

时滞系统的双自由度 Smith 模糊 PID 控制器设计与仿真

孙立强 郑恩让

(陕西科技大学电气与信息工程学院, 西安 710021)

摘 要 针对大时滞系统采用 Smith 模糊 PID 算法控制, 在控制器的输入端加入给定双自由度调节参数, 有效地减小系统动态响应的最大超调量和调节时间, 增强系统的抗干扰能力。通过改进模糊 PID 控制器结构解决控制器参数耦合的问题, 降低了参数整定的难度。仿真研究验证所设计算法的有效性。

关键词 Smith 模糊 PID 控制器 双自由度 时滞系统

中图分类号 TH865 **文献标识码** A **文章编号** 1000-3932(2014)05-0486-04

模糊 PID 控制器是传统的 PID 控制与模糊控制相结合形成的一种智能控制器, 它融合了 PID 控制器不依赖对象数学模型及模糊控制器良好的知识表达能力等优点^[1], 合理地设置控制器的参数能够对大时滞过程取得理想的控制效果。

笔者研究的模糊 PID 控制器改进了文献[2]中模糊 PID 的控制结构, 避免了参数的耦合; 给定输入端增加的比例和微分部分的自由度, 可以有效减小系统动态响应的最大超调量^[3], 减小扰动对系统的影响。仿真结果表明, 笔者设计的控制器改善了输入跟踪响应和扰动响应特性曲线, 并对模糊 PID 控制器的鲁棒性进行了验证。

1 模糊 PID 控制器^①

1.1 模糊 PID 的控制结构

模糊 PID 的控制结构如图 1 所示。以模糊控制器的偏差 $e = r - y$ 和偏差的变化量 \dot{e} 作为控制器的输入, K_e 和 K_d 是输入量化因子, K_u 是输出量化因子。一个二维的模糊控制器等效为 PD 控制器^[1], 要实现 PID 算法, 需要增加积分分量。具体为对模糊控制器的输出 u 分别作积分、比例运算后再求和^[3], 推导过程如下:

$$\begin{aligned} u_e &= \beta_1 u + \beta_2 \int u dt \\ &= \beta_1 (PK_e e + DK_d \dot{e} K_u + \beta_2 \int K_u (PK_e e + DK_d \dot{e}) dt \\ &= K_u (\beta_1 PK_e + \beta_2 DK_d) e + K_u \beta_2 PK_e \int e dt + \\ &\quad K_u \beta_1 DK_d \dot{e} \end{aligned} \quad (1)$$

$$K_{FP} = K_u (\beta_1 PK_e + \beta_2 DK_d) \quad (2)$$

$$K_{FI} = \beta_2 PK_e K_u \quad (3)$$

$$K_{FD} = \beta_1 DK_d K_u \quad (4)$$

式中 K_{FD} ——模糊 PID 的微分增益;

K_{FI} ——模糊 PID 的积分增益;

K_{FP} ——模糊 PID 的比例增益;

β_1 、 β_2 ——比例和积分的组合系数。

由式(2)~(4)可以看出, 模糊 PID 控制的 3 个参数和 β_1 、 β_2 都有关系, 且存在耦合作用。

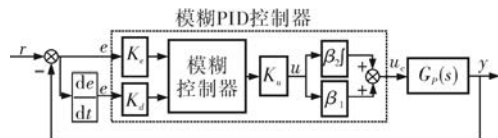


图 1 模糊 PID 控制框图

1.2 改进型模糊 PID 控制器

为了解决上述模糊 PID 控制器的参数耦合问题, 提出如图 2 所示的控制结构, 该模糊控制器是在模糊控制器的基础上构造出一个积分作用与模糊控制器迭加共同构成 PID 控制器。此外, 图 2 还是一个多自由度的模糊 PID 控制器, 在输入端加入调节参数 α_1 、 α_2 和 α_3 , 则:

$$\begin{cases} e_1 = \alpha_3 r - y \\ e_p = \alpha_2 r - y \\ e_D = \alpha_1 r - y \end{cases} \quad (5)$$

① 收稿日期: 2013-10-17

基金项目: 陕西省教育厅项目 (11JK0935); 陕西科技大学博士科研启动基金项目 (BJ10-09)

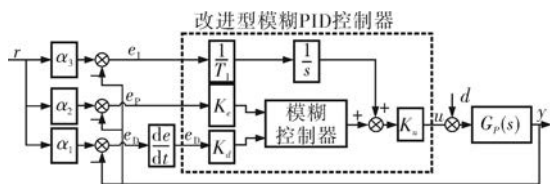


图2 多自由度改进型模糊PID控制结构

通常取 $\alpha_3 = 1$, 模糊PID控制变为双自由度模糊PID控制器, 通过调整 α_1 和 α_2 调节给定的强度, 可以有效地减小动态响应的最大超调量。假设系统的主导极点为 $\sigma + j\omega$, 参数的计算式为^[4]:

$$\alpha_1 = \frac{2|\sigma|}{(\sigma^2 + \omega^2)T_1}, \alpha_2 = \frac{1}{(\sigma^2 + \omega^2)T_1T_D} \quad (6)$$

输入调节参数可以进一步等效为一个输入滤波器 $F(s)/C(s)$, 可以有效地简化控制器的结构(图3)^[5]。输入滤波器的计算公式为:

$$\frac{F(s)}{C(s)} = \frac{1 + \alpha_2 PK_e T_1 s + \alpha_1 DK_d T_1 s^2}{1 + PK_e T_1 s + DK_d T_1 s^2} \quad (7)$$

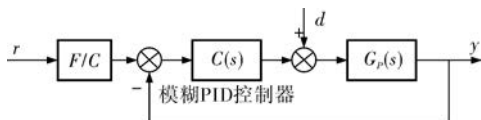


图3 简化等效后的系统框图

为了克服系统的传输延迟加入 Smith 预估器, 假设被控对象 $G_p(s) = G_0 e^{-\tau s} = \frac{K}{1 + Ts} e^{-\tau s}$, 则预估器的数学模型为:

$$G_m(s) = \hat{G}_0 (1 - e^{-\tau s}) = \frac{K}{1 + Ts} (1 - e^{-\tau s}) \quad (8)$$

系统的控制框图如图4所示。

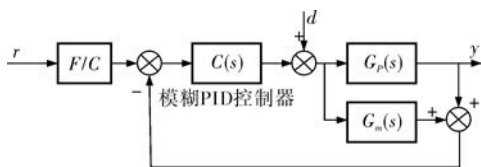


图4 系统控制框图

1.3 模糊控制器设计

笔者采用二维模糊控制器, e, \dot{e} 选择钟形隶属度函数, e 分为3个模糊区间: $N[-1.0, -0.3]$ 、 $M[-0.3, 0.1]$ 、 $P[0.3, 1.0]$, \dot{e} 也分为3个模糊区间: $N[-0.03, -0.01]$ 、 $M[-0.01, 0.01]$ 、

$P[0.01, 0.03]$ 。输出 u 采用三角形隶属度函数, 分为5个隶属度区间 $NB[-1.0, -0.9, -0.8]$ 、 $NS[-0.6, -0.5, -0.4]$ 、 $ZO[-0.1, 0.0, 0.1]$ 、 $PS[0.2, 0.3, 0.4]$ 和 $PB[0.8, 0.9, 1.0]$ 。

模糊控制器采用 Mamdani 推理算法, 相关的推理运算算法为: 蕴含关系→求积、综合算法→取大、清晰化→面积中心法^[6]。

控制器参数整定步骤为:

a. 令 α_1, α_2 和 K_u 均为1, $K_d = 0$, 调整 K_e, T_1 使系统单位阶跃响应曲线收敛振荡;

b. 调节 K_d 和 K_u 值, 调整微分和控制输出强度, 优化系统动态响应;

c. 调整 α_1, α_2 , 进一步减小系统的动态超调量和调节时间;

d. 将输入调节参数等效为输入滤波器, 简化控制器结构。

2 仿真研究

系统仿真对象选为一阶惯性加纯延迟环节:

$$G_p(s) = \frac{8}{5s + 1} e^{-10s} \quad (9)$$

模糊PID控制器的参数 $K_e = 0.27, K_d = 0.25, K_u = 1.5$ 。

为验证输入调节参数 α_1, α_2 的控制效果, 分别在 t 为0.40s时输入单位阶跃信号和 $d=0.2$ 干扰信号, 对比未加输入调节参数控制器和双自由度模糊PID控制器的系统动态响应曲线(图5)。

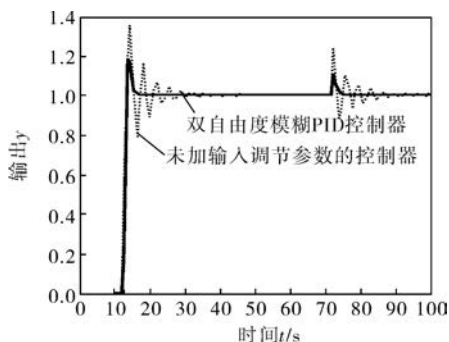


图5 双自由度控制器的动态响应曲线

验证改进型双自由度模糊PID控制器的鲁棒性, 解决实际应用中很难建立精确的对象数学模型的问题, 将对象数学模型的 K, T, τ 分别增加和减小20%^[7], 得到的响应曲线如图6~8所示。

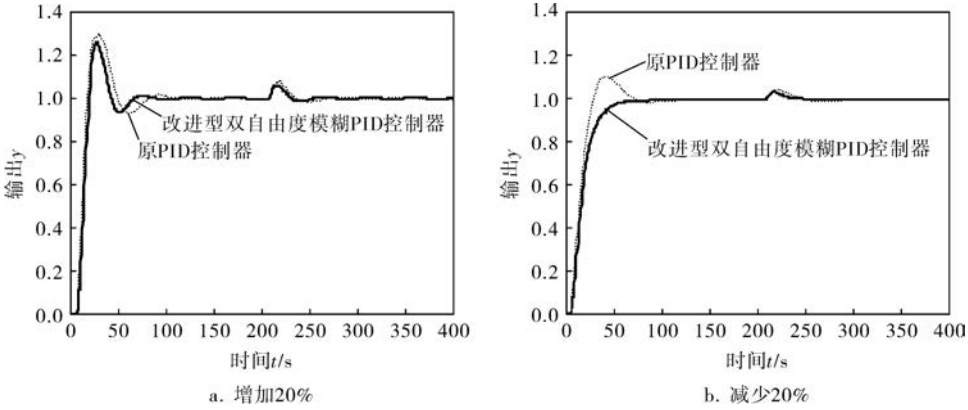


图6 模型参数 K 变化时的响应曲线

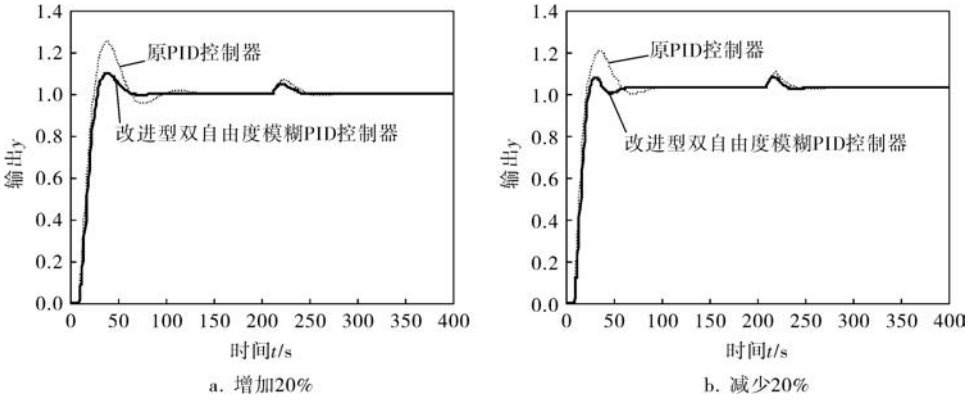


图7 模型参数 T 变化时的响应曲线

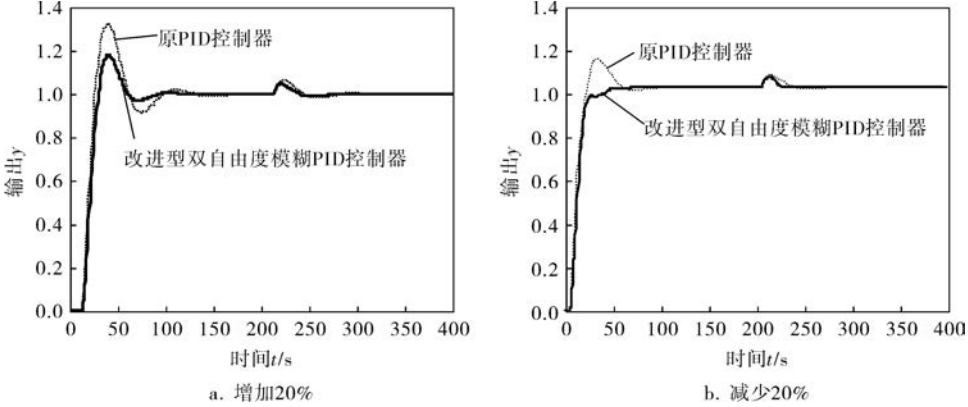


图8 模型参数 τ 变化时的响应曲线

由图5~8可知,未加入输入调节参数控制器的动态响应的最大超调量为40%,双自由度控制器的最大超调量为15%,可见双自由度控制器可以明显减小系统的最大超调量;加入干扰后双自由度控制器能够明显提高系统抗干扰能力,模型失配时,改进型双自由度模糊PID控制器的鲁棒

性优于原控制器。

3 结束语

模糊PID控制器增加双自由度给定调节参数后,减小了系统的最大超调量,系统能够快速达到稳态,提高抗干扰能力。此外,分析解决了控
(下转第523页)

较好的优势。

参 考 文 献

- [1] Kolasa T, Krol D. A Survey of Algorithms for Paper-reviewer Assignment Problem [J]. IETE Technical Review, 2011, 28 (2): 123 ~ 134.
- [2] 骆光馨. 基于反序——杂交算子的改进蚁群算法研究与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- [3] 包宜栋, 杨伟. 智能新算法在无功优化中的应用[J]. 现代电力, 2007, 24(3): 16 ~ 19.
- [4] 任瑞春. 基于排序加权的蚁群算法[D]. 大连: 大连海事大学, 2006.
- [5] Dagdeviren O, Korkmaz I, Tekbacak F. A Survey of Agent Technologies for Wireless Sensor Networks [J]. IETE Technical Review, 2011, 28 (2): 168 ~ 184.

Application of Improved Multi-agent Ant Colony Algorithm in Reactive Power Optimization for Power System

YAO Jian-hong, ZHANG Ling-yu, SUN Da-xing

(Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract Applying multi-agent ant colony optimization algorithm to realize the reactive power optimization in power system was proposed. Its main purpose is to have sorting and weighting-based ant colony algorithm improved and combined with the multi-agent system so as to build a multi-agent ant colony algorithm and then to apply it to the power system. This algorithm can improve convergence speed and calculation accuracy, and avoid falling into local optimal value, as well as converge toward the global optimal solution quickly. Applying it to reactive power optimization in IEEE30 node system verifies the reliability and validity of the algorithm.

Key words multi-agent system, power system, reactive power optimization, ant colony algorithm

(上接第 488 页)

制器参数耦合问题, 降低了系统的参数整定的难度, 整定出的模糊 PID 参数具有良好的鲁棒性。

参 考 文 献

- [1] 李士勇. 模糊控制、神经控制和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.
- [2] Woo Z W, Chung H Y, Lin J J. A PID Type Fuzzy Controller with Self-tuning Scaling Factors [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 115(2): 321 ~ 326.
- [3] Zhang W D. Optimal Design of the Refined Ziegler-Nichols Proportional-Integral-Derivative Controller for Stable and Unstable Processes with Time Delays [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2006, 45(4): 1408 ~ 1419.
- [4] Mantz R J, Tacconi E J. A Regulating and Tracking PID Controller [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 1990, 29(7): 1249 ~ 1253.
- [5] Vijayan V, Panda Rames C. Design of PID Controllers in Double Feedback Loops for SISO Systems with Set-point-filters [J]. ISA Transactions, 2012, 51(4): 514 ~ 521.
- [6] 郑恩让, 王新民. 时滞系统的智能控制方法 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17(12): 2947 ~ 2949.
- [7] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.

Design and Simulation of Smith Fuzzy PID Controller with Double-freedom for Time-delay Systems

SUN Li-qiang, ZHENG En-rang

(College of Electrical and Information Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract Smith fuzzy PID control was applied to time-delay system. Adding double-freedom parameters at controller's input end can reduce both maximum overshoot and accommodation time of the system dynamic response and can enhance anti-jamming capability; improving fuzzy PID controller's structure can decrease the difficulty in parameters setting. Simulation result proves the effectiveness of the algorithm designed.

Key words Smith fuzzy PID, double freedom, time-delay system