

引用格式: 安金鑫, 杨少龙, 向先波, 等. 基于动态安全领域的水下机器人近底应急决策[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(2): 184–193.

AN J X, YANG S L, XIANG X B, et al. Seabed collision emergency decision-making of AUV based on safety domain model[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(2): 184–193.

基于动态安全领域的水下机器人 近底应急决策



扫码阅读全文

安金鑫, 杨少龙*, 向先波, 董东磊

华中科技大学 船舶与海洋工程学院, 湖北 武汉 430074

摘要: [目的] 为了保障复杂未知环境下自主式水下机器人(AUV)的安全, 防止意外触底, 提出AUV近底动态安全领域模型, 建立**分级应急响应措施**。[方法] 建立AUV垂直面运动模型并通过超越试验对比验证, 求解主动安全领域及被动安全领域距离, 建立AUV**近底航行动态安全领域模型**, 基于该模型设计AUV应急控制系统与应急策略。基于实时纵倾和对底高度状态, 计算当前及未来**危险系数**, 通过分配权重系数求得综合危险系数, 用于指导AUV应急响应决策。[结果] 通过分析湖试定深和定高航行试验, 当河床高度相距AUV主动安全领域边界较近时, 综合危险系数与河床高度的相关性较强, 反之则较弱。结果表明, AUV应急控制系统在起伏地形下作业时能减少应急决策虚警, 而在近底航行作业时又能减少应急决策漏警, 从而实现在复杂起伏地形下近底航行时的合理应急决策。[结论] 基于垂直面运动方程建立的近底安全领域模型与应急响应策略能够用于AUV水下航行近底危险实时预测, 可提高AUV水下自主航行的安全性。

关键词: 自主式水下机器人; 安全领域模型; 近底避险; 应急决策

中图分类号: U674.941

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.02533

Seabed collision emergency decision-making of AUV based on safety domain model

AN Jinxin, YANG Shaolong*, XIANG Xianbo, DONG Donglei

School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan 430074, China

Abstract: [Objectives] To ensure safety and prevent seabed collisions in complex unknown underwater environments, this study proposes a seabed safety domain model and tiered emergency response strategies. [Methods] A vertical motion simulation model is established and verified by surpassing the test results, then used to calculate the active and passive safety domain distance of an autonomous underwater vehicle (AUV), thereby establishing a seabed safety domain model. An AUV emergency control system and emergency strategies are then built on the basis of the dynamic safety domain model. The trim and distance from the seabed of the AUV are used to calculate the current and future risk factors. Based on the weighted sum, the comprehensive risk factor is employed to provide the AUV with emergency response strategies. [Results] Lake tests with the AUV sailing at a fixed depth and height show a strong dependency of the comprehensive risk coefficient on seabed height when it is close to the boundary of the AUV's active safety domain. In the opposite case, there is a weak dependency of the comprehensive risk coefficient on seabed height. The results show that the proposed AUV emergency control system can reduce emergency false alarms caused by frequently changing riverbed heights and sailing altitudes close to the seabed. In such cases, reasonable emergency strategies can be realized under complex rough terrain. [Conclusions] The AUV seabed safety domain model and tiered emergency response strategies based on vertical motion equations proposed herein can be applied to evaluate seabed collision risk in various cases. Finally, this paper provides emergency response strategies to avoid seabed collision accidents, which can enhance the safety of AUV navigation.

Key words: autonomous underwater vehicle; safety domain model; seabed collision risk; emergency decision-making

收稿日期: 2021-09-18

修回日期: 2022-01-19

网络首发时间: 2023-04-20 10:22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52071153); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2018KFYYXJJ015, 2021yjsCXC007)

作者简介: 安金鑫, 男, 1998年生, 硕士生。研究方向: 水下机器人应急系统、路径规划。E-mail: an_jinxin@hust.edu.cn

杨少龙, 男, 1988年生, 博士, 副教授。研究方向: 无人飞行器航线规划与智能控制。E-mail: yangsl@hust.edu.cn

*通信作者: 杨少龙

0 引言

自主式水下机器人(AUV)^[1]以其探测和作业范围大、机动灵活等优点成为了海洋工程界的研究热点。AUV可以适应类型丰富的水下作业场景,例如海洋环境调查、海底资源勘察和深海科学试验等^[2]。然而,AUV若在水下作业中发生触底事故,轻则导致任务失败,重则造成设备损坏或设备丢失^[3]。因此,增强触底避险能力、提高自身安全性一直是AUV研制过程中非常重要的问题^[4-5]。

为了提升安全性,国内外基于安全领域模型,对航行器提出了各种有效的避碰策略。以船舶安全领域为例,1971年,日本学者Fujii等^[6]首次提出用于船舶避障的安全领域模型,并通过交通调查和概率统计方法,得出了适用于狭窄水域的椭圆形船舶安全领域模型和航道通行能力影响因素。Goodwin^[7]受航空领域的避碰程序启发,定义了“船舶安全领域”的概念,即领航员期望与其他船舶或水面固定物体保持的安全距离。多年来,船舶安全领域的大小、形状和面积随着研究的深入不断发生演变^[8-11]。目前,安全领域模型在汽车、船舶和航空航天等领域^[12]已有许多相关报道。例如,在汽车领域,车辆的安全空间被称为安全驾驶区域。Kuchar等^[13]通过设置汽车安全领域的包络线来避免车辆与障碍物碰撞,Erlie等^[14]根据周围车辆的驾驶模式设置安全领域包络线,并以此为基础,控制车辆的转向角和纵向加速度,以保证与周围车辆的安全距离。上述研究表明,当传感器检测到某一安全领域范围内存在障碍物时,交通工具将及时采取应急响应措施,使其主动远离障碍物,提升其安全性。

受此启发,国内外基于安全领域也开展了水下机器人安全性的初步探究。Wang等^[15]进行AUV全局路径规划时就通过运动安全性分析,定义了AUV在有障碍情况下的“禁区”和“潜在碰撞区”,提出了AUV安全航行准则用于局部路径规划,仿真结果验证了方法的可行性,但缺乏实艇试验。Suh等^[16]提出了一种评估遥控水下机器人(ROV)碰撞风险的指标,通过碰撞时间、平均碰撞时间和平均碰撞能量来决策ROV的碰撞风险,证明其可以评估路径中的总体风险,但是并未用于实际试验。Hegde等^[17]提出了一种基于传感器数据模糊推理的安全领域模型,仿真试验证实模糊逻辑在提高水下机器人安全性方面可发挥一定作用。Hegde等^[18]再次利用八叉树方法设计

了静态安全领域模型,在水下机器人周围形成一个三维虚拟保护屏障保障机器人的安全航行。然而,这类静态安全领域模型需要预先人为设定固定阈值,对于多任务、复杂起伏地形下的航行安全,难以做到安全领域模型的自适应。

针对上述问题,本文将提出一种面向触底预警避险的AUV近底动态安全领域模型及应急响应决策。首先将建立AUV垂直面运动模型并进行湖试验证,进而计算主动和被动的安全领域距离。根据AUV当前运动状态和未来运动趋势与主动、被动安全领域距离进行对比,计算AUV的综合危险系数,指导近底应急响应决策。设计AUV独立应急控制系统,并通过湖试验证在复杂地形下的近底应急避险能力。

1 AUV垂直面运动模型及验证

1.1 AUV垂直面运动建模

建立AUV运动坐标系,包括大地坐标系和附体坐标系,如图1所示。图中变量含义见表1。

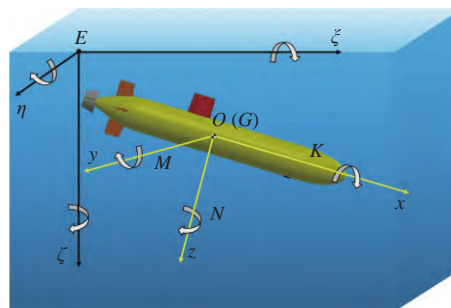


图1 AUV大地坐标系与附体坐标系

Fig. 1 Earth-and body-fixed coordinate systems of AUV

表1 AUV大地坐标系与附体坐标系变量含义

Table 1 Notation of AUV in earth frame and body frame

	位置/m	姿态角/rad	线速度/(m·s ⁻¹)	角速度	力/N	力矩
大地坐标系	ξ轴	x	φ	\dot{x}	$\dot{\varphi}$	X_E K_E
	η轴	y	θ	\dot{y}	$\dot{\theta}$	Y_E M_E
	ζ轴	z	ψ	\dot{z}	$\dot{\psi}$	Z_E N_E
附体坐标系	x轴	x'	γ	u	p	X K
	y轴	y'	α	v	q	Y M
	z轴	z'	β	w	r	Z N

由文献[19]可知,假设附体坐标系的原点O与重心G重合,并且AUV左右对称,上下、前后近似对称,则转动惯量 $I_{xx} = I_{yy} = I_{zz} = I_{xy} = I_{yx} = 0$ 。

AUV空间运动可分解为垂直面和水平面,本文着重考虑近底安全,因此简化考虑AUV垂直

面运动,即忽略横滚角速度($p=0$)、横摇角速度($r=0$)、横向速度($v=0$)、横滚角($\varphi=0$)和航向角($\psi=0$)后,设定前进速度为常量($\dot{u}=0$),由此得出垂直面运动模型式(1),动力学模型式(2):

$$\begin{cases} \dot{z} = -u \sin \theta + w \cos \theta \\ \dot{\theta} = q \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} Z = m(\dot{w} - uq - x_G \dot{q} - z_G q^2) \\ M = I_{yy} \dot{q} + m z_G w q - m x_G (\dot{w} - uq) \end{cases} \quad (2)$$

式中,作用力 Z 和力矩 M 为:

$$\begin{aligned} Z &= Z_{\dot{w}} \dot{w} + Z_{\dot{q}} \dot{q} - X_{\dot{u}} u q + Z_{w|w|} w |w| + Z_{uw} u w + Z_{q|q|} q |q| + \\ &\quad Z_{uq} u q + Z_{uud} u^2 \delta_s + Z_{uudb} u^2 \delta_b + (W - B) \cos \theta \\ M &= M_{\dot{w}} \dot{w} + M_{\dot{q}} \dot{q} - (Z_{\dot{w}} w + Z_{\dot{q}} q) u + X_{\dot{u}} u w + M_{w|w|} w |w| + \\ &\quad M_{uw} u w + M_{q|q|} q |q| + M_{uq} u q + M_{uud} u^2 \delta_s + M_{uudb} u^2 \delta_b - \\ &\quad (z_G W - z_B B) \sin \theta - (x_G W - x_B B) \cos \theta \end{aligned} \quad (3)$$

将式(3)代入动力学模型(2),整理得式(4):

$$\begin{aligned} (m - Z_{\dot{w}}) \dot{w} - (m x_G + Z_{\dot{q}}) \dot{q} &= m u q + m z_G q^2 - \\ X_{\dot{u}} u q + Z_{w|w|} w |w| + Z_{uw} u w + Z_{q|q|} q |q| + Z_{uq} u q + \\ (W - B) \cos \theta + Z_{uud} u^2 \delta_s + Z_{uudb} u^2 \delta_b - \\ (m x_G + M_{\dot{w}}) \dot{w} + (I_{yy} - M_{\dot{q}}) \dot{q} &= -m z_G w q - m x_G u q - \\ (Z_{\dot{w}} w + Z_{\dot{q}} q) u + X_{\dot{u}} u w + M_{w|w|} w |w| + M_{uw} u w + \\ M_{q|q|} q |q| + M_{uq} u q - (z_G W - z_B B) \sin \theta - \\ (x_G W - x_B B) \cos \theta + M_{uud} u^2 \delta_s + M_{uudb} u^2 \delta_b \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $Z_{u|u|}$ 为 z 方向的阻力; $X_{\dot{u}}$ 为 x 方向的附加质量系数,其他自由度的流体阻力和附加质量系数表达形式详见文献[19]; Z_{uq}, M_{uq} 等为附加质量和舵片力的合力; M_{uw}, Z_{uw} 等为考虑舵片升降力、体升降力及转矩的力学系数。其他相关变量的定义详见文献[20]中的附录。基于式(1)和式(4),在Matlab中进行数值仿真,仿真环境中AUV初始纵倾角 θ 、初始速度 u 的设定与湖试试验的初值保持一致,初始舵角为湖试对应的响应舵角,对比分析仿真值与湖试值的实时深度与纵倾变化。

1.2 AUV垂直面运动模型验证

AUV进行湖试垂直面超越试验,与数字仿真结果进行对比。图2为AUV舵角时历曲线的对比结果。

由图2可见,湖试试验执行舵角受舵机迟滞影响,滞后于期望舵角指令约3 s。为此,在数值仿真阶段,通过延时环节模拟舵机迟滞的同类效应,实现仿真舵角的响应输出(蓝色曲线)与湖试数据接近。进一步对比其中一组仿真试验和外场试验纵倾和深度的响应数据(3 m/s),结果如图3所示,图中, E_{π} 为峰值误差, E_{π} 为差值误差。

为了量化对比结果,选取 E_{π} 和 E_{π} 来具体计算

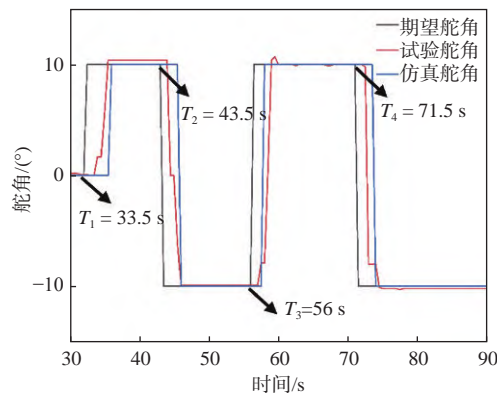
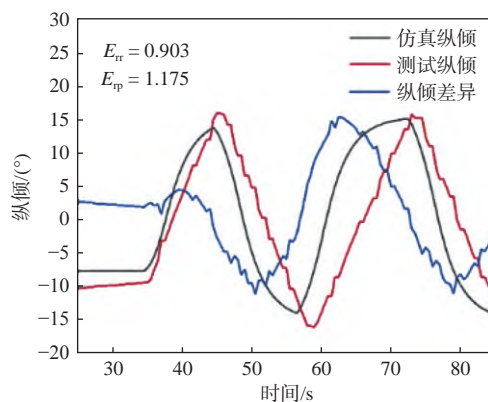
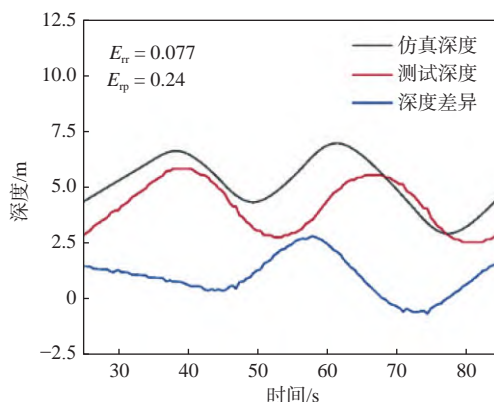


图2 舵角时历曲线对比

Fig. 2 Comparison of rudder angle curve



(a) 纵倾变化曲线



(b) 深度变化曲线

图3 AUV垂直面运动响应仿真与湖试结果对比

Fig. 3 Simulation and lake test comparison of AUV vertical motion response curve

仿真和试验的数据偏差^[19]。设仿真数据为函数 $S(t)$,试验数据为 $S'(t)$,则 E_{π} 和 E_{π} 的定义式分别为:

$$E_{\pi} = \left| \frac{\max[S'(t) - S(t)]}{2 \max[S(t)]} \right| + \left| \frac{\min[S'(t) - S(t)]}{2 \min[S(t)]} \right| \quad (5)$$

$$E_{\pi} = \frac{1}{2} \times \left\{ \left| \frac{\max[S'(t)] - \max[S(t)]}{\max[S(t)]} \right| + \left| \frac{\min[S'(t)] - \min[S(t)]}{\min[S(t)]} \right| \right\} \quad (6)$$

本文约定纵倾角大于 0° 时AUV的艇艏朝上。经过对比,在仿真和湖试阶段,AUV的深度、

纵倾的峰值误差分别为 0.24 和 1.175, 差值误差分别为 0.077 和 0.903。此外, 进一步对比超越试验特征参数, 结果如表 2 所示。表中, u 为航速, δ_r 为艏舵角, θ 为纵倾角, θ_{ov} 为超越纵倾角, ξ_{ov} 为超越深度。

表 2 超越试验仿真和湖试的特征参数对比

Table 2 Comparison of feature parameters between simulation and lake test for the overtaking maneuver

$u/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\delta_r/(\circ)$	$\theta/(\circ)$	$\theta_{ov}/(\circ)$			ξ_{ov}/m		
			仿真	湖试	误差/%	仿真	湖试	误差/%
3	10	10	5.83	5.9	1.2	0.988	1.40	29.40
1	20	20	2.49	2.9	14.1	0.100	0.11	9.09

由表 2 可知, 两种工况下的 θ_{ov} 与 ξ_{ov} 误差均在 30% 以内。由峰值误差、差值误差以及超越试验特征参数对比结果可知, 在试验研究可接受的偏差范围内, AUV 垂直面运动仿真模型能够基本反映其运动响应特征, 可用于后续安全领域计算, 试验误差主要由湖试条件下的浪、流等干扰导致。

2 近底安全领域模型

2.1 AUV 下降深度规律

当 AUV 纵倾大于河床与水平面夹角时或对底高度大于 0 时, 通常认为 AUV 的垂直面安全性较高, 故定义在初始纵倾小于 0° 时, AUV 从执行转舵完成时刻起至纵倾恢复到 0° 时刻止的响应时间为 T_θ 。由于舵机响应迟滞特性, 在收到期望舵角指令到执行转舵完成会有时间延迟。因此, 定义舵机这段滞后时间为 T_0 ($T_0 = 3 \text{ s}$)。理论上, T_θ 越短, AUV 机动性越好。结合 AUV 垂直面运动仿真模型可知, 当 AUV 的初始速度与纵倾发生变化时, T_θ 也会变化。结合本文所研究的 AUV 装备与任务场景, 设定前进速度为 $0 \sim 3.4 \text{ m/s}$, 纵倾为 $-10^\circ \sim -90^\circ$, 转舵舵角为 $-25^\circ \sim 25^\circ$ 。数字仿真得到不同初始状态组合下的 T_θ , 拟合得到公式为

$$T_\theta = 4 + 9.44u + 0.585u^2 + 0.0025\theta^2 + 0.0077u\theta \quad (7)$$

$$(R^2 = 0.973)$$

式中, R^2 为拟合优度, 数值越接近 1 表示仿真的拟合度越好。

从近底安全角度出发, AUV 执行上浮舵 (10°) 指令后, 在 T_θ 时间内能够从某一危险初始状态恢复到垂直面安全性较高的状态, 故定义在 T_θ 内 AUV 下降深度为主动安全领域距离 D_2 :

$$D_2 = u \times T_0 \times \sin \theta_0 + \int_0^{T_\theta} \left(u \times \sin \left(\left| \theta_0 \right| - \left| \frac{\theta_0}{T_\theta} \right| t \right) \right) dt \quad (8)$$

联合式 (7) 和式 (8), 可得 D_2 :

$$D_2 = 7.5 - 8.91u - 0.13\theta + 3.53u^2 + 0.3u\theta \quad (9)$$

$$(R^2 = 0.985)$$

此外, 由于舵机在响应迟滞时间 T_0 内维持原舵角指令, 该时间段 T_0 内 AUV 的前进速度、纵倾等状态不能及时改变, 因此定义在 T_0 时间内 AUV 下降深度为被动安全领域距离 D_1 :

$$D_1 = u \times T_0 \times \sin \theta_0 + D_0 \quad (10)$$

式中, D_0 为 AUV 的半径。

设定与主动安全领域计算相同的初始状态, 可得 D_1 拟合函数:

$$D_1 = 0.00182u + 0.44722\theta - 0.01902\theta^2 + 0.03389\theta u \quad (11)$$

$$(R^2 = 0.979)$$

2.2 AUV 近底动态安全领域模型

针对近底航行易触底风险, 提出 AUV 近底动态安全领域模型概念。如图 4 所示, AUV 的近底主动安全领域和被动安全领域共同构成了近底动态安全领域模型。近底动态安全领域模型的边界由 D_1 和 D_2 共同组成。当 AUV 的前进速度与纵倾发生变化时, 近底动态安全领域边界动态调整。当检测到近底安全领域边界内出现障碍物时, AUV 采取相应的应急响应措施, 改变自身运动状态, 使障碍物远离安全领域模型边界。近底动态安全领域模型是 AUV 三维空间安全领域的一个重要维度, 可靠的近底动态安全领域模型能够降低 AUV 由于触底而引起的损坏、丢失等安全事故的发生频率。

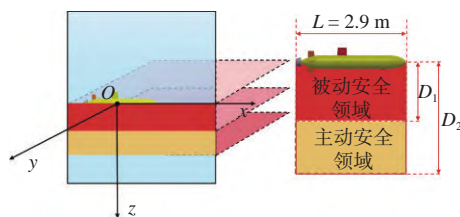


图 4 AUV 近底动态安全领域模型示意图

Fig. 4 Diagram of bottoming dynamic safety domain model

3 应急响应策略设计

3.1 应急响应框架

为确保安保系统独立可靠, 所提应急响应框架独立于主控单元。如图 5 所示, 该框架采集艇载传感器获取的实时纵倾、前进速度、深度、对底高度等典型状态数据。通过对多源感知数据进行综合分析后, 输出应急响应决策至 4 种执行机构, 通过分组控制, 实现合理的分级应急响应决策。

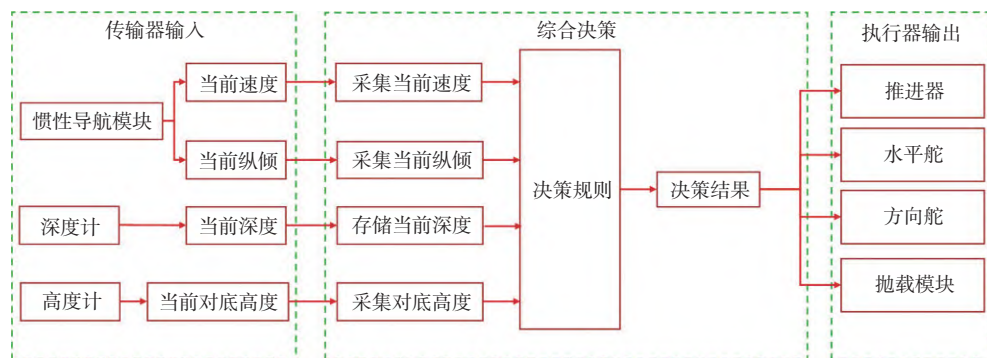


图 5 AUV 应急响应决策框架

Fig. 5 AUV emergency response framework

3.2 应急综合决策

如图 6 所示, AUV 运动状态分为 3 类: 过去状态、当前状态和未来状态。过去状态储存数据包括深度变化趋势和对底高度变化趋势; 当前状态数据包括当前速度、当前纵倾和当前对底高

度; 未来状态是由当前速度和纵倾预测出响应时间 T_0 , 以及由过去对底高度与当前对底高度预测 T_0 后的对底高度。通过计算当前危险系数和未来危险系数共同决定 AUV 综合危险系数, 进而用于应急决策。

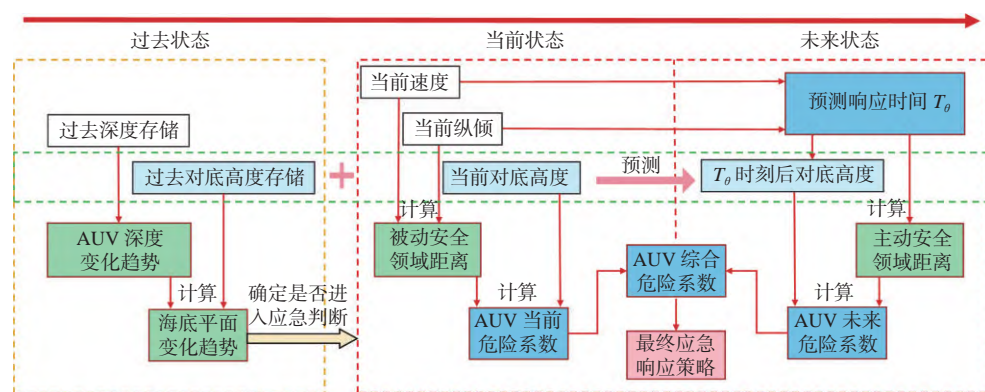


图 6 AUV 多状态应急判断逻辑

Fig. 6 AUV multi-state emergency judgment logic

3.2.1 过去状态应急响应判断架构

近底航行时, 计算河床轮廓起伏趋势能够用于判断 AUV 是否与河床距离逐渐缩小, 由此可推测 AUV 的近底安全性, 进而触发应急决策。如图 7 所示, 列举 AUV 和河床轮廓的 3 类相对位置关系, 并进行应急决策触发条件分析。图中, u_0 为航速, θ_0 为纵倾角, θ_r 为河床与水平面夹角。

首先, 取一段过去时间窗口(即在当前时刻往前 t 时刻)内深度计变化量 $\Delta S = S_{-t} - S_0$ 和对底高度变化量 $\Delta D = D_0 - D_{-t}$, 进而得出河床轮廓变化趋势(即 AUV 艇体正下方投影的河床地形变化), 如表 3 中判断结果 1 所示。然后, 在完成河床变化趋势判定后, 结合 AUV 纵倾状态 θ_0 与 θ_r (即判断条件 2)进行进一步决策判断 AUV 是否需要进入应急响应。

3.2.2 当前危险系数计算

由于舵机迟滞影响, 对出现在被动安全领域内的障碍物需要立即响应避障, 以免造成更严重

的后果。故可由 AUV 实时被动安全领域距离 D_1 和当前对底高度 ξ_0 得出当前危险系数 ρ_1

$$\rho_1 = \xi_0 - D_1 \quad (12)$$

当 $\rho_1 \leq 0$ 时, $\xi_0 \leq D_1$, 表明由于舵机迟滞响应, AUV 在接下来 T_0 时间内不能及时转舵, 会大概率造成 AUV 触底事故, 即 $\xi_{T_0} \leq 0$; 而当 $\rho_1 > 0$ 时, 则 $\xi_0 > D_1$, 表明 AUV 仍可在下降 $(\xi_0 - D_1) > 0$ 距离的反应时间内及时发出应急响应措施实现摆脱触底危险。

3.2.3 未来危险系数计算

基于当前状态预测未来状态可进一步提高 AUV 的近底安全预警能力, 提前规避可能发生的危险。但过度复杂的状态预测和危险判断也会降低 AUV 对水下复杂地形的适应能力, 以致应急决策虚警频发。为此, 本文将基于 AUV 运动状态趋势和对底高度变化趋势, 设计分析未来危险系数的方法。

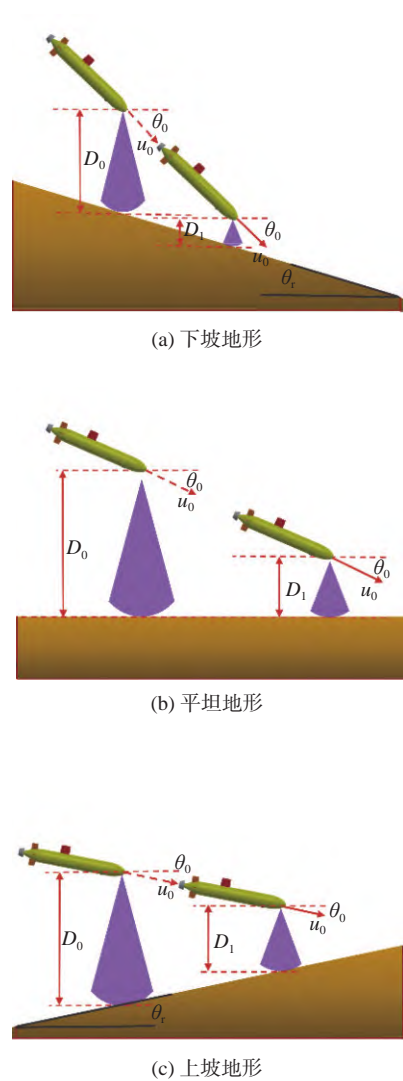


图 7 AUV 与河床轮廓的相对危险位置分析

Fig. 7 Analysis of relative position between AUV and riverbed profile

表 3 河床相对 AUV 轮廓变化趋势及应急触发条件			
Table 3 Riverbed change trend and emergency judgment			
判断条件1	判断结果1	判断条件2	判断结果2
$\Delta D < \Delta S$	河床呈上升趋势	$\theta_0 \leq \theta_r$	进入应急决策
		$\theta_0 > \theta_r$	不进入应急决策
$\Delta D > \Delta S$	河床呈下降趋势	$ \theta_0 \geq \theta_r$	进入应急决策
		$ \theta_0 < \theta_r$	不进入应急决策
$\Delta D = \Delta S$	河床呈平缓趋势	$\theta_0 \leq 0^\circ$	进入应急决策
		$\theta_0 > 0^\circ$	不进入应急决策

从 3.1 节所述可知, AUV 从完成执行舵机指令到纵倾恢复到 0° 需要的响应时间为 T_θ , 且这段 T_θ 时间内, AUV 仍会有下降速度的分量, 可以计算出 AUV 下降深度, 即主动安全领域距离 D_2 。为此, 以从当前时刻至 T_θ 时间后的预测对底高度 ξ_{T_θ} 和主动安全领域距离 D_2 的差值来计算未来危险系数 ρ_2

$$\begin{cases} \xi_{T_\theta} = D_0 + \frac{\Delta D}{t} T_\theta \\ \rho_2 = \xi_{T_\theta} - D_2 \end{cases} \quad (13)$$

当 $\xi_{T_\theta} \leq 0$ m 时, 有 $\rho_2 \leq -D_2$, 表明在当前速度和纵倾状态下, 从 AUV 发出上浮舵指令开始至 T_θ 时刻, AUV 对底高度会小于等于 0, 即 AUV 会在 T_θ 时间内发生触底。

3.2.4 综合危险系数与响应逻辑

基于危险系数 ρ_1 和 ρ_2 , 通过加权求和得到综合危险系数, 进而划分危险等级进行分级处理。首先, 对当前危险系数和未来危险系数进行无量纲化处理。为了满足实时处理要求, 将数据归一化, 另当 $\rho_i < 0$ 时, 指定其为 0, 具体方法为:

$$\rho_i^* = \frac{1}{(1 + \rho_i)} \left(i = 1, 2; \quad \rho_i = \begin{cases} 0, & \rho_i \leq 0 \\ \rho_i, & \rho_i > 0 \end{cases} \right) \quad (14)$$

然后, 根据实际航行试验中触发应急响应逻辑, 判定综合危险系数的合理性, 进而来确定 2 个危险系数的权重区间, 如图 8 所示。

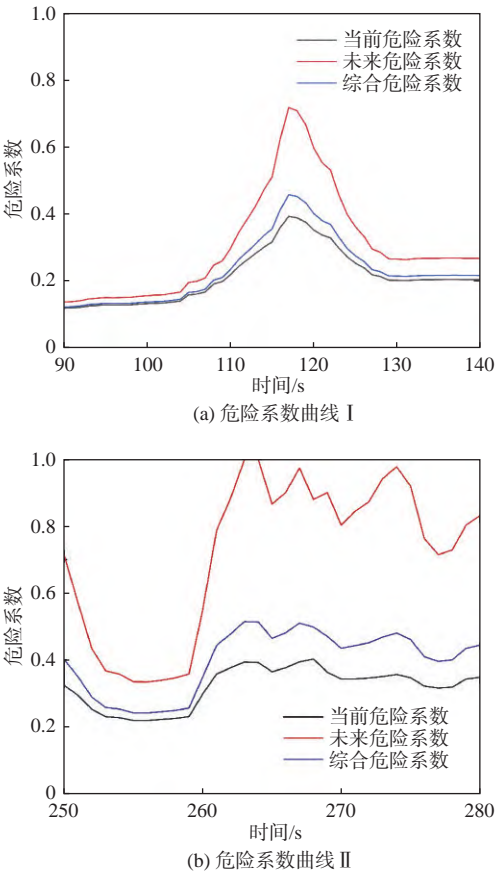


图 8 确定综合危险系数组成权重

Fig. 8 Weight determination of comprehensive risk factor

图 8(a) 中的 117 s 时, 当前危险系数为 0.39, 未来危险系数为 0.71, 此时人为判断其并不属于危险情况, 故需将计算得出的综合危险系数降至 0.5 以下, 防止造成应急决策虚警, 由此可得, 当前危险系数权重区间为 (65%, 100%); 图 8(b) 中的

263 s 时,当前危险系数为 0.39,而未来危险系数已经高达 0.99,此时人为判断其属于危险情况,故需要将综合危险系数提高至 0.5 以上,防止造成应急决策漏警,由此也可以得出当前危险系数权重区间为 (0%, 81.9%)。综合以上 2 个区间,并结合当前危险系数和未来危险系数的特性,故将 2 类危险系数权重分别设为 80% 和 20% 时,综合危险系数能够兼顾当前危险系数的实时性和未来危险系数的预测性,并且减少应急决策虚警和漏警,最终试验确认综合危险系数计算式为

$$\rho = 0.8 \times \rho_1^* + 0.2 \times \rho_2^* \tag{15}$$

待综合危险系数计算完成后对结果进行分类,由此确定综合危险等级,如表 4 所示。

不同危险等级对应的分级响应措施由 AUV 搭载的应急工况用执行机构决定。图 9 为某 AUV 应急相关传感器和执行机构布置示意图。AUV 搭载常规传感器包括对底高度计、深度计和组合惯性导航模块等,测量实时速度、位姿、深度和对底高度,与应急控制相关的执行机构包括

表 4 综合危险系数与危险等级的对应关系
Table 4 Corresponding relationship between comprehensive risk factors and risk levels

综合危险系数 ρ	危险等级
<0.25	无危险
0.25~0.5	轻度危险
0.5~0.75	中度危险
>0.75	重度危险

艏部推进器、应急抛载块、艏部水平舵和转向舵。抛载释放后,AUV 会获得较大向上的正浮力,从而快速应急自救。但由于抛载块不可回收,抛载应急仅一次有效,故实际系统通常将应急抛载作为最危急的应急响应措施。而水平舵、转向舵、推进器等执行机构是 AUV 在正常航行期间应急响应干预的主要措施。由文献 [19] 可知,多执行机构组合动作效果会优于单个执行机构的应急响应效果。为此,表 5 建立了应急执行机构与 AUV 危险等级的对应关系,随着危险等级的提升,呈现出响应措施逐级递增、执行机构逐渐增多的应急控制策略。

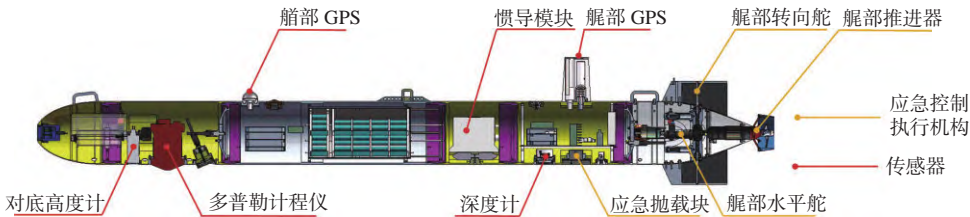


图 9 AUV 传感器和执行机构布置示意图
Fig. 9 Layout diagram of AUV sensors and actuators

表 5 危险等级与应急响应措施的对对应关系
Table 5 Corresponding relationship between risk levels and emergency response measures

危险等级	应急响应措施			
	推进器停止	满上浮舵	满方向舵	抛载
无危险	否	否	否	否
轻度危险	是	否	否	否
中度危险	是	是	否	否
重度危险	是	是	是	是

AUV 应急系统首先根据表 2 的判断条件确定是否进入应急判断。进入应急判断后,若无危险,则 AUV 执行正常主控制程序;若轻度危险,则暂停当前任务,停止推进器,待轻度危险消除后继续执行主控制程序;若中度危险,则停止当前任务,停止推进器,打满上浮舵上浮;若重度危险,则停止当前任务,停止推进器,打满上浮舵和方向舵(左舵或右舵),且执行应急抛载。其中,

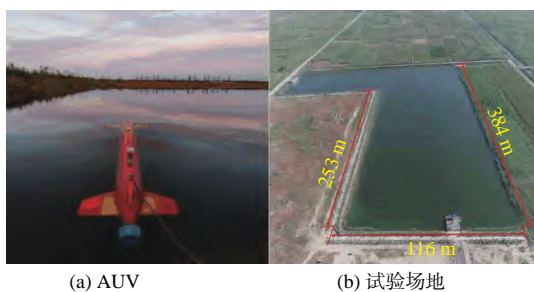
满方向舵作用是利用 AUV 在回转时产生的“尾重”特点,尽可能减少触底的可能性。

4 应急响应策略湖试验证

4.1 试验设备介绍

试验 AUV 及湖试场地如图 10 所示。AUV 长 2 000 mm,直径 240 mm,干重 89 kg,巡航速度约 1.5 m/s,试验场地长宽深约 384 m×116 m×20 m。

AUV 控制系统由地面单元和艇载单元组成,如图 11 所示。地面单元包括操作员和地面控制站,艇载单元包括上层控制节点、主控节点、下层控制节点(包括船部和艏部节点)和环境、姿态感知节点。AUV 航行任务可以分为定深航行和定高航行,在 AUV 航行任务开始之前,操作人员需要通过地面控制站在 AUV 上层控制节点中设置任务模式、航行时间和航行距离等参数。待参数设



(a) AUV

(b) 试验场地

图10 试验 AUV 和湖试场地

Fig. 10 Lake test AUV and test site

置完成以后, 操作员在地面控制站中点击开始执行任务, 上层控制节点开始接收由环境、姿态感知节点发送的位置、姿态和障碍物等信息, 并根据当前的任务模式计算相关制导、控制指令, 然后再将分配好的控制指令分别发送到艏部节点和艉部节点, 艏部节点最后将控制指令发送到艏部舵机, 并通过舵机和推进器的实时反馈实现闭环

控制。

AUV 在艏部、艉部舵机和推进器的共同作用下执行预定航行任务, 当 AUV 需要应急控制时, 抛载模块也会成为执行机构的一部分, 按照控制系统指令进行动作。当控制系统的抛载指令通过上层控制节点下达后, 会经由主控节点转发, 直接作用于抛载模块继电器, 当抛载释放后 AUV 正浮力增大, 加速上浮至水面。

湖试试验采用 AUV 常见的定深航行和定高航行试验任务来验证综合危险系数与应急响应策略的合理性和有效性。

4.2 定深航行试验及分析

图 12 为 AUV 执行定深航行任务的时序图, AUV 定深 3 m, 航速约 0.5 m/s。图中显示了主动安全领域距离、被动安全领域距离与实时深度、河床高度的结果。

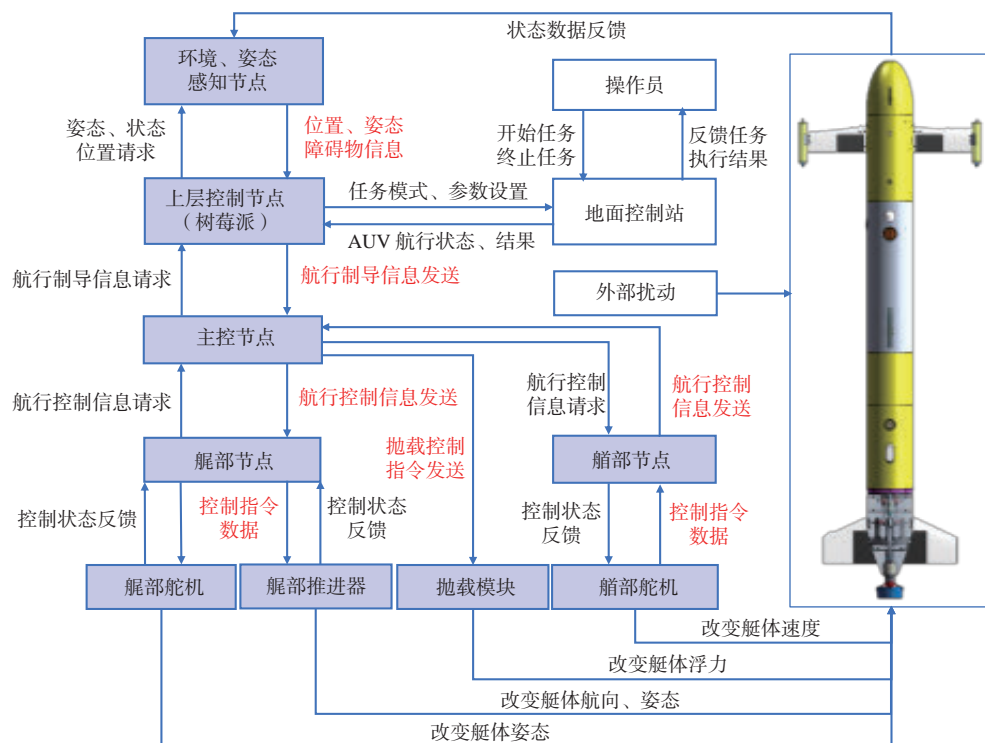


图11 试验 AUV 控制架构

Fig. 11 Control architecture for AUV testing

由图 12 可知, AUV 在开始航行后快速下潜至 3 m 深度。提取定深航行过程时间段①~④进行讨论, 时间段①和③内河床高度分别降低 10.34 和 8.52 m, 在此期间主动安全领域距离随着速度和纵倾不变而稳定在 6~7 m; 时间段②和④内河床高度分别升高 7.3 和 3.68 m, 在该时间段内 AUV 主动安全领域距离也随着速度和纵倾不变, 依旧保持在 6~7 m。

全航程危险系数结果如图 13 所示。整个定

深航行过程中, 综合危险系数变化区间为 0.05~0.13, 且最大值出现在时间段①之前, 此时河床较浅且 AUV 正以负纵倾下潜俯冲, 故应急系统计算危险系数增加, 即触底风险增大。在时间段①和③内河床高度持续下降, 但综合危险系数分别只下降了 0.08 和 0.04, 在时间段②和④内河床高度持续升高, 但综合危险系数分别只升高了 0.037 和 0.012。结果表明, 当河床高度起伏变化, 且 AUV 对底高度与近底安全领域距离相差较大

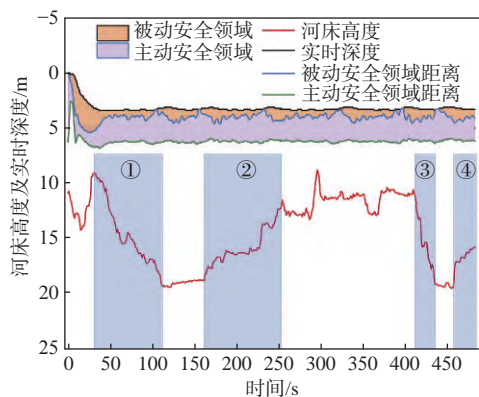


图12 AUV定深航行任务时序图

Fig. 12 Sequence diagram of AUV for fixed depth navigation

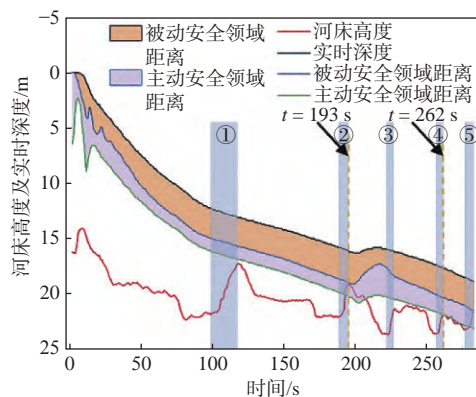


图14 AUV定高航行任务时序图

Fig. 14 Sequence diagram of AUV for fixed height navigation

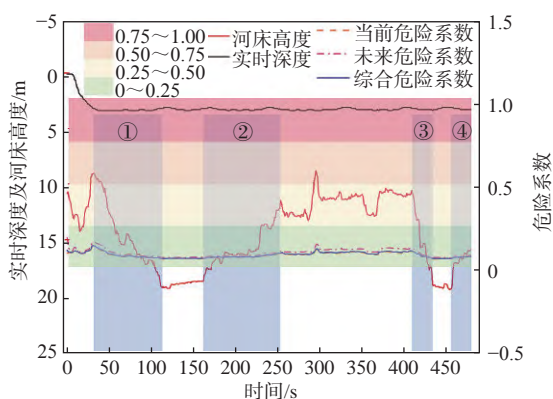


图13 定深航行危险系数曲线

Fig. 13 Risk factor curve of fixed depth navigation

时,综合危险系数不会显著变化。由定深航行结果可知,当河床高度与主动安全领域边界距离较远时,AUV处于相对安全的状态,此时综合危险系数随河床起伏变化较小,故不会造成应急决策虚警,可提高近底应急响应策略的有效性。

4.3 定高航行试验及分析

考虑湖试安全和风险可控需求,以AUV原生控制系统中自带的应急系统为底层安保措施开展定高航行试验。在原生控制系统中嵌入本文的近底应急响应策略,但不触发执行应急响应措施,以避免与系统自带的应急系统发生串扰。以触发系统自带应急措施的某一次定高航行试验为例,该航次AUV航速较低,操纵性不足,在航行285s后触发系统自带的应急响应措施,AUV强制上浮结束任务。主动安全领域距离和被动安全领域距离、实时深度与河床高度的对比结果如图14所示。

从第100s后河床高度有5次降低过程,时间段①~⑤的河床高度变化分别为4.4、2.85、2.28、1.61和1.56m。在时间段①内,河床高度与主动安全领域边界相距最小时仅0.41m。由于AUV

持续以负纵倾下潜,导致从第193s开始,主动安全领域距离边界出现低于河床高度的情况,时间段②内差值最小为-1.15m,造成AUV触底风险增大。由于AUV继续以负纵倾下潜,而试验水域河床深度仅20~30m,导致主动安全领域边界与河床高度频繁接近甚至出现河床高度小于主动安全领域的距离。从第262s即时间段④开始,河床高度持续减小导致主动安全领域距离与河床高度接近,触底风险进一步增加。最终,当河床高度与被动安全领域距离为0.11m,与主动安全领域距离最小为-2.7m时,触发AUV自带应急措施强制结束航行试验任务。

接着分析全航程危险系数结果,如图15所示。分析时间段①~⑤中,计算危险系数也有明显突变,综合危险系数在5个时间段内的变化值分别为:0.31、0.53、0.15、0.26和0.41。虽然时间段①内河床高度变化最大为4.4m,但此时河床高度与主动安全领域边界并无接触,所以AUV危险性较小,危险系数较低。在时间段②内,综合危险系数在193s时增大到0.79,这是由于河床高度急剧减小且已越过主动安全领域边界,导致AUV触底风险增大,但随后当河床高度又增大后,综合危险系数随之降低。在第262s时,即时间段⑤内,AUV以负纵倾持续航行,河床高度越过主动安全领域边界,且靠近被动安全领域边界,危险系数持续增大,但危险系数并不作为此次AUV航行触发应急响应的数据源,AUV实际是依靠底层自带应急响应逻辑而结束航行任务。由定高航行结果(图15)可知,在相对近底航行时,当河床高度与主动安全领域边界有越界时,AUV危险性增加,此时,综合危险系数变化与河床高度变化强相关,能够起到减少应急决策漏警的作用,从而在AUV实际遇险时能够及时触发应急响应,提高AUV航行的近底安全性。

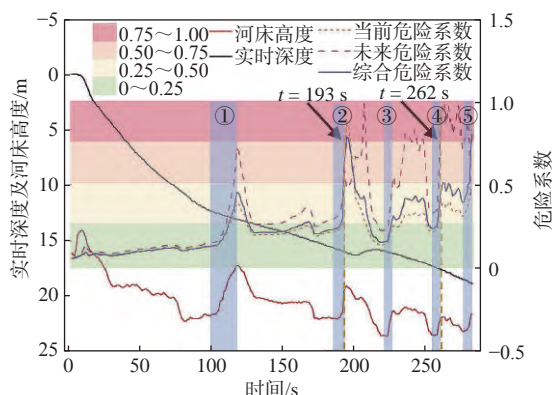


图15 定高航行危险系数计算

Fig. 15 Calculation of risk factor for fixed height navigation

5 结 语

受水面船舶安全领域启发,本文提出了基于纵倾与速度的AUV近底动态安全领域模型,进而建立了分级应急响应措施,并进行起伏地形下的湖试试验,验证了AUV近底应急预警逻辑和框架的合理性和有效性。

在定深航行过程中,当河床高度与主动安全领域距离相距较远时,尽管河床高度变化超过10 m,但综合危险系数变化范围仅0.08, AUV综合危险系数与河床高度变化相关性较弱。故AUV在起伏地形航行时近底应急预警策略不会因河床高度频繁变化而造成应急决策虚警,故而提高了AUV航行的安全性。

在定高航行过程中,当河床高度与主动安全领域距离边界较近或越界时, AUV综合危险系数与河床高度变化呈现明显的相关性。故在起伏地形航行时, AUV可以通过实时状态预测并计算综合危险系数,进而能够起到减少应急决策漏警,从而起到提高航行安全性的作用。

参考文献:

- [1] 冯正平. 国外自治水下机器人发展现状综述[J]. 鱼雷技术, 2005, 13(1): 5-9.
FENG Z P. A review of the development of autonomous underwater vehicles (AUVs) in western countries[J]. Torpedo Technology, 2005, 13(1): 5-9 (in Chinese).
- [2] 徐玉如, 庞永杰, 甘永, 等. 智能水下机器人技术展望[J]. 智能系统学报, 2006, 1(1): 9-16.
XU Y R, PANG Y J, GAN Y, et al. AUV-state-of-the-art and prospect[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2006, 1(1): 9-16 (in Chinese).
- [3] BRITO M P, GRIFFITHS G. A Markov chain state transition approach to establishing critical phases for AUV reliability[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2011, 36(1): 139-149.
- [4] ERNITS J, DEARDEN R, PEBODY M. Automatic fault detection and execution monitoring for AUV missions

[C]//2010 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles. Monterey, CA, USA: IEEE, 2011: 2-4.

- [5] QUIDU I, HETET A, DUPAS Y, et al. AUV (redormor) obstacle detection and avoidance experimental evaluation [C]//OCEANS 2007 - Europe. Aberdeen, UK: IEEE, 2007: 1-6.
- [6] FUJII Y, TANAKA K. Traffic capacity[J]. Journal of Navigation, 1971, 24(4): 543-552.
- [7] GOODWIN E M. A statistical study of ship domains[J]. Journal of Navigation, 1975, 28(3): 328-344.
- [8] TAM C K, BUCKNALL R, GREIG A. Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters[J]. Journal of Navigation, 2009, 62(3): 455-476.
- [9] PIETRZYKOWSKI Z, URIASZ J. The ship domain - a criterion of navigational safety assessment in an open sea area[J]. Journal of Navigation, 2009, 62(1): 93-108.
- [10] LEWISON G R G. The risk of a ship encounter leading to a collision[J]. Journal of Navigation, 1978, 31(3): 384-407.
- [11] DAVIS P V, DOVE M J, STOCKEL C T. A computer simulation of marine traffic using domains and arenas [J]. Journal of Navigation, 1980, 33(2): 215-222.
- [12] HEGDE J, UTNE I B, SCHJØLBERG I, et al. Application of fuzzy logic for safe autonomous subsea IMR operations[C]//Proceedings of the 25th European Safety and Reliability Conference. Zurich, Switzerland: ESREL, 2015: 415-422.
- [13] KUCHAR J E, DRUMM A C. The traffic alert and collision avoidance system[J]. Lincoln Laboratory Journal, 2007, 16(2): 277-296.
- [14] ERLIEN S M, FUJITA S, GERDES J C. Shared steering control using safe envelopes for obstacle avoidance and vehicle stability[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(2): 441-451.
- [15] WANG H J, ZHAO D H, BIAN X Q, et al. Research on autonomous planning for AUV in unstructured environment[C]//International Conference on Intelligent Computing. Kunming, China: Springer, 2006: 586-599.
- [16] SUH J, KIM B, YI K. Design and evaluation of a driving mode decision algorithm for automated driving vehicle on a motorway[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(11): 115-120.
- [17] HEGDE J, UTNE I B, SCHJØLBERG I. Development of collision risk indicators for autonomous subsea inspection maintenance and repair[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 44: 440-452.
- [18] HEGDE J, HENRIKSEN E H, UTNE I B, et al. Development of safety envelopes and subsea traffic rules for autonomous remotely operated vehicles[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2019, 60: 145-158.
- [19] 施生达. 潜艇操纵性[M]. 国防工业出版社, 1995: 174-177.
SHI S D. Maneuverability of submarine[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995: 174-177 (in Chinese).
- [20] PRESTERO T. Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle[D]. Boston, Massachusetts, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2009.