

控制与决策

Control and Decision

带有推进器故障的船舶动力定位系统的鲁棒滑模容错控制

郝立颖, 韩金城, 郭戈, 李莉莉

引用本文:

郝立颖, 韩金城, 郭戈, 等. 带有推进器故障的船舶动力定位系统的鲁棒滑模容错控制[J]. *控制与决策*, 2020, 35(6): 1291–1296.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1233>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

油浸式变压器内部检测球形机器人的深度悬停控制研究

Depth hover control of spherical robot for internal detection of oil-immersed transformer
控制与决策. 2020, 35(2): 375–381 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0953>

一种基于时变干扰观测器的高超声速飞行器容错控制策略设计

A FTC scheme for hypersonic vehicle based on adaptive disturbance observer
控制与决策. 2018, 33(10): 1893–1900 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0645>

基于LMI的一体化鲁棒主动容错控制器设计

Integrated robust active fault tolerance controller design based on linear matrix inequality
控制与决策. 2018, 33(1): 53–59 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.1311>

基于变结构模型参考自适应的双绕组永磁容错电机转子位置估计算法

Estimation algorithm of rotor position for dual-winding fault tolerant permanent magnet motor drive based on SMO-MRAS
控制与决策. 2018, 33(1): 27–36 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.1227>

基于鲁棒自适应滑模观测器的多故障重构

Design of the robust adaptive sliding mode observer for multiple fault reconstruction
控制与决策. 2016, 31(7): 1219–1224 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0659>

带有推进器故障的船舶动力定位系统的鲁棒滑模容错控制

郝立颖[†], 韩金城, 郭 戈, 李莉莉

(大连海事大学 船舶电气工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘 要: 由于海洋工作环境具有复杂性和不可预测性, 船舶动力定位系统的可靠性一直备受关注. 针对带有推进器故障的船舶动力定位系统的鲁棒容错控制问题展开研究. 首先, 建立更一般且统一的推进器故障模型, 该模型能全面描述推进器失效、卡死、中断 3 种故障情形; 然后, 设计一种不依赖故障检测模块 (FDI) 和故障信息上下界的自适应滑模控制器, 其中自适应机制用于在线估计故障信息和未知外部扰动的上界, 基于李雅普诺夫稳定性理论和滑模控制理论, 所设计的自适应滑模控制器能保证船舶动力定位系统在有推进器故障发生和海洋环境外部有界扰动存在情况下的所有信号一致有界; 最后, 在一艘过驱动船舶模型上进行仿真, 其结果验证了所设计方法的有效性.

关键词: 鲁棒容错控制; 推进器故障; 自适应滑模控制; 船舶动力定位系统

中图分类号: TP13

文献标志码: A

Robust sliding mode fault-tolerant control for dynamic positioning system of ships with thruster faults

HAO Li-ying[†], HAN Jin-cheng, GUO Ge, LI Li-li

(College of Marine Electrical Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: Due to the complexity and unpredictability of sea environment, the reliability of dynamic positioning systems of ships has been paid much attention. A robust fault-tolerant control problem for the dynamic positioning system of ships with thruster faults is studied. Firstly, a uniform thruster fault model is established to universally describe different thruster fault cases such as loss-of-effectiveness, stuck and outage. Then, without requiring any fault detection and isolation (FDI) mechanism and the upper and lower bounds of the fault information, an adaptive sliding mode controller is designed where the fault information and unknown external disturbances are estimated online through the adaptive mechanism. With the help of the Lyapunov stability theory and sliding mode control theory, the uniformly ultimate boundedness of all signals in the closed-loop dynamic positioning system of ships can be guaranteed by using the proposed control law. Finally, the simulation is carried out through an overactuated ship model and the results demonstrate the effectiveness of the proposed design control method.

Keywords: robust fault-tolerant control; thruster faults; adaptive sliding mode control; dynamic positioning system of ships

0 引 言

近年来,随着人们对海洋资源开发的不断深入,越来越多的动力定位船舶被应用于深海勘探、海底管道建设、海上石油钻探和供给等工程领域. 具有动力定位系统的海洋工程船舶可以通过对船舶推进器的精确控制使得船舶在风、浪等外部环境干扰下以一定姿态维持在海面的某一固定位置或者跟踪某一预设的运动轨迹^[1]. 水面船舶的动力定位控制也受到越来越多的学者关注,由此提出了很多控制算法,如

模糊控制^[2]、神经网络控制^[3]、反步法^[4]、混合控制^[5]等均取得了较好的控制效果.

虽然国内外已有大量关于船舶动力定位相关领域的研究成果,但是在船舶动力定位容错控制领域的研究还不是十分深入. 在实际作业中,船舶的推进器长期在恶劣的海洋环境中运作,不可避免地会发生故障,而动力定位船舶的工作性质使得故障推进器很难及时被修理或替换为备用推进器^[6]. 因此,为了提高系统的可靠性和保障作业的安全性,为动力定位船舶

收稿日期: 2018-09-11; 修回日期: 2019-01-02.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61503055, 61573077, U1808205, 61602077); 大连市高层次人才创新计划项目 (2017RQ072, 2016RQ049); 辽宁省自然科学基金计划项目 (2019-KF-03-09).

责任编辑: 张维海.

[†]通讯作者. E-mail: haoliying_0305@163.com.

设计一个有效的容错控制(fault tolerant control, FTC)方案使得船舶在推进器出现故障时也不会出现位置丢失是很有必要的^[7].

为了解决船舶推进器故障下的FTC问题,文献[8]提出了通过控制器重构(re-configuration)实现船舶容错控制的方法;文献[9]通过比较具有故障检测阈值推进器的输入和输出来完成故障诊断,通过重新分配控制输入以避免使用故障推进器来实现容错控制;基于动力定位船舶虚拟推进器的概念,文献[10]设计了一种整合故障诊断机构的容错控制器;文献[11]将奇偶空间方法与Luenberger观测器相结合实现了故障检测,设计了一组可重构的离散时间变结构控制器,用于带有推进器故障的海上补给船的动力定位控制;文献[12]提出了一种FTC设计框架,使用未知输入观测器检测和隔离推进器故障,并在过驱动的船舶上进行了重构配置.虽然这些FTC方案均取得了安全可靠的效果,但它们必须依赖于船舶推进机构故障检测模块提供真实有效的故障信息.这可能会导致实际操作中的困难,因为实际动力定位船舶的推进器数量多,系统结构复杂,模型不确定性和测量噪声等因素都会导致故障检测模块出现误报、漏报、延时预报等情况,会影响容错控制器的控制效果^[6].此外,上述文献中只考虑了推进器失效的故障情形,而在复杂的海洋作业中,螺旋桨浆叶驱动机构卡死等会导致推进器发生卡死故障,推进器轴发动机断电会导致推进器发生中断故障,因此同时考虑多种故障模式的船舶容错控制是很有必要的.

基于以上考虑,本文提出一种同时考虑多种故障模式的不依赖故障检测模块信息的滑模容错控制方法.主要内容如下:1)建立更一般且统一的推进器故障模型,它能够更全面地描述船舶推进器发生的故障情形;2)设计一种不依赖于故障检测模块的自适应滑模控制器,通过自适应机制在线估计故障信息和未知参数,对所设计的控制器进行稳定性分析.最后通过仿真结果验证所提出控制算法的有效性.

1 问题描述

1.1 动力定位船舶数学模型

对于动力定位船舶,假设船舶前进与横漂和艏摇运动解耦,忽略船舶的垂荡、横摇和纵摇运动的影响,只考虑船舶的前进、横漂和艏摇3个自由度的水平面运动.考虑文献[4]中的船体坐标系和大地坐标系:位置向量 $\eta = [x, y, \psi]^T$,大地坐标系下船舶位置为 (x, y) ,艏摇角 $\psi \in [0, 2\pi]$;速度向量 $v = [u, v, r]^T$, u 、 v 、 r 分别为随体坐标系下船舶的前进速度、横漂速度和艏摇角速度.则动力定位船舶的非线性数学模型

通常描述为

$$\begin{cases} \dot{\eta}(t) = R(\psi)v(t), \\ M\dot{v}(t) = -Dv(t) + \tau(t) + d(t). \end{cases} \quad (1)$$

其中:旋转矩阵 $R(\psi)$ 为

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

并且满足特性 $R^{-1}(\psi) = R^T(\psi)$, $\|R\| = 1$, $\|\cdot\|$ 为矩阵或向量的二范数; M 为包含附加质量的惯性矩阵,是可逆的正对称矩阵; D 为线性阻尼矩阵,是严格正定的; $\tau(t) = [\tau_1(t), \tau_2(t), \tau_3(t)]^T$ 为推进器提供的控制力向量, $\tau_1(t)$ 为前进控制力, $\tau_2(t)$ 为横漂控制力, $\tau_3(t)$ 为艏摇控制力.

$$M = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & 0 \\ 0 & 0 & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix},$$

$$D(v) = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & -Y_r \\ 0 & -N_v & -N_r \end{bmatrix}. \quad (2)$$

其中: m 为船舶质量, I_z 为船舶转动惯量, $X_{\dot{u}}$ 、 $Y_{\dot{v}}$ 、 $N_{\dot{r}}$ 为船舶在纵荡、横荡、艏摇方向上产生的附加质量, X_u 、 Y_v 、 N_r 为船舶在3个自由度上的线性阻尼系数. $d(t) = [d_1(t), d_2(t), d_3(t)]^T$ 为船舶3个自由度上由风、浪、流等海洋环境对船体造成的等效干扰力和力矩.假设环境扰动力矩 $d_i(t)$ ($i = 1, 2, 3$)未知但能量有界,即 $|d_i(t)| \leq \bar{d}_i$, \bar{d}_i ($i = 1, 2, 3$)为未知正常数, $\bar{d} = [\bar{d}_1, \bar{d}_2, \bar{d}_3]^T$.

1.2 推进器故障模型

动力定位船舶通常选用可变螺距推进器,通过改变螺距和转速改变推力大小.因此推进器故障可分为螺距故障和转速故障,根据FMEA(failure mode and effects analysis)^[6]中关于推进器故障的分析描述,可对推进器的现实故障从以下方面进行考虑:

1) 推进器失效:由液压系统的泄漏导致的螺旋桨螺距缓慢地漂移,这将导致推进器产生的实际推力小于控制信号的期望推力.

2) 推进器卡死:由螺旋桨浆叶驱动机构卡死、控制指令丢失或断线引起反馈信号丢失而导致的螺旋桨螺距无法控制,使得推进器产生未知时变推力.

3) 推进器中断:由推进器轴发动机断电而导致的轴转速故障,这将使得推进器完全丧失推进能力.

因为动力定位船舶3个自由度上的控制力和控制力矩 τ 是由推进器的输出力矩合成的,可以将其表示为

$$\tau(t) = G\vartheta^F(t). \quad (3)$$

其中: $\vartheta^F(t) = [\vartheta_{1j}^F, \vartheta_{2j}^F, \dots, \vartheta_{mj}^F]^T$, ϑ_{ij}^F 表示动力定位船舶的第 i 个推进器在第 j 种故障模式下的故障信号; $G \in R^{3 \times m}$ 表示推进器配置矩阵. 根据上述分析, 将故障模型定义如下:

$$\vartheta_{ij}^F(t) = \zeta_i^j \vartheta_i(t) + \chi_i^j \vartheta_{si}(t). \quad (4)$$

其中: $i \in I(1, m), j \in I(1, L)$, i 和 j 分别表示第 i 个推进器和第 j 种故障模式, m 和 L 分别表示推进器的个数和故障模式的数目, $I(1, N)$ 表示为 $\{1, 2, \dots, N\}$; $\vartheta_{si}(t)$ 表示第 i 个推进器的未知时变有界卡死故障信号; ζ_i^j 表示推进器未知有界的效率因子, $\underline{\zeta}_i^j$ 和 $\bar{\zeta}_i^j$ 分别表示第 i 个推进器效率因子的下界和上界, 则 $0 \leq \underline{\zeta}_i^j \leq \zeta_i^j \leq \bar{\zeta}_i^j \leq 1$. 定义 χ_i^j 如下:

$$\chi_i^j = \begin{cases} 0, & 0 < \zeta_i^j \leq 1; \\ 0 \text{ or } 1, & \zeta_i^j = 0. \end{cases} \quad (5)$$

为了便于描述清晰, 表 1 详细地列出了各种推进器故障模式下的情况.

表 1 推进器故障模式

故障模式	$\underline{\zeta}_i^j$	$\bar{\zeta}_i^j$	χ_i^j	产生原因
正常	1	1	0	—
中断	0	0	0	轴发电机断电等
失效	> 0	< 1	0	液压系统泄露等
卡死	0	0	1	螺旋桨桨叶驱动机构卡死等

定义 $\vartheta_j^F(t)$ 形式如下:

$$\vartheta_j^F(t) = [\vartheta_{1j}^F(t), \vartheta_{2j}^F(t), \dots, \vartheta_{mj}^F(t)]^T = \zeta^j \vartheta(t) + \chi^j \vartheta_s(t).$$

其中

$$\zeta^j = \text{diag}\{\zeta_1^j, \zeta_2^j, \dots, \zeta_m^j\}, \zeta_i^j \in [\underline{\zeta}_i^j, \bar{\zeta}_i^j], i \in I(1, m);$$

$$\chi^j = \text{diag}\{\chi_1^j, \chi_2^j, \dots, \chi_m^j\}, j \in I(1, L);$$

$$\vartheta_s(t) = [\vartheta_{s1}(t), \vartheta_{s2}(t), \dots, \vartheta_{sm}(t)]^T.$$

然后, 定义具有上式结构的算子集合如下:

$$\Delta_{\zeta^j} = \{\zeta^j | \zeta^j = \text{diag}\{\zeta_1^j, \zeta_2^j, \dots, \zeta_m^j\}, \zeta_i^j \in [\underline{\zeta}_i^j, \bar{\zeta}_i^j]\}.$$

对于所有可能的故障模式 L , 可用如下统一的推进器故障模型表示:

$$\vartheta^F(t) = \zeta \vartheta(t) + \chi \vartheta_s(t). \quad (6)$$

其中: $\zeta \in \Delta_{\zeta^j}, \chi \in \Delta_{\chi^j}, j \in I(1, L)$.

注 1 文献[8-9]仅考虑了推进器失效故障模式, 文献[10]仅考虑了推进器中断的故障模式. 实际中, 动力定位船舶配置的推进器可能发生螺距故障和转速故障^[6], 由此会导致失效、卡死、中断 3 种故障. 因此本文建立的推进器故障模型能更全面地描述推进器现实故障.

带有推进器故障(6)的船舶动力定位系统(1)可

表示为

$$\begin{cases} \dot{\eta}(t) = R(\psi)v(t), \\ M\dot{v}(t) = -Dv(t) + G(\zeta\vartheta(t) + \chi\vartheta_s(t)) + d(t). \end{cases} \quad (7)$$

为了保证状态反馈设计中能达到容错目的, 一个基本的假设是系统中所有位置信息和速度信息均可测. 此外, 在容错控制中以下假设也成立.

假设 1 非参数卡死故障 $\vartheta_s(t)$ 为分段连续有界方程, 即存在未知正常数 $\bar{\vartheta}_s$, 使得 $\|\vartheta_s\| \leq \bar{\vartheta}_s$.

假设 2 对于所有推进器故障模式 $\zeta \in \Delta_{\zeta^j}, j \in I(1, L)$, 满足 $\text{rank}(G\zeta) = \text{rank}(G) = 3$.

注 2 假设 1 在鲁棒容错控制文献[13]中非常普遍. 假设 2 是一个推进器冗余假设^[8-9], 这在容错控制^[14]中也很普遍, 特别是针对卡死故障, 冗余假设是完全补偿卡死故障的必要假设.

1.3 控制目标

本文的控制目标是寻找一个合适的滑模面, 并设计自适应滑模控制律, 使动力定位船舶系统即使在推进器失效、中断、卡死和未知有界外部扰动情况下也能维持船舶的位置和航向, 使其从实际的位置 (x, y) 和艏向角 ψ 保持在期望位置 $\eta_d = [x_d, y_d, \psi_d]$ 上.

2 自适应滑模控制器设计

首先定义误差向量

$$e(t) = \eta(t) - \eta_d, \quad (8)$$

并设计如下 PID 型滑模面:

$$s(t) = \dot{e}(t) + c_1 e(t) + c_2 \int_0^t e(t) dt. \quad (9)$$

其中: $s(t) = [s_1(t), s_2(t), s_3(t)]^T \in R^3, c_1, c_2 > 0$ 为滑模面参数. 对式(9)求导可得

$$\begin{aligned} \dot{s}(t) &= \ddot{e}(t) + c_1 \dot{e}(t) + c_2 e(t) = \\ &\dot{R}v(t) + R\dot{v}(t) + c_1 Rv(t) + c_2 e(t). \end{aligned} \quad (10)$$

将式(7)代入(10)中可得

$$\begin{aligned} \dot{s}(t) &= \dot{R}(\psi)v(t) - R(\psi)M^{-1}Dv(t) + c_1 R(\psi)v(t) + \\ &R(\psi)M^{-1}G\zeta\vartheta(t) + R(\psi)M^{-1}G\chi\vartheta_s(t) + \\ &R(\psi)M^{-1}d(t) + c_2 e(t). \end{aligned} \quad (11)$$

设计自适应滑模 FTC 控制律如下:

$$\begin{aligned} \vartheta(t) &= (G\hat{\zeta})^+ MR^{-1}[(RM^{-1}D - \dot{R} - c_1 R)v - c_2 e] - \\ &G^T MR^{-1}(\psi)\Gamma(t)\text{sign}(s), \end{aligned} \quad (12)$$

其中

$$\begin{aligned} \Gamma(t) &= \\ &\frac{\|M^{-1}\|}{\mu\|G\|^2} \left(\sum_{i=1}^m \|G_i\| \hat{\chi}_i \hat{\vartheta}_{si}(t) + \sum_{k=1}^q \hat{d}_k(t) \right) + \epsilon_0. \end{aligned} \quad (13)$$

这里: $\mu > 0$ 为推进器故障的下界值, ϵ_0 为任意正标

量, $\hat{\chi}_i$ 和 $\hat{\zeta}$ 分别为故障因子 χ_i 和 ζ 的估计值, $\hat{\vartheta}_{si}$ 为推进器卡死上界 $\bar{\vartheta}_{si}$ 的估计值, \hat{d}_k 为扰动上界的估计值. 相应自适应律设计为

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\vartheta}}_{si}(t) &= \gamma_{1i} \|s(t)\| \|G_i\| \|M^{-1}\|, \\ \dot{\hat{\chi}}_i(t) &= \gamma_{2i} \|s(t)\| \|G_i\| \|M^{-1}\| \hat{\vartheta}_{si}(t), \\ \dot{\hat{d}}_k(t) &= \gamma_{3k} \|s(t)\| \|M^{-1}\|, \\ \dot{\hat{\zeta}}_i(t) &= \gamma_{4i} s^T [RM^{-1}G]_i \iota_i.\end{aligned}\quad (14)$$

其中

$$\iota = (G\hat{\rho})^+ MR^{-1}(RM^{-1}Dv - \dot{R}v - c_1Rv - c_2e); \quad (15)$$

$i = 1, 2, \dots, m$ 为推进器的数量; $k = 1, 2, \dots, q$ 为扰动的数量; G_i 和 $[RM^{-1}G]_i$ 为矩阵的第 i 列; γ_{1i} 、 γ_{2i} 、 γ_{3k} 、 γ_{4i} 为待设计的自适应增益, 其值根据实际需要进行调整; ι_i 为矩阵 $\iota \in R^{m \times 3}$ 的第 i 行. 定义 $\tilde{\vartheta}_{si}(t) = \hat{\vartheta}_{si}(t) - \bar{\vartheta}_{si}$, $\tilde{\chi}_i(t) = \hat{\chi}_i(t) - \chi_i$, $\tilde{\zeta}_i(t) = \hat{\zeta}_i(t) - \zeta_i$, $\tilde{d}_k(t) = \hat{d}_k(t) - \bar{d}_k$ 分别为故障信息参数和扰动上界的自适应估计误差.

为了方便后续的稳定性证明, 在作者已有结果^[14]的基础上, 给出下面一个重要的引理.

引理 1 对于行满秩的矩阵 G , 一定会存在一个正标量 μ , 使得对于所有的 $\zeta \in \Delta_{\zeta^j}$, $j \in I(1, L)$, 不等式 $G\zeta G^T \geq \mu G G^T$ 成立.

限于篇幅, 证明略.

定理 1 针对动力定位船舶容错系统(7), 满足假设 1 和假设 2, 滑模面由式(9)给出, 滑模控制律由式(12)和(13)给出, 自适应律由(14)给出, 则在有推进器故障和海洋环境外部有界扰动的情况下, 仍能够保证闭环容错系统所有信号一致有界.

证明 对于动力定位船舶系统(7), 选择如下的 Lyapunov 函数:

$$\begin{aligned}V(t) &= \frac{1}{2} s^T(t) s(t) + \sum_{i=1}^m \frac{\chi_i \tilde{\vartheta}_{si}^2(t)}{2\gamma_{1i}} + \sum_{i=1}^m \frac{\tilde{\chi}_i^2(t)}{2\gamma_{2i}} + \\ &\quad \sum_{k=1}^q \frac{\tilde{d}_k^2(t)}{2\gamma_{3k}} + \sum_{i=1}^m \frac{\tilde{\zeta}_i^2(t)}{2\gamma_{4i}}.\end{aligned}\quad (16)$$

对式(16)两边关于时间求导, 将式(11)代入可得

$$\begin{aligned}\dot{V}(t) &= s^T \left[\dot{R}(\psi)v(t) - R(\psi)M^{-1}Dv(t) + \right. \\ &\quad \left. c_1R(\psi)v(t) + c_2e(t) + \sum_{i=1}^m \frac{\tilde{\zeta}_i(t)\dot{\tilde{\zeta}}_i(t)}{\gamma_{4i}} + \right. \\ &\quad \left. R(\psi)M^{-1}G\zeta\vartheta(t) + R(\psi)M^{-1}G\chi\vartheta_s(t) + \right. \\ &\quad \left. R(\psi)M^{-1}d(t) \right] + \sum_{i=1}^m \frac{\chi_i \tilde{\vartheta}_{si}(t)\dot{\tilde{\vartheta}}_{si}(t)}{\gamma_{1i}} + \\ &\quad \sum_{i=1}^m \frac{\tilde{\chi}_i(t)\dot{\tilde{\chi}}_i(t)}{\gamma_{2i}} + \sum_{k=1}^q \frac{\tilde{d}_k(t)\dot{\tilde{d}}_k(t)}{\gamma_{3k}}.\end{aligned}\quad (17)$$

将控制律(2)代入(17), 可以得到

$$\begin{aligned}RM^{-1}G\zeta\vartheta &= \\ RM^{-1}G\zeta(G\hat{\zeta})^+ MR^{-1}(-c_2e - \dot{R}v - c_1Rv + \\ RM^{-1}Dv) - RM^{-1}G\zeta G^T MR^{-1}\Gamma \text{sign}(s) = \\ -RM^{-1}G\tilde{\zeta}(G\hat{\rho})^+ MR^{-1}(-\dot{R}v - c_2e - c_1Rv \\ RM^{-1}Dv) - RM^{-1}G\zeta G^T MR^{-1}\Gamma \text{sign}(s) + \\ RM^{-1}Dv - c_2e - \dot{R}v - c_1Rv,\end{aligned}\quad (18)$$

则式(17)变为

$$\begin{aligned}\dot{V}(t) &= s^T [-RM^{-1}G\tilde{\zeta}(G\hat{\zeta})^+ MR^{-1}[(RM^{-1}D - \\ &\quad \dot{R} - c_1R)v - c_2e] + R(\psi)M^{-1}G\chi\vartheta_s(t) - \\ &\quad RM^{-1}G\zeta G^T MR^{-1}\Gamma \text{sign}(s) + \\ &\quad R(\psi)M^{-1}d(t)] + \sum_{i=1}^m \frac{\chi_i \tilde{\vartheta}_{si}(t)\dot{\tilde{\vartheta}}_{si}(t)}{\gamma_{1i}} + \\ &\quad \sum_{i=1}^m \frac{\tilde{\chi}_i(t)\dot{\tilde{\chi}}_i(t)}{\gamma_{2i}} + \sum_{k=1}^q \frac{\tilde{d}_k(t)\dot{\tilde{d}}_k(t)}{\gamma_{3k}} + \\ &\quad \sum_{i=1}^m \frac{\tilde{\zeta}_i(t)\dot{\tilde{\zeta}}_i(t)}{\gamma_{4i}}.\end{aligned}\quad (19)$$

根据引理 1, 可将式(19)整理化简如下:

$$\begin{aligned}\dot{V} &\leq -s^T RM^{-1}G\tilde{\zeta}(G\hat{\zeta})^+ MR^{-1}[(RM^{-1}D - \\ &\quad \dot{R} - c_1R)v - c_2e] - \mu \|s(t)\| \|G\|^2 \Gamma(t) + \\ &\quad \|s(t)\| \|M^{-1}\| \sum_{i=1}^m \|G_i\| \chi_i \|\vartheta_{si}(t)\| + \\ &\quad \|s(t)\| \|M^{-1}\| \sum_{k=1}^q \|d_k(t)\| + \\ &\quad \sum_{i=1}^m \frac{\tilde{\chi}_i(t)\dot{\tilde{\chi}}_i(t)}{\gamma_{2i}} + \sum_{k=1}^q \frac{\tilde{d}_k(t)\dot{\tilde{d}}_k(t)}{\gamma_{3k}} + \\ &\quad \sum_{i=1}^m \frac{\tilde{\zeta}_i(t)\dot{\tilde{\zeta}}_i(t)}{\gamma_{4i}} + \sum_{i=1}^m \frac{\chi_i \tilde{\vartheta}_{si}(t)\dot{\tilde{\vartheta}}_{si}(t)}{\gamma_{1i}}.\end{aligned}\quad (20)$$

将式(13)代入(20)并整理可以得到

$$\begin{aligned}\dot{V}(t) &\leq \\ &\quad \|s(t)\| \|M^{-1}\| \sum_{i=1}^m \|G_i\| (\chi_i \bar{\vartheta}_{si}(t) - \hat{\chi}_i(t) \hat{\vartheta}_{si}(t)) - \\ &\quad s^T RM^{-1}G\tilde{\zeta}(G\hat{\zeta})^+ MR^{-1}[(RM^{-1}D - \\ &\quad \dot{R} - c_1R)v - c_2e] - \epsilon_0 \|s(t)\| + \\ &\quad \sum_{i=1}^m \frac{\tilde{\zeta}_i(t)\dot{\tilde{\zeta}}_i(t)}{\gamma_{4i}} + \sum_{i=1}^m \frac{\chi_i \tilde{\vartheta}_{si}(t)\dot{\tilde{\vartheta}}_{si}(t)}{\gamma_{1i}} + \\ &\quad \sum_{i=1}^m \frac{\tilde{\chi}_i(t)\dot{\tilde{\chi}}_i(t)}{\gamma_{2i}} + \sum_{k=1}^q \frac{\tilde{d}_k(t)\dot{\tilde{d}}_k(t)}{\gamma_{3k}} + \\ &\quad \|s(t)\| \|M^{-1}\| \sum_{k=1}^q (\bar{d}_k(t) - \hat{d}_k(t)).\end{aligned}\quad (21)$$

将自适应律(14)和自适应估计误差代入(21),并整理可以得到

$$\dot{V}(t) \leq -\epsilon_0 \|s(t)\|.$$

因为 ϵ_0 为正标量,所以当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\dot{V}(t) \leq 0$,船舶动力定位容错系统渐近稳定. \square

注3 不同于文献[8-12],本文提出的滑模容错控制律不依赖故障检测模块的信息,不会出现因故障检测模块误报、漏报、延时预报等影响容错控制效果.

3 仿真分析

为了验证所设计滑模容错控制律的有效性,以文献[12]中的一艘过驱动船舶为仿真对象进行仿真研究,并与文献[15]提出的传统滑模控制器进行对比.此外,为了抑制抖振现象,不失一般性,采用文献[16]的方法,用连续函数 $\frac{s}{\|s\| + \epsilon}$ 替代符号函数 $\text{sign}(s)$.仿真的船舶配备5个推进器,其中包括3个全回转推进器,两个槽道推进器.该船质量 $m = 6 \times 10^6 \text{ kg}$,长度 $L = 76 \text{ m}$,宽 $W = 16 \text{ m}$.船舶推进器的配置矩阵 $G^{[12]}$ 为

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ -5.91 & -19.1 & 5.91 & -19.1 & 0 & 18.5 & 30 & 35 \end{bmatrix}.$$

在仿真中:设定动力定位船舶初始位置 $\eta(0) = [10 \text{ m}, 10 \text{ m}, 20^\circ]^T$, $v(0) = [-2 \text{ m/s}, 1.5 \text{ m/s}, 0^\circ/\text{s}]^T$,期望位置 $\eta_d = [0 \text{ m}, 0 \text{ m}, 0^\circ]^T$;滑模面和控制参数分别为 $c_1 = 0.2, c_2 = 0.01, \mu = 0.09, \epsilon_0 = 330$,自适应增益分别为 $\gamma_{1i} = 1 (i = 1, 2, \dots, 8), \gamma_{2i} = 10 (i = 1, 2, \dots, 8), \gamma_{3k} = 3 (k = 1, 2, 3)$;干扰信号选择文献[17]中的4级海况扰动,相应地选取扰动上界 $\bar{d}_k = 8 \times 10^6$,

$$d = \begin{bmatrix} 2(1.1 + 1.2 \sin(0.01t) + 1.5 \sin(0.1t)) \text{ kN} \\ 13(-1.1 + 2 \sin(0.01t - \pi/6) + 1.5 \sin(0.1t)) \text{ kN} \\ 200(\sin(0.05t + \pi/3) + 3 \sin(0.01t)) \text{ kN} \cdot \text{m} \end{bmatrix}.$$

仿真考虑以下故障情形:当 $t < 100 \text{ s}$ 时,系统正常运行,当 $t \geq 100 \text{ s}$ 时,第1个全回转推进器失效70%,第4个槽道推进器产生卡死故障,卡死信号为

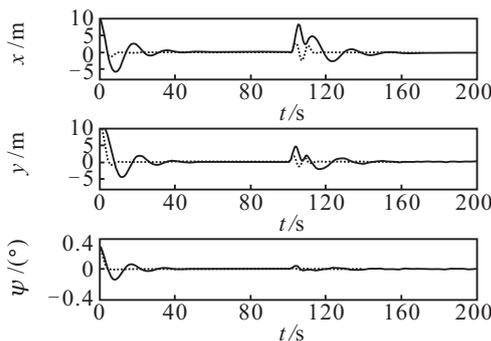


图1 船舶实际位置 x, y 和艏向角 ψ 的遍历曲线

$7 \times 10^5(1 + \sin t)$.为了进行对比,同时也考虑文献[15]中未考虑故障的控制算法,仿真结果如图1~图4所示,实线为本文控制器,虚线为文献[15]控制器.

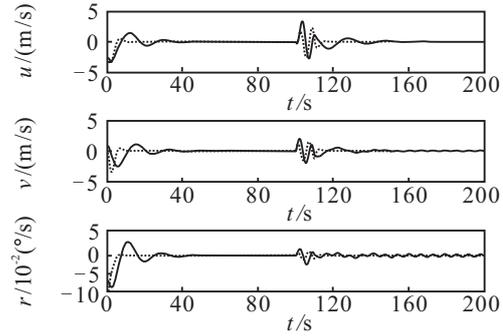


图2 船舶纵荡速度、横荡速度、艏摇角速度遍历曲线

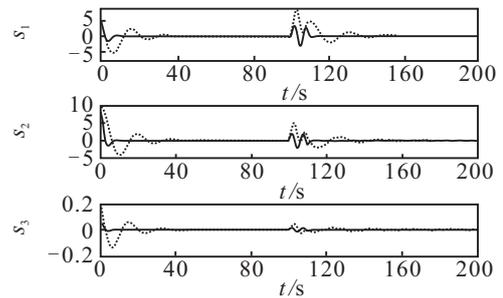


图3 滑模面响应曲线

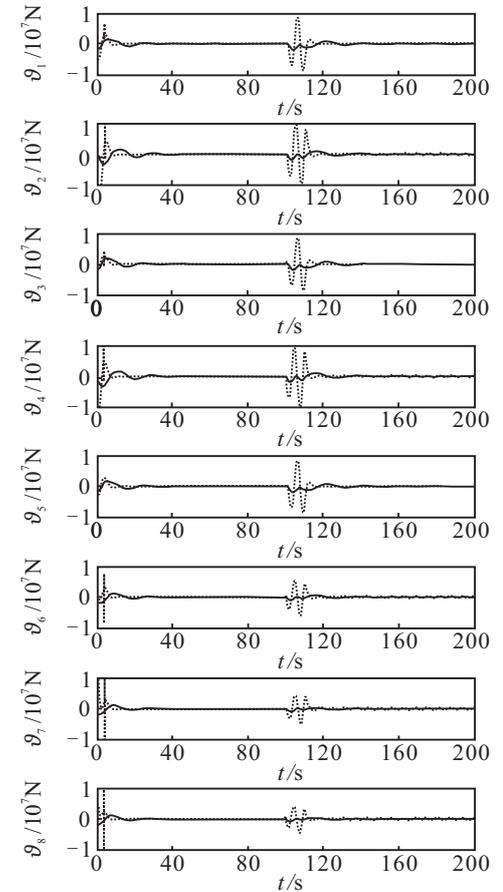


图4 推进器响应曲线

仿真分析:图1为船舶在推进器故障情形下的实际位置和艏向角遍历曲线,可以看出,当100s推进器

发生故障时,本文算法可以使得船舶更快回到期望位置上,表明本文设计的自适应滑模控制律在动力定位船舶推进器产生失效、卡死故障时,也可以在较短的时间内控制船体稳定;图2为船舶纵荡速度、横荡速度、艏摇角速度遍历曲线,通过对比结果可以看出,相较于传统滑模控制器,本文算法可以更好地抑制推进器故障带来的影响;图3为滑模面随时间响应曲线,可以看出,本文设计的滑模面在有限时间可达,位置误差在有限时间内趋于零;图4为推进器响应曲线,可以看出,本文的控制器对执行器故障有更好的灵敏性,可以更快补偿故障给系统带来的影响,但是需要耗费更高的能量。

4 结论

本文针对动力定位船舶系统鲁棒容错控制问题展开了研究.首先建立了统一的推进器故障模型,该模型能全面描述推进器失效、卡死、中断3种故障模式.提出了一种新的自适应滑模控制算法,通过自适应机制在线估计未知外部扰动.此种滑模控制器的设计保证了闭环系统在有推进器故障发生和外部扰动存在的情况下不依赖于故障检测模块(FDI)但仍能使系统所有信号一致有界.最后仿真结果验证了所提出控制算法的有效性.

参考文献(References)

- [1] Sørensen A J. A survey of dynamic positioning control systems[J]. *Annual Reviews in Control*, 2011, 35(1): 123-136.
- [2] Wang Y L, Han Q L, Fei M R, et al. Network-based T-S fuzzy dynamic positioning controller design for unmanned marine vehicles[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2018, 48(9): 2750-2763.
- [3] Du J L, Yang Y, Wang D H, et al. A robust adaptive neural networks controller for maritime dynamic positioning system[J]. *Neurocomputing*, 2013, 110(1): 128-136.
- [4] Witkowska A, Śmierczalski R. Adaptive dynamic control allocation for dynamic positioning of marine vessel based on backstepping method and sequential quadratic programming[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 163(1): 570-582.
- [5] Nguyen T D, Sørensen A J, Quek S T. Design of hybrid controller for dynamic positioning from calm to extreme sea conditions[J]. *Automatica*, 2007, 43(5): 768-785.
- [6] Zhu J F, Xu L P. Application of FMEA in risk assessment of ship system[J]. *World Shipping*, 2006, 29(2): 22-24.
- [7] Blanke M, Kinnaert M, Lunze J, et al. *Diagnosis and fault-tolerant control*[M]. New York: Springer, 2003: 1379-1384.
- [8] Blanke M, Zamanabadi R I, Lootsma T F. Fault monitoring and reconfigurable control of a ship propulsion plant[J]. *International Journal of Adaptive Control & Signal Processing*, 1998, 12(8): 671-688.
- [9] Yang K C H, Yuh J, Choi S K. Fault-tolerant system design of an autonomous underwater vehicle ODIN: An experimental study[J]. *International Journal of Systems Science*, 1999, 30(9): 1011-1019.
- [10] Fu M Y, Ning J P, Wei Y S. Fault-tolerant control of dynamic positioning vessel by means of a virtual thruster[C]. 2011 IEEE International Conference Mechatronics and Automation. Beijing: IEEE, 2011: 1706-1710.
- [11] Benetazzo F, Ippoliti G, Longhi S, et al. Advanced control for fault-tolerant dynamic positioning of an offshore supply vessel[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 106: 472-484.
- [12] Andrea Cristofaro, Tor Arne Johansen. Fault tolerant control allocation using unknown input observers[J]. *Automatica*, 2014, 50(7): 1891-1897.
- [13] Jin X Z, Yang G H, Yin L P. Robust fault-tolerant controller design for linear time-invariant systems with actuator failures: an indirect adaptive method[J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2010, 8(4): 471-478.
- [14] Hao L Y, Yang G H. Robust fault tolerant control based on sliding mode method for uncertain linear systems with quantization[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I Journal of Systems & Control Engineering*, 2013, 227(9): 692-703.
- [15] Utkin V. Variable structure systems with sliding modes[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 22(2): 212-222.
- [16] Boiko I M. Analysis of chattering in sliding mode control systems with continuous boundary layer approximation of discontinuous control[C]. *Proceedings of the 2011 American Control Conference*. San Francisco: IEEE, 2011: 757-762.
- [17] Du J L, Yang Y, Guo C, et al. Output feedback control for dynamic positioning system of a ship based on a high gain observer[J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(11): 1486-1491.

作者简介

郝立颖(1982—),女,副教授,博士,从事船舶鲁棒容错控制等研究, E-mail: haoliying_0305@163.com;

韩金城(1993—),男,硕士生,从事船舶鲁棒容错控制的研究, E-mail: 286492867@qq.com;

郭戈(1972—),男,教授,博士生导师,从事网络控制系统分析与综合、工业过程控制、移动机器人等研究, E-mail: geguo@yeah.net;

李莉莉(1982—),女,副教授,博士,从事切换时滞系统的鲁棒控制等研究, E-mail: lilili@dlmu.edu.cn.

(责任编辑: 闫妍)