

doi: 10.7690/bgzd.2025.03.002

## 车载武器伺服系统的模糊滑模控制

李有为<sup>1</sup>, 侯远龙<sup>1</sup>, 季强<sup>1</sup>, 刘璐<sup>2</sup>, 闫智聪<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2. 南京理工大学网络空间安全学院, 南京 210094)

**摘要:** 针对车载武器行进间射击的稳定性问题, 提出一种基于 RBF 神经网络和模糊切换增益调节的滑模控制策略。建立车载武器伺服系统的数学模型, 设计基于新型趋近率的滑模控制器, 使系统快速收敛到平衡状态; 在滑模控制的基础上融合模糊控制, 采用模糊规则对控制器中的切换增益进行实时调节, 利用切换增益消除系统受到的扰动, 削弱系统抖振; 利用 RBF 神经网络对系统的时变项进行自适应估计, 以提高控制精度。仿真结果表明: 设计的控制器对扰动不敏感, 能有效地提高系统的位置精度、削弱抖振, 并使系统具有较强的鲁棒性。

**关键词:** 伺服系统; 滑模控制; 模糊控制; RBF 神经网络; 抖振抑制

中图分类号: TJ810 文献标志码: A

## Fuzzy Sliding Mode Control for Vehicular Weapon Servo System

Li Youwei<sup>1</sup>, Hou Yuanlong<sup>1</sup>, Ji Qiang<sup>1</sup>, Liu Lu<sup>2</sup>, Yan Zhicong<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. School of Cyber Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** A sliding mode control strategy based on RBF neural network and fuzzy switching gain regulation is proposed to solve the stability problem of vehicle-mounted weapon firing while moving. The mathematical model of the vehicle-mounted weapon servo system is established, and the sliding mode controller based on the new reaching law is designed to make the system converge to the equilibrium state quickly. The fuzzy control is integrated on the basis of the sliding mode control, and the fuzzy rules are used to adjust the switching gain of the controller in real time. The switching gain is used to eliminate the disturbance of the system and weaken the system chattering; RBF neural network is used to adaptively estimate the time-varying items of the system to improve the control precision. The simulation results show that the designed controller is insensitive to the disturbance, and can effectively improve the position accuracy of the system, weaken the chattering, and make the system have strong robustness.

**Keywords:** servo system; sliding mode control; fuzzy control; RBF neural network; chattering suppression

### 0 引言

车载武器的强大打击能力和较好的机动性使其成为各国陆军的重要武器作战装备。随着战争形势的不断发展, 对车载武器的动态响应性能、鲁棒性和可靠性提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。在车载武器工作过程中, 其伺服系统会受到外部路面扰动、内部摩擦力矩以及发射装置振动等非线性因素影响, 导致系统的控制精度下降, 难以精确打击目标<sup>[2-3]</sup>; 因此, 有必要将先进的控制策略应用到车载武器伺服系统中。

车载武器伺服系统采用永磁交流伺服电机(PMSM)作为驱动器。由于 PMSM 的强耦合、非线性和时变等特点, 使得传统 PID 控制技术受到很大限制<sup>[4]</sup>。滑模变结构控制具有快速响应、对系统参数变化及扰动不灵敏等优点, 常被应用于各种控制系统中<sup>[5-6]</sup>。然而滑模控制对参数摄动和外部扰动的

不变性是以控制量的高频抖动换取的, 在工程中没有任何执行器能够实现。这样的高频输入导致了系统抖振, 造成不必要的能量损失, 影响了系统的控制精度; 因此, 必须削弱控制器的输出抖振<sup>[7]</sup>。各国学者对此问题提出了很多先进控制方法。文献[8]设计了一种全局快速终端滑模观测器, 引入了混合滑模面来减小常规滑模观测器的相位滞后问题, 设计高阶控制率抑制抖振现象。文献[9]介绍了一种将 LQ 最优控制与滑模控制相结合的一种新的控制器设计方法。文献[10]利用自适应模糊系统对控制率中非线性函数项进行自适应逼近, 保证了系统的稳定与收敛。文献[11]提出一种基于负载观测器的 RBF 滑模控制策略, 将负载观测器观测的力矩引入控制率中削弱系统的抖振。

笔者设计一种基于 RBF 和模糊切换增益调节的滑模控制器, 利用模糊规则对系统的扰动在线估计, 实现切换增益的自调整, 在保证滑模到达条件

收稿日期: 2024-07-08; 修回日期: 2024-08-15

第一作者: 李有为(1998—), 男, 陕西人, 硕士。

满足的情况下尽量减小切换增益，以削弱抖振。再利用 RBF 神经网络对非线性系统的时变项自适应逼近，进而提高系统的总体性能。

## 1 车载武器伺服系统

### 1.1 车载武器伺服系统结构与组成

车载武器伺服系统的主要组成：操纵台、A/D 转换器、D/A 转换器、火控计算机、伺服放大器、伺服电机、PWM 和减速器，如图 1 所示。

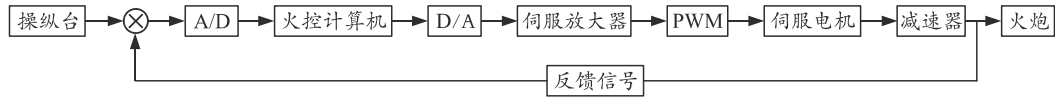


图 1 车载武器伺服系统结构

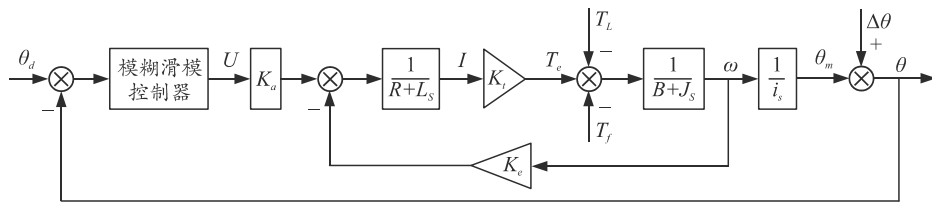


图 2 车载武器伺服系统数学模型

图 2 中： $\theta_d$  为输入的位置信号； $\theta_m$  为电机位置角度； $\Delta\theta$  为扰动产生的角度； $\theta$  为实际角度； $U$  为控制器输出； $K_a$  为比例环节； $K_e$  为电机反电势系数； $K_t$  为电机转矩系数； $R$  为电枢绕组电阻； $L$  为电枢绕组电感； $B$  为黏性摩擦系数； $T_e$  为电机转矩； $T_L$  为负载转矩； $T_f$  为摩擦转矩； $J$  为折算到电机输出轴的转动惯量； $\omega$  为电机角速度； $i$  为减速比。

电机电磁转矩为：

$$T_e = -\frac{K_e K_t}{R + L_s} \omega + \frac{K_a K_t}{R + L_s} U \quad (1)$$

在实际工况中，电流时间常数远小于机械时间常数，为简化计算将电流响应的延迟时间忽略，即：

$$\frac{1}{R + L_s} = \frac{1}{R} \frac{1}{1 + L_s/R} \approx \frac{1}{R} \quad (2)$$

则式(1)可简化为：

$$T_e = -K_e K_t \omega / R + K_a K_t U / R \quad (3)$$

由转矩平衡方程可得：

$$T_e - T_L - T_f = J i \ddot{\theta}_m + B i \dot{\theta}_m \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)可得：

$$-\frac{K_e K_t}{R} \omega + \frac{K_a K_t}{R} U - T_L - T_f = J i \ddot{\theta}_m + B i \dot{\theta}_m \quad (5)$$

整理式(5)可得：

$$\ddot{\theta}_m = -\left(\frac{B}{J} + \frac{K_e K_t}{J R}\right) \dot{\theta}_m + \frac{K_a K_t}{i J R} U - \frac{T_L + T_f}{i J} \quad (6)$$

首先，操纵台发出指定位置信号，由 A/D 转换器将信号传入炮控计算机中，输出的控制信号由 D/A 转换器传入伺服放大器中，再经过 PWM 逆变器来驱动伺服电机转动，配合减速箱带动火炮移动。最后，采集火炮的实时角度并反馈至控制器中，实时调整系统的误差。

### 1.2 车载武器伺服系统数学模型

车载武器伺服系统的数学模型如图 2 所示<sup>[12]</sup>。

车载武器在行进过程中，会受到外部路面扰动产生小幅度振动，产生微小偏移角度  $\Delta\theta$ 。引入路面扰动后系统的数学方程为：

$$\ddot{\theta} = -\left(\frac{B}{J} + \frac{K_e K_t}{J R}\right) \dot{\theta} + \frac{K_a K_t}{i J R} U - \frac{T_L + T_f}{i J} \quad (7)$$

式中  $\theta = \theta_m + \Delta\theta$ 。

选取状态变量  $x = [x_1, x_2]^T$ ，其中  $x_1 = \theta$ ， $x_2 = \dot{\theta}$ ，则系统的状态空间方程为：

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= f(x, t) + g u(x, t) + d(t) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中： $f(x, t) = -\left(\frac{B}{J} + \frac{K_e K_t}{J R}\right) x_2$ ， $g = \frac{K_a K_t}{i J R}$ ，分别为系统的非线性动力学方程和控制增益； $d(t)$  为系统受到有界的扰动项，即满足  $|d(t)| \leq D$ ， $D$  为常数。

## 2 RBF 模糊滑模控制器设计

### 2.1 滑模控制器设计

系统输入的理想位置信号为  $\theta_d$ ，通过传感器采集的角位置为  $\theta$ ，令跟踪误差为：

$$e = \theta_d - \theta \quad (9)$$

积分型滑模面可以提高系统的动态性能，提高响应速度，故本文中选取积分滑模面为：

$$s = c_1 \int_0^t e dt + c_2 e + \dot{e} \quad (10)$$

式中： $c_1 > 0$ ； $c_2 > 0$ 。则：

$$\dot{s} = c_1 e + c_2 \dot{e} + \ddot{\theta}_d - f(x, t) - gu(x, t) - d(t)。 \quad (11)$$

传统的趋近率存在响应速度和系统抖振无法兼顾的问题，为此设计新型趋近率为：

$$\dot{s} = -\eta |s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) - ks。 \quad (12)$$

式中  $\eta > 0$ ； $\alpha > 1$ ； $k > 0$ 。

引入新型趋近率后，系统趋于稳定的速度和  $s$  有关，当系统状态距离滑模面较远的时候趋近速度大，反之速度较小。可以通过控制  $\alpha$  的数值来控制趋近速度，保证系统在有限时间内到达滑模面。

结合式(10)和(11)，得：

$$u = [c_1 e + c_2 \dot{e} + \ddot{\theta}_d - f(x, t) + ks + K(t) \operatorname{sgn}(s)] / g。 \quad (13)$$

取

$$K(t) = \max\{d(t) + \eta |s|^\alpha\}。 \quad (14)$$

取 Lyapunov 函数为：

$$V = s^2 / 2。 \quad (15)$$

则

$$\begin{aligned} \dot{V} = s\dot{s} &= s(c_1 e + c_2 \dot{e} + \ddot{\theta}_d - f(x, t) - gu(x, t) - d(t)) \\ &= s(c_1 e + c_2 \dot{e} + \ddot{\theta}_d - f(x, t) - gu(x, t) - d(t))。 \end{aligned} \quad (16)$$

将控制率代入可得：

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s[-K(t) \operatorname{sgn}(s) - d(t) - ks] = \\ &= -K(t)|s| - d(t)s - ks^2 \leq -\eta |s| \leq 0。 \end{aligned} \quad (17)$$

系统稳定。

观察式(13)，系统抖振是由切换增益  $K(t)$  造成的。 $K(t)$  用以补偿干扰项  $d(t)$ ，以保证满足滑模存在性条件。由于干扰项是时变的，可采用模糊规则，根据经验来实现  $K(t)$  的变化。

### 2.2 模糊滑模控制器设计

常规滑模控制器使系统的输出直接跟踪期望指令，为克服系统受到的外界扰动需要较大的切换增益，会导致系统产生高频抖振。笔者通过模糊规则调节切换增益以降低系统抖振，还能有效地消除干扰。

模糊规则如下：

$$\left. \begin{aligned} \text{if } s\dot{s} > 0, \text{ 则 } K(t) \text{ 应增大} \\ \text{if } s\dot{s} < 0, \text{ 则 } K(t) \text{ 应减小} \end{aligned} \right\}。 \quad (18)$$

本系统中，输入为  $s\dot{s}$ ，输出为  $\Delta K(t)$ 。系统输入/输出的模糊集定义如下：

$$\begin{aligned} s\dot{s} &= \{\text{NB NM ZO PM PB}\}; \\ \Delta K &= \{\text{NB NM ZO PM PB}\}。 \end{aligned} \quad (19)$$

式中：PB 为正大；PM 为正中；ZO 为零；NM 为负中；NB 为负大。

模糊系统的输入、输出隶属函数如图 3 和 4 所示。

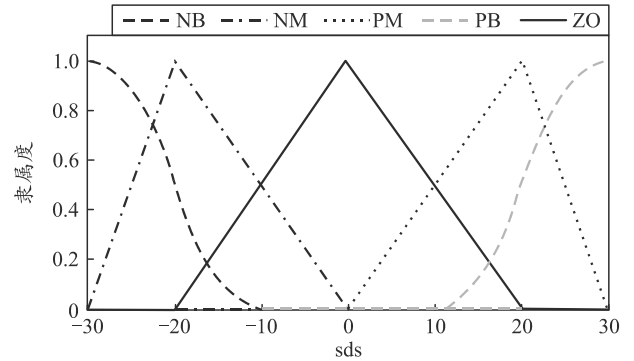


图 3 模糊输入的隶属函数

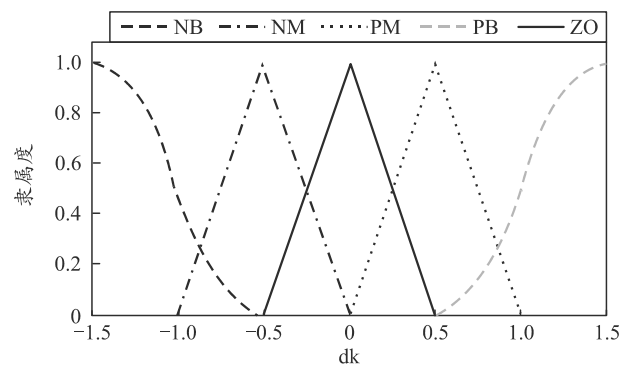


图 4 模糊输出的隶属函数

模糊规则设计如下：

$$\begin{aligned} R_1: & \text{ if } s\dot{s} \text{ is PB then } \Delta K \text{ is PB;} \\ R_2: & \text{ if } s\dot{s} \text{ is PM then } \Delta K \text{ is PM;} \\ R_3: & \text{ if } s\dot{s} \text{ is ZO then } \Delta K \text{ is ZO;} \\ R_4: & \text{ if } s\dot{s} \text{ is NM then } \Delta K \text{ is NM;} \\ R_5: & \text{ if } s\dot{s} \text{ is NB then } \Delta K \text{ is NB.} \end{aligned} \quad (20)$$

$\Delta \hat{K}(t)$  的上界采用积分进行估计：

$$\hat{K}(t) = G \int_0^t \Delta K dt。 \quad (21)$$

$G$  为比例系数。

用  $\hat{K}(t)$  代替式(12)的  $K(t)$ ，则控制率变为：

$$u = \frac{1}{g} [c_1 e + c_2 \dot{e} + \ddot{\theta}_d - f(x, t) + ks + \hat{K}(t) \operatorname{sgn}(s)]。 \quad (22)$$

### 2.3 RBF 神经网络优化控制器

由于车体行进时系统内部受到摩擦、振动等因素导致非线性项  $f(x, t)$  时变，影响控制精度。RBF 神经网络具有万能逼近特性<sup>[13]</sup>，因此笔者采用 RBF 对  $f(x, t)$  进行逼近，来进一步提高系统的控制精度。RBF 输入取为  $\mathbf{x} = [x_1, x_2]^T$ ，网络算法为：

$$h_j = \exp\left(-\frac{\|x - z_j\|^2}{2b_j^2}\right)； \quad (23)$$

$$f = W^{*T}h(x) + \varepsilon. \quad (24)$$

式中： $j$  为隐含层的第  $j$  个节点； $W^*$  为网络的理想权值； $h(x)=[h_j]^T$  为网络的高斯基函数输出； $\varepsilon$  为有界逼近误差，满足  $|\varepsilon| \leq \varepsilon_N$ 。网络的输出为：

$$\hat{f}(x) = \hat{W}^T h(x). \quad (25)$$

经 RBF 逼近后系统的控制率为：

$$u = \frac{1}{g} [c_1 e + c_2 \dot{e} + \ddot{\theta}_d - \hat{f}(x, t) + ks + K(t) \text{sgn}(s)]. \quad (26)$$

定义 Lyapunov 函数为：

$$V = s^2/2 + \tilde{W}^T \tilde{W} / 2\gamma. \quad (27)$$

式中： $\gamma > 0$ ； $\tilde{W} = \hat{W} - W^*$ 。

则

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} + \tilde{W}^T \dot{\tilde{W}} / \gamma = s[c_1 \dot{e} + c_2 \ddot{e} + \ddot{\theta}_d - f(x, t) - gu - d(t)] + \tilde{W}^T \dot{\tilde{W}} / \gamma = s[\hat{f}(x, t) - f(x, t) - ks - d(t) - K(t) \text{sgn}(s) - \varepsilon] + \tilde{W}^T \dot{\tilde{W}} / \gamma = s[-ks - \varepsilon - K(t) \text{sgn}(s) - d(t)] + \tilde{W}^T (sh(x) + \dot{\tilde{W}} / \gamma). \end{aligned} \quad (28)$$

取自适应律：

$$\dot{\tilde{W}} = -\gamma sh(x). \quad (29)$$

则

$$\dot{V} = s[-\varepsilon - ks - K(t) \text{sgn}(s) - d(t)] \leq 0. \quad (30)$$

控制器中的鲁棒项  $K(t) \text{sgn}(s)$  用来克服扰动和逼近误差，保证系统稳定。

控制器结构如图 5 所示。

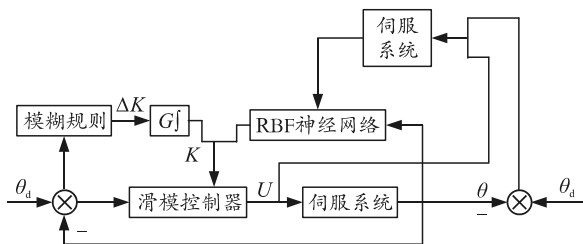


图 5 RBF+模糊滑模控制器结构

### 3 仿真与分析

为证明笔者设计的 RBF 模糊滑模控制器的可行性，将该控制器与模糊滑模控制器和常规滑模控制器进行仿真对比。

车载武器交流伺服系统参数值  $J=0.0258 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ， $B=0.04 \text{ N}\cdot\text{m}^2/(\text{rad}/\text{s})$ ， $I=60$ ， $K_t=0.20 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{A}$ ， $K_e=0.195 \text{ V}/(\text{rad}/\text{s})$ ， $R=0.8 \Omega$ 。控制器参数  $c_1=150$ ， $c_2=60$ ， $k=30$ ， $G=80$ ， $\alpha=2$ ， $\gamma=10$ 。

车载武器在陆上行进时受到的主要扰动是由路面颠簸不平导致的。按照目前载体行进速度和路面情况，取幅值为  $2^\circ$ 、频率为  $1\text{Hz}$  的正弦扰动来模拟

路面扰动。

输入信号为  $y=30 \sin(t)$ ，幅值为  $30^\circ$ ，仿真时间为  $20 \text{ s}$ ，其跟踪曲线如图 6 所示，误差曲线如图 7 所示，控制器的输出如图 8 所示。

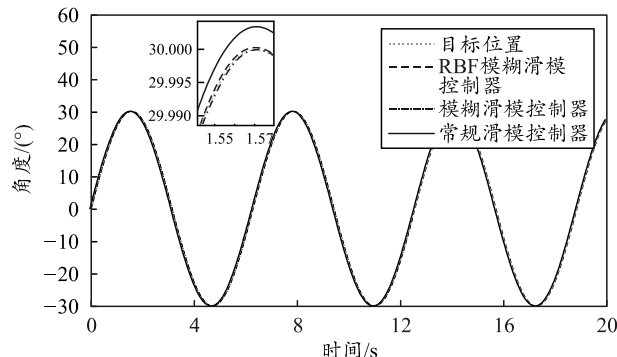


图 6 正弦信号跟踪曲线

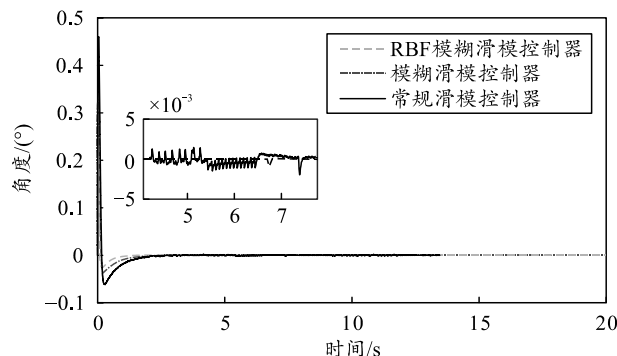


图 7 正弦信号误差曲线

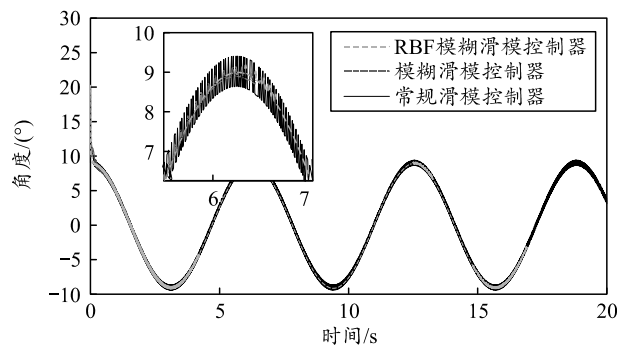


图 8 正弦追踪控制器输出曲线

从仿真结果可以看出：RBF 模糊滑模控制跟另外 2 种控制方法相比，超调量更小，系统进入稳定状态要快得多，而且在利用新型趋近率提高快速性的同时，系统并没有过大的抖振。通过 RBF 优化后，稳态误差始终控制在  $\pm 0.01^\circ$ ，模糊滑模虽能抑制抖动但是误差更大，常规滑模控制的误差频繁抖动能看出系统存在抖振现象，这一现象在控制器的输出曲线中反映的更加明显。

常规滑模控制为保证系统的控制精度需要控制量的高频抖动。采用模糊规则后可有效地通过调节切换增益来削弱系统抖振，达到了预期的效果。

输入角位置信号为  $30^\circ$ ，仿真时间取 20 s。为了充分验证系统的鲁棒性，在  $t=5.0$  s 时刻加入 0.5 s，幅值为  $-2^\circ$  的干扰信号。阶跃响应曲线如图 9 所示，误差曲线如图 10 所示。

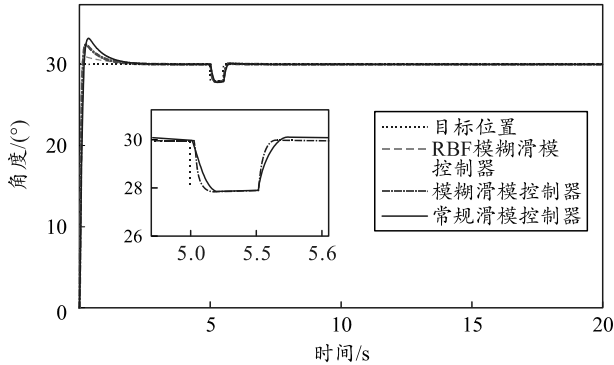


图 9 阶跃响应曲线

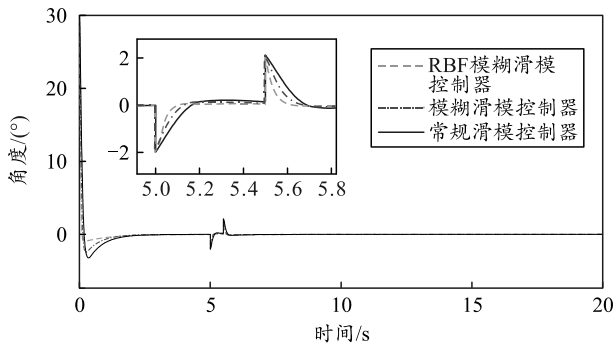


图 10 阶跃信号误差曲线

从仿真图可以看出：采用 RBF 模糊滑模控制系统的响应速度更快，误差更小，超调量有明显地减少。而且在系统受到扰动后，可以在 0.1 s 内快速跟踪目标，系统的抗干扰性较强。

#### 4 结论

笔者针对车载武器伺服系统的控制精度与抗干扰性问题，在常规的滑模控制基础上，设计了一种基于 RBF 神经网络和模糊切换增益调节的滑模控制器。利用滑模控制的抗干扰能力以及模糊规则来调整切换增益，采用 RBF 神经网络对系统时变项进行逼近，以提高控制精度。通过仿真实验证明：这种控制器具有较高的控制精度和抗干扰能力，有效地削减系统抖振，提高了伺服系统的鲁棒性，达到

了良好的效果。

#### 参考文献：

- [1] 戴翊, 董志明, 冯琦琦. 聚焦未来坦克发展国外新一代坦克研发新动向[J]. 坦克装甲车, 2022(11): 36-39.
- [2] 谢润. 车载武器行进间发射动力学研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [3] 王誉, 侯忠生. 具有外部扰动的 PMSM 系统的无模型自适应预测控制[J]. 控制理论与应用, 2022, 39(5): 837-846.
- [4] 赵寿华. 永磁同步电机高性能控制系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [5] WU H Z, LIU S Y, CHENG C, et al. Observer based adaptive interval type-2 fuzzy sliding mode control for unknown nonlinear systems[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2019, 38(4): 1-12.
- [6] MUÑOZ V, ALDO J, FERNÁNDEZ A, et al. Fractional integro-differential sliding mode control of a class of distributed-order nonlinear systems[J]. Journal of Applied Mathematics and Computing, 2022, 68: 2743-2760.
- [7] 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展[J]. 控制理论与应用, 2007(3): 407-418.
- [8] 王晓远, 傅涛. 基于全局快速终端滑模观测器的无刷直流电机无位置传感器控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(11): 164-172.
- [9] LEONID F, ALEXANDER P, FRANCISCO J. Robust Output LQ Optimal Control via Integral Sliding Modes[M]. New York: Birkhäuser, 2014: 31-41.
- [10] 葛媛媛, 张宏基. 基于自适应模糊滑模控制的机器人轨迹跟踪算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(5): 746-755.
- [11] 李玉腾, 陈机林, 侯远龙, 等. 基于负载观测器与新型趋近律的光电稳定平台伺服系统 RBF+SMC 控制策略设计[J]. 指挥控制与仿真, 2022, 44(4): 99-104.
- [12] 高强, 侯远龙, 吕明明, 等. 某新型车载多管负载行进间稳定控制方法[J/OL]. 兵工学报: 1-11[2023-03-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20220704.1855.020.html>.
- [13] 夏长亮, 王明超, 史婷娜, 等. 基于神经网络的开关磁阻电机无位置传感器控制[J]. 中国电机工程学报, 2005(13): 123-128.