

文章编号:1003-7837(2006)03-0217-04

IMC-PID 在大惯性大滞后系统中的应用及仿真

严兴华, 王钦若, 曾永荣

(广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510090)

摘要:针对 PID 对大滞后大惯性系统的控制效果不佳、参数整定复杂等方面的不足, 将内模控制与 PID 控制相结合, 并在 MATLAB 环境下进行仿真. 以算例证明内模控制与 PID 控制串联结合, 比单纯的 PID 控制具有更良好的鲁棒性和抗干扰性, 不但调节速度更快, 参数整定方法更简单, 而且还不依赖于对象模型的参数, 非常适用于工业过程控制.

关键词:鲁棒性; PID; 内模控制; 仿真; 大惯性大滞后系统

中图分类号:TP273

文献标识码:A

内模控制自面世以来, 不仅在工业过程控制中获得了成功应用, 而且在控制系统稳定性和鲁棒性理论分析方面也具有一定的优势. 尤其是多变量内模控制可以直接调试整个闭环系统的动态性能, 并对模型误差具有良好的鲁棒性, 因此, 内模控制也是分析与设计多变量过程控制系统的一种重要方法.

在工业过程中, 简单的 PID 控制可以解决绝大部分的控制问题, 然而对于强耦合多变量过程、强非线性过程、大惯性过程和大时滞过程, 常规的 PID 控制难以得到满意的控制效果.

采用内模控制结合 PID 控制, 比单纯采用 PID 控制器的控制效果好. 与经典的 PID 控制相比, 内模控制结合 PID 控制仅需整定一个参数, 参数调整与系统的动态品质和鲁棒性的关系比较明确.

法, 而且还是研究预测控制等基于模型的控制策略的重要理论基础, 以及提高常规控制系统设计水平的工具. 其结构框图如图 1 所示.

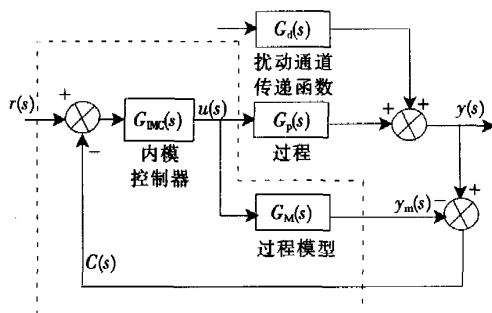


图 1 内模控制框图

Fig. 1 IMC controller

1 内模控制

1.1 内模控制原理及其结构图

内模控制 (Internal Model Control, 简称 IMC) 是一种基于过程数学模型进行控制器设计的控制策略. 由于其设计简单, 控制性能好和在系统分析方面的优越性, 因而它不仅是一种实用的先进的控制算

系统的闭环响应:

$$y(s) = \frac{G_{IMC}(s)G_p(s)}{1 + G_{IMC}(s)[G_p(s) - G_M(s)]}r(s) + \frac{[1 - G_{IMC}(s)G_M(s)]G_d(s)}{1 + G_{IMC}(s)[G_p(s) - G_M(s)]}d(s) \quad (1)$$

反馈信号:

收稿日期:2006-04-19

作者简介:严兴华(1982-),男,广东广州人,硕士研究生.

$$C(s) = [G_p(s) - G_M(s)]u(s) + G_d(s)d(s) \quad (2)$$

1.2 基于内模 PID 鲁棒性控制器的设计^[1-2]

若过程 $G_p(s)$ 稳定, 过程模型定义准确, 且当 $G_p(s) = G_M(s)$, $G_{IMC}(s) = G_p^{-1}(s)$, 模型的逆 $G_M^{-1}(s)$ 存在时, 则理想控制器的特性为^[3]:

$$y(s) = \begin{cases} r(s) & \text{设定值扰动下} \\ 0 & \text{外界干扰扰动下} \end{cases}$$

即系统可以克服任何干扰 $d(s)$, 实现对参考输入的无偏差跟踪. 但理想控制器的特性是在 $G_M^{-1}(s)$ 存在且控制器 $G_{IMC}(s)$ 可以实现的条件下得到的. 由于对象中常见的时滞和惯性环节, 使 $G_M^{-1}(s)$ 中出现纯超前和纯微分环节, 因此, 理想控制器是很难实现的. 此外, 对于具有反向特性, 即包含不稳定零点的过程, $G_M^{-1}(s)$ 中甚至还含有不稳定极点. 另外, 由于模型误差, 闭环系统的鲁棒性也无法确定.

1.3 IMC-PID 控制器的设计过程^[4-5]

1.3.1 理想的 PID 控制器

理想的 PID 控制器具有如下形式:

$$G_{PID}(s) = K_P \left[1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right] \quad (3)$$

图 1 虚线框内等价的反馈控制器 $G(s)$ 和内模控制器 $G_{IMC}(s)$ 之间有如下关系:

$$G(s) = \frac{G_{IMC}(s)}{1 - G_{IMC}(s)G_M(s)} \quad (4)$$

1.3.2 IMC-PID 控制器的设计

内模控制器可分为三步进行设计. 首先, 暂不考虑系统的鲁棒性和约束, 设计一个稳定的理想控制器; 其次, 引入滤波器, 通过调整滤波器的结构和参数来获得期望的动态品质和鲁棒性^[6]; 最后, 对系统的抗干扰性进行验证.

(1) 过程模型 $G_M(s)$ 的分解

$G_M(s)$ 可以分解成 $G_{M-}(s)$ 和 $G_{M+}(s)$ 两项, 即:

$$G_M(s) = G_{M+}(s)G_{M-}(s) \quad (5)$$

式(5)中: $G_{M+}(s)$ 是一个全通滤波器传递函数, 对于所有频率 ω 满足 $|G_M(j\omega)| = 0$.

在 $G_{M+}(s)$ 中包含了所有时滞和右半平面零点. $G_{M-}(s)$ 是具有最小相位特征的传递函数, 即 $G_{M-}(s)$ 稳定且不包含预测项.

(2) 鲁棒性的设计

为了增加鲁棒性, 在控制环节中加入一个低通滤波器 $F(s)$.

$$F(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^\gamma} \quad (6)$$

式(6)中: λ 是时间常数; γ 是使 $G_M(s)$ 控制可以实现的阶次.

从图 1 可以推导出:

$$G_{IMC}(s) = G_M^{-1}(s)F(s) \quad (7)$$

$$G(s) = \frac{G_M^{-1}(s)}{(\lambda s + 1)^\gamma - G_{M+}(s)} \quad (8)$$

在 IMC-PID 串级控制中, $G_{IMC}(s)$ 和 $G_M(s)$ 等都是按照内模控制原理来设计的, 与单回路 IMC 类似, 只要满足一定的条件, 不管多大的模型失配, $F(s)$ 中的参数 λ 都能保证闭环系统的稳定.

(3) 抗干扰性验证

与单回路控制系统相比较, 由于系统在结构上多了一个副回路, 所以提高了系统抑制二次干扰的能力. 可用信噪比 $As = \frac{y/r}{y/dz}$ 来衡量系统的抗干扰能力.

1.4 基于内模控制的 PID 控制参数的整定^[7]

通过对 IMC-PID 控制器进行参数整定, 发现在整个整定过程中, 只有滤波器的时间常数 λ 需要调整, 其他所有控制器的参数如比例增益 K_P , 积分时间 T_I 和微分时间 T_D 都与 λ 有关, 且随着 λ 的增大, K_P 和 T_D 趋向于 0, T_I 趋向于过程模型的时间常数 T_p .

2 利用 MATLAB 对模型仿真

2.1 选取模型^[8]

以某电厂球磨机负载控制系统为例, 负荷对象的模型为 $G(s) = \frac{0.5}{(50s+1)^3} e^{-90s}$. 由对象模型的延迟时间为 90 s 可知, 该系统属 PID 难控型的大滞后系统. 我们利用 MATLAB 7.0 下的 Simulink 工具箱对其进行仿真, 并基于此模型对象进行推算, 近似求出 IMC-PID 控制器下的过程模型为 $G_M(s) = \frac{0.5}{1+93s} e^{-155s}$. IMC-PID 在 Simulink 下的仿真模型如图 2 所示.

2.2 参数整定

电厂球磨机负载控制系统负荷对象模型 $G(s) = \frac{0.5}{(50s+1)^3} e^{-90s}$ 的 PID 控制器为 $K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{0.1 T_D s + 1} \right)$, 利用 Z-N 法求出 3 个需要调节的参数分别为: $K_P = 1.44$; $T_I = 310$; $T_D = 77.5$.

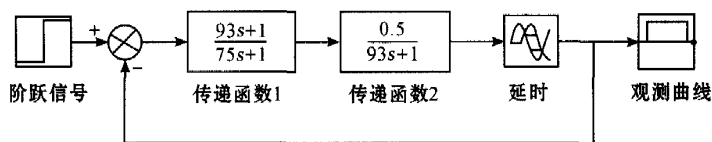


图2 IMC-PID 的仿真模型

Fig. 2 IMC-PID simulation model

PID 控制器的仿真曲线如图 3 所示. IMC-PID 模型为 $G_M(s) = \frac{0.5}{1+93s}e^{-155s}$, 由式(5)~式(8)可得出 $G_{IMC}(s) = \frac{1+93s}{1+\lambda s}$, 其时间常数 $\lambda=75$.

IMC-PID 控制器的仿真曲线如图 4 所示.

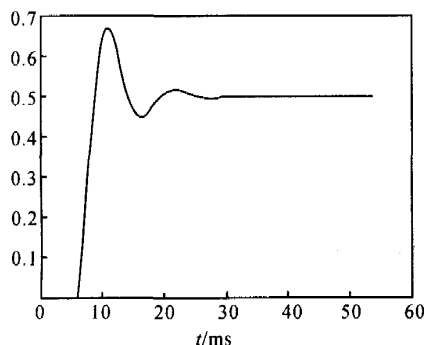


图3 PID 控制器仿真曲线

Fig. 3 Cruve of simulation of PID-controller

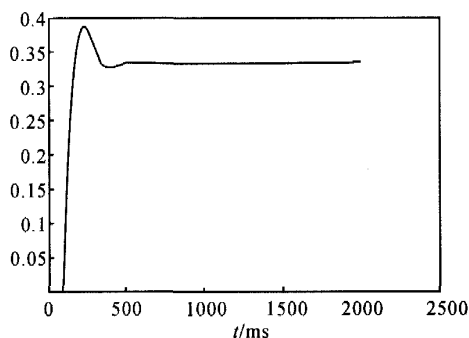


图4 IMC-PID 控制器仿真曲线

Fig. 4 Cruve of simulation of IMC-PID controller

2.3 仿真说明

对单纯 PID 控制器先进行仿真, 给模型输入一个单位阶跃信号, 然后观察该模型的控制能力和仿真曲线.

对 IMC-PID 控制器的仿真方法与 PID 控制器的相同, 可参考图 2 的仿真模型进行仿真.

2.4 仿真结论

从图 3 和图 4 可以看出, 对于大滞后大惯性系统, 单纯的 PID 控制, 3 个参数的调节比较复杂, 而且效果也不理想. IMC-PID 控制的动态响应比单纯 PID 控制要好, 而且只需要调节设定一个时间常数, 所以调整时间相应减少, 其动态品质和鲁棒性较好.

参考文献:

- [1] 邵惠鹤. 工业过程高级控制[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1997.
- [2] 刘红军, 韩璞, 孙海蓉, 等. 基于内模控制的 PID 控制器的设计[J]. 计算机仿真, 2005, 22(3): 207-210.
- [3] 王树青. 先进控制技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [4] 谭功全, 陈永会. 内模控制器的一种简单设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2002, (1): 11, 15.
- [5] 高东杰, 谭杰, 林红权. 应用先进控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [6] 王笑, 钟伟勋. 基于 IMC 的 PID 控制器的设计实现[J]. 计算机仿真, 2005, 22(8): 80-82.
- [7] 王东风, 王剑东, 韩璞, 等. 基于内模原理的 PID 控制器参数整定[J]. 华北电力大学学报, 2003, 30(4): 42-46.
- [8] 刘蓉, 吕震中. 基于内模 PID 控制的球磨机负荷控制系统的设计[J]. 电力设备, 2005, 6(1): 30-33.

Application and simulation of IMC-PID controller in time delay inertial system

YAN Xing-hua, WANG Qin-ruo, ZENG Yong-rong

(Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China)

Abstract: PID parameter-control has achieved in lots of fields in the industrial proceeding control, however, as the request of the control system improve, and the control object changed, PID could not present as satisfy as demand. In view of insufficient intensity control over the PID in the time delay inertial system, we compare the combination of IMC and PID cascade control with it in this article and simulation in the MATLAB. Along with robust and anti-interference, IMC-PID is not only easier adjusted in speed and tuned in parameter, but also it rarely relies on the parameter of the model. So it can be applied to many projects.

Key words: robust; PID; internal model control (IMC); simulation; time delay inertial system