

引用格式:金鹏程,高强,侯远龙,等.某舰载火箭炮交流伺服系统复合控制研究[J].电光与控制,2019,26(12):49-53. JIN P C, GAO Q, HOU Y L, et al. Composite control of AC servo system of a shipborne rocket launcher[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(12):49-53.

某舰载火箭炮交流伺服系统复合控制研究

金鹏程, 高强, 侯远龙, 何禹锟
(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要:针对舰载火箭炮交流伺服系统控制速度与精度的问题,提出了一种RBF神经网络PID-模糊复合控制策略。该复合控制策略根据误差信息调节两种控制方法对被控对象的作用权值,使两种控制方法无扰动地切换,实现最终的控制量连续稳定输出。仿真实验结果表明,该控制策略较好地综合了RBF神经网络PID控制和模糊控制的优势,控制精度高,系统响应快、震荡小,能够更好地满足舰载火箭炮交流伺服系统的性能指标要求。

关键词:舰载火箭炮;交流伺服系统;RBF神经网络;模糊控制;复合控制

中图分类号:TN820.3 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.12.010

Composite Control of AC Servo System of a Shipborne Rocket Launcher

JIN Peng-cheng, GAO Qiang, HOU Yuan-long, HE Yu-kun

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Aiming at the control speed and accuracy of the AC servo system of the ship-borne rocket launcher, a composite control strategy combining RBF neural network based PID control with fuzzy control is proposed. The composite control strategy adjusts the weights of the two control methods on the controlled object according to the error information, so as to switch the two control methods without disturbance, and realize the continuous and stable output of the final control quantity. The simulation results show that the control strategy combines the advantage of RBF neural network based PID control with that of fuzzy control, and has high control precision, fast system response speed and small oscillation, which can better meet the performance requirements of the AC servo system of the ship-borne rocket launcher.

Key words: shipborne rocket launcher; AC servo system; RBF neural network; fuzzy control; composite control

0 引言

舰载火箭炮在军舰上发射时,主要受到海洋情况影响,同时存在燃气流冲击力矩等强干扰,会导致发射平台和发射管产生振动。在此状况下,海洋环境条件下的外部扰动和内部参数摄动会造成系统的不稳定,从而影响火箭炮的射击精度以及跟踪精度。因此,研究如何把智能控制策略应用到舰载火箭炮交流伺服控制中,提高火箭炮射击精度以及整体性能,具有重要的理论意义和应用价值。目前,PID控制广泛应用于工控领域,已经相当成熟,但其对系统中有参数摄动以及大负载变化的系统无法有效控制。舰载火箭炮交流伺

服系统具有的时变性、大干扰力矩、大范围转动惯量特点使得常规PID控制很难实现系统的动态和稳态性能指标。因此,将智能控制与PID控制相结合的思想已经得到了广大学者的认可。文献[1]提出采用BP神经网络PDFF作为控制器,提升系统参数自整定效果;文献[2]采用RBF神经网络PID控制方法,使得系统的自我学习能力和响应能力增强。

RBF神经网络对非线性系统具有强大的映射能力,不仅能实现全局最优,还能逼近任意模型^[3-5]。模糊控制的稳定性能优越,系统控制的效果基本不受外界干扰和相关参数变化的影响^[6-9]。由此,本文提出了将RBF神经网络PID控制与模糊控制相结合的复合智能控制策略应用于舰载火箭炮交流伺服系统的控制,仿真实验与半实物仿真实验都取得了良好的控制效果。该复合控制策略综合了神经网络PID控制与模

收稿日期:2018-12-25

修回日期:2019-01-21

作者简介:金鹏程(1992—),男,河南信阳人,硕士生,研究方向为伺服系统与智能控制。

糊控制各自的优点,使得系统能够以低跟踪误差的形式快速响应,满足系统要求。

1 系统结构与建模

1.1 交流伺服系统组成

舰载火箭炮交流伺服系统结构如图1所示。该系统主要由舰炮火控系统、控制计算机、D/A转换电路、功率放大电路、交流调速系统、旋转变压器、RDC转换模块等组成。

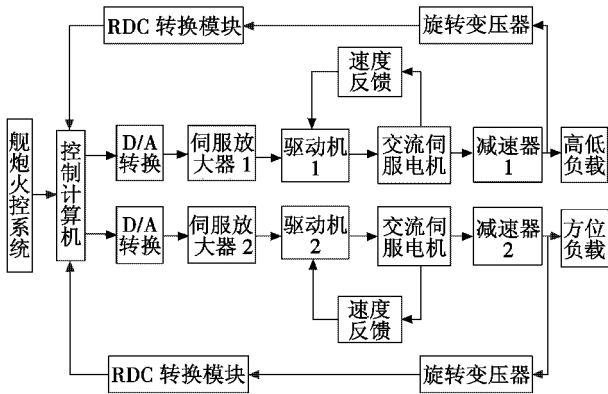


图1 舰载交流伺服系统结构

Fig.1 Structure of shipborne AC servo system

系统的主要流程如下:首先舰炮火控系统给出输出角度信息,控制计算机计算出实时控制信号,经D/A模块转换为数字量信号,伺服放大器放大数字量信号;然后通过驱动器控制电机,此过程会有一个速度反馈来调整电机的转速;最后减速器把机械动力传送到负载中。减速器输出的信息会被多级旋转变压器采集,经RDC转换后反馈至控制计算机中。

1.2 系统建模

由于舰载交流伺服系统是由俯仰和方位的位置伺服系统构成,其基本原理相同,因此只需要对其一进行建模即可。舰载火箭炮交流伺服系统可简化为图2所示的结构图。

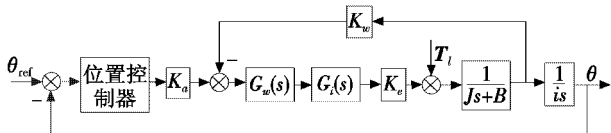


图2 伺服系统结构框图

Fig.2 Block diagram of servo system

图2中: θ_{ref} 为目标位置; θ 为负载当前角度; K_a 为放大器增益系数; $G_w(s)$ 为速度环传递函数; $G_i(s)$ 为电流环传递函数; K_e 为转矩系数; B 为粘性摩擦系数; i 为减速比; K_w 为速度反馈系数; T_i 为负载扰动转矩。

考虑到电流环最突出的要求在于其跟随性能,故此电流环采用PI控制器,其中,控制滞后的电压逆变

器均可看成是时间常数为 T_v 和控制增益为 K_v 的一阶惯性环节,其传递函数表示为

$$G_v = \frac{K_v}{T_v s + 1} \quad (1)$$

基于速度环控制不能有静态误差的要求,速度调节器采用PI控制,其传递函数为

$$G_w(s) = K_s \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (2)$$

式中, K_s 为速度环控制器系数和 T_i 积分的时间常数。若忽略粘性摩擦系数 B 和负载扰动转矩 T_i 的影响,可以得到速度环的开环传递函数为

$$G'_w(s) = \frac{K_s K_c (T_s + 1)}{J s^2 T_s \left(\frac{s}{K'} + 1 \right)} \quad (3)$$

式中, $\frac{1}{K'}$ 为电流环的积分时间常数。从而可得此伺服控制系统在位置环开环情况下的传递函数为

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{G'_w(s)}{1 + K_w G'_w(s)} \times \frac{K_a}{i s} \quad (4)$$

式中, i 为减速比。将式(3)代入式(4)可得

$$G(s) = \frac{K_a K_s K_c (T_s + 1)}{i s \left[J s^2 \left(\frac{s}{K'} + 1 \right) + K_s K_c K_w (T_s s + 1) \right]} \quad (5)$$

2 复合控制策略设计

2.1 RBF神经网络PID控制器设计

鉴于传统的PID控制在系统状态和参数等发生变化时难以达到最佳的控制效果,而舰载交流伺服系统又具有很强的非线性、时变性的特点,因而,本文针对PID控制器的参数采用RBF神经网络输出梯度信息的方法进行在线调整。

RBF神经网络PID控制器结构如图3所示。

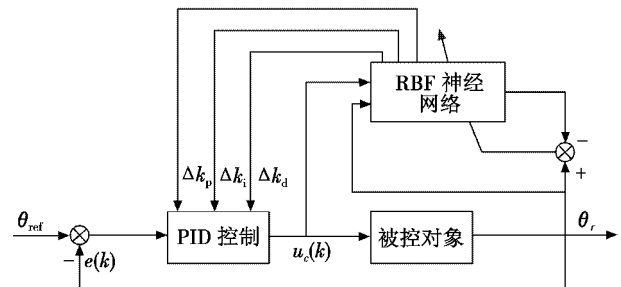


图3 RBF神经网络PID控制器结构图

Fig.3 Structure diagram of RBF neural network PID controller
控制器的输入为

$$x_1(k) = e(k) - e(k-1) \quad (6)$$

$$x_2(k) = e(k) \quad (7)$$

$$x_3(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \quad (8)$$

式中, $e(k)$ 为误差信号,

$$e(k) = \theta_{\text{ref}} - \theta, \quad (9)$$

定义神经网络的性能指标为

$$E = \frac{1}{2}(e(k))^2 \quad (10)$$

RBF 神经网络 PID 控制器可根据外界变化自动实时调整响应参数以适应环境,控制算法为

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (11)$$

$$\Delta u(k) = \Delta u_p(k) + \Delta u_i(k) + \Delta u_d(k) \quad (12)$$

$$\Delta u_p(k) = k_p(e(k) - e(k-1)) \quad (13)$$

$$\Delta u_i(k) = k_i e(k) \quad (14)$$

$$\Delta u_d(k) = k_d(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (15)$$

其中, k_p, k_i, k_d 调整采用梯度下降法,即

$$\Delta k_p = -\eta_{kp} \frac{\partial E}{\partial k_p} = -\eta_{kp} \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \Delta u} \frac{\partial \Delta u}{\partial k_p} = \eta_{kp} e(k) \frac{\partial y}{\partial \Delta u} x_1(k) \quad (16)$$

$$\Delta k_i = -\eta_{ki} \frac{\partial E}{\partial k_i} = -\eta_{ki} \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \Delta u} \frac{\partial \Delta u}{\partial k_i} = \eta_{ki} e(k) \frac{\partial y}{\partial \Delta u} x_2(k) \quad (17)$$

$$\Delta k_d = -\eta_{kd} \frac{\partial E}{\partial k_d} = -\eta_{kd} \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \Delta u} \frac{\partial \Delta u}{\partial k_d} = \eta_{kd} e(k) \frac{\partial y}{\partial \Delta u} x_3(k) \quad (18)$$

式中: $\eta_{kp}, \eta_{ki}, \eta_{kd}$ 为学习速率; $\frac{\partial y}{\partial \Delta u}$ 为被控对象通过 RBF 神经网络辨识得到的雅可比信息。

2.2 模糊控制器设计

模糊 PID 控制的输入量是误差信息,包括位置偏差 e 和偏差变化率 e_c 参数,这两个输入量通过模糊化、模糊推理及清晰化这一模糊调整机构对 PID 控制器的参数进行调整。整个模糊控制器中 k_p, k_i, k_d 为模糊控制的输出量,电压为整个模糊 PID 控制的输出,具体结构如图 4 所示。

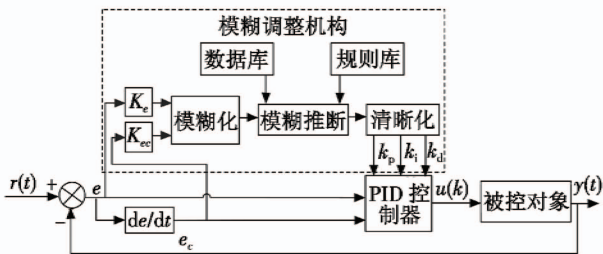


图 4 模糊 PID 控制结构图

Fig.4 Structure of fuzzy PID control

本文将输入的误差信息的论域均设置为 $[-3, 3]$, 而将输入输出的模糊子集均设置为 $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ 。为保持模糊系统的统一性,输出量 k_p, k_i, k_d 的论域和模糊子集划分与输入量相同。

为了实现对 PID 参数的模糊控制,需要建立一套参数调整规则使 PID 控制器能够在系统运行的不同阶段都有不同的控制重点,最终实现快速、准确且稳定的系统控制。 k_p, k_i, k_d 的模糊控制规则如表 1 ~ 表 3 所示。

表 1 k_p 模糊规则

Table 1 k_p fuzzy rule

e	e_c						
	NH	NM	NL	Z	PL	PM	PH
NH	PH	PH	PH	PM	PL	Z	Z
NM	PH	PM	PM	PL	Z	Z	NL
NL	PH	PM	PM	PL	Z	NL	NM
Z	PH	PM	PL	Z	NL	NM	NH
PL	PL	PL	Z	NL	NM	NM	NH
PM	PL	Z	Z	NL	NM	NH	NH
PH	Z	Z	NL	NM	NH	NH	NH

表 2 k_i 模糊规则

Table 2 k_i fuzzy rule

e	e_c						
	NH	NM	NL	Z	PL	PM	PH
NH	NH	NH	NH	NM	NM	Z	Z
NM	NH	NH	NM	NM	NL	Z	Z
NL	NM	NM	PM	PL	Z	PL	PL
Z	NM	PM	PL	Z	PL	PL	PM
PL	PL	PL	Z	PL	PL	PM	PM
PM	Z	Z	Z	PM	PM	PH	PH
PH	Z	Z	NL	PM	PH	PH	PH

表 3 k_d 的模糊规则

Table 3 k_d fuzzy rule

e	e_c						
	NH	NM	NL	Z	PL	PM	PH
NH	PL	PL	PL	NL	Z	Z	PM
NM	NL	NL	NL	NL	Z	PL	PM
NL	NH	NH	NM	NL	Z	PL	PM
Z	NH	Z	Z	Z	Z	PL	PM
PL	NH	NM	NL	NL	Z	PL	PL
PM	NM	NL	NL	NL	Z	PL	PL
PH	PL	Z	Z	NL	PH	PH	PH

控制器的输入量 e 和 e_c 以及输出量 k_p, k_i 和 k_d 的隶属度函数均选择三角分布式。

将控制量信息模糊分析之后,还需要将模糊量做清晰化处理。PID 参数根据表 1 ~ 表 3 的信息进行动态整定。设定的初始 PID 控制值为 k_p, k_i 和 k_d , 利用重心法对输入的模糊集合进行清晰化处理,得到精确的 $\Delta k_p, \Delta k_i$ 和 Δk_d , 然后由式(19) ~ 式(21)可得新的模糊 PID 参数

$$k'_p = k_p + \Delta k_p \quad (19)$$

$$k'_i = k_i + \Delta k_i \quad (20)$$

$$k'_d = k_d + \Delta k_d \quad (21)$$

2.3 复合控制算法设计

复合控制器的算法原理如图 5 所示。本文采用

RBF神经网络PID控制和模糊控制两种控制方法共同作用的复合控制策略,通过对误差信息的分析调整加权系数 $\alpha(0 \leq \alpha \leq 1)$ 的大小,以调控不同控制方法的用量,最终实现对控制目标的复合控制。

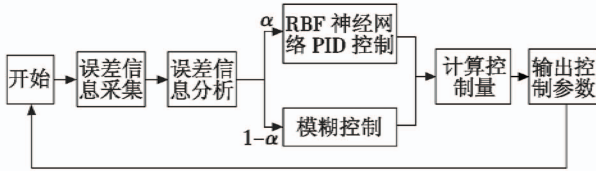


图5 复合控制算法原理图

Fig. 5 Schematic diagram of compound control algorithm

加权因子 α 可根据误差信号 e 与误差变化率 e_c 的大小进行实时调整。在误差信号较大时,利用模糊控制响应迅速、对参数变化及扰动不灵敏的优点,可以实现很好的控制效果。在误差信号较小时,将模糊控制切换为RBF神经网络PID控制,在保证系统鲁棒性的前提下提高其控制精度。

3 仿真实验分析

本文选取了RBF-PID控制器与复合控制器的控制效果进行对比,以求更加清晰地看出复合控制器的控制性能。在仿真实验中采用阶跃和正弦跟踪两种信号进行观测^[10-11]。

某舰载火箭炮交流伺服系统的控制精度指标为:

- 1) 静态误差不大于 0.03° ;
- 2) 动态误差(等效正弦)绝对误差不大于 0.12° 。

系统电机轴输出端的主要参数如下:系统负载转动惯量 $J = 3.7 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$;摩擦系数 $B = 1.43 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$;减速比 $i = 1039$;系统的负载扰动转矩为 $T_l = 8.97 \text{ N} \cdot \text{m}$;电机转矩系数 $k_d = 1.95 \times 10^{-1} \text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}$ 。

阶跃跟踪测试属于静态性能测试,用以考核其定位速度。设定目标角度为 15° ,仿真时间为 10 s 。阶跃响应曲线如图6所示,在 5 s 处加入一个 $500 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的负载作为干扰信号。在负载受到给定的干扰时,RBF神经网络PID控制偏移量为 1.36° ,恢复到稳态的时间为 1.1 s ,而复合控制的阶跃图中,偏移量为 0.6° ,恢复到稳态的时间为 0.5 s 。复合控制的阶跃偏移量比RBF神经网络PID控制的偏移量少少了 55.8% ,同时恢复至目标位置的时间减少了 54.5% ,这说明复合控制具有更快的响应速度,有利于火箭炮系统的快速追踪。系统稳定后,复合控制的稳态误差小于 0.01° ,满足舰载交流伺服系统的静态误差要求。

等效正弦跟踪属于动态性能检测,用以考核最大跟踪加速度的跟踪能力。在做舰载交流伺服系统控制的仿真实验时,一般假设的海洋条件为三级海况。三

级海况指轻浪(Slight),浪高 $0.5 \sim 1.25 \text{ m}$,波浪不大,但很触目,波长变长,渔船张帆时随风移行每小时 $3 \sim 5 \text{ n miles}$ 。

通过正弦跟踪仿真实验模拟三级海况中舰艇随海浪波动的情况。为测试控制策略在不同海浪高度的跟踪情况,仿真实验中设置了两个不同幅值的正弦跟踪函数进行实验仿真,图7为复合控制与RBF-PID模拟不同的海浪高度进行的正弦跟踪对比图。图7a的输入信号表达式为 $y(t) = 7.5 \sin(\pi t)$,幅值为 7.5° ,周期为 2 s ;图7b的输入信号表达式为 $y(t) = 15 \sin(\pi t)$,幅值为 15° ,周期为 2 s 。

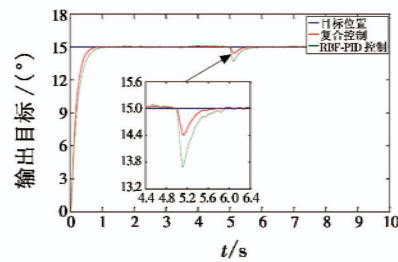


图6 阶跃响应位置曲线

Fig. 6 Step response position curve

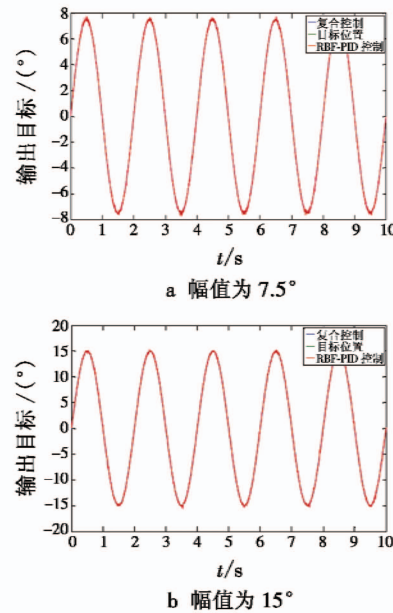


图7 正弦跟踪曲线

Fig. 7 Sinusoidal tracking curve

图8为正弦跟踪误差实验结果。图8a中,当幅值为 7.5° 的正弦输入信号时,RBF神经网络PID控制的正弦跟踪误差范围在 $\pm 0.36^\circ$ 以内,复合控制的正弦跟踪误差范围在 $\pm 0.09^\circ$ 以内。复合控制的正弦跟踪误差为RBF-PID控制的 25% 。图8b中,当幅值为 15° 的正弦输入信号时,RBF神经网络PID控制的正弦跟踪误差范围在 $\pm 0.19^\circ$ 以内,复合控制的正弦跟踪误差范围在 $\pm 0.06^\circ$ 以内,复合控制的正弦跟踪误差为RBF-

PID 控制的 31.6%。由实验数据可知,复合控制满足舰载交流伺服系统的控制精度要求,且复合控制的系统的正弦跟踪相对 RBF 神经网络 PID 控制的波动幅度小、跟踪误差小,控制结果的精度高。应用在舰载火箭炮交流伺服系统上,能有效提高系统跟踪能力。

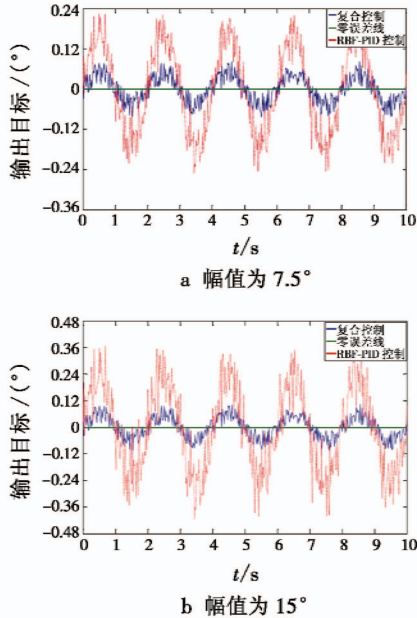


图 8 正弦跟踪误差曲线

Fig. 8 Sinusoidal tracking error curve

4 结论

本文针对舰载火箭炮交流位置伺服系统跟踪速度与跟踪精度的问题,将 RBF 神经网络 PID 控制理论和模糊控制理论相结合,提出了一种复合控制策略。仿真结果进一步验证了复合控制策略相对于 RBF 神经网络 PID 控制的优越性。复合控制策略能够加快系统响应速度,提高跟踪精度,有效地提高了舰载火箭炮交流伺服系统的性能。

参考文献

- [1] 周佳,卢少武,周凤星. 基于 BP 神经网络的伺服速度控制参数自整定研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2016(7):70-72,77.
- [2] 史磊,王蔚. 基于 RBF 神经网络 PID 参数的自调节及仿真[J]. 科技与创新,2017(16):64-66.
- [3] 张明君,张化光. 遗传算法优化的 RBF 神经网络控制器[J]. 电机与控制学报,2007,11(2):183-187.
- [4] 牛姗姗. 一类交流伺服系统 RBF 神经网络与 PID 复合控制策略研究[D]. 南京: 南京理工大学,2007.
- [5] 胡继辉,侯远龙,高强,等. 基于干扰观测器的坦克炮控系统滑模控制[J]. 电光与控制,2018,25(3):98-101.
- [6] 刘凯,宋晓娜,刘跃敏. 导弹复合控制系统的切换控制器设计[J]. 电光与控制,2017,24(7):33-36.
- [7] 徐晨峰,陈强. 基于模糊控制的交流伺服系统仿真[J]. 自动化与仪器仪表,2017(1):107-109.
- [8] SHIBATA S, JINDAI M, SHIMIZU A. Neuro-fuzzy control for pneumatic servo system[C]//The 26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2000. doi:10.1109/IECON.2000.972542.
- [9] LUKICHEV D V, DEMIDOVA G L. PID-type fuzzy adaptive control for two-mass servo-drive system: Design, simulation and experiment[C]//International Conference on Power Drives Systems, 2016. doi: 10.1109/ICPDS.2016.7756679.
- [10] 马挺,李奔亮. 舰载火控雷达交流伺服系统仿真分析[J]. 舰船电子工程,2017,37(5):75-80.
- [11] 梁海峰,樊水康,张华,等. 灰色预测智能 PID 控制在火箭炮伺服系统中的仿真[J]. 火力与指挥控制,2018,43(11):69-71.