

基于自适应阈值与扩张状态滑模观测器的 AUV 执行机构故障检测与估计

吴云凯^{1†}, 胡大海¹, 朱志宇¹, 曾庆军¹

(1. 江苏科技大学 自动化学院, 江苏 镇江 212100)

摘要: 作为自主式水下机器人(AUV)的重要组成部分, 执行机构的可靠性对系统的安全运行具有重要意义. 本文以AUV六自由度模型为基础, 提出了一种基于自适应阈值与扩张状态滑模观测器相结合的故障检测与估计机制. 首先, 将模型中除去控制输入的部分扩张成新的系统状态, 得到估计值和实际值之间的残差; 其次, 针对执行机构的未知扰动, 设计了一种改进的自适应阈值以监测残差的变化, 进一步降低了误诊率与漏诊率; 随后, 在扩张状态的结构基础上设计滑模观测器, 将观测器的增益求解转化为线性矩阵不等式(LMI)约束优化问题; 最后, 通过动态滑模面的设计实现了抖振的抑制并论证了该动态滑模面的收敛性. 同时引入等效控制输出误差注入原理, 实现了AUV执行机构的故障重构. 仿真结果表明, 本文所提方法对AUV执行机构的故障具有较好的检测灵敏度和估计精度.

关键词: 自主式水下机器人; 执行机构; 扩张状态; 动态滑模面; 故障检测与估计

引用格式: 吴云凯, 胡大海, 朱志宇, 曾庆军. 基于自适应阈值与扩张状态滑模观测器的 AUV 执行机构故障检测与估计. 控制理论与应用, 2022, 39(x): 1–10

DOI: 10.7641/CTA.2022.20430

Adaptive threshold and extended state sliding mode observer based actuator fault detection and estimation for AUV

WU Yun-kai^{1†}, HU Da-hai¹, ZHU Zhi-yu¹, ZENG Qing-jun¹

(1. College of Automation, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

Abstract: As an important part of autonomous underwater vehicle (AUV), the actuator reliability is of great significance to the system security. On the basis of AUV model with 6 degrees of freedom, a fault detection and estimation method via adaptive threshold and extended state sliding mode observer (SMO) is proposed in this paper. Firstly, new expanded state variables are achieved to obtain the diagnosis residuals between actual and estimated outputs. Then, an improved adaptive threshold is designed to monitor the change of residuals, aiming at further reducing the fault mis-diagnosis. Further, the gain solution is transformed into the linear matrix inequality (LMI) constrained optimization problem based on the extended-state structure. Finally, by designing dynamic sliding surface, the chattering phenomenon is suppressed and the convergence can be guaranteed. The fault estimation of AUV actuators is realized via the equivalent control output error injection principle at the same time. The simulation results show that the proposed scheme has an outstanding detection sensitivity and estimation accuracy for AUV actuators.

Key words: AUV; actuator; extended state; dynamic sliding surface; fault detection and estimation

Citation: WU Yunkai, HU Dahai, ZHU Zhiyu, ZENG Qingjun. Adaptive threshold and extended state sliding mode observer based actuator fault detection and estimation for AUV. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(x): 1–10

1 引言

近年来, 海洋资源的勘探与开发逐渐成为各领域的研究热点. 自主式水下机器人(AUV)作为人类探索 and 开发海洋资源的工具, 在海洋相关研究领域发挥着

重要的作用. 然而, 水下环境的不确定性、水下运动的复杂性等客观因素给AUV执行机构的故障诊断与容错控制带来了极大的挑战^[1]. AUV绝大部分的故障问题都是由执行机构引起的, 且执行机构对AUV在水下的行进和姿态调整起到至关重要的作用, 因此, 研

收稿日期: 2022-05-24; 录用日期: 2022-11-18.

[†]通信作者. E-mail: wuyunkaischolar@just.edu.cn.

本文责任编辑: 李世华

国家自然科学基金项目(62173164, 62203192), 江苏省自然科学基金项目(BK20201451), 中国-北马其顿科技合作委员会第6届例会人员交流项目(6-3)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China(62173164, 62203192), the National Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20201451) and the 6th regular meeting exchange program (6-3) of China-North Macedonian science & technology cooperation committee.

究执行机构的故障诊断和容错控制技术以提高AUV的安全性和可靠性,是当前相关领域迫切需要解决的问题。

近年来,针对AUV执行机构的故障诊断一直是热点研究领域.基于解析模型的AUV故障诊断方法依赖于被诊断对象的精确数学模型,但在静水环境下具有良好的诊断效果.文献[2]将滑模观测器应用于AUV执行机构的故障诊断,通过滑模观测器构造残差信号,从残差信号中提取故障信息,实现执行机构的故障检测与隔离.文献[3]利用自适应滑模观测器实现故障信号的重构,所设计的自适应增益参数,在实现故障检测的同时保证了系统的容错性能,并且提升了控制器对故障的响应速度.为了抑制抖振现象,文献[4]采用连续的控制信号取代传统的符号函数,但该方法同时产生了有界稳态误差;为了解决上述问题,文献[5]在此基础上设计了一种新的动态终端滑模面,实现了在不引入稳态误差的前提下消除抖振.进一步地,文献[6]引入动态PID滑模控制器,消除了因滑模切换项引起的抖振问题.文献[7]采用扩张状态观测器(ESO)对非线性时滞系统的故障诊断进行了研究,获得了较为理想的执行机构故障诊断性能.文献[8]进一步在ESO的基础上,利用迭代学习的算法实现AUV执行机构的故障估计.文献[9]采用区间观测器,通过对状态上界与下界的估计构造残差与阈值,以实现AUV执行机构的故障检测.文献[10]利用卡尔曼滤波器识别与故障执行机构相对应的控制分布矩阵元素,同时设计线性二次型调节器作为AUV的控制器,并对所提出的执行机构故障辨识和可重构控制技术的性能进行了检验.文献[11]提出了用自动跟踪模型来代表系统输入和输出信号之间的关系,通过模型的参数评估与监测机制,实现AUV执行机构的故障诊断。

近年来,基于数据驱动和人工智能的方法在一定程度上弥补了基于模型的故障诊断在误诊率与漏诊率上的不足,但相关方法也存在着应用场合上的限制,并未在AUV相关领域中得到大范围的应用^[12].文献[13]针对水下机器人故障诊断中残差阈值不易选取的问题,提出了一种基于人工智能的故障检测、分离与重构方法,实现了执行机构故障的在线监测.文献[14]利用递归神经网络的自学习能力和稳定性理论设计故障估计器,实现了故障重构性能的提升。

本文针对AUV执行机构的常见故障,提出了一种自适应阈值与扩张状态滑模观测器相结合的故障诊断机制.创新点如下:(1)在故障检测环节,自适应阈值的设计可以有效地减少健康工况下的故障误报;(2)在故障估计环节,动态滑模面的设计有效抑制了抖振现象,同时等效控制输出误差注入原理的引入,进一步提升执行机构的故障重构精度。

2 AUV的动力学模型

2.1 AUV空间运动模型(健康工况)

AUV在静坐标系和动坐标系下的六自由度运动如图1所示.其在动坐标系中的简化动力学模型可以表示为:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\mu) = \tau. \quad (1)$$

式中 M 是包括附加质量的惯性矩阵,包括刚体的惯量矩阵 M_{RB} 以及流体动力的附加质量惯性矩阵 M_A ,即 $M = M_{RB} + M_A$; $C(v)$ 是科氏及向心力矩阵,包括刚体的向心力矩阵 $C_{RB}(v)$ 和由附加质量惯性矩阵 M_A 引起的科氏力矩阵 $C_A(v)$; $D(v)$ 是流体阻力矩阵; $g(\mu)$ 是重力和浮力产生的回复力,其中 μ 是静坐标系下的位姿向量; τ 是执行机构的控制输入。

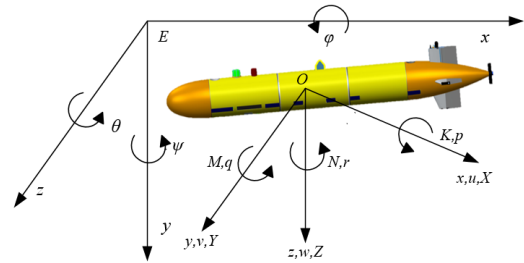


图1 AUV坐标示意图^[15]

Fig. 1 Schematic diagram for AUV coordinates^[15]

表1 AUV坐标系相关参数定义

Table 1 Definition of parameters for AUV coordinate system

符号	定义
E, O	静态、动态坐标系的原点
x, y, z	纵向轴位移, 横向轴位移, 垂向轴位移
ϕ, θ, ψ	横倾角, 纵倾角, 艏向角
u, v, w	线速度矢量在载体坐标系中的对应分量
p, q, r	角速度矢量在载体坐标系中的对应分量
X, Y, Z	轴向、侧向、垂向水动力
K, M, N	横摇、纵倾、转艏水动力矩

AUV水动力是指AUV在无限水域中运动时所受到的水动力,包括与速度有关的粘性水动力和与加速度有关的惯性水动力.文献[15]给出了其六自由度运动方程的具体描述。

2.2 AUV执行机构故障对动力学模型的影响

AUV的主要执行机构为螺旋桨与方向舵,分别提供前进推力与转向力矩.导致螺旋桨与方向舵故障的主要原因包括:桨叶变形、掉落或是操作不当导致其停止转动,向螺旋桨提供动力的推进电机发生故障,舵面的突然卡死等等.虽然导致执行机构故障的原因各不相同,但其表征是类似的,即与理想的执行机构输出存在一定偏差,因此可归结为参数比例型偏差故

障;

$$\begin{cases} T = (T_{n|n|} + b_n)n|n|, \\ N = N_\delta(\delta + b_\delta)u^2. \end{cases} \quad (2)$$

其中 T 为主推力; $T_{n|n|}$ 为主推力系数; b_n 为主推力系数偏差; n 为螺旋桨转速; N 为力矩; N_δ 为舵角系数; δ 为舵角; b_δ 为舵角偏差.

以AUV的水平运动为例, 执行机构故障工况下的水动力方程表示如下:

$$\begin{cases} m(\dot{u} - vr + wq) \\ = X_{u|u|}u|u| + X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{vr}vr + X_{rr}r^2 + \\ (T_{n|n|} + b_n)n|n|, \\ I_z\dot{r} - I_xpq + m[x_g(\dot{v} + ur)] \\ = N_{v|v|}v|v| + N_{r|r|}r|r| + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + \\ N_{ur}ur + N_{uv}uv + N_\delta(\delta + b_\delta)u^2. \end{cases} \quad (3)$$

3 执行机构故障检测

3.1 扩张状态观测器的设计

故障工况下AUV六自由度模型可以表示为如下非线性系统[16]:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = g(x, \dot{x}, t, w) + bu, \\ y = Cx. \end{cases} \quad (4)$$

其中 $g(\cdot)$ 为系统非线性且可微, 包括状态量 x 和系统扰动 w ; u 为控制输入, b 为对应的输入参数. 原系统(4)可以改写为如(5)所示的形式, 其中新的状态变量为原始状态变量中除去输入向量 bu 扩张生成.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + bu = g + bu, \\ \dot{x}_2 = \dot{g} = \eta(x, \dot{x}, t, w), \\ y = Cx_1. \end{cases} \quad (5)$$

其中 x_1, x_2 为状态变量; $g = x_2$ 为扩张状态变量. 基于此, 扩张状态观测器可以构造如下:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + l_1(x_1 - z_1) + bu, \\ \dot{z}_2 = l_2(x_1 - z_1), \\ \xi = x_1 - z_1. \end{cases} \quad (6)$$

其中 l_1, l_2 为扩张状态观测器的两个增益向量; ESO(6)中 $z_i (i = 1, 2)$ 为原系统状态 x_i 的估计, 即 z_1 跟踪系统输出, z_2 跟踪非线性动态 $g(\cdot)$ 以及系统内部响应和外部干扰.

观测器的增益通常可以如下参数化:

$$[l_1 \ l_2] = [\beta_1\omega_0 \ \beta_2\omega_0^2]. \quad (7)$$

其中 $\beta_i (i = 1, 2)$ 是选择的参数, 满足特征多项式 $\beta_2s + \beta_1$ 为Hurwitz矩阵. 令

$$s^{(n+1)} + \beta_1s^n + \dots + \beta_n s + \beta_{n+1} = (s+1)^{n+1}. \quad (8)$$

即需要保证特征多项式的根在复平面的左半部分. 因此, 式(7)中的参数可选择为

$$[l_1 \ l_2] = [2\omega_0 \ \omega_0^2]. \quad (9)$$

其中 ω_0 为观测器的带宽.

3.2 误差收敛性证明

令 $\tilde{\xi}_i(t) = x_i(t) - z_i(t), i = 1, 2$. 则有

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\xi}}_1 = \tilde{\xi}_2 - l_1\tilde{\xi}_1, \\ \dot{\tilde{\xi}}_2 = \eta - l_2\tilde{\xi}_1. \end{cases} \quad (10)$$

定义尺度化误差 $\tilde{\xi}_i(t)$, 令 $\varepsilon_i(t) = \frac{\tilde{\xi}_i(t)}{\omega_0^{i-1}}$, 代入式(10)可得

$$\dot{\varepsilon} = \omega_0 A_\varepsilon \varepsilon + B_\varepsilon \frac{\eta(x, \dot{x}, t, w)}{\omega_0}. \quad (11)$$

其中, $A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\omega_0}l_1 & 1 \\ -\frac{1}{\omega_0^2}l_2 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -21 \\ -10 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$.

定理 1 加速度的导数 $\eta(x, \dot{x}, t, w)$ 有界, 则存在一个常数 ϕ 和有限时间 $T_1 > 0$, 使得 $|\tilde{\xi}_i(t)| \leq \phi_i (i = 1, 2), \forall t \geq T_1 > 0$. 并且存在

$$\phi_i = O\left(\frac{1}{\omega_0^k}\right). \quad (12)$$

其中 O 是表征 ϕ_i 与 ω_0 的函数; k 为未知常数.

证明: 根据式(11);

$$\varepsilon(t) = e^{\omega_0 A_\varepsilon t} \varepsilon(0) + \int_0^t e^{\omega_0 A_\varepsilon (t-\tau)} B_\varepsilon \frac{\eta(x, \dot{x}, t, w)}{\omega_0} d\tau. \quad (13)$$

其中 $\varepsilon(0) = e^c, c$ 为任意常数. 对于ESO的扩张状态变量 $g = x_2$, 有 $\eta = \dot{g}$. 令

$$\varepsilon(t) = e^{\omega_0 A_\varepsilon t} \varepsilon(0) + \int_0^t e^{\omega_0 A_\varepsilon (t-\tau)} B_\varepsilon \frac{\dot{g}}{\omega_0} d\tau. \quad (14)$$

利用分部积分法求解可得:

$$\begin{aligned} y(t) &= \frac{B}{\omega_0} \int_0^t e^{\omega_0 A_\varepsilon (t-\tau)} dg \\ &= \frac{B}{\omega_0} (g \cdot e^{\omega_0 A_\varepsilon (t-\tau)})|_0^t - \frac{B}{\omega_0} \int_0^t g \cdot d(e^{\omega_0 A_\varepsilon (t-\tau)}) \\ &= \frac{B}{\omega_0} (g \cdot e^{\omega_0 A_\varepsilon (t-\tau)})|_0^t + AB \int_0^t g \cdot e^{\omega_0 A_\varepsilon (t-\tau)} d\tau. \end{aligned} \quad (15)$$

上式中, $g \cdot e^{\omega_0 A_\varepsilon (t-\tau)} < 0$, 因此,

$$y(t) \leq \frac{B}{\omega_0} (g \cdot e^{\omega_0 A_\varepsilon (t-\tau)})|_0^t. \quad (16)$$

式(16)两边取绝对值可得:

$$|y(t)| \leq \frac{1}{2\omega_0} [|B|_i + |e^{\omega_0 A_\varepsilon t} B|_i]. \quad (17)$$

根据式(17),

$$\begin{cases} \text{Max}|B|_i = 1, \\ \text{Max}|e^{\omega_0 A_\varepsilon t} B|_i = \text{Max}(0, \frac{1}{\omega_0^2}) = \frac{1}{\omega_0^2}. \end{cases} \quad (18)$$

因此,

$$|y(t)| \leq \frac{1}{2\omega_0} \left(1 + \frac{1}{\omega_0^2}\right) = \frac{1}{2\omega_0} + \frac{1}{2\omega_0^3}. \quad (19)$$

结合式(19)可得

$$|\xi_i(t)| \leq \left| \frac{e^c}{\omega_0^{3-i}} \right| + \frac{1}{2\omega_0^{2-i}} + \frac{1}{2\omega_0^{4-i}}. \quad (20)$$

即 $\xi_i(t)$ 存在上界,且 $\xi_i(t) \leq \phi_i$,其中 ϕ 是 ω_0 的函数.

3.3 自适应阈值的设计

设计与非线性系统相关的两个动态阈值 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 如下:

系统未发生故障($f(t) = 0$),

$$\varepsilon_1 = \|\xi_\omega(t)\|_2 = \left(\sup \frac{\|\xi_\omega(t)\|_2}{\|\omega(t)\|_2} \right) \|\omega(t)\|_2. \quad (21)$$

系统发生故障($f(t) \neq 0$),

$$\begin{aligned} \varepsilon_2 &= \|\xi_f(t)\|_2 \\ &= \left(\sup \frac{\|\xi_\omega(t)\|_2}{\|\omega(t)\|_2} \right) \|\omega(t)\|_2 + \left(\inf \frac{\|\xi_f(t)\|_2}{\|f(t)\|_2} \right) \|f(t)\|_2. \end{aligned} \quad (22)$$

一般来说,自适应阈值应满足 $\varepsilon_1 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_2$,如果 ε 的值过大或过小,则可能导致误诊与漏诊.

令

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \|\xi_\omega(t)\|_2 = \alpha, \\ \varepsilon_2 = \|\xi_f(t)\|_2 = \beta. \end{cases} \quad (23)$$

则所设计的自适应阈值 ε 可表述如下:

$$\varepsilon = \lambda_1(\alpha + \lambda_2\beta). \quad (24)$$

其中标量 $\lambda_1, \lambda_2 \in [0, 1]$,其两者的标示基于故障与系统扰动的影响.根据上述所设计的自适应阈值,当具有未知扰动的AUV执行机构发生故障时,阈值 ε 可以随着干扰的变化而自适应调节,将系统扰动对故障检测性能的影响降到了最低,减小因阈值选取不当造成的误报率,提高故障检测的灵敏度.

4 执行机构故障估计

4.1 系统匹配与误差有界性

非线性系统(4)可以进一步改写为如下形式的状态空间方程:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + g(x) + Ff(t) + Ww(t), \\ y = Cx. \end{cases} \quad (25)$$

其中 x, u, y 是系统状态、控制输入及系统输出; $g(x)$ 是非线性项; $f(t)$ 是执行机构故障向量; $w(t)$ 是系统的未知干扰.

AUV的系统结构空间方程满足如下匹配条件:

$$\text{rank}(D) = \text{rank}([W \ F]) = \text{rank}(CD). \quad (26)$$

同时存在对称正定矩阵 Q, P ,增益矩阵 L 及矩阵 G ,使得下述等式成立:

$$\begin{cases} (A - LC)^T P^T + P(A - LC) = -Q, \\ F^T P = GC. \end{cases} \quad (27)$$

基于章节2.1的相关理论分析,根据非线性系统的

扩张形式设计如下的滑模观测器:

$$\begin{cases} \dot{z} = Az + Bu + L(y - \hat{y}) + v(t), \\ \hat{y} = Cz. \end{cases} \quad (28)$$

定理 2 存在如下形式的滑模变结构输入信号 $v(t)$,

$$v(t) = \begin{cases} \rho P^{-1} C^T F \frac{e_y}{\|e_y\| + \delta} & e_y = \dot{e}_y, \\ 0 & e_y \neq \dot{e}_y. \end{cases} \quad (29)$$

其中 $e_y = y - \hat{y}$,使得估计误差有界稳定.

证明:误差方程可表述为

$$\dot{e} = (A - LC)e + \eta + Ff(t) - v(t). \quad (30)$$

其中 $\eta = g(x) - g(\tilde{x}) + Ww(t)$,包括非线性分量与扰动分量; L 为观测器的增益矩阵.定义 γ (满足 $\gamma^2 = \psi, \|g(x) - g(\tilde{x})\| \leq \psi \|x - \tilde{x}\|$,其中 ψ 为Lipschitz系数),将观测器的增益求解转化为LMI约束优化问题(增益矩阵为 $L = P^{-1}G$).

定义如下形式的李雅普诺夫函数:

$$L(t) = e^T P e > 0. \quad (31)$$

令 $A - LC = A_1$,则有

$$\begin{aligned} \dot{L}(t) &= [A_1 e + \eta + Ff(t) - v(t)]^T P e + \\ &e^T P [A_1 e + \eta + Ff(t) - v(t)] \\ &= e^T (A_1^T P + P A_1) e + [e^T P [Ff(t) - v(t)]]^T + \\ &\eta^T E^T P e + e^T P E \eta + e^T P [Ff(t) - v(t)]. \end{aligned} \quad (32)$$

令

$$\begin{cases} y_1(t) = \eta^T E^T P e + e^T P E \eta, \\ y_2(t) = e^T P [Ff(t) - v(t)] \\ \quad = e^T (C^T \|G\| f(t) - \rho C^T \|G\| \frac{e_y}{\|e_y\| + \delta}). \end{cases} \quad (33)$$

由式(33)可得

$$\begin{aligned} y_1(t) &= \eta^T E^T P e + e^T P E \eta \\ &= \eta^T G C e + (\eta^T G C e)^T \\ &= B + B^T. \end{aligned} \quad (34)$$

其中 $\|B\| = \|\eta^T G C e\| = \eta^T \|G C\| \|e\| < 0$ (η 上界小于0).

考虑故障的取值为负,则

$$\begin{aligned} y_2(t) &\leq -e^T \rho C^T \|G\| \frac{e_y}{\|e_y\| + \delta} \\ &= -\rho (e_y)^T (C C^{-1})^T \|G\| \frac{e_y}{\|e_y\| + \delta} \\ &= -\rho \|G\| \frac{|\zeta|}{\|e_y\| + \delta}. \end{aligned} \quad (35)$$

其中 e_y 为列向量,因此 $\zeta = (e_y)^T (e_y)$ 为常数.

令 $e_g = g(x) - g(\tilde{x})$, 则

$$\begin{aligned} L(\dot{t}) &\leq e^T (A_1^T P + P A_1) e + \frac{1}{\gamma} e^T e - e_g^T e_g \quad (36) \\ &\leq \begin{bmatrix} e \\ e_g \end{bmatrix}^T \underbrace{\begin{bmatrix} (A_1^T P + P A_1) + \frac{1}{\gamma} I & 0 \\ 0 & -I \end{bmatrix}}_{-\tilde{Q}} \begin{bmatrix} e \\ e_g \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

当 $\tilde{Q} > 0$ 时, $L(\dot{t}) < 0$, 即估计误差最终有界稳定.

4.2 动态滑模面的设计及稳定性证明

章节4.1所设计的滑模观测器未考虑抖振的影响, 使得估计误差较为明显; 为消除抖振, 本文引入动态滑模面的思想.

章节3.1中, 观测器的跟踪误差可表示为:

$$E = x - x_d = \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \\ \ddot{e} \end{bmatrix}^T. \quad (37)$$

定义如下的滑模方程

$$s(x, t) = CE - CV(t). \quad (38)$$

其中 $C = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix}^T$, $V(t) = \begin{bmatrix} v(t) & \dot{v}(t) & \ddot{v}(t) \end{bmatrix}^T$, c 为正的常系数.

则动态滑模面可设计为

$$\sigma(x, t) = \dot{s}(x, t) + \lambda s(x, t). \quad (39)$$

其中 λ 为常系数.

定理 3 对于非线性系统(25), 如果给定如下的控制律:

$$\begin{aligned} u(\dot{t}) &= -\frac{1}{(c_1 + \lambda c_2 + A c_2)B} (I_1 u(t) + I_2 + I_3 \\ &\quad + (\lambda + A)(c_1 + c_2 A) D \text{sign}(\sigma)). \quad (40) \end{aligned}$$

则 $\sigma(x, t)$ 将在有限时间 t 内到达 0, 即状态变量 x 在有限时间内收敛, 其中 D 为常值.

证明: 设计如下形式的李雅普诺夫函数:

$$L(t) = \frac{1}{2} \sigma^T \sigma. \quad (41)$$

$$\begin{aligned} s(x, t) &= C(E - V) \\ &= \sum_{l=1}^2 c_l (e^{(l)} - v^{(l)}). \quad (42) \end{aligned}$$

取其微分形式为

$$\begin{aligned} \dot{s}(x, t) &= C(\dot{E} - \dot{V}) \quad (43) \\ &= c_1(\dot{e} - \dot{v}) + c_2(\ddot{e} - \ddot{v}). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma &= \dot{s}(x, t) + \lambda s(x, t) \quad (44) \\ &= \lambda c_1(e - v) + (c_1 + \lambda c_2)(\dot{e} - \dot{v}) + c_2(\ddot{e} - \ddot{v}). \end{aligned}$$

因此,

$$\dot{\sigma} = \lambda c_1(\dot{e} - \dot{v}) + (c_1 + \lambda c_2)(\ddot{e} - \ddot{v}) + \quad (45)$$

$$c_2(e^{(3)} - v^{(3)}).$$

令 $d(x, t) = g(x) + Ff(t) + Ww(t)$, 则

$$\begin{cases} \lambda c_1(\dot{e} - \dot{v}) \\ = \lambda c_1(Ax + Bu(t) + d(x, t) - \dot{x}_d - \dot{v}), \\ (c_1 + \lambda c_2)(\ddot{e} - \ddot{v}) \\ = (c_1 + \lambda c_2)(A^2 x + ABu(t) + Ad(x, t) \\ + B\dot{u}(t) + \dot{d}(x, t) - \ddot{x}_d - \ddot{v}), \\ c_2(e^{(3)} - v^{(3)}) \\ = c_2(A^3 x + A^2 Bu(t) + AB\dot{u}(t) + \dot{d}(x, t) \\ + A^2 d(x, t) + A\dot{d}(x, t) - x_d^{(3)} - v^{(3)}). \end{cases} \quad (46)$$

由上式可得

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= I_1 u(t) + (c_2 A^2 + \lambda c_2 A + c_1 A + \lambda c_1) d(x, t) + \\ &\quad c_2 \ddot{d}(x, t) + (c_2 A + c_1 A + \lambda c_2 A) \dot{d}(x, t) + \\ &\quad c_2 B \ddot{u}(t) + (c_1 B + \lambda c_2 B + c_2 AB) \dot{u}(t) + \\ &\quad I_2 + I_3. \quad (47) \end{aligned}$$

其中,

$$\begin{aligned} I_1 &= c_2 AB + c_1 AB + \lambda c_2 AB + \lambda c_1 B, \\ I_2 &= (\lambda c_1 A + c_1 A^2 + \lambda c_2 A^2 + c_2 A^3) x, \quad (48) \\ I_3 &= \dot{x}_d + \ddot{x}_d + x_d^{(3)} + \dot{v} + \ddot{v} + v^{(3)}. \end{aligned}$$

考虑到 $d(x, t)$ 为连续微分函数, $\dot{d}(x, t)$, $\ddot{d}(x, t)$ 为有限函数, 进一步可得:

$$\begin{aligned} d(x, t) + \frac{c_2(\lambda + A) + c_1}{(\lambda + A)(c_1 + c_2 A)} \dot{d}(x, t) + \\ \frac{c_2}{(\lambda + A)(c_1 + c_2 A)} \ddot{d}(x, t) = \dot{d}(x, t) \leq D. \quad (49) \end{aligned}$$

将动态控制律带入公式(49)可得:

$$\dot{\sigma} = (\lambda + A)(c_1 + c_2 A)(\dot{d}(x, t) - D \text{sign}(\sigma)). \quad (50)$$

$$\begin{aligned} \sigma \dot{\sigma} &= (\lambda + A)(c_1 + c_2 A)(\dot{d}(x, t) \sigma - D \text{sign}(\sigma) \sigma) \\ &\leq -(\lambda + A)(c_1 + c_2 A) |\sigma|. \quad (51) \end{aligned}$$

若 $\sigma \neq 0$, 则 $L(\dot{t}) < 0$, 即输出估计误差的滑模运动将在有限时间内到达动态滑模面 $\sigma(x, t)$.

4.3 故障估计

定义线性变换矩阵 $K = \begin{bmatrix} PC^T & C \end{bmatrix}$, 根据式(30)可以得到新的误差方程:

$$\dot{e} = A_2 e + K \eta + F_1 f(t) - K v(t). \quad (52)$$

其中

$$A_2 = K A_1 K^{-1} = \begin{bmatrix} A_{21} & A_{22} \\ A_{23} & A_{24} \end{bmatrix}, \quad (53)$$

$$K \eta = \begin{bmatrix} PC^T \eta \\ C \eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix}, \quad (54)$$

$$Kv(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ \rho CP^{-1}C^T \|F\| \frac{e_y}{\|e_y\| + \delta} \end{bmatrix}, \quad (55)$$

$$F_1 = KF = \begin{bmatrix} 0 \\ CP^{-1}C^TG^T \end{bmatrix}. \quad (56)$$

进一步改写误差方程为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = A_{21}e_1 + A_{22}e_y + \eta_1, \\ \dot{e}_2 = A_{23}e_1 + A_{24}e_y + \eta_2 + F_1f(t) - v. \end{cases} \quad (57)$$

通过等效控制输出误差注入原理维持滑模运动, 实现故障重构. 当滑模运动到达时, $\sigma = \dot{\sigma} = 0$,

$$[-CP^{-1}(GC)^T]f(t) = A_{23}e_1 + \eta_2 - v_{eq}. \quad (58)$$

其中 v_{eq} 为等效输出注入信号. 根据上述误差稳定性证明, 将约束优化问题 $g_2 = Ce_g \leq \psi\|x - \tilde{x}\|$ 代入式(58)可得:

$$\|CF_1\|f(t) \leq \|A_{23}\|e_1 + \|C\|\psi + \|W_{12}\|w(t) - v_{eq}. \quad (59)$$

估计式(59)中的各项参数, 将式(57)代入可得:

$$(-CKF)f(t) = P^{-1}C^T[(CK)^T + \sigma]v(t). \quad (60)$$

式中 σ 为参数的总估值, 则执行机构故障重构的估计值可以近似表示为:

$$\tilde{f}(t) = -P^{-1}C^T[(CF)^T(CF)^{-1} + \sigma]v(t). \quad (61)$$

5 仿真实证

$$T_i = \begin{cases} T_i & t < 100 \\ 0.5(1 - e^{-\alpha(t-100)})T_i & t > 100 \end{cases}, \quad i = 1, 2.$$

故障工况: $i = 1$ 表征螺旋桨故障; $i = 2$ 表征方向舵故障. 仿真AUV执行机构中的螺旋桨或方向舵发生故障的情况, 即推力(力矩)在100s时发生衰减, 直至变为正则推力(力矩)的50%. α 表征故障变化速率(不同取值可分别表示突变故障与缓变故障).

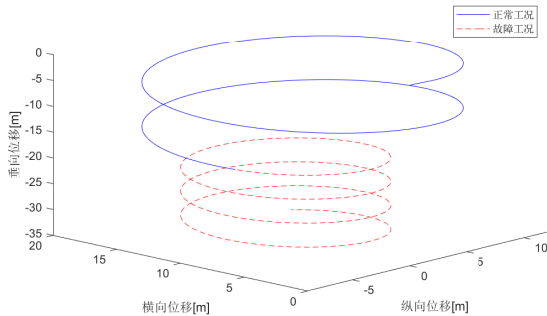


图2 AUV运动姿态

Fig. 2 Motion poster for AUV

图2所示为螺旋桨发生故障前后AUV姿态的变化. 不难发现, 在故障工况下, AUV机体已无法跟踪即定的循迹任务. 但同时, 故障工况下机体位移、速度以及姿态的变化给基于解析残差的故障检测带来了可

能.

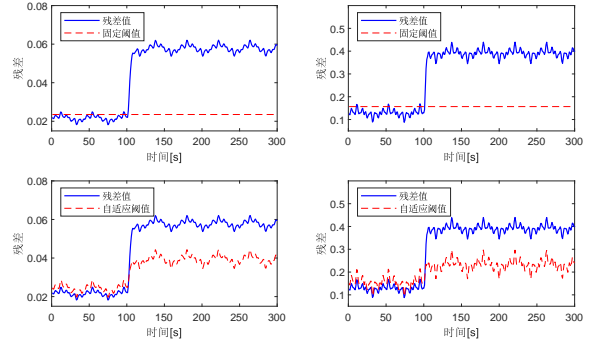


图3 螺旋桨故障检测(突变故障)

Fig. 3 Propeller fault detection(abrupt fault)

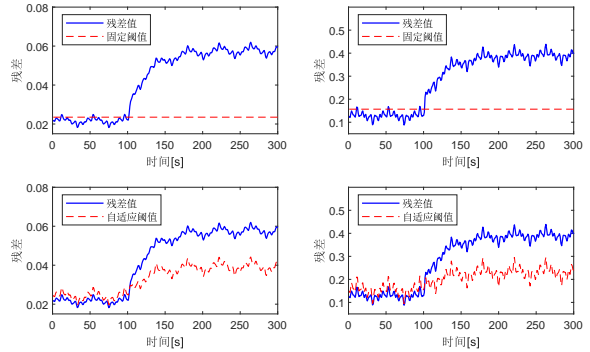


图4 螺旋桨故障检测(缓变故障)

Fig. 4 Propeller fault detection(slowly-varying fault)

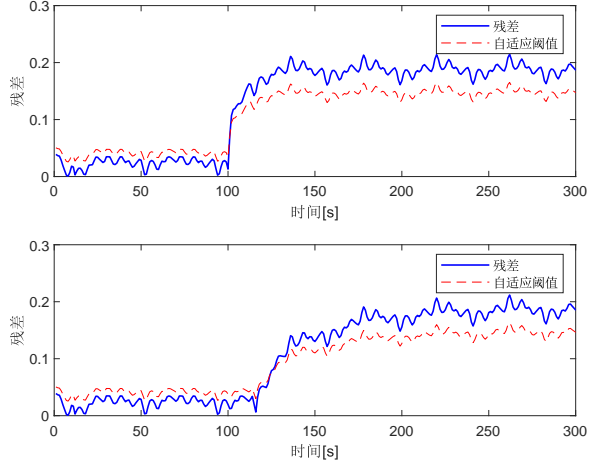


图5 方向舵故障检测(突变+缓变故障)

Fig. 5 Horizontal rudder fault detection(slowly-varying fault and abrupt fault)

图3-5为AUV执行机构的故障检测结果, 通过对比不难发现, 执行机构在有干扰的工况下运行时, 基于固定阈值的诊断机制会产生误报警, 而自适应阈值的设计可以有效规避上述问题. 因此, 自适应阈值的引入有效地降低了健康工况下的故障误报.

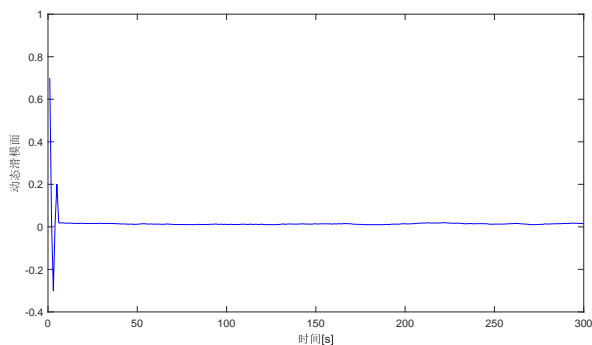


图 6 动态滑模面

Fig. 6 Dynamic sliding surface

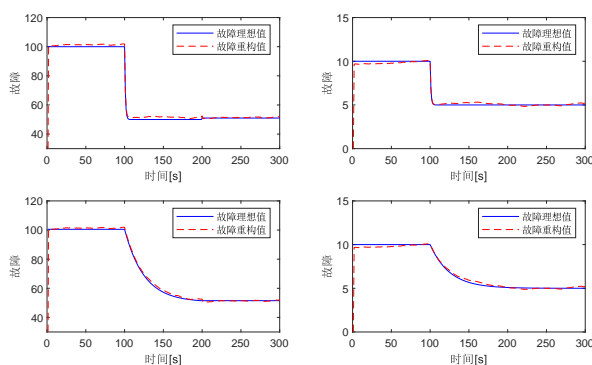


图 7 执行机构故障估计(突变+缓变故障)

Fig. 7 Actuator fault estimation (slowly-varying fault and abrupt fault)

图6表明所设计的动态滑模面可以迅速地收敛到原点;图7表明本文所提出的执行机构故障估计策略可以实现包括螺旋桨、方向舵在内的参数时变型故障的重构。

6 结论

本文提出了一种自适应阈值和扩张状态SMO相结合的AUV执行机构故障检测与估计方法。所设计的改进的自适应阈值有效避免了健康工况下的故障误报。设计动态滑模面抑制抖振,通过引入等效控制输出误差注入原理,获得了较为理想的故障估计效果。仿真表明,该方法可以有效地对包括螺旋桨、方向舵在内的AUV执行机构进行故障检测与估计。

参考文献:

- [1] ZHU D Q, HU Z. Fault diagnosis and fault-tolerant control technology for AUV[M]. National Defense Industry Press, 2012. (朱大奇, 胡震. 水下机器人故障诊断与容错控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.)
- [2] LIU X, ZHANG M, YAO F. Adaptive fault tolerant control and thruster fault reconstruction for autonomous underwater vehicle[J]. Ocean Engineering, 2018, 155: 10-23.
- [3] LEE J, OH K, YOOH Y, SONG T, et al. Adaptive fault detection and emergency control of autonomous vehicles for fail-safe systems using a sliding mode approach[J]. IEEE Access, 2022, 10: 27863-27880.

- [4] SU L Q, GUO X, JI Y D. Tracking control of cable-driven manipulator with adaptive fractional-order nonsingular fast terminal sliding mode control[J]. Journal of Vibration and Control, 2021, 27: 2482-2493.
- [5] LIU W Q, FENG Z P, BI A Y. A novel nonsingular terminal sliding mode control combined with global sliding surface for uncertain nonlinear second-order systems[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2020, 42(7): 1294 - 1300.
- [6] LABBADI M, DJEMAI M, BOUBAKER S. A novel non-singular terminal sliding mode control combined with integral sliding surface for perturbed quadrotor[J]. Journal of Systems and Control Engineering, 2022, 236(5): 999-1009.
- [7] HE S P, AI Q L, REN C C, et al. Finite-Time Resilient Controller Design of a Class of Uncertain Nonlinear Systems With Time-Delays Under Asynchronous Switching[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems, 2019, 49(2): 281-286.
- [8] LI X G, WANG J M, XU Q Y, et al. Extended State Observer Based Iteration Learning Fault-tolerant Control Scheme for AUV[C]. Global Oceans 2020: Singapore - U.S. Gulf Coast, 2020, 1-8.
- [9] ZHANG C M, WANG X H, REN Y H, et al. Actuator Fault Detection for Autonomous Underwater Vehicle Using Interval Observer[C]. 2019 CAA Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS), 2019, 449-453.
- [10] CENGIZ H, SITKI Y V. Active Fault Tolerant Lateral Control Against Actuator Faults Applied to AUV Dynamics[C]. 2019 Conference on Control and Fault Tolerant Systems, 2019, 153-158.
- [11] SUN Y S, RAN X R, LI Y M, et al. Thruster fault diagnosis method based on Gaussian particle filter for autonomous underwater vehicles[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2016, 8(3): 243-251.
- [12] JIANG B, WU Y K, LU N Y, et al. Review of fault diagnosis and prognosis techniques for high-speed railway traction system[J]. Control and Detection, 2018, 33(5): 841-855. (姜斌, 吴云凯, 陆宁云, 等. 高速列车牵引系统故障诊断与预测技术综述[J]. 控制与决策, 2018, 33(5): 841-855.)
- [13] ZHANG S, FAN L T, GAO J W, et al. Fault Diagnosis of Underwater Vehicle and Design of Intelligent Self-rescue System[J]. Journal of Coastal Research, 2018, 83: 872-875.
- [14] LEE H, JEONG H, KOO G, et al. Attention recurrent neural network-based severity estimation method for interturn short-circuit fault in permanent magnet synchronous machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(4): 3445-3453.
- [15] KIM D, LEE S S, CHOI H S, et al. Dynamic Modeling and Motion Analysis of Unmanned Underwater Gliders with Mass Shifter Unit and Buoyancy Engine[J]. Journal of Ocean Engineering and Technology, 2014, 28(5): 466-473.
- [16] LIN P P, YE D, GAO Z, et al. Intelligent process fault diagnosis for nonlinear systems with uncertain plant model via extended state observer and soft computing[J]. Intelligent Control and Automation, 2012, 3(4): 346-355.

作者简介:

吴云凯 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 目前研究方向为故障诊断与容错控制, E-mail: wuyunkaischolar@just.edu.cn;

胡大海 硕士研究生在读, 目前研究方向为AUV故障诊断与容错控制, E-mail: hu1350118711@163.com;

朱志宇 博士, 教授, 博士研究生导师, 目前研究方向为船舶智能电网, E-mail: zzydzz@163.com;

曾庆军 博士, 教授, 硕士研究生导师, 目前研究方向为机器人传感与控制, E-mail: zheng28501@163.com.