M = \bar{P}_M e^{-\tau}$, \bar{P}_M 不包含时滞; r, u, y 分别为给定输入, 控制量和输出; C 为 Smith

预估控制器, 一般为 PID 型; Q 和 F 分别为 IMC 的前馈控制器和反馈滤波器, Q 主要用于实现对给定的良好跟踪(伺服性能), F 用于调节鲁棒及抗扰性. 这种结构为 2 自由度的 IMC 系统, 若取 F 为单位量, 则成为 1 自由度系统, Q 需要在伺服性能、鲁棒性、抗扰性之间进行折衷, 通常是靠牺牲跟踪的快速性来改善鲁棒性.

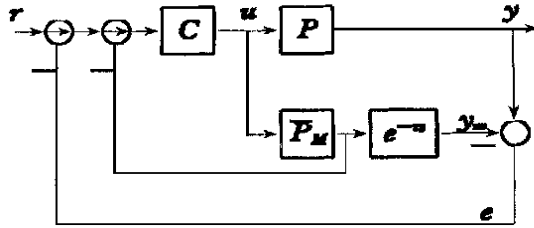


图 1 Smith 预估控制系统

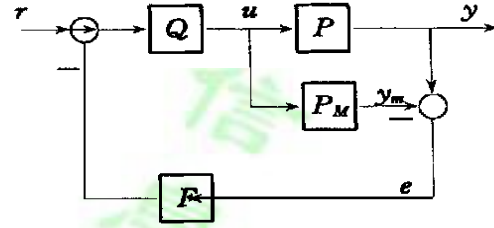


图 2 IMC 系统

Smith 预估器的作用是将有时滞的系统转化为无时滞的系统来进行控制, 只要模型精确, 控制效果与时滞大小无关. 从结构图可以看出, 它与 IMC 控制器的关系为

$$Q = \frac{C}{1 + CP_M} \quad (1)$$

若令 $F = 1$, 两种控制结构则完全等价. 这说明了 *Smith* 预估控制是 IMC 的一种特例, IMC 不仅保留了 *Smith* 预估控制的全部优点, 而且在性能改善上有更大的回旋余地, 设计也更为直观简便. Q 的设计与开环系统一样, F 则一般取一阶低通滤波器, 无需设计, 只有一个调节参数. 下面针对一阶和二阶对象说明 *Smith* 预估控制的 PID 控制器在 IMC 结构下进行设计是非常简单而直观的.

对于典型一阶加纯滞后对象

$$P_M = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s} \quad (2)$$

IMC 的 Q 可按相消法简单地取为

$$Q = \frac{Ts + 1}{K(T_c s + 1)} \quad (3)$$

显然, 系统响应的快慢由 T_c 决定, T_c 的选取主要在快速性与控制强度之间取折衷, 设计简单明了. T_c 也会影响鲁棒性, 一般是 T_c 越大鲁棒性越好, 但这方面的性能通过 F 来进行设计和调整更为合理.

将(3)代入(1)可得对应的 *Smith* 预估控制器为 PI 型

$$C = \frac{Ts + 1}{KT_c s} \quad (4)$$

文[22]证明了该 *Smith* 器具有 H_2 最优结构, 实际上在 IMC 结构下, 其最优性是显而易见的.

对于典型二阶加纯滞后对象

$$P_M = \frac{K}{a_2 s^2 + a_1 s + 1} e^{-\tau s} \quad (5)$$

则可取 Q 为

$$Q = \frac{a_2 s^2 + a_1 s + 1}{K(T_2 s^2 + T_1 s + 1)} \quad (6)$$

T_1, T_2 为设计参数, 很容易根据阻尼比、调节时间等典型二阶指标来确定, 设计和调整都很直观简单. 相应的 *Smith* 器则为带惯性环节的 *PID* 控制

$$C = \frac{a_2 s^2 + a_1 s + 1}{K s(T_2 s + T_1)} \quad (7)$$

3 前馈控制器 Q 的设计

在没有模型误差和扰动时, 闭环传递函数为 $Q P_M$. 因此只要使 Q 尽可能成为 \bar{P}_M 的逆就是最佳的控制. 下面比较说明三种典型的设计方法.

(1) 相消法^[4-6]

设对象稳定, 首先利用 Q 消去 P_M 中的最小相位部分, 然后在 Q 中增加一个一阶或二阶前馈滤波环节来调节响应的快速性, 控制强度和鲁棒及抗扰性, 这就是所谓的两步设计法. 该法设计和调整都最为直观简单, 如前面例, 并同时适用于连续和离散系统, 但对于非最小相位对象, 由于 P_M 中的不稳定零点无法消去, 系统的响应性能因而无法保证, 有可能产生较大的输出反调和超调.

(2) 预测控制法^[6, 12]

该方法利用对象模型(脉冲响应、阶跃响应、或传递函数)对输出进行预测, 通过优化包含输出预测误差和控制量的二次型加权指标来求取 Q . 该法本质上属于典型的预测控制算法如 *MAC*(脉冲响应模型)^[12]、*DMC*(阶跃模型)^[13]和 *GPC*(传函模型)^[23], 只是在求取 Q 时无需考虑对预测误差的修正, 即反馈校正. 该环节在 *IMC* 中通过反馈滤波来体现. 因此, 这样设计的 Q 具有预测控制的大部分特点, 参数调整也基本相同, 并能很好地控制非最小相位系统, 缺点是计算比较复杂, 尤其是预测时域较大时.

(3) 有限拍法^[14]

该方法是离散系统中最少拍控制和有限拍最优控制^[24, 25]在 *IMC* 中的应用和扩展, 其基本思路是在有限个采样周期内使输出达到给定值. 最少的采样周期数对应最少拍控制, 只有唯一解, 但控制幅值有可能过大; 适当延长响应拍数, 并对控制量进行二次型优化就构成有限拍最优控制, 可大幅度地降低控制幅度或控制能量. 该设计法能很好地适用于非最小相位系统, 全部设计过程只是选取控制拍数和计算一个简单的矩阵方程, 计算量小于预测控制法, 其缺点是响应不够平滑.

上述三种方法的共同点是响应快慢可以很直观地进行调整, 降低快速性就可减小控制幅度, 增加平稳性或鲁棒性. 在没有反馈滤波($F=1$)时, 只能靠 Q 在三方面性能之间进行折衷; 有反馈滤波时, 则 Q 的设计只需考虑响应的快速性与控制强度, 鲁棒及抗扰性则专门由 F 来进行调节, 这样的 2 自由度控制器在设计上更为灵活方便, 性能改善的回旋余地也更大.

4 反馈滤波器 F

由图 2 可知, 没有模型失配和扰动时, $e=0$, 系统相当于开环, 只有前馈控制器 Q 起作用, 所以 F 是专门针对模型失配和扰动设置的, 主要解决三个问题: 鲁棒稳定, 鲁棒跟踪(鲁棒无静差)和鲁棒性能.

F 最常用的结构为一阶低通滤波器, 其离散方程为

$$F(z) = \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha z^{-1}}, \quad 0 \leq \alpha < 1 \quad (8)$$

只有一个调节参数, 结构简单, 同时性能改善效果显著, 并有很多成熟的结论. 在鲁棒稳定性方面, 一个很有用的结论是: 无论模型失配有多大, 只要对象增益不变号, 则增大 α (逼近 1) 总能使系统稳定^[10].

在鲁棒跟踪或鲁棒无静差(即存在模型失配和扰动也能保证响应无稳态误差)方面, 对于阶跃输入和阶跃扰动, 只需 Q 的增益为 P_M 增益的倒数(标称情况下的无静差条件), 且系统闭环稳定, 则(8)式的 F 就能保证鲁棒无静差^[6,10]. 该条件实际上等效于传统结构的控制器包含一个积分环节. 对于一般形式的给定输入和扰动, 文[26]给出了鲁棒无差跟踪条件, 这实际上就是 IMC 结构下的内模原理. 当然, 非阶跃型输入和扰动时, F 就不可能是(8)式的形式了, 其鲁棒稳定性和鲁棒性能如何保证, 这方面的研究尚有待深入.

在鲁棒性能(使输出尽可能地逼近无模型失配和扰动时的响应)方面, 全面系统的分析和设计方法尚未见报道, 只是总结出了 F 为一阶滤波时的基本性质和参数调整规律. 不同的模型失配和扰动可能要求不同的 α 值, 如对于时滞误差, α 越接近 1 效果越好, 其道理很显然, 即趋向开环控制, 不受时滞变化影响. 对于其他类型的模型失配或扰动, 最佳的 α 常常为中间的某个值, 但总的趋势是增大 α ($\alpha < 1$) 有利于平稳性和鲁棒性, 但响应变得滞缓, 因此滤波器参数的选择实际上是在鲁棒性与快速性之间折衷.

另一方面, 固定的 α 值所能达到的性能有限, 文[17]提出的方法是根据系统误差及其变化率自动地在线修正 α , 文[18]是同时根据系统误差和模型误差在线调整 α , 两种方法都使性能明显改善, 但采用的都是 1 自由度结构, 即修正的是前馈滤波器, 对伺服性能, 特别是跟踪的快速性有影响, 且调整 α 只是调整滤波器反应的快慢. 文[20]在(8)式中给 F 增加了一个变增益环节, 通过同时在线调整 F 的增益和 α , 可分别改变 F 响应的强度和快慢, 从而进一步使性能得到改善.

鲁棒性能的一般讨论要用到敏感性函数. 从图 2 容易得到

$$y = P_M Q r + S e \quad (9)$$

其中

$$S = 1 - F Q P_M \quad (10)$$

称为敏感性函数. 显然, 只要使 S 尽可能地小, 就能使模型误差和扰动对输出的影响减小到最小. 对于时滞很小的连续系统, 可以在关键频段通过对 S 整形而获得非常理想的特性^[7], 但对于离散系统, 无论时滞大小, S 的 H_∞ 和 H_2 指标(峰值和平均值)最多能减小到 1^[27], 而(8)式的 F 在 $\alpha \rightarrow 1$ 时就能达到该最小值, 这就从理论上论证了为何增大 α 能改善鲁棒性, 同时也启示我们, 对于离散系统, 是否还有必要采用更复杂的反馈滤波结构? 这是一个值得深入探讨的问题.

5 结束语

$Smith$ 预估控制作为 IMC 的一个特例, 在结构上可以相互转换, IMC 与 $Smith$ 器一样, 在结构上可以和常规反馈系统相互转换, 但从设计角度看, 两者并不等价, 原因是 IMC 控制器变换为常规控制器时其分母将包含时滞环节, 而直接设计常规控制器则通常取其有理分式, 因此 IMC 与常规控制是有本质区别的. IMC 结构的最大优点是把伺服问题与鲁棒及抗扰性问

题分开处理、使分析、设计和调整都大为简化,同时又能像 *Smith* 器那样适用于大时滞系统,因此自其诞生以来就表现出了强大的生命力和应用潜力,尽管生产实际中约 90% 的控制问题都可用简单的 *PID* 控制器来解决^[28],但对于有较大纯滞后,明显非线性、多变量耦合的系统,采用 *IMC*(包括预测控制)是非常合适的。*IMC* 与 *PID* 控制一样已经具有能够在生产实际中大量应用的几个特征:结构和设计简便,调节参数少且调整方针明确,物理意义清楚。因此可以断言,*IMC* 有望成为与 *PID* 互为补充,大量应用于工程实际的一种行之有效的控制手段。

IMC 发展到今天,应当说其理论框架已基本形成,尚需深入研究的主要是如何更有效地利用反馈滤波器来改善鲁棒及抗扰性,但对于常用的一阶滤波器,所得结论已能够卓有成效地指导实践。另外在非线性、多变量系统的控制,与智能、自适应控制的结合等方面,也有很多工作要做,目前的很多研究成果与实际应用尚有距离。

参 考 文 献

- 1 Garcia C E, Morari M. Internal Model Control. 1. A Unifying Review and Some New Results. *I&EC Process Des. Dev.*, 1982, **21**(2): 308~ 323
- 2 Richalet J A, *et al.* Model Predictive Heuristic Control: Applications to an Industrial Process. *Automatica*, 1978, **14**(5): 413~ 428
- 3 Cutler C R, Ramaker L B. Dynamic Matrix Control—a Computer Control Algorithm. In: *JACC Proceedings*, 1980: WP5 - B
- 4 Deshpande P B, Ash R H 著,张新薇,陈永译. 计算机过程控制——先进控制策略的应用,中国科学技术出版社,1991
- 5 Morari M, Zafiriou E. *Robust Process Control*, Prentice-Hall, 1988
- 6 舒迪前. 预测控制系统及其应用. 北京:机械工业出版社,1996
- 7 赵 曜. 直流调速系统的 2 自由度内模控制方法. *电气传动*, 1997, **27**(1): 41~ 43
- 8 赵 曜. 直流调速系统 2 自由度内模控制与 *PID* 控制的比较. 见:1997 中国控制会议论文集,武汉出版社,1997: 1109 ~ 1112
- 9 张井岗等. 直流电动机调速系统的内模控制. *电机与控制学报*, 1998, **2**(2): 126~ 128
- 10 Garcia C E, Morari M. Internal Model Control. 2. Design Procedure for Multivariable Systems. *I&EC Process Des. Dev.*, 1985, **24**(2): 472~ 484
- 11 Econmou C G, Morari M. Internal Model Control. 5. Extension to Nonlinear Systems. *I&EC Process Des. Dev.*, 1986, **25**(2): 403~ 411
- 12 Garcia C E, Morari M. Internal Model Control. 3. Multivariable Control Law Computation and Tuning Guidelines. *I&EC Process Des. Dev.*, 1985, **24**(2): 484~ 494
- 13 Garcia C E, Morari M. Internal Model Control. 4. *PID* Controller Design. *I&EC Process Des. Dev.*, 1986, **25**(1): 252 ~ 265
- 14 赵 曜. 基于内模结构的鲁棒有限拍控制及其与预测控制的比较. 见:1995 中国控制会议论文集,中国科学技术出版社,1995: 157~ 162
- 15 舒迪前. 自适应控制. 沈阳:东北大学出版社,1993
- 16 谭永红,李松. 自适应内模控制及其应用. *自动化仪表*, 1991, **12**(4): 8~ 10
- 17 张井岗等. 模糊自适应内模控制. 见:第二届全球华人智能控制与智能自动化大会论文集,1997: 1811~ 1814
- 18 刘乐星,余文休. 智能自适应内模控制器. 见:1996 中国智能自动化会议论文集,1996: 501~ 505
- 19 李士勇. 模糊控制、神经控制和智能控制论. 哈尔滨工业大学出版社,1996
- 20 赵 曜,牛端燕. 内模控制系统反馈滤波器的在线智能调节. 见:1999 中国智能自动化会议论文集(待出版),清华大学出版社,1999: 529~ 533
- 21 Laughlin D L, *et al.* *Smith* Predictor Design for Robust Performance. *Int. J. Control*, 1987, **46**(2): 477~ 504
- 22 张卫东,孙优贤. 大纯滞后对象的 H_2 鲁棒控制. *控制理论与应用*, 1996, **13**(4): 495~ 499

- 23 Clarke D W, *et al.* Generalized Predictive Control-part 1. the Basic Algorithm, Part 2. Extension and Interpretations. *Automatica*, 1987, **23**(2): 137~ 160
- 24 赵 曜. 最小能量有限拍鲁棒控制系统的设计. *自动化学报*, 1993, 19(3): 340~ 345
- 25 Zhao Y, Kimura H. Optimization of Control Input for Deadbeat Control Systems. *Int. J. Control*, 1994, **59**(4): 1107~ 1117
- 26 赵 曜. 内模控制的鲁棒无差跟踪条件. 见: 1999 中国控制与决策学术年会论文集, 东北大学出版社, 1999: 252~ 254
- 27 赵 曜. 动态矩阵控制的稳定性和鲁棒性分析. 见: 1994 中国控制与决策学术年会论文集, 东北大学出版社, 1994: 157~ 162
- 28 黄聪明, 袁德成. 内模控制(IMC)的发展. *化工自动化及仪表*, 1989, **16**(3): 6~ 9

A SURVEY OF DEVELOPMENT OF INTERNAL MODEL CONTROL

ZHAO Yao

((Department of Automation, Sichuan University, Chengdu 610065))

Abstract: This paper describes the emerge, the development and the present research situation on internal model control(IMC). Several kinds of the most commonly-used IMC design approaches are analyzed and compared. Some comments on IMC's developing prospects and improving possibilities are made.

Keywords: internal model control, Smith predictor, feedforward controller, feedback filter

作者简介

赵 曜(1956-), 男, 博士, 教授. 研究领域为鲁棒控制, 内模与预测控制, 智能控制.

编
辑
部