

DOI: 10.7641/CTA.2014.31309

水下航行器执行机构的故障诊断与容错控制

刘富樯[†], 徐德民, 高 剑, 张立川

(西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 为了解决水下航行器执行机构的故障, 提出低依赖性和高普适性的故障诊断与容错控制算法. 故障诊断由检测、隔离和辨识3个阶段组成. 首先, 定义比例式、偏差式和常量式3种故障类型, 设计相应故障观测器, 在满足指数收敛性的前提下检测出故障. 其次, 基于故障估计与其微分的指数收敛性, 建立故障函数, 以方差最小为条件隔离出实际故障; 然后, 联立控制输入方程和故障估计, 辨识出故障执行机构. 在故障诊断和反馈控制的基础上, 通过修正期望控制输入, 实现满足闭环稳定性的容错控制. 经水下航行器回坞仿真实验验证, 所提故障诊断和容错控制算法可行且有效.

关键词: 水下航行器; 故障诊断; 容错; 观测器; 回坞

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Fault diagnosis and fault tolerant control for actuators of underwater vehicles

LIU Fu-qiang[†], XU De-min, GAO Jian, ZHANG Li-chuan

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710072, China)

Abstract: In dealing with the fault problems occurred on the actuators of underwater vehicles, we propose the fault diagnosis and the fault tolerant control algorithms with low dependence and high universality. The fault diagnosis algorithm comprises the stages of detection, isolation and identification. Three types of actuator faults, namely, the proportional, the deviated and the constant faults are defined, for which the corresponding observers are designed such that the fault estimates can be detected by satisfying the exponential convergence requirement. To isolate the actual fault among the three estimates, fault functions are generated based on the exponentially converged fault estimates and the corresponding derivatives, of which the deduced data with the lowest variance are used for isolation. The actual fault actuator is successfully identified by combining the control input equation with the isolated fault estimate. Based on the fault diagnosis result and the feedback control design, the fault tolerant control (FTC) which satisfies the stabilization requirement is realized by modifying the desired control input directly. Through an underwater vehicle docking simulation, the feasibility and effectiveness of the addressed algorithms are validated.

Key words: underwater vehicle; fault diagnosis; fault tolerance; observer; docking

1 引言(Introduction)

水下航行器如今已被较为广泛地应用于科学、军事和商业等领域, 如水下设施维护、海洋科学考察、水下搜救和海洋战争等. 然而, 由于水下环境复杂多变和水中通讯受限等原因, 造成水下航行器在执行任务的过程中容易发生各种故障, 如传感器失灵、推进器损坏和鳍舵变形等, 严重阻碍了水下航行器的应用与推广. 据此引入故障诊断和容错控制技术, 当航行器发生故障时, 及时诊断出故障信息并且采取有效的控制措施, 以尽最大可能降低故障带来的危害^[1-6].

近30年来, 关于水下航行器故障诊断与容错控制问题的研究已经较为深入地展开. 目前, 水下航行器故障诊断最为通用的方法是将估计残差与故障阈值

进行比较, 以判断系统的故障情况^[7-8]. 此外, 部分研究通过比较各观测信号的故障概率, 诊断出最大可能发生故障的信号; 以及建立故障词典, 通过匹配观测信号与词典数据诊断出故障信号^[9-10]. 现有文献通常采用观测器、滑模运动、神经网络和虚拟传感器等方法, 提取并处理相关传感器数据以供故障诊断所需, 其对传感器的依赖性较高. 少有基于航行器动力学模型和控制输入关系来诊断航行器执行机构故障的研究, 而后者仅依赖于航行器的状态观测, 可有效降低故障诊断对专用传感器的依赖性.

基于诊断过程提供的航行器故障信息, 主动式容错控制便可采取有效的容错策略达到降低故障危害的效果. 目前, 关于水下航行器容错控制的研究较多

收稿日期: 2013-12-11; 录用日期: 2014-05-31.

[†]通信作者. E-mail: fuqiangliu@yeah.net; Tel.: +86 13720453681.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51279164, 51109179).

从航行器的动力学模型出发,通过设计控制矩阵的参数,达到容错控制的目的^[11-13].此外,部分研究基于某种控制方法,如滑模控制,设计控制输入达到容错控制的目的^[3,14];以及根据故障情况选择合适控制器的方式实现容错控制^[15].各种容错方案均涉及更改控制方法本身以调节控制输入,从而达到容错控制的目的,少有研究采用直接更改控制输入的方式实现容错控制,而后者在保证系统稳健性的前提下,既避免了对控制方法的更改,更提高了容错控制应用的普适性.

基于以上分析,本文从水下航行器执行机构的故障问题着手,解决其诊断与容错控制问题.首先,将执行机构可能发生的故障分为比例式、偏差式和常量式3类^[16],并将其以故障输入的形式表现在水下航行器的动力学系统中;其次,为各种故障模式设计相应的观测器,在满足估计收敛性的前提下,检测出故障数据,并采用故障隔离和辨识算法,达到隔离和辨识执行机构故障的目的;然后,根据故障诊断提供的故障输入信息,在满足闭环控制稳定性的前提下,合理改变控制输入,实现容错控制;最后,通过水下航行器的回坞仿真实验,验证了本文故障诊断与容错控制算法的可行性和有效性.相比其他故障诊断方法,本文所提方法更侧重于挖掘系统状态所携带的故障信息,故而降低了对专用传感器等硬件的依赖;同时,本文所提容错控制算法从控制输入着手,设计和实现相对简单,应用普适性较高.

本文后续内容安排如下:第2部分研究水下航行器执行机构的故障诊断问题,包括故障检测、故障隔离和故障辨识3个阶段;第3部分给出容错控制算法,并证明其稳定性;第4部分通过航行器的回坞仿真实验进行可行性和有效性验证;第5部分进行全文总结.

2 故障诊断(Fault diagnosis)

如前所述,故障诊断由3个阶段组成:通过配置观测器实现故障检测^[17];构建故障函数,拟合估计数据和统计分析实现故障隔离;联立控制输入方程求解,实现故障辨识.

2.1 故障检测(Fault detection)

水下航行器在执行任务的过程中可能发生推进器损坏和鳍舵卡死等故障.如果执行机构因故障而产生的实际作用与期望作用成一定比例,或者实际作用是在期望作用以外增加或者减少了一定作用,甚或执行机构不受控制,那么执行机构发生了如下定义故障:

定义1 假设在 t 时刻,某执行机构存在故障,其期望作用为 $T_d \in \mathbb{R}$.如果执行机构产生的实际作用为 $f_p T_d$,其中 $f_p \in \mathbb{R}$ 且 $f_p \neq 1$,那么定义执行机构发生了比例式故障,称 f_p 为比例故障因子;如果执行机构产生的实际作用为 $T_d + f_a$,其中 $f_a \in \mathbb{R}$ 且 $f_a \neq 0$,那么定义执行机构发生了偏差式故障,称 f_a 为偏差故

障因子;如果执行机构产生的实际作用为 f_c ,且 f_c 与 T_d 不相关,那么定义执行机构发生了常量式故障,称 f_c 为常量故障因子.

注1 当 $T_d \in \mathbb{R}^m$,即 T_d 表示执行机构产生的多个作用时,对应3种故障情况分别有:1) $f_p \in \mathbb{R}^{m \times m}$ 为对角阵;2) $f_a \in \mathbb{R}^m$;3) $f_c \in \mathbb{R}^m$.

考虑水下航行器动力学模型^[18]

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) = \tau, \quad (1)$$

其中: M 为惯性矩阵; $C(\nu)$ 为科里奥利和向心力矩阵; $D(\nu)$ 为阻尼矩阵; $g(\eta)$ 为重浮力向量; $\tau = (\tau_1, \dots, \tau_6)^T$ 是控制输入向量; $\nu = (u, v, w, p, q, r)^T$ 是速度向量,包含体坐标系的3个线速度量和3个角速度量; $\eta = (x, y, z, \phi, \theta, \psi)^T$ 为位置和姿态向量,包含地面坐标系的3个位置坐标和3个姿态角.

若执行机构发生故障,由定义1可知,故障输入 τ_i ($i = 1, \dots, 6$)实为 $f_p \tau_{d,i}$, $\tau_{d,i} + f_a$ 或者 f_c ,其中 $\tau_d = \{\tau_{d,i}\}$ 是期望控制输入.如果诊断出故障执行机构及其故障因子,那么可采取有效的容错控制措施,遏制故障对航行器的进一步危害.下文通过建立故障观测器,估计 τ 中的故障因子,实现系统的故障检测.由于故障情况复杂多变,可能线性或非线性,不失一般性,作如下假设:

假设1 在故障检测的一较小时间间隔 t_p 内,期望作用 τ_d 的变化忽略不记,即 $\dot{\tau}_d = 0$;同时,故障的变化可以忽略,即 $\dot{f}_p = 0$, $\dot{f}_a = 0$ 和 $\dot{f}_c = 0$;航行器的重浮心重合,且航行器关于水平面和纵平面对称,即 M 是正定对角阵.

基于以上分析,设3类故障因子的估计值分别为 \hat{f}_p , \hat{f}_a 和 \hat{f}_c ,其中关于 \hat{f}_p 的观测有如下定理:

定理1 若执行机构只发生了比例式故障,那么比例故障因子 f_p 的估计值 \hat{f}_p 可通过

$$\hat{f}_p = x_p - R_p(\nu) \quad (2)$$

求解,其中向量 x_p 与 $R_p(\nu)$ 分别满足如下关系:

$$\dot{x}_p = L_p M^{-1} T_d x_p - L_p M^{-1} (T_d R_p(\nu) + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta)), \quad (3)$$

$$R_p(\nu) = -K_p M^{-1} T_d \nu, \quad (4)$$

式中: $L_p = \frac{\partial R_p(\nu)}{\partial \nu^T}$; $T_d = \text{diag}\{\tau_d\}$,表示将 τ_d 转换为对角矩阵; K_p 为正定对角阵.

定理证明如下:

证 由于执行机构仅发生比例式故障,故定义比例故障因子的估计误差 $e_p = f_p - \hat{f}_p$,其中 $f_p \in \mathbb{R}^6$,且 $\hat{f}_p \in \mathbb{R}^6$.基于假设1,式(1)与

$$\dot{\nu} = -M^{-1}(C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta)) + M^{-1}T_d f_p \quad (5)$$

等价. 设计观测器

$$\dot{\hat{f}}_p = L_p M^{-1} T_d \hat{f}_p - L_p [M^{-1} (C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta)) + \dot{\nu}], \quad (6)$$

其中 L_p 是待定对角阵. 上式包含未知速度微分量 $\dot{\nu}$, 进一步设计观测状态

$$x_p = \hat{f}_p + R_p(\nu), \quad (7)$$

其中 $\frac{\partial R_p(\nu)}{\partial \nu^T} = L_p$. 式(7)对时间 t 求导, 可得 x_p 的状态微分方程

$$\begin{aligned} \dot{x}_p &= \dot{\hat{f}}_p + \dot{R}_p(\nu) = \\ &L_p M^{-1} T_d \hat{f}_p - L_p [M^{-1} (C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta)) + \dot{\nu}] + \frac{\partial R_p(\nu)}{\partial \nu^T} \dot{\nu} = \\ &L_p M^{-1} T_d x_p - L_p M^{-1} (T_d R_p(\nu) + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta)). \end{aligned} \quad (8)$$

又估计误差 e_p 对 t 的导数

$$\begin{aligned} \dot{e}_p &= \dot{f}_p - \dot{\hat{f}}_p = \dot{R}_p(\nu) - \dot{x}_p = \\ &\frac{\partial R_p(\nu)}{\partial \nu^T} \dot{\nu} - L_p M^{-1} (T_d x_p - T_d R_p(\nu) - C(\nu)\nu - D(\nu)\nu - g(\eta)) = \\ &L_p M^{-1} T_d e_p. \end{aligned} \quad (9)$$

由于 M 和 T_d 都是对角矩阵, 且 $M > 0$, 如果设计

$$L_p = -K_p M^{-1} T_d, \quad (10)$$

其中 K_p 是正定对角阵, 那么 $L_p M^{-1} T_d < 0$, 可得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_p = 0, \quad (11)$$

即估计误差 e_p 以指数形式收敛到0, 表明 \hat{f}_p 能够很好地估计 f_p , 并且 $\hat{f}_p = x_p - R_p(\nu)$.

另外, 据式(10)和 $\frac{\partial R_p(\nu)}{\partial \nu^T} = L_p$, 可设计

$$R_p(\nu) = -K_p M^{-1} T_d \nu.$$

证毕.

同理, 关于估计值 \hat{f}_a 和 \hat{f}_c 的观测存在如下定理:

定理 2 若执行机构只发生了偏差式故障, 那么故障因子 f_a 的估计值 \hat{f}_a 可通过

$$\hat{f}_a = x_a - R_a(\nu) \quad (12)$$

求解, 其中向量 x_a 与 $R_a(\nu)$ 分别满足如下关系:

$$\begin{aligned} \dot{x}_a &= L_a M^{-1} x_a - L_a M^{-1} (R_a(\nu) + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) - \tau_d), \end{aligned} \quad (13)$$

$$R_a(\nu) = -K_a M^{-1} \nu, \quad (14)$$

式中: $L_a = \frac{\partial R_a(\nu)}{\partial \nu^T}$; K_a 为正定对角阵.

定理 3 若执行机构只发生了常量式故障, 那么

故障因子 f_c 的估计值 \hat{f}_c 可通过

$$\hat{f}_c = x_c - R_c(\nu) \quad (15)$$

求解, 其中向量 x_c 与 $R_c(\nu)$ 分别满足如下关系:

$$\begin{aligned} \dot{x}_c &= L_c M^{-1} x_c - L_c M^{-1} (R_c(\nu) + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta)), \end{aligned} \quad (16)$$

$$R_c(\nu) = -K_c M^{-1} \nu, \quad (17)$$

式中: $L_c = \frac{\partial R_c(\nu)}{\partial \nu^T}$; K_c 为正定对角阵.

2.2 故障隔离(Fault isolation)

采用定理1-3的观测器能够有效估计出相应类型的故障因子, 如果故障类型与采用的观测器不对应, 那么估计结果将不能收敛到实际值. 比如, 采用定理1的观测器估计非比例式故障, 那么经式(9)解算出的估计误差 e_p 不能收敛到0, 即估计无效. 由于同一时间段内, 收敛估计的方差最小, 故可采用3类观测器对故障同时进行观测, 其中, 估计值方差最小的观测器与故障类型对应, 据此隔离出实际故障. 然而在故障发生初期, 估计误差较大, 方差分析不能有效隔离实际故障, 故采用如下分析.

对于比例式故障, 将式(9)对时间 t 进行积分可得

$$e_p = C e^{\int L_p M^{-1} T_d dt}, \quad (18)$$

其中: C 是常量, e 是自然底数. 由估计误差的定义知

$$\hat{f}_p = f_p - e_p = f_p - C e^{\int L_p M^{-1} T_d dt}, \quad (19)$$

$$\dot{\hat{f}}_p = \dot{f}_p - \dot{e}_p = -L_p M^{-1} T_d C e^{\int L_p M^{-1} T_d dt}, \quad (20)$$

表明 \hat{f}_p 和 $\dot{\hat{f}}_p$ 均将以指数形式收敛. 另外, 根据误差定义以及式(9)有

$$f_p = \hat{f}_p + e_p = \hat{f}_p - (L_p M^{-1} T_d)^{-1} \dot{\hat{f}}_p. \quad (21)$$

分析式(19)-(21)可知, 当获得收敛估计结果 \hat{f}_p 和 $\dot{\hat{f}}_p$ 时, 可计算出实际的比例故障因子 f_p .

由于可通过观测器获得 \hat{f}_p , 却无法直接获得 $\dot{\hat{f}}_p$, 故采用最小二乘法拟合一段时间内相邻 \hat{f}_p 随时间变化的函数 $\hat{f}_p(t)$, 然后对时间 t 求导可得 $\dot{\hat{f}}_p(t)$. 取该时间段内任一时刻 t_0 的数据 $\hat{f}_p(t_0)$ 和 $\dot{\hat{f}}_p(t_0)$, 通过式(21)求得 f_p 的估计

$$\bar{f}_p = \hat{f}_p(t_0) - (L_p M^{-1} T_d)^{-1} \dot{\hat{f}}_p(t_0). \quad (22)$$

由于拟合过程存在误差, 故 \bar{f}_p 与 f_p 之间存在一定的拟合偏差.

对于偏差式和常量式故障, 通过类似的最小二乘拟合过程, 求解出估计函数及其导数, 再分别通过

$$\bar{f}_a = \hat{f}_a(t_0) - (L_a M^{-1})^{-1} \dot{\hat{f}}_a(t_0), \quad (23)$$

$$\bar{f}_c = \hat{f}_c(t_0) - (L_c M^{-1})^{-1} \dot{\hat{f}}_c(t_0) \quad (24)$$

求得偏差故障因子估计 \bar{f}_a 和常量故障因子估计 \bar{f}_c .

采用 \bar{f}_p, \bar{f}_a 和 \bar{f}_c 分别替代 \hat{f}_p, \hat{f}_a 和 \hat{f}_c 进行分析,可弥补最小方差故障隔离算法在故障诊断前期无法使用的不足,有助于高效准确地隔离出实际故障.

注2 如果 τ_d 的某元素为0,表示对应维度上无期望输入,此时发生的故障不存在比例式,故该种情况下不考虑比例式故障的诊断.

2.3 故障辨识(Fault identification)

通过故障隔离确定故障类型后,仍需进一步的故障辨识,以确定故障执行机构的准确部位及故障严重程度.执行机构对水下航行器的作用满足如下控制输入关系:

$$\tau = Bu, \quad (25)$$

其中: $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 是由执行机构配置决定的控制矩阵; $u \in \mathbb{R}^m$ 是执行机构的控制输入.当执行机构无故障发生时, $u = u_d$,其中 u_d 为执行机构的期望控制输入;如若执行机构存在故障,那么 $u \neq u_d$,通过分析 u 与 u_d 的差异便可得知详细的故障情况.由于已经获知 τ 中的故障信息,如果能够解出实际的 u ,那么再与期望输入 u_d 比较便可辨识出故障执行机构.由文献[4]可知,式(25)经拉格朗日乘数法可转变为

$$u = B^\dagger \tau, \quad (26)$$

其中 B^\dagger 是 B 的广义逆.当 B 为满秩方阵时,通过隔离的 τ 可直接求得对应的 u ,进而确定故障执行机构;否则由于广义逆 B^\dagger 不唯一,使得实际的 u 不能被确定,故需要通过其他途径进行故障辨识.

目前,水下航行器按执行机构的不同配置情况可大致分为3类:执行机构由固定方位推进器及鳍舵构成的欠驱动水下航行器、执行机构仅由固定方位推进器构成的全驱动或欠驱动水下航行器以及含有矢量推进器的全驱动或欠驱动水下航行器.不同执行机构的配置使得彼此的控制矩阵 B 有较大差异,下文将分析这三类航行器执行机构的故障辨识问题.

1) 执行机构由固定方位推进器及鳍舵构成的欠驱动水下航行器.该类航行器的控制输入 u 包括前向推力 X 、水平舵角 δ_e 和垂直舵角 δ_r ,如果考虑 δ_r 由垂直上下舵角 δ_{ru} 和 δ_{rd} 构成,即 $\delta_r = (\delta_{ru} + \delta_{rd})/2$,那么对应该类航行器的式(25)可描述为

$$\tau = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_Y^{\delta_r} & c_Y^{\delta_r} \\ 0 & c_Z^{\delta_e} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_X^{\delta_{ru}} & m_X^{\delta_{rd}} \\ 0 & m_Y^{\delta_e} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_Z^{\delta_r} & m_Z^{\delta_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ \delta_e \\ \delta_{ru} \\ \delta_{rd} \end{bmatrix}, \quad (27)$$

其中: $c_Y^{\delta_r}, c_Z^{\delta_e}, m_X^{\delta_{ru}}, m_X^{\delta_{rd}}, m_Y^{\delta_e}$ 和 $m_Z^{\delta_r}$ 等标量是由航行器

硬件配置决定的流体动力参数,其定义可参见文献[19].联立上式各方程求解,即可获得执行机构的实际输入 $u = [X \ \delta_e \ \delta_{ru} \ \delta_{rd}]^T$,然后基于已经隔离的故障类型,同各执行机构的期望输入进行比较,便可辨识出故障执行机构的部位以及故障严重程度.对应3类故障模式,执行机构的故障严重程度可分别通过 $\bar{f}_{p,i} = \frac{u_i}{u_{d,i}}$, $\bar{f}_{a,i} = u_i - u_{d,i}$ 和 $\bar{f}_{c,i} = u_i$ 获得,其中 $i(i=1, \dots, m)$ 为执行机构编号.

2) 执行机构仅由固定方位推进器构成的全驱动或欠驱动水下航行器.该类航行器一般在水平面和竖直方向上配置多个固定方位推进器,如图1,其中推进器 $i(i=1, \dots, k)$ 和 $j(j=1, \dots, m-k)$ 分别为水平面和竖直方向推进器.

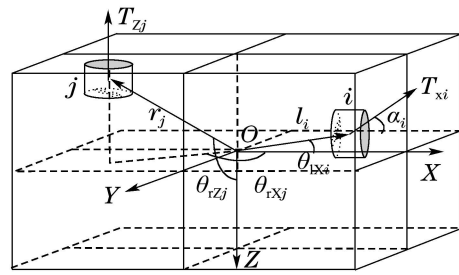


图1 固定方位推进器位置图解

Fig. 1 Illustration for the fixed thruster position

该类航行器的控制矩阵 B 和控制输入 u 可描述为

$$B = \begin{bmatrix} c_1 & \dots & c_i & \dots & c_n & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ s_1 & \dots & s_i & \dots & s_n & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & r_{Y1} & \dots & r_{Yj} & \dots & r_{Ym} \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & r_{X1} & \dots & r_{Xj} & \dots & r_{Xm} \\ l_{X1} & \dots & l_{Xi} & \dots & l_{Xn} & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix},$$

$$u = [T_X \ T_Z]^T,$$

其中:

$$c_i = \cos \alpha_i, \quad s_i = \sin \alpha_i,$$

$$r_{Xj} = r_j \sin \theta_{rzj} \cos \theta_{rxj},$$

$$r_{Yj} = r_j \sin \theta_{rzj} \sin \theta_{rxj},$$

$$l_{Xi} = l_i \sin(\alpha_i - \theta_{lxi}),$$

$$T_X = [T_{X1} \ \dots \ T_{Xi} \ \dots \ T_{Xn}],$$

$$T_Z = [T_{Z1} \ \dots \ T_{Zj} \ \dots \ T_{Zm}],$$

α_i 为水平面推进器 i 的推力方向与 X 轴之间的夹角, l_i 是推进器 i 与原点 O 的距离,定义 \vec{l}_i 为推进器 i 的位置矢量,那么 θ_{lxi} 是 \vec{l}_i 与 X 轴之间的夹角; r_j 是竖直方向推进器 j 与原点 O 的距离,定义 \vec{r}_j 为推进器 j 的位置矢量,那么 θ_{rxj} 和 θ_{rzj} 分别是 \vec{r}_j 在水平面的投影与 X 轴间

的夹角和 \vec{r}_j 与 Z 轴间的夹角; u 由水平面推力 T_X 与竖直方向推力 T_Z 组成.

由于水平面和竖直方向各拥有3个独立的方程,故仅当 $k \leq 3$ 时,联立水平面的3个方程能够求解出水面推进器的推力输入,再采用第1)类航行器中比较和求取故障严重程度的方法,可辨识出水平面推进器的故障部位和故障严重程度;否则由于水平面方程组无唯一解,无法辨识出水平面推进器的故障;同理,仅当 $m - k \leq 3$ 时,竖直方向推进器的故障部位和故障严重程度能够被辨识出来.

3) 含有矢量推进器的全驱动或欠驱动水下航行器. 矢量推进器的控制输入包括推力 T_i 、推力矢量在水平面投影与 X 轴的夹角 θ_{exi} 和推力矢量与 Z 轴的夹角 θ_{ezi} ,其中 $i(i = 1, \dots, m)$ 表示矢量推进器编号,如图2所示. 当矢量推进器只有一个方位角(θ_{exi} 或 θ_{ezi})可控时,包括推力在内可控输入维数为2,当两个方位角均可控时,可控输入维数为3.

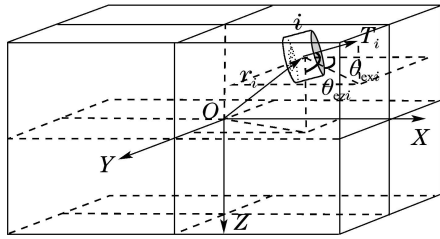


图2 矢量推进器位置图解

Fig. 2 Illustration for the azimuth thruster position

该类航行器的控制矩阵 B 和推力输入 u 可描述为

$$B = \begin{bmatrix} e_{X1} & \cdots & e_{Xi} & \cdots & e_{Xn} \\ e_{Y1} & \cdots & e_{Yi} & \cdots & e_{Yn} \\ e_{Z1} & \cdots & e_{Zi} & \cdots & e_{Zn} \\ (\vec{r}_1 \times \vec{e}_1)_X & \cdots & (\vec{r}_i \times \vec{e}_i)_X & \cdots & (\vec{r}_n \times \vec{e}_n)_X \\ (\vec{r}_1 \times \vec{e}_1)_Y & \cdots & (\vec{r}_i \times \vec{e}_i)_Y & \cdots & (\vec{r}_n \times \vec{e}_n)_Y \\ (\vec{r}_1 \times \vec{e}_1)_Z & \cdots & (\vec{r}_i \times \vec{e}_i)_Z & \cdots & (\vec{r}_n \times \vec{e}_n)_Z \end{bmatrix},$$

$$u = [T_1 \ \cdots \ T_i \ \cdots \ T_n]^T,$$

其中:

$$e_{Xi} = \sin \theta_{ezi} \cos \theta_{exi}, \quad e_{Yi} = \sin \theta_{ezi} \sin \theta_{exi},$$

$$e_{Zi} = \cos \theta_{ezi}, \quad \vec{e}_i = (e_{Xi}, e_{Yi}, e_{Zi}),$$

\vec{r}_i 表示推进器 i 的位置矢量, $(*)_X$, $(*)_Y$ 和 $(*)_Z$ 分别表示向量 $*$ 在坐标轴 X , Y 和 Z 上的分量.

由于式(25)共包含6个方程,故仅当控制输入维数不多于6,即航行器由固定式推进器(可控输入维数为1)、一个方位角可控的矢量推进器和两个方位角可控的矢量推进器所组成的可控输入维数总和不超过6,方程组有唯一解. 在解出实际控制输入的基础上,采

用第1)类航行器中比较和求取故障严重程度的方法,可辨识出推进器的故障部位和故障严重程度.

3 容错控制(Fault tolerant control)

在航行器执行任务的过程中,通常可基于运动状态、输出或者其他信息,设计反馈控制,然后通过执行机构作用于航行器,以达到控制的目的. 当执行机构有故障发生时,如果故障没有得到及时处理,那么故障执行机构的持续作用可能导致反馈控制受到严重影响,甚至控制失效. 为了及时有效地遏制故障带来的影响,下文给出具有较高普适性的容错控制方案.

3.1 容错算法(Fault tolerant algorithm)

本文研究的对象是水下航行器的执行机构,由于其故障直接反映在系统输入中,故容错控制只需屏蔽掉输入数据中的故障信息即可,即在执行机构的期望输入中添加与故障信息相反的作用,如图3所示.

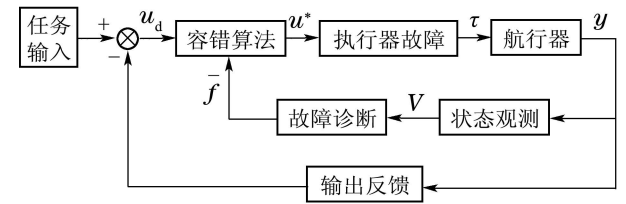


图3 容错控制图解

Fig. 3 Fault tolerant control illustration

当诊断出执行机构 i 的故障时,针对故障类型和期望输入 $u_{d,i}$ 可采取如下容错控制方案:

- 1) 对于严重程度为 $\bar{f}_{p,i}$ 的比例式故障,容错输入修改为 $u_{p,i}^* = u_{d,i} / \bar{f}_{p,i}$;
- 2) 对于严重程度为 $\bar{f}_{a,i}$ 的偏差式故障,容错输入修改为 $u_{a,i}^* = u_{d,i} - \bar{f}_{a,i}$;
- 3) 对于严重程度为 $\bar{f}_{c,i}$ 的常量式故障,执行机构不可控,停止使用该机构,其任务由冗余机构执行.

采用 u_i^* 统一表示 $u_{p,i}^*$ 和 $u_{a,i}^*$,并记控制输入的有效区间为 $[u_{\min,i}, u_{\max,i}]$. 如果 $u_i^* \in [u_{\min,i}, u_{\max,i}]$,直接将 u_i^* 应用于执行机构;如果 $u_i^* < u_{\min,i}$ 或者 $u_i^* > u_{\max,i}$,那么将 $u_{\min,i}$ 与 $u_{\max,i}$ 分别应用于相应执行机构,同时采用冗余机构分别实现 $u_i^* - u_{\min,i}$ 与 $u_i^* - u_{\max,i}$ 的作用.

3.2 稳定性分析(Stabilization analysis)

对于由式(1)和(25)所描述的水下航行器动力学系统,设计Lyapunov函数

$$V = \nu^T P \nu, \quad (28)$$

其中 $P > 0$. 由于本文所提容错控制算法以反馈控制为前提^[20],那么执行机构无故障发生时,必然存在一标量 $\gamma > 0$,使得系统在反馈控制作用下满足系统稳定性要求 $\dot{V} \leq -\gamma \nu^T \nu < 0$.

假设有执行机构发生了比例式、偏差式或者常量

式故障,如果系统不具备容错的功能,那么在实际输入 u 的作用下, Lyapunov函数的微分

$$\begin{aligned} \dot{V}_f &= \dot{\nu}^T P \nu + \nu^T P \dot{\nu} = \\ &[-M^{-1}(C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta)) + M^{-1}Bu]^T P \nu + \\ &\nu^T P[-M^{-1}(C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta)) + M^{-1}Bu] = \\ &\dot{V} + 2\nu^T P M^{-1} B(u - u_d). \end{aligned}$$

由于故障情况下无法保证 $2\nu^T P M^{-1} B(u - u_d) \leq 0$, 那么可能出现 $\dot{V}_f > 0$, 即系统不稳定.

当为系统添加图3所示的容错模块后, 如果执行机构 i 发生比例式、偏差式或者常量式故障, 那么在 u 中对应的输入分别为

$$u_{p,i} = u_{p,i}^* f_{p,i} = u_{d,i} f_{p,i} / \bar{f}_{p,i}, \quad (29)$$

$$u_{a,i} = u_{a,i}^* + f_{a,i} = u_{d,i} - \bar{f}_{a,i} + f_{a,i}, \quad (30)$$

$$u_{c,i} = u_{d,i}, \quad (31)$$

其中 $u_{c,i}$ 由冗余机构实现. 如果忽略拟合造成的偏差, 那么由式(22)和(23)所得 $\bar{f}_{p,i} = f_{p,i}$ 且 $\bar{f}_{a,i} = f_{a,i}$, 从而 $u_{p,i} = u_{d,i}$ 且 $u_{a,i} = u_{d,i}$. 那么经容错后执行机构产生的输入 $u = u_d$, 相应的Lyapunov函数微分

$$\dot{V}_{FTC} = \dot{V} + 2\nu^T P M^{-1} B(u - u_d) = \dot{V} < 0,$$

即系统闭环稳定. 故在拥有反馈控制和故障诊断的前提下, 本文提出的针对执行机构故障的容错控制算法可行且有效.

4 仿真结果(Simulation result)

本节采用第1)类水下航行器在推进器和舵机发生故障后, 执行水平面回坞任务的仿真实验^[21-22], 验证所提故障诊断和容错控制算法的可行性和有效性. 回坞要求航行器跟随规划路径驶进回收坞, 现假设推进器和舵机在回收开始前已经分别发生了偏差式与比例式故障, 其故障因子分别为 $f_a = 13$ 和 $f_p = 0.8$. 若航行器无故障诊断与容错控制功能, 那么可得图4所示的回坞情况, 实线所示运行轨迹未能与虚线所示规划路径重合, 航行器未能成功驶进回收坞.

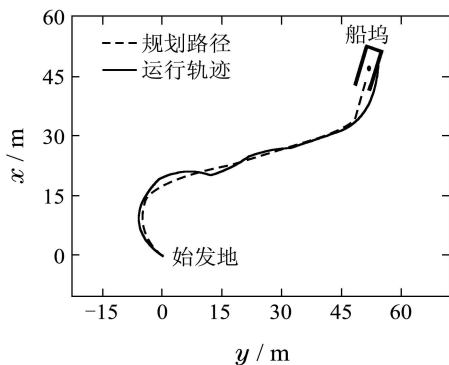
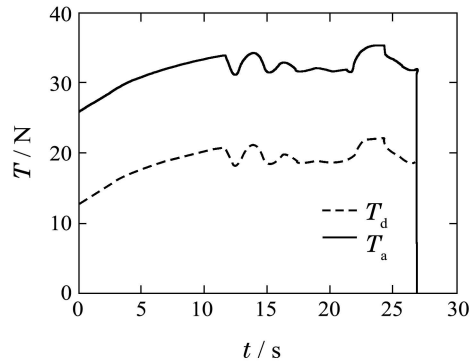


图4 有故障回坞

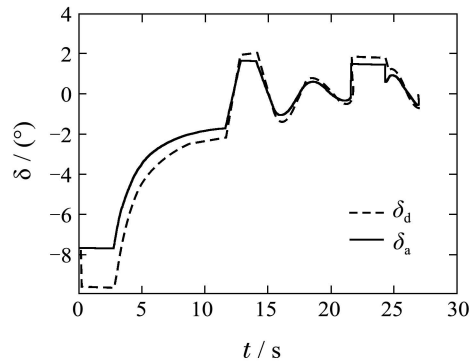
Fig. 4 Docking with faults

统计推进器和舵机的期望输入与实际作用可得图5所示结果, 其中虚线和实线分别表示相应执行机

构的期望输入和实际作用. 可见在回收过程中, 反馈控制产生的期望输入始终未能在执行机构上实现, 两者之间的差距实为故障因子.



(a) 推力的期望值与实际值

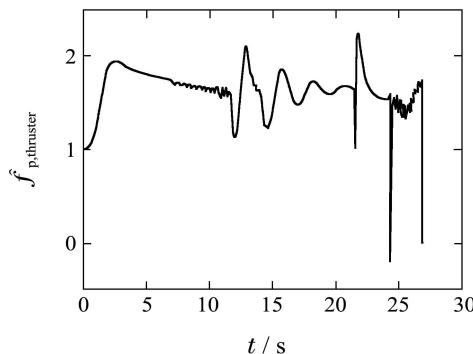


(b) 舵角的期望值与实际值

图5 执行机构作用的期望值与实际值

Fig. 5 Desire and real values of actuators

当在航行器的控制回路中添加了如图3所示的故障诊断模块后, 采用比例式和偏差式故障观测器同时进行故障检测, 可得图6所示的检测结果(由于该欠驱动仿真中无冗余执行机构, 故未考虑常量式故障, 同时相应的观测器也不予考虑). 图6(a)–6(d)中纵坐标分别表示推进器和舵机的比例与偏差故障因子估计. 从中可知, 图6(b)与图6(c)的估计数据各自不到5秒钟便收敛到相应的故障因子值, 而图6(a)与图6(d)的数据从始至终都比较紊乱. 该结果与实际情况相符, 据此可知本文的故障检测算法可行且有效.



(a) 推力的比例式故障检测

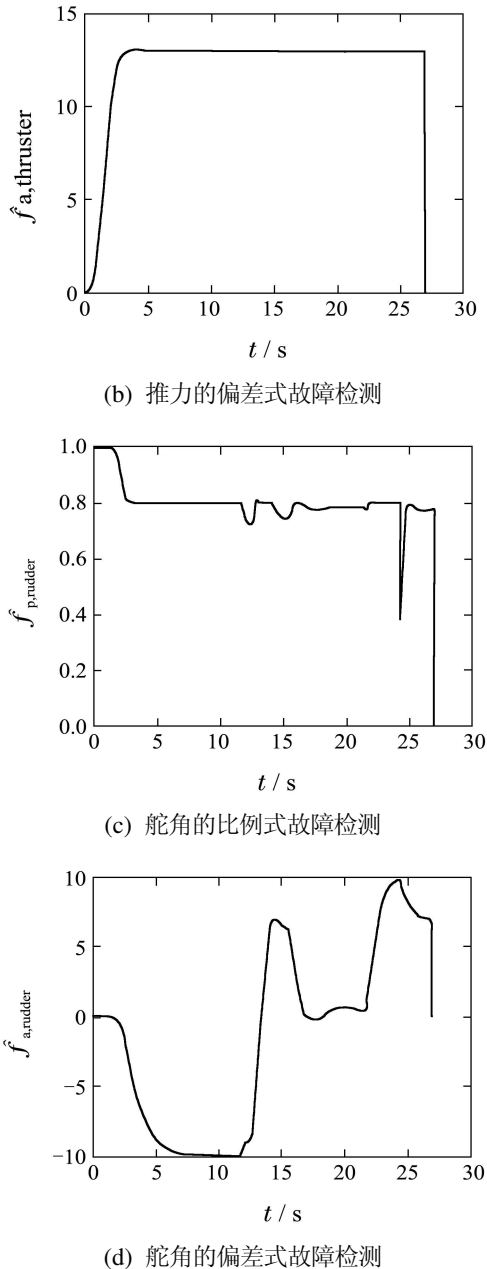


图 6 两类观测器故障检测结果

Fig. 6 Fault detection results with two types of observers

根据故障隔离和故障辨识算法, 在满足方差小于 10^{-4} 的条件下, 于3.1788 s解算出推进器故障为偏差式, 对应偏差故障因子 $\bar{f}_a = 13.0043$, 同时舵机故障为比例式, 对应比例故障因子 $\bar{f}_p = 0.8001$. 结果与实际情况相差较小, 表明故障隔离和辨识算法可行且有效.

基于以上结果, 对推进器和舵机采用相应的容错控制方案, 即将期望推力 T_d 和期望舵角 δ_d 分别修正为 $T_d - \bar{f}_a$ 和 δ_d/\bar{f}_p . 可得图7所示的回坞轨迹, 与图4对比可知容错控制有效屏蔽掉故障对执行机构的影响. 图8反映了容错控制前后实际推力与期望推力和实际舵角与期望舵角间的关系, 可见经容错控制后, 实际作用等于期望输入.

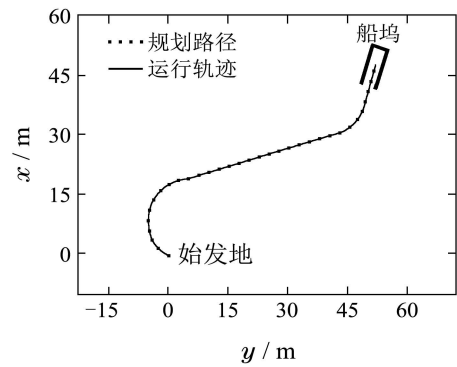


图 7 容错控制下的回坞

Fig. 7 Docking under FTC

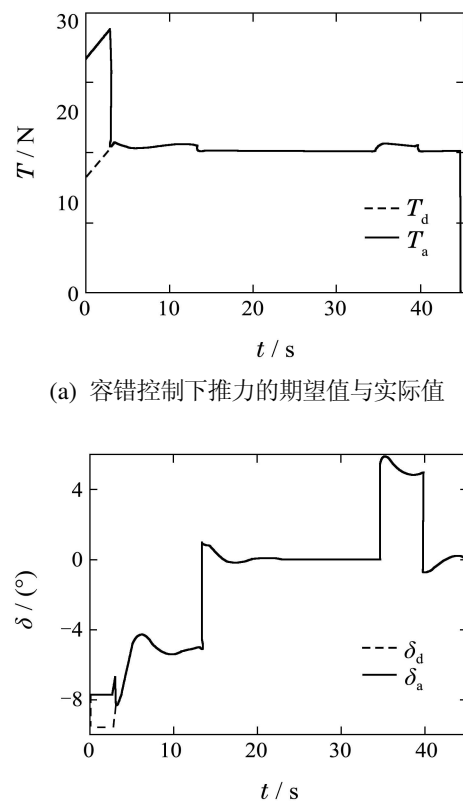


图 8 容错控制下执行机构作用的期望值与实际值

Fig. 8 Desire and real values of actuators under FTC

从仿真结果可知, 基于本文提出的故障诊断和容错控制算法, 执行机构的故障被有效地诊断出来, 并且被及时屏蔽掉, 验证了算法的可行性和有效性. 由于本实验中不存在冗余机构, 故采用推力和舵角的变化情况来统一描述检测和辨识阶段推进器和舵机各自的故障, 从而出现检测阶段估计数据与隔离阶段数据一样的情况.

5 结论(Conclusions)

本文研究了水下航行器执行机构的故障诊断与容错控制问题. 基于3类故障模式的定义和 underwater 航行器的动力学模型, 通过故障检测、故障隔离和故障辨

识3个阶段诊断出故障执行机构. 基于故障诊断和反馈控制, 通过修正反馈输入实现满足闭环稳定性的容错控制. 在此基础上, 通过水下航行器的回坞仿真实验, 验证了本文针对水下航行器执行机构的故障诊断与容错控制算法的可行性和有效性. 另外, 由于使用基于航行器状态的观测器进行故障检测, 有效降低了对专用故障传感器的依赖性, 提高了故障诊断算法应用于不同航行器的普适性; 同时, 使用修正控制输入实现容错控制的方式, 避免了对控制结构的修改, 有效提高了容错控制算法的应用普适性.

参考文献(References):

- [1] ZHANG Y, JIANG J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems [J]. *Annual Reviews in Control*, 2008, 32(2): 229 – 252.
- [2] 徐似春, 萧德云. 一种新的基于参数估计的故障诊断方法 [J]. *控制理论与应用*, 2001, 18(4): 493 – 497.
(XU Sichun, XIAO Deyun. A new fault diagnosis method based on parameter estimation [J]. *Control Theory & Applications*, 2001, 18(4): 493 – 497.)
- [3] FOSSEN T I, JOHANSEN T. A survey of control allocation methods for ships and underwater vehicles [C] // *Proceedings of the 14th Mediterranean Conference on Control and Automation*. Ancona: IEEE, 2006, 1: 1 – 6.
- [4] BLANKE M, KINNAERT M, LUNZE J, et al. *Diagnosis and Fault-tolerant Control* [M]. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2003.
- [5] 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.
(ZHU Daqi, HU Zhen. *Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control for the Underwater Robot* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.)
- [6] LIU F Q, HUANG J, SHI Y, et al. Fault detection for discrete-time systems with randomly occurring nonlinearity and data missing: a quadrotor vehicle example [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2013, 350(9): 2474 – 2493.
- [7] YANG K, YUH J, CHOI S. Fault-tolerant system design of an autonomous underwater vehicle ODIN: an experimental study [J]. *International Journal of Systems Science*, 1999, 30(9): 1011 – 1019.
- [8] ALESSANDRI A, CACCIA M, VERUGGIO G. Fault detection of actuator faults in unmanned underwater vehicles [J]. *Control Engineering Practice*, 1999, 7(3): 357 – 368.
- [9] NIL L. *Fault-tolerant control of unmanned underwater vehicles* [D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [10] OMERDIC E, ROBERTS G. Thruster fault diagnosis and accommodation for open-frame underwater vehicles [J]. *Control Engineering Practice*, 2004, 12(12): 1575 – 1598.
- [11] SØDALEN O. Optimal thrust allocation for marine vessels [J]. *Control Engineering Practice*, 1997, 5(9): 1223 – 1231.
- [12] SARKAR N, PODDER T, ANTONELLI G. Fault-accommodating thruster force allocation of an AUV considering thruster redundancy and saturation [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, 18(2): 223 – 233.
- [13] SOYLU S, BUCKHAM B, PODHORODESKI R. A chattering-free sliding-mode controller for underwater vehicles with fault-tolerant infinity-norm thrust allocation [J]. *Ocean Engineering*, 2008, 35(16): 1647 – 1659.
- [14] JOHANSEN T, FOSSEN T, BERGE S. Constrained nonlinear control allocation with singularity avoidance using sequential quadratic programming [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2004, 12(1): 211 – 216.
- [15] RAUCH H. Autonomous control reconfiguration [J]. *IEEE Control Systems*, 1995, 15(6): 37 – 48.
- [16] 李娟, 周东华, 司小胜, 等. 微小故障诊断方法综述 [J]. *控制理论与应用*, 2012, 29(12): 1517 – 1529.
(LI Juan, ZHOU Donghua, SI Xiaosheng, et al. Review of incipient fault diagnosis methods [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(12): 1517 – 1529.)
- [17] WU X Q, LU J A. Parameter identification and backstepping control of uncertain Lü system [J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2003, 18(4): 721 – 729.
- [18] FOSSEN T I. *Guidance and Control of Ocean Vehicles* [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 1994.
- [19] 严卫生. 鱼雷航行力学 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.
(YAN Weisheng. *Torpedo Mechanics* [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005.)
- [20] 高剑, 刘富樯, 赵江, 等. 欠驱动自主水面船的非线性路径跟踪控制 [J]. *机器人*, 2012, 34(3): 329 – 336.
(GAO Jian, LIU Fuqiang, ZHAO Jiang, et al. Non-linear path following control of underactuated autonomous surface vehicles [J]. *Robot*, 2012, 34(3): 329 – 336.)
- [21] LIU F Q, XU D M, GAO J, et al. Fault tolerant control for an autonomous underwater vehicle to dock with thruster redundancy [C] // *Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference*. Xi'an: IEEE, 2013, 1: 6186 – 6190.
- [22] 高剑, 刘富樯, 严卫生. 自主水下航行器回坞路径规划与跟踪控制 [J]. *机械科学与技术*, 2012, 31(5): 810 – 813.
(GAO Jian, LIU Fuqiang, YAN Weisheng. Homing path planning and following control of an autonomous underwater vehicle [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2012, 31(5): 810 – 813.)

作者简介:

刘富樯 (1986–), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水下航行器的故障诊断、可靠性分析和容错控制, E-mail: fuqiangliu@yeah.net;

徐德民 (1937–), 男, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水中兵器科学与技术和控制理论与工程应用, E-mail: xudm@nwpu.edu.cn;

高剑 (1979–), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为水下航行器的运动与回收控制技术, E-mail: jiangao@nwpu.edu.cn;

张立川 (1982–), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为水下航行器的导航与运动控制技术, E-mail: zlc@nwpu.edu.cn.