

【引用格式】蒋平, 李加强. 多机动控位水雷队形控制技术[J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5(4): 369-373.

多机动控位水雷队形控制技术

蒋平^{1,2}, 李加强^{1,2}

(1. 中国船舶集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003;

2. 清江创新中心, 湖北 武汉 430076)

摘要 根据机动控位水雷编队后的队形控制问题, 结合水雷隐蔽、高效、可靠通信的应用场景, 为尽可能减少水声通信数据交互信息, 提出了一种基于领航者位置信息的领航-跟随者控制方法。针对不同跟随态势, 设计了基于模糊 PID 的领航者跟随者速度控制器, 并进行了仿真实验验证。仿真结果证明了这种机动控位水雷控制方法的快速和稳定。

关键词 机动控位水雷; 领航-跟随者方法; 模糊 PID

中图分类号 TJ61 **文献标识码** A **文章编号** 2096-5753(2022)04-0369-05

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.04.013

Formation Control Technology of Multi-maneuverable Mine

JIANG Ping^{1,2}, LI Jiaqiang^{1,2}

(1. No. 710 R&D Institute, CSSC, Yichang 443003, China;

2. Qingjiang Innovation Center, Wuhan 430076, China)

Abstract Aiming at the problem of formation control after the formation of maneuvering position mines, and to reduce the data interaction information of underwater acoustic communication as much as possible, a leader-follower control method based on leader position information is proposed combined with the application scenarios of concealed, efficient and reliable communication of mines. According to different following situations, a leader-follower speed controller based on fuzzy PID is designed and verified by simulation experiments. The simulation results show that the method is fast and stable.

Key words maneuvering position mine; leader-follower method; fuzzy PID

0 引言

机动控位水雷本质上是一种大型 AUV。与 AUV 集群相似, 机动控位水雷编队协作执行任务的能力相较于单个机动控位水雷执行任务具有显著提升。通过各水雷之间的协调与合作, 不仅可以改善单个水雷的基本能力, 而且在各水雷的交互中进一步体现了社会行为。通过共享资源(信息、知

识、物理装置等)扩大完成任务的能力范围, 如分组形成编队能够提高系统的探测能力、导航能力和通信范围等。通过设伏、围捕、齐射、梯队攻击等方式来提高任务的执行效率, 并大大提高了水雷行为的智能化程度。

在水下隐蔽作战中, 机动控位水雷可突破传统水雷位置固定、封锁范围有限的限制, 可以通过集群编队式移动, 更为有效地执行区域覆盖式目标搜

索、协同探测、攻击等任务，共同完成传统水雷无法完成的复杂任务。要实现多机动控位水雷编队协作，队形控制是首先要解决的技术难题。近年来，队形控制已经在无人机、无人船、移动机器人等领域得到了一定应用，水中兵器领域相关高校^[1-2]和院所^[3-4]在水下领域也开展了相关研究，取得了一些研究成果。从已有的文献来看，常用的队形控制方法主要有：领航-跟随者方法、虚拟结构方法、行为融合方法、基于强化学习的方法等，并在此基础上衍生出许多改进和组合方法。

1 领航-跟随者法

领航跟随者方法也被称为主从式编队方法：编队中设置1台AUV作为领航者，领航者按照预定的航路规划航行；编队中其他AUV则作为跟随者，与领航者保持一定的距离，使整体呈现相对固定的队形航行。领航跟随者编队方法简单明了，没有太多复杂理论和计算，跟随者只需要通过观测领航者的运动信息来调整自身运动轨迹，是目前应用最为广泛的编队方法。

机动控位水雷配备了磁罗盘、DVL、GPS/北斗等设备用来进行导航定位解算，是一种具备自主航行能力的新型水雷。机动控位水雷在进行水下组网通信和区域封锁/巡航时，需要通过保持队形来得到更好的效果。由于机动控位水雷本身具备独立的导航能力，因此可让每一条水雷按预先设置的航路行进（每条航路之间保持固定的间距），再通过水声通信交互位置信息，以位置、速度等信息作为队形控制的对象，通过领航-跟随者方法来实现队形控制的工程应用。

对不同面积区域的覆盖封锁，机动控位水雷群的数量也是不定的。为了简化模型并能将多AUV的队形控制方法移植到水雷上，本文选取3条机动控位水雷进行编队，包括1条领航者水雷和2条跟随者水雷。

2 机动控位水雷模型

机动控位水雷从流体结构和动力特性上来分析，是一种典型的欠驱动AUV，其水平面运动动力学和运动学方程^[5]：

$$\begin{aligned} \dot{\eta} &= \mathbf{R}_B^I(\psi)u \\ \mathbf{M}\dot{u} &= \mathbf{C}(u)u + \mathbf{D}u = \boldsymbol{\tau} \end{aligned} \quad (1)$$

式中： $\eta = [x \ y \ \psi]^T$ ，其中 $[x \ y]^T$ 表示机动控位水雷在水平面上的位置信息； ψ 为偏航角； $u = [\mu \ v \ r]^T$ 表示载体坐标系下水雷的前向速度、侧向速度及偏航角速度。

雷体坐标系到大地坐标系的转换矩阵：

$$\mathbf{R}_B^I(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

科里奥利-向心矩阵：

$$\mathbf{C}(u) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -mv + Y_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & mu - X_{\dot{u}}\mu \\ mv - Y_{\dot{v}}v & -mu + X_{\dot{u}}\mu & 0 \end{bmatrix}$$

惯性矩阵：

$$\mathbf{M} = \text{diag}\{m - X_{\dot{u}}, m - Y_{\dot{v}}, I_z\}$$

水动力阻尼矩阵：

$$\mathbf{D} = \text{diag}\{-X_u \ m - Y_v \ -N_r\}$$

机动控位水雷轴向力、侧向力及偏航力矩的外部控制输入：

$$\boldsymbol{\tau} = [\tau_x, \tau_y, \tau_z]$$

对于机动控位水雷来说，几乎不受侧向力，即 $\tau_y = 0$ 。

3 基于位置信息的领航-跟随者法

传统的多AUV在进行领航-跟随编队时，领航者按照事先设定的航路规划航行，跟随者则通过水声通信广播的方式获取领航者的位置和速度信息，自主调整自身的航行路线和速度来保持队形。与常规AUV不同的是，机动控位水雷有2个特点：1)作为水雷，隐蔽性是其重要特征，因此无法频繁的通过水声通信来进行位置信息交互，并且由于相互之间的距离较远，水声通信数据传输量有限，因此需要尽可能的减少交互信息；2)编队中的每一条机动控位水雷，都具备出色的导航定位的能力，且相互间距离足够远，因此编队航行时可不考虑航向偏差和相互规避。

对于对领航者状态信息需求较少的队形控制

方法, 文献[6]和文献[7]中提出了一种仅需要领航者的位置及航向的队形控制器, 而文献[8]设计的控制器只利用了领航者的速度信息。本文结合机动控位水雷的自身特点和应用场景, 设计了一种只需要领航者的位置信息的控制方法。

3 条机动控位水雷组成的编队如图 1 所示, 为简化流程, 假设: 1) 3 条水雷航行时位于同一深度, 这样就将机动控位水雷的运动由 3 维简化到水平面的 2 维平面上; 2) 3 条水雷均按设定航路进行直航, 分别处于互相平行且等间距的航线上, 这样可以更容易地保持队形。

图中 $O_1(x_1, y_1)$ 是领航者的位置, $O_2(x_2, y_2)$, $O_3(x_3, y_3)$ 分别是 2 个跟随者的位置, 整个编队期望保持的队形是以 $O'_2O_1O'_3$ 为定点的三角形, 其中 $O'_2(x'_2, y'_2)$, $O'_3(x'_3, y'_3)$ 是跟随者在编队中的期望位置。

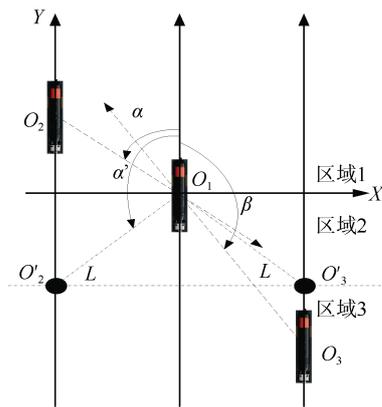


图 1 领航者与跟随者所处位置示意图
Fig. 1 A sketch of the positions of the leader and follower

以伴随者 O_2 的队形控制方法进行分析, α 为 O_1O_2' 和直航方向的夹角, α' 为 O_1O_2 和直航方向的夹角, 伴随者 O_2 在获知了领航者 O_1 的位置信息后, 通过计算:

$$\cos \alpha = \frac{y_2 - y_1}{\sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2}} \quad (2)$$

得出当前 O_2 当前的位置分布, 包含 2 种情况:

$$\begin{cases} \cos \alpha \geq 0, \text{ 位于区域1} \\ \cos \alpha < 0, \text{ 位于区域2和区域3} \end{cases}$$

由图 1 可见, 伴随者 O_2 的期望位置 O'_2 位于区域 2, 有:

$$\cos \alpha' = \frac{y'_2 - y_1}{\sqrt{(y'_2 - y_1)^2 + (x'_2 - x_1)^2}} \quad (3)$$

当伴随者 O_2 位于区域 1 时, 定义该状态为 N_1 , 状态判据为

$$N_1: \cos \alpha \geq 0$$

当伴随者 O_2 位于区域 2 时, 此时又包括 2 种状态, 分别定义为 N_2, N_3 , 状态判据为

$$N_2: \cos \alpha < A$$

$$N_3: A \leq \cos \alpha < 0$$

3 种状态与对应的控制策略见表 1。

表 1 跟随者状态与控制策略

Table 1 State and control policy of the follower

序号	位置	判据	状态	说明	控制方法
1	区域 1	$\cos \alpha \geq 0$	N_1	位于领航者前方	减小速度
2	区域 2	$\cos \alpha < A$	N_2	位于领航者后方, 期望点前方	减小速度
3	区域 3	$A \leq \cos \alpha < 0$	N_3	位于领航者后方, 期望点后方	增加速度

4 模糊 PID 控制器

按照表 1 的控制策略, 处于跟随状态的机动控位水雷, 可通过调节自身的航行速度保持队形, 采用模糊 PID 控制方法设计速度控制器:

$$\begin{cases} N_1: V_2 = V_{\min} \\ N_2: V_2 = K_1(\overline{O_1O_2} - L) + V_L \\ N_3: V_2 = K_2(\overline{O_1O_2} - L) + V_L \end{cases} \quad (4)$$

式中: V_2 为跟随者当前的速度; V_{\min} 是机动控位水雷最小航行速度; V_L 是整个编队的期望速度; L 为三角编队时领航者与伴随者之间的直线距离期望值; 系数 $K_1, K_2 > 0$

如上所述, 当编队处于状态 N_1 时, 跟随者位于领航者前方, 此时只需要保持最低航速, 直到进入状态 N_2 ; 在 N_2 状态下, 此时跟随者位于领航者和跟随期望位置之间, 只需选取合适的位置比例控制参数 K_1 即可使编队趋于期望队形; 当跟随者位于状态 3 时, 情况较为复杂, 为了确保不丢失跟随目标和快速调整队形, 不仅需要基于跟随者与领航者之间的距离为反馈, 根据距离的大小, 设置多级调控模式, 因此 N_3 状态下队形控制的关键在于速

度控制器的控制参数 K_2 。

对于控制参数 K_2 ，本文采用模糊推理的方式来获得，设计单变量二维模糊控制器输入选取 D 和 V ，其中 $D = y_2' - y_2$ ，表示跟随者的期望位置与当前位置在 Y 轴上的差值， V 表示跟随者的当前速度。



图 2 模糊控制器框图
Fig. 2 Fuzzy controller block diagram

模糊输入 D 的论域 $Y = [0, +\infty]$ ，对应的模糊子集为 $A_i (i=1,2,3,4)$ ，对应的模糊语言为 {近、较近、较远、远}，取梯形隶属函数，其中 D_1 为领航者与跟随者在 Y 向上的最大允许间距。

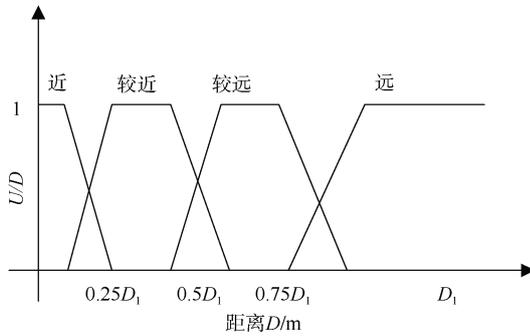


图 3 跟随者 Y 向位置偏差隶属函数
Fig. 3 Y -direction position deviation membership function of the follower

模糊输入 V 的论域 $Y = [V_{min}, V_{max}]$ 对应的模糊子集为 $B_i (i=1,2,3,4)$ ，对应的模糊语言为 {慢、较慢、较快、快}，取梯形隶属函数。

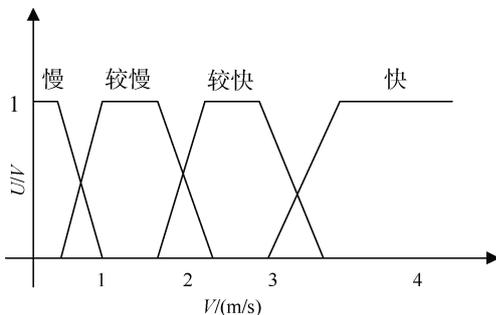


图 4 跟随者速度隶属函数
Fig. 4 Velocity membership function of the follower

速度控制器的控制参数 K_2 ，论域 $Y = [0.01, 0.1]$ ，

对应的模糊子集为 $z_i (i=1,2,3,4,5)$ ，对应的模糊语言为 {小、较小、中、较大、大}，取梯形隶属函数。

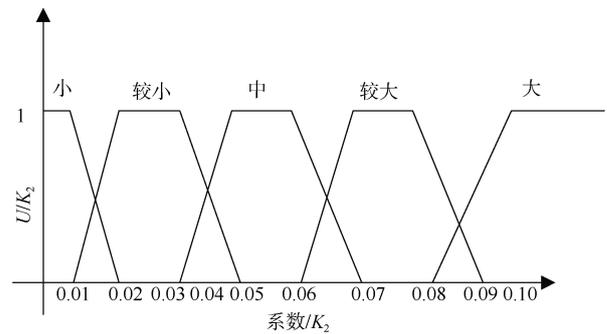


图 5 跟随者控制参数隶属函数
Fig. 5 Control parameter membership function of the follower

根据上述分析，制定 K_2 模糊推理规则如表 2 所示。

表 2 模糊推理规则表
Table 2 Table of fuzzy inference rules

速度	距离近模糊语言	距离较近模糊语言	距离较远模糊语言	距离远模糊语言
慢	中	较大	较大	大
较慢	较小	较小	中	较大
较快	小	小	较小	中
快	小	小	小	较小

在得到上述推理后，需要对推理结果解模糊化从而得到最后输出。解模糊化的方法有重心解模糊化法、面积和中心解模糊化法、最大隶属度值解模糊化法等。本文采用最常用的重心解模糊化法。

由模糊规则 A_i and $B_i \rightarrow k$ 得到推理结果 C_n' ：

$$u_{C_n'}(r) = u_{A_i}(D_0) \wedge u_{B_i}(V_0) \wedge u_{C_k}(r) \quad (5)$$

$$u_{C'}(r) = u_{C_1'}(r) \vee u_{C_2'}(r) \dots \vee u_{C_n'}(r)$$

式中： \wedge 表示最小值 \min ； \vee 表示最大值 \max 。

模糊集合 C' 隶属函数的“重心”为

$$K_2 = \frac{\sum r_i \cdot u_{C'}(r_i)}{\sum u_{C'}(r_i)} \quad (6)$$

在得到整个输出范围内离散采样点的重心值后，取 K_2 模糊集合中最接近上述计算的值作为输出。

5 仿真验证

上述章节选取跟随者 O_2 作为研究对象，跟随

者 O_3 与跟随者 O_2 中心对称,控制方法与跟随者 O_2 相似。

在MATLAB上对本文的队形控制方法进行仿真验证,3条机动控位水雷的坐标点分别为跟随者1(100,100)、领航者(0,0)、跟随者2(-100,-200)沿Y轴方向运动1000m,期望速度跟随者 $V_L=2$ m/s, $V_{\min}=1$ m/s, $V_{\max}=4$ m/s,期望的距离 $L_1=L_2=200$ m,通信周期10 s,最终呈现正三角队形。采用上述PID模糊控制器,机动控位水雷群的运动轨迹和速度曲线如图6-7所示。

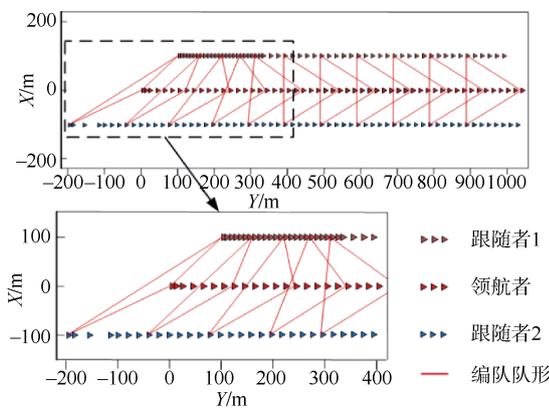


图6 领航-跟随者航行轨迹
Fig. 6 Path of the leader-follower

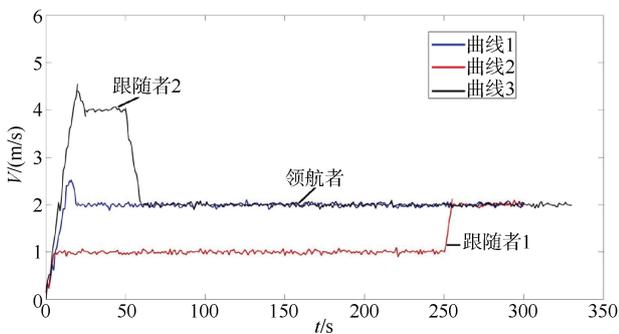


图7 领航-跟随者速度曲线
Fig. 7 Speed curve of the leader-follower

由图6可以看出,3条机动控位水雷开始航行时,跟随者1和跟随者2分别在期望位置的前方和后方,在模糊PID控制的作用下,逐渐构成了三角形队形并趋于稳定。图7的速度曲线中,领航者保持期望速度匀速航行,跟随者则根据实际所处位置与期望位置不断调整航行速度,最终达到期望队形并保持稳定。

6 结束语

本文基于水雷隐蔽、高效、可靠通信的应用场景,为尽可能减少水声通信数据交互信息,提出了一种基于领航者位置信息的队形控制方法,通过设计一种基于PID模糊控制的跟随者速度控制器。MATLAB仿真结果表明:该方法适用于机动控位水雷,能够快速、稳定的形成队形并稳定,具备工程应用前景。

本文的队形控制方法,很大程度上依靠各编队成员自身的导航精度,然而在真实水下环境中,多个机动控位水雷在长时间保持航向一致和间距稳定,对导航精度的要求非常高,对导航成本也是很大的考验。下一步,将围绕“高精度领航、低成本跟随”的编队构思,设计新的队形控制方法,以适应机动控位水雷协同搜索、集群攻击的任务需求。

参考文献

- [1] 陈伟,严卫生,崔荣鑫.障碍物环境下的多AUV主从式编队控制[J].鱼雷技术,2013,12(6):431-435.
- [2] 潘无为.分布式多水下机器人编队控制方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018.
- [3] 赵宁宁,徐德民,高剑,等.基于Serret Frenet坐标系的多AUV编队路径跟踪控制[J].鱼雷技术,2015,2(26):36-39.
- [4] 李良,李一平,张岳星,等.基于改进领航者法的多AUV队形控制方法研究[J].数字海洋与水下攻防,2021,4(6):469-474.
- [5] FOSSEN T I. Marine control systems: guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles[M]. Trondheim: Marine Cybernetics, 2002.
- [6] KYRKJEBO E, PETERSEN K Y, WONDERGEM M, et al. Output synchronization control of ship replenishment operations: theory and experiments[J]. Control Engineering Practice, 2007, 15: 741-755.
- [7] 崔荣鑫,徐德民,严卫生.仅利用位置信息的自主水下航行器主从式队形控制方法[J].兵工学报,2008,29(8):981-984.
- [8] SEMSAR E, KHORASANI K. Adaptive formation control of UAVs in the presence of unknown vortex forces and leader commands[C]// Proc. of American Control Conference. US: IEEE, 2006.

(责任编辑:曹晓霖)