

文章编号: 1001-0920(2002)06-886-04

一类非自衡对象的二自由度 PD 控制

张井岗^{1,2}, 刘志远¹, 裴 润¹

(1 哈尔滨工业大学 控制科学与工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2 太原重型机械学院 自动化系, 山西 太原 030024)

摘 要: 针对一类典型的非自衡过程控制对象, 根据内模控制理论提出一种二自由度 PD 调节器的设计方法。所设计的调节器仅有两个可调参数, 而且被调参数与系统的性能直接相关, 可使系统同时具有良好的目标值跟随特性和干扰抑制特性。仿真结果表明了它的有效性。

关键词: 二自由度控制; PD 调节器; 内模控制; 非自衡对象

中图分类号: TP 13

文献标识码: A

Two-degree-of-freedom PD control for integrator and dead time process

ZHANG Jing-gang^{1,2}, LIU Zhi-yuan¹, PEI Run¹

(1 Department of Control Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2 Department of Automation, Taiyuan Heavy Machinery Institute, Taiyuan 030024, China)

Abstract The design procedure of the two-degree-of-freedom (2DOF) PD regulator for typical integrator and dead time process is proposed based on the internal model control (MC) theory. The designed controller has only two adjustable parameters that are directly related to system performance. Good dynamic response performance of both command tracking and disturbance rejection characteristics can be achieved simultaneously. The simulation results are given to demonstrate the effectiveness of the controller.

Key words: two-degree-of-freedom control; PD regulator; internal model control (MC); integrator and dead time process

1 引 言

在过程控制系统中, 存在一类非自衡对象, 其模型一般包含一个积分环节。这样的控制对象在阶跃扰动的作用下, 其输出不能自动地达到稳定状态, 而是持续地增大或减小。因而, 这类对象的控制难度较大^[1]。针对这类对象的特点, 文献[2]在 Z-N 方法的

基础上给出一种整定 PI 调节器参数的经验公式; 文献[3]给出一种整定 PD 调节器的方法; 文献[4, 5]根据鲁棒控制理论, 给出两种设计 PD 调节器的方法。这些方法所设计的 PD 调节器具有结构简单、稳态性能好、可靠性高等优点, 但都是一自由度控制器, 只能设置一组控制参数, 不具有使系统的目标值跟踪特性和干扰抑制特性同时达到最佳的能力。一

收稿日期: 2001-09-25; 修回日期: 2002-01-07

基金项目: 山西省自然科学基金项目(20001038)

作者简介: 张井岗(1965—), 男, 山西新绛人, 教授, 博士生, 从事智能控制和鲁棒控制及其应用的研究; 刘志远(1957—), 男, 山东益都人, 教授, 从事机器人控制、预测控制的研究。

般来说,若按干扰抑制特性来整定参数,则目标值跟踪特性差;若按目标值跟踪特性来整定参数,则干扰抑制特性差,所以这些PD调节器参数的整定通常采用折中或试凑的办法。这样做一般能满足大多数控制系统的要求,但对于高性能的控制系统则有一定的局限性,难以获得满意的控制效果。文献[6]针对积分时间常数为1的一类非自衡对象提出了一种新型的控制结构,其优点是系统的目标值跟踪特性和干扰抑制特性是解耦的,可以分别优化,但给出的控制器非常复杂,也没有提供相应的整定方法。

本文从内模控制原理^[7,8]出发,针对工业过程控制领域中具有代表性的一类非自衡对象,提出一种二自由度PD调节器的设计方法。所设计的调节器结构简单、参数调整方便,系统的动态性能与调节器参数之间有着单调变化的关系。通过两个可调参数的调整,可使系统同时具有良好的目标值跟随特性和干扰抑制特性。仿真实验证明了它的有效性。此外,所设计的调节器在现有的可编程控制器(PLC)、智能仪表、集散控制系统(DCS)和新型现场总线控制系统中都极易实现,无需增加硬件投资,因而具有较高的工程应用价值。

2 内模控制

内模控制的结构如图1所示。其中, $P(s)$ 为实际被控过程对象; $M(s)$ 为被控过程的数学模型,即内部模型; $Q(s)$ 为内模控制器; $U(s)$ 为内模控制器的输出; r, y, d 分别为控制系统的输入、输出和干扰信号。

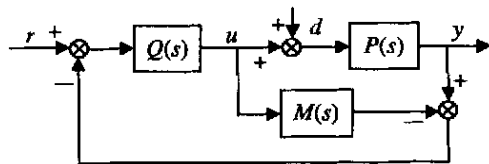


图1 内模控制结构

由图1可得如下关系式

$$Y(s) = \frac{P(s)Q(s)R(s)}{1 + Q(s)[P(s) - M(s)]} + \frac{P(s)[1 - M(s)Q(s)]}{1 + Q(s)[P(s) - M(s)]}D(s) \quad (1)$$

由式(1)可知,当模型精确即 $M(s) = P(s)$ 时,只要 $M(s)$ 和 $Q(s)$ 都是稳定的,那么内模控制系统闭环稳定。在此情况下,如果

$$Q(s) = M^{-1}(s) \quad (2)$$

则

$$Y(s) = R(s) \quad (3)$$

即系统的输出始终等于输入,不受任何干扰的影响。

但是,对于实际的被控过程系统来说,很难建立其精确的数学模型,模型与实际过程之间总有一定的差别。此外,当 $M(s)$ 包含纯滞后环节或具有右半 s 平面的零点时,无法实现式(2)和式(3)所示的理想控制特性。针对实际被控过程的特点,可通过设计内模控制器 $Q(s)$,对系统实现鲁棒控制。内模控制器的设计一般分两步进行:

Step 1: 分解对象模型: 将模型分解为全通部分 $M_+(s)$ 和最小相位部分 $M_-(s)$, 即

$$M(s) = M_+(s) * M_-(s) \quad (4)$$

式中, $M_+(s)$ 包含 $M(s)$ 中的纯滞后环节和右半 s 平面的零点,且

$$|M_+(j\omega)| = 1, \quad \forall \omega \quad (5)$$

$M_+(s)$ 通常具有如下形式

$$M_+(s) = e^{-s\theta} \prod_i \frac{-s + \zeta_i}{s + \zeta_i^*}, \quad \text{Re}(\zeta_i), \theta > 0 \quad (6)$$

其中 H 表示复共轭。

Step 2: 模型误差的鲁棒性设计: 为抑制模型误差对系统的影响,增强系统的鲁棒性,在控制器中加入一个低通滤波器 $F(s)$, 这样由两步设计所得的内模控制器为

$$Q(s) = M^{-1}(s) * F(s) \quad (7)$$

3 二自由度PD调节器的设计

为不失一般性,本文以工业控制领域中具有代表性的一类非自衡过程为对象,给出二自由度PD调节器的设计方法。

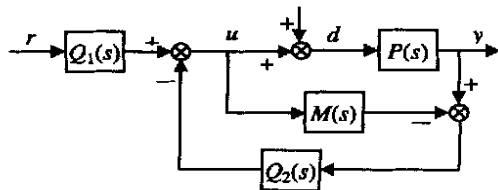


图2 采用内模控制器的二自由度控制系统结构

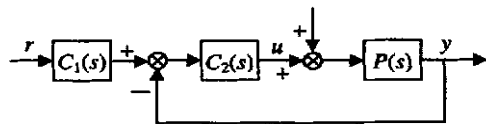


图3 设定值滤波型二自由度控制系统结构

采用内模控制器的二自由度控制系统的结构如图2所示, $Q_1(s)$ 和 $Q_2(s)$ 为二自由度内模控制器。图2可以等效变换为图3所示的设定值滤波型二自

由度控制结构。图3中 $C_1(s)$ 为设定值滤波器, $C_2(s)$ 为调节器,二者构成设定值滤波型二自由度调节器。由图2和图3可得

$$Y(s) =$$

$$\frac{C_1(s)C_2(s)P(s)}{1 + C_2(s)P(s)}R(s) + \frac{P(s)}{1 + C_2(s)P(s)}D(s) = \frac{P(s)Q_1(s)}{1 + Q_2(s)[P(s) - M(s)]}R(s) + \frac{P(s)[1 - M(s)Q_2(s)]}{1 + Q_2(s)[P(s) - M(s)]}D(s) \quad (8)$$

$$C_1(s) = Q_1(s)/Q_2(s) \quad (9)$$

$$C_2(s) = \frac{Q_2(s)}{1 - M(s)Q_2(s)} \quad (10)$$

$C_1(s)$ 和 $C_2(s)$ 可通过设计 $Q_1(s)$ 和 $Q_2(s)$ 得到。

当模型精确,即 $P(s) = M(s)$ 时,有

$$Y(s) = M(s)Q_1(s)R(s) + M(s)[1 - M(s)Q_2(s)]D(s) \quad (11)$$

显然,调整 $Q_1(s)$ 的参数可改变系统的目标值跟踪特性,调整 $Q_2(s)$ 的参数可改变系统的干扰抑制特性。

考虑一类非自衡过程的模型为

$$M(s) = \frac{1}{Ts}e^{-\theta} \quad (12)$$

式中纯滞后项 $e^{-\theta}$ 是个难以解析处理的环节,利用1/1Pade公式对其进行展开,有

$$M(s) = \left(1 - \frac{\theta}{2}s\right) / Ts \left(1 + \frac{\theta}{2}s\right) \quad (13)$$

根据内模控制器设计方法,可得 $Q_1(s)$ 和 $Q_2(s)$ 为

$$Q_1(s) = M^{-1}(s)F_1(s) \quad (14)$$

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{\frac{1}{T}(\lambda^2 \frac{\theta}{2}s + \lambda^2 + 2\lambda\theta + \frac{\theta^2}{2})se^{-\theta}}{(\lambda^2 \frac{\theta}{2}s + \lambda^2 + 2\lambda\theta + \frac{\theta^2}{2})s^2 + [(2\lambda + \theta)\frac{\theta}{2}s^2 + (2\lambda + \frac{3}{2}\theta)s + 1]e^{-\theta}} \quad (22)$$

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{[(2\lambda + \theta)s + 1](1 + \frac{\theta}{2}s)e^{-\theta}}{(\lambda^2 \frac{\theta}{2}s + \lambda^2 + 2\lambda\theta + \frac{\theta^2}{2})s^2 + [(2\lambda + \theta)\frac{\theta}{2}s^2 + (2\lambda + \frac{3}{2}\theta)s + 1]e^{-\theta}} \quad (23)$$

由式(22)和(23)可以看出, λ 对系统的目标值跟踪特性和干扰抑制特性有着决定性的影响。根据内模控制理论, λ 决定着系统的响应速度,并与系统的闭环带宽近似成比例,而且也与系统的鲁棒性直接相关。减小 λ ,系统的动态响应速度加快,鲁棒性变差;增大 λ ,系统的动态响应速度趋缓,但获得了好的鲁棒性。因此, λ 的取值应综合考虑各种性能要求来确定。在本文中,为保证系统的动态稳定性,Pade近似公式引入的误差限制了 λ 取值的下限,这一下限值可根据内模控制系统的鲁棒稳定性条

$$Q_2(s) = M^{-1}(s)F_2(s) \quad (15)$$

$$\text{其中 } M^{-1}(s) = 1/Ts \quad (16)$$

为使系统获得良好的目标值跟踪特性和干扰抑制特性,提出具有如下传递函数的低通滤波器

$$F_1(s) = \frac{(2\lambda + \theta)s + 1}{(\lambda s + 1)^2} \quad (17)$$

$$F_2(s) = \frac{(2\lambda + \theta)s + 1}{(\lambda s + 1)^2} \quad (18)$$

由式(9)~式(18)可得

$$C_1(s) = \frac{(2\lambda + \theta)s + 1}{(2\lambda + \theta)s + 1} \quad (19)$$

$$C_2(s) = \frac{T}{\lambda^2 + 2\lambda\theta + \theta^2/2} \times \frac{(2\lambda + \theta)\frac{\theta}{2}s^2 + (2\lambda + \frac{3}{2}\theta)s + 1}{\left[\frac{\lambda^2\theta/2}{\lambda^2 + 2\lambda\theta + \theta^2/2}s + 1\right]s} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_{IS}} + T_{DS}\right) \frac{1}{T_{fs} + 1} \quad (20)$$

其中

$$K_p = \frac{T(2\lambda + \frac{3}{2}\theta)}{\lambda^2 + 2\lambda\theta + \frac{\theta^2}{2}}, \quad T_I = (2\lambda + \frac{3}{2}\theta) \frac{\theta}{2} \quad (21)$$

$$T_D = \frac{(2\lambda + \theta)\frac{\theta}{2}}{(2\lambda + \frac{3}{2}\theta)}, \quad T_f = \frac{\lambda^2\frac{\theta}{2}}{\lambda^2 + 2\lambda\theta + \frac{\theta^2}{2}}$$

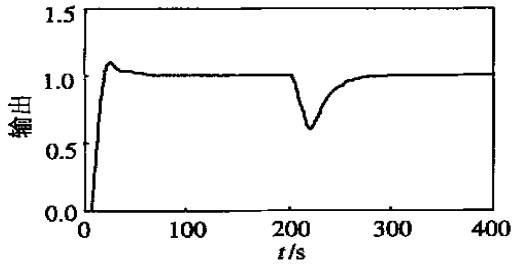
$C_1(s)$ 和 $C_2(s)$ 即为设定值滤波型二自由度PD调节器,它仅有两个需要整定的参数 λ_i 和 λ_o 。

根据式(8),(13)~(21),有

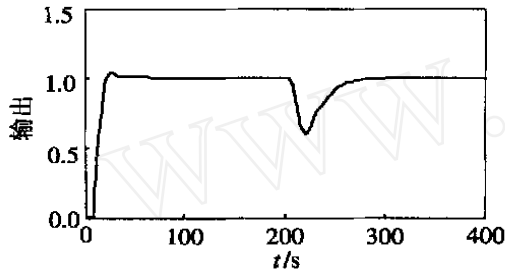
件^[7,8]近似求得。另外,改变 λ_i 可调整系统的目标值跟踪特性,不影响系统的干扰抑制特性,减小 λ_i ,系统的超调量减小。因此,在确定 λ_i 和 λ_o 的取值时,先根据干扰抑制特性和鲁棒性的要求确定 λ_o ,然后再根据目标值跟踪特性的要求确定 λ_i ,这样就可使系统同时获得良好的目标值跟踪特性和干扰抑制特性。在实际过程控制系统中,推荐 λ_o 的取值范围一般在1.0~2.0之间,以使系统具有良好的动态性能和鲁棒性; λ_i 的取值一般应小于 λ_o ,以减小系统目标值跟踪特性的超调量。

4 仿真结果

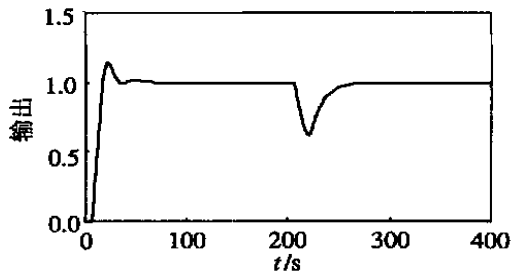
设被控过程对象为 $P(s) = \frac{1}{5s}e^{-7.4s}$, 系统的目标值输入为 $r(t) = 1(t)$, 扰动输入为 $d(t) = -0.2 * 1(t-200)$, 分别选取不同的滤波器 $F_1(s)$ 和 $F_2(s)$ 的参数 λ_1 和 λ_2 , 可获得不同的输出响应特



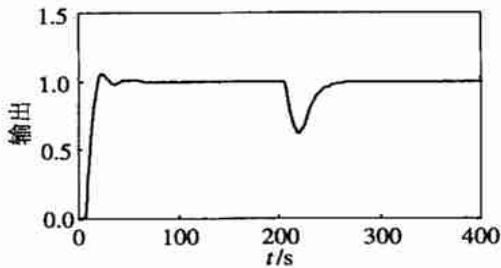
(a) $\lambda_1 = 5, \lambda_2 = 10$



(b) $\lambda_1 = 4, \lambda_2 = 10$



(c) $\lambda_1 = 3, \lambda_2 = 8$



(d) $\lambda_1 = 2, \lambda_2 = 8$

图4 系统的输出响应

性, 如图4所示。

从仿真结果可以看出: 系统的性能与二自由度PD调节器参数之间有着单调变化的关系, 通过改变调节器的两个参数 λ_1 和 λ_2 便可使系统同时具有良好的目标值跟踪特性和干扰抑制特性。另一方面, 由于所提出的二自由度PD调节器是基于内模控制原理设计的, 因而同样具有内模控制的优点, 可使系统获得良好的鲁棒性。

5 结论

本文根据内模控制原理, 针对工业过程控制领域中具有代表性的一类非自衡过程对象系统, 提出一种二自由度PD调节器的设计方法。理论分析和仿真结果表明, 此方法可使系统同时具有良好的目标值跟踪特性和干扰抑制特性, 能够满足高性能控制系统的要求, 而且所设计的调节器结构简单、参数调整方便, 易于实际系统应用。

参考文献(References):

- [1] 金以慧 过程控制[M] 北京: 清华大学出版社, 1993
- [2] Tyreus B D. Tuning PI controllers for integrator/dead time processes[J] *Ind Eng Chem Res*, 1992, 31(10): 2625-2628
- [3] Wang L. Tuning PD controllers for integrating processes[J] *IEE Proc Part D*, 1997, 144(4): 385-392
- [4] 张卫东 一类非自衡对象的PD控制[J] *自动化学报*, 1999, 25(4): 518-523
(Zhang W D. PD control for integrator and dead time processes [J] *Acta Automatica Sinica*, 1999, 25(4): 518-523)
- [5] Zhang W D. Quantitative performance design for integrating processes with time delay [J] *Automatica*, 1999, 35(7): 719-723
- [6] Astrom A J. A new Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead-time [J] *IEEE Trans on Automatic Control*, 1994, 39(3): 343-345
- [7] Zafirion E. Internal model control: Robust digital controller synthesis for multivariable open loop stable or unstable processes[J] *Int J Control*, 1991, 54(3): 665-704
- [8] Vandenrsen J M. Internal model control with improved disturbance rejection [J] *Int J Control*, 1995, 62(4): 983-999