

火箭弹电动舵机模糊单神经元PID控制算法

孙建飞, 辛长范

(中北大学机电工程学院, 太原 030051)

摘要:针对制导火箭弹电动式舵机,为提高其响应速度和精度,文章在模糊PID控制基础上,提出了模糊单神经元PID控制方法。首先,建立了火箭弹舵机系统模型;然后,将模糊推理、单神经元自学习算法和PID控制相结合,建立智能控制系统,以实现舵机输入指令的精确、快速响应。经仿真实验表明:在此智能控制下,舵机位置在阶跃响应的调节时间、超调量以及正弦跟踪上相对于传统模糊PID控制均得到有效改进,具有良好的动静态性能、自适应性和稳定性。

关键词:电动式舵机;模糊推理;单神经元;PID控制器

中图分类号:TP13

文献标志码:A

随着高新技术的发展和为满足现代战争局部化的需求,精确打击能力和控制智能化正在引入制导弹药导航与控制中。现代智能火箭弹制导系统的主要控制形式是:采用精确导引和智能控制技术,在弹的飞行过程中能够实时测量弹与理想弹道的误差,并通过弹上的控制执行机构及时修正实际弹道,最终达到精确打击目的^[1]。舵机系统是火箭弹飞行控制的执行机构,控制弹的飞行很大程度上就落实到舵机的控制上。因此,舵片的位置能否在其控制系统下快速准确响应和超调是否较小,这成为制导弹药能否精确制导的重要指标^[2]。

对于智能火箭弹,其飞行环境复杂多变,使得火箭舵机伺服系统动态特性实时变动。如果火箭弹在常规PID控制下,其控制参数在几乎整个控制飞行进行中变化缓慢,这样会造成精度低和抗干扰性较差等缺点^[3]。随着计算机技术的发展,出现了专家PID控制器,这种控制器必须精确地确定对象模型和对长期实践经验的控制规则模型化,但是对于操作者经验不易精确描述,控制过程中各种信号量以及评价指标不易定量表示,专家PID方法受到限制。模糊理论为解决这一问题的有效途径^[4],把规则条件和操作用模糊集表示,并把这些模糊控制规则以及有关信息作为知识存入计算机知识库中,然后计算机根据控制系统的实际响应情况,应用模糊推理即可实现自动对PID参数的最佳调整。模糊PID控制能够很好地适应被控对象非线性和环境时变性,具有较强的稳定性,因而其算法更加符合舵机的控制需求。

但是,模糊数学的建立有着对大量控制经验的要

求^[5],并在输入、输出上难免受到其论域范围有限和模糊子集划分欠妥的影响,导致模糊控制的响应慢,超调量大。对于这些问题,需要对传统模糊PID进行相应的改进,以更好地满足智能火箭弹对舵机控制高标准的要求。

根据上述分析,在此提出模糊单神经元PID控制,将模糊推理与单神经元算法融合之后,再利用PID控制输出,以2种算法的优劣互补为思路,设计出一种能快速精确响应的智能PID控制器,提高了舵机控制系统的控制精度、稳定性和抗干扰能力。

1 制导火箭弹舵机系统建模

1.1 舵机系统的工作原理

弹体在大气飞行的过程中,为达到弹最终控制在预定弹道下飞行的目的,一般需要修改弹体周围的空气动力,来改变弹的受力情况^[6]。

可控火箭弹是通过舵片的偏转改变弹体所受到的导转力矩、升力和阻力,从而改变对自身的控制力^[7]。在飞行控制阶段中,弹载计算机接收并处理弹体的位置和姿态信息,最后输出所需的舵偏角指令,输出的舵偏角指令经过功率放大电路形成可驱动电机转动的电压,电机的转动通过齿轮组的减速最终作用在舵片上,舵片位置再通过传感器反馈给控制系统,最终完成对舵机的控制^[8]。所以,对于舵偏指令,舵机系统需要作出快速和准确的响应,并且要做到超调量较小,才能使火箭弹能够稳定在理想弹道下飞行。

1.2 舵机系统的结构

可控火箭弹舵机系统主要组成有:控制器、信号功率放大器、直流伺服电机、减速器和舵偏角传感器。功率放大器是由脉宽调制器以及开关控制电路等部分组成;直流伺服电机分为有刷直流电动机和无刷直流电动机,一般在军工上采用无刷直流电机,减速器一般采用齿轮组合机构^[9]。

1.3 舵机系统模型建立

1.3.1 无刷直流电机建模

电动机是舵机的核心动力执行元件,无刷直流电机主要由定子和转子组成,系统选用星型三相六状态无刷直流电机^[10]。

三相无刷直流电机定子电压方程为:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a & 0 & 0 \\ 0 & L_b & 0 \\ 0 & 0 & L_c \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中: L 为定子绕组电感; E 表示绕组电动势; I 表示绕组电流; U 表示电压; t 表示时间; R 为电阻。

通过等效电路法将电机电路简化,可以得到简化后的电压方程为:

$$U_d = R_d I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} + E_d \quad (2)$$

感应电动势方程为:

$$E_d = K_T \omega_d \quad (3)$$

负载电机转矩方程为:

$$T_e = J \frac{d\omega_d}{dt} + B_d \cdot \omega_d + T_L = K_T \cdot I_d \quad (4)$$

式(2)~(4)中: U_d 表示电源电压; R_d 表示回路总电阻; I_d 表示电枢电流; E_d 表示感应电动势; L_d 表示总电感; T_L 为电机负载转矩; ω_d 为电机机械角速度; T_e 为负载转矩; J 为定子的转动惯量; K_T 为转矩系数; B_d

为摩擦阻力因素^[11]。

由此建立有负载转矩的无刷直流电机模型,其系统结构如图1所示,图中 θ_d 为电机输出转角。

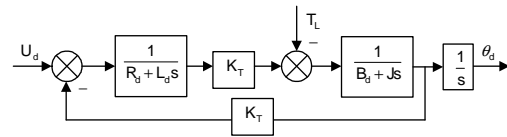


图1 有负载转矩的无刷直流电机系统结构

Fig.1 Brushless DC motor system structure with load torque

1.3.2 舵面动力模型建立

由舵片旋转产生的力矩为铰链力矩,即流过舵面的气流对舵轴形成的空气动力矩^[12],计算公式为:

$$T_H = m_h \frac{\rho v^2}{2} b_l S_l \theta_l \quad (5)$$

式(5)中: T_H 为铰链力矩; ρ 为空气密度; v 为弹的空速; S_l 为舵面面积; b_l 为舵面压心与弹轴距离; m_h 为铰链力矩系数导数; θ_l 为舵偏角。

舵片偏转角为:

$$\theta_l = \frac{\theta_d}{N} \quad (6)$$

舵偏角传感器的角度转化式为:

$$u_r = K_r \theta_l \quad (7)$$

式(7)中: u_r 为传感器信号; N 为减速器传动比; K_r 传感器角度转换比^[13]。

1.3.3 舵机系统整体模型

根据舵机系统的组成和功能,将电机系统设计为电流环、转速环和位置环三闭环系统模型,最终舵机系统建立的模型如图2所示。电流环和转速环为内环,模拟实时的电机电流和转速;外环为位置环,响应舵偏指令 y_d , 精准控制舵机位置^[14]。

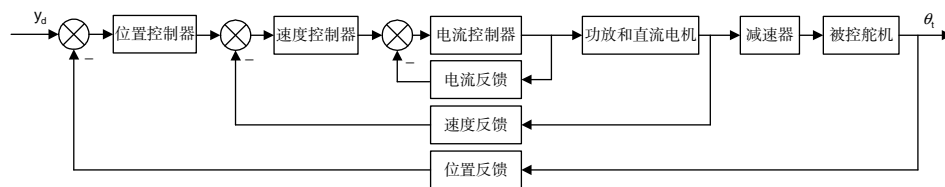


图2 电动舵机系统

Fig.2 Electric steering gear system

2 模糊单神经元PID控制器

2.1 智能控制器整体设定

此智能PID控制器位于位置控制环,控制器结构

主要是:以模糊PID控制为主框架,引入结构较为简单的单神经元在线修改部分参数;然后,将输出的比例系数 k_p 、积分系数 k_i 和微分系数 k_d 传送到PID控制器中;最终,由PID的输出控制目标对象,其结构原理如图3所示。

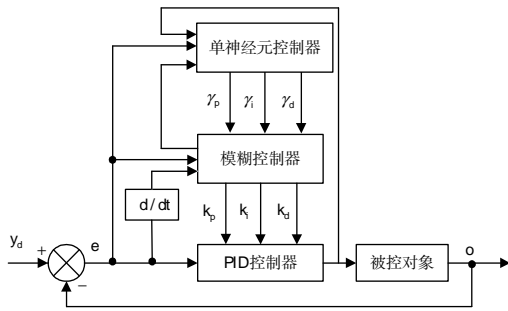


图3 模糊单神经元PID控制器

Fig.3 Fuzzy single neuron PID controller

2.2 智能控制算法

2.2.1 输入变量模糊化

首先,根据模糊控制器输入变量的变化范围定义模糊集上的论域:

$$\begin{cases} e = [-3, 3] \\ \delta = [-3, 3] \end{cases} \quad (8)$$

误差 e 和误差变化率 δ 的模糊子集为:

$$\begin{cases} e = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\} \\ \delta = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\} \end{cases} \quad (9)$$

子集元素分别代表“负大”“负中”“负小”“零”“正小”“正中”和“正大”^[15]。

输入模糊化就是对输入尺度变换,使变量适应在设定的论域中,设误差 e 和误差变化率 δ 的变换系数为 γ_e 、 γ_δ ,则模糊化后的值分别为 $\gamma_e e$ 和 $\gamma_\delta \delta$ 。比例系数调节量 Δk_p 、积分系数调节量 Δk_i 和微分系数调节量 Δk_d 的模糊子集均服从正态分布, e 、 δ 的隶属度函数图见图4,因而可得出模糊子集的隶属度^[16]。 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 的论域分别设为 $[-3, 3]$ 、 $[-1, 1]$ 和 $[-1, 1]$ 。

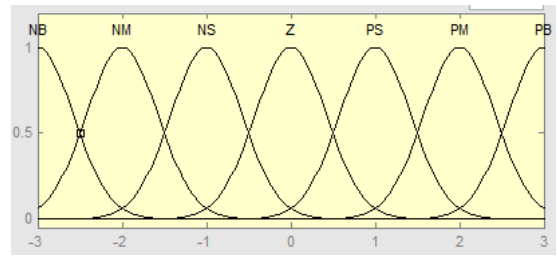


图4 e 、 δ 隶属度函数图

Fig.4 Membership function graph of e and δ

2.2.2 模糊规则设置

模糊PID控制以误差 e 和误差变化率 δ 作为输入,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 δ 对PID参数自整定要求。

离散型PID控制算法为:

$$u(k) = k_p e(k) + k_i T \sum_{j=0}^k e(j) + k_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (10)$$

式(10)中: $u(k)$ 为PID输出; $e(k)$ 为误差; k 为采样序号; T 为采样时间。

再考虑 k_p 、 k_i 和 k_d 的作用:

1)比例系数 k_p 的作用是加快系统响应速度,提高系统调节精度。

2)积分系数 k_i 可消除系统稳态误差。

3)微分系数 k_d 可改善系统的动态特性,抑制误差的扩大,对误差变化作出预报,缩小控制量动态振荡。

制定规则:在电动舵机执行偏转命令开始阶段,增大比例系数取值,减小微分系数;在后期则相应地减小比例和微分系数的作用,扩大积分系数^[17]。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 list

$\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$	e							
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB	
δ	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和隶属函数可得出输出模糊子集的隶属度,再利用重心法进行反模糊化得到模糊控制器输出,计算式分别如下:

$$f_{ij} = \mu_i(e) \cdot \mu_j(\delta); \quad (11)$$

$$u = \frac{\sum_{i,j} f_{ij} u_{ij}}{\sum_{i,j} f_{ij}} \quad (12)$$

式(11)、(12)中: $\mu_i(e)$ 、 $\mu_j(\delta)$ 分别为 e 、 δ 的隶属度;

f_{ij} 为输出参数的隶属度; u 为模糊控制器输出; u_{ij} 为所隶属模糊子集, 其值由模糊规则表确定。

2.2.3 模糊输出参数

模糊控制输出参数为:

$$k_p(k) = \gamma_p(0)\Delta k_p(0) + \sum_{j=1}^k \gamma_p(j)\Delta k_p(j); \quad (13)$$

$$k_i(k) = \gamma_i(0)\Delta k_i(0) + \sum_{j=1}^k \gamma_i(j)\Delta k_i(j); \quad (14)$$

$$k_d(k) = \gamma_d(0)\Delta k_d(0) + \sum_{j=1}^k \gamma_d(j)\Delta k_d(j)。 \quad (15)$$

式(13)~(15)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。

比例系数的确定直接影响着PID控制性能, 传统模糊PID的比例系数是根据经验所得^[18]。

2.2.4 比例系数的单神经元自整定法

根据有监督 Hebb 学习规则, 设计有自学习能力的单神经元自适应系数调整器^[19], 其结构如图5所示。

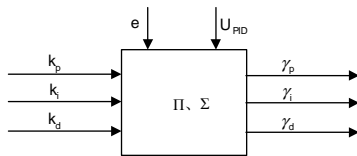


图5 单神经元结构图

Fig.5 Structure diagram of single neuron

具体算法为:

$$\gamma_p(k) = \gamma_p(0) + \sum_{j=1}^k \eta_p \cdot \Delta k_p(j) \cdot e(j) \cdot U_{PID}(j); \quad (16)$$

$$\gamma_i(k) = \gamma_i(0) + \sum_{j=1}^k \eta_i \cdot \Delta k_i(j) \cdot e(j) \cdot U_{PID}(j); \quad (17)$$

$$\gamma_d(k) = \gamma_d(0) + \sum_{j=1}^k \eta_d \cdot \Delta k_d(j) \cdot e(j) \cdot U_{PID}(j)。 \quad (18)$$

式(16)~(18)中: η_p 、 η_i 和 η_d 分别为比例、积分、微分的学习系数; U_{PID} 为PID控制器的输出。

3 仿真分析

通过 Matlab-Simulink 工具建立火箭弹舵机控制系统仿真模型。选用的无刷直流电机参数: 额定电压 36 V, 额定电流 6.7 A, 电枢回路总电阻 0.78 Ω , 电枢回路总电感 1.25×10^{-3} H, 转矩系数 0.097 N·m/A, 反电动势系数 7.3V/krpm, 机械时间常数 4.33×10^{-3} s^[20], 功率放大系数 5, 减速器传动比为 210, γ_p 、 γ_i 和 γ_d 初值分别为 4、0.5 和 0.25, 学习系数 η_p 、 η_i 、 η_d 分别为

0.4、0.015、0.1。

针对控制系统输入阶跃信号和正弦信号的响应和静态特性来做仿真验证, 模型中的电流环和速度环封装于舵机伺服系统中, 系统仿真结构如图6所示, 并得到仿真结果如图7~10所示。

在实验验证中, 分别输入幅值为 0.4、0.5、0.6 的阶跃信号和振幅为 1 的正弦信号, 并收集输出结果, 观察对比 2 个控制器的控制性能, 整理得出表 2。

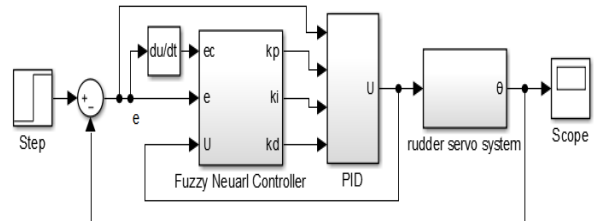


图6 系统仿真结构

Fig.6 System simulation architecture

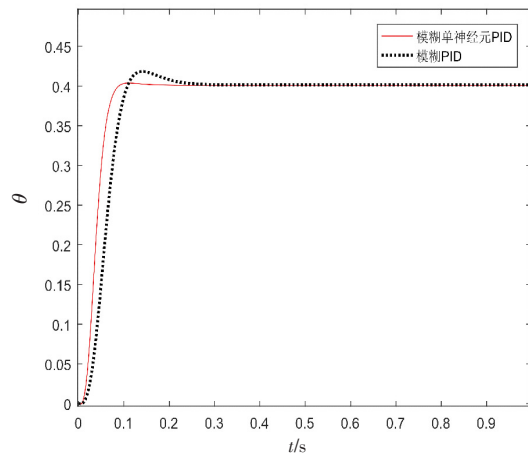


图7 幅值为0.4的阶跃响应

Fig.7 Step response with amplitude of 0.4

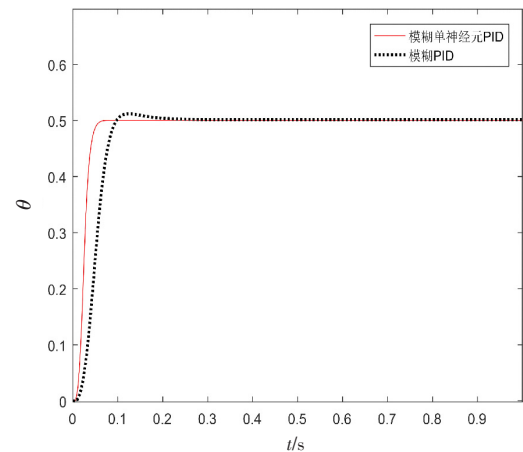


图8 幅值为0.5的阶跃响应

Fig.8 Step response with amplitude of 0.5

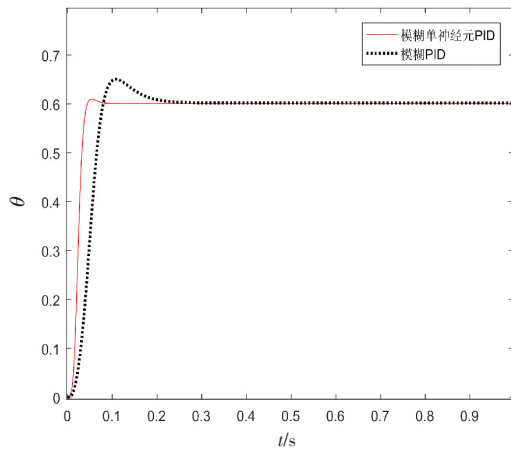


图9 幅值为0.6的阶跃响应

Fig.9 Step response with amplitude of 0.6

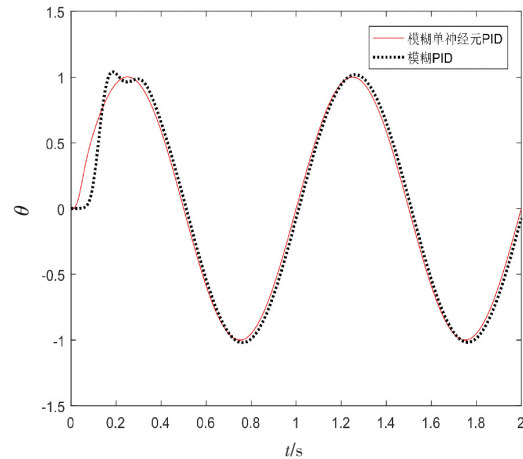


图10 振幅为1的正弦跟随

Fig.10 Sinusoidal tracking of amplitude 1

表2 控制器的性能指标

Tab.2 Performance indicators of the controller

控制器类型	幅值为0.4/0.5/0.6阶跃响应		振幅为1的正弦跟随	
	调节时间/s	超调量/%	最大舵角/rad	相位移动/ms
模糊PID	0.16/0.18/0.14	5/2.5/8.3	1.05	9
模糊单神经元PID	0.084/0.045/0.04	0.75/0.4/1.5	1.03	5

综合上述结果和分析得出:模糊单神经元PID相比传统模糊PID阶跃响应速度要快,超调量明显缩小,动态时间缩短 0.1 s 左右;在正弦跟随方面减小了 4 ms 的跟随滞后,舵偏角的最大误差也明显减小。由此可见,模糊单神经元PID控制算法改进了传统模糊PID,能够快速、准确、稳定地控制、执行舵偏指令,符合火箭弹弹道修正对舵机控制的要求。

4 结束语

本文研究了火箭弹电动舵机的模糊单神经元PID控制算法。首先,对火箭弹舵机系统进行建模;再立足于模糊推理和Hebb学习规则设计了参数自整定的模糊单神经元PID控制算法;最后,经仿真验证,模糊单神经元PID控制相比传统模糊PID控制,其信号响应的动态特性和跟踪性能均得到改善,并且降低了模糊控制对经验积累的要求,在提高舵面控制的快速性和准确性的同时,使得控制器的设计得到简化。

参考文献:

[1] 谷贤良,温炳恒. 导弹总体设计原理[M]. 西安:西北工业大学出版社,2004:2-10.
GU XIANLIANG, WEN BINGHENG. General design principle of missile[M]. Xi' an: Northwest Polytechnic

University Press,2004:2-10. (in Chinese)

[2] 王生明. 制导炮弹电动舵机控制器设计与分析[D]. 南京:南京理工大学,2010.
WANG SHENGMING. Design and analysis of electric steering gear controller for guided projectile[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology,2010. (in Chinese)

[3] 傅强. 弹载电动舵机控制控制系统研究[D]. 石家庄:河北科技大学,2011.
FU QIANG. Research on control system of ballistic electric steering gear[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology,2011. (in Chinese)

[4] 刘金锴. 智能控制[M]. 北京:电子工业出版社,2017:141-145.
LIU JINKUN. Intelligent control[M]. Beijing: Electronics Industry Press,2017:141-145. (in Chinese)

[5] 邓宏彬. 中小型智能弹药舵机系统设计与应用技术[M]. 北京:国防工业出版社,2016:30-32.
DENG HONGBIN. Design and application technology of small and medium-sized intelligent ammunition steering engine system[M]. Beijing: National Defense Industry Press,2016:30-32. (in Chinese)

[6] 牛鑫培. 制导弹药气动舵机关键技术分析及解决办法[D]. 南京:南京理工大学,2008.

- NIU XINPEI. Key technology analysis and solution of guided ammunition pneumatic steering gear[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- [7] 刘宗源,高敏,王毅,等.可控滚转弹道修正引信电动舵机系统仿真[J].舰船电子工程,2019,39(3):93-97.
LIU ZONGYUAN, GAO MIN, WANG YI, et al. Simulation of controlled rolling trajectory correction fuze electric rudder system[J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39(3):93-97. (in Chinese)
- [8] 景蓉,彭舒钰.小型电动比例舵机研究[J].航空兵器,2002,8(3):18-20.
JING RONG, PENG SHUYU. Research on small electric proportional steering gear[J]. Aeronautical Weapons, 2002, 8(3):18-20. (in Chinese)
- [9] 毛文晋.电动舵机系统的设计与试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.
MAO WENJIN. Design and experimental study of electric steering gear system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011. (in Chinese)
- [10] 张训文.电机一体化设计与应用[M].北京:北京理工大学出版社,2006:83-85.
ZHANG XUNWEN. Motor integration design and application[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006:83-85. (in Chinese)
- [11] 王益全.电动机原理与实用技术[M].北京:科学出版社,2005:43-45.
WANG YIQUAN. Motor principle and practical technology[M]. Beijing: Science Press, 2005:43-45. (in Chinese)
- [12] 秦豪.简易制导舵机技术研究[D].南京:南京理工大学,2011.
QIN HAO. Research on simple guidance steering gear technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [13] 王占林,李培滋.飞机液压传动与伺服控制[M].北京:国防工业出版社,1983:121-122.
WANG ZHANLIN, LI PEIZI. Aircraft hydraulic transmission and servo control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1983:121-122. (in Chinese)
- [14] 韩红业.舵机电动力加载台控制系统设计与仿真[D].西安:西北工业大学,2007.
HAN HONGYE. Design and simulation of control system of steering gear electric power loading platform[D]. Xi'an: Northwest Polytechnic University, 2007. (in Chinese)
- [15] 郭杨光,赵怀林,祝波.基于模糊控制的电动舵机控制器设计与实现[J].电力电子技术,2019,53(5):21-23.
GUO YANGGUANG, ZHAO HUAILIN, ZHU BO. Design and implementation of electric steering gear controller based on fuzzy control[J]. Power Electronics, 2019, 53(5):21-23. (in Chinese)
- [16] 刘金琨.先进PID控制Matlab仿真[M].北京:电子工业出版社,2016:191-195.
LIU JINKUN. Advanced PID control Matlab simulation [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2016: 191-195. (in Chinese)
- [17] 陈军勇,梁孜.模糊自适应飞控舵面控制算法研究[J].控制技术,2014,22(4):1065-1068,1072.
CHEN JUNYONG, LIANG ZI. Research on fuzzy adaptive rudder control algorithm[J]. Control Technology, 2014, 22(4):1065-1068, 1072. (in Chinese)
- [18] 张晓峰,杨军,祝小平.高精度电动舵机模糊自适应控制器设计[J].弹箭与制导学报,2010,30(1):30-32.
ZHANG XIAOFENG, YANG JUN, ZHU XIAOPING. Design of fuzzy adaptive controller for high precise electromechanical actuator steering gear[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010, 30(1):30-32. (in Chinese)
- [19] 王士同.神经模糊系统及其应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,1998:63-65.
WANG SHITONG. Neural fuzzy system and its application[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1998:63-65.
- [20] 谢仕宏. Matlab控制系统动态仿真实例教程[M].北京:化工工业出版社,2009:138-140.
XIE SHIHONG. Matlab control system dynamic simulation example course[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009:138-140. (in Chinese)

(下转第510页)