

doi: 10.7690/bgzdh.2022.10.018

海流环境下 AUV 航行偏移影响研究

王郁茗, 李 博, 周义勇, 冷相文

(海军大连舰艇学院水武与防化系, 辽宁 大连 116018)

摘要: 针对不同海流环境会对自主式水下无人飞行器(autonomous underwater vehicle, AUV)航行船位产生不同程度偏移的问题, 构建一种海流环境下 AUV 运动模型, 并基于海流区内 AUV 航行船位距离偏移及船位方位偏移评价指标, 分析海流环境对 AUV 航行偏移的影响规律。结果表明: 当海流流向或流速达到一定量值时, 对 AUV 航行船位的距离和方位偏移影响陡然增加; 相比海流流向, 海流流速对 AUV 船位偏移影响更为直接; 不同方向及大小的海流在一定情况下会对 AUV 航行船位偏移产生一致的影响; 通过设置 AUV 船位偏移阈值, 可为 AUV 航路规划提供辅助决策, 避开存在相应海流阈值的海域, 从而提高 AUV 对武器、装备及物资的远距离精准投送能力。

关键词: 自主式水下无人飞行器; 海流环境; 航行船位距离偏移; 航行船位方位偏移

中图分类号: TJ83 **文献标志码:** A

Research on Influence of AUV Deviation in Ocean Current Environment

Wang Yuming, Li Bo, Zhou Yiyong, Leng Xiangwen

(Department of Underwater Weapon and Chemical Defense, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)

Abstract: To Solve the problem that the ship position of an autonomous underwater vehicle (AUV) will shift in different degrees in different ocean current environments, a model of AUV motion in ocean current environment is established, and based on the evaluation index of ship position distance shift and ship position azimuth shift in ocean current area, the model of AUV motion in current environment is established. The influence of ocean current environment on AUV sailing deviation is analyzed. The results show that when the current direction or velocity reaches a certain value, the influence on the distance and azimuth deviation of AUV navigation increases sharply. Compared with the current direction, the current velocity has a more direct influence on the position deviation of AUV navigation; different directions and sizes of currents will have a consistent influence on the position deviation of AUVs navigation under certain circumstances; By setting the threshold of AUV position shift, it can provide auxiliary decision-making for AUV route planning, avoid the sea area with the corresponding current threshold, and improve the ability of AUV to deliver weapons, equipment and materials remotely and accurately.

Keywords: AUV; ocean current environment; sailing ship position distance shift; sailing ship position azimuth shift

0 引言

自主式水下无人飞行器(AUV)在军事应用中的地位越来越突出, 可以作为运送武器、装备、物资的水下隐蔽平台, 为成功完成水下运输、投掷任务, 应保证 AUV 航行时船位的准确性。AUV 水下航行会受到诸多海洋环境的干扰, 而海流是最重要的影响因素之一, 一定程度的海流会造成 AUV 航行船位及方位的偏移, 从而影响 AUV 航行船位的精度^[1-2]。通常 AUV 在根据具体任务进行航路规划时主要为手动添加航路点制作计划航线; 因此, 在航路规划时应尽可能避免规划的航路经过对 AUV 航行船位偏移影响较大的海流区域。而不同的海流环境会对 AUV 航行船位造成不同的偏移影响, 笔

者通过构建海流环境下 AUV 航行偏移模型, 分析不同海流环境对 AUV 航行船位距离及方位偏移的影响规律; 基于分析结论, 结合预报的海流数据即可为 AUV 航路规划提供辅助决策, 使 AUV 避开影响较大的海流区, 从而保证 AUV 对武器、装备及物资的远距离精准投送。

1 海流环境下 AUV 运动模型构建

AUV 水下航行受到海流影响后, 其航行船位会产生一定程度的偏移, 这主要体现在偏移的距离和方位 2 个要素上^[3]。AUV 在水下航行时, 可看作为水平面上的 3 自由度运动, 即前后向运动、左右向运动和绕垂轴转动, 同时忽略掉垂直面运动对水平面运动的影响, AUV 的运动模型可表示为^[4]:

收稿日期: 2022-06-07; 修回日期: 2022-07-03

基金项目: 海军大连舰艇学院科技发展基金(DJYKYKT2021-051)

作者简介: 王郁茗(1990—), 男, 山东人, 博士, 讲师, 从事无人水雷反水雷作战研究。E-mail: 18041155370@163.com。

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= \mu \cos \Psi - v \sin \Psi \\ \dot{y}_1 &= \mu \sin \Psi + v \cos \Psi \\ \dot{\Psi} &= r \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： (x_1, y_1) 为 AUV 在地面坐标系下的水平面坐标； Ψ 为航向角； μ 为前向速度； v 为侧向速度； r 为航向角速度。

当 AUV 于海流区航行时，AUV 整体会受到海流的干扰，发生船位上的方位偏移，方位偏移的同时会造成船位距离的偏移^[5]，海流环境下 AUV 航行偏移情况如图 1 所示。在海洋大环境下可将 AUV 看作质点，由于海流通常在水平面运动；因此，对 AUV 造成的干扰只会影响 AUV 的 2 维运动，而不会在垂直方向造成影响。由于一定时间和区域内的海流可看作定常流；因此，AUV 在受流后航行船位将产生一个固定偏移方位角 Ψ_B ，但 AUV 航向角 Ψ 可在控制系统的作用下对抗水流扰动保证基本不变^[6]。则海流环境下 AUV 运动模型可表示为：

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_2 &= \Delta \mu \cos \Psi_B - \Delta v \sin \Psi_B \\ \dot{y}_2 &= \Delta \mu \sin \Psi_B + \Delta v \cos \Psi_B \\ \dot{\Psi} &= r \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 (x_2, y_2) 为 AUV 在受流影响后地面坐标系下的水平面坐标； $(\Delta \mu, \Delta v)$ 为在海流作用下，AUV 改变后的运动速度； Ψ_B 为 AUV 受流影响后固定偏移的方位角。假定 AUV 具有良好的左右对称性，则受流影响后 AUV 偏移的距离 ΔD 为 $\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2}$ ，AUV 在受到海流影响后的偏移方位角 Ψ_B 为：

$$\Psi_B = \arcsin(\Delta D / D_2 \cdot \sin \Psi_A) \quad (3)$$

式中 D_2 为 AUV 受流影响后实际航行的距离。按照海上航行误差判定方式，AUV 航行船位距离偏移情况以船位偏移距离与实际航行距离的比值表示；船位方位偏移以偏移角度表示。

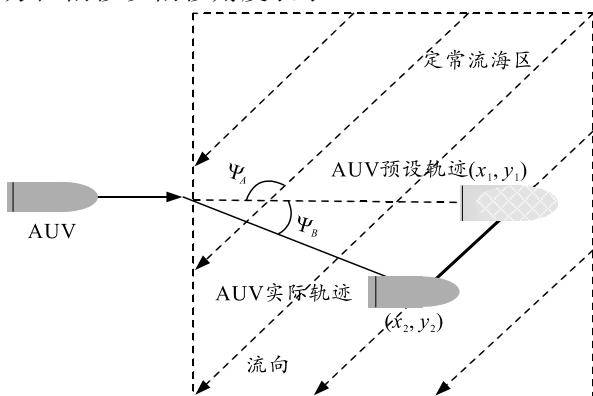


图 1 海流区内 AUV 航行偏移情况

2 海流区内 AUV 航行偏移分析

2.1 海流区内 AUV 船位距离偏移分析

海流表现为空间和时间上的连续、方向与大小不确定性的非均匀流场，通过长期检测发现，包括中国沿海在内大部分海域海流速度在 $0 \sim 1$ kn 之间，流速高于 1 kn 的海区面积占有比例较低，在海洋环境复杂的中国南海即使是 2 月平均余流出现相对异常现象，流速相对较大时，最大也仅为 1.66 kn，不同海流速度段海域面积所占比例见表 1^[7]。由此设海流流速范围在 $0 \sim 1.5$ kn，海流流向与 AUV 航向的夹角范围在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 之间。AUV 在水下执行运送武器、装备、物资等军事任务时，为保证运送稳定，航速通常为 2~5 节，分析时设 AUV 航速为典型的 4 节航速^[8]。同时，AUV 控制系统通常要求在流速不大于 3 kn 的海流区域内航行，分析时设海流流速范围在 $0 \sim 1.5$ kn，海流流向与 AUV 航向的夹角范围在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 之间。

表 1 不同海流速度段海域面积所占的比例

海流速度/kn	海域所占比例/%
0~0.4	60
0.4~1	35
>1	5
合计	100

根据海流环境下 AUV 运动模型，得出典型海流区域内航速为 4 节的 AUV 随不同方向、不同速度海流变化的航行船位距离偏移情况如图 2 所示， x 轴为海流流速， y 轴为海流与 AUV 航向的夹角， z 轴为在不同流向流速影响下，AUV 航行船位的距离偏移占实际航程的比值。不同的海流虽然流向、流速各有不同，但在某种情况下也会对 AUV 航行造成相同的船位偏移。

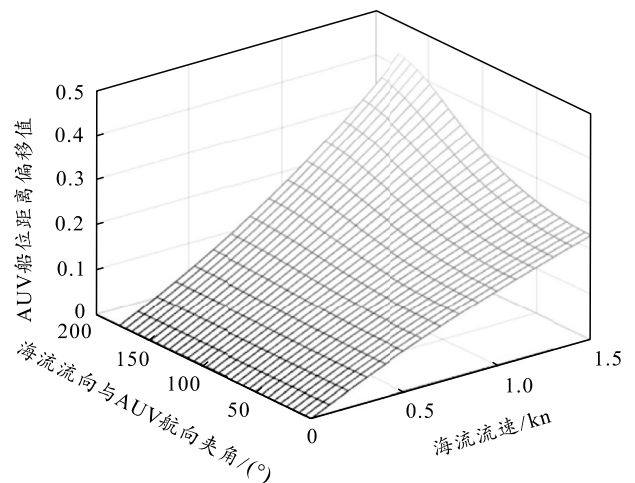


图 2 海流影响下船位偏移情况

基于海流影响下船位距离偏移数据绘制不同流速、流向海流的等值线如图 3 所示，图中每条曲线为在不同大小、不同方向海流作用下造成的相同船位距离偏移情况，同样以距离偏移量与实际航行距离的比值表示，数值由色框显示。

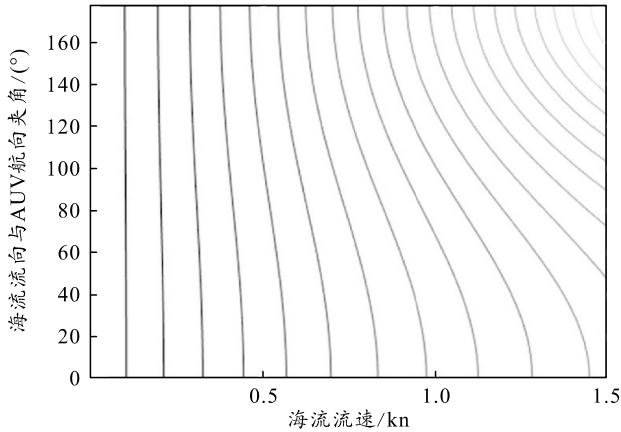


图 3 不同海流影响下船位距离偏移情况等值线

通过对图 2 及 3 比较分析可以得出：

1) 海流流速一定时，随着海流与 AUV 航向夹角的增大，AUV 的船位距离偏移也随之增大。当流速较小时，任意方向的海流对 AUV 航行船位距离偏移产生的影响都较小；流速较大时，距离偏移随海流流向变化明显；当流速超过航速的 1/3 时，船位距离偏移随夹角的增大而急剧增加，任意流向海流造成的偏移量均能达到实际航程的 1/4 以上。

2) 海流流向一定时，AUV 船位距离偏移亦会随流速增大而增加。当海流流向超过 135°后，船位距离偏移随着流速增加急剧增大；当流向接近 140°、流速达到航速的一半时，AUV 船位距离偏移达到实际航程的 1 倍；当海流流向与 AUV 航向的夹角较小时（一般 20°以内），距离偏移程度随流速变化不明显。

2.2 海流区内 AUV 船位方位偏移分析

根据海流环境下 AUV 运动模型，得出典型海流区域内航速为 4 节的 AUV 随不同方向、不同速度海流变化的航行船位方位偏移情况如图 4 所示，x 轴为海流流速，范围在 0~2.5 kn；y 轴为海流流向与 AUV 航向的夹角；z 轴为在不同流向流速影响下，AUV 航行船位的方位偏移值。

同样，不同海流也会对 AUV 的航行船位方位偏移造成相同影响，基于海流影响下船位方位偏移数据绘制不同流速、流向海流的等值线如图 5 所示。图中每条曲线为在不同大小、不同方向海流作用下

造成的相同船位方位偏移情况，偏移角度表示，数值由颜色栏显示。

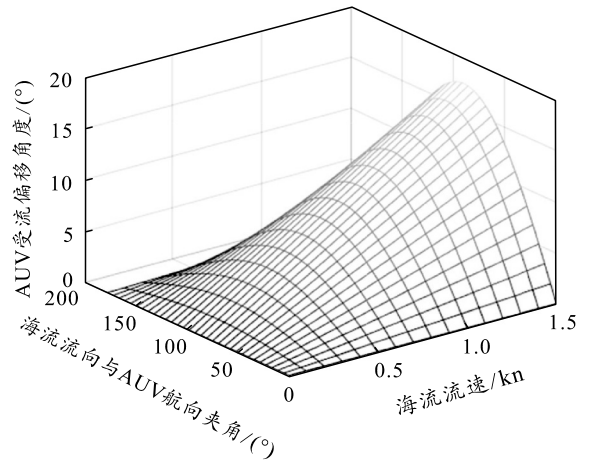


图 4 海流影响下 AUV 船位方位偏移情况

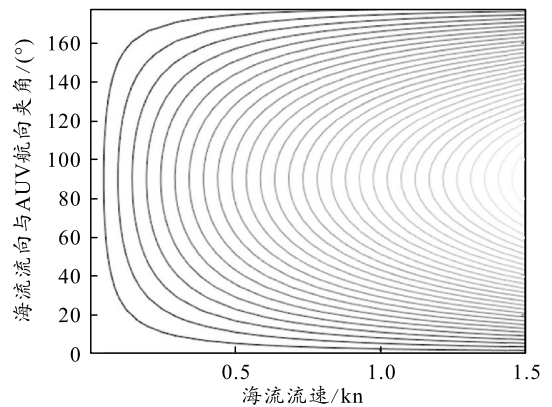


图 5 不同海流作用下船位方位偏移情况等值线

通过对图 4 及 5 进行比较分析可以看出：

1) 海流流速一定时，来流越接近 90°，方位偏移越大，且流速越大，方位偏移的角度随来流与 AUV 航向夹角的变化而快速增大。当流速较小时，流向对 AUV 船位方位偏移影响较小，随着流速增加，方位偏移受海流流向影响趋于明显。

2) 海流流向一定时，AUV 方位偏移随流速增大而增加，且来流夹角越接近 90°，方位偏移随海流流速的增加而快速增大。海流流向与 AUV 航向的夹角位于 0°~20°及 160°~180°之间时，方位偏移受流速影响较小，偏移在 10°以内。

3 航行偏移影响在航路规划中的应用

由上节分析可见，当海流流向或流速达到一定量值时，对 AUV 航行船位的距离和方位偏移影响都陡然增加，相比海流流向，海流流速对 AUV 船位偏移影响更为直接。此外，不同方向、不同大小的海流在某些情况下会对 AUV 航行船位偏移产生一致的影响。

为避免海流环境下，不同方向、大小的海流使 AUV 的船位在距离及方位上产生较大偏移，影响任务执行的时间及效果。可在 AUV 航路规划时，提前设置 AUV 船位偏移阈值，从而反推能够影响 AUV 达到偏移阈值海流的流向、流速阈值；再基于上节分析得到的海流区内 AUV 航行船位偏移受流影响规律，通过比对预报的海流数据，即可在设置航路时有效避开将会造成 AUV 偏移的海流环境，从而保证 AUV 航行的准确性。

以 AUV 航行船位距离和方位偏移阈值 10% 及 5° 为例，在 AUV 航速等条件与上述一致的情况下，基于这 2 个偏移阈值反推海流流向、流速阈值，由此可列出推算表格，如表 2 所示。

表 2 海流流速、流向阈值推算

距离偏移阈值 10%		方位偏移阈值 5°	
流速/kn	流向夹角/(°)	流速/kn	流向夹角/(°)
0.45	140	0.45	90
0.50	100	0.50	120
0.55	20	0.55	52
		0.60	45
		0.65	42
		0.70	40

上表给出了在满足距离偏移阈值 10%、方位偏移阈值 5° 的情况下，海流流速、流向的阈值，基于表中数据即可有效规划 AUV 航行路线，例如：当途经海域的海流流速为 0.5 kn 时，应将 AUV 计划航向与流向的夹角控制在 100° 以上；当海流流速达到 0.6 kn 以上时，虽然方位偏移阈值在某些角度可控制在 5° 以内，但对于距离偏移阈值则始终超过 10%。因此，在航路规划时应考虑避开具备该海流特征的海域。

4 结束语

笔者建立海流环境下 AUV 运动模型，通过比较分析海流区内 AUV 航行船位距离偏移及船位方

位偏移，总结海流环境下 AUV 航行偏移的影响规律。在实际应用中可根据提前规定的 AUV 航行偏移阈值推算相应的海流流向、流速阈值，基于影响规律及推算的阈值数据，可在 AUV 航路规划时提供辅助决策。下一步将结合部队使用实际，基于理论模型分析结论开展实际应用数据验证，根据使用海区实际海流情况，建立海流流速、流向阈值推算表，从而辅助 AUV 航路规划制定，提高 AUV 对武器、装备及物资的远距离精准投送能力。

参考文献：

- [1] 刘丽萍, 王红燕. 基于海流观测的欠驱动 AUV 自适应反演滑模轨迹跟踪[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2020, 53(7): 745-753.
- [2] 姚绪梁, 王峰, 王景芳, 等. 不确定海流环境下水下机器人最优时间路径规划[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(6): 1302-1310.
- [3] 郭银景, 孟庆良, 孔芳, 等. AUV 路径规划算法研究现状与展望[J]. 计算机科学与探索, 2020, 14(12): 1981-1994.
- [4] 施淑伟, 严卫生, 高剑, 等. 常值海流作用下的 AUV 水平面路径跟踪控制[J]. 兵工学报, 2010(3): 375-379.
- [5] 吴小涛, 赵冉, 乔冰. 基于实航数据的定常海流动力学模型验证评估[J]. 数字海洋与水下攻防, 2021, 4(4): 294-300.
- [6] 王晓杰, 李硕, 曾俊宝. 基于 IMX6Q 的便携式自主水下机器人控制器设计与实现[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(8): 212-217.
- [7] 胡冬, 陈希, 张守业, 等. 南海东沙群岛南侧海域的潮流余流特征[J]. 解放军理工大学学报, 2015, 16(4): 369-372.
- [8] MILLER A, MILLER B, MILLER G. On AUV Control with the Aid of Position Estimation Algorithms Based on Acoustic Seabed Sensing and DOA Measurements[J]. Sensors, 2019, 19(24): 5520.