

基于动态安全领域的水下机器人近底应急决策

该文章较为特别的点是：

1. 对 AUV 的模型进行了测试验证
2. 对于近底情况建立了**安全领域模型**，用于指导 AUV 的应急策略，这个模型值得参考。

建模和验证

运动学和动力学模型：

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

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

式中，作用力 Z 和力矩 M 为：

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

将 (3) 代入 (2)：

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

对于公式 (4) 所建立的模型，文章通过仿真和试验的方式，建立了峰值误差 E_{rp} 和差值误差 E_{rr} ，将两者数据对比。

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

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

其中仿真数据为 $S(t)$ ，实验数据为 $S'(t)$ 。

近底安全领域模型

下降深度规律

文章定义纵倾大于 0（AUV 机头朝上）为安全性较高，反之纵倾小于 0 时，较为危险。

为了衡量从危险状态（ $\theta < 0$ ）恢复到安全状态（ $\theta = 0$ ）所需要的时间，文章定义了 T_θ ：

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

$(R^2 = 0.973)$

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。

T_θ 表示在初始纵倾角 θ 下，AUV 执行上浮舵（ 10° ）指令后，恢复到安全状态所需时间。

除了拟合时间，还拟合了安全距离：

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 ：

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

联合式 (7) 和式 (8)，可得 D_2 ：

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

$(R^2 = 0.985)$

(8) 式好像有两处问题，我认为应该这样：

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

式中 T_0 代表执行器的滞后时间。此外，定义在时间 T_0 内 AUV 下降的深度为被动安全领域距离：

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

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:

$$D_1 = 0.001\,82u + 0.447\,22\theta - 0.019\,02\theta^2 + 0.033\,89\theta u \quad (R^2 = 0.979) \quad (11)$$

AUV 近底动态安全领域模型

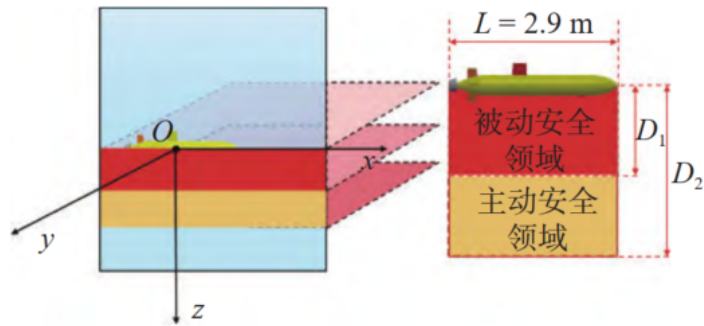


图 4 AUV 近底动态安全领域模型示意图

Fig. 4 Diagram of bottoming dynamic safety domain model

如图 4 所示, 近底动态安全领域模型的边界由 D_1 和 D_2 共同组成, 包括被动安全领域和主动安全领域。该领域模型会在 AUV 行进过程中根据 u 和 θ 实时变化。

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。

应急响应策略

该文章提出的“响应策略”是独立于控制系统的, 应急响应策略框架如图 5 所示:

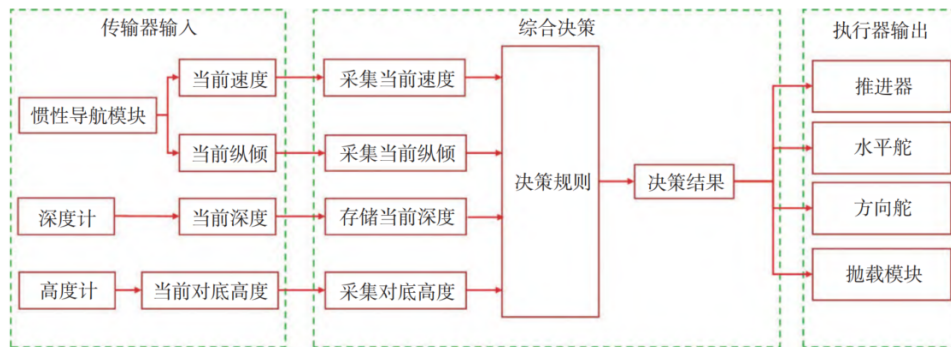


图 5 AUV 应急响应决策框架

Fig. 5 AUV emergency response framework

在图 5 所示的“综合决策”层会根据系统状态计算危险系数, 进行决策。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。

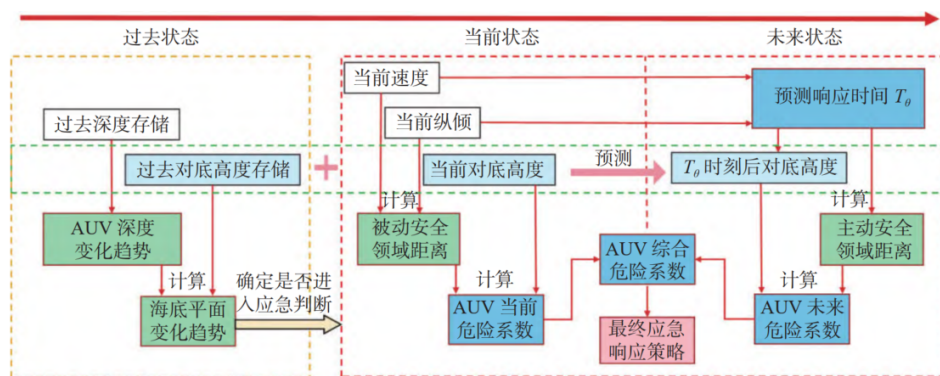


图 6 AUV 多状态应急判断逻辑

Fig. 6 AUV multi-state emergency judgment logic