

二自由度内模控制抗扰及鲁棒性分析

喻晓红¹, 刘永春², 张修军³

(1. 成都大学电子信息工程学院, 成都 610106 2 四川理工学院自动化与电子信息学院, 四川 自贡 643000

3. 成都大学信息科学与技术学院, 成都 610106)

摘要: 文章针对生产过程中常见的对象不精确及扰动或参数波动等情况, 采用 2 自由度内模控制结构进行系统设计。通过内模前馈控制器及反馈滤波器设计来探讨内模控制结构如何有效提高控制系统的抗扰及鲁棒性能。然后使用 Matlab 仿真工具, 实例设计反馈滤波器并在 simulink 下进行系统仿真, 结果表明该二自由度内模结构设计方法可行, 控制性能好, 合理的滤波系数可保证系统具有良好的抗扰及鲁棒性能。

关键词: 内模控制; 反馈滤波器; 抗扰性; 鲁棒性

中图分类号: TP273

文献标识码: A

工业过程往往具有频繁扰动, 参数波动以及模型失配等特点。针对此类系统, 不仅要求控制具有良好的跟踪及准确性能, 同时要求系统具有良好的鲁棒及抗扰性能。内模控制 (MC) 因为对模型精度要求低, 在线调节方便、鲁棒性强的特点^[1], 近年来得到了快速的发展。

内模控制与常规反馈控制的主要区别是在结构上控制器内部包含了对象模型, 从而使存在模型失配及扰动时的鲁棒性能与模型准确, 无扰动时的跟踪性能可以独立进行分析和设计。跟踪性能的分析与设计等价于开环控制问题, 因而设计简单直观, 响应性能与时滞无关, 可应用于大时滞系统。

二自由度控制结构可独立调节跟踪性和鲁棒及抗扰性, 前馈控制器的设计使用常规内模控制设计方法, 而反馈滤波器的设计主要满足鲁棒及抗扰性能, 并对二自由度鲁棒及抗扰性能进行分析。此外, MC 因其调节参数少, 且物理意义清楚, 调整方针明确等优点使 MC 逐渐成为工业控制的主要手段, 引起了国内外的广泛关注。

1 内模控制

1.1 内模控制结构

内模控制基本结构框图如图 1 所示。

其中 r, u, y 分别为给定输入、控制量和输出, d 为干扰输入, P 为实际控制对象, P_M 为对象模型, Q 为内模

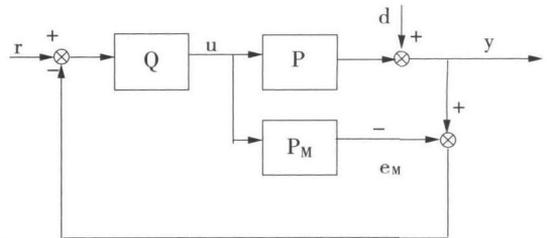


图 1 内模控制基本结构图

前馈控制器。因此, 此内模控制结构的系统闭环输入、输出方程为:

$$u = \frac{Q}{1 + Q(P - P_M)}(r - d) \tag{1}$$

$$y = \frac{QP}{1 + Q(P - P_M)}(r - d) + d \tag{2}$$

1.2 内模控制特性

(1) 对偶稳定性

当模型与对象匹配, 即 $P = P_M$ 时, 由 (1) 式、(2) 式可知, 系统相当于开环, 即闭环系统的输出 y 只取决于 MC 系统前向通道的传递函数 $G_K = QP$, 因此, 只要系统的前向通道开环稳定, 即 Q 和 P 稳定, 则闭环总是稳定的, 这就是对偶稳定性。特别是当系统存在非线性、纯滞后等特性时, 大大简化了常规反馈控制系统的稳定性分析。

收稿日期: 2010-02-13

基金项目: 成都大学校级基金资助项目 (2008XJZ105); 四川理工学院校级科研资助项目 (2004ZR007)

作者简介: 喻晓红 (1976-), 女, 四川富顺人, 讲师, 硕士, 主要从事预测控制、智能控制方面的研究。

(2)理想控制特性

对于内模控制器的设计,不考虑模型失配、扰动等因素,先设计出一个理想的控制器,然后再用滤波等调节手段来改善和满足各种性能要求。

当无模型失配时,若设计控制 $Q = P_M$ 且模型 P_M 存在并可实现,则闭环系统输出

$$y = \frac{QP}{1 + Q(P - P_M)}(r - d) + d = \begin{cases} r & \text{设定值扰动下} \\ 0 & \text{外部干扰扰动下} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)表明,在所有时间内,系统输出都等于输入设定值,即 $y = r$ 。这意味着系统对于任何干扰 d 都能消除,实现对参考输入的无偏差跟踪。

(3)稳态无差特性

系统的跟踪误差

$$e = y - r = \frac{1 - QP}{1 + Q(P - P_M)}(r - d) \quad (4)$$

显然,若 $Q(1) = P_M(1)$,则对于阶跃输入和阶跃扰动,稳态偏差 $e(\infty)$ 为零。因此,系统本身具有偏差积分作用,不需要在控制器设计中再引入积分因子。

2 内模控制器的设计方法

2.1 前馈控制器设计

内模控制器 Q 的设计是在考虑没有模型失配及扰动时进行的,因为此时的闭环传递函数为 QP_M ,所以只要使 Q 尽可能成为模型 P_M 的逆就是最佳的控制。目前比较典型的设计方法主要有以下几种:相消法^[2]、 H_2 / H_∞ 优化法^[3]、有限拍法^[4,5]、预测控制法^[6]。

2.2 反馈滤波器的设计

上述各种内模控制器的设计方法的响应快慢都可以直观地进行调整,降低快速性就可减小控制幅值,增加平稳性或鲁棒性。在没有反馈滤波($F_f = 1$)时,只能靠前馈控制器 Q 在三方面性能之间进行折衷;这个系统称为一自由度内模控制系统。如果在反馈通道中引入一个滤波器,则成为二自由度的内模控制,此时系统的设计任务包括了前馈控制器 Q 的设计以及反馈滤波器 F_f 的设计。前馈滤波器按开环进行设计,主要以跟踪性能作为设计目标,配合各种约束以及性能指标条件进行设计,而反馈滤波器的设计则需要考虑模型失配和扰动,并在二者之间进行折衷。适当选取反馈滤波器的结构和参数,可以有效的抑制输出振荡,且可获得所期望的动态性能、抗扰性和鲁棒性。二自由度控制器其结构图如图2所示。

在 Q 的设计时只考虑响应的快速性与控制强度,鲁棒及抗扰性则专门由反馈滤波器 F_f 来实现。

内模控制系统的反馈滤波器 F_f 可采用常用的一阶低通滤波器结构,其离散方程为

$$F_f = \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha \cdot z^{-1}} \quad (0 \leq \alpha < 1) \quad (5)$$

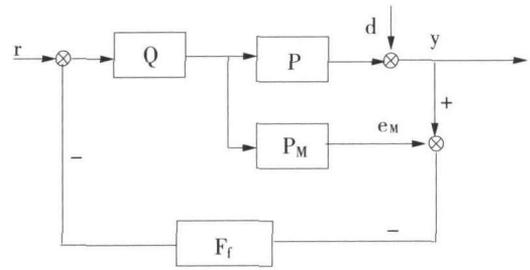


图2 二自由度内模控制结构

3 系统鲁棒性分析

3.1 鲁棒跟踪性

$$e = \frac{1 - F_f Q P_M + (F_f - 1) Q P}{1 + F_f Q (P - P_M)} r + \frac{1 - F_f Q P_M}{1 + F_f Q (P - P_M)} d \quad (6)$$

当 $r = d = \frac{1}{1 - \lambda}$, 即为阶跃信号时,稳态无差条件为:

(1) $\frac{1}{\Delta}$ 稳定(保证闭环鲁棒稳定),其中 $\Delta = 1 + F_f Q (P - P_M)$ 。

(2) $F_f(1) = 1, Q(1)P_M(1) = 1$ 。

当 r, d 为任意信号时,稳态无差条件则为:

(1) $\frac{1}{\Delta}$ 稳定(保证闭环鲁棒稳定)。

(2) $1 - F_f Q P_M$ 和 $F_f - 1$ 包含 r 的不稳定极点。

(3) $1 - F_f Q P_M$ 包含 d 的不稳定极点。

3.2 动态鲁棒性能

系统在无模型失配和扰动下的响应 $y = r Q P_M$ 称为标称响应。系统实际响应为 $y = r Q P_M + (1 - F_f Q P_M) e_m$,其中 $e_m = y - y_m$ 反映出模型失配和扰动。定义敏感性函数 $S = 1 - F_f Q P_M$ 当 S 趋向于 0, y 趋向于标称响应。但是,由于 P_M 是对象的离散采样模型,至少存在一拍采样滞后,因此 S 在 H_2 和 H_∞ 范数下的最小值是 1,且 F_f 取(5)式的结构时,当参数 α 趋向于 1 时, S 可以取得最小值 1,所以,这种形式的 F_f 具有 H_2 和 H_∞ 意义下的最优性。 F_f 对系统鲁棒性的调节规律是: α 越大,则系统克服模型失配和参数波动的能力就越强,但输出响应会变慢,即响应的快速性会变差。

3.3 鲁棒稳定性

对于式(5)形式的 F_f ,无论模型失配有多大,只要对象增益不变号,则增大滤波器参数调节 α (逼近 1),总能使系统稳定^[2]。因此,滤波器参数的选择应综合考虑系统的动态性能,稳态性能及鲁棒性能,使系统综合指标优良。通过反馈滤波器的引入,内模控制的鲁棒稳定得到满足。

4 实例与仿真

考虑常见的一阶惯性对象加纯滞后,即控制对象为:

$$P(s) = \frac{1}{s+1} e^{-0.2s}$$

输入 r 为单位阶跃信号, 在仿真时间 10s 时加一幅值为 0.5 的阶跃扰动。当对象参数发生 20% 变化时, 即实际对象为

$$P(s) = \frac{1.2}{0.8s + 1} e^{-0.24s}$$

前馈控制器使用相消法进行设计, 而反馈滤波器使用一阶滤波器, 取 $\alpha = 0.35$ 。

仿真结果如图 3 所示。其中实线所示为模型精确时的系统响应曲线, 而虚线所示为存在模型失配及扰动时系统的响应曲线。

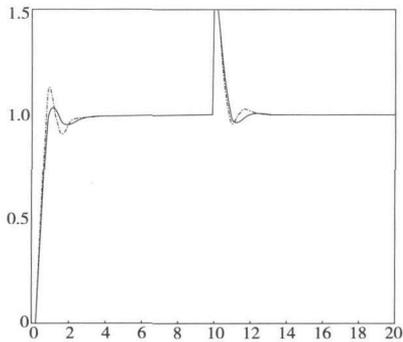


图 3 有模型失配及扰动时响应曲线

可见, 此二自由度内模控制, 合理选用反馈滤波器参数, 可以有效克服系统模型失配及扰动, 系统具有良好的鲁棒及抗扰性能。

5 结束语

本文选用二自由度内模控制方法^[7], 通过选取前馈控制器参数和调节反馈滤波器参数, 可独立调节跟随性和鲁棒及抗扰性。由于采用的只是一阶滤波器,

鲁棒性及抗扰性能的改善非常有限, 因此赵曜^[8]等人提出改进的 MC 结构, 采用频域理论互质分解的方法全面分析了系统的稳定及鲁棒跟踪性能。而有些学者更多的尝试使用多种智能控制方法相结合的形式来提高系统的跟踪及抗扰性能^[9]。本文就一般意义上的二自由度内模结构及其鲁棒与抗扰性能进行了探讨与分析, 仿真结果证明效果较好, 可广泛用于计算机工业生产。

参考文献:

- [1] Garcia C E, Morari M. Internal model control 1. A Unifying Review and Some New Results [J]. &EC Process Des Dev 1982, 21(2): 308-323
- [2] Garcia C E, Morari M. Internal model control 2. Design Procedure for Multivariable Systems [J]. &EC Process Des Dev 1985, 24(2): 472-484
- [3] Aniruddha Datta, James Ochoa. Adaptive Internal Model Control H_2 Optimization for Stable Plants [J]. Automatic, 1998, 34(1): 75-82
- [4] 赵曜. 最少能量有限拍鲁棒控制系统的设计 [J]. 自动化学报, 1993, 19(3): 340-345
- [5] 喻晓红, 杨涛. 二次型最优的有限拍内模控制器设计 [J]. 计算机测量与控制, 2009, (12): 2455-2457
- [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] 牛瑞燕, 赵曜. 智能二自由度内模控制 [J]. 控制理论与应用, 2001, 18(4): 624-628
- [8] 赵曜. 改进型内模控制系统的稳定性与鲁棒跟踪条件 [J]. 控制与决策, 2007, 22(4): 477-479
- [9] 聂志刚, 黄鲁江. 基于 BP 算法的神经网络内模控制器 [J]. 四川理工学院学报: 自然科学版, 2008, 21(3): 85-87.

Analysis of the Ability of Anti-disturbance and Robustness of 2-degree-freedom Internal Model Control

YU Xiao-hong¹, LIU Yong-chun², ZHANG Xu-jun³

(1. School of Electronic Information Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

2. School of Automation and Electronic Information, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China

3. School of Information Science and Technology, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

Abstract A 2-degree-freedom internal model control (MC) system is designed in this paper with the plant imprecision or the parameters fluctuation of disturbance. The analysis of anti-disturbance and robustness is preceded after the design of feed-forward controller and feedback filter. And a simulation for a real system with simulink was made to verify the result. Which shows good performance for this 2-degree-freedom design and offer further prospect of engineering application for the simple controller design and fewer parameters with good ability of anti-disturbance and robustness.

Key words MC; feedback filter; anti-disturbance; robustness