

doi: 10.7690/bgzd.2014.04.011

空空导弹电动舵机自适应模糊滑模控制方法

周静, 柴永利, 黄丰保

(中国空空导弹研究院十一所, 河南 洛阳 471009)

摘要: 针对空空导弹电动舵机系统中存在的参数摄动和外干扰问题, 提出一种将非线性特性中的死区特性与自适应律相结合的改进方法。介绍电动舵机控制对象简化模型, 采用传统自适应律保证系统能够快速到达滑模面; 当切换函数值到达设定值时, 改变自适应律, 以切换函数的值作为切换增益, 使得滑模控制的切换增益随着切换函数的递减而递减, 最终驱使系统平稳的进入滑模态。仿真结果表明: 该方法进一步提高了舵机的动态性能和鲁棒性, 有效地削弱了系统抖振。

关键词: 空空导弹; 电动舵机; 自适应模糊控制; 鲁棒性

中图分类号: TJ765 **文献标志码:** A

Method of Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control for Air-to-Air Missile Electromechanical Actuator

Zhou Jing, Chai Yongli, Huang Fengbao

(No. 11 Institute, China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: In allusion to the characteristics of parametric uncertainties and disturbance in air-to-air missile electromechanical actuator, a novel method, which matched dead zone character in nonlinear system and adaptive regulation, is proposed. The note introduces the simple model of electromechanical actuator (EMA), uses classic adaptive control to making system arriving quirkily sliding surface. When switch function arrived, adaptive control should be changed, the value of switch function used switch value, so switch value would be descended with switch function, finally control system will arrive sliding mode steady. The simulation result proved that the methods enhance electromechanical actuator robustness and performance, and effectively restrain the system chattering.

Keywords: air-to-air missile; electromechanical actuator; adaptive fuzzy control; robustness

0 引言

空空导弹舵机系统是一个系统参数易摄动、负载变化剧烈的伺服机构^[1-3], 特别是末端大机动, 舵机受到的气动负载变化更为剧烈。为进一步提高舵机动态性能, 不少控制策略被应用到舵机控制系统的设计中。作为一种对参数摄动、干扰有极强鲁棒性的控制方法, 滑模控制策略一直是控制界的研究热点^[4-6]。

自适应模糊滑模控制是一种应用较为广泛的滑模控制方法, 用模糊控制逼近理想滑模控制减小控制输入和稳态误差, 文献[7]将自适应模糊滑模控制应用于船舶航向控制器的设计, 利用自适应模糊推理系统对船舶动态系统中的未知非线性函数进行模糊逼近, 解决了船舶动态结构和参数不确定性问题及外部干扰, 并具有较强的鲁棒性。文献[8]针对多管火箭炮伺服系统转动惯量和负载力矩变化大的特性, 采用自适应模糊滑模控制方法提高了火箭炮在剧烈运动过程中对干扰的鲁棒性。

传统的自适应律是非减函数, 对不确定项的估

计是在原有基础上增加, 估测值不会随着系统干扰的消失而逐渐递减, 抖振随着时间的延长而增强^[8]。基于此, 笔者将非线性特性中的死区特性与自适应律相结合, 来解决舵机系统中存在的参数摄动和外干扰问题, 并进行了仿真验证。

1 电动舵机建模及系统滑模面设计

1.1 电动舵机分析及建模

空空导弹电动舵机主要由校正网络、PWM 功率放大电路、伺服电机、减速传动机构和位置反馈装置构成, 其中伺服电机与减速传动机构为舵机的控制对象, 其控制对象简化模型如图 1 所示。

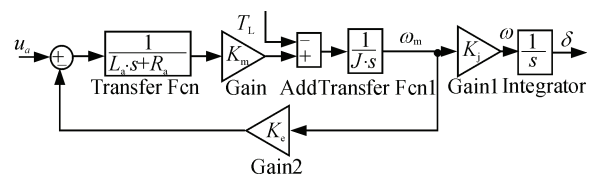


图 1 电动舵机控制对象简化模型

其中: u_a 为舵机控制输入电压; R_a 为电机电枢电阻; T_L 为系统干扰力矩; K_m 为机电时间常数; J

收稿日期: 2013-11-18; 修回日期: 2013-12-15

作者简介: 周静(1982—), 女, 湖北人, 本科, 工程师, 从事导弹伺服系统及能源系统研究。

为电机转动惯量； K_j 为减速传动比； ω 表示舵机转速； δ 表示舵偏角。

由此得到舵机控制对象状态方程为：

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega \\ \dot{\omega} = -\frac{K_m K_e}{J R_a} \omega + \frac{K_m K_j}{J R_a} u_a - \frac{K_j}{J} T_L \end{cases} \quad (1)$$

1.2 系统滑模面设计

考虑如下 SISO 非线性系统

$$\ddot{x} = f(x, t) + g(x, t)u(t) + d(t) \quad (2)$$

式中 $f(x, t)$, $g(x, t)$ 均为未知非线性函数，且 $g(x, t) > 0$, $d(t)$ 外加干扰。

定义系统跟踪误差为 $e(t) = x(t) - r(t)$ ，式中 $r(t)$ 为系统控制指令，利用系统的跟踪误差反馈构建滑模面：

$$\dot{s}(t) = \mathbf{K}E(t) = \ddot{e}(t) + k_1 \dot{e}(t) + k_2 e(t) \quad (3)$$

$$\text{那么 } s(t) = \dot{e} + \int_0^t [k_1 \dot{e}(\tau) + k_2 e(\tau)] d\tau =$$

$$\dot{x}(t) - \int_0^t [\ddot{r}(\tau) - k_1 \dot{e}(\tau) - k_2 e(\tau)] d\tau$$

从式 (3) 可以看出，系统构建了积分型的滑模面，系统的跟踪误差决定于状态反馈矩阵 $\mathbf{K} = [1, k_1, k_2]$ ，通过确定合适的 k_1, k_2 ，跟踪误差 $e(t)$ 将趋近于零，且系统将有良好的动态性能。

2 自适应模糊滑模控制器设计

2.1 算法设计

对于式 (2) 表示的非线性系统，若 $f(x, t)$ 、 $g(x, t)$ 及 $d(t)$ 为已知时，则可根据处于理想状态的滑模面 $s(t) = \dot{s}(t) = 0$ 计算控制律为：

$$u^*(t) = g(x, t)^{-1} [-f(x, t) - d(t) + \ddot{r}(t) - k_1 \dot{e}(t) - k_2 e(t)] \quad (4)$$

若 $f(x, t)$, $g(x, t)$ 及 $d(t)$ 为未知时， $u^*(t)$ 难以实现，可采用模糊系统逼近 $u^*(t)$ 。

以切换函数 $s(t)$ 作为模糊控制器的输入，构成一个单输入模糊逼近系统，该模糊控制器的模糊规则形式为：

$$\text{Rule } i: \text{ IF } s \text{ is } F_s^i, \text{ THEN } u \text{ is } \alpha_i \quad (5)$$

式中 $i=1, 2, 3, \dots, m$, α_i 和 F_s^i 为模糊集合，采用重心法进行反模糊化，得到模糊控制器输出：

$$u_{tz}(s, \alpha) = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i \alpha_i}{\sum_{i=1}^m \mu_i} = \alpha^T \omega^T \quad (6)$$

式中 μ_i 为第 i 条规则的权值， $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_m]$, $\omega = [\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_m]$ ，定义 ω_i 为：

$$\omega_i = \frac{\mu_i}{\sum_{i=1}^m \mu_i} \quad (7)$$

依据模糊逼近理论，存在一个最优模糊系统 $u_{tz}(s, \alpha^*)$ 可以逼近 $u^*(t)$ 。

$$u^*(t) = u_{tz}(s, \alpha^*) + \varepsilon = (\alpha^*)^T \omega + \varepsilon \quad (8)$$

式中的 ε 为逼近误差，满足 $|\varepsilon| < D$ 。

采用模糊系统 u_{tz} 逼近 $u^*(t)$ ，则

$$u_{tz}(s, \hat{\alpha}) = \hat{\alpha}^T \omega \quad (9)$$

其中 $\hat{\alpha}$ 为 α^* 的估计值。

采用切换控制律 $u_{vs}(t)$ 来补偿 $u^*(t)$ 与 u_{tz} 之间的误差，切换控制律对逼近误差 ε 有较强的鲁棒特性，定义切换控制律为：

$$u_{vs} = -\eta(t) \text{sgn}(s(t)) \quad (10)$$

则系统(2)的总控制律为：

$$u(t) = u_{tz} + u_{vs} \quad (11)$$

在切换控制器中，由于系统不确定参数和干扰的存在，导致切换增益 $\eta(t)$ 很难确定，实际控制中以经验确定。如果 $\eta(t)$ 值选的过大，就会产生较大的抖振，如果过小，则系统的鲁棒性下降且趋于不稳。为减小控制系统计算量，可采用自使用律来设计 $\eta(t)$ ，定义：

$$u_{vs} = -\hat{\eta}(t) \text{sgn}(s(t)) \quad (12)$$

$$\dot{\hat{\eta}}(t) = \gamma_2 |s(t)| \quad (13)$$

$\hat{\eta}(t)$ 为估计的切换增益， γ_2 为正实数自适应因子，表征自适应律跟随速度的快慢，定义自适应律估计误差为：

$$\tilde{\eta}(t) = \hat{\eta}(t) - D \quad (14)$$

定义 $\tilde{\alpha} = \hat{\alpha} - \alpha^*$ ，那么式 (8) 变换为：

$$\tilde{u}_{tz} = \hat{u}_{tz} - u^* = \hat{u}_{tz} - u_{tz}^* - \varepsilon = \tilde{\alpha}^T \omega - \varepsilon \quad (15)$$

将式 (3) 带入式 (4) 中，得到：

$$u^*(t) = g(x,t)^{-1}[-f(x,t) - d(t) + \ddot{r}(t) + \ddot{e}(t) - \dot{s}(t)] = g(x,t)^{-1}[g(x,t)u(t) - \dot{s}(t)] \quad (16)$$

那么:

$$\dot{s}(t) = g(x,t)[u(t) - u^*(t)] = g(x,t)[u_{\text{e}} + u_{\text{vs}} - u^*(t)] \quad (17)$$

2.2 稳定性证明

定义 Lyapunov 函数为:

$$V(t) = 0.5s^2(t) + \frac{g(x,t)}{2\gamma_1} \tilde{\alpha}^T \tilde{\alpha} + \frac{g(x,t)}{2\gamma_2} \tilde{\eta}^2(t)$$

则

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= s(t)\dot{s}(t) + \frac{g(x,t)}{\gamma_1} \tilde{\alpha}^T \dot{\tilde{\alpha}} + \frac{g(x,t)}{\gamma_2} \tilde{\eta}(t)\dot{\tilde{\eta}}(t) = \\ &= s(t)g(x,t)(u_{\text{e}} + u_{\text{vs}} - u^*(t)) + \frac{g(x,t)}{\gamma_1} \tilde{\alpha}^T \dot{\tilde{\alpha}} + \frac{g(x,t)}{\gamma_2} \tilde{\eta}(t)\dot{\tilde{\eta}}(t) = \\ &= s(t)g(x,t)(\tilde{\alpha}^T \omega) + \frac{g(x,t)}{\gamma_1} \tilde{\alpha}^T \dot{\tilde{\alpha}} + \frac{g(x,t)}{\gamma_2} \tilde{\eta}(t)\dot{\tilde{\eta}}(t) = \\ &= g(x,t)\tilde{\alpha}^T \left(s(t)\omega + \frac{\dot{\tilde{\alpha}}}{\gamma_1} \right) + s(t)g(x,t)(u_{\text{vs}} - \varepsilon) + \\ &= \frac{g(x,t)}{\gamma_2} (\tilde{\eta}(t) - D)\dot{\tilde{\eta}}(t) = \\ &= g(x,t)\tilde{\alpha}^T \left(s(t)\omega + \frac{\dot{\tilde{\alpha}}}{\gamma_1} \right) + \frac{g(x,t)}{\gamma_2} (\tilde{\eta}(t) - D)\dot{\tilde{\eta}}(t) - \\ &= \hat{\eta}(t)|s(t)|g(x,t) - \varepsilon s(t)g(x,t) \end{aligned} \quad (18)$$

为使系统稳定即 $\dot{V}(t) \leq 0$, 模糊逼近系数 α 的估计值采用如下算法:

$$\dot{\tilde{\alpha}} = \dot{\hat{\alpha}} = -\gamma_1 s(t)\omega \quad (19)$$

将式 (13) 和式 (19) 带入式 (18) 中, 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= -\hat{\eta}(t)|s(t)|g(x,t) - \varepsilon s(t)g(x,t) + \\ &= (\hat{\eta}(t) - D)|s(t)|g(x,t) - \varepsilon s(t)g(x,t) - \\ &= D|s(t)|g(x,t) \leq |\varepsilon||s(t)|g(x,t) - \\ &= D|s(t)|g(x,t) = -(D - |\varepsilon|)|s(t)|g(x,t) \leq 0 \end{aligned} \quad (20)$$

由于式 (13) 表征的自适应估计律为非减函数, 即自适应律 $\hat{\eta}(t)$ 不会随着干扰的减弱或变化而变化, 只能在原有基础上增加, 而实际系统受到的扰动或参数是时变的, 随着时间的延长, 由自适应律决定的切换控制会越来越大, 抖振将加强。为降低系统的抖振强度, 采用文中的方法对自适应律进行改进。

2.3 改进的自适应控制律

这里借鉴非线性特性中死区特性的方法, 设计

以下自适应律对式 (13) 进行改进:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\eta}}(t) = \gamma_2 |s(t)|, & |s| \geq d \\ \dot{\hat{\eta}}(t) = |s| + n, & |s| < d \end{cases} \quad (21)$$

式中, $d > 0, n > 0$ 。

理论分析如下:

1) $|s| \geq d$ 时, 系统状态距离滑模面较远, 即滑模控制中的趋近段, 需要用较大的控制律, 既保证系统稳定, 又能把系统引向滑模面, 这时采用自适应律式 (13), 可保证系统在较大范围内是收敛的, 且控制输入较强, 可迅速迫使系统状态进入设定的滑模面。稳定性由上节已证明。

2) $|s| < d$ 时, 系统状态已回到滑模面, 采用改进的自适应律进行控制, 可使切换增益随着误差的减小而降低。稳定性证明:

取 Lyapunov 函数为

$$V(t) = 0.5s^2(t) + \frac{g(x,t)}{2\gamma_1} \tilde{\alpha}^T \tilde{\alpha} \quad (22)$$

由式 (18) 和式 (19) 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= g(x,t)\tilde{\alpha}^T (s(t)\omega + \frac{\dot{\tilde{\alpha}}}{\gamma_1}) + s(t)g(x,t)(u_{\text{vs}} - \varepsilon) = \\ &= s(t)g(x,t)(-\hat{\eta}(t)\text{sgn}(s(t)) - \varepsilon) = \\ &= s(t)g(x,t)(-|s(t)|\text{sgn}(s(t)) - n\text{sgn}(s(t)) - \varepsilon) = \\ &= g(x,t)(-|s(t)|^2 - n|s(t)| - \varepsilon s(t)) \end{aligned} \quad (23)$$

逼近误差 ε 趋近于零, 故式 (23) 有以下变化:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= g(x,t)(-|s(t)|^2 - n|s(t)| - \varepsilon s(t)) = \\ &= -g(x,t)(|s(t)|^2 + n|s(t)|) \leq 0 \end{aligned} \quad (24)$$

3) 系统受到多次扰动时, 系统误差的变化表现在 s 上。无论误差增大或减小, s 都会在 1) 和 2) 两种状态表示的边界线 $|s| = d$ 内外切换, 最终驱使 s 收敛至零, 切换控制增益的估计值 $\hat{\eta}(t)$ 也随之减小。

4) 在自适应律表达式 (21) 中, γ_2 的取值决定切换控制增益变化的速度, γ_2 大有利于系统及时对不确定干扰的抑制; 反之, 需要较长时间抑制扰动。 n 为一小正数, 保证系统在进入滑动模态以后能够收敛。 δ 为边界值。

3 仿真实验及分析

针对采用跟踪误差状态反馈的积分滑模面, 采用以下 5 种隶属度函数来模糊化:

$$\mu_{\text{NM}}(s) = \exp\left[-\left(\frac{(s + \pi/6)/(\pi/24)}{1}\right)^2\right] \quad (25)$$

$$\mu_{NS}(s) = \exp\left[-\left(\frac{s + \pi/12}{\pi/24}\right)^2\right] \quad (26)$$

$$\mu_{ZO}(s) = \exp\left[-\left(\frac{s}{\pi/24}\right)^2\right] \quad (27)$$

$$\mu_{PS}(s) = \exp\left[-\left(\frac{s - \pi/12}{\pi/24}\right)^2\right] \quad (28)$$

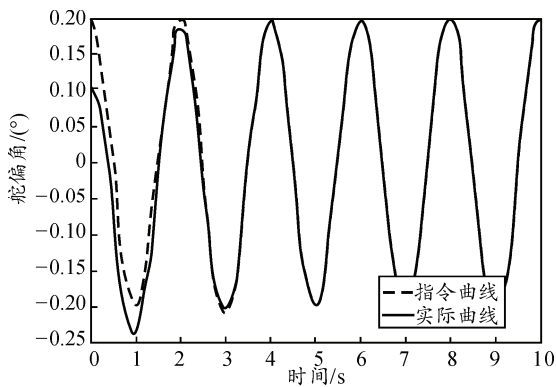
$$\mu_{PM}(s) = \exp\left[-\left(\frac{s - \pi/6}{\pi/24}\right)^2\right] \quad (29)$$

考虑某电动舵机，其状态方程如下：

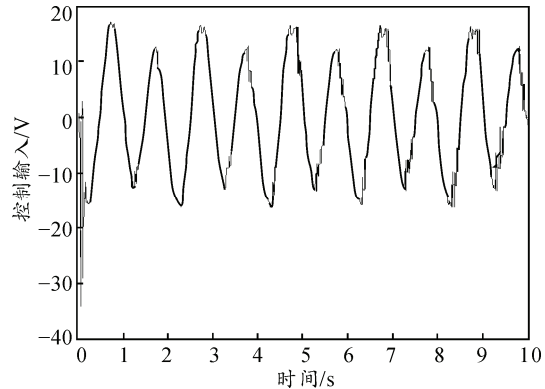
$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega \\ \dot{\omega} = -154.0931\omega + 2052.9u_a - 85538T_L \\ y = \delta \end{cases} \quad (30)$$

系统初始状态取 $[x_1 \ x_2]^T = [-0.5 \ 0]^T$ ，依据 1、2 章所述方法，控制律采用式 (11)、式 (19) 和式 (21)，控制器参数取 $\gamma_1 = 1000$ ， $\gamma_2 = 10$ ， $d = 0.01$ ， $n = 1$ ， $K = [1 \ -4.0386 \ 0.0259]$ 。跟随正弦信号时，位置指令 $r(t) = 0.2\sin(\pi t + \pi/2)$ ，系统的初始状态为： $x_0 = [\pi/60 \ 0]$ ，干扰 $T_L = 20\sin(2\pi t)$ ；当系统跟随阶跃信号时，初始状态为 $x_0 = [-0.1 \ 0]$ ，0.2 s 时施加持续 0.1 s 的干扰 $T_L = 0.1$ 。

仿真曲线如图 2~图 4 所示。

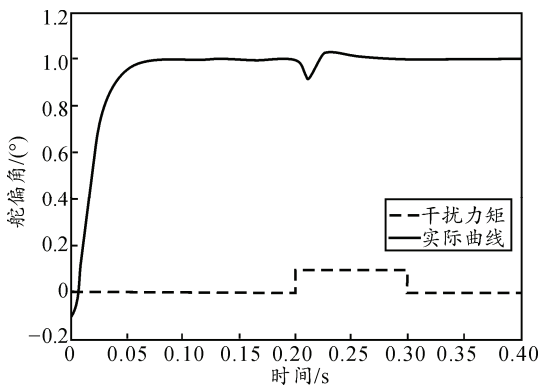


(a) 正弦信号位置跟踪波形

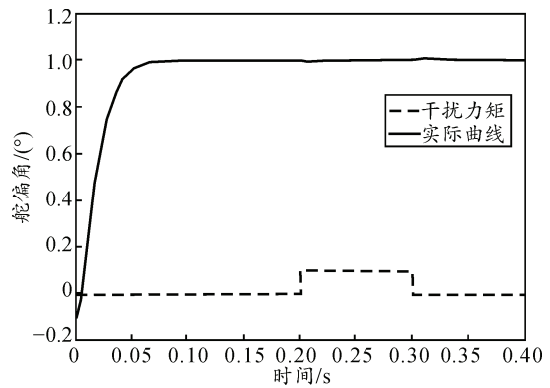


(b) 控制输入波形

图 2 系统的正弦信号跟踪和控制输入波形

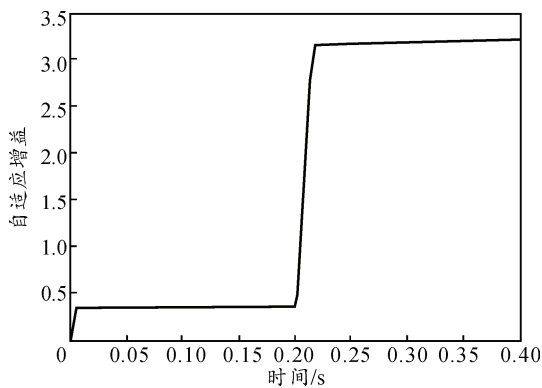


(a) 常规方法处理的阶跃信号跟踪波形

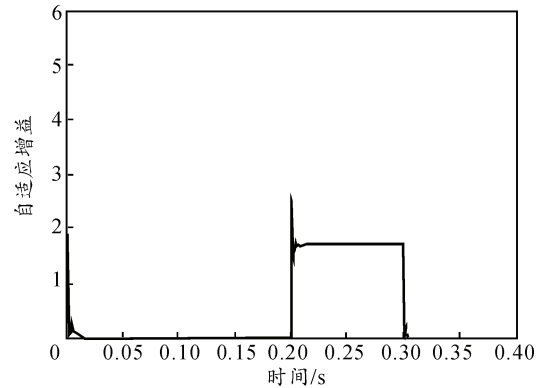


(b) 文中改进方法处理的阶跃信号跟踪波形

图 3 系统的阶跃信号跟踪波形



(a) 常规的自适应参数 \hat{E} 的波形



(b) 改进的自适应参数 \hat{E} 的波形

图 4 自适应项 \hat{E} 的变化轨迹

由图 2 分析可知,舵机能快速跟随指令的变化轨迹,并对干扰具有较强的鲁棒性,控制输入明显减小,分析图 3 和图 4,在系统平稳运行过程中,如果受到干扰,采用文中改进的方法使得系统的鲁棒性有较大提高,动态性能进一步优化,分析图 4 中自适应参数的估计值波形可以看到,改进的方法达到了设计的初始目的,改进型自适应律不再是一个非减函数,而是随着干扰的变化而变化,对于减小控制量及削弱抖振有明显的效果。

4 结论

笔者针对空空导弹电动舵机参数易漂移、负载变化剧烈的特点,利用自适应模糊推理系统对系统的控制量输入进行模糊逼近,并对自适应律进行了改进,有效地解决了自适应律非减的缺点。仿真结果证明该方法是正确有效的,舵机的动态性能和鲁棒性有了进一步的提高,有效地解决了以往方法的不足。

(上接第 41 页)

由表 1 可以看出,改进蚁群算法平均执行时间较基本蚁群算法提高了 40.1%,这是因为改进蚁群算法是在基本蚁群算法的基础上引入了蚂蚁相遇策略,正、逆反馈同时搜索,所以得到这个结果是科学合理的。由图 3 路径优化结果可以看出:较基本蚁群算法,改进蚁群算法的保障代价变化比较平稳,个别的极值现象表现为少量蚂蚁的探索行为,这是因为在信息素更新策略上,改进蚁群算法的信息素浓度被限定在一定的范围之内,不仅可避免算法过早收敛于非最优解,也避免了像基本蚁群算法中有大量的蚂蚁盲目地寻找路径。

4 结论

针对战时供应保障路径优化问题,着重考虑道路承重约束、保障时间约束和保障可靠性约束,并对问题进行分析,建立了保障代价最小的优化模型。对于求解算法,在基本蚁群算法的基础上引入相遇蚂蚁策略,并融合了多约束条件对保障路径优化的

参考文献:

- [1] 梁晓庚,王伯荣,余志峰,等.空空导弹制导控制系统设计[M].北京:国防工业出版社,2006:178-216.
- [2] 齐铎,范惠林,陈丹强.空空导弹发射装置数据采集系统[J].兵工自动化,2012,31(9):9-11.
- [3] Liu Haitao, Zhang Tie. Fuzzy Sliding Mode Control of Robotic Manipulators With Kinematic and Dynamic Uncertainties[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2012, 134(11): 061007.
- [4] 李士勇,章钱.变结构控制在导弹制导中的应用研究[J].飞航导弹,2009(7):47-51.
- [5] 李大东,孙秀霞,董文瀚,等.基于线性化反馈的滑模变结构重载空投纵向控制律设计[J].控制理论与应用,2013,30(1):54-60.
- [6] 刘文江,隋青美,周凤余,等.基于自适应模糊滑模控制的船舶航向控制器设计[J].信息与控制,2012,41(2):136-141.
- [7] 霍龙,乐贵高,马大为,等.自适应模糊滑模在火箭炮位置伺服系统中的应用[J].火力与指挥控制,2012,37(9):137-140.
- [8] 刘金琨.滑模变结构控制 Matlab 仿真[M].北京:清华大学出版社,2005:120-200.

影响。实例验证结果说明:该改进算法在实际应用中是可行的,可为决策者在确定最优保障路径时提供有效的支持。下一步,笔者将对保障路径中“必经点”问题进行深入研究。

参考文献:

- [1] Carlier J, et al. Reliability evaluation of large telecommunication networks[J]. Discrete Applied Mathematics, 1997, 76(1-3): 61-80.
- [2] Fu L P, et al. Expected shortest paths in dynamic and stochastic traffic networks[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1998, 32(7): 499-516.
- [3] 杨正磊,宋建社,等.多约束条件下战场导航路径规划问题研究[J].系统仿真学报,2011,23(6):1288-1291.
- [4] 黄泽汉,谭越紧,邓宏钟.基于蚁群优化的物流网络多约束路径规划[J].系统工程,2009,27(6):91-94.
- [5] 刘海军,彭绍雄,高传斌,等.一种基于信息素变化的改进蚁群算法[J].兵工自动化,2012,31(4):28-31.
- [6] 王宗喜.军事物流概论[M].北京:海潮出版社,1994.
- [7] 程焕,谢洪森,孙大军,等.用雷达海杂波反演蒸发波导的蚁群算法[J].四川兵工学报,2013,34(1):91-93.