

一种基于内模控制的分数阶控制器设计

余艳伟, 徐鹏飞

(河南机电职业学院, 郑州 450000)

摘要: **目的** 为了解决分数阶控制器参数整定复杂问题, 引入内模控制思想, 从而得到分数阶内模控制器控制的被控对象。**方法** 依据最大灵敏度整定所得分数阶内模控制器中的参数, 避免参数整定的盲目性。**结果** 相对于传统的分数阶控制器, 基于内模控制思想设计得到的分数阶内模控制其设定值跟踪及抗干扰性能更优。**结论** 仿真结果表明基于文中方法设计所得的分数阶内模控制器在模型失配时, 仍具有较好的鲁棒性和控制精度。

关键词: 分数阶控制器; 内模控制; 参数整定

中图分类号: TB485.3; TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)05-0048-04

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.05.010

A Design of Fractional Order Controller Based on Internal Model Control

YU Yan-wei, XU Peng-fei

(Henan Mechanical and Electrical Vocational College, Zhengzhou 450000, China)

ABSTRACT: The work aims to introduce the internal model control thought, thus obtaining the objects controlled by the fractional order internal model controller, to solve the problem of fractional order controller parameter setting complexity. According to the parameters in the fractional order internal model controller obtained by the setting of the maximum sensitivity, the blindness of parameter setting was avoided. Compared with the traditional fractional order controller, the set value tracking and anti-interference ability of fractional order internal model control designed based on the internal model control thought were better. The simulation results show that, for the model mismatch of the fractional order internal model controller designed based on the proposed method, it still has better robustness and control accuracy.

KEY WORDS: fractional order controller; internal model control; parameter setting

分数阶微积分是一门研究分数阶导数和分数阶积分的数学分支, 经过几十年的发展得到了国内外众多学者的广泛关注^[1]。科学技术和计算机水平的发展, 也让大家从不同角度对分数阶控制理论进行研究。如分数阶系统辨识^[2]、稳定性分析^[3]、控制器设计^[4]、能观性^[5]、能控性^[6]、系统辨识^[7]、模型近似^[8]等。其中 TAVAZOEI M S^[9]利用分数阶微分模型分析蜂窝纸板式样的粘弹性力, 为研究蜂窝纸板的动态特性奠定基础。王俊等^[4]首先针对分数阶线性定常系统在阶次为 0 到 1 之间, 分别基于不稳定域和广义的线

性矩阵不等式判断系统的稳定性, 并研究了分数阶 CRONE 控制器的控制策略。潘嘹等^[10]其为了给果品减损包装设计提供理论依据, 建立了苹果果柱蠕变的分数阶 Kelvin 模型。单文娟等^[11]在传统 Smith 预估器的基础上结合分数阶 PID 算法得到双自由度 Smith 预估控制器研究纸张定量控制回路中的大时滞控制策略。大量的研究成果也表明分数阶控制器在包装自动化及其控制、运输包装设计领域比传统的整数阶控制器控制性能更好^[12-13]。

文中针对减震包装设计中的复杂控制问题设计

收稿日期: 2017-08-15

基金项目: 河南省科技厅科技发展计划 (152102210098, 172102210125); 河南省教育厅科技攻关计划 (15A470010, 16A410002)

作者简介: 余艳伟 (1980—), 男, 硕士, 河南机电职业学院讲师, 主要研究方向为电子技术、自动化与控制。

一种分数阶控制器。内模控制 (IMC) 作为一种经典的先进控制方法, 其中只有一个待整定参数, 故常和分数阶 PID 控制器结合起来实现控制器参数整定。避免了参数整定的盲目性, 同时降低控制器参数整定的难度和复杂度, 因此, 文中主要从 3 个方面入手设计分数阶控制器。

1 模型降阶处理

1.1 布谷鸟算法

布谷鸟算法^[14]是通过模拟布谷鸟的寄生育雏行为, 同时采用相关的 Levy 飞行搜索机制来有效地求解最优化问题的一种全局随机搜索优化算法。该算法搜索路径简单、寻优能力更强, 比其他群体优化算法更有效。利用其寻优功能可将其用来进行模型降阶处理。为了简化控制器设计, 同时提高控制效果, 可将高阶系统降阶为:

$$M(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{Ts^\alpha + 1} \quad 0 < \alpha < 2, e \approx 2.72 \quad (1)$$

布谷鸟算法应用于模型降阶上的算法流程如下所述。

1) 算法初始化。随机初始化群体 (如鸟巢数量), 搜索维数, 最大迭代次数, 宿主鸟发现外来鸟蛋的概率 P_a , 以及选取适应度函数。文中适应度函数取为:

$$F = \sum_{i=1}^D t(y_m - y) \quad (2)$$

式中: y 为原系统的阶跃响应输出; y_m 为简化模型的阶跃响应输出。根据当前鸟巢位置, 计算对应的适应度值。

2) 按式 (1) 对鸟巢位置进行更新, 确定新一轮鸟巢位置, 并计算对应的适应度值。将 2 次计算得到的适应度值相比较, 较好适应值对应的鸟巢位置替换掉较差的, 从而得到一组较优的鸟巢位置:

$$k_i = [x'_1, x'_2, x'_3, \dots, x'_N]^T \quad N \text{ 为鸟巢, } N=1, 2, 3, \dots, 60$$

3) 设置一个随机数 r 来表示宿主鸟发现外来鸟蛋的可能性, $r \in [0, 1]$ 。每个鸟巢都有属于自己的随机数 r , 比较 r 与 P_a 的大小, 若 $r < P_a$, 则保留所对应的鸟巢位置; 若 $r > P_a$, 则随机改变鸟巢位置, 并比较其适应度值, 选择较小的适应度值所对应的鸟巢位置, 得到一组新的位置:

$$P_i = [x'_1, x'_2, x'_3, \dots, x'_N]^T \quad (3)$$

4) 在 P_i 中找出一个最优的鸟巢位置: $x'_b = [x'_{b1}, x'_{b2}, x'_{b3}, \dots, x'_{bn}]$ (n 为搜索维数, $n=1, 2, 3, 4$), 判断算法是否满足结束条件。若满足结束条件, 则输出所对应的的鸟巢位置 x'_b 及全局最优值 f_{\min} ; 若未满足, 则返回步骤 2), 开始新一轮循环, 直到算法结束。

2 分数阶 IMC-PID 控制器

2.1 分数阶 PID 控制器

分数阶 PID 控制器作为传统整数阶 PID 控制器在分数域内的推广, 其形式为:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu \quad (4)$$

式中: K_p, K_i, K_d 分别为控制器的比例增益、积分、微分时间常数。 λ, μ 分别为控制器的积分与微分阶次, 二者的存在为产生良好的控制效果提供了可能, 但同时存在参数整定困难的缺陷。

为解决分数阶 PID 控制器参数整定困难这一问题, 文中采用经典 PID 反馈控制与内模控制 (IMC) 相结合的控制方案, 推导出基于内模控制思想的分数阶 IMC-PID 控制器。经典的反馈控制框见图 1。

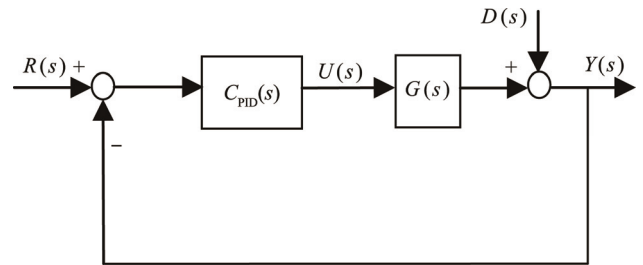


图 1 反馈控制

Fig.1 Feedback control

图 1 中 $C_{PID}(s)$ 为控制器, $G(s)$ 为被控对象, $R(s), U(s), D(s), Y(s)$ 分别为系统输入、控制器输出、输出扰动、系统输出。

内模控制结构见图 2。其中, $G_{IMC}(s)$ 为内模控制器, $M(s)$ 被控系统的数学模型。由图 1—2 可知, $C_{PID}(s)$ 与 $G_{IMC}(s)$ 之间存在的关系为:

$$C_{PID}(s) = \frac{G_{IMC}(s)}{1 - G_{IMC}(s)M(s)} \quad (5)$$

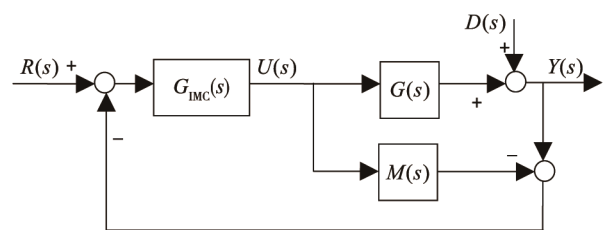


图 2 内模控制结构

Fig.2 Structure of internal model control

设计分数阶 IMC-PID 控制器, 步骤如下所述。

1) 模型分解。

$$M(s) = M_-(s)M_+(s) \quad (6)$$

式中: $M_-(s)$ 为 $M(s)$ 中的最小相位部分; $M_+(s)$ 为 $M(s)$ 中的非最小相位部分。

2) 设计内模控制器 $G_{IMC}(s)$:

$$G_{IMC}(s) = M^{-1}(s)f(s) \quad (7)$$

式中: $f(s)$ 为滤波器, 以保证内模控制器 $G_{IMC}(s)$ 的物理可实现形式:

$$f(s) = \frac{1}{(1+\gamma s)^n} \quad (8)$$

式中: γ 为滤波器的时间常数, n 为滤波器阶次。

3) 分设计数阶 IMC-ID ^{μ} 控制器

针对式 (8), 选择 $n=1$, 将式 (1), (7), (8) 代入式 (5), 考虑到控制器中含有的时滞项不便于实际应用, 因此用一阶 Tyler 近似:

$$e^{-\theta s} \approx 1 - \theta s \quad (9)$$

展开其中的时滞项对控制器进行逼近实现, 得分数阶 IMC-ID ^{μ} 控制器为:

$$C_{ID^\mu}(s) = \frac{(Ts^\alpha + 1)}{K(\gamma + \theta)s} \quad (10)$$

3 分数阶 IMC-PI 控制器参数整定

在工业生产中, 被控系统总是受到环境、时间等因素的影响造成不确定性。基于灵敏度分析的方法是控制理论中分析参数不确定性的主要工具, 灵敏度是表示系统跟踪误差大小的重要指标, 灵敏度越小, 系统跟踪误差就越小, 对应的鲁棒性就越好, 因此文中采用基于最大灵敏度指标 M_s 整定控制器参数。由式 (1), (10) 可得, 系统的开环传递函数为:

$$L(s) = C_{ID^\mu}(s)M(s) = \frac{e^{-\theta s}}{(\gamma + \theta)s} \quad (11)$$

赵志诚等^[15]针对开环传递函数如式 (11) 所示的被控系统给出了一种基于最大灵敏度指标的内模控制器参数整定方法:

$$\gamma = \frac{1.508 - 0.451M_s}{1.451M_s - 1.508} \theta \quad (12)$$

式中: M_s 为最大灵敏度, 定义为:

$$M_s = \max_{0 \leq \omega < \infty} |S(j\omega)| = \frac{1}{1 + L(j\omega)} \quad (13)$$

可根据限定范围的最大灵敏度 M_s (一般情况下, M_s 的取值范围为 [1.2, 2.0]), 确定控制器中的唯一可调参数 γ , 克服了参数选择的盲目性。

4 实例仿真

对文献中的经典高阶系统利用 Matlab 仿真, 选择时间乘误差绝对值的积分性能指标 (ITAE) 与超调 (overshoot) 作为表示系统闭环性能的质量指标并与文献方法进行比较从而验证文中所提分数阶 IMC-PI 控制器设计方法的有效性。考虑以下高阶系统^[16]:

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^5} \quad (14)$$

采用前半部分介绍的模型降阶方法, 对该系统进行模型简约处理见式 (15), 同时取最大灵敏度 $M_s=1.25$, 由式 (12) 计算得 $\gamma=3.2563$ 并设计分数阶 IMC-ID ^{μ} 控制器可得:

$$M(s) = \frac{0.9901e^{-3.1308s}}{0.002s^{1.0544} + 1} \quad (15)$$

$$C_{ID^\mu}(s) = \frac{0.002s^{1.0544} + 1}{0.9901(3.2563 + 3.1308)s} \quad (16)$$

王春阳^[16]针对该系统设计基于继电器反馈的具有阻尼特性的分数阶 FOPI 控制器:

$$C_{PI}(s) = 0.5610 \left(1 + \frac{0.1869}{s^{1.3106}} \right) \quad (17)$$

设系统的设定值输入为 $r(t) = 1(t)$, 输出扰动为 $d(t) = 0.5(t-150)$ 。此时系统的阶跃响应曲线见图 3, 系统的性能指标见表 1。与文中方法相比, 文献^[16]方法在超调较大, 且存在稳态误差, 扰动抑制特性也较差。

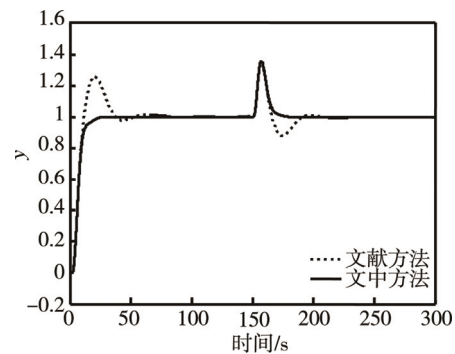


图3 标称系统的单位阶跃响应曲线
Fig.3 The unit step response curve of nominal system

表1 控制系统性能参数
Tab.1 Performance parameter of the control system

方法	标称系统		摄动系统	
	超调/%	ITAE	超调/%	ITAE
文献[16]	26	604.76	25	606.22
文中	0	322.34	0	315.32

同样, 使系统参数发生改变验证系统的鲁棒性:

$$G(s) = \frac{1.1}{(0.8s+1)(0.9s+1)(s+1)(1.1s+1)(1.2s+1)} \quad (18)$$

由图 4 和表 1 可以看出文中方法的鲁棒性优于文献^[16]方法。

假设发生乘性输入不确定性 $\Delta_1 = (s+0.3)/(s+1)$, 输出不确定性 $\Delta_0 = -(s+0.2)/(2s+1)$, 验证系统的鲁棒性。摄动系统谱半径的幅频曲线见图 5。可见, 谱半径曲线的幅值均小于 1, 因此控制系统能够保持良好的鲁棒特性。

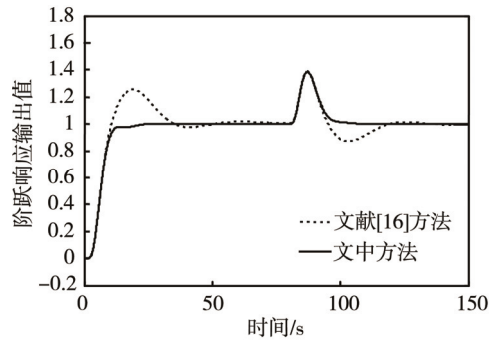


图 4 摄动系统的单位阶跃响应曲线

Fig.4 The unit step response curve of perturbed system

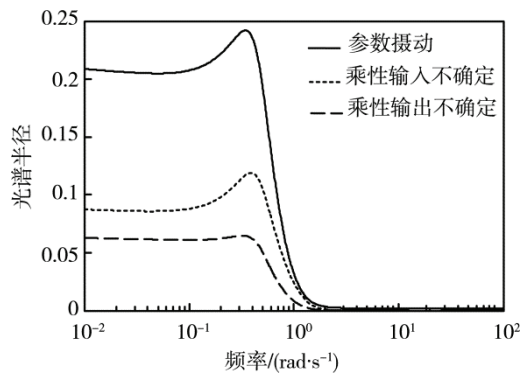


图 5 摄动系统的谱半径幅值曲线

Fig.5 Amplitude curves of spectral radius of perturbed system

5 结语

针对减震包装设计中的复杂控制问题进行了研究。为了减轻控制器设计的难度,首先通过一种新型优化算法对复杂系统进行降阶处理得到其近似的分数阶模型,然后根据内模控制得到分数阶内模控制器,最后为解决参数整定的盲目性,利用最大灵敏度完成控制器的参数整定。仿真结果表明文中方法可以使系统获得良好的动静态性能,同时鲁棒性也能够得到保证。

参考文献:

- [1] 朱呈祥, 邹云. 分数阶控制研究综述[J]. 控制与决策, 2009, 24(2): 161—169.
ZHU Cheng-xiang, ZOU Yun. Summary of Research on Fractional Order Control[J]. Control and Decision, 2009, 24(2): 161—169.
- [2] 李旺. 分数阶系统辨识与控制器设计研究[D]. 北京: 中国科学技术大学, 2010.
LI Wang. Fractional Order System Identification and Controller Design[D]. Beijing: University of Science and Technology of China, 2010.
- [3] TAVAZOEI M S, HAERI M. A Note on the Stability of Fractional Order Systems[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2009, 79(5): 1566—1576.
- [4] 王俊, 周先锋, 温艳华. 分数阶时滞微分系统的能控性判断[J]. 安庆师范大学学报(自然科学版), 2017, 23(1): 45—48.
WANG Jun, ZHOU Xian-feng, WEN Yan-hua. Criterion of Controllability of Fractional Differential Systems with Delay[J]. Journal of Anqing Normal University(Natural Science Edition), 2017, 23(1): 45—48.
- [5] BETTAYEB M, DJENNOUNE S. New Results on Controllability and Observability of Fractional Dynamical Systems[J]. Journal of Vibration and Control, 2008, 14(10): 1531—1541.
- [6] 曾庆山, 冯冬青, 曹广益. 基于分数阶微分方程描述的系统能控性和能观性判据[J]. 郑州大学学报(工学版), 2004, 25(1): 66—69.
ZENG Qing-shan, FENG Dong-qing, CAO Guang-yi. The Controllability and Observability Criteria of Systems Described by Fractional Differential Equations[J]. Journal of Zhengzhou University(Engineering Science), 2004, 25(1): 66—69.
- [7] AOUN M, MALTI R, LEVRON F, et al. Synthesis of Fractional Laguerre Basis for System Approximation[J]. Automatica, 2007, 43(9): 1640—1648.
- [8] TAVAZOEI M S, HAERI M. Rational Approximations in Simulation and Implementation of Fractional Order Dynamics: A Descriptor System Approach[J]. Automatica, 2010, 46(1): 94—100.
- [9] SABATIER J, MOZE M, FARGES C. LMI Stability Conditions for Fractional Order Systems[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2010, 59(5): 1594—1609.
- [10] 潘喙, 卢立新, 王军. 基于分数阶导数的苹果果柱蠕变特性研究[J]. 包装工程, 2011, 32(1): 15—17.
PAN Liao, LU Li-xin, WANG Jun. Creep Properties of Apple Based on Fractional Order Derivative[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(1): 15—17.
- [11] 单文娟, 汤伟, 王孟效, 等. 基于分数阶 PID 的纸张定量双自由度 Smith 预估控制[J]. 包装工程, 2017, 38(11): 143—147.
SHAN Wen-juan, TANG Wei, WANG Meng-xiao, et al. Two-degree-of-freedom Smith Predictor Based on Fractional Order PID Controller in Paper Basis Weight[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(11): 143—147.
- [12] DAS S, PAN I, DAS S, et al. Improved Model Reduction and Tuning of Fractional-order PID Controllers for Analytical Rule Extraction with Genetic Programming[J]. ISA Transactions, 2012, 51(2): 237—261.
- [13] PADULA F, VISIOLI A. Set-point Weight Tuning Rules for Fractional-order PID Controller[J]. Asian Journal of Control, 2013, 15(3): 678—690.
- [14] YANG X S, DEB S. Cuckoo SEARCH VIA LÉVY FLIGHTS[C]// Nature & Biologically Inspired Computing, NaBIC 2009, World Congress on IEEE, 2009: 210—214.
- [15] 赵志诚, 刘志远, 张井岗. 一种时滞过程内模 PID 控制器鲁棒整定方法[J]. 信息与控制, 2010, 39(5): 526—530.
ZHAO Zhi-cheng, LIU Zhi-yuan, ZHANG Jing-gang. A Robust Method of Internal Model PID Controller for Process with Time-delay[J]. Information and Control, 2013, 39(5): 526—530.
- [16] 王春阳. 分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器参数整定方法与设计研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
WANG Chun-yang. Study on Fractional Order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ Controller Parameter Tuning Methods and Design[D]. Changchun: Jilin University, 2013.