

新型二阶系统自调整模糊 PD 控制器

郑伟勇, 李艳玮

(河南工程学院 计算机学院, 河南 郑州 451191)

摘 要: 提出一种新型的自调整模糊比例微分控制器(NST-FPDC)以提高相应的控制精度. 利用模糊控制原理在控制过程中实时调整控制器的比例及微分参数, 实现了输出比例因子(SF)实时调节. 此外, 采用了一种简单的经验法则对控制变量的误差进行定义和归一化变换, 使控制器的闭环增益连续变化. 仿真结果表明: NST-FPDC 的超调量和上升时间等关键性能均优于现有控制器的 10% 以上, 部分性能则远优于其他控制器, 验证了 NST-FPDC 的优越性及有效性.

关键词: 模糊比例微分控制器; 自调整模糊逻辑控制器; 比例因子; 实时增益变化

中图分类号: TP13

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2015)12-0085-05

A New Self-tuning Fuzzy Proportional-derivative Controller for High-order System

ZHENG Wei-yong, LI Yan-wei

(College of Computer, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China)

Abstract: To improve corresponding control precision, this paper presents a new self-tuning fuzzy proportional-derivative controller (NST-FPDC) with real-time adjusting its proportional-derivative parameters, which realize the real-time adjustment of output scaling factor (SF). Moreover, a simple heuristic rule is defined on the normalized change of error of the controlled variable in order to make continuous variation in the close-loop gain. As a Tested result, the overshoot, rise time and other key performances of NST-FPDC are superior to more than 10% of the existing controllers, and some performances far better other controllers, which clearly verify the superiority and effectiveness of NST-FPDC.

Key words: fuzzy proportional-derivative controller; self-tuning FLC; scaling factor; real-time gain variation

1 引言

对于传统的模糊逻辑控制器中, 模糊比例微分控制器(FPDC)和模糊积分控制器(FPIC)应用最为广泛^[1], 但是 FPIC 与传统非模糊比例积分(PI)控制器一样, 虽然能够应用于大多数的控制系统, 但当其用于开环、不稳定、非线性及积分等系统时, 其性能很难达到理想的效果. 然而, 对于上述系统来说, FPDC 却能表现出令人满意的性能^[2], 因而其实际应用也较为广泛. 现有关于 FLCs 的诸多文献表明, 相关研究主要是围绕如何提高 FLCs 的性能及其鲁棒性等进行, 同时各种控制参数自调整 and 自组织的

FLCs 也被广泛报道^[3]. 此外, 研究人员在 FLCs 的设计过程中, 还发现了神经网络和遗传算法的应用能够提高控制器性能, 并使其满足严格的性能指标^[4], 增加了模糊逻辑控制器的研究和应用潜力.

在不同的采样时刻, 设计的鲁棒自调整模糊比例微分控制器(RST-FPDC)均能通过调节增益因子 α 在线调节输出的比例因子^[5]. 为此, 提出了一种新型的自调整模糊 PD 控制器(NST-FPDC), 对模糊比例微分控制器(FPDC)进行改进, 仅使用了 25 个控制规则就能定义模糊规则, 从而减少设计的复杂程度和计算负担. 同时 NST-FPDC 的输出放大因子(SF)可以利用误差归一化变化值(如 Δe_N)和隶属

收稿日期: 2015-02-23; 修回日期: 2015-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(61379079)

度函数(MFs)个数定义的单启发式关系进行连续的修正,其中误差归一化变化值 Δe_N 由控制过程中的动力学系统确定.此外,NST-FPDC 通过对若干不同死区时间的非线性、积分和非最小相位系统进行仿真测试获得其关键闭环性能,并将结果与传统的 FPDC 和非模糊 PID 控制器等进行比较和分析.

2 NST-FPDC 的控制原理

提出了一种自调整比例微分模糊逻辑控制器(NST-FPDC),其控制方框图如图 1 所示.

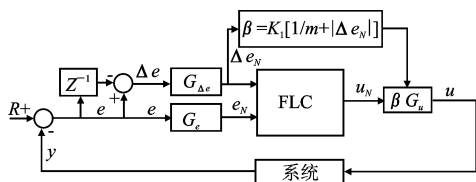


图 1 NST-FPDC 的控制方框图

从图 1 中可以看出,与传统模糊控制器相比,NST-FPDC 采用输出比例因子 SF 来辅助修正控制器的输出,同时比例因子 SF 可通过控制系统中模糊逻辑控制器(FLC)的自调整机制进行修正.其中, βG_u , e 和 Δe 分别是 NST-FPDC 的有效增益、输出误差及相对误差.

2.1 隶属度函数和规则库

控制器的输入(R)、误差(e 和 Δe)和输出(u)的隶属度函数(MFs)被定义到正规化区间 $[-1, 1]$,且相同对称三角形(两端除外)的 MFs 被考虑^[6],用于控制器输出计算的规则库如图 2 所示.

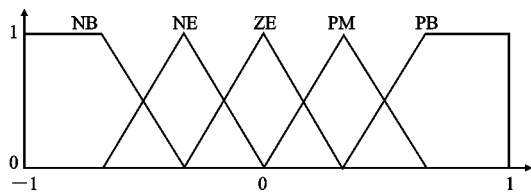


图 2 e_N 、 Δe_N 和 u_N 的隶属度函数(MFs)

规则库设计采用滑模控制原理,控制器输出 u 利用规则库确定^[7],如表 1 所示.

表 1 计算输出 u 的规则库

$\Delta e/e$	NB	NM	ZE	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	ZE
NM	NB	NB	NM	ZE	PM
ZE	NB	NM	ZE	PM	PB
PM	NM	ZE	PM	PB	PB
PB	ZE	PM	PB	PB	PB

2.2 比例因子(SFs)

输入和输出变量缩放用于定义 e_N 、 Δe_N 和 u_N 到区间 $[-1, 1]$ 上,比例因子的 G_e 、 $G_{\Delta e}$ 及 G_u 与自调整 FLC 输入 / 输出变量之间的关系如下: $e_N = G_e \cdot e$; $\Delta e_N = G_{\Delta e} \cdot \Delta e$; $u = (\beta \cdot G_u) \cdot u_N$. 其中 β 为输出比例因子 G_u 的在线增益修正参数,其后发式关系定义:

$$\beta = K_1 [1/m + |\Delta e_N|] \quad (1)$$

式中, m 为 Δe_N 的模糊划分数,取 $m = 5$; K_1 为确定 β 变化范围的常数,反过来通过适当调节 G_u 来提高闭环响应.根据大量对非线性及高阶系统大范围仿真研究的经验, K_1 的值被考虑为 4.传统 PD 控制器(FPDC)和 NST-FPDC 之间的不同点在于 FPDC 仅仅使用 G_u 获取控制器的输出,然而 NST-FPDC 的输出则使用有效的比例因子 SF,与之不同的是 NST-FPDC 需要 49 个模糊自调整规则. β 可以通过式(1)定义的单模型独立非模糊关系进行在线计算^[8].

2.3 自调整策略

NST-FPDC 的有效增益是 βG_u ,而不仅是传统 FLC(FPDC)中的 G_u .此外,NST-FPDC 不需要任何的规则库或者任何与自调整相关的推论,且修正因子 β 需要在每一个采用时刻都进行修正^[9].如图 3 所示. FPDC(固定增益 $\beta=1$)和 NST-FPDC(可变增益)的控制曲面(控制器输出 u 相对于变量 e 和 Δe)分别被详细描述.

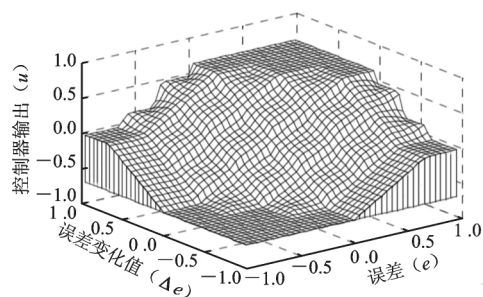
通过图 3 可以看出,NST-FPDC 的控制曲面比 FPDC 要平滑.由于控制曲面的平滑度限制了驱动器的速度及能够避免震颤问题,因而好的平滑度在实际应用中具有重要的意义.并且注意到 β 不以任何方式依赖于任何的过程参数,而依赖于过程的瞬态稳定.不同于 RST-FPDC, NST-FPDC 仅使用 25 个控制规则,不需要其他任何的增益修正因子 β 自调整规则库,因而更加简化其设计过程.

3 仿真实验

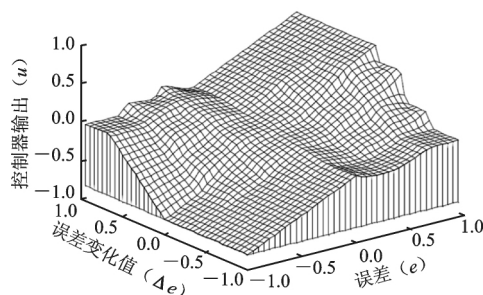
通过对不同二阶非线性、不稳定和积分系统进行仿真实验以评估 NST-FPDC 的性能,并与 FPDC、RST-FPDC 及非模糊 PID 控制器(包括 Ziegler-Nichols 和 Tyreus-Luyben 设置)的性能进行比较.

3.1 二阶非线性系统

对于绝大多数的工业控制系统来说,一阶的线性控制系统已不能满足实际生产对控制精度的要



(a) 传统 FLC(FPDC)的控制曲面



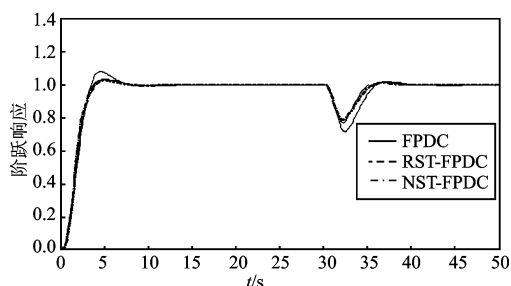
(b) 自调整 FLC(NST-FPDC)的控制曲面

图3 控制曲面比较

求,这就使得高阶系统得到广泛的应用^[10]. 这里提出一种常规的二阶系统并对其进行性能分析:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 0.3y \frac{dy}{dt} = u(t-L) \quad (2)$$

在式(2)所示的系统中,死区时间分别取 $L=0.2, 0.3, 0.4$,在不同死区时间的情况下,当 $t=30\text{ s}$ 时施加负载扰动. 式(2)所示的二阶系统对于 NST-FPDC、RST-FPDC 和 FPDC 的响应特性如图4所示.

图4 二阶系统的阶跃响应($t=30\text{ s}$)

通过仿真获得的各种性能指标如表2所示.

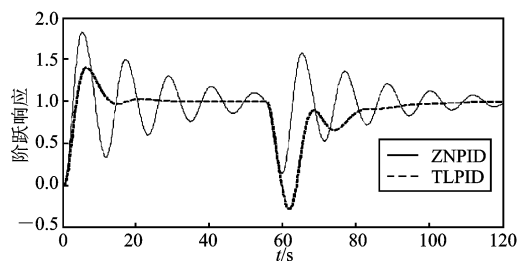
图5所示为在 $t=50\text{ s}$ 时施加负载扰动情况下,传统的 Ziegler Nichols (ZN) 和 Tyreus Luyben (TL) PID 控制器对系统(2)的响应.

如图4和图5所示,本文提出的新型控制器性能要明显优于其他两种控制器. 根据表2可知, NST-FPDC 在不同死区时间的条件下,其各项性能与 FLC 相差并不大,但要明显优于 RST-FPDC、

表2 二阶非线性系统(2)的性能比较

L	控制器	%OS	t_s	t_r	IAE	ITAE
0.2	ZNPID	82.77	88.00	1.60	26.90	343.02
	TLPID	40.43	24.30	2.30	4.85	27.77
	RST-FPDC	8.27	6.70	2.10	3.08	20.31
	NST-FPDC	3.33	6.70	2.10	2.62	15.52
	FPDC	2.9	6.00	2.10	2.62	14.47
0.3	RST-FPDC	9.49	6.30	2.00	3.05	20.74
	NST-FPDC	2.1	5.60	2.00	2.54	15.16
	FPDC	1.4	4.40	2.30	2.59	14.11
0.4	RST-FPDC	11.77	6.20	1.80	3.04	21.63
	NST-FPDC	1.17	3.00	1.80	2.85	16.16
	FPDC	1.36	5.80	1.70	2.60	15.11

ZNPID 和 TLPID,例如当死区时间为 0.2 s 时,不同控制器的超调量分别为 82.77% 、 40.43% 、 8.27% 、 3.33% 和 2.9% . 上述数据表明 NST-FPDC 对于二阶非线性系统来说,具有较好的控制性能及适用性. 特别是对于 ZNPID 和 TLPID 两种控制器来说, NST-FPDC 的优异性能更加显著.

图5 二阶系统的阶跃响应($t=50\text{ s}$)

3.2 非最小相位系统

上述只针对简单的二阶系统进行分析及对比,不能够完全体现 NST-FPDC 的优异性能,因此本节提出一种相对复杂的非最小相位系统进行分析,其数学表达式如下:

$$G_P(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{(s^2 - 1)} \quad (3)$$

式(3)描述的系统为一个开环不稳定系统,该系统为倒立摆系统的简化和线性化模型. 图6所示为系统(3)对 NST-FPDC、RST-FPDC 及 FPDC 的响应,在 $t=7\text{ s}$ 和 $t=30\text{ s}$ 时施加脉冲负载扰动分别如图6(a)和图6(b)所示(死区时间分别取 $L=0.0$ 和 0.1).

通过分析图6和表3可知,提出的 NST-FPDC 与传统的 RST-FPDC 和 FPDC 相比,其性能指标完全能够满足要求. 从表3中的结果中可以看出,在两

种不同死区时间的情况下, NST-FPDC 的性能 %OS, t_s , t_r , IAE 及 ITAE 均明显优于 RST-FPDC 和 FPDC, 但当死区时间为 0 时, NST-FPDC 的上升时间等于其他控制器的上升时间。

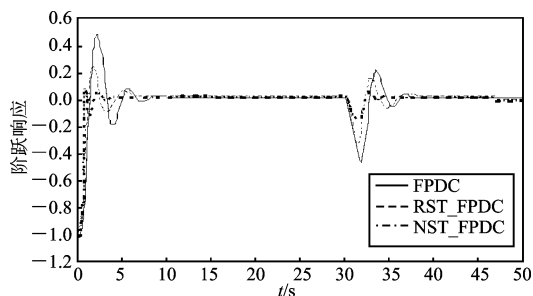


图 6 非最小相位系统的阶跃响应 ($L=0.1, t=50\text{ s}$)

表 3 非最小相位系统(3)性能比较

L	控制器	%OS	t_s	t_r	IAE	ITAE
0.2	FPDC	14.78	2.00	1.00	0.95	1.93
	RST-FPDC	6.02	1.90	1.00	0.90	2.30
	NST-FPDC	1.10	0.80	1.00	0.59	0.87
0.1	FPDC	47.12	7.50	1.50	3.05	36.72
	RST-FPDC	23.18	8.50	1.30	2.20	27.55
	NST-FPDC	6.90	2.60	0.90	1.13	9.33

3.3 二阶积分(SOI)系统

将在死区时间 (L 取 $0.2 \sim 0.5$) 范围较大的情况下, 分别考虑 NST-FPDC 对两种不同二阶积分系统的控制效率和控制精度。其中, 式(4)为纯二阶积分系统, 用 SOI-1 表示; 式(5)为通用二阶积分系统, 用 SOI-2 表示。

$$\text{SOI-1: } G_P(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{s^2} \quad (4)$$

$$\text{SOI-2: } G_P(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{s^2(s+1)} \quad (5)$$

首先对纯二阶积分系统进行仿真, 图 7 所示为在设定值变化和负载扰动 ($t=30\text{ s}$) 条件下, 系统 SOI-1 系统的响应 (死区时间 $L=0.5$)。此外, 在相同的扰动和设定值条件下, 将系统的死区时间设定为 0.2 到 0.5, 然后对 SOI-1 系统的阶跃响应进行仿真, 其具体的仿真结果如表 4 所示。

通过比较表 4 中各项性能指标可以看出, NST-FPDC 与传统的 FPDC 和 RST-FPDC 相比, 其各项性能指标均得到显著的提高, 并且死区时间越大的情况下, 性能指标的提高就越明显。此外, 当死区时间为 0.4 时, NST-FPDC 的性能指标要由于其他死

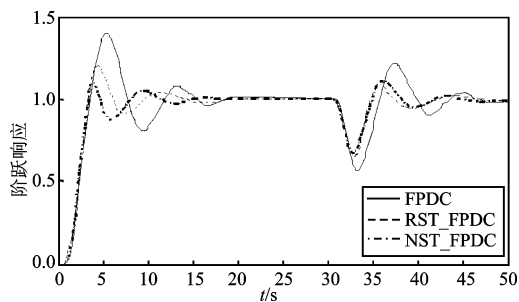


图 7 二阶积分系统(SOI-1)的阶跃响应 ($L=0.5, t=30\text{ s}$)

区时间的性能。

表 4 式(4)中二阶纯积分系统的性能比较

L	控制器	%OS	t_s	t_r	IAE	ITAE
0.2	FPDC	26.20	11.80	2.20	4.65	58.76
	RST-FPDC	10.65	11.50	2.20	3.76	43.59
	NST-FPDC	10.18	10.20	1.80	3.44	38.29
0.3	FPDC	30.14	14.00	2.10	4.89	64.61
	RST-FPDC	11.78	10.7	2.00	3.65	44.95
	NST-FPDC	8.08	9.30	1.80	3.33	38.25
0.4	FPDC	34.68	14.50	2.00	5.49	75.13
	RST-FPDC	14.56	14.00	1.90	3.88	46.44
	NST-FPDC	5.66	7.80	1.60	3.47	39.50
0.5	FPDC	40.24	17.60	1.90	6.30	92.00
	RST-FPDC	20.39	16.80	1.80	4.17	50.02
	NST-FPDC	10.42	13.30	1.60	4.03	46.50

对 SOI-2 系统进行仿真, 具体的方法与 SOI-1 系统相同。最后, NST-FPDC 对 SOI-2 系统的阶跃响应 ($L=0.5, t=30\text{ s}$) 如图 8 所示。

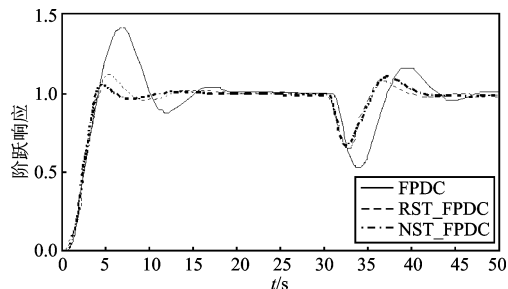


图 8 二阶积分系统(SOI-2)的阶跃响应 ($L=0.5, t=30\text{ s}$)

由图 7 所示, 在高死区时间 ($L=0.5$) 时, NST-FPDC 的性能相对 FPDC 来说得到明显的提高, 并性能也要优于 RST-FPDC。从图中可以看出, NST-FPDC 阶跃信号响应的超调量明显小于其他两种控制器, 并且在相同冲击扰动的作用下, NST-FPDC 同样显示出很好的抗干扰性能。在不死区时间下获

得的仿真结果如表 5 所示.

表 5 式(5)中二阶纯积分系统的性能比较

L	控制器	%OS	t_s	t_r	IAE	ITAE
0.0	ZNPID	70.56	119.7	6.6	23.98	706.05
	TLPID	37.57	82.4	8.9	15.53	325.75
0.2	FPDC	14.51	8.4	2.7	4.07	44.88
	RST-FPDC	40.2	8.1	2.7	3.35	30.5
	NST-FPDC	4.25	7.6	2.6	3.18	27.13
0.3	FPDC	19.40	11.4	2.6	4.53	54.85
	RST-FPDC	4.09	7.4	2.6	3.42	32.93
	NST-FPDC	4.31	7.6	2.5	3.28	29.49
0.4	FPDC	25.11	12.6	2.6	5.51	73.91
	RST-FPDC	7.09	10.9	2.6	3.87	39.43
	NST-FPDC	3.53	7.5	2.3	3.60	32.31
0.5	FPDC	31.16	16.7	2.6	6.85	106.59
	RST-FPDC	11.94	11.6	2.6	4.46	49.94
	NST-FPDC	4.36	6.2	2.2	4.02	40.6

对表 5 中的指标分析比较可知,NST-FPDC 在不同死区时间的情况下,其性能指标均要优于 FPDC 和 RST-FPDC,并远远优于 ZNPID 和 TLPID 的性能.例如,当死区时间为 0.5 s 时,控制器 FPDC、RST-FPDC 和 NST-FPDC 的超调量分别为 31.16%,11.94% 和 4.36%,而上升时间则分别为 16.7 s、11.6 s 和 6.2 s.此外,从表 5 中还可以看出,死区时间对 NST-FPDC 的性能影响要小于其他两种控制器.例如,当死区时间处于 0.2~0.5 s 时,NST-FPDC 超调量的相对变化(最大值与最小值之比)小于 1.3,而 RST-FPDC 和 FPDC 的相对变化则分别大于 9.8 和 2.1.综上所述,NST-FPDC 不仅性能指标优于其他控制器,而且还具有较好的鲁棒性及稳定性.

4 结束语

提出了新型二阶系统自调整模糊控制器(NST-FPDC),与传统自调整模糊控制器相比较,NST-FPDC 不仅设计过程中仅有少数的模糊规则,而且对非线性、不稳定和积分等系统的控制精度也要高得多.此外,一个容易实现的无模型启发式关系被提

出,用于通过输出 SF 在线调节的 NST-FPDC 的连续增益修正.对不同类型二阶系统(包含一个不稳定系统)的仿真结果表明,几乎在所有情况下,本文提出的 NST-FPDC 的性能比传统的模糊和非模糊控制器均得到全面显著的提高.此外,NST-FPDC 对负载扰动的抑制作用也很明显,这对于控制器的实际应用具有很重要的意义.

参考文献:

- [1] 罗梅,贾志娟.模糊自适应参数调整的改进遗传算法[J].微电子学与计算机,2010,27(4):1-4.
- [2] 陈建强,徐洪泽.基于迭代学习的 PID 控制器在直流电机控制中的应用[J].微特电机,2013,41(2):38-41.
- [3] 王述彦,师宇,冯忠绪.基于模糊 PID 控制器的控制方法研究[J].机械科学与技术,2011,30(1):166-172.
- [4] 李瑞,刘明生,李燕.基于 MATLAB 的模糊 PID 控制器的设计与研究[J].科技创新与应用,2013(29):33-34.
- [5] 张向锋,李言俊.红外成像导引头模糊 PD 控制器设计与仿真[J].弹箭与制导学报,2011,31(3):35-36.
- [6] 于晓敏,于晓坤,耿蕊. PID 控制器参数优化算法的仿真研究[J].计算机仿真,2011,28(7):212-215.
- [7] 潘海迪,吴向前.基于混合粒子群算法的多变量解耦控制器优化[J].计算机仿真,2013,30(8):319-322.
- [8] 呼文豹,郭锐锋,王志成.基于专家 PID 控制器的伺服系统速度控制研究[J].计算机工程与设计,2013,34(7):2372-2376.
- [9] 郭德彪,陈卫兵,王金燕,等.基于非线性类 PID 算法的控制器优化过程仿真[J].计算机仿真,2013,30(5):341-344.
- [10] 石晓斐,宫辰,谷朝臣.未知初始条件下连续时滞二阶系统的识别[J].计算机应用与软件,2012,29(8):193-195.

作者简介:

郑伟勇 男,(1978-),硕士,讲师.研究方向为模式识别与软件工程.

李艳玮 女,(1980-),硕士,讲师.研究方向人工智能与计算机应用. E-mail:zhengwy78@126.com