

文章编号: 1001-0920(2004)02-0175-04

一种改进的模糊 PD 控制器

苏玉鑫¹, 郑春红², 段宝岩¹

(1. 西安电子科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710071; 2. 中国科学院 沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110015)

摘要: 充分利用非线性跟踪微分器获得高质量微分信号的特性, 将跟踪微分器与传统的简单模糊 PD 控制器相结合, 提出一种简单的高性能的改进的模糊 PD 控制器。该改进模糊控制器的最显著特点是对测量噪声的强鲁棒性和工程易实现性。数值仿真证明了其有效性和高效性。

关键词: 模糊控制; 跟踪微分器; 模糊 PD 控制器

中图分类号: TN 751 **文献标识码:** A

An enhanced fuzzy PD controller

SU Yu-xin¹, ZHENG Chun-hong², DUAN Bao-yan¹

(1. School of Electro-Mechanical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015, China. Correspondent: SU Yu-xin, E-mail: yxsu@mail.xidian.edu.cn)

Abstract: Make full use of the characteristics of nonlinear tracking differentiator (TD) to provide high quality differential signal of the non-continuous measured signal with noise, a simple enhanced fuzzy PD controller is developed by combining the TD with a conventional fuzzy PD controller. The main improvement of the proposed simple enhanced fuzzy PD controller is that it has high robustness against the noise and is easy for engineering implementation. Simulation results show the effectiveness and efficiency of the proposed controller.

Key words: fuzzy control; tracking differentiator; fuzzy PD controller

1 引言

自 Mamdani 与 Assilian^[1] 成功地将模糊控制应用于动力学系统以来, 模糊控制器一直是研究与应用的热点, 是目前工业过程控制中应用最广泛的智能控制方法。随着科技的不断进步, 越来越多的研究者试图通过诸如自适应、自学习和混合控制策略来提高简单模糊控制系统的性能, 并取得了预期的效果, 唯一不足的是算法过于复杂^[2-5]。而在实际工程中, 广泛应用的仍是误差及其变化(微分)的二输入模糊 PD 控制器^[2-5]。对于这样的模糊控制器来说, 由于其微分信号是采用传统的差分方法获得的, 对

于存在测量噪声的工业过程, 这种方法获得的微分信号误差很大, 严重制约了控制系统性能的进一步提高^[5-7]。

韩京清等^[7,8]提出的非线性跟踪微分器(TD), 改变了以往通常采用差分求微分的做法, 所设计的 TD 即使在噪声扰动的情況下, 也能高精度地给出可靠的微分信号, 得到了广泛的应用^[7-9]。本文将 TD 与传统的模糊 PD 控制器相结合, 利用 TD 获得的高质量微分信号提高简单的模糊 PD 控制器的性能。改进型模糊 PD 控制器的主要优点是系统的抗噪声扰动的能力大大增强, 且非常易于工程实现。交

收稿日期: 2002-12-11; 修回日期: 2003-02-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50075065); 陕西省自然科学基金资助项目(2000C22)

作者简介: 苏玉鑫(1969—), 男, 辽宁建昌人, 副教授, 博士, 从事机电控制及自动化的研究; 段宝岩(1955—), 男, 河北冀县人, 校长, 教授, 博士生导师, 从事机电一体化、CAD/CAE 等研究

流伺服系统的数值仿真证明了其有效性和高效性

2 改进型模糊 PD 控制器

改进型模糊 PD 控制器的结构如图 1 所示 它由两个非线性跟踪微分器和一个简单的二输入单输出的模糊 PD 控制器组成

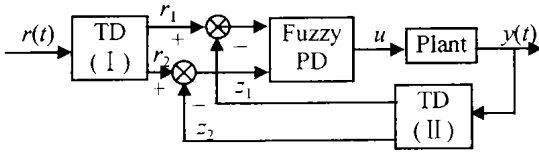


图 1 改进型模糊 PD 控制器结构

2.1 非线性跟踪微分器

所谓非线性跟踪微分器(TD)是指如下一类系统^[7]:对于给定的参考输入信号 $r(t)$, TD 能够提供可靠的高质量的输出信号 $r_1(t), r_2(t), \dots, r_{n+1}(t)$, 并使 $r_1(t) \rightarrow r(t), r_2(t) \rightarrow \dot{r}(t), \dots, r_{n+1}(t) \rightarrow r^{(n)}(t)$.

本文采用的两个 TD 具有如下相同的二阶离散形式(以 TD(I) 为例)^[9]:

$$\begin{cases} r_1(k+1) = r_1(k) + hr_2(k), \\ r_2(k+1) = r_2(k) + hfst(r_1(k) - r(k), r_2(k), \delta, h_0). \end{cases} \quad (1)$$

其中: h 为采样步长, δ 为决定过渡过程快慢的速度因子, h_0 为滤波因子. 非线性函数 $fst(x_1, x_2, \delta, h_0)$ 可表示为

$$fst(x_1, x_2, \delta, h_0) = \begin{cases} \delta \operatorname{sgn}(a), & |a| > d; \\ \delta \frac{a}{d}, & |a| \leq d. \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\operatorname{sgn}(\bullet)$ 为标准符号函数, a 与 d 由下式给出

$$a = \begin{cases} x_2 + \frac{(a_0 - d)}{2} \operatorname{sgn}(y), & |y| > d_0; \\ x_2 + \frac{y}{h}, & |y| \leq d_0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} d = \delta h_0, d_0 = h_0 d; \\ y = x_1 + hx_2, a_0 = \sqrt{d^2 + 8\delta|y|}. \end{cases} \quad (4)$$

对于 TD(II) 来说, 只要用 y 代替式(1) 中的 r , 即可得到 $z_1(t) \rightarrow y(t), z_2(t) \rightarrow \dot{y}(t)$. 非线性跟踪微分器的详细设计过程及相关证明可参见文献[7]

2.2 模糊 PD 控制器

简单模糊 PD 控制器归一化的两个输入误差 e 及其微分 c 可表示为^[2]

$$\begin{cases} e(t) = K_e(r_1(t) - z_1(t)), \\ c(t) = K_c(r_2(t) - z_2(t)), \end{cases} \quad (5)$$

其中 K_e 与 K_c 为量化因子. 控制作用 u 的归一化量化因子为 K_u .

11 个底边长为 0.4 的三角形的隶属函数分别均匀分布在归一化的输入输出论域上. 采用 Zadeh 的 $\min \max$ 推理策略进行模糊推理, 并用标准重心法进行模糊量的非模糊处理输出^[2]. 所应用的归一化控制规则集如表 1 所示

3 数值仿真

为验证所提出的改进型模糊 PD 控制器的有效性, 对工业上常用的带有匹配伺服驱动器的交流伺服电机的位置控制系统进行了数值仿真. 系统框图如图 2 所示. 这类位置控制的交流伺服电机系统可描述为^[9]

表 1 归一化模糊控制规则

u_i^k	c^i										
	-1	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
-1	1	1	1	1	1	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0
-0.8	1	1	1	1	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0	-0.2
-0.6	1	1	1	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0	-0.2	-0.4
-0.4	1	1	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0	-0.2	-0.4	-0.6
-0.2	1	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0	-0.2	-0.4	-0.6	-0.8
0	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0	-0.2	-0.4	-0.6	-0.8	-1
0.2	0.8	0.6	0.4	0.2	0	-0.2	-0.4	-0.6	-0.8	-1	-1
0.4	0.6	0.4	0.2	0	-0.2	-0.4	-0.6	-0.8	-1	-1	-1
0.6	0.4	0.2	0	-0.2	-0.4	-0.6	-0.8	-1	-1	-1	-1
0.8	0.2	0	-0.2	-0.4	-0.6	-0.8	-1	-1	-1	-1	-1
1	0	-0.2	-0.4	-0.6	-0.8	-1	-1	-1	-1	-1	-1

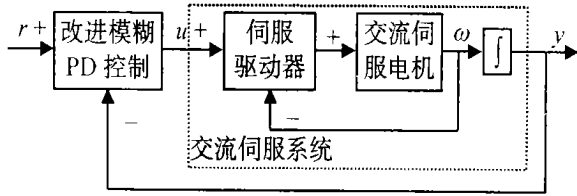


图 2 位置控制的交流伺服系统

$$H(s) = \frac{K_t}{s(sJ + B)} \quad (6)$$

其中: K_t 为转矩常数, B 为阻尼系数, J 为伺服电机转子的转动惯量

采用 M SMA 042A 1G 系列交流伺服电动机及其匹配的交流伺服驱动器 其相关参数为: $K_t = 0.18 \text{ (N} \cdot \text{m)}/\text{A}$, $B = 4.0 \times 10^{-3} \text{ (N/m} \cdot \text{s)}/\text{rad}$, $J = 0.4 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. 采样周期确定为 $T = 10 \text{ ms}$

所采用的两个 TD 具有相同的结构和参数, 其参数为: $R = 150$, $\delta = 10$, $h_0 = 1.5$. 改进型模糊 PD 控制器和一般模糊 PD 控制器具有相同的参数, 以便于性能比较. 经过多次调试, 其参数确定为: $K_e = 10$, $K_c = 0.5$, $K_u = 3$. r_1, r_2, z_1, z_2 的初始状态都为零.

参考输入信号为 $r(t) = \sin(t)$. 假设反馈信号受到幅值为 0.01 的噪声扰动的影响. 分别采用一般的模糊 PD 控制器和改进的模糊 PD 控制器的跟踪误差如图 3 所示.

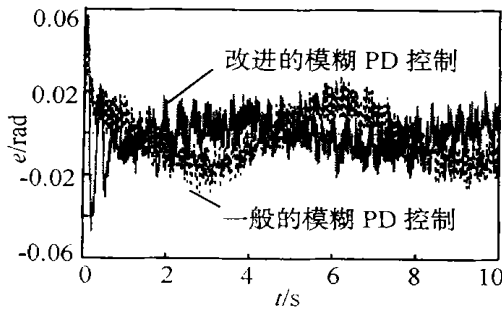
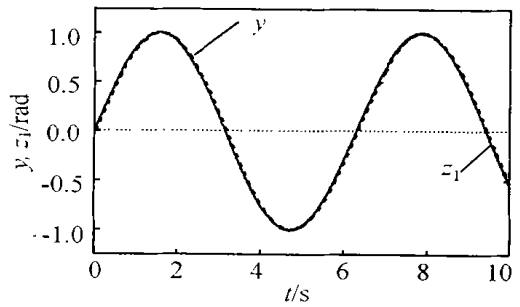


图 3 轨迹跟踪误差比较

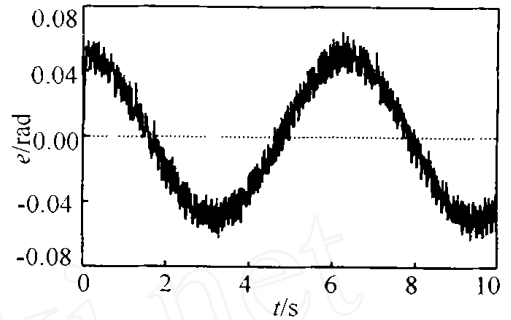
由图 3 可见, 除了刚开始的过渡过程阶段, 改进型模糊 PD 控制器的性能明显优于一般的模糊 PD 控制器. 改进型模糊 PD 控制器的稳态跟踪误差在 $\pm 0.02 \text{ rad}$ 以内, 而一般的模糊 PD 控制器的稳态跟踪误差在 $\pm 0.03 \text{ rad}$ 以内.

在上述仿真过程中, 采用传统的差分方法和所设计的 TD 获得反馈信号的微分分别如图 4 和图 5 所示.

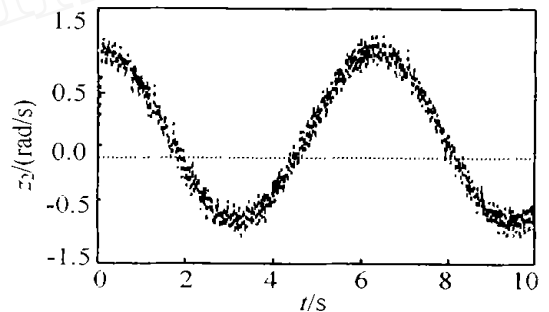
比较图 4 和图 5 可见, 在噪声扰动情况下, 采用所设计的非线性跟踪微分器较传统的反相差分算法



(a)



(b)



(c)

图 4 非线性跟踪微分器的性能

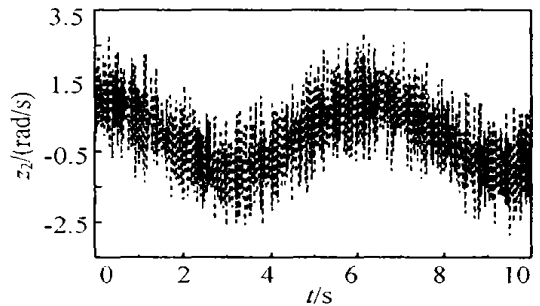


图 5 噪声情况下, 反相差分获得微分信号

能获得质量更高的微分信号. 改进型模糊 PD 控制器良好的稳态跟踪精度正源于此.

4 结 论

在测量噪声情况下, 如何获得高质量微分信号是制约目前大多数工业控制系统的关键因素. 本文采用非线性跟踪微分器与传统的一般模糊 PD 控制

器相结合来提高其控制性能。所提出的改进型模糊PD控制器,最显著的特点是对测量噪声具有很强的鲁棒性,并且算法简单,易于工程实现。对位置控制的交流伺服系统进行数值仿真,证明了其有效性和高效性。

参考文献(References):

- [1] M amdani E H, A ssilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller[J]. *Int J Man-M ach Stud*, 1974, 7(1): 1-13
- [2] Chen G R, Pham T T. *Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic and Fuzz Control Systems* [M]. Boca Raton: CRC Press, 2000
- [3] 王立新. 自适应模糊系统与控制——设计与稳定性分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995
- [4] 苏玉鑫, 段宝岩, 彭勃, 等. 大射电望远镜馈源轨迹跟踪的模糊预测控制[J]. *控制与决策*, 2002, 17(1): 85-88
(Su Y X, Duan B Y, Peng B, et al. Fuzzy predictive coarse tracking control of the feed for the next generation large radio telescope [J]. *Control and Decision*, 2002, 17(1): 85-89.)
- [5] Li W, Chang X G, Jay Farrell, et al. Design of an enhanced hybrid fuzzy P+ D controller for a mechanical manipulator[J]. *IEEE Trans on Syst, Man Cybernetics: Part B*, 2001, 31(6): 938-945
- [6] Liu Xu, Bin Yao. Output feedback adaptive robust precision motion control of linear motors[J]. *Automatica*, 2001, 37(7): 1029-1039
- [7] 韩京清, 王伟. 非线性跟踪-微分器[J]. *系统科学与数学*, 1994, 14(2): 177-183
(Han J Q, Wang Wei. Nonlinear tracking-differentiator [J]. *J Syst Sci & Math Scis*, 1994, 14(2): 177-183.)
- [8] 韩京清, 侯增广. 利用跟踪微分器构造未知函数的寻优器及求根器[J]. *控制与决策*, 2000, 15(3): 365-367.
(Han J Q, Hou Z G. Tracking differentiator approaches for solving optimization problems and finding roots of algebraic equations[J]. *Control and Decision*, 2000, 15(3): 365-367.)
- [9] Su Y X, Duan B Y, Zhang Y F. Robust precision motion control for AC servo systems [A]. *The 4th World Congress on Intelligent Control and Automation* [C]. Shanghai, 2002. 3319-3323
- [4] Hennigsen A. Model reference Adaptive control and adaptive stability augmentation[A]. *Proc of the Fourth IFAC Int Symposium on Adaptive System in Control and Signal Processing* [C]. Grenoble, 1992. 323-328
- [5] Makoudi M, Radouane L. A robust model reference adaptive control for non minimum phase systems with unknown or time-varying delay[A]. *Automatica*, 2000, 36(7): 1057-1065
- [6] Nagger A, Dumont G A, El Shafei A L. Adaptive control with direct delay estimation[A]. *Control System 92* [C]. Canada: Chateau Whistler Resort Whistler, 1992. 13-17.
- [7] Manitius A Z, Olbrot A W. Finite spectrum assignment problem for systems with delays[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1979, 24: 541-553
- [8] Ichikawa K. *Control System Design Based on Exact Model Matching Techniques* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1986
- [9] Ortega R, Lozano L. Globally stable adaptive controller for system with delay[J]. *Int J of Control*, 1988, 47(1): 17-23
- [10] Doyle J C, Franos B A, Tancnbaum A R. *Feedback Control Theory* [M]. New York: Macmillan Publishing Company, 1991.
- [11] Ioannou P A, Sun J. *Robust Adaptive Control* [M]. New Jersey: PTR Prentice-Hall, 1996

(上接第 174 页)