

引用格式:陈霄,刘忠,姜晓政,等.无人艇非线性K-T模型参数辨识算法[J].电光与控制,2018,25(8):28-31,77.CHEN X, LIU Z, JIANG X Z, et al. A parameter identification algorithm of nonlinear K-T model for USVs[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(8):28-31, 77.

无人艇非线性K-T模型参数辨识算法

陈 霄, 刘 忠, 姜晓政, 董 蛟
(海军工程大学电子工程学院,武汉 430000)

摘要:无人艇作为一种小型水面智能任务平台,具有机动性好、隐蔽性强、自动化程度高等优点,已成为国内外的研究热点。无人艇操纵模型作为实现其自主航行、智能避障等控制的基础,其辨识精度的优劣直接影响最终控制效果的好坏。为克服无人艇操纵模型辨识过程中的“参数相消”效应,提高辨识精度,提出了一种基于分步实艇数据处理的模型参数辨识算法,详细给出了辨识算法的步骤和流程,通过实际的湖上操纵性试验,依次得到模型参数。最后,分别利用所辨识出的无人艇操纵模型和实艇进行操舵仿真试验及湖上试验,通过实艇试验数据和仿真结果对比,验证了所辨识模型的正确性。

关键词:无人艇; K-T模型; 回转和Z形试验; 参数辨识

中图分类号: TP242 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.08.006

A Parameter Identification Algorithm of Nonlinear K-T Model for USVs

CHEN Xiao, LIU Zhong, JIANG Xiao-zheng, DONG Jiao

(College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430000, China)

Abstract: As a small surface intelligent task platform, the Unmanned Surface Vessels (USV) have such advantages as good mobility, strong concealment, and a high degree of automation, which have become a hot spot of research at home and abroad. The USV manipulating model is the basis for the realization of such control operations as autonomous navigation and intelligent obstacle avoidance, and its identifying accuracy directly affects the quality of the final control effect. In order to overcome the effect of “parameter cancellation” occurring in the identifying process, and to improve its identifying accuracy, an algorithm for model parameter identification based on the step-by-step processing of experimental data is presented. The working procedures of the algorithm are given in detail, and the model parameters are obtained by a manipulating test operated on the lake. Finally, an experiment is implemented on the identified USV model and a real USV respectively, and the correctness of the identified model is verified through a comparison between the experimental data and the simulation results.

Key words: Unmanned Surface Vehicle (USV); K-T model; rotation and Z experiment; parameter identification

0 引言

无人水面艇(Unmanned Surface Vehicle, USV, 简称为无人艇)作为一类在复杂海洋环境下自主航行完成各种使命任务的运载平台,与无人机、无人车和无人潜航器组成四大无人运载系统^[1],具有机动性好、隐蔽性

强、自动化程度高、无人员伤亡等优势,在军事和民用领域具有广阔的应用前景^[2]。无人艇的自主航行、自动避碰等运动控制问题已成为国内外研究的热点。无人艇自主航行等效果的好坏不仅依赖于各种先进的控制算法,还取决于被控对象模型的辨识精度,因此获取无人艇模型是设计各类运动控制器的基础,也是研究无人艇自主控制技术的核心问题之一^[3]。系统辨识的方法通常被用于线性和非线性模型参数的确定,主要包括最小二乘及扩展最小二乘法^[4]、极大似然估计法^[5]、扩展卡尔曼滤波法^[6]、模型参考自适应法^[7]、梯

收稿日期:2017-09-17 修回日期:2018-03-29

基金项目:装备预研基金重点项目(9140A01010415JB11002)

作者简介:陈 霄(1990—),男,山东德州人,博士生,研究方向为无人艇模型辨识及控制算法。

度校正法^[8]及基于人工智能辨识算法^[9]等。其中,最小二乘法是系统辨识中最常用的方法,具有系统先验知识少、算法简单、计算量小、收敛性好等优点。孙晓界等通过分析 Z 形和定常回转实船操纵性试验数据,利用递推最小二乘法辨识得到无人艇线性 K-T 模型,并通过 Z 形操舵试验验证了模型的正确性,但并未考虑模型的非线性因素^[3];秦余刚等提出了一种快速收敛迭代学习最小二乘法并将其用于船舶 K-T 模型的参数辨识,仿真结果表明,该算法具有较高的辨识精度,但是迭代学习的引入导致算法复杂性和耗时增加^[10]。

本文以某无人艇为研究对象,建立响应型三自由度非线性数学模型,在研究国内外现有无人艇操纵模型参数辨识算法的基础上,综合考虑算法的辨识精度和实用性,提出了一种基于分步实艇数据处理的模型参数辨识算法,详细给出了辨识过程,并基于 Z 形操舵试验,通过所辨识出的模型仿真结果和实艇试验数据对比,验证了所辨识模型的正确性。

1 无人艇操纵运动数学模型

通常情况下,设计航向控制器时,船舶水平面内的运动数学模型常采用 Nomoto 模型,但是该模型是在低频小舵角的假设条件下进行推导的,而无人艇有着更快的航速和更好的机动性,通常需要高频操舵,因此 Nomoto 模型不适用于无人艇^[11-12]。本节在考虑无人艇特性以及模型非线性的基础上,采用 Norrbom 模型来进行航向控制器的设计,即

$$T\ddot{\psi} + H_N(\psi) = K(\delta + \delta_r) \quad (1)$$

$$H_N(\psi) = n_3\dot{\psi}^3 + n_2\dot{\psi}^2 + n_1\dot{\psi} + n_0 \quad (2)$$

式中: ψ 为航向角; δ 为舵角输入; δ_r 为未操舵时维持直航的压舵角; T 为追随性指数; K 为回转性指数; $H_N(\psi)$ 为非线性项,用于描述无人艇的操纵性能; n_0, n_1, n_2, n_3 为 Norrbom 系数,当无人艇具有对称结构时, $n_0 = n_2 \approx 0$, 当无人艇具有直行特性时, $n_1 = 1$, 否则 $n_1 = -1$ 。因此式(1)可简化为

$$T\ddot{\psi} + n_3\dot{\psi}^3 + \dot{\psi} = K(\delta + \delta_r) \quad (3)$$

当 $n_3 = 0$ 时,式(3)即为 Nomoto 模型

$$T\ddot{\psi} + \dot{\psi} = K(\delta + \delta_r) \quad (4)$$

2 分步实艇数据处理的辨识算法

由于辨识技术的固有缺陷,当同时辨识的参数较多时,存在所谓的“参数相消效应”,即所辨识参数同时偏离各自真值。为克服这个缺陷,本文通过设计不同的试验,分步辨识各参数,确保所辨识参数的准确性。方法步骤如下所述。

Step1 由文献[13]可知,对于航向稳定的水面船艇,在小舵角操舵时($\delta \leq 10^\circ$),由于运动幅度小, n_3 属于不敏感系数,可利用 K-T 线性模型描述其操舵响应,因此本文首先利用 $\delta = 5^\circ$ 定常回转试验,根据艏向角速度和对应的舵角求各采样段 K 和 δ_r 的均值,先辨识出 K-T 线性方程中的 K 和 δ_r 参数。定常回转时, δ 为常数, $\dot{\delta} = 0$, $\ddot{\psi}$ 为常数, $\ddot{\psi} = \dot{r} = 0$, 代入式(3)得

$$r = \dot{\psi} = K(\delta + \delta_r) \quad (5)$$

$$\delta = \frac{1}{K}\dot{\psi} - \delta_r \quad (6)$$

假设由定常回转试验得到的一组数据为 $(\delta_i, \dot{\psi}_i)$, $i = 1, 2, 3, \dots, n$, 令 $a_0 = -\delta_r$, $a_1 = \frac{1}{K}$, 则

$$\delta = a_0 + a_1\dot{\psi} \quad (7)$$

最小二乘拟合误差为

$$J = \sum_{i=1}^n (a_0 + a_1\dot{\psi}_i - \delta_i)^2 \quad (8)$$

令 $\frac{\partial J}{\partial a_0} = 0$, $\frac{\partial J}{\partial a_1} = 0$, 可得

$$\begin{cases} a_0 \sum_{i=1}^n 1 + a_1 \sum_{i=1}^n \dot{\psi}_i = \sum_{i=1}^n \delta_i \\ a_0 \sum_{i=1}^n \dot{\psi}_i + a_1 \sum_{i=1}^n \dot{\psi}_i^2 = \sum_{i=1}^n \delta_i \dot{\psi}_i \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可得 a_0 和 a_1 , 故可求得 K 和 δ_r 。

Step2 将辨识得到的 K 和 δ_r 视作已知量,利用 $Z10^\circ/10^\circ$ 试验结果对 K-T 线性模型进行最小二乘辨识,得到 T 。首先将式(4)进行前向差分处理,各阶前向差分格式为

$$\dot{\psi}(k) = \frac{\psi(k+1) - \psi(k)}{h} \quad (10)$$

$$\ddot{\psi}(k) = \frac{\dot{\psi}(k+1) - \dot{\psi}(k)}{h} = \frac{\psi(k+2) - 2\psi(k+1) + \psi(k)}{h^2} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\psi}(k) &= \frac{\ddot{\psi}(k+1) - \ddot{\psi}(k)}{h} = \\ &\frac{\psi(k+3) - 3\psi(k+2) + 3\psi(k+1) - \psi(k)}{h^3} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\dot{\delta}(k) = \frac{\delta(k+1) - \delta(k)}{h} \quad (13)$$

式中: $\psi(k)$ 为 k 时刻艏向角的采样值; $\delta(k)$ 为 k 时刻舵角的采样值; h 为采样间隔。则对式(4)采用前向差分格式离散化得

$$T[y(k+2) - y(k+1)] = Kh^2[\delta(k) + \delta_r] - hy(k+1) \quad (14)$$

式中, $y(k+1) = \psi(k+1) - \psi(k)$ 。

取 $k=1,2,3,\dots,M-2,M$ 为采样总数, 令

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} y(3) - y(2) \\ y(4) - y(3) \\ \vdots \\ y(M) - y(M-1) \end{pmatrix}_{(M-2) \times 1} \quad (15)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} Kh^2[\delta(1) + \delta_r] - hy(2) \\ Kh^2[\delta(2) + \delta_r] - hy(3) \\ \vdots \\ Kh^2[\delta(M-2) + \delta_r] - hy(M-1) \end{pmatrix}_{(M-2) \times 1} \quad (16)$$

得到 $T\mathbf{Y} = \mathbf{A}$, 因此 T 的最小二乘解为 $T = (\mathbf{Y}^T \mathbf{Y})^{-1} \cdot (\mathbf{Y}^T \mathbf{A})$, \mathbf{Y}^T 为 \mathbf{Y} 的转置。

Step3 将 K, T 和 δ_r 视作已知量, 利用 Z20°/20° 试验对非线性模型(3)进行最小二乘辨识, 得到 n_3 。此时由于运动幅度大, 非线性严重, n_3 属于敏感系数, 因而有较高的辨识精度^[8]。首先将式(3)采用前向差分格式离散化得

$$T[y(k+2) - y(k+1)] = \\ Kh^2[\delta(k) + \delta_r] - hy(k+1) - \alpha \frac{y^3(k+1)}{h} \quad (17)$$

式中, $y(k+1) = \psi(k+1) - \psi(k)$ 。

取 $k=1,2,3,\dots,M-2,M$ 为采样总数, 令

$$\mathbf{Q} = \left(\frac{y^3(2)}{h}, \frac{y^3(3)}{h}, \dots, \frac{y^3(M-1)}{h} \right)^T_{(M-2) \times 1} \quad (18)$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} Kh^2[\delta(1) + \delta_r] - hy(2) - T[y(3) - y(2)] \\ Kh^2[\delta(2) + \delta_r] - hy(3) - T[y(4) - y(3)] \\ \vdots \\ Kh^2[\delta(M-2) + \delta_r] - hy(M-1) - T[y(M) - y(M-1)] \end{pmatrix}_{(M-2) \times 1} \quad (19)$$

则可得到 $\alpha \mathbf{Q} = \mathbf{C}$, 则 α 的最小二乘解为 $\alpha = (\mathbf{Q}^T \mathbf{Q})^{-1} \cdot (\mathbf{Q}^T \mathbf{C})$, \mathbf{Q}^T 为 \mathbf{Q} 的转置。

Step4 利用 Z15°/15° 的操舵响应试验, 通过实艇试验数据和所辨识出的模型仿真结果对比, 验证了所辨识模型的正确性。

3 辨识结果与分析

首先在一级海况下进行 $\delta = 5^\circ$ 定常回转试验, 舵角和航速分别稳定在 5° 和 10 kn ($1 \text{ kn} = 1.852 \text{ km/h}$) 左右, 采样时间间隔为 0.5 s 。由于记录的数据较多, 只列出回转试验的部分采样点数据, 如表 1 所示。对应舵角与艏向角的关系如图 1 所示, 由 Step1 辨识得 $K = 0.5600$, $\delta_r = 0.0082^\circ$ 。

表 1 5°回转实验数据

Table 1 Data of 5° rotation experiment

| 序号 | 时间/s | 舵角/(°) | 艏向角/(°) | 航速/kn |
|-----|-------|----------|---------|-----------|
| 1 | 0.0 | 4.892 82 | 2.345 | 11.044 3 |
| 2 | 0.5 | 4.880 21 | 4.882 | 10.871 5 |
| 3 | 1.0 | 4.892 82 | 6.963 | 10.527 2 |
| 4 | 1.5 | 4.905 43 | 9.689 | 10.437 9 |
| 5 | 2.0 | 4.911 74 | 11.628 | 10.264 7 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 227 | 130.5 | 4.911 74 | 190.700 | 9.962 75 |
| 228 | 131.0 | 4.873 91 | 190.528 | 9.753 63 |
| 229 | 131.5 | 4.899 13 | 191.084 | 10.587 10 |
| 230 | 132.0 | 4.905 43 | 191.998 | 9.965 56 |
| 231 | 132.5 | 4.905 43 | 193.897 | 9.790 41 |
| 232 | 133.0 | 4.892 82 | 195.550 | 9.363 75 |

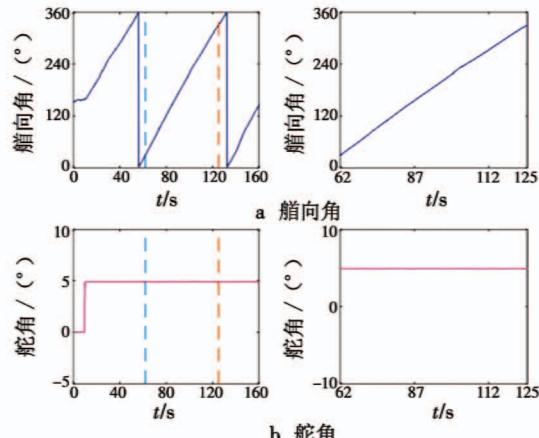


图 1 对应艏向角与舵角的关系

Fig. 1 Correspondence between the heading angle and the rudder angle

在相同的海况和航速下, 进行无人艇 Z10°/10° 操舵试验, 由于各种干扰的存在和无人艇本身的机械特性, 试验中允许目标舵角和实际舵角存在一定的偏差。部分 Z10°/10° 试验数据如表 2 所示。由 Z 形试验得到的舵角和艏向角之间的关系如图 2 所示。由 Step2 计算可得 $T = 0.5308$ 。

表 2 Z10°/10° 试验数据

Table 2 Data of Z10°/10° experiment

| 序号 | 时间/s | 舵角/(°) | 艏向角/(°) | 航速/kn |
|-----|------|-----------|---------|----------|
| 1 | 0.0 | -9.684 74 | 187.807 | 11.877 2 |
| 2 | 0.5 | -9.684 74 | 187.990 | 11.864 4 |
| 3 | 1.0 | -9.684 74 | 186.146 | 11.754 6 |
| 4 | 1.5 | -9.697 35 | 183.908 | 11.558 0 |
| 5 | 2.0 | -9.684 74 | 179.225 | 10.348 9 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 158 | 78.5 | 9.823 47 | 192.692 | 10.154 4 |
| 159 | 79.0 | 9.823 47 | 198.928 | 10.661 5 |
| 160 | 79.5 | 9.773 03 | 203.619 | 11.797 5 |
| 161 | 80.0 | 9.810 86 | 209.248 | 10.347 0 |
| 162 | 80.5 | -9.697 35 | 219.547 | 10.235 0 |
| 163 | 81.0 | -9.684 74 | 221.440 | 10.920 3 |

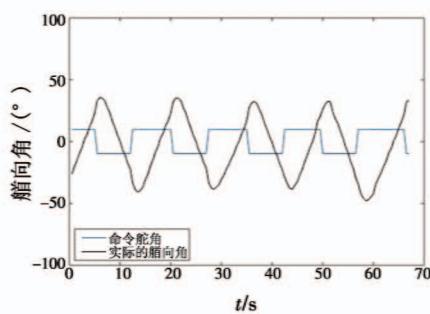


图 2 实艇 Z10°/10° 试验结果

Fig. 2 The result of Z10°/10° experiment

同理,在相同的海况和航速下,进行无人艇 Z20°/20°操舵试验,部分 Z20°/20°试验数据如表 3 所示。由 Z 形试验得到的舵角和艏向角之间的关系如图 3 所示。由 Step3 计算可得 $n_3 = 0.0017$ 。

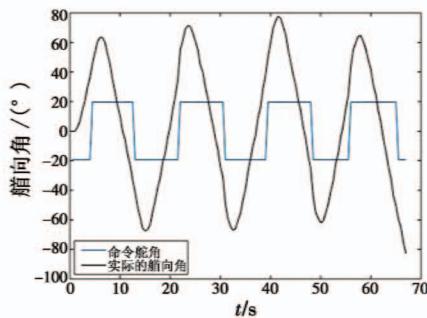


图 3 实艇 Z20°/20° 试验结果

Fig. 3 The result of Z20°/20° experiment

表 3 Z20°/20° 试验数据

Table 3 Data of Z20°/20° experiment

| 序号 | 时间/s | 舵角/(°) | 艏向角/(°) | 航速/kn |
|-----|------|-----------|---------|----------|
| 1 | 0.0 | -19.394 7 | 183.137 | 10.664 3 |
| 2 | 0.5 | -19.394 7 | 183.209 | 11.500 0 |
| 3 | 1.0 | -19.369 5 | 180.537 | 10.630 4 |
| 4 | 1.5 | -19.394 7 | 176.528 | 10.679 6 |
| 5 | 2.0 | -19.394 7 | 168.681 | 10.088 7 |
| : | : | : | : | : |
| 129 | 64.0 | 19.773 1 | 227.119 | 9.456 9 |
| 130 | 64.5 | 19.848 8 | 233.402 | 9.662 1 |
| 131 | 65.0 | -19.394 7 | 242.786 | 8.778 9 |
| 132 | 65.5 | -19.394 7 | 248.396 | 9.090 9 |
| 133 | 66.0 | -19.369 5 | 258.645 | 9.894 0 |
| 134 | 66.5 | -19.369 5 | 266.055 | 10.124 6 |

利用参数辨识结果建立对应的一阶非线性响应模型进行 Z15°/15° 仿真试验,并利用实艇进行 Z15°/15° 操纵性试验,得到相应的艏向角预报曲线和实艇操舵响应试验的拟合曲线,如图 4 所示。可以看出,模型输出与实际输出性能大体一致,由于实际试验中的一些干扰等外在因素使得模型输出不能和实际情况完全一致,但模型基本上可以满足要求。

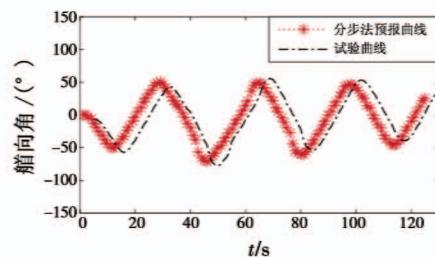


图 4 Z15°/15° 试验与仿真结果对比

Fig. 4 The comparison of Z15°/15° experiment result with simulation result

4 结束语

为解决无人艇操纵模型参数辨识过程中存在的“参数相消效应”,提出了一种基于分步实艇数据处理的模型参数辨识算法,通过设计不同的试验,分步辨识各参数,确保参数辨识结果的准确性。最后,分别利用所辨识出的无人艇操纵模型和实艇进行操舵预报仿真试验及湖上试验,通过实艇试验数据和仿真结果对比,验证了所辨识模型的正确性。下一步,将研究风、浪、流等外界不确定干扰下的无人艇模型参数估计及校正问题。

参 考 文 献

- [1] 阚亚雄,卢道华,仲伟波,等. 小型无人艇集成控制系统设计与实验研究[J]. 舰船科学技术,2016,38(10):67-71,77.
- [2] 薛春祥,黄孝鹏,朱咸军,等. 外军无人系统现状与发展趋势[J]. 雷达与对抗,2016,36(1):1-5,10.
- [3] 孙晓界,石林龙,范云生,等. 一种无人水面艇运动模型参数在线辨识方法[J]. 中国航海,2016,39(1):39-43,78.
- [4] 江立军,慕东东,范云生,等. 无人水面艇模型辨识及其航向非线性控制的研究[J]. 计算机测量与控制,2016,24(7):133-136,161.
- [5] 王亚辉,李醒飞,纪越,等. 改进极大似然法动力陀螺仪闭环辨识[J]. 纳米技术与精密工程,2017,15(6):499-506.
- [6] 杨靖,常思江,王中原. 基于改进混杂扩展卡尔曼滤波的炮弹阻力系数辨识[J]. 弹道学报,2017,29(1):28-33.
- [7] 汪琦,王爽,付俊永,等. 基于模型参考自适应参数辨识的永磁同步电机电流预测控制[J]. 电机与控制应用,2017,44(7):48-53.
- [8] 谢建,李良,黄建朝. 基于梯度校正法的非对称液压缸建模与参数辨识[J]. 机床与液压,2013,41(3):124-126.

(下转第 77 页)

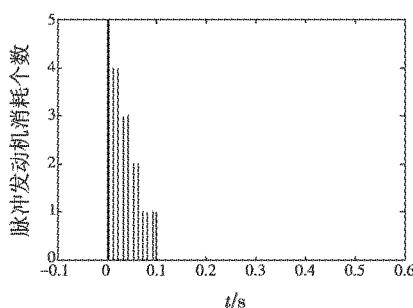


图8 脉冲发动机消耗个数

Fig. 8 Consumption of the pulse thrusters

通过仿真验证可知,该复合控制器能够很好地实现对过载指令的跟踪,同时自适应神经网络的引入,降低了导弹控制系统的抖振,对复合控制系统的稳定性产生较好的影响。当模糊输出 r 取值过大时会增加脉冲发动机的使用,利用模糊控制算法对直接力参数 r (即模糊输出)进行控制,提高了脉冲发动机的使用效率。

4 结论

本文通过对导弹复合控制系统的研究,首先运用自适应神经网络滑模控制对导弹气动力进行设计,并利用连续函数 $\tan(\cdot)$ 替代趋近律中的符号函数 $\text{sgn}(\cdot)$,保证了控制系统的稳定性。进一步采用模糊控制的方法,对直接力部分参数进行修订,保证了控制系统的响应速度。最后对导弹数学模型进行了仿真验证,实验结果表明,通过对复合控制系统进行合理的设计,可以在保证系统稳定性的前提下,进一步提高导弹的响应速度,减少脉冲发动机的使用,进而实现精确制导的目的。

参 考 文 献

- [1] 徐品高.新一代防空导弹提高制导控制精度的需求与(上接第31页)
- [9] 孙如祥,邓朝辉,邓国斌,等.进化粒子群优化算法在船舶纵向运动参数辨识算法设计中的应用[J].舰船科学技术,2017,39(4A):13-15.
- [10] 秦余钢,马勇,张亮,等.基于改进最小二乘算法的船舶操纵性参数辨识[J].吉林大学学报:工学版,2016,46(3):897-903.
- [11] FOSSEN T I, PETTERSEN K Y, GALEAZZI R. Line-of-sight path following for dubins paths with adaptive sideslip compensation of drift forces[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23(2):820-827.
- [12] MOREIRA L, FOSSEN T I, SOARES G. Path following control system for a tanker ship model[J]. Ocean Engineering, 2007, 34, 2074-2085.
- [13] 王立军,张显库.响应型船舶运动模型的建模与遗传算法辨识[J].中国航海,2013,36(2):33-37.
- [2] 闫亮,段朝阳,张公平,等.一种采用脉冲调制器的空空导弹直/气复合控制系统稳定性研究[J].导航定位与授时,2017,4(1):42-48.
- [3] 雷虎民,张旭,董飞垚,等.零控脱靶量有限时间收敛制导律[J].国防科技大学学报,2015,37(3):136-141.
- [4] SHTESSEL Y B, SHKOLNIKOV I A, LEVANT A. Guidance and control of missile interceptor using second-order sliding modes[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2009, 45(1):110-124.
- [5] CHOI J Y, CHWA D. Adaptive control based on a parametric affine model for tail-controlled missiles[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2006, 42(2):659-669.
- [6] 滕江川,吴晓燕,陈永兴,等.基于模糊控制理论的脉冲推力器点火算法[J].四川大学学报:工程科学版,2011(s1):194-198.
- [7] 朱隆魁,汤国建,余梦伦.防空导弹直接力/气动力复合控制系统设计[J].宇航学报,2008,29(6):1895-1900.
- [8] 沙建科,徐敏.基于随机鲁棒动态逆的防空导弹姿态控制设计[J].计算机仿真,2016,33(1):95-99.
- [9] 姚怀瑾,林德福,臧路尧,等.变结构经典比例导引制导性能对比研究[J].计算机仿真,2014,31(7):31-35.
- [10] YEH F K. Adaptive-sliding-mode guidance law design for missiles with thrust vector control and divert control system[J]. IET Control Theory & Applications, 2012, 6(4):552-559.