

DOI: 10.3724/SP.J.1218.2013.00552

基于多辨识模型优化切换的 USV 航向动态反馈控制

周焕银^{1,2,3}, 封锡盛¹, 胡志强¹, 李 为^{1,3}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;
2. 东华理工大学机械与电子工程学院, 江西 南昌 330013; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了解决无人水面航行器 (USV) 受外界干扰大且航向控制模型参数未知等航向控制中的相关难题, 提出基于多辨识模型切换的动态反馈控制法。此控制法首先根据最小二乘法对 USV 系统航向模型进行辨识, 构建过渡模型集; 然后通过预设平均拟合偏差阈值法筛选过渡模型集, 构建临时模型集, 以避免模型集中子模型过分庞大造成控制过程计算量大的问题; 最后根据临时模型集构建动态反馈控制库。为了从控制库中获取“最佳”控制策略, 提出以控制性能指标为事件驱动的多辨识模型切换策略。多次湖泊试验表明: 基于多模型切换的动态反馈法实现了系统航向无超调、无静差运动, 从而提高了 USV 系统控制品质。

关键词: 无人水面航行器; 最小二乘法; 辨识模型; 动态反馈控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2013)-05-0552-07

Dynamic Feedback Controller Based on Optimized Switching of Multiple Identification Models for Course Control of Unmanned Surface Vehicle

ZHOU Huanyin^{1,2,3}, FENG Xisheng¹, HU Zhiqiang¹, LI Wei^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
2. School of Mechanical and Electronic Engineering, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A dynamic feedback control algorithm based on multiple identification models switching is proposed to solve the problems in course control of the unmanned surface vehicle (USV), such as large external disturbances and unknown course control model parameters. Firstly, a transitional model set is constructed by identifying USV course model according to the least square method. Then, a temporal model set is selected from the transitional models by introducing mean fitting error, which can avoid huge computation cost caused by large amount of sub-models in model set. Finally, a dynamic feedback controller database is designed based on the temporal model set. Meanwhile, using control performance indexes as event driven factors, some switching methods for multiple identification models are taken to obtain optimal controllers from the controller database. Some lake trials show that the multi-model switching based dynamic feedback method can improve the control performances, and the USV can move without overshoots or static errors.

Keywords: unmanned surface vehicle; least square method; identification model; dynamic feedback control

1 引言 (Introduction)

无人水面航行器 (USV) 受外界环境干扰影响大且系统控制模型难以确定, 这使得系统航向控制成为一大难题。USV 系统航向控制的研究多围绕系统所受外界环境干扰的辨识问题展开^[1-2]。虽根据系统外界干扰力的辨识而构建的控制算法能保证系统在某些环境下具有良好的动态性能, 但无法保证环境变化后系统的控制品质。USV 系统模型辨识多通过仿真实验获取系统的控制模型^[3-5], 而对于受

外界环境影响较大的 USV 系统, 由于外界环境复杂多变, USV 系统实际运行模型与仿真模型存在不可忽视的模型误差。文 [6-7] 采用聚类在线辨识法辨识系统模型的不确定参数, 通过仿真验证了算法; 张铭钧等采用一种稳态自适应在线辨识法对水下机器人的部分水动力参数进行辨识, 通过了水池试验验证^[8]。参数辨识法可从实际试验中辨识出系统的相关水动力参数^[9-10], 通过试验所获取的信息相对于通过理论推导所获取的水动力参数具有更强的实际应用价值。而完全不依赖于模型的控制算法受多

基金项目: 中国科学院科技创新重点部署项目 (KGFZD-125-014); 江西省教育厅科技项目 (GJJ13466); 机器人学国家重点实验室开放课题 (2012-008); 国家自然科学基金资助项目 (51009016)。

通讯作者: 周焕银, z_huanyin3@163.com 收稿/录用/修回: 2012-11-01/2013-04-13/2013-08-19

种条件约束, 局限性较强^[11]. 基于模型的 USV 系统航向控制法, 多采用抗干扰能力较强的滑模控制法^[12]. 状态反馈控制法是一种重要的工程控制法, 具有物理意义明确的特点^[13], 其通过与多种控制方法结合达到解决复杂非线性问题的目的^[14].

USV 航向控制系统具有完全可观测性与完全可控性, 本文综合分析参数辨识法与输出反馈法的控制优势, 提出基于多辨识模型切换的动态反馈法.

本文所研究 USV 系统的外场辨识试验为系统模型辨识提供了丰富数据. 为了减少辨识模型与实际模型的偏差, 构建了 USV 系统过渡辨识模型集. 为了减少模型切换次数, 提出了预设平均拟合偏差法, 获取临时辨识模型集. 根据临时模型集特点, 构建 USV 系统控制库, 为了保证控制切换过程中的稳定性与系统安全性, 提出稳定切换策略法与紧急切换策略法. 通过预设的控制性能指标对所获取的临时模型集进行模型筛选, 将与预期性能指标最接近的模型作为“最佳”模型. 根据系统控制性能进行控制参数切换及微调, 以提高系统运动控制的鲁棒性与自适应能力.

2 基于拟合偏差的最小二乘航向辨识法 (Least square identification method for heading based on fitting error)

2.1 航向模型辨识

本文研究 USV 系统的航向与纵向速度的控制执行机构为系统尾部喷嘴角, 尾部喷嘴角的左右扭动改变系统航向, 喷嘴角向后喷水产生的反作用力来控制 USV 系统的纵向速度.

USV 系统航向控制模型多采用 Fossen 定义的模式^[15], 其表达式为

$$\begin{cases} \dot{\Psi} = r \\ (I_{zz} - N_r)\dot{r} = N_r u r + N_{r|r}|r| + N_\delta u^2 \delta_r(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中, 变量为: $\Psi, r, u, \delta_r(t)$ 分别为 USV 系统的航向角 (rad)、航向角速度 (rad/s)、纵向速度与 USV 系统尾部喷嘴角左右扭动角度, 其下标 r 为航向角速度. 模型参数描述为: I_{zz} 为 USV 系统动坐标系下垂直轴的转动惯量, 下标 z 表示绕垂直轴的方向, $N_r, N_r, N_{r|r}, N_\delta$ 为系统有因次水动力参数. 各参数具体含义请见文 [15].

USV 系统水动力参数未知, 通过将航向控制模型 (1) 转化为模型 (2) 进行辨识:

$$\begin{cases} \dot{\Psi} = r \\ \dot{r} = a_1 u r + a_2 r|r| + b_1 u^2 \delta_r(t) \end{cases} \quad (2)$$

系统航向模型中含有 3 个参数 (a_1, a_2, b_1) 有待辨识.

$$\dot{r} = a_1 u r + a_2 r|r| + b_1 u^2 \delta_r(t) \quad (3)$$

本文以模型 (3) 为航向控制参考模型进行模型的参数估计.

2.2 模型参数估计与筛选函数的构建

本文采用一般模型辨识所用的 S 形开环试验法, 获取 USV 系统输入量对应的输出数据, 根据最小二乘法^[16] 辨识系统运动控制中的模型参数, 构建系统辨识模型集.

将试验数据分为用于参数估计的数据与用于参数验证的数据. 由于所研究的辨识模型为 SIMO (single input multiple output) 模型, 将待辨识模型 (3) 设置为

$$y_1(k+1) = a_1 y_2(k) + a_2 y_3(k) + b_1 U(k) + e(k) \quad (4)$$

其中, $U(k), y_1(k+1), y_2(k), y_3(k)$ 分别为系统第 k 次输入与输出序列, a_1, a_2 与 b_1 为待估计模型参数. 最小二乘格式为

$$\begin{cases} \boldsymbol{\varphi}(k) = [y_2(k) \quad y_3(k) \quad U(k)]^T \\ \boldsymbol{\theta} = [a_1 \quad a_2 \quad b_1]^T \end{cases} \quad (5)$$

$\boldsymbol{\theta}$ 为待估计值, 辨识模型为

$$y_1(k+1) = \boldsymbol{\varphi}^T(k) \boldsymbol{\theta}(k) + e(k) \quad (6)$$

引入最小二乘准则函数:

$$J = \sum_{i=0}^{N-1} (y_1(k+1+i) - \boldsymbol{\varphi}^T(k+i) \tilde{\boldsymbol{\theta}})^2 \quad (7)$$

设: $\boldsymbol{\Phi}_N = [\boldsymbol{\varphi}(k) \quad \boldsymbol{\varphi}(k+1) \cdots \boldsymbol{\varphi}(k+N-1)]^T$ 与 $\mathbf{Y}_N = [y_1(k+1) \quad y_1(k+2) \cdots y_1(k+N)]^T$ 分别为 N 次输入输出观测数据. $\mathbf{e}_N = [e(k) \quad e(k+1) \cdots e(k+N-1)]^T$ 为随机噪声带来的误差与模型误差, N 表示采样数组中数据个数. 根据极大值原理, 准则函数最小值条件为

$$\frac{\partial J}{\partial \tilde{\boldsymbol{\theta}}} = -\boldsymbol{\Phi}_N^T (\mathbf{Y}_N - \boldsymbol{\Phi}_N \tilde{\boldsymbol{\theta}}) - \boldsymbol{\Phi}_N^T (\mathbf{Y}_N - \boldsymbol{\Phi}_N^T \tilde{\boldsymbol{\theta}}) \quad (8)$$

故若 $\boldsymbol{\Phi}_N^T \boldsymbol{\Phi}_N$ 为可逆矩阵, 则 $\boldsymbol{\theta}_N$ 的最小二乘估计值为

$$\tilde{\boldsymbol{\theta}}_N = (\boldsymbol{\Phi}_N^T \boldsymbol{\Phi}_N)^{-1} \boldsymbol{\Phi}_N^T \mathbf{Y}_N \quad (9)$$

将试验数据代入方程 (9), 获取过渡模型参数估计值.

模型参数的验证与筛选. 将试验真值 Y_{iN} 与模型输出值 $\boldsymbol{\Phi}_{iN}^T \tilde{\boldsymbol{\theta}}_j$ 进行对比, 通过方程 (10) 获取系统拟合偏差 \bar{e}_{jN} .

$$\bar{e}_{jN} = (Y_{iN} - \boldsymbol{\Phi}_{iN}^T \tilde{\boldsymbol{\theta}}_j) / N \quad (10)$$

各组平均拟合偏差 e_j 为

$$e_j = \sum_{i=1}^m |\bar{e}_{jN}|/m = \sum_{i=1}^m |Y_{iN} - \Phi_{jN}^T \tilde{\theta}|/m \quad (11)$$

其中 m 为用于参数拟合的试验组数。

临时模型集的构建. 预设平均拟合偏差的第 n 组范围为 ξ_n , 筛选系统过渡模型集中的模型, 将满足预设 ξ_n 要求的过渡模型通过模型参数的平均拟合方程 (12) 进行拟合, 得到临时模型集参数.

$$\hat{\theta}_n = \frac{\sum_{i=1}^r \tilde{\theta}_{iN}}{M} \quad (12)$$

其中 $\hat{\theta}_n$ 为满足 ξ_n 阈值的临时辨识模型参数估计值, M 为满足 ξ_n 要求的临时辨识模型个数.

2.3 USV 系统临时辨识模型集的构建

根据待辨识模型 (4), 设航向辨识模型 (3) 的输出数据为 $y_1(k+1) = r(k+1)$, $y_2(k) = u(k)r(k)$ 与 $y_3(k) = |r(k)|r(k)$, 输入数据为 $U(k) = u(k)u(k)\delta_r(k)$. 系统采样时, 将 $u(k)r(k)$ 、 $|r(k)|r(k)$ 与 $u(k)u(k)$ 分别作为整体变量处理, 从待辨识模型 (3) 可以看出此种处理并不影响模型参数的估计.

从试验数据中任选 13 组数据代入式 (9), 获取过渡模型集中各模型参数估计值. 从不同试验数据中任选 $m = 7$ 组数据检验过渡模型输出值与实际输出值的拟合程度, USV 系统航向角速度 r 为被检验的状态量. 通过筛选函数 (1) 获取各拟合偏差 e_j , 如表 1 所示.

表 1 360bot 航向控制过渡辨识模型参数估计值

Tab.1 Estimated parameters of USV course control temporary identification models

过渡模型	a_1	a_2	b_1	e_j
M_{h1}	0.5392	0.001	-0.0152	≈ 25
M_{h2}	0.5005	0.0116	-0.0065	≈ 13.3
M_{h3}	0.2236	0.0171	-0.0134	≈ 3
M_{h4}	0.5244	0.0063	-0.0136	≈ 4
M_{h5}	0.2125	0.0186	-0.0134	≈ 3
M_{h6}	0.2966	-0.0002	-0.005	≈ 3.5
M_{h7}	0.2766	0.0034	-0.0044	≈ 3.5
M_{h8}	0.5319	0.0093	-0.0119	≈ 14.1
M_{h9}	0.3871	0.0216	-0.0528	≈ 13.7
M_{h10}	0.2706	0.0056	-0.006	≈ 12.1
M_{h11}	0.5003	0.0082	-0.0082	≈ 15
M_{h12}	0.1357	0.0411	0.0086	≈ 20
M_{h13}	0.011	0.0727	0.0307	≈ 20

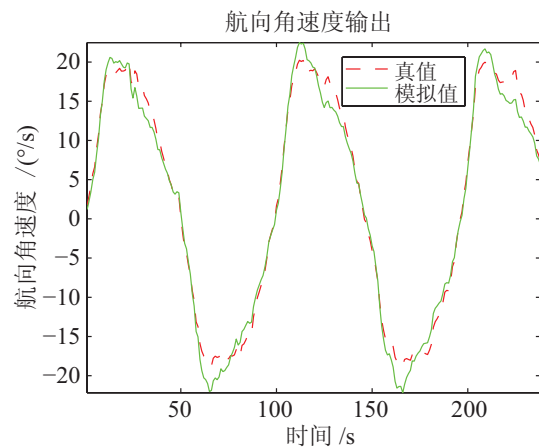
预设 4 组平均拟合偏差范围为 $\xi = \{\{\xi_1 > 15\}, \{15 < \xi_2 < 5\}, \{5 < \xi_3 < 3\}\}$, 根据式 (12) 获取临时模型集中各模型参数, 见表 2, 符号表述为 $M_{h1}, M_{h2}, M_{h3}, M_{h4}$.

表 2 USV 航向控制临时辨识模型集

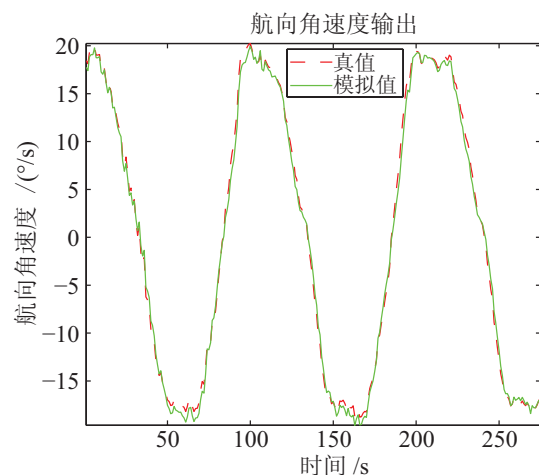
Tab.2 Sets of USV course control temporary identification models

临时模型	a_1	a_2	b_1
M_{h1}	0.339231	0.016638	-0.00855
M_{h2}	0.358178	0.009989	-0.0143
M_{h3}	0.27408	0.01326	-0.018
M_{h4}	0.24455	0.011	-0.0089

从辨识数据中任选一组数据, 代入临时模型中进行曲线拟合. 系统实际输出曲线 (真值) 与临时模型仿真输出曲线 (模拟值) 的对比见图 1, 其中虚线为系统湖试输出曲线, 实线为临时模型的仿真输出曲线. 图 1(a) 为平均拟合偏差大于 15 的比较图, 图 1(b) 为平均拟合偏差小于 3 的比较图.



(a) 平均拟合偏差大于 15 的曲线比较



(b) 平均拟合偏差小于 3 的曲线比较

图 1 实际曲线与拟合曲线的对比

Fig.1 Comparison between the fitting curve and practical curve

通过对多组拟合曲线的分析发现, 系统实际输出值与临时模型仿真输出值间的平均拟合偏差远远小于所有构建此临时模型的过渡模型的平均拟合偏差. 图 1 表明, 临时模型 M_{11} 的拟合偏差 $|\bar{e}_{1N}| = 1.75$ 远远小于各过渡模型的平均拟合偏差 $e_1 > 15$.

模型辨识算法说明: 虽然所设的平均拟合偏差越小, 系统实际输出值与模拟仿真值间的绝对偏差越小, 但其所包含的有用信息可能会变少, 实际应用价值也会相对降低. 为了不丢失有价值的信息, 构建了多组临时模型参数, 以获取最佳控制模型.

3 USV 动态反馈控制与切换控制策略 (Dynamic feedback control for USV and switching control laws)

动态反馈控制库的设置. 根据临时模型集中各模型控制特点设置动态反馈控制库. 预设 USV 系统航向动、静态性能指标, 通过相应的切换策略从控制库中选取满足指标要求的“最佳”控制策略. 本文所研究 USV 系统航向控制方框图如图 2 所示.

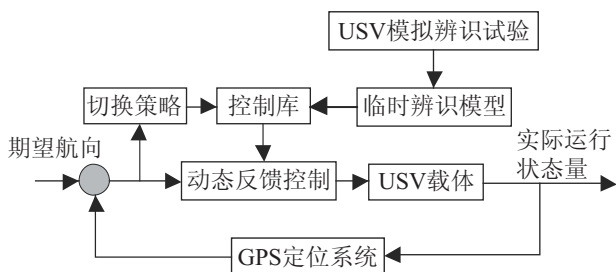


图 2 基于多辨识模型切换的 USV 系统航向控制方框图
Fig.2 The block diagram of the USV course control based on multiple identification models switching

根据水下机器人的动力学模型以及运动学模型^[15-16], 将系统航向控制模型 (3) 转换为状态空间表达式:

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & a_1 u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ a_2 |r| \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_1 u^2 \end{bmatrix} \delta_r \quad (13)$$

由于纵向速度 u 与航向控制模型中的各状态量间耦合性强, 一般将 u 作为模型参数处理^[17]. 在设计控制策略时, 纵向速度有如下约束条件: if $u < 1.0\text{m/s}$, $u = 1.0$; else $u = u$. 在获取“最佳”模型后, 根据此条件计算模型参数.

动态反馈控制律的构建. 首先, 预设闭环系统矩阵的极点为 λ_1, λ_2 , 极点值范围设为 $-1 < \lambda_1, \lambda_2 < 0$. 根据现代控制理论中的极点配置问题^[14], 构建动态反馈控制律:

$$\delta_{r1}(t) = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + a_1 u}{b_1 u^2} r - \frac{\lambda_1 \lambda_2}{b_1 u^2} \psi - \frac{a_2 |r|}{b_2 u^2} \quad (14)$$

然后, 将表 2 临时模型集中各模型参数赋予控制律 (14), 构建航向控制库, 通过切换策略从控制库中选取“最佳”控制策略.

3.1 基于辨识模型集的控制切换策略

从控制律 (14) 可以发现控制参数与辨识模型参数紧密关联, 根据系统航向控制品质, 研究各临时模型与实际模型间的模型误差. 为了确保控制参数选取过程中 USV 系统的安全性及系统切换过程的稳定性, 本文采用两种类型的控制切换策略: 基于事件驱动的紧急切换策略与基于性能指标函数驱动的多模型稳定切换策略.

3.1.1 基于事件驱动的紧急切换策略

基于事件驱动的紧急切换策略主要是 USV 系统在某些运动状态发散前所采取的策略.

考虑如下切换模型:

$$\Sigma_i = \begin{cases} x(k+1) = f_i(x(k), u(k)) \\ y(k) = C_i x(k) \end{cases} \quad (15)$$

其中 i 为第 i 个子系统.

LaSalle 不变定理^[18]: 对于非线性自治系统

$$\dot{x} = f(x) \quad (16)$$

设方程 (16) 的一个正紧集 $\Omega \subset D$, $V : D \rightarrow R$ 是连续可微函数且在 Ω 内满足 $\dot{V}(x) \leq 0$, 设 E 是 Ω 内所有点的集合, 满足 $\dot{V}(x) = 0$, M 是 E 内的最大不变集, 那么当时间 $t \rightarrow \infty$ 时, 始于 Ω 内的每个解都趋于 M .

定理 1^[19-20]: 系统是 l_∞ 稳定的, 则对每一有界输入 $u(t)$, 输出 $y(t)$ 是有界的.

推论 1: 如果系统 (13) 的输入 $u(t)$ 有界, 输出 $y(t)$ 是无界的, 则系统不稳定.

此推论是定理 1 的逆定理.

推论 2: 构建正紧集函数 $E = y^T(t)y(t)$, 若函数 E 发散变化或在有限时间内其变化率 \dot{E} 超出预设函数 $E = \rho \|y(\infty)\|_2^2$ ($y(\infty)$ 为系统目标状态量输出), 则系统不稳定.

证明:

由于能量函数 $E = y^T(t)y(t)$ 为系统输出函数, 若系统输出不稳定或系统输出状态变量不稳定, 则能量函数 E 变化率呈大于某一正值常数增加; 相对应, 若系统能量函数 E 呈大于某一正值常数增长, 则表明系统输出状态变量不稳定.

3.1.2 基于指标函数的稳定切换策略

预设系统动态性能指标, 设置稳定切换策略, 在线从控制库中选取最佳控制策略.

多李亚普诺夫法稳定判据: 如果各切换子系统渐近稳定且各子系统的李亚普诺夫函数渐近衰减, 则直接切换不影响系统的稳定性.

推论 3: 若切换系统各子系统在状态反馈控制策略下稳定, 则直接切换不影响系统的稳定性.

证明:

若切换系统的各子系统在相应状态反馈控制策略下均稳定, 则根据状态反馈控制特点可知, 基于状态误差构建的能量函数呈指数衰减.

根据多李亚普诺夫法知^[21]系统直接切换稳定. 同样若各系统在预设范围内稳定, 则各子系统的能量函数在预设范围内渐近衰减至某一定值.

3.1.3 基于控制库的最佳控制策略选取

以能量函数为紧急切换策略的驱动函数, 可避免系统运行中的不稳定; 以系统控制品质的阈值为稳定切换策略的驱动事件, 可获取“最佳”控制模型. 预设期望控制性能指标以及系统不稳定指标的阈值置于控制库中, 达到切换控制策略的目的. 切换策略驱动原则与“最佳”控制策略获取步骤:

(1) 将临时辨识模型集中各模型参数代入状态反馈控制律中, 构建控制库.

(2) 预设能量函数 $E = \Psi^T \Psi$ 及其预警能量函数 $\dot{E} > k|\Psi|$ 作为驱动紧急切换策略的事件, k 根据载体航向控制器喷嘴角的饱和程度设置, 本文初步设置为 1.3, 若紧急切换策略启动, 系统直接切换到预设的控制策略下运行.

(3) 航向控制动态性能指标切换: 系统动态性能指标主要为超调量、调节时间. USV 系统航向控制输出曲线超调量不宜过大, 将超调量 $\delta_p \geq 20\%$ 作为紧急切换事件; 超调量 $\delta_p \leq 20\%$ 且 $\delta_p \geq 15\%$ 作为稳定切换策略的事件; 将调节时间 $t_s > 100\text{s}$ 作为稳定切换策略事件.

(4) 静态误差切换: 如果系统稳定且动态性能较佳, 则继续在临时模型集中切换, 以获取“最佳”的临时模型参数. 系统切换条件为航向角稳态误差 $|e_{ss}| > 10^\circ$.

(5) 将所获取的“最佳”控制参数进行微调, 以达到预期的控制性能指标要求.

4 USV 湖试试验数据分析 (Analysis on the test data of USV lake trials)

本次试验环境为湖泊, 风浪小, 系统受外界环境影响较小, 但当系统运行时, 由于自身重量与惯性, 其运行所产生的波浪力对系统的影响是不容忽视的. 本文研究的 USV 系统是中国科学院沈阳自动

化研究所新研发的一类新型自治水下机器人, 系统重 4.5 t, 长 6 m, 宽 2 m, 是一种中型水面机器人, 如图 3 所示.



图 3 本文所研究 USV 系统

Fig.3 The studied USV system

以下试验均为自主航行试验, 即系统根据预设的航向轨迹自主航行. 试验中各图的虚线为预设的航向轨迹.

根据动态反馈控制律 (14) 构建系统航向运动控制库, 预设控制策略顺序与切换策略. 图 4 与图 5 为湖试中寻求最佳控制策略的部分输出曲线图. 其中喷嘴角向右扭转为正, 其最大扭转角为 20° ; 系统航向角顺时针方向为正.

“最佳”控制模型参数获取. 图 4 为基于临时辨识模型集各模型切换的航向控制输出曲线, 其中航向曲线中的虚线为预设的航向轨迹, 即期望航向, 实线为系统实际输出曲线. 为了获取最佳的控制策略, 系统进行了 3 次切换, 从图 4 分析可以看出: 第一次切换前系统基本达到预期的目标, 但为了获取控制库中“最佳”的控制策略, 系统进行了稳定切换; 第二次切换是由于存在静态误差而启动了稳定切换策略; 第三次切换则是由于系统超调过大引起系统紧急切换. 通过此次试验获取了当前运行环境下“较佳”的控制策略. 在较佳控制策略基础上, 对反馈控制参数进行微调, 获取“最佳”控制策略, 然后根据控制律 (14) 推出当前运行环境下系统模型. 图 5 为 USV 系统在“最佳”反馈控制参数下的航向运行曲线, 其具有无静态误差、超调小等控制品质.

湖试结果表明: 控制库能够在系统航向运动发散前采取相应的切换策略, 保证系统在一定静态误

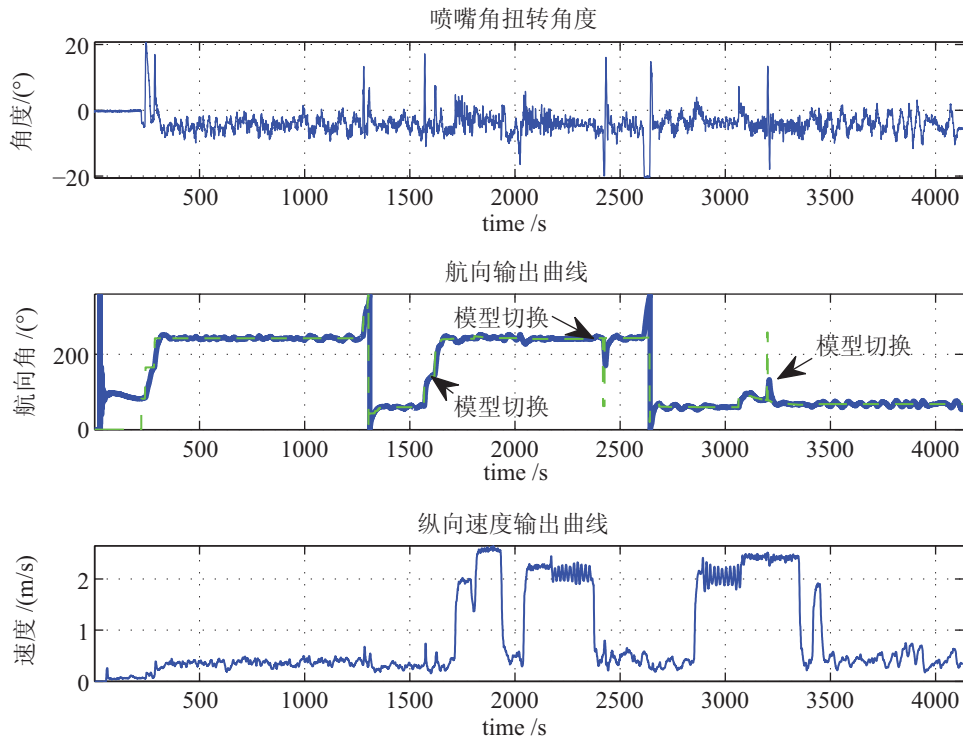


图 4 基于多辨识模型切换获取“较佳”模型的 USV 航向控制湖试曲线

Fig.4 Course control curves of USV in lake trials for selecting better model based on multiple identification switching laws

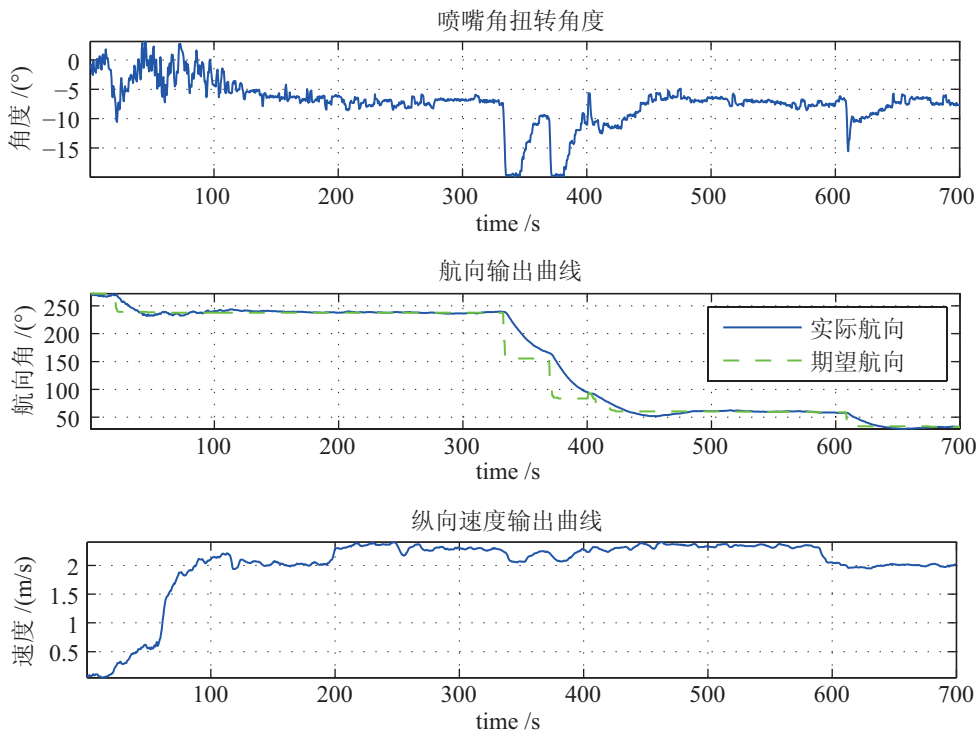


图 5 基于“最佳”模型参数的动态反馈法 USV 航向控制湖试曲线

Fig.5 Course control curves of USV in lake trials with dynamic feedback method based on the best model parameters

差范围内的稳定, 能够通过切换获取当前运行环境下较佳的控制策略. 且从图 4 试验数据分析可以推测, “较佳”的控制参数来源于哪一组临时模型集参数.

5 结论 (Conclusions)

本文针对 USV 系统航向控制模型未知且易受外界干扰等问题, 提出通过辨识模型集设置动态反馈控制策略的设计思路. 根据系统航向控制品质与

预设切换策略, 在线从控制库中选取当前运行环境下“最佳”控制策略. 湖试试验表明: 紧急切换策略可保证系统在航向控制发散前切换到稳定控制策略下; 基于系统控制性能指标切换驱动的切换策略, 可在线选取当前运行环境下“较佳”的控制策略; 根据系统纵向速度与模型参数可动态调整状态反馈控制参数. 大量外场试验表明, 基于系统模型辨识所构建的控制库具有很好的实际应用价值, 能够提高系统的控制品质.

参考文献 (References)

- [1] 李晔, 刘建成, 徐玉如, 等. 带翼水下机器人运动控制的动力学建模[J]. 机器人, 2005, 27(2): 128-131.
Li Y, Liu J C, Xu Y R, et al. Dynamics modeling for motion control of underwater vehicle with wing[J]. Robot, 2005, 27(2): 128-131.
- [2] 袁伟杰, 刘贵杰, 朱绍锋. 基于遗传算法的自治水下机器人水动力参数辨识方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(11): 96-100.
Yuan W J, Liu G J, Zhu S F. Identification method of hydrodynamic parameters of autonomous underwater vehicle based on genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(11): 96-100.
- [3] Marco D B, Martins A, Healey A J. Surge motion parameter identification for the NPS Phoenix AUV[C]//International Advanced Robotics Program. Lafayette, USA: IARP, 1998.
- [4] de Barros E A, Pascoal A, de Sa E. Investigation of a method for predicting AUV derivatives[J]. Ocean Engineering, 2008, 35(16): 1627-1636.
- [5] Peng Y, Han J D. Tracking control of unmanned trimaran surface vehicle: Using adaptive unscented Kalman filter to estimate the uncertain parameters[C]//IEEE International Conference on Robotics, Automation and Mechatronics. Piscataway, USA: IEEE, 2008: 901-906.
- [6] 潘天红, 薛振框, 李少远. 基于减法聚类的多模型在线辨识算法[J]. 自动化学报, 2009, 35(2): 220-224.
Pan T H, Xue Z K, Li S Y. An online multi-model identification algorithm based on subtractive clustering[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(2): 220-224.
- [7] 段朝阳, 张艳, 邵雷, 等. 基于多模型在线辨识的滑模变结构控制[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(3): 403-407.
Duan C Y, Zhang Y, Shao L, et al. Sliding mode variable structure control based on multi-model on-line identification[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(3): 403-407.
- [8] 张铭钧, 胡明茂, 徐建安. 基于稳态自适应技术的水下机器人系统在线辨识[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(18): 5006-5009,5014.
Zhang M J, Hu M M, Xu J A. Online identification of autonomous underwater vehicle based on stable adaptive technique[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(18): 5006-5009,5014.
- [9] Marani G, Choi S K, Yuh J. Real-time center of buoyancy identification for optimal hovering in autonomous underwater intervention[J]. Intelligent Service Robotics, 2010, 3(3): 175-182.
- [10] Petrich J, Stilwell D J. Model simplification for AUV pitch-axis control design[J]. Ocean Engineering, 2010, 37(7): 638-651.
- [11] 金鸿章, 高妍南, 周生彬. 基于能量优化的海洋机器人航向与横摇自适应终端滑模综合控制[J]. 机械工程学报, 2011, 47(15): 37-43.
Jin H Z, Gao Y N, Zhou S B. Adaptive terminal-sliding-mode combination control for heading and rolling of marine robot based on energy optimization[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(15): 37-43.
- [12] Smallwood D A. Advances in dynamical modeling and control of underwater robotic vehicles[D]. Baltimore, USA: Johns Hopkins University, 2003.
- [13] 于志刚, 沈永良, 李桂英. 基于在线优化的线性系统状态反馈鲁棒镇定[J]. 控制与决策, 2011, 26(1): 75-79.
Yu Z G, Shen Y L, Li G Y. State feedback robust stabilization for linear system based on on-line optimization[J]. Control and Decision, 2011, 26(1): 75-79.
- [14] 段纳, 王璐, 赵从然. 一类具有积分输入到状态稳定未建模动态的高阶非线性系统的状态反馈调节[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(5): 639-644.
Duan N, Wang L, Zhao C R. State-feedback regulation for a class of higher-order nonlinear systems with integral input-to-state stability unmodeled dynamics[J]. Control Theory and Applications, 2011, 28(5): 639-644.
- [15] Fossen T I. Guidance and control of ocean vehicles[M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 1994: 21-56.
- [16] 蒋新松, 封锡盛, 王棣堂. 水下机器人[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2000: 150-183.
Jiang X S, Feng X S, Wang D T. Underwater vehicles[M]. Shenyang: Liaoning Publisher of Science and Technology, 2000: 150-183.
- [17] Naik M S, Singh S N. State-dependent Riccati equation-based robust dive plane control of AUV with control constraints[J]. Ocean Engineering, 2007, 37(11/12): 1711-1723.
- [18] Khalil H K. 非线性系统[M]. 3版. 朱义胜, 董辉, 李作洲, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2005: 89-93.
Khalil H K. Nonlinear system[M]. 3rd ed. Zhu Y S, Dong H, Li Z Z, et al, trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 89-93.
- [19] 林相泽, 邹云. 线性切换系统的积分不变性原理[J]. 自动化学报, 2011, 37(2): 196-204.
Lin X Z, Zou Y. An integral invariance principle for switched linear systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(2): 196-204.
- [20] Koo M S, Choi H L, Lim J T. Universal control of nonlinear systems with unknown nonlinearity and growth rate by adaptive output feedback[J]. Automatica, 2011, 47(10): 2211-2217.
- [21] Liberzon D. Switching in systems and control[M]. Boston, USA: Birkhäuser, 2003: 73-124.

作者简介:

周焕银 (1975-), 女, 博士, 副教授. 研究领域: 多模型控制, 水下机器人运动控制.

封锡盛 (1942-), 男, 研究员, 博士生导师, 中国工程院院士. 研究领域: 水下机器人总体设计, 非线性控制等.