

基于模糊单神经元 PID 的车载发射装置随动控制策略研究

王旭锋¹, 牛远征², 曾远帆², 殷翔², 姜晓明²

(1. 南京理工大学自动化学学院, 江苏南京 210094; 2. 上海机电工程研究所, 上海 201109)

摘要: 对于车载防空武器系统而言, 往往需要随动系统快速、高精度地跟踪目标, 跟踪效果的优劣直接影响到武器系统作战效能的发挥。为提高随动装置的快速性和精度, 提出一种将单神经元与模糊 PID 控制相结合的位置随动控制策略, 应用机理分析和实验结合的方法建立随动系统数学模型, 并运用 Matlab 中的 Simulink 进行仿真。仿真结果表明: 所提出的随动控制策略, 可以显著提高发射装置的静态、动态跟踪性能, 验证了该随动控制策略的可行性。

关键词: 数学模型; 模糊 PID 控制; 单神经元; 发射装置; 随动控制

中图分类号: TP 273

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.05.014

Research on Follow-up Strategy for Vehicle Launchers Based on Fuzzy Single Neuron PID Control

WANG Xufeng¹, NIU Yuanzheng², ZENG Yuanfan², YIN Xiang², JIANG Xiaoming²

(1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;

2. Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: For vehicle-mounted air defense weapon systems, a fast and high-precision tracking of the target by the follower system is often required, and the tracking effect directly affects the combat effectiveness of the weapon system. In order to improve the rapidity and accuracy of the follower device, a position follower control strategy combining single neuron and fuzzy PID control is proposed, and a mathematical model of the follower system is established by applying a combination of mechanism analysis and experiment, and Simulink in Matlab is used for simulation. The simulation results show that the proposed follower control strategy can significantly improve the static and dynamic tracking performance of the launcher, which verifies the feasibility of the follower control strategy.

Key words: mathematical model; fuzzy PID control; single neuron; launcher; follow-up control

0 引言

随着现代战争模式的迅速变化, 战场上出现越来越多低空、超低空等进攻性武器, 这就需要包括车载导弹发射车在内的防空系统具有快速、高精度、准确打击等能力。作为现代防空体系重要的一环, 车载随动系统的响应速度、跟踪精度、鲁棒性等指标的优劣会直接影响武器系统作战效能的发挥。

对于发射车的随动系统而言, 由于作战环境复杂多变, 机械摩擦、外部扰动等因素持续存在, 动静

态性能也会发生很大变化。在跟踪目标的过程中, 会产生动态滞后, 目标速度变化越快, 滞后越突出, 精确的控制模型往往难以建立。因此, 传统 PID 控制已经不能满足现代战争模式的作战需求^[1]。

多年来, 许多学者致力于模糊 PID、自适应 PID、神经网络 PID 等先进 PID 控制的研究, 用以克服传统 PID 缺陷。其中, 模糊 PID 控制可以很好地应用于非线性时变系统, 但是模型的建立需要大量的经验, 在输入输出上受模糊集的影响较大, 从而

收稿日期: 2021-03-24; 修回日期: 2021-04-06

作者简介: 王旭锋(1979—), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为先进过程控制、模式识别与智能控制等。

通信作者: 牛远征(1993—), 男, 硕士, 主要研究方向为控制工程、目标数据融合等。

导致系统超调、响应慢等问题^[2-4]。自适应PID控制的好坏,取决于辨识模型的精确度,对于复杂系统是特别困难的^[5]。本文提出一种将单神经元与模糊PID控制相结合的位置随动控制策略,以两种控制方法优缺点互补为思路,运用神经网络控制与模糊控制理论,设计出相应的比例 K_p 、积分 K_i 、微分系数 K_d 的动态调整规则,实现PID参数的自整定,以此提高系统的快速性、控制精度和干扰能力^[6]。

1 车载随动系统组成及建模

1.1 车载随动系统组成

车载随动系统的控制对象为发射装置,其随动系统的基本组成如图1所示。

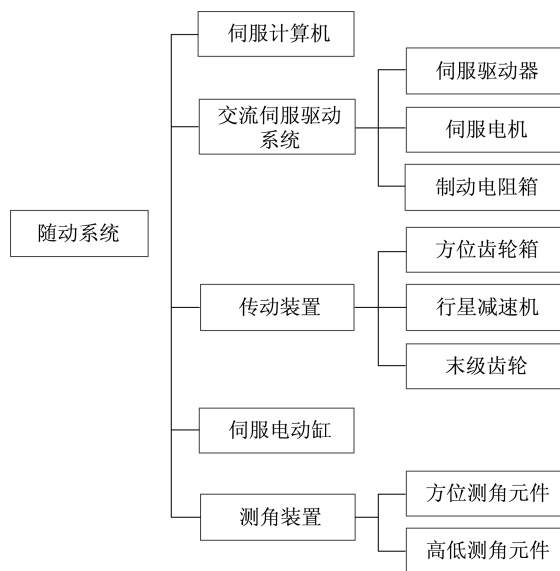


图1 随动系统的基本组成

Fig.1 Basic composition of the follow-up system

伺服计算机是随动系统的控制中枢,接收来自武控计算机发送的发射装置方位角、左/右发射架高低角控制指令,经坐标转换、拉格朗日插值、伺服控制、量纲转换等步骤,向驱动器发送转速控制指令^[7]。交流(Alternating Current, AC)伺服驱动系统为发射装置的驱动机构,系统采用三相交流永磁同步电机,用于给发射装置提供动力力矩。驱动器接收到伺服计算机的转速控制指令后,经功率放大电路,形成驱动电机的电压,电机转动并通过减速器作用于发射装置。发射装置的实际位置通过测角装置发送给伺服计算机,最终形成随动系统的闭环控制^[8]。

1.2 车载随动系统建模

1.2.1 交流伺服驱动系统建模

交流伺服驱动系统包含有速度环和电流环。速度环为外环,主要用于控制电机转速。速度环的反馈来自于电机编码器的旋变信号,经驱动器内部芯片解码后得到转速,由驱动器完成速度环的闭环控制。电流环为内环,主要用于控制电机电流,确保电枢电流在启动瞬间不超过允许值。电流环的反馈来自于驱动器内部安装在每相的霍尔元件,驱动器采样电流值后,完成电流环的闭环控制^[9]。交流伺服驱动系统工作原理图如图2所示。

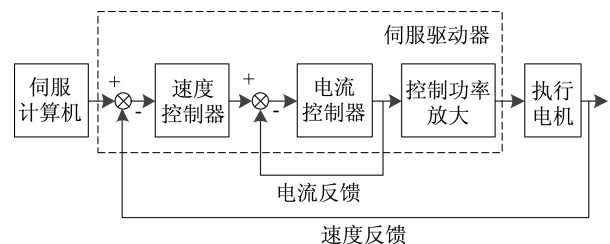


图2 交流伺服驱动系统工作原理

Fig.2 Working principle diagram of the AC servo drive system

由于交流永磁电机内部电磁场关系较为复杂,建立数学模型比较困难。因此,在进行随动仿真时,一般用电枢电压控制的直流电动机进行。为了简化电机模型作如下假设:忽略磁场高次谐波影响、电枢回路电感、转子的绕阻、永磁体的阻尼,以及内部磁场的饱和效应和磁滞带来的损耗。这样驱动放大器就可近似成1个比例环节,执行电机则简化为一阶惯性环节,旋变作为1个积分环节^[10]。由此可得到2阶线性系统模型结构,如图3所示。

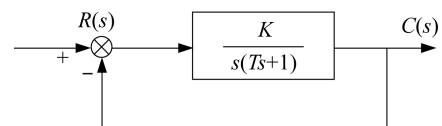


图3 交流伺服驱动系统等效结构

Fig.3 Equivalent structure diagram of the AC servo drive system

图中, $R(s)$ 对应伺服计算机发送的给定转速, $C(s)$ 对应电动机的实际转速。电机参数、负载惯量以及黏性摩擦系数对参数 K 、 T 都有影响。由于参数在工程上难以直接测量和理论计算,一般常采用

脉冲响应、阶跃响应等方法确定参数数值^[11]。本文采用阶跃响应法对交流伺服系统进行辨识,即给驱动器发送适当幅值的阶跃信号,同时测量电动机的转速信号,得到速度环响应的超调量 $\sigma\%$ 和峰值时间 t_p 。根据如下典型 2 阶系统阻尼比 ζ 、无阻尼振荡频率 ω_n 的公式:

$$\zeta = \frac{\ln(1/\sigma)}{\sqrt{\pi^2 + (\ln \sigma)^2}} \quad (1)$$

$$\omega_n = \frac{\pi}{t_p \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (2)$$

可得到交流伺服驱动系统的传递函数为

$$\varphi(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

采用上述方法,以某车载发射车的方位随动系统为例,多次测得方位随动系统的超调量与峰值时间,并求均值以后,根据式(1)、式(2)以及传递函数公式得到交流伺服驱动系统的传递函数为

$$\varphi(s) = \frac{141.67}{s^2 + 16.67s + 141.67} \quad (4)$$

1.2.2 车载随动系统整体建模

根据车载防空武器随动系统的组成及工作原理,将随动系统分为位置环、速度环、电流环,其工作原理图如图 4 所示。

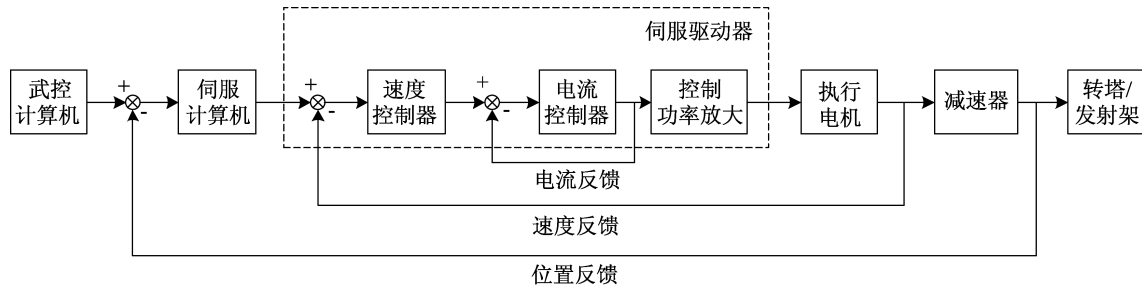


图 4 车载防空武器随动系统的工作原理

Fig. 4 Working principle diagram of the follow-up system for vehicle-borne air defense weapon

以某车载发射车的方位随动系统为例,减速器是齿轮组合结构,减速比 r 为 120,考虑到角速度单位换算系数 100,可得到随动系统从伺服计算机到转塔输出的转角部分的传递函数为

$$G(s) = \varphi(s) \cdot \frac{100}{rs} = \varphi(s) \cdot \frac{100}{120s} = \frac{141.67}{s^2 + 16.67s + 141.67} \cdot \frac{100}{120s} \quad (5)$$

综上,随动系统可近似看成 1 个含积分环节的 3 阶系统。

2 模糊单神经元 PID 控制器

2.1 控制器整体设计

模糊单神经元 PID 控制作用于位置环,运行在伺服计算机软件上。该控制以模糊 PID 控制为主体,引入单神经元控制器实时调整参数。然后将两种算法融合后的 k_p 、 k_i 、 k_d 作用于被控对象,其控制结构如图 5 所示。

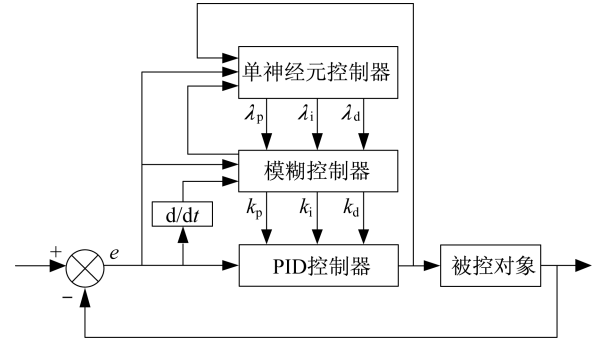


图 5 模糊单神经元 PID 控制结构

Fig. 5 Control structure of the fuzzy single neuron PID

2.2 模糊控制算法

用系统误差 e 和误差变化量 ec 作为模糊 PID 控制输入,比例系数调节量 ΔK_p 、积分系数调节量 ΔK_i 、微分系数调节量 ΔK_d 作为输出,利用模糊控制规则在线对 PID 参数进行修改,以满足不同时刻的 e 和 ec 对 PID 参数自整定要求^[12]。

将模糊 PID 控制输入 e 和 ec 的变化范围,定义为模糊集上的论域: $e, ec = [-3, 3]$ 。其模糊子集为

$e, ec = [NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB]$, 子集元素分别代表“负大”“负中”“负小”“零”“正小”“正中”“正大”。对输入进行尺度变换后,使输入量映射在设定的论域内,目的是对输入模糊化。对输出而言,比例系数调节量 ΔK_p 、积分系数调节量 ΔK_i 、微分系数调节量 ΔK_d 的论域分别设置为 $[-3, 3]$ 、 $[-1, 1]$ 、 $[-1, 1]$, ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 均服从正态分布。以比例系数调节量 ΔK_p 为例,其隶属度函数如图 6 所示。

考虑到不同时刻,3个参数对系统作用以及3个参数之间的相互影响,模糊PID控制在PID控制的基础上对输入模糊化,并根据模糊规则进行模糊推理,查询模糊矩阵表进行参数调整。制定规则如下:当转塔执行角度偏转指令开始,为提高响应速度,增大比例系数,减小微分系数作用;在中后期,

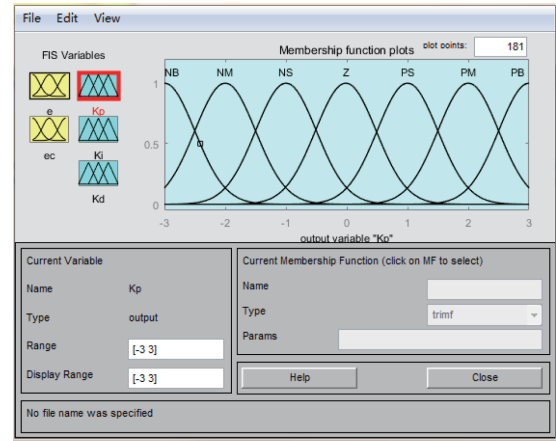


图 6 隶属度函数设置

Fig. 6 Setting of membership functions

增大积分系数,适当减少比例和微分系数的作用^[13]。由此建立输入输出的模糊规则表,见表 1。

表 1 模糊规则表

Tab.1 Fuzzy rule table

		e						
		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
ec	NB	PB,NB,PS	PB,NM,PB	PM,NS,PM	NB,NM,PM	NS,NS,PS	Z,NS,PS	Z,Z,NM
	NM	PB,NM,PB	PM,NM,PB	PS,NS,PM	NB,NS,PS	NS,Z,PS	PS,Z,Z	PM,PS,NM
	NS	PB,NS,PB	PM,NS,PM	PS,Z,PS	Z,Z,PS	Z,Z,PS	PS,Z,Z	PB,PS,NM
	Z	PM,NS,PM	PS,NS,PM	Z,PS,PS	Z,Z,Z	PM,PS,Z	PM,Z,NM	PB,PM,Z
	PS	PM,NM,PM	PS,NS,PS	Z,Z,Z	NS,PS,PS	PM,PS,PS	PM,PS,PS	PB,PB,PM
	PM	PS,NS,PS	Z,Z,Z	NS,PS,PM	NM,PS,PS	PS,PM,PS	PM,PM,PS	PB,PB,PM
	PB	Z,Z,Z	Z,Z,Z	NS,PS,PM	NM,PM,PM	PS,PM,PM	PB,PM,PS	PB,PB,PB

由表 1 以及隶属函数,可得到输出模糊子集的隶属度。解模糊的方法有最大隶属度法、重心法、加权平均法等。本文采用重心法进行反模糊化,使输出为具体值^[14],计算公式如下:

$$f_{ij} = \mu_i(e) \cdot \mu_j(\Delta e) \quad (6)$$

$$u = \frac{\sum_{i,j} f_{ij} \mu_{ij}}{\sum_{i,j} f_{ij}} \quad (7)$$

式中: $\mu_i(e)$ 为系统误差 e 的隶属度; $\mu_j(\Delta e)$ 为系统误差 Δe 的隶属度; f_{ij} 为输出参数的隶属度; u 为模糊控制器的输出; μ_{ij} 为所属的隶属模糊子集,其值由模糊规则表确定。

模糊输出参数公式如下:

$$K_p(k) = \gamma_p(0) \Delta k_p(0) + \sum_{j=1}^k \gamma_p(j) \Delta k_p(j)$$

$$K_i(k) = \gamma_i(0) \Delta k_i(0) + \sum_{j=1}^k \gamma_i(j) \Delta k_i(j)$$

$$K_d(k) = \gamma_d(0) \Delta k_d(0) + \sum_{j=1}^k \gamma_d(j) \Delta k_d(j) \quad (8)$$

式中: $\Delta k_p(0)$ 、 $\Delta k_i(0)$ 、 $\Delta k_d(0)$ 为 PID 控制参数初值; $\gamma_p(j)$ 、 $\gamma_i(j)$ 、 $\gamma_d(j)$ 为模糊输出的修正参数的比例系数; $\gamma_p(0)$ 、 $\gamma_i(0)$ 、 $\gamma_d(0)$ 为比例系数的初值。

2.3 单神经元控制算法

神经网络模拟是根据人脑的思维方式确定的数学模型,主要用于解决复杂的非线性、不确定系统。根据有监督的 Hebb 学习规则,利用输入和输出调整神经元之间连接的权值,设计出自适应控制器^[15],其结构如图 7 所示。

具体算法如下:

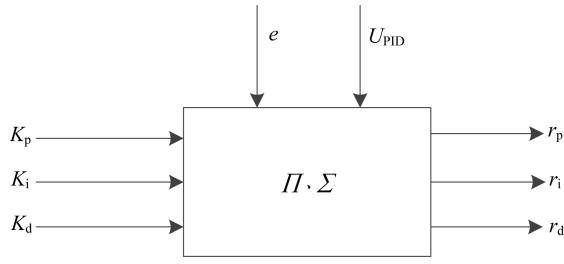


图 7 单神经元结构图

Fig. 7 Diagram of single neuron structure

$$\begin{aligned}
 K_p(k) &= \gamma_p(0) + \sum_{j=1}^k \eta_p \Delta k_p(j) e(j) U_{PID}(j) \\
 K_i(k) &= \gamma_i(0) + \sum_{j=1}^k \eta_i \Delta k_i(j) e(j) U_{PID}(j) \\
 K_d(k) &= \gamma_d(0) + \sum_{j=1}^k \eta_d \Delta k_d(j) e(j) U_{PID}(j) \quad (9)
 \end{aligned}$$

式中: η_p 、 η_i 和 η_d 分别为比例 P、积分 I、微分 D 的学习系数; U_{PID} 为 PID 控制器的输出。其中, 学习系数的制定一般按照经验选取。

3 仿真试验及结果分析

通过 Matlab/Simulink 工具建立随动控制系统仿真模型, 并加入模糊 PID 控制、模糊单神经元 PID 控制进行仿真对比。对于发射车随动控制系统的参数, 在实际调试过程中, 一般运用斜坡信号、正弦信号进行调节^[16]。为了验证模糊单神经元 PID 算法的有效性, 用函数信号发生器分别产生阶跃信号、正弦进行仿真验证。根据对车载随动系统的数学建模、模糊单神经元 PID 控制器设计, 可设计仿真结构如图 8 所示。

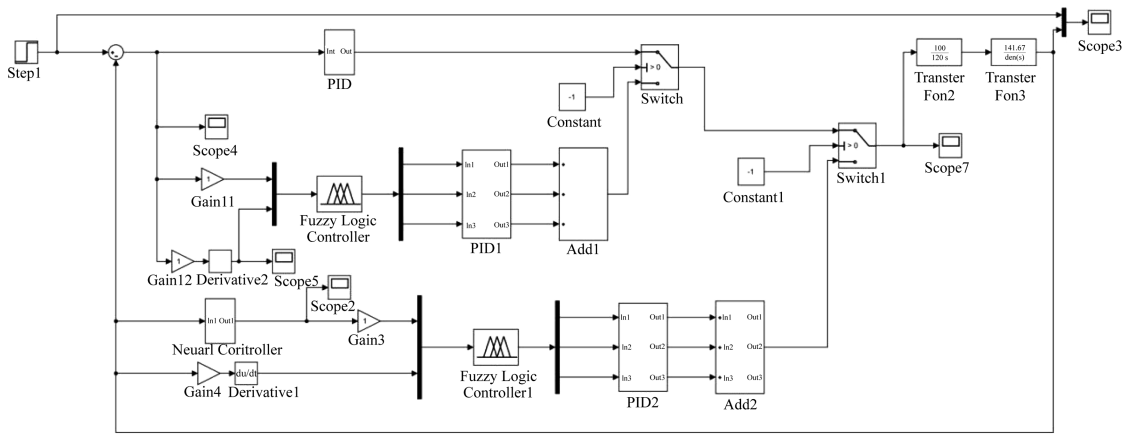


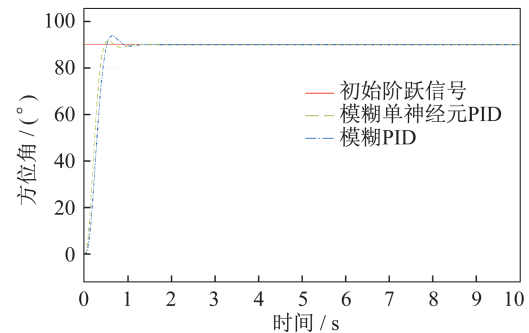
图 8 系统 Simulink 仿真结构

Fig. 8 Simulation structure diagram of the system by Simulink

图 8 中, Fuzzy Logic Controller 为模糊逻辑控制器, Neural Controller 为单神经元控制器, Derivative 为微分环节, Transfer Fcn 为辨识出来的传递函数。通过 Switch 控件选择, 分别实现模糊 PID 控制与模糊单神经元 PID 控制对传递函数的仿真, 并对两者的输出结果进行对比。

在车载发射装置运动过程中, 随动控制系统一般存在最优路径选择, 即最大调转角度为 180° 。在仿真试验中, 选取初值 $\gamma_p(j)$ 、 $\gamma_i(j)$ 、 $\gamma_d(j)$ 为 2.87、0.38、0.19。选取 η_p 、 η_i 和 η_d 学习系数分别为 0.35、0.009、0.05。分别设置模拟输入幅值为 90° 、 180° 的阶跃信号, 幅值为 45° , 周期为 6.28 s 的正弦信号, 并查看模糊 PID 控制、模糊单神经元 PID 控制的仿真结果, 仿真结果如图 9~图 11 所示, 其

中, 横坐标为时间, 纵坐标为发射装置调转的角度。

图 9 幅值为 90° 的阶跃信号的仿真结果Fig. 9 Simulation results of the step signal with amplitude of 90°

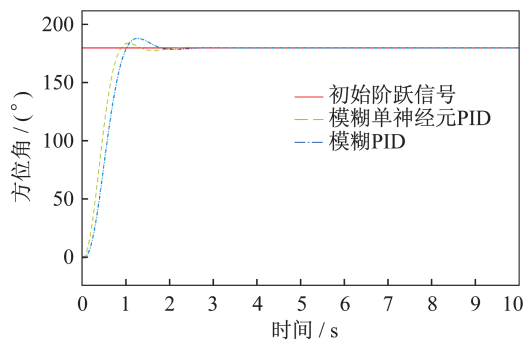


图 10 幅值为 180° 的阶跃信号的仿真结果

Fig. 10 Simulation results of the step signal with amplitude of 180°

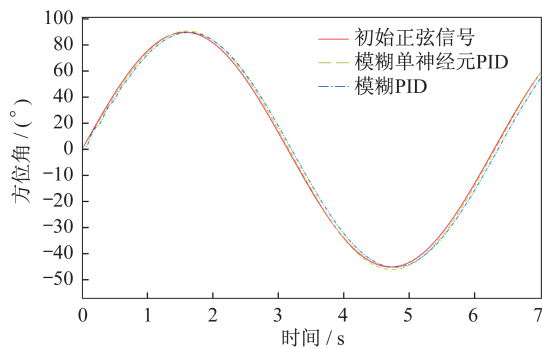


图 11 幅值为 45°、周期为 6.28 s 的正弦信号的仿真结果

Fig. 11 Simulation results of the sinusoidal signal with amplitude of 45° and period of 6.28 s

通过分析对比 2 个控制器的控制性能,整理结果见表 2 和表 3。

表 2 幅值为 90°、180° 的阶跃信号的控制性能

Tab. 2 Control performance of the step signal with amplitude of 90° and 180°

幅值为 90°、180° 阶跃响应的系统指标	随动系统控制策略	
	模糊 PID 控制	模糊单神经元 PID 控制
调节时间/s	1.5/2.8	1.2/2.1
超调量/%	4.7/5.6	1.9/2.2

表 3 幅值为 45°、周期为 6.28 s 的正弦信号的控制性能

Tab. 3 Control performance of the sinusoidal signal with amplitude of 45° and period of 6.28 s

幅值为 45°、周期为 6.28 s 正弦响应系统指标	随动系统控制策略	
	模糊 PID 控制	模糊单神经元 PID 控制
最大初始偏差角/(°)	2.80	1.60
动态跟踪误差/(°)	3.50	0.73

综合仿真结果和分析得出:对于阶跃信号,模糊单神经元PID控制器相比传统模糊PID控制器响应速度要快,且超调量明显缩小;对于正弦信号,模糊单神经元PID控制的最大初始偏差角以及动态跟踪误差均优于模糊PID控制。经过对传统模糊PID控制的改进,模糊单神经元PID控制器具有一定的学习能力和自适应能力,使得发射装置能够快速、准确、稳定地控制、执行随动控制指令,各项性能指标均达到系统作战要求。

4 结束语

本文对发射车随动系统的控制策略进行研究。首先,根据车载随动系统的组成及工作原理进行数学建模,并运用系统辨识及理论分析,得到车载随动系统的传递函数;其次,运用神经网络控制与模糊控制理论,以两种控制方法优缺点互补为思路,设计了单神经元模糊控制的学习规则,将单神经元与模糊PID控制相结合的随动控制;最后,运用Matlab中的Simulink进行仿真。仿真结果表明,相比于传统模糊PID控制,模糊单神经元PID控制可以显著提高发射装置的静态、动态跟踪性能,验证了该随动控制策略的可行性。

参考文献

- [1] 李爱萍,范文晶,丁小琴,等.基于PowerPC平台的某随动控制系统的设计研究[J].空天防御,2018,1(3):11-15.
- [2] 冯华峰.烤箱模糊自整定PID控制系统的设计[D].杭州:浙江理工大学,2019.
- [3] 徐晓东,徐晓辉,任安业.基于参数自整定模糊PID控制的大型液压源温控系统设计[J].上海航天,2010,27(5):60-64.
- [4] 祝相泉,黄海龙,田昊.无刷直流电机模糊PID控制[J].辽宁工业大学学报(自然科学版),2020,40(1):22-25.
- [5] 黄羽韬,徐海祥,余文墨,等.动力定位自适应变论域模糊PID控制器设计[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2020,44(2):311-315.
- [6] 张邦楚,王少锋,王卫华,等.基于单神经元的飞航导弹智能PID控制[J].上海航天,2005,22(5):19-23.
- [7] 姜晓明,王旭烽,张伟芳,等.激光跟踪系统粗精复合轴协同控制策略优化研究[J].空天防御,2019,2(3):31-37.
- [8] 夏芳,谢红军.车载卫星天线用交流伺服系统设计[J].上海航天,2005(1):39-42.

(下转第 130 页)