

定向战斗部随动系统新型模糊-PID 复合控制

滕 玺, 米双山, 朱东方, 谢世富

(军械工程学院, 石家庄 050000)

摘要: 针对随动定向战斗部随动系统中存在的非线性与随机干扰问题, 普通的 PID 控制器和模糊控制器不能满足快速性与适应性的要求, 基于模糊自整定 PID 参数控制器与模糊-PID 切换控制器, 提出了一种新型模糊-PID 复合控制算法, 控制前段利用模糊控制加快控制速度, 后段利用模糊逻辑整定 PID 参数提高精度与自适应能力; 仿真结果表明, 采用这种新型模糊-PID 复合控制算法能够保持跟踪精度, 减少调节时间, 加快系统跟踪速度, 减小切换冲击, 提高抗干扰能力。

关键词: 随动定向战斗部; 模糊 PID; 随动系统

A New Type of Fuzzy-PID Composite Control of Aimable Warhead Servo System

Teng Xi, Mi Shuangshan, Zhu Dongfang, Xie Shifu

(Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: The conventional PID controller and Fuzzy controller can not fulfill the requirement of speediness and adaptability for servo aimable warhead servo system due to nonlinear problem and random disturbances. Therefore, we proposed a new type of Fuzzy-PID composite controller based on Fuzzy self-tuning PID controller and Fuzzy-PID switching controller, the front to speed up the control with fuzzy control, and then setting the PID parameter by fuzzy logic to improve precision and adaptive ability. Simulation demonstrated that the new type of Fuzzy-PID composite control algorithm can keep high tracking precision, reduce the adjustment time and switching impact while improve the tracking speed and robustness.

Key words: servo aimable warhead; fuzzy-PID; servo system

0 引言

随动定向战斗部就是利用伺服系统对战斗部实施控制, 使其对准目标, 而后定向爆破的战斗。在大过载情况下, 弹目交汇瞬间进行控制, 需要兼顾稳定性、快速性和精确性。在随动控制系统中, PID 控制器依然具有统治地位^[1], 但是随动定向战斗部随动系统对快速性有着很高的要求^[2-3], 增加伺服电机的输出力矩以加快战斗部转动速度, 势必会加大系统的超调量; 另外, 在空中飞行环境复杂、过载大, 加之随动系统非线性比较明显, 存在很多类似负载扰动和摄动等不确定性因素, 普通的 PID 控制器已经很难达到预定的控制要求。

在传统 PID 控制器中融入模糊控制模块, 采用 PID 控制和模糊控制相结合的复合控制算法, 能够有效提高系统的反应速度和鲁棒性, 对于非线性和扰动所引起的不确定性有很强的适应能力^[4]。但模糊语言数量有限, 控制规则也不能无限细分, 所以模糊控制策略控制速度快但比较粗略, 会产生比较大的误差^[5]。结合两种控制算法以及随动定向战斗部随动系统的特点, 本文提出两种随动定向战斗部随动系统 PID 控制与模糊控制的结合方式, 并将这两种结合方式进一步优化结合, 形成了模糊-模糊自整定 PID 平滑切换控制器。

1 随动控制器设计

对直流伺服电机, 可以进行合理的假设, 忽略铁损, 电机无饱和, 则将转动系统在 X-Y 坐标系下的动态方程简化为:

$$\begin{cases} \frac{di_y}{dt} = \frac{1}{L_y}(u_y - Ri_y - \omega\psi) \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J}(T_e - f\Omega - T_L) \\ T_e = \frac{3}{2}n\psi i_y = K_e i_y \end{cases} \quad (1)$$

式中, i_y 、 u_y 、 L_y 分别为定子电压、电流与电感, R 为定子相绕组电阻, ψ 为永磁磁链, ω 为转子电角速度, Ω 为机械角速度, J 为系统转动惯量, f 为粘滞摩擦系数, T_e 、 T_L 分别为电磁转矩和负载转矩, n 为极对数, $K_e = 3/2n\psi$ 为电机的转矩系数。

1.1 模糊自整定 PID 参数控制器设计

在常规 PID 控制器的基础上, 采用模糊逻辑推理的方法, 调整 PID 控制算法中的参数^[6]。经模糊推理得到的结果不直接作为系统的输出, 而是用该结果来整定 PID 参数, 再根据 PID 算法来决定系统的输出。

根据给定要求, 模糊控制器采用二维模糊控制器^[7-8]。输入偏差 e 为给定输入信号和输出信号之差, 输入 ec 为偏差的变化率。

偏差 e 、偏差变化率 ec 与 PID 调节器的 3 个参数间存在如下关系^[9]:

(1) 当 e 较大时, 取较大 K_p 来加快系统响应速度; 取 K_i 为 0 来避免出现较大的超调量; 取较小 K_d 来避免系统在开始的时候可能引起的超范围控制作用。

(2) 当 e 中等大小时, 取较小 K_p , 使超调量略小; 适当加大 K_i ; K_d 取值恰当, 保证系统的响应速度。

(3) 当 e 较小时, 取较大 K_p 和 K_i , 使系统具有良好的稳态性能; K_d 恰当取值, 避免系统出现振荡。

3 个语言变量语言值都取为 {大 (L)、中 (M)、小 (S)、

收稿日期: 2013-12-05; 修回日期: 2014-01-10。

作者简介: 滕 玺(1989-), 男, 四川内江人, 硕士研究生, 主要从事武器系统建模与仿真方向的研究。

零 (ZO), 隶属度函数取为三角形函数, 三个参数模糊控制规则如表 1、表 2、表 3 所示。

表 1 调节 K_p 的模糊控制规则表

控制量 偏差变化率	偏差 e	L	M	S	ZO
	L	M	S	M	M
M	L	M	L	L	L
S	L	M	L	L	L
ZO	L	M	L	L	ZO

表 2 调节 K_i 的模糊控制规则表

控制量 偏差变化率	偏差 e	L	M	S	ZO
	L	ZO	S	M	L
M	ZO	S	L	L	L
S	ZO	ZO	L	L	L
ZO	ZO	ZO	L	ZO	ZO

表 3 调节 K_d 的模糊控制规则表

控制量 偏差变化率	偏差 e	L	M	S	ZO
	L	S	M	ZO	ZO
M	M	M	S	ZO	ZO
S	L	L	S	S	S
ZO	L	L	S	ZO	ZO

设计模糊自整定 PID 参数控制器如图 1 所示^[10]。图 1 (a) 为总设计结构图, 图 1 (b) ~ (d) 为各个模块的子系统。

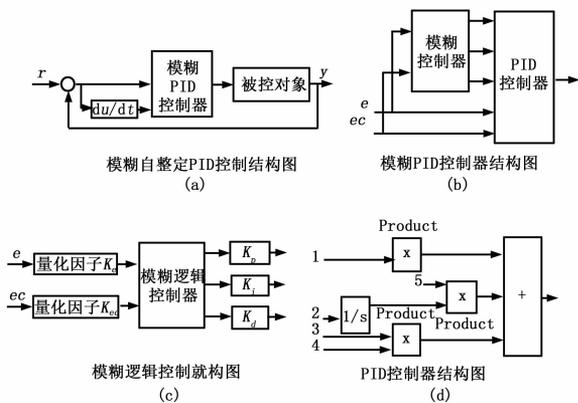


图 1 模糊自整定 PID 参数控制器设计图

1.2 模糊-模糊自整定 PID 平滑切换控制器设计

设计一般的复合控制器的基本思想是对控制论域进行分段, 在不同的分段区内采用不同的控制方式。当系统偏差较大时, 通过开关选择模糊控制器, 加快控制速度, 以得到较好的动态特性; 当系统偏差较小时, 将开关切换到基本 PID 控制器^[11]。这里结合模糊-PID 切换控制器与模糊自整定 PID 参数控制器, 采用平滑切换因子函数来降低切换冲击, 提高系统

稳定性; 并采用模糊推理整定 PID 参数^[12]。

输入偏差 e 的模糊论域为 $[-6, 6]$, 语言变量 E 的语言值设定为 6 个, {负大 (NB)、负中 (NM)、负小 (NS)、正小 (PS)、正中 (PM)、正大 (PB)}; 输入 ec 的模糊论域为 $[-6, 6]$, 语言变量 EC 的语言值设定为 5 个, {负大 (NB)、负小 (NS)、零 (Zero)、正小 (PS)、正大 (PB)}; 输出 DU 为控制量, 模糊论域为 $[-6, 6]$, 语言变量 u 的语言值设定为 7 个, {负大 (NB)、负中 (NM)、负小 (NS)、零 (Zero)、正小 (PS)、正中 (PM)、正大 (PB)}。隶属度函数定义三角形函数, 设计模糊规则见表 4。

表 4 模糊规则表

控制量 DU 偏差变化率	偏差 e	NB	NM	NS	PS	PM	PB
	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
NS	NB	NB	NS	ZO	PS	PM	PM
ZO	NB	NM	NS	PS	PM	PB	PB
PS	NM	NS	ZO	PM	PB	PB	PB
PB	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB

设论域宽度为 L 、取模糊量化因子 (K_e 、 K_{ec} 和 K_u 分别为 e 、 ec 和 u 的量化因子) 为:

$$K = 12/L \tag{2}$$

利用加权平均法进行清晰化处理, 得到控制器输出:

$$u_F = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \mu(x_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(x_i)} \tag{3}$$

其中: μ_i 为 i 点的隶属度函数值。

传统的二维模糊 PID 切换控制器是根据误差信号是否达到事先规定的阈值来判断是否在 PID 控制与模糊控制间进行切换。由于该种开关切换方式有突变性, 会产生切换冲击的问题, 降低系统在切换点领域的稳定性能。

为了减小切换冲击, 引入平滑切换因子函数, 得到模糊-PID 切换控制器的输出:

$$u = \xi(e)u_F + [1 - \xi(e)]u_{PID} \tag{4}$$

式中, u_F 为模糊控制器输出, u_{PID} 为 PID 控制输出, $\xi(e)$ 为引入平滑切换因子函数:

$$\xi(e) = \begin{cases} 0 & |e| \leq e_1 \\ \exp[\alpha(|e| - e_1)] \frac{|e| - e_1}{e_2 - e_1} & e_1 \leq |e| \leq e_2 \\ 1 & |e| \geq e_2 \end{cases} \tag{5}$$

式中, 不同系数 α 可以改变平滑切换因子函数的形状, 调整 PID 控制与模糊控制的权重影响, 得到不同的控制特性。 e_1 、 e_2 为模糊控制与 PID 控制作用分界点。

当系统瞬态响应时, 误差与误差变化率比较大, 模糊控制器起主要作用, 加快控制速度; 当系统接近稳态时, 模糊自整定 PID 控制器起主要作用, 提高随动精度与适应能力。模糊-PID 切换控制器基本结构如图 2 所示。

其中, PID 控制器采用图 5 所示的模糊 PID 自整定控制器, 形成了模糊-模糊自整定 PID 平滑切换控制器。

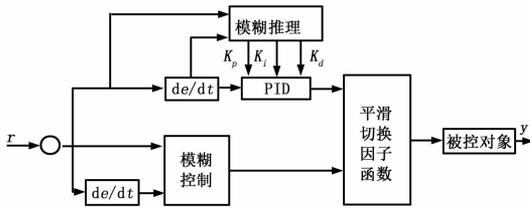


图 2 模糊-模糊自整定 PID 平滑切换控制器结构图

2 仿真分析

伺服位置控制就是让电机从一个位置转动到另一个预定位置，采用阶跃响应作为系统输入，能较好地反映实际控制状态，并且体现控制策略的优劣。

2.1 传统 PID 控制

仿真效果如图 3 所示，可以看出，传统 PID 控制器稳态误差非常小，控制速度比较慢，超调量很大，调节时间长。

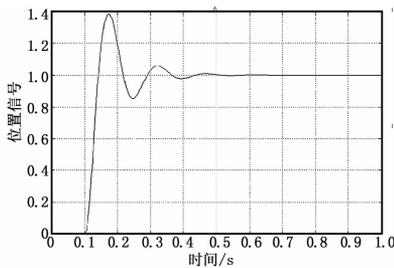


图 3 传统 PID 控制器的阶跃响应曲线

2.2 模糊自整定 PID 控制

仿真效果如图 4 所示，可以看出，模糊自整定 PID 控制器控制效果整体较好，几乎没有稳态误差，上升速度很快，最快达到稳定值，超调量较小，调节时间很短。

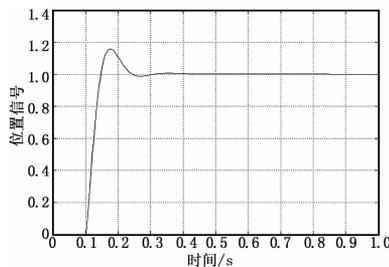


图 4 模糊自整定 PID 控制器的阶跃响应曲线

2.3 模糊-PID 切换控制

仿真效果如图 5 所示，可以看出，模糊-PID 切换控制器控制效果比较好，基本没有稳态误差，上升速度很快，没有波动和超调量，但是调节时间较长，开关切换控制时有冲击。

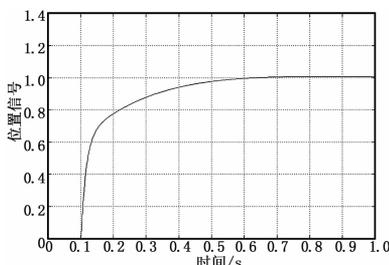


图 5 模糊-PID 切换控制器的阶跃响应曲线

2.4 模糊-模糊自整定 PID 平滑切换控制

仿真效果如图 6 所示，可以看出，模糊-模糊自整定 PID 平滑切换控制较前面 3 种控制方式的效果都要好，几乎没有稳态误差和超调量，切换控制平滑无冲击，调节时间很短。

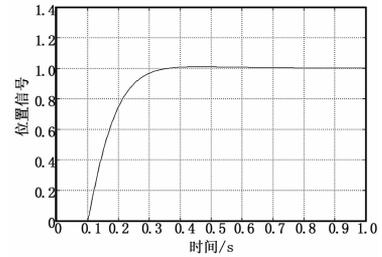


图 6 模糊-模糊自整定 PID 平滑切换控制器的阶跃响应曲线

3 结论

本文将模糊自整定 PID 控制和模糊-PID 切换控制两种结合方法进一步集合，首先，模糊控制能在前半部分加快响应速度；其次，模糊推理整定 PID 参数，全面提升后半部分的动态与稳态性能；最后，平滑切换因子函数保证了算法切换时的平稳。

仿真结果显示，不同的结合方式所得到的控制效果不同，模糊-模糊自整定 PID 平滑切换控制能够得到较为理想的控制效果，相较于前面两种控制方式，在控制速度以及平稳性上有良好的表现，能够更好地适应随动定向战斗部随动系统的工作环境。

参考文献:

- [1] 刘金琨. 先进 PID 控制 Matlab 仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [2] Tally J C, Dahlgren, Va. Aimable warhead [P]. USP 5182418, 1993.
- [3] Lambert D E. Revisiting I-D hypervelocity penetration [J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35 (12): 1631.
- [4] 王力, 钱林方, 高强, 等. 基于灰预测模糊 PID 的随动系统负载模拟器力矩控制研究 [J]. 兵工学报, 2012, 33 (11): 1379-1386.
- [5] 席爱民. 模糊控制技术 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008. 6.
- [6] 李向旭, 张曾科, 姜敏. 两轴稳定平台的模糊-PID 复合控制器设计与仿真 [J]. 电光与控制, 2010, 17 (1): 69-72.
- [7] 范卫刚, 袁冬莉. 基于模糊自适应 PID 的无人机纵向姿态控制研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (3): 586-588.
- [8] Mohan B M, Sinha A. Analytical structures for fuzzy PID controller [J]. IEEE Transactions on Fuzzy System, 2008, 16 (1): 52-60.
- [9] Misir D, Malki H A. Liapunov stability for a fuzzy PID controlled flexible-joint manipulator [J]. International Journal of Computer Applications in Technology, 2006, 27 (2): 97-106.
- [10] 董海荣, 高冰, 宁滨, 等. 基于模糊 PID 软切换的列车自动驾驶系统调速制动 [J]. 控制与决策, 2010, 25 (5): 794-796.
- [11] 段瑞玲, 李玉和, 李庆祥. 精密伺服工作的模糊-PI 复合控制的设计与仿真 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (6): 751-753.
- [12] 韩文虹, 赵小丽. 基于 TS 模糊 PID 控制模型的发电机控制器设计 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (2): 386-388.