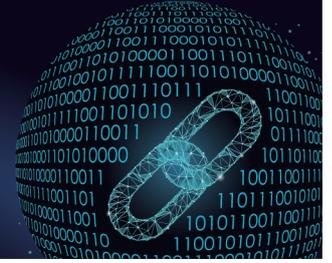




中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

# 控制与决策

CONTROL AND DECISION



## 基于故障描述因子与多观测器同步协作的AUV执行机构故障隔离与辨识

吴云凯, 胡大海, 付俊, 周扬

引用本文:

吴云凯, 胡大海, 付俊, 周扬. 基于故障描述因子与多观测器同步协作的AUV执行机构故障隔离与辨识[J]. 控制与决策, 2024, 39(6): 2005–2012.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.2040>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 基于向量集逆区间滤波的故障观测器设计

Vector set inversion interval filtering based fault observer design

控制与决策. 2021, 36(12): 2973–2981 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0212>

##### 基于动态观测器零极点优化的网络控制系统故障检测

Pole-zero optimization design of dynamic observer for fault detection of networked control systems

控制与决策. 2021, 36(6): 1351–1360 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1107>

##### 标签Petri网的路径信息在故障诊断中的应用

Application of path information of labeled Petri nets in fault diagnosis

控制与决策. 2021, 36(2): 325–334 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0698>

##### 具有执行器故障的四旋翼无人机自适应预定性能控制

Adaptive prescribed performance control of quadrotor with unknown actuator fault

控制与决策. 2021, 36(9): 2103–2112 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0083>

##### 基于多块信息提取的AUV资源勘查系统故障检测

Fault detection of AUV resource exploration system based on multi-block information extraction

控制与决策. 2021, 36(4): 790–800 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0732>

# 基于故障描述因子与多观测器同步协作的 AUV 执行机构故障隔离与辨识

吴云凯<sup>1</sup>, 胡大海<sup>1</sup>, 付俊<sup>2†</sup>, 周扬<sup>3</sup>

(1. 江苏科技大学 自动化学院, 江苏 镇江 212100; 2. 东北大学 流程工业综合自动化国家重点实验室, 沈阳 110819; 3. 江苏科技大学 计算机学院, 江苏 镇江 212100)

**摘要:** 执行机构的可靠性对系统的安全运行具有重要意义. 针对自主式水下机器人(AUV), 提出一种基于故障描述因子与多观测器同步协作的故障隔离与辨识方法. 首先, 通过执行机构故障描述因子概念的引入, 将 AUV 运载器的故障隔离和辨识问题分为两个层级; 其次, 通过扩张状态观测器(ESO)和故障隔离逻辑规则的设计, 实现包括舵面、螺旋桨与舵机在内的粗粒度级执行机构的故障隔离; 然后, 根据故障力与力矩的正负性关系, 进一步分析舵面的具体形变故障类型, 亦或基于螺旋桨与舵机的输出力与力矩关系, 通过分析故障因子的内部信息, 具体辨识可能的螺旋桨与舵机故障类型; 最后, 通过仿真结果表明所提出方法对 AUV 执行机构的故障具有较好的隔离与辨识精度.

**关键词:** 自主式水下机器人; 执行机构; 故障描述因子; 多观测器; 故障隔离; 多层次故障辨识

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.13195/j.kzyjc.2022.2040

**引用格式:** 吴云凯, 胡大海, 付俊, 等. 基于故障描述因子与多观测器同步协作的 AUV 执行机构故障隔离与辨识[J]. 控制与决策, 2024, 39(6): 2005-2012.

## Fault factor and multiple observers based AUV actuator fault isolation and identification

WU Yun-kai<sup>1</sup>, HU Da-hai<sup>1</sup>, FU Jun<sup>2†</sup>, ZHOU Yang<sup>3</sup>

(1. College of Automation, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China; 2. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. School of Computer Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

**Abstract:** The actuator reliability is of great significance to the system security. Therefore, a fault isolation and identification method is proposed for autonomous underwater vehicles (AUVs) based on fault factor and multiple observers scheme. Firstly, the fault isolation and identification of AUV actuators is divided into two levels based on the concept of fault factors. Then, the fault isolations focusing on rudders, propellers and actuators based on extended state observers (ESOs) and isolation logic rules are proposed. According to the relationship between the output force and torque, further identification can be realized via internal information analysis of fault factors. The simulation results show that the proposed scheme has an outstanding accuracy for AUV actuator fault isolation and identification.

**Keywords:** AUV; actuator; fault factor; multiple observers; fault isolation; multi-level fault identification

## 0 引言

自主式水下机器人 (autonomous underwater vehicles, AUV) 作为海洋资源开发的主要勘探工具, 因其机械及控制结构的复杂性、水下运动及环境的不确定性等因素, 对运载器的安全性和可靠性都提出

了较高的要求, 从客观层面上给 AUV 执行机构的故障隔离与辨识带来了困难<sup>[1]</sup>.

近年来, 针对 AUV 执行机构的故障隔离与辨识一直是热点研究领域, 其中观测器和滤波器的设计和优化在基于解析模型的方法中扮演着重要的角

收稿日期: 2022-11-24; 录用日期: 2023-04-03.

基金项目: 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.

责任编辑: 吴立刚.

† 通讯作者. E-mail: junfu@mail.neu.edu.cn.

色. 文献[2]通过设计多个滑模观测器,实现由于早期故障导致的推进器参数与标准值细微偏差的检测与定位,其中每个观测器均采用仅对某类型故障敏感而对其他类型故障都不敏感的设计机制. 文献[3]采用自适应区间观测器组成故障隔离单元,基于严格的状态上下限估计来确定执行机构中的故障位置,实现故障的隔离. 文献[4]通过三级中心差分卡尔曼滤波器的设计,在故障和未知输入信息部分未知的情况下,实现了执行器故障与系统干扰的解耦,并验证了其在执行器故障检测和隔离方面的优异性能. 然而,上述方法大多研究执行机构的故障隔离问题,对故障的辨识未有涉及. 因此,在解析模型的基础上融入数据驱动的方法以实现故障的精准辨识,成为了新的研究热点. 文献[5]基于信息融合的策略,利用AUV的运动状态残差和推进器的推力残差的多源融合,制定和设计了分离决策规则和辨识机制,实现了推进器故障的隔离与辨识. 文献[6]通过状态切换无迹卡尔曼滤波器建立故障识别模型,在此基础上利用贝叶斯递归公式计算AUV每种工作模式下的概率以实现故障的辨识. 文献[7]选择具有适当动态模型的分量滤波器以对应系统当前工况,将数据集的统计测试用于检测和识别故障参数,以达到故障辨识的目的. 近年来,相关文献通过针对故障特征的研究,进一步提升了故障隔离与辨识的精度. 文献[8]通过将故障特征与估计的故障参数进行匹配,定位出疑似的故障区段,同时分析相关故障参数,以提升故障隔离的精确度. 文献[9]针对频域中缺少有用特征的问题,提出了一种新的特征计算方法,并给出了可用特征的数量级,为故障辨识提供了简明、准确的信息. 文献[10]基于时域和频域信息构造故障特征矩阵并对AUV推进器工况进行多源映射和冗余描述,以实现对其故障隔离与辨识的目的.

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解析模型的故障隔离与辨识在精度上的不足<sup>[11]</sup>,但相关方法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. 其中,文献[12]提出一种基于动态神经网络和遗传算法的AUV推进器故障检测、隔离与辨识方法. 文献[13]利用峰值区域能量法提取故障特征,并基于最小二乘灰色关联度算法实现对AUV推进器故障的辨识和故障程度的估计.

综上,目前国内外相关研究主要集中在AUV运载器舵面、舵机与螺旋桨等粗粒度级的执行机构的故障隔离,针对更细粒度级的故障辨识鲜有研究. 本

文的主要工作如下: 1) 基于故障描述因子与多观测器同步协作机制,成功建立了针对AUV执行机构故障的分层故障隔离与辨识机制,即粗粒度级的故障隔离与细粒度级的故障辨识,诊断过程更具逻辑性; 2) 在细粒度级的诊断层面,基于故障描述因子对舵面、舵机与螺旋桨的具体故障情况进行进一步的精确辨识,具有较高的理论意义与工程价值.

## 1 AUV运载器动力学模型与故障建模

### 1.1 AUV近水面海浪干扰分析

AUV在水中作业时,时常受到海浪的干扰. 而本文所考虑的小型水下机器人其执行机构抗洋流扰动能力有限,因此海浪对运载器的干扰因素不可忽略. 当海浪流经AUV机体时,会引起附近的流体产生对运载器的作用力. 考虑AUV运载器与洋流介质间满足基本的流体力学假设条件,可采用Morison方程<sup>[14]</sup>来估计AUV在近水面所受到的海浪总干扰力,即

$$F_w = \left( \frac{C_d}{2} \rho A U_w^2 + C_m \nabla \rho \dot{U}_w \right) dx. \quad (1)$$

其中: $U_w, \dot{U}_w$ 分别为海浪流动的速度与加速度; $C_d$ 为流体阻力系数; $A$ 为机器人在纵倾面上的横截面积; $C_m$ 为惯性系数; $\nabla$ 为运载器排水量; $\rho$ 为海水密度.

在文献[14]中,AUV的外形被等效成圆柱体,其等效直径为 $D$ ,对其长度 $L$ 进行积分即可得到近水面AUV各个自由度的海浪干扰力.

### 1.2 AUV执行机构故障描述与建模

基于故障描述因子刻画的AUV执行机构动态可表述如下.

#### 1) 加性描述形式

$$u = u^* + F^+. \quad (2)$$

其中: $u$ 为控制输入; $F^+$ 为加性故障向量,可用于描述系统控制与期望控制量之间的偏差.  $F^+ = [f_1^+, f_2^+, \dots, f_n^+]^T, f_i^+ (i = 1, 2, \dots, n)$ 为加性故障描述因子.

#### 2) 乘性描述形式

$$u = F^\times u^*. \quad (3)$$

其中: $F^\times$ 为描述故障程度的对角阵,有

$$F^\times = \text{diag}(f^\times) = \text{diag}(f_1^\times, f_2^\times, \dots, f_n^\times). \quad (4)$$

当 $f_i^\times (i = 1, 2, \dots, n) \neq 1$ 时,控制输入携带故障信息,此时称 $f_i^\times (i = 1, 2, \dots, n)$ 为乘性故障描述因子.

#### 1.2.1 动力推进执行机构故障

螺旋桨是AUV中直接与流体发生作用产生前向推力的执行机构. 引入螺旋桨输出推力与其转速之

间的关系式<sup>[15]</sup>

$$T = K_T n |n| + K_v n V_a. \quad (5)$$

其中:  $T$  为推力,  $n$  为螺旋桨转速,  $V_a$  为电机推进速度; 推力系数  $K_T$  与电机推进系数  $K_v$  为与螺旋桨故障有关的变量, 两者的取值分别与螺旋桨形状和AUV的流体结构相关. 当转速  $n$  下降时, 相应的推力  $T$  也会随之下降, 本文视此情况为螺旋桨的推力损失故障.

### 1.2.2 姿态控制执行机构故障

AUV的姿态控制主要依赖舵面与舵机在内的姿态控制机构. 舵面故障可描述为边缘的小角度弯曲变形, 同时形变舵面与流体发生作用产生与载体坐标系平行的作用力, 其受流体作用所产生的加性故障可由受力的变化来刻画.

$$F^+ = [F_X^+ \ F_Y^+ \ F_Z^+ \ F_M^+ \ F_N^+]^T = F_{\text{fault}}^+ - F^*. \quad (6)$$

其中: 向量  $F_X^+, \dots, F_N^+$  表征各个自由度的加性受力变化, 同时可以表征舵面的形变故障;  $F_{\text{fault}}^+$  与  $F^*$  分别为故障与健康工况下流体对舵面的作用力.

在姿态控制系统中, 舵机用于提供舵面偏转的力矩, 给定舵机的力矩公式为<sup>[15]</sup>

$$M = DK_M n |n| + DK_v n V_a. \quad (7)$$

其中:  $M$  为力矩,  $D$  为螺旋桨直径; 力矩系数  $K_M$  和电机推进系数  $K_v$  为与舵机故障有关的变量, 两者的取值分别与舵机和AUV的流体结构相关. 当转速  $n$  下降时, 相应的力矩  $M$  也会随之下降, 本文视此情况为舵机的力矩损失故障.

基于 1.2.1 节与 1.2.2 节中相关故障前后力与力矩的变化, 引入乘性故障描述因子  $f_1^\times$  和  $f_2^\times$  与加性故障描述因子  $f_1^+$  和  $f_2^+$ , 可得

$$\begin{cases} T + f_1^+ = f_{11}^\times K_T n |n| + f_{12}^\times K_v n V_a, \\ M + f_2^+ = f_{21}^\times DK_M n |n| + f_{22}^\times DK_v n V_a. \end{cases} \quad (8)$$

其中:  $f_1^\times = [f_{11}^\times \ f_{12}^\times]^T$ ,  $f_2^\times = [f_{21}^\times \ f_{22}^\times]^T$ .

### 1.3 AUV 运载器空间运动模型(正常/故障工况)

AUV在水下主要受重力、浮力、推力、水动力、干扰力以及与这些力相关的各种力矩的作用, 其在地面坐标系和载体坐标系下的六自由度模型如图1所示(相关参数定义详见表1). 其在载体坐标系中的非线性动力学模型可以表示为

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\mu) = \tau. \quad (9)$$

其中: 惯性矩阵  $M$  包括流体动力的附加质量惯性矩阵  $M_A$  及刚体的惯量矩阵  $M_{RB}$ ; 科氏及向心力矩阵  $C(v)$  包括由附加质量惯性矩阵  $M_A$  引起的科氏力矩阵  $C_A(v)$  以及刚体的向心力矩阵  $C_{RB}(v)$ ; 流体阻力

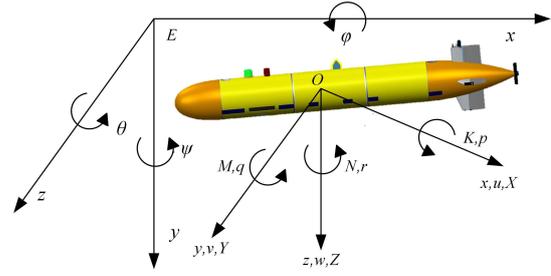


图1 AUV坐标<sup>[15]</sup>

表1 AUV坐标系相关参数定义

符号	定义
$E, O$	原点(对应静态和动态坐标系)
$x, y, z$	轴位移(对应纵向、横向和垂向)
$\phi, \theta, \psi$	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分量
$p, q, r$	角速度矢量在载体坐标系中的分量
$X, Y, Z$	水动力(对应轴向、侧向和垂向)
$K, M, N$	水动力矩(对应横摆、纵倾和转舵)

矩阵由  $D(v)$  表示; 重力和浮力产生的回复力  $g(\mu)$  中,  $\mu$  是静坐标系下的位姿向量; 执行机构的控制输入由  $\tau$  表示. 进一步可由如下形式更改为一般的非线性系统描述:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + g(x) + Dd, \\ y = Cx. \end{cases} \quad (10)$$

其中:  $x, y, u, d$  分别为状态向量、系统输出向量、控制输入向量及系统干扰;  $g(x)$  为非线性项;  $A, B, C, D$  为常系数矩阵. 根据故障描述因子的相关定义, 式(10)所述非线性系统可以改写为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + g(x) + Dd + G(u, F^\times, F^+), \\ y = Cx. \end{cases} \quad (11)$$

其中

$$G = \begin{cases} BF^\times u, & F^\times \neq 0, F^+ = 0; \\ B(u + F^+), & F^\times = 0, F^+ \neq 0; \\ B(F^\times u + F^+), & F^\times \neq 0, F^+ \neq 0. \end{cases} \quad (12)$$

$G(\cdot)$  为分段故障函数, 包括加性描述形式、乘性描述形式以及混合描述形式的执行机构故障结构, 故障分布矩阵  $F$  可定义为

$$F = [F^\times \ F^+]^T = [F_1 \ F_2 \ \dots \ F_n]^T. \quad (13)$$

式(13)中的故障矩阵可分别表征舵面形变故障、螺旋桨推力故障与方向舵推力矩故障.

## 2 执行机构故障隔离与辨识

如图2所示, 其主要思想是将故障诊断过程分为两级: 第1级(粗粒度级), 通过设计与执行器故障相对应的隔离观测器并合成观测器组, 利用观测器残差与故障类型的对应关系, 实现运载器舵面、舵机与螺旋

桨等的故障隔离;第2级(细粒度级),基于故障描述因子对上一层级AUV运载器执行机构内部的故障信息进行二次辨识.本文所提出的多层次故障隔离与辨识方案,与已有的AUV运载器执行机构故障隔离相关研究相比,其具体优势体现在:1)从粗粒度级到细粒度级故障隔离与辨识的多层级融合,使得本文所提出的故障诊断机制更具逻辑性;2)在细粒度级故障辨识的层面,实现了包括舵面小角度形变、桨叶缺失/损毁/异物缠阻与舵机卡死/舵角完全闭合等在内的具体故障的识别,在一定程度上提升了实际工程应用价值.

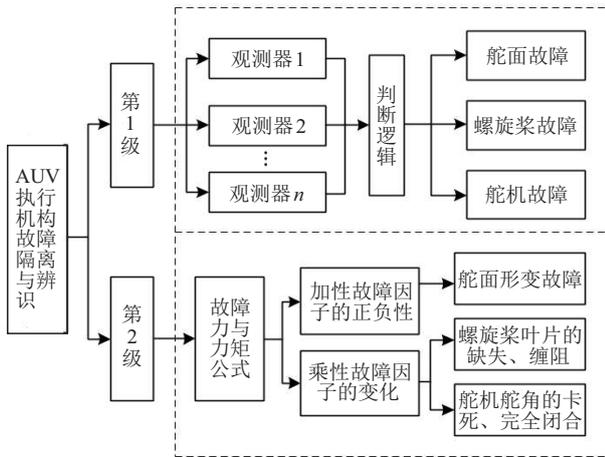


图2 多层次故障隔离与辨识方案

## 2.1 故障隔离方案(第1级)

针对包含执行机构故障的状态方程(11),定义

$$F_a = [F_a^\times \quad F_a^+]^T = [F_j \quad F_{j+1} \quad \dots \quad F_k]^T. \quad (14)$$

其中:  $F_a$  为目标故障矩阵,且满足  $1 < j < k < n$ . 重新定义  $F_b$  为分段故障函数  $G$  中剩下的故障向量所组成的矩阵,从  $G$  中移除  $F_b$  并与干扰向量构成新的分布矩阵,令此时只包含目标故障矩阵  $F_a$  的分段故障函数  $G$  为  $G_1$ . 据此变换规则,存在  $i$  个故障分段函数  $G_i (i = 1, 2, \dots, n, n$  为故障类型数),使得式(11)可进一步改写为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + g(x) + \bar{D}\bar{d} + G_i(u, F^\times, F^+), \\ y = Cx. \end{cases} \quad (15)$$

其中:  $\bar{D} = [D \quad F_b]$ ,  $\bar{d} = [d \quad f_b]$ .

AUV执行机构的动态方程满足以下结构条件:

1) 矩阵  $C$  的行数大于  $\bar{D}$  的列数,即输出向量的维数大于未知扰动向量;

2)  $CF_a$  为列满秩,且  $\bar{D}^T \in C$ ,即  $C(\bar{D} \quad F_a) = 0$  存在有效解;

3)  $G_i$  中的故障向量相互独立,不存在耦合.

综上所述,故障隔离方案可实现观测器残差不受

系统干扰  $\bar{d}$  的影响,而仅对新构造的分段故障函数  $G_i$  敏感.

下面给出故障隔离观测器的设计.针对式(15),将分段故障函数  $G_i$  以外的其他系统变量扩张成一个新的状态变量  $x_2$ ,可得

$$\begin{cases} \dot{x}_{1,i} = x_{2,i} + G_i(u, F^\times, F^+) = g_i + G_i, \\ \dot{x}_{2,i} = \dot{g}_i = \eta_i, \\ y_i = Cx_i. \end{cases} \quad (16)$$

其中:  $g_i = x_{2,i}$  为扩张状态变量,  $\eta_i = g_i(x) - g_i(\tilde{x}) + \bar{D}_i \bar{d}_i, i = 1, 2, \dots, n$  ( $n$  为可能的故障类型数).

**定理1** 如果存在对称正定矩阵  $Q, P$ ,增益矩阵  $L$  以及矩阵  $M$ ,使得下述等式成立:

$$\begin{cases} (A - LC)^T P^T + P(A - LC) = -Q, \\ F^T P = GC, \end{cases} \quad (17)$$

则如下形式的扩张状态观测器可以保证估计误差最终有界:

$$\begin{cases} \dot{z}_{1,i} = Az_{2,i} + l_{1,i}(x_{1,i} - z_{1,i}) + G_i, \\ \dot{z}_{2,i} = l_{2,i}(x_{1,i} - z_{1,i}), \\ \hat{y}_i = Cz_i. \end{cases} \quad (18)$$

其中:  $z_{1,i}, z_{2,i}$  分别为状态量  $x_{1,i}, x_{2,i}$  的估计;  $l_{1,i}, l_{2,i}$  为观测器增益向量,且满足  $[l_{1,i} \quad l_{2,i}] = [2\omega_0 \quad \omega_0^2]$ ,  $\omega_0$  为观测器的带宽.

**证明** 定义如下形式的李雅普诺夫函数:

$$V(t) = e_i^T P e_i > 0. \quad (19)$$

观测器的误差方程可表示为

$$\dot{e}_i = (A - LC)e_i + \eta_i + G_i(u, F^\times, F^+). \quad (20)$$

定义  $\gamma$  满足  $\gamma^2 = \psi, e_{g,i} = \|g_i(x) - g_i(\tilde{x})\| \leq \psi \|x_i - \tilde{x}_i\|$ . 令  $A - LC = A_1$ , 有

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= (A_1 e_i + \eta_i + G_i)^T P e_i + e_i^T (A_1 e_i + \eta_i + G_i) = \\ &e_i^T A_1^T P e_i + e_i^T P A_1 e_i + e_i^T P \eta_i + \\ &\eta_i^T P e_i + G_i^T P e_i + e_i^T P G_i = \\ &e_i^T (A_1^T P + P A_1) e_i + (\eta_i + G_i)^T P e_i + \\ &[(\eta_i + G_i)^T P e_i]^T. \end{aligned} \quad (21)$$

令

$$y_i = (\eta_i + G_i)^T P e_i + [(\eta_i + G_i)^T P e_i]^T = S_i + S_i^T. \quad (22)$$

其中  $\|S_i\| = (\eta_i + G_i)^T \|G_i C\| \|e_i\| < 0$ , 进一步可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq \\ &e_i^T (A_1^T P + P A_1) e_i + \frac{1}{\gamma} e_i^T e_i - e_{g,i}^T e_{g,i} \leq \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} e_i \\ e_{g,i} \end{bmatrix}^T \underbrace{\begin{bmatrix} (A_1^T P + P A_1) + \frac{1}{\gamma} I & 0 \\ 0 & -I \end{bmatrix}}_{-\tilde{Q}} \begin{bmatrix} e_i \\ e_{g,i} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

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

为了抑制系统干扰对故障隔离精度的影响, 基于干扰观测器设计与优化的思路<sup>[16]</sup> 近年来被陆续应用到类似场合. 通过比较不难发现, 本文所设计的扩张状态观测器将除去目标故障以外的其他故障, 与原系统状态一起扩张为新的状态变量, 从而可以对目标故障进行更为有效的隔离.

### 2.2 故障辨识方案(第2级)

在上一级的故障隔离中, 通过多观测器的同步协作机制已经实现舵面、舵机与螺旋桨故障的初步隔离; 在下一级的故障辨识中, 需要对上述各部分的具体故障情况进行精细粒度的定位.

#### 2.2.1 舵面故障辨识

假设在第1级诊断中, 舵面的形变故障已经被成功隔离, 后续因细粒度级辨识的要求, 需进一步对形变部位进行受力分析. 如图3所示, 将执行机构中的舵面看作平面矩形ABCD, 其中  $\theta_X$  表征横舵角, 虚线表示的部分为发生形变故障的舵面, 同时将形变故障表示为三角形ABC沿直线AB向下转动一个角度(标记为形变角  $\theta_f$ ), 其在平面上产生的角度为故障平面角  $r_e$ .

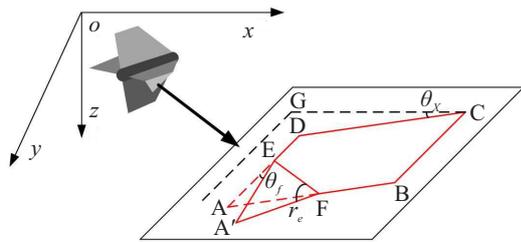


图3 舵面小角度形变及受力分析

通过执行机构故障前后的流体作用力相减, 可近似计算出形变舵面ABC受流体作用所产生的加性故障力与力矩, 即

$$\begin{cases} F_X^+ = \frac{1}{2} l^2 P \sin^2 r_e \cos \theta_f - l^2 P \cos^2 r_e, \\ F_Y^+ = \frac{1}{2} l^2 P \sin^2 r_e \sin(\theta_X + \theta_f) \sin \theta_f, \\ F_Z^+ = \frac{1}{2} l^2 P \cos^2 r_e \sin(\theta_X + \theta_f) \cos \theta_f, \\ F_M^+ = f_Z x_e, \\ F_N^+ = f_X x_e - f_Y L x_e. \end{cases} \quad (24)$$

其中:  $x_e$  为横舵面边缘距  $z$  轴的垂直距离,  $P$  为流体

压强,  $l$  为舵面形变部分的长度,  $L$  为AUV的长度. 细粒度级的舵面形变故障与执行机构故障力与力矩的正负性之间存在如表2所示的对应关系.

表2 舵面形变故障分析

舵面形变情况	$F_X^+$	$F_Z^+$	$F_M^+$	$F_N^+$
左横舵面向上形变	-	+	+	+
左横舵面向下形变	-	-	-	+
右横舵面向上形变	-	+	+	-
右横舵面向下形变	+	-	-	-
上横舵面向左形变	+	-	-	+
上横舵面向右形变	-	-	+	+
下横舵面向左形变	+	+	-	-
下横舵面向右形变	-	+	+	-

通过对4种故障力与力矩的排列组合, 可以得到8种基本的细粒度级的舵面形变故障情况. 考虑同一时刻仅有一块舵面存在故障, 结合上一级的隔离结果和表2即可实现故障舵面的定位, 进而辨识出舵面形变故障的方向.

#### 2.2.2 螺旋桨与舵机故障辨识

考虑推力与力矩公式(8)中存在两个未知数, 仅通过一个时刻的估计数据无法求解. 假设螺旋桨与舵机的故障程度变化在短时间内可忽略, 因此可以基于两段临近且参数变化的时间段  $t_1, t_2$  的量测与估计数据, 将式(8)转换为求解乘性故障描述因子的矩阵方程.

##### 1) 螺旋桨的推力

$$F_1^x(t) = \begin{bmatrix} F_{11}^x(t) \\ F_{12}^x(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T(t_1) + f_1^+(t_1) \\ T(t_2) + f_1^+(t_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_T n(t_1) |n(t_1)| & K_v n(t_1) V_a \\ K_T n(t_2) |n(t_2)| & K_v n(t_2) V_a \end{bmatrix}^{-1}. \quad (25)$$

##### 2) 舵机的推力矩

$$F_2^x(t) = \begin{bmatrix} F_{21}^x(t) \\ F_{22}^x(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M(t_1) + F_2^+(t_1) \\ M(t_2) + F_2^+(t_2) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} DK_T n(t_1) |n(t_1)| & DK_v n(t_1) V_a \\ DK_T n(t_2) |n(t_2)| & DK_v n(t_2) V_a \end{bmatrix}^{-1}. \quad (26)$$

$F_1^x(t)$  与  $F_2^x(t)$  均为对角矩阵, 可以通过判别两者主对角线上的元素信息来进一步辨识螺旋桨与舵机的故障类型, 故障向量与螺旋桨、舵机的具体故障工况对应关系如表3和表4所示.

表3 细粒度级螺旋桨故障分析

故障向量	螺旋桨故障情况
$F_1^x(t)$ 中元素等于1(定常)	表现为推力正常
$F_1^x(t)$ 中元素小于1(定常)	表现为推力减小 (成因:叶片的老化、缺失)
$F_1^x(t)$ 中元素等于0(定常)	表现为推力消失 (成因:叶片的完全损毁)
$F_1^x(t)$ 中元素介于0到1之间(时变)	表现为推力不稳定 (成因:叶片被异物卡住)

表4 细粒度级舵机故障分析

故障向量	舵机故障情况
$F_2^x(t)$ 中元素等于1(定常)	表现为力矩正常
$F_2^x(t)$ 中元素小于1(定常)	表现为力矩减小 (成因:舵角的卡死)
$F_2^x(t)$ 中元素等于0(定常)	表现为力矩消失 (成因:舵角完全闭合)
$F_2^x(t)$ 中元素介于0到1之间(时变)	表现为力矩不稳定 (成因:舵角无规则地变化)

### 3 仿真验证与分析

为验证本文所提出的多层次故障隔离与辨识方法,仿真验证部分考虑3种常见的AUV执行机构故障(故障设置如表5所示,故障时刻为100-th s):1)舵面故障(左横舵面向上形变和上横舵面向右形变故障)见图4和图5;2)螺旋桨故障(桨叶的老化、缺失、桨叶完全损毁和桨叶被异物缠阻的故障工况),见图6和图7;3)舵机故障(舵角卡死、舵角完全闭合以及舵角无规则变化的故障),见图8和图9.

表5 AUV执行机构故障设置

序号	类型(第1级)	描述(第2级)
1	舵面故障	左横舵面向上形变/ 上横舵面向右形变
2	螺旋桨故障	桨叶老化、缺失/ 桨叶完全损毁/桨叶异物缠阻
3	舵机故障	舵角卡死/舵角完全闭合/ 舵角无规则变化

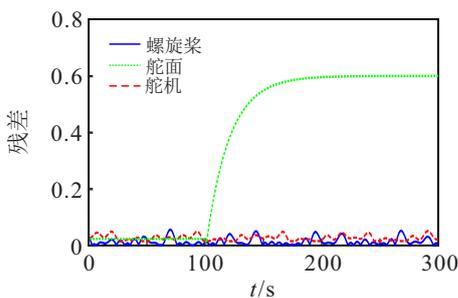


图4 舵面故障隔离(第1级)

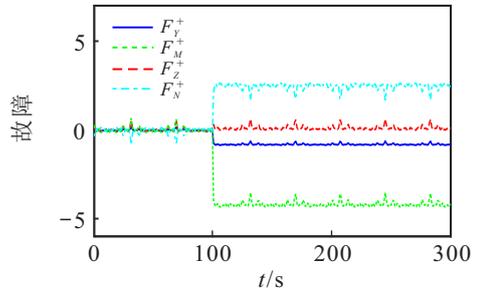
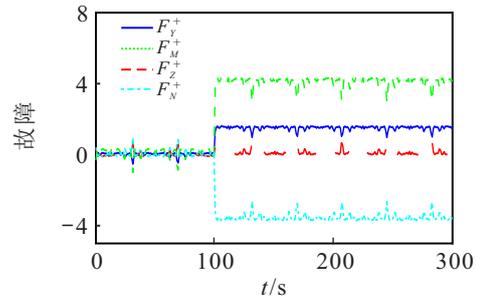


图5 舵面故障辨识(第2级)

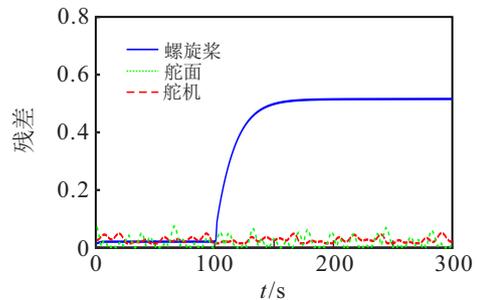


图6 螺旋桨故障隔离(第1级)

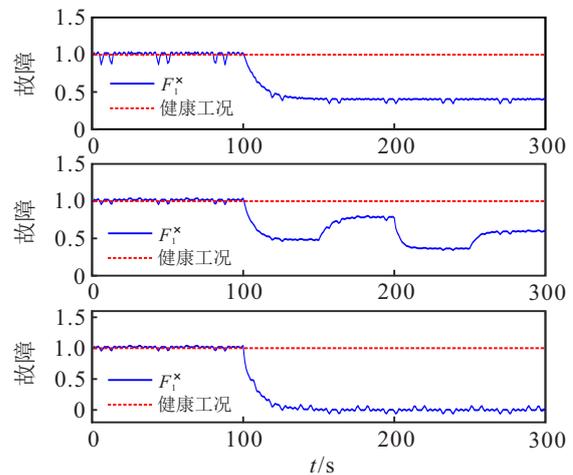


图7 螺旋桨故障辨识(第2级)

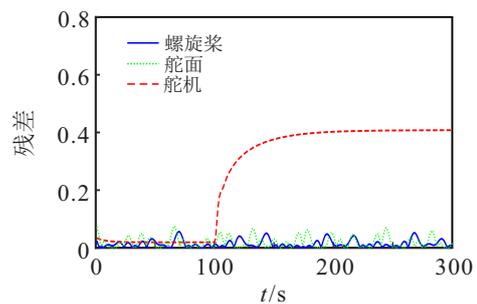


图8 舵机故障隔离(第1级)

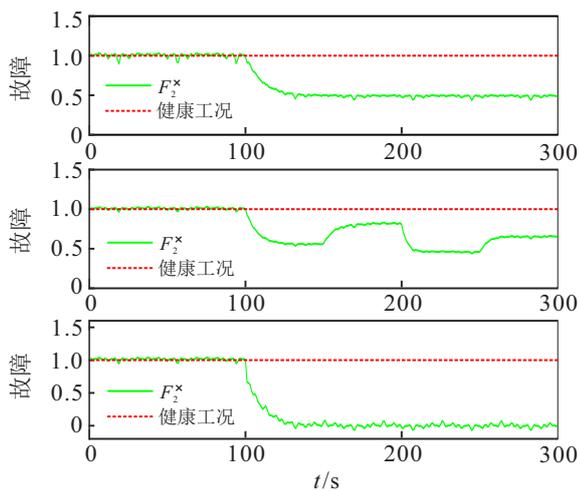


图9 舵机故障辨识(第2级)

因篇幅限制,以螺旋桨发生故障为例,图10所示为该执行机构发生故障前后AUV运动姿态的变化。显然,AUV运载器在该类型执行器故障工况下,无法实现预定的循迹任务和姿态保持。但是从系统层面来看,AUV运载器速度、位移和姿态角度的变化,给执行机构的故障隔离与辨识带来了可能。图4、图6及图8所示为AUV运载器舵面、螺旋桨与舵机的第1级故障隔离结果。不难发现,基于本文隔离方案所设计的观测器仅对某一种粗粒度级的执行机构故障敏感,多观测器的同步协作可以有效实现第1级的隔离,完成故障的初步分类。

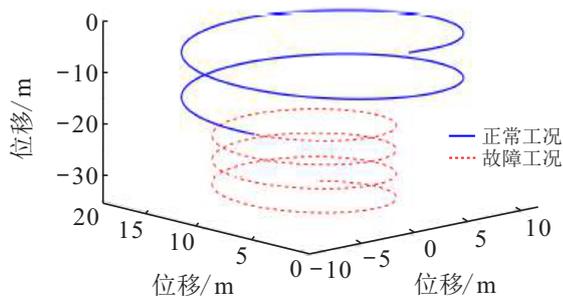


图10 螺旋桨故障前后AUV运动姿态的变化

图5、图7与图9所示分别为针对舵面故障、螺旋桨与舵机故障的第2级细粒度故障辨识结果,旨在第1级故障初分类的基础上,进一步获得故障的定位信息。根据图5所示的辨识结果,舵面的故障类型分别为左横舵面向上形变与上横舵面向右形变,与所设置的故障类型吻合,从而验证了舵面形变故障辨识设计机制的有效性。类似的,图7与图9中故障描述因子的变化也精确表征了螺旋桨与舵机的细粒度级故障类型,并且辨识精度良好。

## 4 结论

本文提出了一种基于故障描述因子与多观测器

同步协作的AUV执行机构故障隔离与辨识方法。通过故障描述因子的引入和分层故障诊断机制的建立,提升了AUV运载器执行机构故障隔离与辨识过程中的逻辑性和准确度。仿真表明,本文所设计的故障隔离和辨识机制可以有效地对AUV运载器包括舵面、螺旋桨与舵机在内的执行机构粗粒度级故障进行隔离;同时可以实现包括舵面小角度形变、桨叶缺失/损毁/异物缠阻与舵机卡死/舵角完全闭合等在内的细粒度级执行机构的故障二次辨识。

## 参考文献(References)

- [1] 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: 1-20. (Zhu D Q, Hu Z. Fault diagnosis and fault-tolerant control technology of underwater vehicle[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 1-20.)
- [2] Alexander Z, Alexey Z, Vladimir F. Fault identification in underwater vehicle thrusters via sliding mode observers[J]. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 2020, 30(4): 679-688.
- [3] Wang X H. Active fault tolerant control for unmanned underwater vehicle with actuator fault and guaranteed transient performance[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2021, 6(3): 470-479.
- [4] Nejati Z, Faraji A, Abedi M. Robust three stage central difference Kalman filter for helicopter unmanned aerial vehicle actuators fault estimation[J]. International Journal of Engineering, 2021, 34(5): 1290-1296.
- [5] Zhu D Q, Sun B. Information fusion fault diagnosis method for unmanned underwater vehicle thrusters[J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2013, 3(4): 102-111.
- [6] Chen X Q, Sun R, Wang F, et al. Two-stage unscented Kalman filter algorithm for fault estimation in spacecraft attitude control system[J]. IET Control Theory & Applications, 2018, 12(13): 1781-1791.
- [7] Chatterjee S, Sadhu S, Ghoshal T K. Fault detection and identification of non-linear hybrid system using self-switched sigma point filter bank[J]. IET Control Theory & Applications, 2015, 9(7): 1093-1102.
- [8] Liu F Q, Long Y, Luo J, et al. Active fault localization of actuators on torpedo-shaped autonomous underwater vehicles[J]. Sensors, 2021, 21(2): 476.
- [9] Yu D C, Zhu C G, Zhang M J, et al. Experimental study on multi-domain fault features of AUV with weak thruster fault[J]. Machines, 2022, 10(4): 236-252.
- [10] Liu W X, Wang Y J, Yin B J, et al. Thruster fault identification based on fractal feature and multiresolution

- wavelet decomposition for autonomous underwater vehicle[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers—Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2017, 231(13): 2528-2539.
- [11] 任浩, 屈剑锋, 柴毅, 等. 深度学习在故障诊断领域中的研究现状与挑战[J]. 控制与决策, 2017, 32(8): 1345-1358.  
(Ren H, Qu J F, Chai Y, et al. Deep learning for fault diagnosis: The state of the art and challenge[J]. Control and Decision, 2017, 32(8): 1345-1358.)
- [12] Dalla Vedova M D L, Germanà A, Berri P C, et al. Model-based fault detection and identification for prognostics of electromechanical actuators using genetic algorithms[J]. Aerospace, 2019, 6(9): 94.
- [13] Zhang M J, Yin B J, Liu X, et al. Thruster fault identification method for autonomous underwater vehicle using peak region energy and least square grey relational grade[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(12): 1-11.
- [14] Mi B B, Xia J H, Bradford J H, et al. Estimating near-surface shear-wave-velocity structures via multichannel analysis of Rayleigh and love waves: An experiment at the Boise hydrogeophysical research site[J]. Surveys in Geophysics, 2020, 41(2): 323-341.
- [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] 李繁飙, 黄培铭, 阳春华, 等. 基于非线性干扰观测器的飞机全电刹车系统滑模控制设计[J]. 自动化学报, 2021, 47(11): 2557-2569.  
(Li F B, Huang P M, Yang C H, et al. Sliding mode control design of aircraft electric brake system based on nonlinear disturbance observer[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(11): 2557-2569.)

### 作者简介

吴云凯(1989—), 男, 副教授, 博士, 从事控制系统早期故障诊断、预测技术等研究, E-mail: wuyunkaischolar@just.edu.cn;

胡大海(1999—), 男, 硕士生, 从事自主式水下机器人故障诊断技术的研究, E-mail: hu1350118711@163.com;

付俊(1979—), 男, 教授, 博士, 从事动态优化、切换系统等研究, E-mail: junfu@mail.neu.edu.cn;

周扬(1989—), 女, 实验师, 博士生, 从事故障诊断、容错控制技术等研究, E-mail: zhouy\_just@163.com.