

引用格式: 向伦凯, 李晓, 蒋云, 等. 无人水面艇推进系统模型辨识[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(增刊1): 7-11, 22.

Xiang L K, Li X, Jiang Y, et al. Model identification of unmanned surface vehicle propulsion system[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(Supp 1): 7-11, 22.

无人水面艇推进系统模型辨识



扫码阅读全文

向伦凯*, 李晓, 蒋云, 杨咏林

北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085

摘要: [目的] 提出一种能简单、快速获取无人水面艇推进系统经验模型的方法。[方法] 在理论模型的基础上, 通过Z型操舵、定常回转以及发动机稳定转速试验, 获取实船运动数据, 搭建基于Simulink Project的开发平台, 完成对喷水推进系统关键参数的估计、辨识以及仿真对比, 从而得到实船推进系统经验模型。[结果] 经验证, 采用该方法所得推进系统模型正确、合理。[结论] 所做研究可为无人水面艇控制系统的开发奠定基础。

关键词: 无人水面艇; 推进系统; 操舵; 参数辨识

中图分类号: U661.73

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.01200

Model identification of unmanned surface vehicle propulsion system

Xiang Lunkai*, Li Xiao, Jiang Yun, Yang Yonglin

Beijing Sifang Automation CO., Ltd., Beijing 100085, China

Abstract: [Objectives] A simple and rapid method for obtaining the empirical model of the propulsion system of Unmanned Surface Vehicles (USV) is presented. [Methods] Based on the theoretical model, the motion data of USV is obtained by zigzag manoeuvre tests, steady turning motion tests and engine stable speed tests. The development platform based on Simulink Project is built to estimate, identify and compare the key parameters of the propulsion system, and then the empirical model of propulsion system is obtained. [Results] It is proved that the propulsion system model obtained through this method is correct and reasonable. [Conclusions] The research can lay a foundation for the development of the control system of USV.

Key words: Unmanned Surface Vehicle (USV); propulsion system; steering; parametric identification

0 引言

无人水面艇(以下称“无人艇”)在水域测绘、水质监测、安防巡逻等领域有着广阔的应用前景, 现已成为国内外的研究热点。推进系统是无人艇的重要组成部分, 推进系统建模及参数辨识是实现其自主航行、智能避障等功能的基础, 而辨识的精确性直接决定了最终控制的好坏。孙晓界等^[1]以大连海事大学的“蓝信”号无人艇为研究对象, 提出了一种基于递推最小二乘法^[2-3]的在线估计参数方法, 并通过实船试验验证了结果的准确性,

不足之处在于在线辨识会导致控制器计算负荷加大, 且对于快速变化的载荷无法自适应地补偿。陈霄等^[4]提出了一种基于分步实艇数据处理的模型参数辨识算法, 并通过实船进行了部分验证, 但该辨识方法的步骤较多, 推导繁琐, 无法满足实际工程中要求的快速性及自动性。杨旺林^[5]通过构建无人艇运动方程, 使用一种基于遗传算法的系统辨识方法对模型参数开展了辨识研究, 但遗传算法作为一种启发式方法用于船舶参数辨识不仅没有体现其优势, 反而使得该方法效率低下且计算量大。井升平等^[6]对一种具有防飞溅条的新型

收稿日期: 2018-02-26

网络首发时间: 2019-4-18 13:33

基金项目: 2016年湖北省省院合作专项资金资助项目(科鄂育字[2017]11号)

作者简介: 向伦凯, 男, 1990年生, 硕士, 工程师。研究方向: 无人艇智能控制。E-mail: xianglunkai@sf-auto.com

李晓, 女, 1983年生, 硕士, 高级工程师。研究方向: 无人艇智能控制。E-mail: lixiao@sf-auto.com

*通信作者: 向伦凯

水面无人艇的操纵性能进行了研究,其采用粒子群算法以及基于成长机制的遗传算法并结合外部分层策略设计优化回转性指数和应舵性指数,但该方法也存在计算量大且效率低的缺点。吴恭兴^[7]针对无人艇操舵响应模型设计了一种基于支持向量机(SVM)^[8-9]的辨识方法,并分别对一阶、二阶以及非线性响应方程进行了全面的辨识和泛化验证。然而,在基于非线性响应模型设计的控制器中,其所整定的参数相对于模型参数摄动将变得敏感,从而导致控制器设计复杂且常常设计失败;此外,文中亦未考虑发动机转速响应模型对无人艇控制的影响。李春风等^[10]通过神经网络对线性水动力系数、弱非线性水动力学系数和强非线性水动力系数进行了辨识,并通过免疫模糊遗传算法对神经网络辨识器进行了优化,但所辨识的结果只适用于仿真研究,且没有结合实际控制器的设计。

针对上述问题,本文拟提出一种能简单、快速获取的、用于实船控制的推进系统经验模型方法。将以四方公司研制的SeaFly无人艇作为研究对象,建立推进系统理论模型,通过Z型操舵、定常回转的操纵性试验以及发动机稳定转速试验获取实船运动数据,搭建Simulink Project环境,利用Parameter Estimation模块分析采集数据,自动准确地辨识推进器各个通道的工作参数,并通过HIL/SIL模块验证所建模型的正确性和合理性。通过该方法,可以迅速获取实船推进系统的经验模型,为控制器开发奠定基础,同时将推进系统的试验数据管理、控制系统快速原型开发以及在线/离线验证融为一体。

1 面向控制的无人艇推进系统模型

由刚体动力学,可以将船体运动与北东坐标系下的运动联系起来,因此,安装于船舶的任何设备都要服从方程式

$$\left[\frac{d}{dt} \mathbf{H}\right]^N = \left[\frac{d}{dt} \mathbf{H}\right]^B + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{H} \quad (1)$$

式中: N 为北东坐标系; B 为船舶坐标系; \mathbf{H} 为关于任何船舶状态的矢量,如线动量或者角动量; $\boldsymbol{\omega}$ 为角速度。

通过将线动量和角动量分别代入式(1)中的 \mathbf{H} 变量中,可以得到船艇动力学方程组,如式(2)所示。其中 X, Y, N 为船艇在3个自由度上的作用力; x_c 为船艇重心在船舶坐标系下的横坐标; m 为船体质量; I_{zz} 为船体转动惯量; u, v, ω 分别为纵向、横向以及偏航角速度,这些变量可以通过船上传感器直接获取。

$$\left. \begin{aligned} m(\dot{u} - v\omega - x_c\omega^2) &= X \\ m(\dot{v} + u\omega + x_c\dot{\omega}) &= Y \\ I_{zz}\dot{\omega} + mx_c(\dot{v} + u\omega) &= N \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

为了将式(2)应用于船舶实际控制,需要在平衡状态下将其线性化。通过对航行包络线上的特征点进行扰动,将式(2)转化成系数为稳定导数和控制导数的线性状态方程,从而得到实用的控制器设计参考对象。直线定速航行是无人艇常用的平衡状态,在这种情况下,可得到状态方程

$$\begin{bmatrix} (m - X_u) & 0 & 0 \\ 0 & (m - Y_v) & (mx_c - Y_r) \\ 0 & (mx_c - N_v) & (I_{zz} - N_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & (Y_r - mu_0) \\ 0 & N_v & (N_r - mx_c u_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \\ v \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ Y_\delta \\ N_\delta \end{bmatrix} \delta \quad (3)$$

式中: δ 为舵角; X_u, Y_v, Y_r, N_v, N_r 为稳定导数; X_u, Y_v, Y_r, N_v, N_r 为控制导数; u_0 为直线巡航纵向速度; Y_δ, N_δ 分别为操舵对横向运动和偏航运动的水动力系数。由式(3)可知,当船舶以恒定速度航行时,纵向运动与航向控制之间没有耦合关系,可采用分离控制^[11],分别对航速和航向设计单通道PID控制器,即可实现对无人艇的解耦控制。推进控制方案如图1所示,图中 ψ, V 分别为测定的船向角度和航速, n 为转速,下标 d 指变量为设计跟随值,符号 Δ 指变量的增量值。

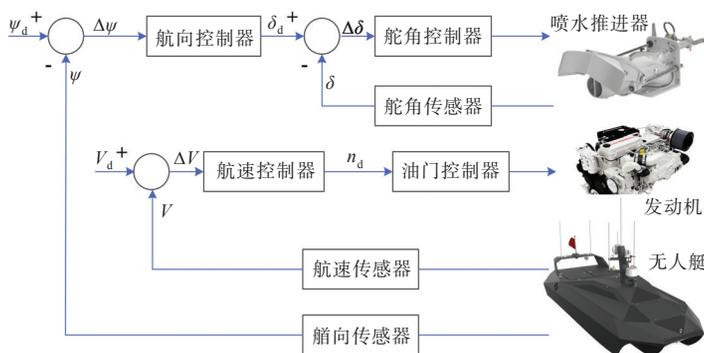


图1 无人艇推进控制方案

Fig.1 Propulsion control scheme of USV

2 参数辨识与验证

2.1 试验原理与方法

试验基于四方公司自主研发的SeaFly无人艇以及其远程监控终端,两者通过无线电台进行信息交互。如图2所示,监控终端向无人艇下发任务,实时监测状态参数及航行画面,数据自动存入后台数据库,同时通过Simulink Project进行快速分析、建模以及控制率设计。

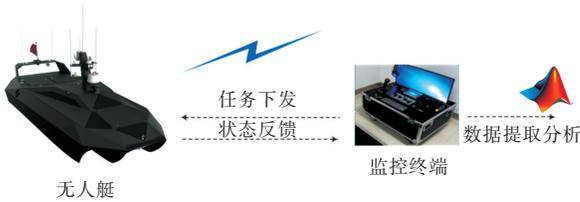


图2 试验平台
Fig.2 Test platform

通过监控终端向无人艇下发规划好的Z型试验任务后,无人艇自动执行。通过不同航速下的Z型操舵试验,可以为模型的验证和泛化提供可靠的数据集合。任务结束后,无人艇会自动停船以便启动下次任务,后台采集的数据则发送到Simulink Project进行数据的滤波、去偏置以及趋势等操作,用以为自动参数辨识提供优良的数据来源。

无人艇的横向运动特性主要由Z型试验和定常回转试验体现。其中,Z型试验可综合反映无人艇的转动惯性和回转增益等动力学特征,而定常回转则将直接反映舵效的回转增益。无人艇的纵向运动特性可由发动机转速—航速试验来体现。

2.2 转向通道辨识

由式(3),可提取转向通道的线性模型如式(4)所示:

$$T_1 T_2 \dot{\omega} + (T_1 + T_2) \dot{\omega} + \omega = K(\delta + T_3 \dot{\delta}) \quad (4)$$

式中, $T_i(i=1,2,3)$ 和 K 为决定这个系统动态行为的参数, K 为回转指数, T 为应舵指数。由此,模型建立的问题即可转化为参数辨识问题。为确定这些参数的具体数值,有2种策略:

1) 基于时域的辨识。

通过构造一个Simulink模型或者代价函数,使用非线性/线性规划^[12]迭代优化参数。

2) 基于频域的辨识。

设计扫频输入信号以激励控制系统产生对应的模态,通过傅里叶变换以及传递函数拟合,对模型进行匹配^[13]。

其中,基于频域模型辨识的控制系统更精确,且具有较强的鲁棒性。通过开发频域辨识的实用软件,采用welch函数加窗,即可有效控制辨识精度和时间。但在参数较少且不需要足够精确带宽的情况下,时域方法的效率更高。

通过对实船操纵性试验数据的分析,航向系统可以简化为动力学方程:

$$T\dot{\omega} + \omega = K\delta \quad (5)$$

Z型试验数据如图3所示,定常回转试验数据如图4所示。图中: V 为航速; φ 为航向角。由图4可以看出,测试是在基本保持航速不变的情况下进行的,满足解耦条件。通过回转试验,此时 $\omega = K\delta$, 可以估算出回转指数值 $K = -0.41$ 。

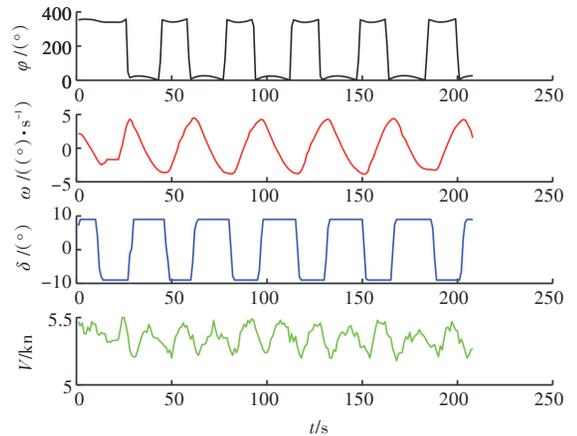


图3 Z型操舵试验数据曲线

Fig.3 Data curves of zigzag manoeuvre test

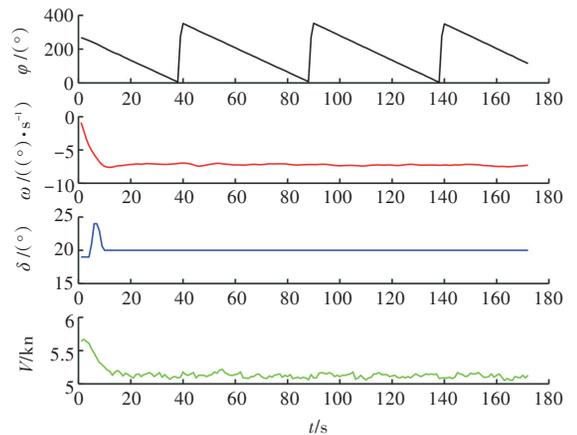


图4 定常回转试验数据曲线

Fig.4 Data curves of steady turning motion test

需要指出的是,当左舵与右舵的回转半径不同时,应对舵角零件进行机械校正或者对回转指数进行平均处理以及零点估算。这里采用梯度下降法^[14],估算出的舵角零点 $\delta_R = -2.97^\circ$ 。

通过输入Z型操舵试验数据,可以得到参数 $K = -0.41$, $T = 4.4$, $\delta_R = -2.97^\circ$ 。在这组参数下,对应的航向模型为

$$\frac{\omega}{\delta} = \frac{-0.41}{4.4s + 1} \quad (6)$$

式中, s 为拉普拉斯算子。

图5给出了通过实测数据验证的对比结果。从图中可以看到, 所辨识的模型在低频部分其响应与实际系统基本吻合, 误差由外部干扰及传感器噪声所引起。

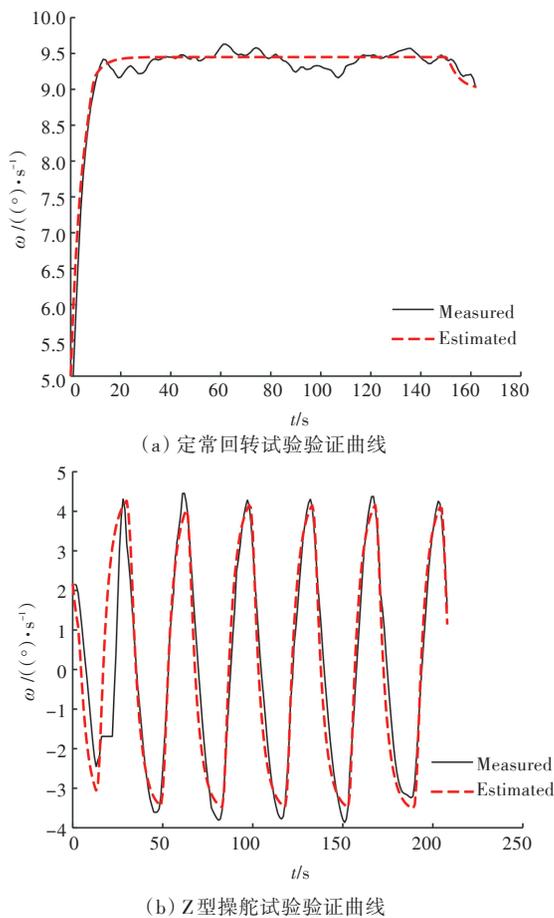


图5 模型测试验证

Fig.5 Model test verification

2.3 油门通道辨识

船体航速控制主要由发动机油门开度调节。在中、低速情况下, 速度控制主要取决于喷泵翻斗的开度, 而发动机转速则不变; 当船体高速运行时, 翻斗开度可以达到最大, 此时, 航速控制由发动机的转速控制。在试验发动机转速时, 将发动机转速由 600~2 300 r/min 分阶段进行稳定性控制测试, 收集数据的时程为 657 s, 采样周期为 250 ms。收集的数据如图6所示, 图中 PORT 和 STBD 分别指左、右舷发动机。

从图6所示的时间历程数据中可以发现: 当左、右发动机转速在 600~2 300 r/min 之间时, 航速随发动机转速的增加而线性增加, 当转速达到 2 300 r/min 以上时, 航速随着发动机转速的增加而快速上升, 呈现非线性特性; 当左、右发动机

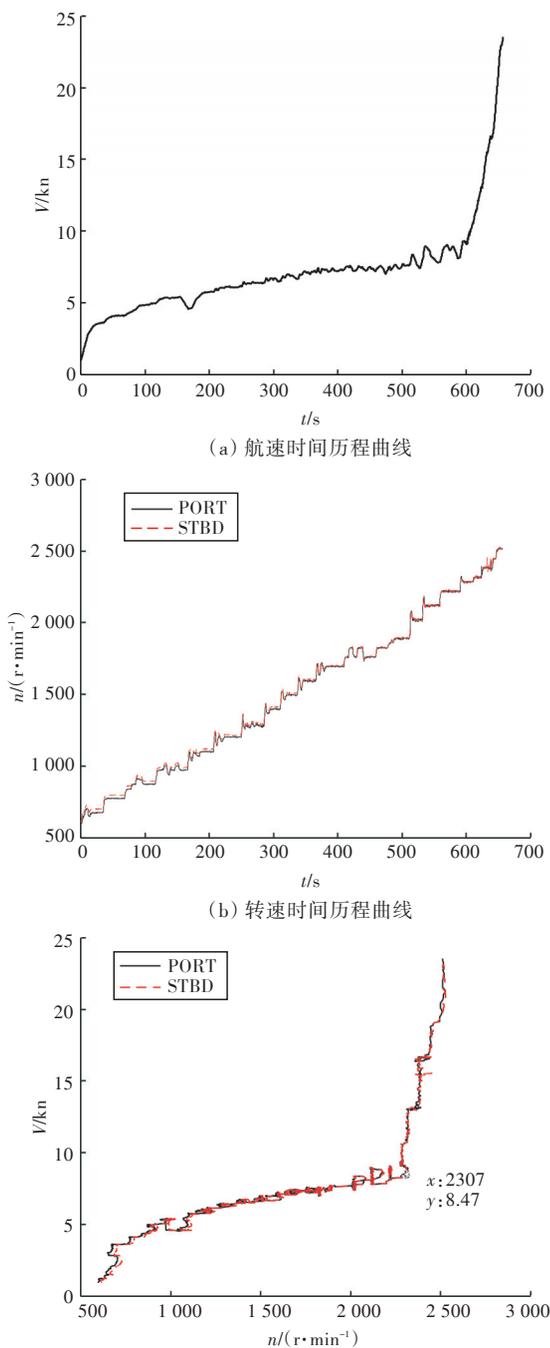


图6 航速以及发动机转速时间历程数据曲线

Fig.6 Time history data curves about speed of USV and engine speed

转速在 600~2 300 r/min 时, 参考输入转速 n_r 为实际输出转速 n_o 的线性函数, a, b 为待定参数,

$$n_r = an_o + b \quad (7)$$

图7所示为左、右发动机转速差随时间的变化曲线。由图可知, 随着发动机转速的增加, 转速差随之增加, 当输出转速在 600~2 300 r/min 之间时, 随着转速的稳定提升, 转速差与转速之间呈线性递增关系, 且右发动机转速与左发动机相比最多相差 20 r/min。随后, 左、右发动机转速差稳定在零线附近。图中 δn 为左、右发动机转速差。

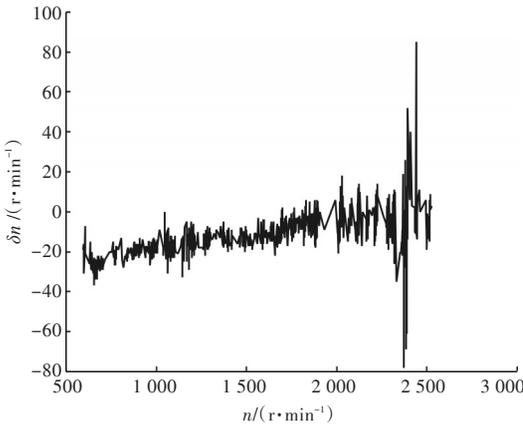


图7 左、右发动机转速误差曲线

Fig.7 Speed error curve of the left and right engines

为确定式(7)线性模型的参数并给出误差分析,使用 Parameter Estimation 功能对左发动机转速进行了快速估计,结果如下:

$$n_{Lcmd} = 0.7315n_{Lfdb} + 561.6863 \quad (8)$$

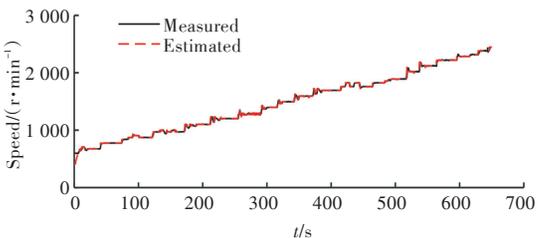
式中: n_{Lcmd} 为左发动机期望转速; n_{Lfdb} 为左发动机实际反馈转速。

同理,对右发动机做标定,结果如下:

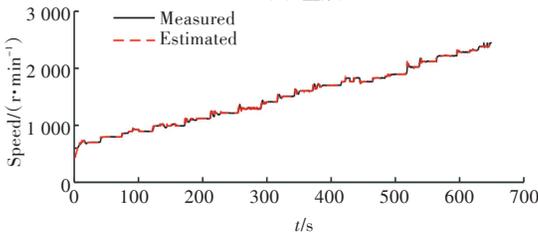
$$n_{Rcmd} = 0.7416n_{Rfdb} + 538.16 \quad (9)$$

式中: n_{Rcmd} 为右发动机期望转速; n_{Rfdb} 为右发动机实际反馈转速。

图8所示为估计模型拟合图,拟合误差5 r/min,约占试验数据的95%。上述标定为提高船体航速控制精度提供了重要依据,使得输出转速能以较小的误差收敛于目标转速。



(a) 左舷



(b) 右舷

图8 发动机转速标定验证曲线

Fig.8 Calibration curves of engine speed

3 结语

本文针对无人艇从工程上提出了一种快速、自动进行推进系统模型辨识的方法。首先,根据刚体动力学获取了无人艇横向、纵向的运动控制

方程;然后,针对横航向和纵向系统分别设计了Z型操舵、定常回转以及发动机转速—航速等试验;最后,采用 Simulink Project 开发平台对数据进行分析,实现了快速、自动的参数辨识。对于不同工况的辨识,分别制定了不同航速下的操纵实验来建立数据库,通过自动辨识,可以获取不同工况下的模型,从而设计出相应的控制增益表,实现增益的自适应调度。试验结果表明,采用该方法所得到的推进系统模型正确、合理,能直接运用于控制系统开发,可为无人艇的操纵性分析和控制提供行之有效的思路和方法。

参考文献:

- [1] 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.
Sun X J, Shi L L, Fan Y S, et al. Online parameter identification of USV motion model[J]. Navigation of China, 2016, 39(1):39-43 (in Chinese).
- [2] Koyama K. Analysis of full-scale measurement of maneuverability by trial and error methods [R]. Delft, The Netherlands: Shipbuilding Laboratory, Delft University of Technology, 1971.
- [3] 张洪东,李宏,郑勇. 基于递推最小二乘法的永磁同步电动机参数辨识[J]. 微特电机, 2011, 39(11): 14-16.
Zhang H D, Li H, Zheng Y. Parameters identification of PMSM based on recursive least squares [J]. Small & Special Electrical Machines, 2011, 39(11): 14-16 (in Chinese).
- [4] 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.
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 (in Chinese).
- [5] 杨旺林. 水面无人艇运动模式实时监测系统设计的初步研究[D]. 镇江:江苏科技大学, 2017.
Yang W L. Preliminary study on the design of real time monitoring system of motion mode for unmanned surface vehicle [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2017 (in Chinese).
- [6] 井升平,杨松林,魏子凡,等. 一种新型水面无人艇的Z形操舵试验辨识及分析[C]// 第九届武汉地区船舶与海洋工程研究生学术论坛论文集. 武汉: [s.n.], 2016: 158-164.
Jing S P, Yang S L, Wei Z F, et al. Identification and analysis of Z steering test for a new type of unmanned

