

雷达稳定平台模糊 PID 串级控制设计与仿真

梅 栋, 俞竹青

(常州大学 机械工程学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 机载雷达稳定平台是根据陀螺仪采集到载机角速度信息, 驱动直流伺服电机采用反向运动补偿原理工作, 以保证机载雷达成像稳定, 清晰; 为了提高机载雷达稳定平台的响应性能和抗干扰能力, 提出一种模糊 PID 串级控制方案, 根据陀螺仪所采集的角速度信息和编码器反馈的角度位置信息, 采用速度模糊 PID 控制和位置模糊 PID 控制串联的形式对直流伺服电机进行控制; 经 Matlab 仿真实验证明, 模糊 PID 串级控制比传统单级 PID 控制以及传统 PID 串级控制具有更优秀的响应性能以及抗干扰能力, 更加适合复杂环境下机载雷达稳定平台的稳定要求。

关键词: 机载雷达稳定平台; 模糊 PID; 串级控制; 直流伺服电机; MATLAB 仿真

Design and Simulation of Fuzzy PID Cascade Control for Radar Stabilization Platform

Mei Dong, Yu Zhuqing

(School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: The airborne radar stabilization platform is based on the angular velocity information collected by the gyroscope, and the DC servo motor is driven by the reverse motion compensation principle to ensure stable and clear imaging of the airborne radar. In order to improve the response performance and anti-interference ability of the airborne radar stability platform, a fuzzy PID cascade control scheme is proposed. According to the angular velocity information collected by the gyro encoder and the angular position information of the encoder feedback, the speed fuzzy PID control and the position fuzzy PID control is connected in series to control the DC servo motor. The MATLAB simulation experiment proves that the fuzzy PID cascade control has better response performance and anti-interference ability than the traditional single-stage PID control and the traditional PID cascade control, and is more suitable for the stability requirements of the airborne radar stabilization platform in complex environments.

Keywords: airborne radar stability platform; fuzzy PID; cascade control; DC servo motor; MATLAB simulation

0 引言

机载雷达稳定平台是一种集机械结构、伺服控制于一体的精密复杂设备, 主要由平台台体、驱动机构、伺服控制单元及传感器单元 4 部分组成。将其安装在飞机和雷达天线之间, 当载机受到气流或其他因素造成扰动时, 据陀螺仪采集到载机角速度信息, 驱动直流伺服电机采用反向运动补偿原理减小甚至消除因飞机的扰动而引起的对雷达的扰动, 从而保证机载雷达成像稳定、清晰。

直流无刷伺服电机作为驱动机构是保证雷达稳定平台精准高效运转的关键环节, 对平台的响应速度, 响应时间以及稳态精度有着直接影响。传统的雷达稳定平台大多采用经典 PID (即比例积分微分) 控制器对直流无刷伺服电机进行控制。该控制器虽然结构简单, 有很强的实用性能^[1], 但其实质上仍然是一种线性控制策略, 对于机载雷达稳定平台这种非线性, 变化快的复杂系统并不能起到良好的控制效果。现在的研究策略大都是将神经网络控制等智能控

制方法与经典 PID 结合起来, 形成神经网络 PID 控制或者采用传统 PID 串级控制方法。但神经网络 PID 控制算法复杂^[2]、计算量大, 很难直接应用于机载雷达稳定平台的控制。虽然 PID 串级控制相对于传统单级 PID 拥有相对良好的响应性能以及抗干扰能力, 但其在载机受到连续扰动的情况下并不能保证雷达稳定平台所需要的控制精度的要求。

针对上述问题, 本文在传统 PID 控制的基础上结合模糊控制, 设计一种模糊 PID 串级控制方案。根据陀螺仪编码器所采集到的角速度信息和编码器反馈的角度位置信息, 将速度模糊 PID 控制和位置模糊 PID 控制串联形成模糊 PID 串级控制器对直流伺服电机进行控制。采用串级控制方案, 将角速度偏差也作为一闭环控制对象使用模糊 PID 控制调节, 通过对速度环的合理控制能够有效地解决因为速度过快而导致位置的超调与震荡^[3], 从而使机载雷达稳定平台获得更优秀的响应性能和抗干扰能力。

1 机载雷达稳定平台数学模型及控制系统结构

1.1 稳定平台动力系统模型

本次采用模糊 PID 串级控制器的平台为两轴两框架机械结构, 如图 1 所示。使用直流无刷伺服电机作为执行机构, 横滚向与方位向控制系统类同, 本文以横滚向伺服电机控制系统为例, 建立数学模型^[4-5]。图 2 为理想状态下电机电路等效图, 根据其建立所用电机传递函数。

由电压平衡方程可得:

收稿日期: 2019-07-08; 修回日期: 2019-08-01。

作者简介: 梅 栋(1995-), 男, 江苏沛县人, 硕士研究生, 主要从事机电一体化、机载雷达稳定平台方向的研究与开发。

俞竹青(1962-), 男, 江苏常州人, 博士, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事机电一体化系统、主从随动机器人和机载雷达稳定平台系统等方向的研究与开发。

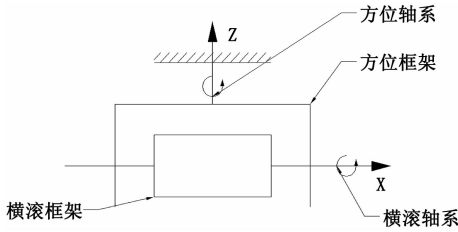


图 1 稳定平台两轴两框架结构图

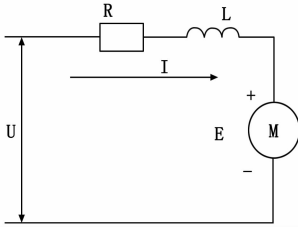


图 2 直流电机电路等效图

$$U = E + IR + L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

电机电动势表达式为:

$$E = C_e \omega \quad (2)$$

C_e 为电机电动势系数。

动力转矩平衡方程为:

$$T_m - T_l = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

电磁转矩为:

$$T_m = C_t I \quad (4)$$

将 (1) ~ (4) 式拉氏变换为:

$$\begin{aligned} U(s) &= E(s) + RI(s) + LSI(s) \\ E(s) &= C_e \omega(s) \\ T_m(s) - T_l(s) &= JS \omega(s) \\ T_m(s) &= C_t I(s) \end{aligned} \quad (5)$$

当负载干扰转矩 $T_l=0$ 时整理可得电压和转速的传递函数为:

$$G_\omega(s) = \frac{\omega(s)}{U(s)} = \frac{C_t}{C_e C_t + JS + LJS^2} \quad (6)$$

再经积分变换后可得角度与电压的传递函数为:

$$G_\theta(s) = \frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{C_t}{C_e C_t S + JS^2 + LJS^3} \quad (7)$$

根据状态空间表达式形式为:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}} &= A\bar{x} + bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (8)$$

令 $x_1=I$, $x_2=\omega$ 仍取输入量: $u=U$, 转速 ω 为输出量, 根据公式 (1) ~ (4) 整理可得速度与电压的状态空间方程为:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{C_e}{L} \\ \frac{C_t}{J} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} u \\ y = x_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

1.2 稳定平台控制系统结构图

本文中稳定平台控制系统采用速度环, 位置环双闭环控制策略并且均与模糊 PID 控制算法结合, 以雷达稳定平台直流无刷伺服电机为控制对象, 以电压 U 为输入量, 角度 θ 为输出。其控制系统结构如图 3 所示。

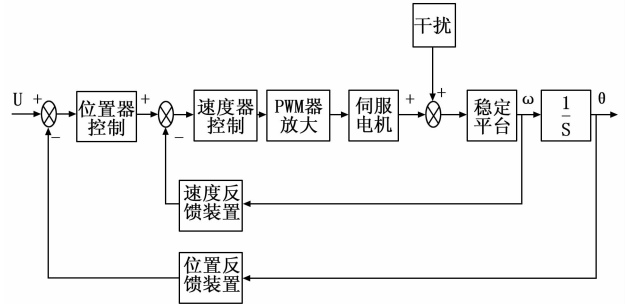


图 3 稳定平台控制系统结构框图

图中, 最内环为速度控制环节, 主要是对机载雷达稳定平台横滚框角速度进行实时跟踪, 调节速度, 保证平台在受到干扰时能够准确补偿角速度的设定值^[6-8]。最外环是位置环, 对机载雷达稳定平台进行实时的位置反馈, 以保证在平台受到干扰时能够准确的保证位置角度的设定值, 因此位置环是控制系统中保证稳定平台动静性能最关键的部分之一。

2 模糊 PID 串级控制器设计

2.1 模糊控制理论

模糊控制是一种适用于非线性的智能控制方法, 是由 Zadeh 教授提出。主要由模糊化、模糊规则库、模糊推理以及解模糊化部分组成。模糊化主要是通过比例因子、隶属度函数等将输入的精确量转化成模糊论域中的模糊子集。模糊规则库是模糊控制器的核心部件, 通常使用 IF (满足的条件) THEN (可推出的结论) 这样一种语言形式来反应专家的经验与知识, 在 IF-THEN 的规则中输入的前提以及得到的结论都是模糊量^[9-10]。模糊推理是基于模糊逻辑所蕴涵关系以及相关规则进行的, 具有模拟人基于模糊概念的推导能力。解模糊化是通过比例因子, 尺度变换以及隶属度函数等将模糊子集中的模糊量转换为清晰的输出量。使用模糊控制器的基本结构如图 4 所示。

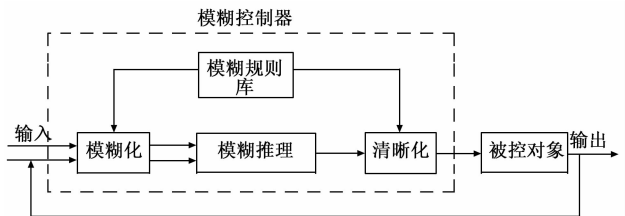


图 4 模糊控制器结构图

2.2 模糊 PID 控制串级设计

传统 PID 控制是一种在工程上广泛应用的线性控制系统, 它由比例环节, 积分环节和微分环节三部分构成, 其控制规律如下式所示:

$$U_t = K_p \left(e_t + \frac{1}{T_i} \int_0^t e_t dt + T_d \frac{de_t}{dt} \right) \quad (10)$$

但在计算机控制系统中，只能计算离散化信号，因此将模拟 PID 规律离散化如下：

$$U_t = K_p e_t + K_I \sum_{i=0}^{t-1} e_i + K_D (e_t - e_{t-1}) \quad (11)$$

模糊 PID 控制是以误差 e 和误差变化率 ec 为输入对象，将 K_p, K_I, K_D 三个 PID 参数作为输出量。通过模糊控制规则对不同时间内的误差 e 和误差变化率 ec 进行对应的 PID 参数自动调节，以满足相对应的要求，具有良好的动静性能。最终的 PID 输出参数是 PID 基本参与与模糊控制输出的调节 PID 参数之和。其关系如下式所示：

$$\begin{aligned} K_p &= K_p + \{e, ec\} \\ K_I &= K_I + \{e, ec\} \\ K_D &= K_D + \{e, ec\} \end{aligned} \quad (12)$$

K_{p1}, K_{I1}, K_{D1} 为 PID 控制的基本参数， $\{e, ec\}$ 为各个对应的模糊控制所调节参数的输出量。根据模糊 PID 控制设计的模糊 PID 串级控制系统如图 5 所示。将位置模糊 PID 控制作为最外环，根据反馈的位置信号误差实时调节控制参数，并将位置环模糊 PID 控制的输出与陀螺仪反馈的速度信号对比的误差作为内环速度模糊 PID 的控制输入，对速度环节进行参数调控，以达到期望目标值。这样不仅有效克服了作用于速度环的速度扰动，并且还改善了整个系统的动态特性，提高了控制质量^[11-12]。

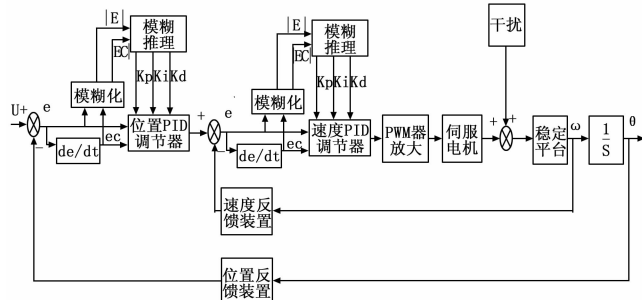


图 5 模糊 PID 串级控制系统框图

2.3 模糊 PID 控制规则建立

模糊控制规则是整个模糊控制 PID 的核心部分，本次设计的模糊 PID 串级控制器采用合理的比例因子，选取的输入输出的基本论域均为 $[-6 \ 6]$ ，将输入输出的变量都划分成为 7 个模糊子集，分别是 $[NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB]$ ，这 7 个模糊子集分别对应的语言变量是 $[-$ 负大, $-$ 负中, $-$ 负小, 零, 正小, 正中, 正大 $]$ 。隶属度函数分别有高斯函数以及三角函数。为了考虑本平台控制系统的调节难易程度以及灵敏度的问题，因此将所有输入输出的隶属度函数均采用三角函数，如图 6 所示。

本文所采用的模糊控制的规则形式为 IF…… THEN ……语句的形式。解模糊化则采用重心法，其计算公式如下所示：

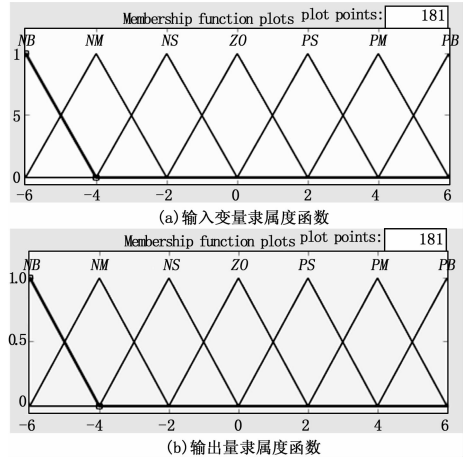


图 6 输入输出隶属度函数示意图

$$V = \frac{\int_a^b x \mu(x) dx}{\int_a^b \mu(x) dx} \quad (13)$$

根据以上原则以及误差 e 和误差变化率 ec 对 K_p, K_I, K_D 三个参数的影响结合实际的经验制定适合的模糊控制表如表 1~3 所示，通过 Matlab Fuzzy 工具箱根据对应的模糊控制规则表形成相对应的的模糊控制曲面图如图 7 所示。

表 1 K_p 模糊控制规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	ZO
NS	PM	PM	PS	ZO	ZO	NS	NM
ZO	PS	PS	ZO	ZO	NS	NS	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	ZO	NS	NS	NM	NB
PB	ZO	ZO	NS	NM	NM	NB	NB

表 2 K_I 模糊控制规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PM
PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 3 K_D 模糊控制规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM
NM	NS	NS	ZO	ZO	PS	PS	PM
NS	NS	ZO	ZO	ZO	PS	PS	PM
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	NS	NS	NS
PM	PM	PS	PS	ZO	NS	NS	NM
PB	PB	PM	PM	PS	NS	NM	NB

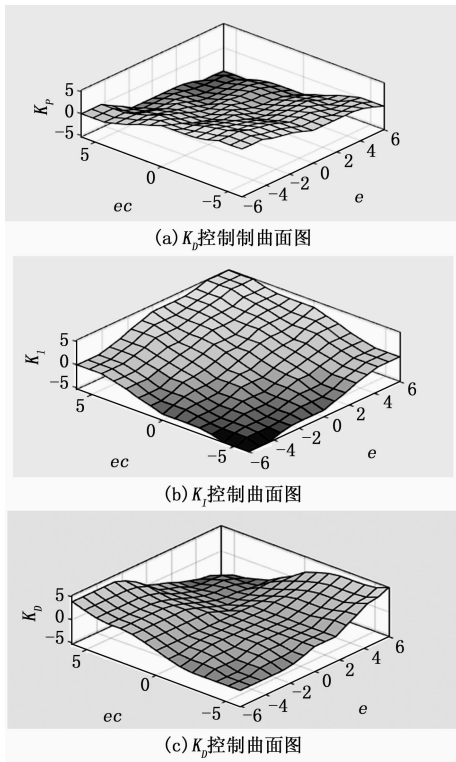


图 7 控制曲面图

3 Matlab 仿真验证

3.1 基本参数的确立

本文采用 Matlab 中的 Simulink 工具箱, 以及 Fuzzy Logical 进行仿真验证。使用的直流无刷伺服电机采用某公司生产的 EC-i40 型电机, 其基本参数如表 4 所示。

表 4 电机基本参数

名称	数据
额定电压/V	36
额定电流/A	2.72
额定转矩/mNm	207
额定转速/rmp	3950
最大空载转速/rmp	4550
最大堵转转矩/mNm	3160
最大堵转电流/A	42.2
最大堵转电压/V	37.5
电枢电阻/ Ω	0.853
电感/mH	0.675

因为 $C_e C_t$ 可由下列公示计算得出:

$$C_t = \frac{T_{\max}}{I_{\max}} \quad (14)$$

$$C_e = \frac{U_m}{\omega_0} \quad (15)$$

其中: T_{\max} 为最大堵转转矩; I_{\max} 为堵转电流; U_m 为最大堵转电压; ω_0 最大空载转速。

将相关参数代入公式得到 $C_t = 0.075 \text{ N} \cdot \text{m/A}$, $C_e = 0.079 \text{ V} \cdot \text{s/rad}$ 。由相关软件可测得横滚轴总惯量为 $0.0159 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 结合以上公式可得电机的传递函数为:

$$G(s) = \frac{12.658}{0.00179s^2 + 2.29s + 1}$$

3.2 Simulink 仿真模型建立与仿真实验

根据系统框图以及相关传递函数建立模糊 PID 串级控制 Simulink 仿真模型如图 8 所示。

建立仿真模型后, 将制定的模糊规则函数输入进仿真模型。分别对单级 PID 控制, 串级 PID 控制以及模糊 PID 串级控制进行无干扰状态下阶跃响应, 以及在 6s 时加入时间为 0.05s 的单位脉冲干扰状态下的阶跃响应进行对比。结果如图 9 所示, 数据对比结果如表 5、6 所示。

表 5 无干扰状态数据对比表

	单级 PID	串级 PID	模糊 PID 串级控制
响应时间/s	0.5	0.2	0.16
稳态时间/s	5.2	1.5	0.6
最大超调量/%	43.3	13.3	5.8

表 6 干扰状态数据对比表

	单级 PID	串级 PID	模糊 PID 串级控制
稳态时间/s	X	1.1	0.35

由表 5、6 可得到, 在无干扰状态下, 单级 PID 的响应时间为 0.5 s, 串级 PID 的响应时间为 0.2 s, 模糊 PID 串级控制的响应时间为 0.16 s 由此看来, 串级 PID 和模糊 PID 串级控制的响应时间相差不大, 但模糊 PID 串级控制响应时间远远小于单级 PID 响应时间。在达到稳态的时间上模糊串级 PID 所用时间为 0.6 s 仅是单级 PID 所用时间的 11.5%, 比串级 PID 所用时间 5.2 s 缩短 60%, 在最大超调量上模糊 PID 串级控制仅有 5.8%, 而串级传统 PID 为 13.3%, 单级 PID 为 43.3%, 显而易见模糊 PID 串级控制的超调量远远低于其他两种。在加入单位脉冲干扰的情况下, 单级 PID 在所给时间内没有达到最终的稳态值, 而串级 PID 用时 1.1 s, 而模糊 PID 串级控制在收到干扰时恢复稳态值所用时间为 0.35 s 仅是串级 PID 的 31.8%。由图 9 (b) 也可看出, 在受到干扰时, 相比于单级 PID 和传统串级 PID, 模糊 PID 串级控制策略受到的扰动最小, 恢复时间最短。最后我们再比较 3 种方案在受到周期性连续干扰时的抗干扰情况。在仿真过程中加入一幅值为 1 周期为 2 s 的连续周期脉冲进行抗干扰实验。结果如图 10 所示。

在幅值为 1 周期为 2 s 的连续周期脉冲的连续干扰下, 单级 PID 已经不能正常工作, 而串级 PID 虽能在短暂时刻恢复稳定, 但随着周期性干扰的进行, 串级 PID 的稳态误差有逐渐扩大的趋势, 最终不能有效进行稳定效果, 但模糊 PID 串级控制仅有很小的波动后马上恢复正常, 并且其

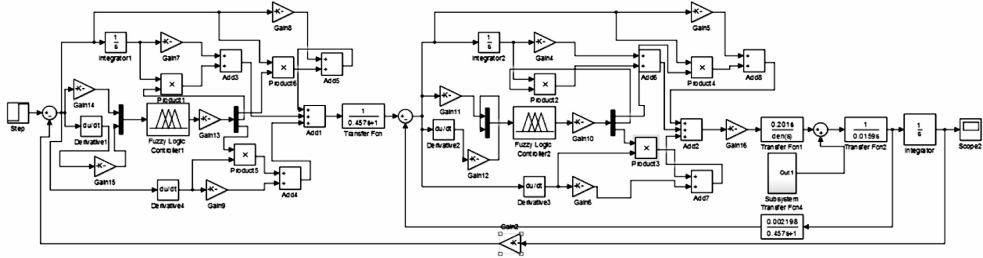
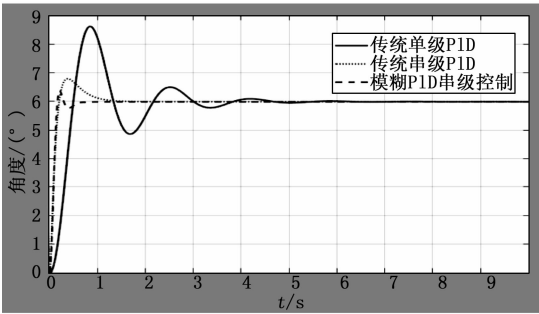
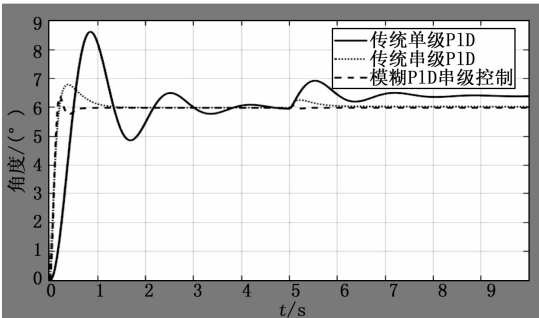


图 8 模糊 PID 串级控制 Simulink 仿真模型



(a) 无干扰状态阶跃响应曲线



(b) 无干扰状态下阶跃响应曲线

图 9 阶跃响应曲线图

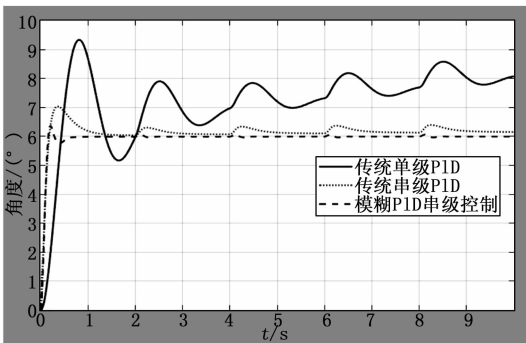


图 10 连续干扰状态响应曲线

稳态误差并没有扩大趋势。

由以上仿真结果可以验证，相对于传统 PID，以及串级 PID，模糊 PID 串级控制设计不仅响应时间短，超调量小而且抗干扰能力强，尤其是在连续干扰的情况下，模糊 PID 串级控制设计的优越性更加突出。

4 结论

本文提出一种机载雷达稳定平台模糊 PID 串级控制器

设计方案。在仅有位置反馈环节的基础上加入速度反馈环节，通过控制调节速度达到使位置变化更精确更稳定的目的。两个反馈环节均采用模糊 PID 控制，并将其串联形成模糊 PID 串级控制。经过 Matlab 仿真证明，模糊 PID 串级控制设计相比于传统的单级 PID，以及串级 PID。拥有更快的响应时间，更短的稳定时间，以及更小的超调量，在抗干扰方面，尤其是在连续干扰的状况下，模糊 PID 串级控制的抗干扰能力更加优秀。更加适用于复杂情况下的机载雷达稳定平台应用，确保其在复杂情况下能够有效保证雷达成像清晰、稳定。

参考文献：

[1] 王 博, 陈万强, 李祥阳. 基于模糊自适应 PID 控制的舵机系统仿真研究 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2015, 29 (10): 52-56.

[2] 张展华, 桂延宁, 周 彬, 等. 基于模糊自适应的连续整定 PID 舵机控制器 [J]. 探测与控制学报, 2018, 40 (4): 73-79.

[3] 于雅莉, 孙 枫, 王元昔. 基于多传感器的四旋翼飞行器硬件电路设计 [J]. 传感器与微系统, 2011, 30 (8): 113-117.

[4] Anon. Adaptive fuzzy PID control method based on identification structure [J]. International Journal of Systems and Control, 2006 (1): 15-21.

[5] 曾光奇, 胡均安, 王 东, 等. 模糊控制理论与工程应用 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006.

[6] 曾光奇, 等. Matlab/Simulink 与过程控制系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.

[7] 李 猛. 两轴船载稳定平台控制系统设计与研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.

[8] 荆建立, 王艳春, 朱永庆. 无刷直流电机模糊参数自适应 PID 控制 [J]. 控制工程, 2018, 25 (5): 915-919.

[9] 薛佳乐, 程 珩. 基于串级 PID 四旋翼飞行器控制系统研究 [J]. 电子技术与应用, 2017, 43 (5): 134-137.

[10] 王 卿, 王 汀, 赵军虎, 等. 平台稳定回路模糊 PI 参数在线调整控制 [J]. 导航与控制, 2018 (4): 41-45.

[11] 李贤涛, 张 葆, 孙敬辉, 等. 航空光电稳定平台扰动频率自适应的自抗扰控制 [J]. 红外与激光工程, 2014, (5): 1574-1581.

[12] 王春阳, 彭业光, 史红伟, 等. 光电稳定平台线性自抗扰控制器设计 [J]. 电光与控制, 2018, 25 (11): 112-115.