

doi: 10.7690/bgzd.2013.06.019

电动平台单缸控制器设计及仿真

赵玉龙, 梁建民, 孙方义, 刘志星, 鲁祖坤
(空军航空大学军事仿真技术研究所, 长春 130022)

摘要: 为解决电动平台实际运行中控制系统受参数变化和负载波动而导致电动缸性能变差的问题, 提出一种基于模糊自适应 PID 控制系统的设计方法。将模糊自适应理论引入电动平台系统控制中, 对单电动缸伺服系统进行建模仿真, 并在 Matlab 的模糊逻辑工具箱中建立仿真模型, 并进行仿真分析。实际使用结果表明: 模糊自适应 PID 控制器在改善被控过程的动态性能、稳态性能和抗干扰能力等方面明显优于 PID 控制, 且控制器设计简单, 易于工程实现, 大大提高平台的控制精度, 完全满足飞行训练技术指标要求。

关键词: 电动平台; 模糊自适应; 电动缸; PID
中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

Design and Simulation of Electric Platform Single Cylinder Controller

Zhao Yulong, Liang Jianmin, Sun Fangyi, Liu Zhixing, Lu Zukun

(Military Simulation Technology Research Institute, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to solve the actual operation of the electric platform control system parameter variations and load fluctuations lead to poor performance of the electric cylinder, put forwards a method based on fuzzy adaptive PID control system. Introduce the fuzzy adaptive theory into the electric platform control system. Carry out the modeling and simulation for the single electric cylinder servo system, the simulation model created by Matlab fuzzy logic toolbox, and then take the simulation analysis. The results show that the use of fuzzy adaptive PID controller to improve the dynamic performance of the controlled process, the steady-state performance and anti-interference is obviously superior to the PID control, and the controller is simple and easy for engineering implementation, improving the control precision greatly, meet the technical requirements of flight training.

Key words: electric platform; fuzzy adaptive; electric cylinder; PID

0 引言

六自由度电动平台是为飞行模拟器提供瞬时过载, 逼真在线真实飞行动感的重要设备, 现有文献对六自由度运动平台研究大多停留在机构理论研究^[1], 在控制策略方面研究依然薄弱。笔者针对六自由度运动平台强耦合、强噪声扰动等特点, 设计了基于模糊推理自整定的模糊自适应 PID 控制器, 使得系统只需实时查询预先设定好的参数整定表控制操作, 能够在线地调整 PID 的 3 个参数, 使系统具有较强的实时性、抗干扰性和较好的跟踪精度。

1 六自由度电动平台总体设计

1.1 机构设计

系统对电动平台的实时位置进行数据采集, 经数据接口将实时数据传送给控制计算机, 计算机经过数据解算, 模拟实时接收飞行方程解算出的与控制运动装置有关的各种信息, 并通过控制算法对信息进行处理, 经 D/A 变换、前置滤波、伺服放大后成为电动缸的输入信号, 从而驱动电动平台完成预

定的轨迹, 其工作原理如图 1。

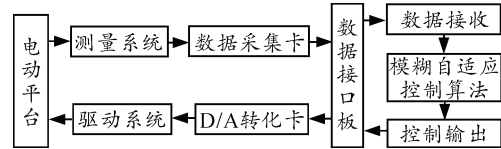


图 1 电动平台机构工作原理

1.2 控制器设计

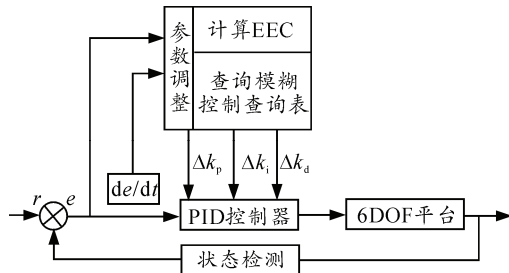


图 2 控制器结构框图

六自由度电动平台模糊自适应 PID 控制器为基于误差驱动的增益调整型控制, 由 PID 控制器和模糊控制器 2 部分组成。为减少在线计算量, 模糊控制器采用查询表方式工作, 整个模糊自适应 PID 控

收稿日期: 2012-12-22; 修回日期: 2013-01-04

作者简介: 赵玉龙(1988—), 男, 内蒙古人, 在读硕士, 从事飞行模拟器六自由度电动平台的精确控制研究。

制器的结构框图如图 2^[2]所示。

模糊自适应 PID 控制器由一个 PID 控制器和一个参数可以自整定的模糊控制器组成, 常规的 PID 控制器的算法^[3]为

$$u(n) = k_p e(n) + k_i \sum e(n) + k_d ec(n) \quad (1)$$

其中: k_p , k_i , k_d 是比例、积分、微分系数; $e(n)$, $ec(n)$ 分别是误差和误差变化, 取 e , ec , k_p , k_i , k_d 的论域均为 $(-6,6)$ 。然后确定输入输出的模糊子集: NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB, 由于三角函数在工程应用上易于实现, 所以模糊子集对应的隶属函数均取为三角函数, k_p , k_i , k_d 的在线自适应调整规则为: $K' = K + \Delta K$ 。

K' 包括 K'_p 、 K'_i 、 K'_d , 是 PID 初始校正, 在线运行过程中, 通过系统输出响应并实时计算出误差和误差变化, 将得到的误差和误差变化分别乘以量化因子 ke 和 kec , 取得相应论域元素以后, 针对 $\Delta K(\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d)$, 根据工程经验, 当误差为负大时, 若误差变化为负, 此时误差有增大的趋势, 为尽快地消除已有的负大误差和抑制误差变大, 则 k_p 的变化应为正大; 若误差变化为正时, 系统本身已有减少误差的趋势, k_p 应取较小的值。其他参数调整原理同上。

据此可得整定的控制规则如表 1~3 所示, 通过查表即可输出相应的 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d , 模糊控制规则建立之后, 采用 Mamdani 推理决策出控制量的模糊子集, 但是此时的控制量是一个模糊量, 还需要将其转变为精确量。解模糊采用隶属度加权平均的方法, 求得模糊控制输出:

$$U = \frac{\sum_{m=1}^k \mu(u_m) u_m}{\sum_{m=1}^k \mu(u_m)} \quad (2)$$

式中, $\mu(u_m)$ 、 u_m 分别表示各对称隶属函数的质心和隶属度值。

表 1 ΔK_p 的模糊规则

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 ΔK_i 的模糊规则

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	PS	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 3 ΔK_d 的模糊规则

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

2 电动缸系统建模

六自由度运动平台是由 6 个电动缸通过虎克铰链将上、下 2 个平台连接而成, 借助 6 个缸的伸缩运动, 完成上平台在三维空间的 6 个自由度的运动, 笔者研究的六自由度电动平台系统采用分布式运动控制, 每个伺服系统可看成一个独立子系统, 并且它们的硬件参数一致, 受篇幅所限, 这里只对单缸伺服系统进行建模。根据电动缸 (LEABB4-001) 机械结构将其转化为图 3^[4]所示的模型简化框图。

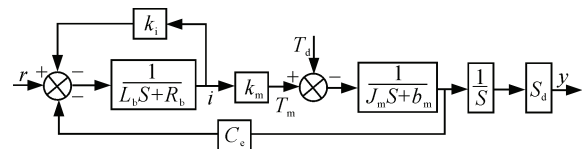


图 3 电动平台电动缸模型简化框图

由模型简化框图得电动缸传递函数:

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{k_m s_d}{s(L_a s + R_b + k_i)(J_m s + b_m) + k_m C_e} \quad (3)$$

忽略电枢回路中电感, 则式 (2) 可简化为:

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{k_m s_d}{s(R_b + k_i)(J_m s + b_m) + k_m C_e} \quad (4)$$

其中: L_a 为电枢电感; C_e 为电机反电动势系数; K_m 为电机力矩系数; s_d 为电动缸滚珠丝杠导程; J_m 为电机电枢和转动轴的转动惯量; b_m 为电机轴的粘性阻尼系数; k_i 为电机电流反馈系数; R_a 为电枢电阻。

根据实验室各参数实际取值情况代入最终得电动缸传递函数:

$$G(s) = \frac{0.7 \times s_d}{0.85 \times 10^{-5} s^2 + 4.8 \times 10^{-3} s} \quad (5)$$

3 电动平台单缸系统仿真及结果分析

在 Matlab 的模糊逻辑工具箱中建立仿真模型，图 4 为模糊控制与 PID 控制 2 种方式组合的模糊自适应控制器^[5]用到电动平台单缸系统中的仿真模型，图 5 为模糊自适应 PID 控制器内部设计结构。

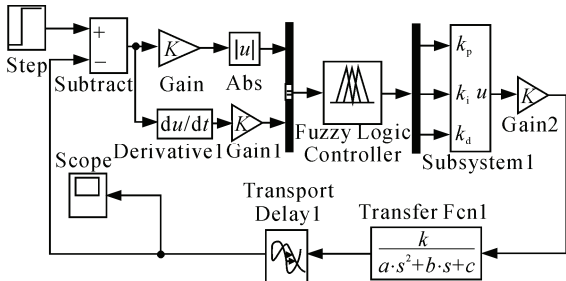


图 4 模糊自适应 PID 控制器总体模型

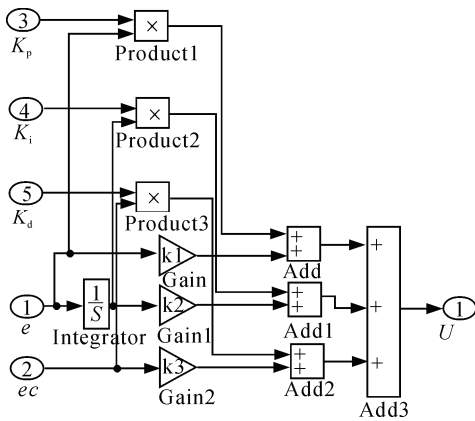


图 5 模糊自适应控制器内部结构模型

对该单缸系统分别采用 PID 和模糊自适应 PID 整定方法进行仿真分析，如图 6、图 7。图中传统控制阶跃响应达到稳态时间约为 0.12 s，然而采用文中设计的控制器稳态时间为 0.8 s。

对单缸系统进行方波跟踪，当采用传统的 PID 和文中设计的控制器控制时，位置跟踪如图 8、图 9。

从图 9 可以看出，模糊自适应 PID 控制时，实际位置曲线基本能逼真地跟踪给定位置曲线，取得了理想的跟踪效果。

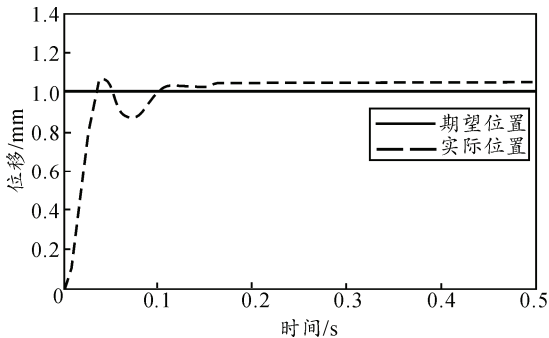


图 6 PID 控制单缸阶跃响应

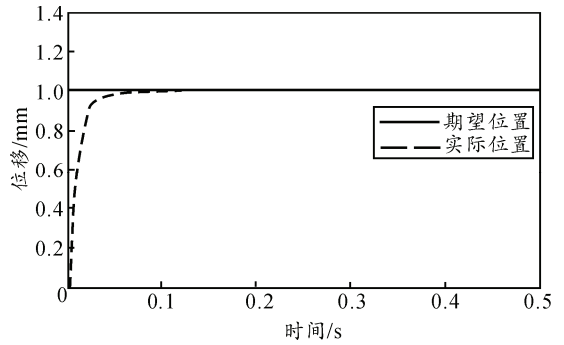


图 7 模糊自适应控制单缸阶跃响应

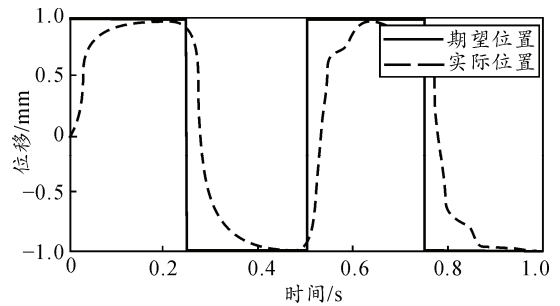


图 8 PID 控制时位置跟踪曲线

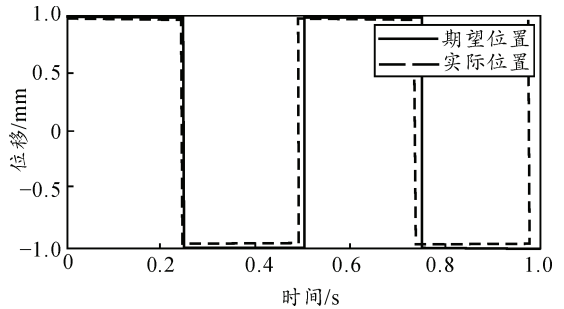


图 9 模糊自适应 PID 控制时跟踪曲线

由于实际电动缸运行时会受到外界各种干扰，现给系统施加 $0.01\sin(2t)$ 的噪声干扰，指定轨迹为 $0.1\sin(t)$ ，系统分别工作在 PID 控制和模糊自适应 PID 控制下，为使仿真效果突出，对其在 2 种不同控制下的位置跟踪效果进行比较，如图 10~图 13。

图 10~图 13 分别为传统 PID 和笔者设计的控制器控制下电动缸系统的位置跟踪情况，图 10、图 11 为电动缸系统分别工作在传统 PID 和笔者设计的模糊自适应 PID 控制模式下的位置跟踪情况，从图中可以看出：传统 PID 控制下电动缸的位置跟踪精度不高，而笔者的设计方法大大提高了系统跟踪精度，逼真再现了期望位置。图 12、图 13 为系统在 2 种控制模式下，在 20 s 时对系统施加 $0.01\sin(2t)$ 的正弦位置干扰，由图可以看出，传统控制时位置跟踪轨迹明显偏离期望位置，且不能实现轨迹的修正。然而通过笔者设计的模糊自适应控制器控制电动缸时，系统在受扰动时能在较短的时间内自发调整控

制参数从而实现偏离轨迹自适应的校正, 达到较高的跟踪精度; 因此, 参数自整定模糊自适应 PID 控制器具有更好的抗干扰性, 且控制精度明显由于常规 PID 控制器。

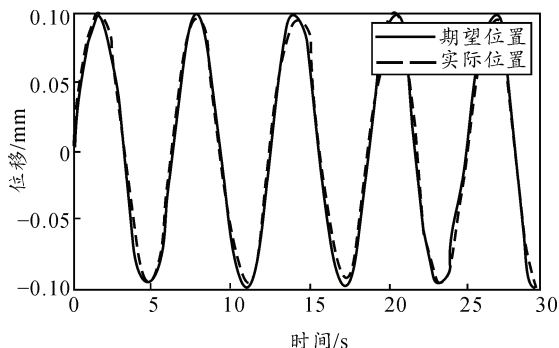


图 10 无扰动时系统跟踪

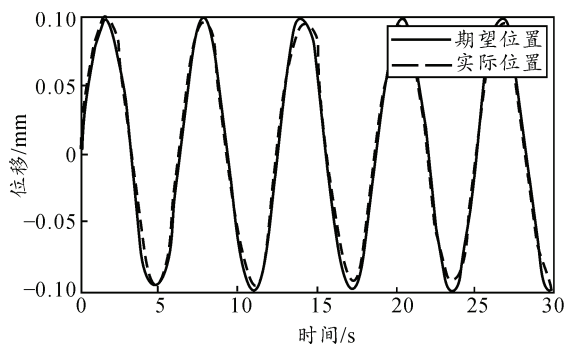


图 11 无扰动时系统跟踪

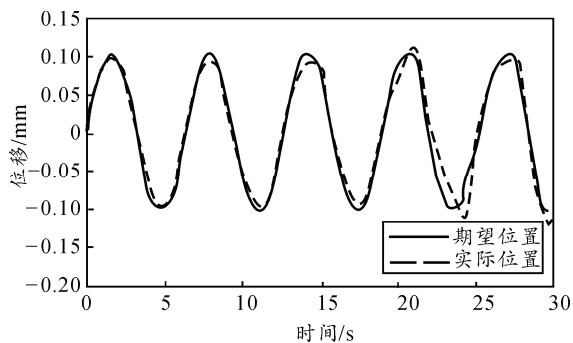


图 12 扰动时系统跟踪

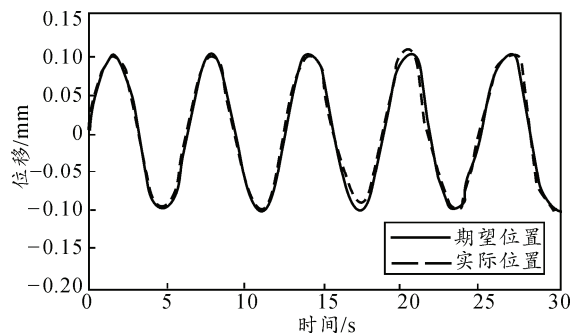


图 13 扰动时系统跟踪

4 结束语

由于模糊自适应控制器具有鲁棒性, 并对大滞后、时变、非线性等有良好的控制效果; 因此, 相比常规 PID 控制器, 笔者设计的参数自整定模糊自适应 PID 控制器具有较快的响应速度和较小的超调。仿真结果表明: 该模糊自适应 PID 控制器在改善被控过程的动态性能、稳态性能与提高抗干扰能力以及对参数时变的适应能力等方面均优于常规 PID 控制, 且本控制器设计简单, 易于工程实现, 通过在单缸系统运行调试后直接应用于六缸控制的电动平台, 大大地提高了平台的控制精度, 经实际平台验证动态跟踪误差小于 0.09%, 满足飞行训练技术指标要求。

参考文献:

- [1] 黄真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学理论及控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997: 12-29.
- [2] 杨用严. 一种自适应模糊 PID 控制系统计算机仿真[J]. 陕西科技大学学报, 2004, 12(2): 48-52.
- [3] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 270-301.
- [4] 冯国楠. 现代伺服系统的分析与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990: 25-52.
- [5] Feng G. An Approach to Adaptive Control of Fuzzy Dynamic Systems[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2002, 10(2): 268-275.