

一种具有设定值加权的 IMC-PID 控制方法

侯明冬,张井岗,赵志诚

(太原科技大学 电子信息工程学院,山西 太原 030024)

摘要:提出了一种具有模糊逻辑设定值加权的内模 PID 控制方法.该方法通过模糊系统的输出在线修正内模 PID 控制器比例作用部分设定值的加权系数及人工调节控制器的滤波器系数,使系统的目标值跟踪特性和干扰抑制特性均得到明显的改善.改进了常规内模 PID 控制的不足,而且控制算法简单、参数调整方便,理论分析和仿真试验研究结果表明了它的有效性.

关键词:模糊逻辑;内模-PID;设定值权系数

中图分类号:TP18 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-4785(2006)02-0084-05

An IMC-PID control method with set-point weight

HOU Ming-dong, ZHANG Jing-gang, ZHAO Zhi-cheng

(College of Electronics and Information Engineering, Taiyuan University Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: A control method performed by a fuzzy logic set-point weight IMC-PID controller is presented. The set-point weight of the proportional part acted on the IMC-PID controller is modified online by intelligent method, and the filter coefficient of a controller is manually adjusted, so the command tracking and the disturbance rejection are greatly improved. The method can also improve the shortcoming of the conventional IMC-PID controller, and its control scheme is simple and the adjustment of control parameters is easy. Theoretical analysis and simulation results show the validity of this control method.

Keywords: fuzzy logic; IMC-PID; set-point weight

内模控制(internal model control, IMC)^[1]是一种设计简单、跟踪调节性能好、鲁棒性强、能消除不可测干扰的先进控制方法.在控制系统的设计过程中,目标值跟踪特性和干扰抑制特性是主要关注的2个问题^[2]. IMC能兼顾控制系统的目标值跟踪特性和干扰抑制特性,且只需整定一个参数.基于内模控制的PID(IMC-PID)^[3]控制器不仅具有IMC控制器的优点,而且它可以得到明确的解析结果,降低PID控制器参数设计的复杂性和随机性.常规的IMC-PID调节器只有一个可调参数,参数整定时一般要在系统的目标值跟踪特性和干扰抑制特性之间进行折中选择^[4].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.当调节使系统取

得好的抗扰性能时,系统跟随性能变坏,而当系统跟随性能比较好时,系统难以取得好的抗扰性能^[5].

文中从内模控制原理出发,提出了一种具有模糊逻辑设定值加权的内模PID控制方法.模糊控制器是一种近年来发展起来的新型控制器,其优点是不要求掌握受控对象的精确数学模型,而根据人工控制规则组织控制决策表,然后由该表决定控制量的大小.将模糊控制和PID控制二者结合起来,扬长避短,既具有模糊控制灵活而适应性强的优点,又具有PID控制精度高的特点^[6-7].文中所提出的调节器结构简单、参数调整方便,系统的动态性能与控制器参数直接相关,通过2个可调参数的调整,可以使系统同时具有良好的目标值跟踪特性、干扰抑制特性和鲁棒性,克服了常规IMC-PID控制的不足,理论分析和仿真实验研究证明了它的有效性.

收稿日期:2006-03-13.

基金项目:山西省青年科学基金资助项目(20021018).

1 IMC-PID 控制器设计

1.1 IMC 控制系统结构

内模控制的基本结构如图 1 所示,等效变换的经典结构见图 2. 图中 $P(s)$ 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.

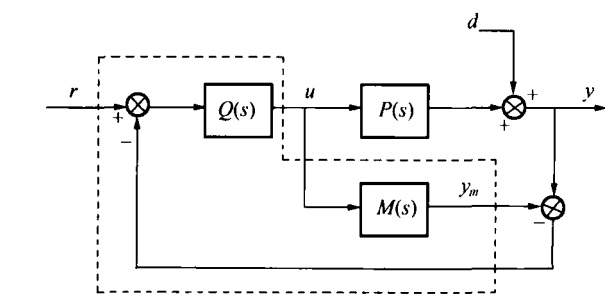


图 1 内模控制结构
Fig. 1 Internal model control structure

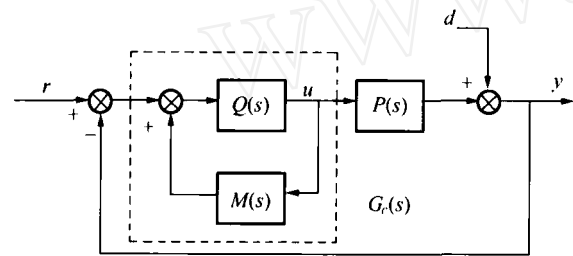


图 2 IMC 结构等效变换为经典控制结构
Fig. 2 The IMC structure equivalent to classical control structure

从图 1 可得到如下关系式:

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

系统的反馈信号为

$$D = [P(s) - M(s)] U(s) + D(s). \quad (2)$$

如果模型准确,即 $M(s) = P(s)$, 且没有外界扰动,即 $D(s) = 0$, 则模型的输出 Y_m 与过程的输出 Y 相等, 此时反馈信号为零. 这样在无模型不确定性和无未知输入的条件下, 内模控制系统具有开环结构.

1.2 基于 IMC 的 PID 控制器设计

通常内模控制器的设计过程如下^[8]:

1) 把模型分解为全通部分 $M_+(s)$ 和最小相位部分 $M_-(s)$, 即

$$M(s) = M_+(s) \cdot M_-(s), \quad (3)$$

式中: $M_+(s)$ 包含 $M(s)$ 中的纯滞后时间和右半 s 平面上的零点, 且对任意 ω 有 $|M_+(j\omega)| = 1$. 通常, $M_+(s)$ 具有如下形式:

$$M_+(s) = e^{-s} \prod_{i=1}^n \frac{-s + \sigma_i}{s + \sigma_i} \quad \text{Re}(\sigma_i) > 0$$

式中: σ_i 表示复共轭.

2) 模型误差的鲁棒性设计

为抑制模型误差对系统的影响, 增加系统的鲁棒性, 在控制器中加入一个低通滤波器 $F(s)$, 一般 $F(s)$ 取最简单的形式:

$$F(s) = \frac{1}{(s + 1)^r}. \quad (4)$$

式中: 阶次 r 取决于 $M_-(s)$ 的阶次以使控制器可实现, r 为时间常数.

这样 2 步设计所得的内模控制器为

$$Q(s) = M_-(s)^{-1} F(s). \quad (5)$$

由图 1、图 2 可得等价的反馈控制器 $G_c(s)$ 和内模控制器 $Q(s)$ 之间有如下关系:

$$G_c(s) = \frac{Q(s)}{1 - Q(s) M(s)}. \quad (6)$$

式中: $G_c(s)$ 为所求的 IMC-PID 控制器.

此处, 以工业控制领域中最具代表性的一阶惯性加纯滞后系统为例, 从内模的角度来设计 PID 控制器. 考虑一阶惯性加纯滞后系统的模型为

$$P(s) = \frac{K e^{-s}}{T_s s + 1}. \quad (7)$$

式中: 纯滞后项 e^{-s} 是个难以处理的环节, 利用一阶 Pade 近似对它进行展开:

$$P(s) \approx K \frac{1 - \frac{T_s}{2}s}{(T_s s + 1) \left(1 + \frac{T_s}{2}s \right)}. \quad (8)$$

由式(3)、(5)、(6)和(8)得 IMC-PID 控制器为

$$G_c(s) = \left[\frac{1}{K} \right] \frac{0.5 T_s^2 s^2 + (T_s + 0.5) s + 1}{(s + 0.5) s}. \quad (9)$$

用 $(T_s + 0.5)/(T_s + 0.5)$ 乘以上式, 可得 PID 参数为

$$K_P = \frac{T_s + 0.5}{K(T_s + 0.5)}. \quad (10)$$

$$T_I = T_s + 0.5. \quad (11)$$

$$T_D = \frac{T_s}{2 T_s + 1}. \quad (12)$$

与常规 PID 控制器参数整定相比, IMC-PID 仅需要调整比例增益. 比例增益与 T_s 成反比关系, T_s 小, 控制器增益大; T_s 大, 控制器增益小. 参数整定时一般要在系统的目标值跟踪特性和干扰抑制特性之间进行折中选择, 当系统取得好的抗负荷扰动时, 系

统超调量比较大,而当超调量比较小时,系统难以取得好的抗负荷扰动,通过反复试凑才能完成,这正是常规 IMC-PID 控制的不足.

2 IMC-PID-FSW 方法

PID 控制器在时域的标准形式为

$$u(t) = K_P e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau. \quad (13)$$

式中 $e(t)$ 为系统误差, $u(t)$ 为控制变量, K_P 、 K_d 和 K_i 分别为比例增益,微分作用系数和积分作用系数.

因为比例增益 K_P 的增大或减小可明显改善系统响应的超调量和调节时间. 所以为了克服常规 IMC-PID 控制方法的不足, 一个有效的方法就是在控制器的比例作用部分引入设定值加权系数常量 b ($b < 1$)^[9], 将式(13)变为

$$u(t) = K_P e_P(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau. \quad (14)$$

式中 $e_P(t) = by_{sp}(t) - y(t)$. 然而, 利用 IMC-PID 比例部分加固定值加权系数 (IMC-PID-FIX- b) 控制系统, 当其他性能指标达到良好时, 通常导致上升时间增大^[10]. 为此, Visioli 采用二维 (e 和 e_c) 模糊推理方式计算“动态”的 b , 依靠当前的系统误差 $e(t)$ 和误差变化 $e_c(t)$, 来决定加权系数 $b(t)$ 的值, 即由 $b(t) = w + f(t)$ 代替 b , 其中 $0 < w < 1$, $f(t)$ 是模糊推理系统的输出. IMC-PID-FSW- b 方法的控制结构图见图 3. 该模糊机制由输入 $e(t)$ 和 $e_c(t)$ 各 5 个三角形隶属度函数及输出 $f(t)$ 的 9 个三角形隶属度函数组成. $e(t)$ 和 $e_c(t)$ 及 $f(t)$ 的隶属度函数图形分别见图 4、图 5. 在模糊系统中, 分别用量化因子 K_{in1} 和 K_{in2} 及比例因子 K_{out} 把 $e(t)$ 和 $e_c(t)$ 及 $f(t)$ 的隶属函数限定在 $[-1, 1]$. 模糊规则见表 1, 其中, NVB、NB、NM、NS、Z、PS、PM、PB、PVB 分别代表负极大、负大、负中、负小、零、正小、正中、正大、正极大.

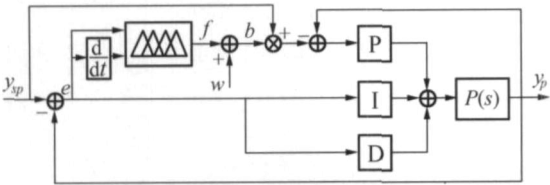


图 3 基于内模的 FSW 方法的控制结构图

Fig. 3 Overall control scheme of the internal model control-PID-fuzzy set-point weight

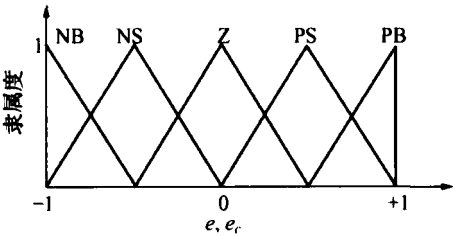


图 4 模糊推理系统输入量 e 和 e_c 的隶属度函数
Fig. 4 Membership functions for the two inputs e and e_c of the fuzzy inference system

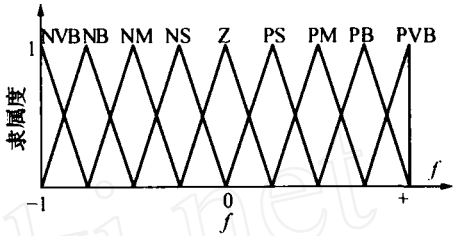


图 5 模糊推理系统输出的隶属度函数
Fig. 5 Membership functions for the output f of fuzzy inference system

表 1 模糊规则

Table 1 Basic rule table of the fuzzy inference system

e	e_c				
	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NVB	NB	NM	NS	Z
NS	NB	NM	NS	Z	PS
Z	NM	NS	Z	PS	PM
PS	NS	Z	PS	PM	PB
PB	Z	PS	PM	PB	PVB

3 仿真实验研究

为验证文中所提出的设计方法的有效性, 下面分别利用 IMC-PID、IMC-PID-FIX- b 、IMC-PID-FSW- b 3 种控制方法, 对以下系统进行仿真研究.

$$G_1(s) = \frac{2}{s^2 + 2s + 2}; \quad n = 1; \quad = 0.2, 0.8. \quad (15)$$

$$G_2(s) = \frac{1}{s(1+s)}. \quad (16)$$

$$G_3(s) = \frac{e^{-Ls}}{Ts + 1}; \quad T = 2, 4; L = 2, 4. \quad (17)$$

$$G_4(s) = \frac{1}{(1 + Ts)^2} e^{-Ls}; \quad T = 1, 10; L = 0.1, 0.4, 0.8. \quad (18)$$

设系统的目标值输入为 $r(t) = 5 \times 1(t)$, 扰动输入为 $d(t) = 1(t)$. 当被控对象的数学模型精确时, 分别用 1.2 节所述方法计算 IMC-PID 参数, 适当调整参数分别代入 3 种方法的控制器. 且选取不同的 b 和 λ 值, 可以获得不同的输出响应特性, 如图 6~9 所示. 表 2、3 给出了这 3 种方法的超调量、上升时间. 同时采用误差绝对值积分方法 (IAE) 比较 3 种方法. 如表 4 所示.

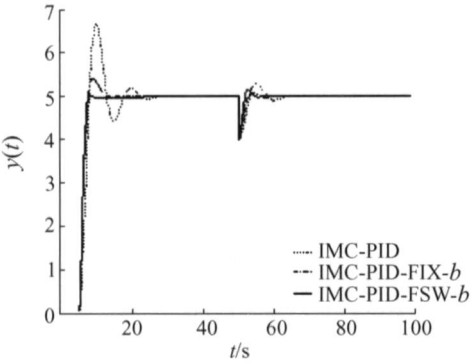


图 6 $\lambda = 0.8$ 时 $G_1(s)$ 的阶跃响应
Fig. 6 Step response for $G_1(s)$, $\lambda = 0.8$

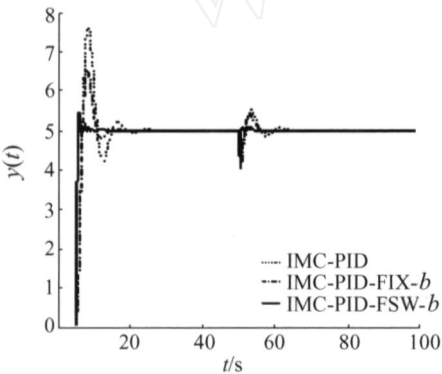


图 7 $G_2(s)$ 的阶跃响应
Fig. 7 Step response for $G_2(s)$

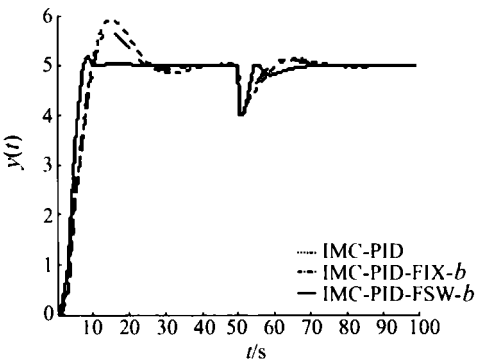


图 8 $T=4, L=2$ 时 $G_3(s)$ 的阶跃响应
Fig. 8 Step response for $G_3(s)$, $T=4, L=2$

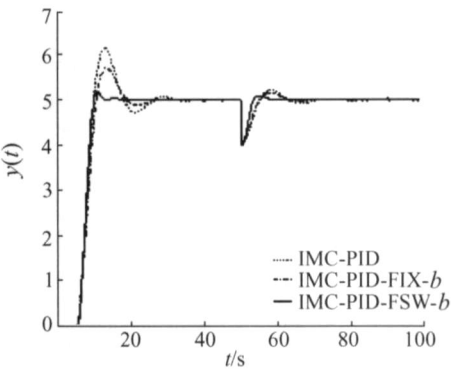


图 9 $T=1, L=0.4$ 时 $G_4(s)$ 的阶跃响应
Fig. 9 Step response for $G_4(s)$, $T=1, L=0.4$

表 2 IMC-PID、IMC-PID-FIX- b 和 IMC-PID-FSW- b 方法的超调值

被控对象 $P(s)$		IMC-PID	IMC-PID-FIX- b	IMC-PID-FSW- b
$G_1(s)$	$\lambda = 0.2$	31	10.2	0
$G_1(s)$	$\lambda = 0.8$	31.8	8.2	1.3
$G_2(s)$		48.6	25.8	0.4
$G_3(s)$	$T=2, L=4$	22.8	1.1	0.6
$G_3(s)$	$T=2, L=2$	11.6	5.6	0.8
$G_3(s)$	$T=4, L=4$	20	11.4	0.5
$G_3(s)$	$T=4, L=2$	18	13.6	4
$G_4(s)$	$T=1, L=0.1$	20	12	1
$G_4(s)$	$T=1, L=0.4$	23.3	14.6	3.2
$G_4(s)$	$T=1, L=0.8$	29.6	19.6	4
$G_4(s)$	$T=10, L=0.1$	46.3	15	5.5
$G_4(s)$	$T=10, L=0.4$	38.4	16.8	2.0
$G_4(s)$	$T=10, L=0.8$	48.5	20.27	4.7

表 3 IMC-PID、IMC-PID-FIX- b 和 IMC-PID-FSW- b 方法的上升时间

被控对象 $P(s)$		IMC-PID	IMC-PID-FIX- b	IMC-PID-FSW- b
$G_1(s)$	$\lambda = 0.2$	2.36	1.82	0.76
$G_1(s)$	$\lambda = 0.8$	3.01	2.68	2.58
$G_2(s)$		1.73	1.82	3.5
$G_3(s)$	$T=2, L=4$	3.25	5.90	4.15
$G_3(s)$	$T=2, L=2$	7	7.80	6.25
$G_3(s)$	$T=4, L=4$	6.05	4.50	3.15
$G_3(s)$	$T=4, L=2$	5.85	6.20	4.24
$G_4(s)$	$T=1, L=0.1$	5.10	5.80	3.02
$G_4(s)$	$T=1, L=0.4$	4.95	5.75	4.82
$G_4(s)$	$T=1, L=0.8$	5.15	5.65	4.92
$G_4(s)$	$T=10, L=0.1$	4.75	4.28	3.50
$G_4(s)$	$T=10, L=0.4$	5.18	3.96	3.62
$G_4(s)$	$T=10, L=0.8$	4.89	3.88	3.52

表 4 IMC-PID、IMC-PID-FIX-*b* 和 IMC-PID-FSW-*b* 方法的 IAE 值

Table 4 The IAE value of three kinds of control methods

被控对象 $P(s)$	IMC-PID	IMC-PID-FIX- b	IMC-PID-FSW- b
$G_1(s)$ $= 0.2$	13.59	6.41	2.46
$G_1(s)$ $= 0.8$	15.92	7.45	3.15
$G_2(s)$	13.70	8.61	5.32
$G_3(s)$ $T=2, L=4$	33.29	24.28	11.25
$G_3(s)$ $T=2, L=2$	29.35	21.05	15.91
$G_3(s)$ $T=4, L=4$	21.60	17.25	10.58
$G_3(s)$ $T=4, L=2$	27.7	25.13	20.15
$G_4(s)$ $T=1, L=0.1$	20.35	18.55	14.12
$G_4(s)$ $T=1, L=0.4$	22.25	16.05	13.75
$G_4(s)$ $T=1, L=0.8$	26.01	20.75	14.16
$G_4(s)$ $T=10, L=0.1$	22.50	18.21	12.51
$G_4(s)$ $T=10, L=0.4$	23.55	18.36	12.25
$G_4(s)$ $T=10, L=0.8$	28.22	17.46	13.29

从 IMC-PID、IMC-PID-FIX-*b*、IMC-PID-FSW-*b* 3 种方法的仿真及对比分析结果,可以看出 IMC-PID-FSW-*b* 方法明显获得了更优解,其既保留了 IMC-PID 方法参数调整方便和鲁棒性强的特点,又克服了 IMC-PID 方法参数整定时要在系统的目标值跟踪特性和干扰抑制特性之间进行折中选择的不足,其控制效果及性能指标均优于 IMC-PID 法和 IMC-PID-FIX-*b* 法。

4 结束语

本文根据内模控制原理,提出了一种具有设定值加权的 IMC-PID 调节器设计方法。理论分析和仿真实验结果表明,这种方法可以使系统同时具有良好的目标值跟随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:

[1] GARCIA C E, MORARI M. Internal model control-1. A unifying review and some new result [J]. Ind Eng Chem Des Dev, 1982, 21(2): 308 - 323.

[2] 张井岗, 李临生, 陈志梅, 赵志诚. 二自由度 PID 调节器的内模整定方法 [J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(1): 27 - 30.

ZHANG Jinggang, LI Linsheng, CHEN Zhimei, ZHAO Zhicheng. IMC tuning of two-degree-of-freedom PID regulator [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002, 23(1): 27 - 30.

[3] RIVERA D E, MORARI M, SKOGESTAD S. Internal model control. 4. PID controller design [J]. Ind Eng Chem Res, 1986(25): 252 - 265.

[4] IAN G H, JEFFERY R A, CHRISTOPHER J G, et al. Improved filter design in internal model control [J]. Ind Eng Chem Res, 1996(35): 3437 - 3441.

[5] ZHANG W D, SUN Y X, XU X M. New two degree-of-freedom smith predictor for processes with time delay [J]. Automatica, 1998, 34(10): 1279 - 1282.

[6] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.

[7] LEE C C. Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller [J]. IEEE Trans Syst, Man, Cybern, 2001 (20): 404 - 435.

[8] 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.

[9] ASTROM K. PID Controllers: Theory, Design and Tuning [M]. New York: ISA, 1995.

[10] Antonio Visioli. Fuzzy logic based set-point weight tuning of PID controllers IEEE Trans Syst, Man, Cybern, Pt A, 1999(29): 587 - 592.

作者简介:



侯明冬, 男, 1980 年生, 硕士研究生, 毕业于太原重型机械学院获工学学士学位。目前从事智能控制的研究及其应用。E-mail: hmdcp @126.com.



张井岗, 男, 1965 年生, 教授, 主要研究方向为鲁棒控制和智能控制及其应用, 主持和完成国家九五攻关项目、山西省自然科学基金项目、山西省青年科学基金项目等研究课题, 发表学术论文 60 多篇, 其中 18 篇分别被 EI、ISTP 收录。



赵志诚, 男, 1970 年生, 讲师, 参加和完成国家九五攻关项目、山西省自然科学基金项目、山西省青年科学基金项目、山西省青年科技开发项目等多项, 发表学术论文 18 篇, 其中 8 篇分别被 EI、ISTP 收录。