



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110580057 A

(43)申请公布日 2019.12.17

(21)申请号 201910917112.6

(22)申请日 2019.09.26

(71)申请人 哈尔滨工程大学

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区南通大街145号哈尔滨工程大学科技处知识产权办公室

(72)发明人 陈涛 高航 徐达 戚琪 吴迪

(51)Int.Cl.

G05D 1/10(2006.01)

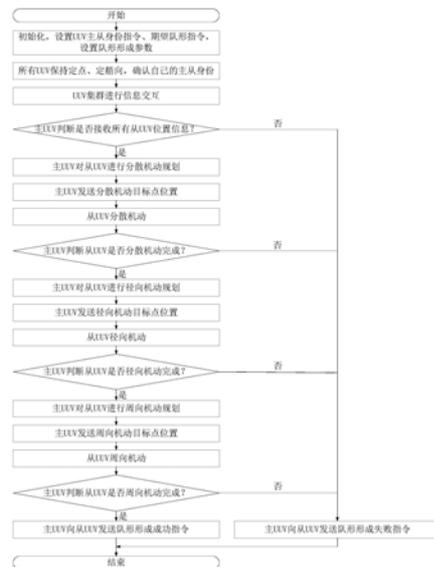
权利要求书5页 说明书12页 附图6页

(54)发明名称

一种基于圆周分层规划的UUV集群编队队形形成方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于圆周分层规划的UUV集群编队队形形成方法,包括初始化设置UUV主从身份指令,设置队形形成参数,期望队形指令;队形形成后,UUV保持定点、定艏向,并确定主从身份;UUV集群进行位置和艏向信息交互;主UUV对从UUV进行分散机动规划,并发送分散机动目标点;从UUV分散机动,机动完成后告知主UUV;主UUV对从UUV先后进行径向和周向机动规划,并先后发送径向机动和周向机动目标点;从UUV先后进行径向机动和周向机动,机动完成后告知主UUV;主UUV向从UUV发送队形形成成功指令,UUV集群编队队形形成。本发明可使UUV集群从初始随机分布、杂乱无序的形态,快速、安全的形成期望队形。



CN 110580057 A

1. 一种基于圆周分层规划的UUV集群编队队形形成方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤一:初始化,设置UUV主从身份指令,设置队形形成参数,期望队形指令;

设置的队形形成参数为 l_{UUV} 、 $N_{num_UUV_F}$ 和 N_{real_s} ,其中, l_{UUV} 为UUV的艇长, $N_{num_UUV_F}$ 为从UUV的个数, N_{real_s} 为取值($N_{num_UUV_F}$, N_r)内的任意整数, $N_r = \left\lfloor \frac{\pi R_{min}}{l_{UUV}} \right\rfloor$ 为最多扇形区域个数, R_{min} 为所有从UUV所在位置点相对距离的最小值, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整运算;

设置的期望队形指令为 $P_{Aim_pole}(m) = \begin{bmatrix} r_{Aim}(m) \\ \theta_{Aim}(m) \end{bmatrix}$,其中 $r_{Aim}(m)$ 表示每个从期望点的相对距离, $\theta_{Aim}(m)$ 表示每个从期望点的相对方位, m 为各从期望点的代号, $m=1,2,\dots,N_{num_UUV_F}$;

步骤二:队形形成开始,所有UUV保持定点、定艏向,并确定自己的主从身份;

步骤三:UUV集群进行信息交互,所有从UUV向主UUV发送自身当前位置信息

$P_{f_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} x_{f_E}(i) \\ y_{f_E}(i) \end{bmatrix}$, i 表示各从UUV代号, $i=1,2,\dots,N_{num_UUV_F}$,主UUV向所有从UUV发送自

身当前位置信息 $P_L = \begin{bmatrix} x_L \\ y_L \end{bmatrix}$ 和艏向信息 θ_{H_L} ;

步骤四:主UUV判断是否接收到所有从UUV位置信息,若主UUV判断在120秒内收到所有从UUV当前位置信息,转步骤五,否则认为队形形成失败,转步骤十八;

步骤五:主UUV对从UUV进行分散机动规划,主UUV根据每个从UUV的当前位置,利用粒子群优化算法进行分散机动规划,将每个从UUV分配到不同的扇形区域内,规划的结果是得到

每个从UUV分散机动的目标点坐标 $C_{d_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} x_{d_E}(i) \\ y_{d_E}(i) \end{bmatrix}$;

步骤六:主UUV将规划好的每个从UUV的分散机动目标点位置信息发送给所有从UUV;

步骤七:从UUV分散机动,所有从UUV沿着自身当前位置点所在的圆周机动到分散机动目标点,每个从UUV分散机动完成后告知主UUV;

步骤八:主UUV判断是否所有从UUV完成分散机动,若主UUV判断在 $\lceil 4\pi R_{max} \rceil$ 秒内所有从UUV完成分散机动,转步骤九,否则认为队形形成失败,转步骤十八;

其中, R_{max} 为所有从UUV所在位置点及所有从期望点的相对距离的最大值, $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整运算;

步骤九:主UUV对从UUV进行径向机动规划,主UUV根据所有从UUV当前位置和所有从期望点的位置,将从UUV分配到所有从期望点所在的圆周上,圆周上有几个从期望点就分配几个从UUV,规划的结果是得到每个从UUV的径向机动目标点

$C_{r_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} x_{r_E}(i) \\ y_{r_E}(i) \end{bmatrix}$;

步骤十:主UUV将规划好的每个从UUV的径向机动目标点位置信息发送给所有从UUV;

步骤十一:从UUV径向机动,所有从UUV沿着自身当前位置点的径向方向机动到各自的径向机动目标点位置,每个从UUV径向机动完成后告知主UUV;

步骤十二:主UUV判断是否所有从UUV完成径向机动,若主UUV判断在 $\lceil 4\pi R_{max} \rceil$ 秒内所有从UUV完成径向机动,转步骤十三,否则认为队形形成失败,转步骤十八;

步骤十三:主UUV对从UUV进行周向机动规划,主UUV根据所有从UUV当前位置和所有从期望点的位置,为每一个从UUV分配一个从期望点,规划结果是得到每个从UUV的周向机动

$$\text{目标点 } C_{c_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} x_{c_E}(i) \\ y_{c_E}(i) \end{bmatrix};$$

步骤十四:主UUV将规划好的每个从UUV的周向机动目标点位置信息发送给所有从UUV;

步骤十五:从UUV周向机动,所有从UUV从当前位置向各自的周向机动目标点位置进行机动,每个从UUV周向机动完成后告知主UUV;

步骤十六:主UUV判断是否所有从UUV完成周向机动,若主UUV判断在 $\lceil 4\pi R_{max} \rceil$ 内所有从UUV完成周向机动,转步骤十七,否则认为队形形成失败,转步骤十八;

步骤十七:主UUV向所有从UUV发送队形形成成功指令,所有UUV保持定点、定艏向,转步骤十九;

步骤十八:主UUV向所有从UUV发送队形形成失败指令,所有UUV停车;

步骤十九:UUV集群编队队形形成结束。

2. 根据权利要求1所述的一种基于圆周分层规划的UUV集群编队队形形成方法,其特征在于,所述的步骤五具体包括:

步骤五(A):求解各从UUV当前位置点所在的扇形区域sector(i)和环形区域ring(i):

$$\text{sector}(i) = \left\lceil \frac{\theta_f(i)}{2\pi} N_{real_s} \right\rceil$$

$$\text{ring}(i) = \left\lceil \frac{r_f(i)}{R_d} \right\rceil$$

其中, $\theta_f(i)$ 为从UUV的相对方位, $r_f(i)$ 为各从UUV的相对距离, $R_d=2l_{UUV}$ 为划分环形区域的圆周半径分度值;

步骤五(B):求解各从UUV分散机动的目标点所在的扇形区域sectorPlan(i),并计算各从UUV分散机动目标点的相对位置 $C_{d_pole_L}(i) = \begin{bmatrix} r_d(i) \\ \theta_d(i) \end{bmatrix}$;

步骤五(C):求解各从UUV分散机动的目标点的位置 $C_{d_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} x_{d_E}(i) \\ y_{d_E}(i) \end{bmatrix}$;

$$C_{d_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{H_L}) & -\sin(\theta_{H_L}) \\ \sin(\theta_{H_L}) & \cos(\theta_{H_L}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_d(i) \cdot \cos(\theta_d(i)) \\ r_d(i) \cdot \sin(\theta_d(i)) \end{bmatrix} + P_L$$

3. 根据权利要求1所述的一种基于圆周分层规划的UUV集群编队队形形成方法,其特征在于,所述的步骤九具体包括:

步骤九(A):求解各从UUV当前位置点所在的扇形区域sector(i)和环形区域ring(i),求解方法与步骤五(A)相同;

步骤九 (B) : 求解各从期望点所在的扇形区域sectorAim(m) 和环形区域ringAim(m) ;

步骤九 (C) : 按照编号规则, 分别对每个从UUV的当前位置点进行编号 $id_f(i)$ 和从期望点进行编号 $id_{Aim}(m)$;

步骤九 (D) : 为各从UUV分配径向机动目标从期望点;

步骤九 (E) : 求解各从UUV径向机动目标点的位置 $C_{r_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} x_{r_E}(i) \\ y_{r_E}(i) \end{bmatrix}$ 。

4. 根据权利要求1所述的一种基于圆周分层规划的UUV集群编队队形形成方法, 其特征在于, 所述的步骤十三具体包括:

步骤十三 (A) : 求解各从UUV当前位置点所在的扇形区域sector(i) 和环形区域ring(i), 求解方法与步骤五 (A) 相同;

步骤十三 (B) : 为所有从UUV根据编号规则进行编号, 编号方法同步骤九 (C) 中对每个从UUV的当前位置点的编号方法;

步骤十三 (C) : 为各从UUV分配从期望点, 分配方法同步骤九 (D) ;

步骤十三 (D) : 求解各从UUV周向机动目标点的位置 $C_{c_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} x_{c_E}(i) \\ y_{c_E}(i) \end{bmatrix}$ 。

5. 根据权利要求2所述的一种基于圆周分层规划的UUV集群编队队形形成方法, 所述的步骤五 (B), 其特征在于:

求解各从UUV分散机动的目标点所在的扇形区域sectorPlan(i), 并计算各从UUV分散机动目标点的相对位置 $C_{d_pole_L}(i) = \begin{bmatrix} r_d(i) \\ \theta_d(i) \end{bmatrix}$:

根据粒子群优化算法, 求解出机动距离最短的情况下, 各从UUV分散机动的目标点所在的扇形区域sectorPlan(i), 并计算得到各从UUV分散机动目标点的相对位置

$C_{d_pole_L}(i) = \begin{bmatrix} r_d(i) \\ \theta_d(i) \end{bmatrix}$, $r_d(i)$ 为分散机动目标点的相对距离, $\theta_d(i)$ 为分散机动目标点的相对方位, 利用的公式如下:

$$r_d(i) = r_f(i)$$

$$\theta_d(i) = \frac{2\text{sectorPlan}(i) - 1}{2} \theta_{real_s}$$

分散机动规划得到的结果满足以下条件:

(1) 若ring(i) = ring(j), $i \neq j, i = 1, 2, \dots, N_{\text{num_UUV_F}}, j = 1, 2, \dots, N_{\text{num_UUV_F}}$ 则有以下式子成立: $(\theta_f(i) - \theta_f(j)) (\theta_d(i) - \theta_d(j)) > 0$;

(2) $r_f(i) = r_d(i)$;

(3) $\text{sectorPlan}(i) \neq \text{sectorPlan}(j), i \neq j$ 。

6. 根据权利要求3所述的一种基于圆周分层规划的UUV集群编队队形形成方法, 所述的步骤九 (B), 其特征在于:

求解各从期望点所在的扇形区域sectorAim(m) 和环形区域ringAim(m) :

根据初始化的期望队形指令 $P_{Aim_pole}(m) = \begin{bmatrix} r_{Aim}(m) \\ \theta_{Aim}(m) \end{bmatrix}$, 计算各从期望点所在的扇形区域 $sectorAim(m)$ 和环形区域 $ringAim(m)$, 利用的公式如下:

$$sectorAim(m) = \left\lfloor \frac{\theta_{Aim}(m)}{2\pi} N_{real_s} \right\rfloor$$

$$ringAim(m) = \left\lfloor \frac{r_{Aim}(m)}{R_d} \right\rfloor$$

7. 根据权利要求3所述的一种基于圆周分层规划的UUV集群编队队形形成方法, 所述的步骤九(C), 其特征在于:

对每个从UUV的当前位置点进行编号 $id_f(i)$ 和从期望点进行编号 $id_{Aim}(m)$, 编号规则如下:

- (1) 各点编号总体按照环形区域从内到外的顺序;
- (2) 若同一环形区域存在多个点, 按照各点的相对方位从小到大进行编号;
- (3) 对各点的编号从1开始直到将所有需要编号的点都编上序号为止。

8. 根据权利要求3所述的一种基于圆周分层规划的UUV集群编队队形形成方法, 所述的步骤九(D), 其特征在于:

为各从UUV分配径向机动目标从期望点, 分配方法为: 若 $id_f(i) = id_{Aim}(m)$, 则 i 号UUV分配了 m 号从期望点。

9. 根据权利要求3所述的一种基于圆周分层规划的UUV集群编队队形形成方法, 所述的步骤九(E), 其特征在于:

求解各从UUV径向机动目标点的位置 $C_{r_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} x_{r_E}(i) \\ y_{r_E}(i) \end{bmatrix}$, 每个从UUV根据分配的径向

机动目标从期望点, 计算得到各自的径向机动目标点的相对位置 $C_{r_pole_L}(i) = \begin{bmatrix} r_r(i) \\ \theta_r(i) \end{bmatrix}$, 再计

算得到 $C_{r_pos_E}(i)$, $C_{r_pole_L}(i)$ 及 $C_{r_pos_E}(i)$ 求解利用的公式如下:

$$r_r(i) = r_{Aim}(m)$$

$$\theta_r(i) = \theta_f(i)$$

$$C_{r_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{H_L}) & -\sin(\theta_{H_L}) \\ \sin(\theta_{H_L}) & \cos(\theta_{H_L}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_r(i) \cdot \cos(\theta_r(i)) \\ r_r(i) \cdot \sin(\theta_r(i)) \end{bmatrix} + P_L$$

其中, $r_r(i)$ 为各从UUV径向机动目标点的相对距离, $\theta_r(i)$ 为各从UUV径向机动目标点的相对方位。

10. 根据权利要求4所述的一种基于圆周分层规划的UUV集群编队队形形成方法, 所述的步骤十三(D), 其特征在于:

求解各从UUV周向机动目标点的位置 $C_{c_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} x_{c_E}(i) \\ y_{c_E}(i) \end{bmatrix}$, 每个从UUV根据分配的从期

望点,计算得到各自的周向机动目标点的相对位置 $C_{c_pole_L}(i) = \begin{bmatrix} r_c(i) \\ \theta_c(i) \end{bmatrix}$,再计算得到 $C_{c_pos_E}$

(i), $C_{c_pole_L}(i)$ 及 $C_{c_pos_E}(i)$ 求解利用的公式如下:

$$r_c(i) = r_f(i)$$

$$\theta_c(i) = \theta_{Aim}(m)$$

$$C_{c_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{H_L}) & -\sin(\theta_{H_L}) \\ \sin(\theta_{H_L}) & \cos(\theta_{H_L}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_c(i) \cdot \cos(\theta_c(i)) \\ r_c(i) \cdot \sin(\theta_c(i)) \end{bmatrix} + P_L$$

其中 $r_c(i)$ 为各从UUV周向机动目标点的相对距离, $\theta_c(i)$ 为各从UUV周向机动目标点的相对方位。

一种基于圆周分层规划的UUV集群编队队形形成方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于圆周分层规划形成UUV(水下无人飞行器, Unmanned Underwater Vehicle)集群编队期望队形的方法,属于UUV编队控制领域。

背景技术

[0002] UUV在民用海洋领域和军事海洋领域方面发挥着越来越重要的作用。但是单UUV的个体能力有限,无法完成复杂的作业任务。而UUV集群由于具有功能冗余、空间分布的特点,可以通过相互之间的协作,增强作业能力、提高作业效率,完成复杂的作业任务。通常UUV集群会采用保持某种期望队形的编队形式进行作业,因此编队控制技术是UUV集群的关键技术之一。而UUV集群编队控制首先要解决的问题就是队形形成问题。UUV集群编队队形形成是指UUV集群从初始随机分布、杂乱无序的几何形态,经信息交互、自主规划、协调机动后,形成某一期望几何队形的过程。

[0003] 在队形形成的研究中,常用的方法是人工势场法,人工势场法是建造势场函数,然后通过研究反馈控制律来完成队形的形成。此外还有其他的一些方法,比如允许UUV自主切换控制律实现期望的队形,还可以在图形理论框架上进行研究,完成期望队形。但是以上的各种方法在应用的过程中都要求每个UUV之间能进行实时通信,存在大量的信息的传输,并且随着UUV数量的增加,控制策略将会变得更加复杂。对此,找到一种简单易实现的方法使UUV集群能够自主形成期望队形就显得尤为重要。

[0004] 申请号为201811229466.3的专利文件中公开了“一种用于无人设备集群控制的多体队形重构方法”,主要解决leader-follower模式的控制算法中无人设备集群受到干扰工况的多体队形重构方法。首先该专利采用的是实时计算飞行并调整集群飞行队形的方法,与本发明的利用先规划后机动的队形形成方法不同。其次该专利重点提出了一种建立与所述当前队形关联的概率密度函数,通过调整集群中被控物体的位置,减小交叉熵的队形重构方法,与本发明重点解决通过分阶段规划机动目标位置点进行队形形成的方法不同。

[0005] 申请号为201810390428.X的专利文件中公开了“无人机对性控制方法”,主要解决编队成员不需已知某些全局信息生成任意队形的无人机编队队形分布式控制方法。首先该专利是利用编队内各无人机生成各自的目标编队位置形成目标基准队形的方法,与本发明利用主UUV获取所有UUV信息,进行机动位置点统一规划的队形形成方法不同。其次该专利重点提出了一种虚拟分配操作下生成编队内各成员的目标编队位置并朝它飞行,使无人机集群形成目标基准队形的方法,与本发明重点解决通过分阶段规划机动目标位置点进行队形形成的方法不同。

发明内容

[0006] 针对上述现有技术,本发明要解决的技术问题是提供一种基于圆周分层规划的UUV集群编队队形形成方法。

[0007] 为解决上述技术问题,本发明的一种基于圆周分层规划的UUV集群编队队形形成

方法,包括以下步骤:

[0008] 步骤一:初始化,设置UUV主从身份指令,设置队形形成参数,期望队形指令;

[0009] 设置的队形形成参数为 l_{UUV} 、 $N_{num_UUV_F}$ 和 N_{real_s} ,其中, l_{UUV} 为UUV的艇长, $N_{num_UUV_F}$ 为从UUV的个数, N_{real_s} 为取值($N_{num_UUV_F}$, N_r)内的任意整数, $N_r = \left\lfloor \frac{\pi R_{min}}{l_{UUV}} \right\rfloor$ 为最多扇形区域个数, R_{min} 为所有从UUV所在位置点相对距离的最小值, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整运算。

[0010] 设置的期望队形指令为 $P_{Aim_pole}(m) = \begin{bmatrix} r_{Aim}(m) \\ \theta_{Aim}(m) \end{bmatrix}$,其中 $r_{Aim}(m)$ 表示每个从期望点的相对距离, $\theta_{Aim}(m)$ 表示每个从期望点的相对方位, m 为各从期望点的代号, $m=1,2,\dots,N_{num_UUV_F}$ 。

[0011] 步骤二:队形形成开始,所有UUV保持定点、定艏向,并确定自己的主从身份;

[0012] 步骤三:UUV集群进行信息交互。所有从UUV向主UUV发送自身当前位置信息

$P_{f_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} x_{f_E}(i) \\ y_{f_E}(i) \end{bmatrix}$, i 表示各从UUV代号, $i=1,2,\dots,N_{num_UUV_F}$ 。主UUV向所有从UUV发送自身当前位置信息 $P_L = \begin{bmatrix} x_L \\ y_L \end{bmatrix}$ 和艏向信息 θ_{HL} ;

[0013] 步骤四:主UUV判断是否接收到所有从UUV位置信息。若主UUV判断在120秒内收到所有从UUV当前位置信息,转步骤五,否则认为队形形成失败,转步骤十八;

[0014] 步骤五:主UUV对从UUV进行分散机动规划。主UUV根据每个从UUV的当前位置,利用粒子群优化算法进行分散机动规划,将每个从UUV分配到不同的扇形区域内,规划的结果是

得到每个从UUV分散机动的目标点坐标 $C_{d_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} x_{d_E}(i) \\ y_{d_E}(i) \end{bmatrix}$;

[0015] 步骤六:主UUV将规划好的每个从UUV的分散机动目标点位置信息发送给所有从UUV;

[0016] 步骤七:从UUV分散机动。所有从UUV沿着自身当前位置点所在的圆周机动到分散机动目标点,每个从UUV分散机动完成后告知主UUV;

[0017] 步骤八:主UUV判断是否所有从UUV完成分散机动。若主UUV判断在 $\lceil 4\pi R_{max} \rceil$ 秒内所有从UUV完成分散机动,转步骤九,否则认为队形形成失败,转步骤十八;

[0018] 其中, R_{max} 为所有从UUV所在位置点及所有从期望点的相对距离的最大值, $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整运算。

[0019] 步骤九:主UUV对从UUV进行径向机动规划。主UUV根据所有从UUV当前位置和所有从期望点的位置,将从UUV分配到所有从期望点所在的圆周上,圆周上有几个从期望点就分

配几个从UUV,规划的结果是得到每个从UUV的径向机动目标点 $C_{r_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} x_{r_E}(i) \\ y_{r_E}(i) \end{bmatrix}$;

[0020] 步骤十:主UUV将规划好的每个从UUV的径向机动目标点位置信息发送给所有从

UUV;

[0021] 步骤十一:从UUV径向机动。所有从UUV沿着自身当前位置点的径向方向机动到各自的径向机动目标点位置,每个从UUV径向机动完成后告知主UUV;

[0022] 步骤十二:主UUV判断是否所有从UUV完成径向机动。若主UUV判断在 $[4\pi R_{max}]$ 秒内所有从UUV完成径向机动,转步骤十三,否则认为队形形成失败,转步骤十八;

[0023] 步骤十三:主UUV对从UUV进行周向机动规划。主UUV根据所有从UUV当前位置和所有从期望点的位置,为每一个从UUV分配一个从期望点,规划结果是得到每个从UUV的周向

机动目标点 $C_{c_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} x_{c_E}(i) \\ y_{c_E}(i) \end{bmatrix}$;

[0024] 步骤十四:主UUV将规划好的每个从UUV的周向机动目标点位置信息发送给所有从UUV;

[0025] 步骤十五:从UUV周向机动。所有从UUV从当前位置向各自的周向机动目标点位置进行机动,每个从UUV周向机动完成后告知主UUV;

[0026] 步骤十六:主UUV判断是否所有从UUV完成周向机动。若主UUV判断在 $[4\pi R_{max}]$ 内所有从UUV完成周向机动,转步骤十七,否则认为队形形成失败,转步骤十八;

[0027] 步骤十七:主UUV向所有从UUV发送队形形成成功指令,所有UUV保持定点、定艏向,转步骤十九;

[0028] 步骤十八:主UUV向所有从UUV发送队形形成失败指令,所有UUV停车;

[0029] 步骤十九:UUV集群编队队形形成结束。

[0030] 本发明一种基于圆周分层规划的UUV集群编队队形形成方法,还可以包括:

[0031] 1.所述的步骤五中,主UUV对从UUV进行分散机动规划具体包括:

[0032] 步骤五(A):求解各从UUV当前位置点所在的扇形区域sector(i)和环形区域ring(i);

[0033] 步骤五(B):求解各从UUV分散机动的目标点所在的扇形区域sectorPlan(i),并计算各从UUV分散机动目标点的相对位置 $C_{d_pole_L}(i) = \begin{bmatrix} r_d(i) \\ \theta_d(i) \end{bmatrix}$;

[0034] 步骤五(C):求解各从UUV分散机动的目标点的位置 $C_{d_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} x_{d_E}(i) \\ y_{d_E}(i) \end{bmatrix}$ 。

[0035] 2.所述的步骤九中,主UUV对从UUV进行径向机动规划具体包括:

[0036] 步骤九(A):求解各从UUV当前位置点所在的扇形区域sector(i)和环形区域ring(i),求解方法与步骤五(A)相同;

[0037] 步骤九(B):求解各从期望点所在的扇形区域sectorAim(m)和环形区域ringAim(m);

[0038] 步骤九(C):按照编号规则,分别对每个从UUV的当前位置点进行编号id_f(i)和从期望点进行编号id_{Aim}(m);

[0039] 步骤九(D):为各从UUV分配径向机动目标从期望点。

[0040] 步骤九 (E) : 求解各从UUV径向机动目标点的位置 $C_{r_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} x_{r_E}(i) \\ y_{r_E}(i) \end{bmatrix}$ 。

[0041] 3. 所述的步骤十三中, 主UUV对从UUV进行周向机动规划具体包括:

[0042] 步骤十三 (A) : 求解各从UUV当前位置点所在的扇形区域 $sector(i)$ 和环形区域 $ring(i)$, 求解方法与步骤五 (A) 相同;

[0043] 步骤十三 (B) : 为所有从UUV根据编号规则进行编号, 编号方法同步骤九 (C) 中对每个从UUV的当前位置点的编号方法;

[0044] 步骤十三 (C) : 为各从UUV分配从期望点, 分配方法同步骤九 (D) ;

[0045] 步骤十三 (D) : 求解各从UUV周向机动目标点的位置 $C_{c_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} x_{c_E}(i) \\ y_{c_E}(i) \end{bmatrix}$ 。

[0046] 4. 所述的步骤五 (B) 中, 求解各从UUV分散机动的目标点所在的扇形区域 $sectorPlan(i)$, 并计算各从UUV分散机动目标点的相对位置 $C_{d_pole_L}(i) = \begin{bmatrix} r_d(i) \\ \theta_d(i) \end{bmatrix}$:

[0047] 根据粒子群优化算法, 求解出机动距离最短的情况下, 各从UUV分散机动的目标点所在的扇形区域 $sectorPlan(i)$, 并计算得到各从UUV分散机动目标点的相对位置

$C_{d_pole_L}(i) = \begin{bmatrix} r_d(i) \\ \theta_d(i) \end{bmatrix}$, $r_d(i)$ 为分散机动目标点的相对距离, $\theta_d(i)$ 为分散机动目标点的相对

方位, 利用的公式如下:

[0048] $r_d(i) = r_f(i)$

[0049] $\theta_d(i) = \frac{2 \text{sectorPlan}(i) - 1}{2} \theta_{real_s}$

[0050] 分散机动规划得到的结果满足以下条件:

[0051] (1) 若 $ring(i) = ring(j)$, $i \neq j$, $i = 1, 2, \dots, N_{num_UUV_F}$, $j = 1, 2, \dots, N_{num_UUV_F}$ 则有以下式子成立: $(\theta_f(i) - \theta_f(j)) (\theta_d(i) - \theta_d(j)) > 0$;

[0052] (2) $r_f(i) = r_d(i)$;

[0053] (3) $sectorPlan(i) \neq sectorPlan(j)$, $i \neq j$ 。

[0054] 5. 所述的步骤九 (B) 中, 求解各从期望点所在的扇形区域 $sectorAim(m)$ 和环形区域 $ringAim(m)$:

[0055] 根据初始化的期望队形指令 $P_{Aim_pole}(m) = \begin{bmatrix} r_{Aim}(m) \\ \theta_{Aim}(m) \end{bmatrix}$, 计算各从期望点所在的扇形区域 $sectorAim(m)$ 和环形区域 $ringAim(m)$, 利用的公式如下:

[0056] $sectorAim(m) = \left[\frac{\theta_{Aim}(m)}{2\pi} N_{real_s} \right]$

[0057] $ringAim(m) = \left[\frac{r_{Aim}(m)}{R_d} \right]$

[0058] 6. 所述的步骤九 (C) 中, 对每个从UUV的当前位置点进行编号 $idf(i)$ 和从期望点进

行编号 $id_{Aim}(m)$,编号规则如下:

[0059] (1) 各点编号总体按照环形区域从内到外的顺序;

[0060] (2) 若同一环形区域存在多个点,按照各点的相对方位从小到大进行编号;

[0061] (3) 对各点的编号从1开始直到将所有需要编号的点都编上序号为止。

[0062] 7.所述的步骤九(D)中,为各从UUV分配径向机动目标从期望点。分配方法为:若 $id_f(i) = id_{Aim}(m)$,则i号UUV分配了m号从期望点。

[0063] 8.所述的步骤九(E)中,求解各从UUV径向机动目标点的位置

$C_{r_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} x_{r_E}(i) \\ y_{r_E}(i) \end{bmatrix}$ 。每个从UUV根据分配的径向机动目标从期望点,计算得到各自的径向机动目标点的相对位置 $C_{r_pole_L}(i) = \begin{bmatrix} r_r(i) \\ \theta_r(i) \end{bmatrix}$,再计算得到 $C_{r_pos_E}(i) \circ C_{r_pole_L}(i)$ 及 $C_{r_pos_E}$

(i) 求解利用的公式如下:

[0064] $r_r(i) = r_{Aim}(m)$

[0065] $\theta_r(i) = \theta_f(i)$

[0066] $C_{r_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{H_L}) & -\sin(\theta_{H_L}) \\ \sin(\theta_{H_L}) & \cos(\theta_{H_L}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_r(i) \cdot \cos(\theta_r(i)) \\ r_r(i) \cdot \sin(\theta_r(i)) \end{bmatrix} + P_L$

[0067] 其中, $r_r(i)$ 为各从UUV径向机动目标点的相对距离, $\theta_r(i)$ 为各从UUV径向机动目标点的相对方位。

[0068] 9.所述的步骤十三(D)中,求解各从UUV周向机动目标点的位置

$C_{c_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} x_{c_E}(i) \\ y_{c_E}(i) \end{bmatrix}$ 。每个从UUV根据分配的从期望点,计算得到各自的周向机动目标点的相对位置 $C_{c_pole_L}(i) = \begin{bmatrix} r_c(i) \\ \theta_c(i) \end{bmatrix}$,再计算得到 $C_{c_pos_E}(i) \circ C_{c_pole_L}(i)$ 及 $C_{c_pos_E}(i)$ 求解利用的

公式如下:

[0069] $r_c(i) = r_f(i)$

[0070] $\theta_c(i) = \theta_{Aim}(m)$

[0071] $C_{c_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{H_L}) & -\sin(\theta_{H_L}) \\ \sin(\theta_{H_L}) & \cos(\theta_{H_L}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_c(i) \cdot \cos(\theta_c(i)) \\ r_c(i) \cdot \sin(\theta_c(i)) \end{bmatrix} + P_L$

[0072] 其中 $r_c(i)$ 为各从UUV周向机动目标点的相对距离, $\theta_c(i)$ 为各从UUV周向机动目标点的相对方位。

[0073] 本发明的有益效果:

[0074] 1、本发明将UUV集群编队队形形成所在空间划分为环形区域和扇形区域,可以有效的避免编队队形形成过程中UUV之间的碰撞。

[0075] 2、本发明将UUV集群编队队形形成过程依次分为分散机动、径向机动和周向机动三个阶段,可以实现UUV集群编队队形形成过程中的有序机动协调,可有效的避免UUV集群的机动混乱,同时也可有效的避免UUV之间的碰撞。

[0076] 3、本发明中,UUV集群之间的信息交互量少,计算简单,规划速度快,协调机动逻辑分明,易于工程实现。

附图说明

- [0077] 图1为UUV集群编队队形形成示意图;
 [0078] 图2为UUV集群编队期望队形示意图;
 [0079] 图3为UUV集群编队队形形成所在空间划分示意图;
 [0080] 图4为基于圆周分层规划的UUV集群编队队形形成方法流程图;
 [0081] 图5为UUV集群编队分散机动原理示意图;
 [0082] 图6为UUV集群编队径向机动原理示意图;
 [0083] 图7为UUV集群编队周向机动原理示意图。

具体实施方式

[0084] 下面结合附图,进一步说明本发明的具体实施方式。

[0085] 结合图1,介绍UUV集群编队队形形成的过程。

[0086] 如图1所示,以包含5个成员的UUV集群进行介绍。初始状态,集群UUV的几何形态是随机分布且杂乱无序的,每个UUV处于待机状态,等待编队队形形成开始指令。期望形成的几何队形为图中所示的矩形队形。当队形形成开始后,所有的UUV根据自己事先被赋予的身份信息,确定自己是主UUV还是从UUV,如图中0号UUV为主UUV,其余为从UUV。主UUV保持定位、定艏向,UUV集群之间经过信息交互、自主规划、协调机动后,在保证不发生相互碰撞的前提下形成期望的矩形队形。队形形成过程中,从UUV进行机动,主UUV始终保持定点、定艏向

[0087] 结合图2,介绍UUV集群编队的期望队形。

[0088] 如图2所示,以期望的几何队形为矩形、以包含5个成员的UUV集群为例进行介绍。期望点0、1、2、3、4组成期望的矩形队形。在UUV集群形成矩形队形后,每个UUV位于一个期望点上,其中主UUV位于期望点0上,期望点0称为主期望点。其他4个从UUV分布于期望点1、2、3、4上,称这4个期望点为从期望点。为了更清楚的介绍本发明的具体实施方式有如下定义:

[0089] (1) 定义任意位置点所在的圆周,是以主期望点为圆心,以主期望点到该位置点的距离为半径形成的圆。如图2,矩形期望队形中,从期望点1、从期望点2、从期望点3和从期望点4所在的圆周重合,如图所示的圆周U。图2中,位置点W所在的圆周,如图所示的圆周W。

[0090] (2) 定义UUV集群所在空间区域任意位置点 $P_{pos} = \begin{bmatrix} x_{pos} \\ y_{pos} \end{bmatrix}$ 的相对距离r,为该位置点

与主期望点 $P_L = \begin{bmatrix} x_L \\ y_L \end{bmatrix}$,连线的线段的长度,计算方法为:

$$[0091] \quad r = \sqrt{(x_{pos} - x_L)^2 + (y_{pos} - y_L)^2} \quad (1)$$

[0092] (3) 定义UUV集群所在空间区域任意位置点 $P_{pos} = \begin{bmatrix} x_{pos} \\ y_{pos} \end{bmatrix}$ 的相对方位 θ ,为该点与主

期望点 $P_L = \begin{bmatrix} x_L \\ y_L \end{bmatrix}$ 的连线逆时针转至主UUV的艏向所转过的角度,计算方法为:

[0093] 令

$$A_{E_B} = \text{atan2}(-(x_{pos} - x_L) \sin \theta_{H_L} + (y_{pos} - y_L) \cos \theta_{H_L}, (x_{pos} - x_L) \cos \theta_{H_L} + (y_{pos} - y_L) \sin \theta_{H_L}), \quad (2)$$

[0095] 则有

$$\theta = \begin{cases} A_{E_B} & , A_{E_B} \geq 0 \\ A_{E_B} + 2\pi & , A_{E_B} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

[0097] 其中, θ_{H_L} 为主UUV的艏向, A_{E_B} 为计算得到的相对方位值,取值范围为 $(-\pi, \pi]$, 所以需要通过公式 (3) 将 A_{E_B} 变换为取值范围为 $[0, 2\pi)$ 的相对方位。

[0098] 在图2中,根据公式 (1)、(2) 和 (3) 可求从期望点3的相对距离 $r_{Aim}(3)$ 以及相对方位 $\theta_{Aim}(3)$:

$$r_{Aim}(3) = \sqrt{(x_{Aim}(3) - x_L)^2 + (y_{Aim}(3) - y_L)^2}$$

$$\theta_{Aim}(3) = \text{atan2}(-(x_{Aim}(3) - x_L) \sin \theta_{H_L} + (y_{Aim}(3) - y_L) \cos \theta_{H_L},$$

$$(x_{Aim}(3) - x_L) \cos \theta_{H_L} + (y_{Aim}(3) - y_L) \sin \theta_{H_L})$$

[0102] 其他从期望点可同理计算。

[0103] (4) 若已知某位置点的相对距离为 r , 相对方位为 θ , 则可解算得到该点的坐标

$P_{pos} = \begin{bmatrix} x_{pos} \\ y_{pos} \end{bmatrix}$ 为:

$$P_{pos} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{H_L}) & -\sin(\theta_{H_L}) \\ \sin(\theta_{H_L}) & \cos(\theta_{H_L}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r \cdot \cos(\theta) \\ r \cdot \sin(\theta) \end{bmatrix} + P_L \quad (4)$$

[0105] 在图2中,若已知从期望点1的相对距离为 $r_{Aim}(1)$ 、相对方位为 $\theta_{Aim}(1)$, 则从期望点

1的坐标 $P_{Aim}(1) = \begin{bmatrix} x_{Aim}(1) \\ y_{Aim}(1) \end{bmatrix}$ 为:

$$P_{Aim}(1) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{H_L}) & -\sin(\theta_{H_L}) \\ \sin(\theta_{H_L}) & \cos(\theta_{H_L}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{Aim}(1) \cdot \cos(\theta_{Aim}(1)) \\ r_{Aim}(1) \cdot \sin(\theta_{Aim}(1)) \end{bmatrix} + P_L$$

[0107] 其他从期望点可同理计算。

[0108] 结合图3,介绍UUV集群编队队形形成的所在空间划分。

[0109] 为了更好的利用粒子群优化算法进行UUV集群队形形成规划,将UUV集群所在空间区域划分为多个环形区域和多个扇形区域,具体的划分过程为:

[0110] (1) 环形区域划分。如图3所示,UUV集群所在空间区域中以主期望点为圆心,存在多个圆周,每个圆周的半径为 $R(k)$, 相邻两个圆周之间形成的区域为环形区域,由此多个圆周将平面分成多个环形区域,并且环形区域总个数为 N_1 , 并且有:

$$R(k) = k \cdot R_d, k = 1, \dots, N_1$$

$$R_d = 2l_{UUV}$$

$$[0113] \quad N_l = \left\lceil \frac{R_{max}}{R_d} \right\rceil$$

[0114] 其中, R_d 为划分环形区域的圆周半径分度值, l_{UUV} 为UUV的艇长, R_{max} 为所有从UUV所在位置点及所有从期望点的相对距离的最大值, $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整运算。

[0115] 将所有环形区域以主期望点为基准,沿径向方向进行编号。如图3中共划分了3个环形区域,每个环形区域的编号如图中所示。

[0116] (2) 扇形区域划分。如图3所示,划分扇形区域是以主期望点为圆心,将圆周均等分为多个扇形区域,等分角度 θ_{real_s} ,且有

$$[0117] \quad \theta_{real_s} = \frac{2\pi}{N_{real_s}}, \quad N_{num_UUV_F} < N_{real_s} < Nr$$

$$[0118] \quad Nr = \left\lfloor \frac{\pi R_{min}}{l_{UUV}} \right\rfloor$$

[0119] 其中, N_{real_s} 可取值为 $(N_{num_UUV_F}, Nr)$ 内的任意整数, $N_{num_UUV_F}$ 为从UUV的个数, Nr 最多扇形区域个数, R_{min} 为所有从UUV所在位置点相对距离的最小值, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整运算。

[0120] 将所有扇形区域以主UUV艏向方向为基准,顺时针进行编号。如图3中共划分了12个扇形区域,每个扇形区域的编号如图中所示。

[0121] 结合图4、图5、图6、图7,介绍基于圆周分层规划的UUV集群编队队形形成方法的流程。

[0122] 步骤一:初始化,设置UUV主从身份指令,设置队形形成参数 l_{UUV} 、 $N_{num_UUV_F}$ 和 N_{real_s} ,

设置期望队形指令 $P_{Aim_pole}(m) = \begin{bmatrix} r_{Aim}(m) \\ \theta_{Aim}(m) \end{bmatrix}$ 。其中, $r_{Aim}(m)$ 表示每个从期望点的相对距离,

$\theta_{Aim}(m)$ 表示每个从期望点的相对方位, m 为各从期望点的代号, $m=1, 2, \dots, N_{num_UUV_F}$ 。

[0123] 步骤二:队形形成开始,所有UUV保持定点、定艏向,并确定自己的主从身份。

[0124] 步骤三:UUV集群进行信息交互。所有从UUV向主UUV发送自身当前位置信息

$P_{f_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} x_{f_E}(i) \\ y_{f_E}(i) \end{bmatrix}$, i 表示各从UUV代号, $i=1, 2, \dots, N_{num_UUV_F}$ 。主UUV向所有从UUV发

送自身当前位置信息 P_L 和艏向信息 θ_{H_L} 。

[0125] 步骤四:主UUV判断是否接收到所有从UUV位置信息。若主UUV判断在120秒内收到所有从UUV当前位置信息,转步骤五,否则认为队形形成失败,转步骤十八。

[0126] 步骤五:主UUV对从UUV进行分散机动规划。主UUV根据每个从UUV的当前位置,利用粒子群优化算法进行分散机动规划,将每个从UUV分配到不同的扇形区域内,规划的结果是

得到每个从UUV分散机动的目标点坐标 $C_{d_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} x_{d_E}(i) \\ y_{d_E}(i) \end{bmatrix}$,具体过程如下:

[0127] 步骤五(A):求解各从UUV当前位置点所在的扇形区域sector(i)和环形区域ring(i)。根据所有主从UUV的当前位置,利用公式(1)、(2)和(3)得到各从UUV当前位置点的相对

位置 $P_{f_pole_L}(i) = \begin{bmatrix} r_f(i) \\ \theta_f(i) \end{bmatrix}$, $r_f(i)$ 为各从UUV的相对距离, $\theta_f(i)$ 为从UUV的相对方位。再根据公式 (5) 求解出各从UUV当前位置点分布所在的扇形区域sector(i) 和环形区域ring(i) :

$$\begin{aligned} \text{sector}(i) &= \left\lfloor \frac{\theta_f(i)}{2\pi} N_{real_s} \right\rfloor \\ \text{ring}(i) &= \left\lfloor \frac{r_f(i)}{R_d} \right\rfloor \end{aligned} \quad (5)$$

[0129] 步骤五 (B) : 求解各从UUV分散机动的目标点所在的扇形区域sectorPlan(i), 并计算各从UUV分散机动目标点的相对位置。根据粒子群优化算法, 求解出机动距离最短的情况下, 各从UUV分散机动的目标点所在的扇形区域sectorPlan(i), 并根据公式 (6) 计算得到各

从UUV分散机动目标点的相对位置 $C_{d_pole_L}(i) = \begin{bmatrix} r_d(i) \\ \theta_d(i) \end{bmatrix}$, $r_d(i)$ 为分散机动目标点的相对距离, $\theta_d(i)$ 为分散机动目标点的相对方位:

$$\begin{aligned} r_d(i) &= r_f(i) \\ \theta_d(i) &= \frac{2\text{sectorPlan}(i) - 1}{2} \theta_{real_s} \end{aligned} \quad (6)$$

[0131] 并且分散机动规划得到的结果满足以下条件:

[0132] (1) 若 $\text{ring}(i) = \text{ring}(j)$, $i \neq j$, $i = 1, 2, \dots, N_{num_UUV_F}$, $j = 1, 2, \dots, N_{num_UUV_F}$ 则有以下式子成立: $(\theta_f(i) - \theta_f(j)) (\theta_d(i) - \theta_d(j)) > 0$;

[0133] (2) $r_f(i) = r_d(i)$;

[0134] (3) $\text{sectorPlan}(i) \neq \text{sectorPlan}(j)$, $i \neq j$ 。

[0135] 步骤五 (C) : 根据公式 (4) 求解各从UUV分散机动的目标点的位置

$$C_{d_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} x_{d_E}(i) \\ y_{d_E}(i) \end{bmatrix};$$

$$C_{d_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{H_L}) & -\sin(\theta_{H_L}) \\ \sin(\theta_{H_L}) & \cos(\theta_{H_L}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_d(i) \cdot \cos(\theta_d(i)) \\ r_d(i) \cdot \sin(\theta_d(i)) \end{bmatrix} + P_L$$

[0137] 根据图3中的各UUV的分布以及步骤五对各UUV的分散机动的规划, 规划结果如图5所示, 图中虚线UUV所在位置点表示的是当前位置点, 实线UUV所在的位置点表示的是分散机动目标点。如图5所示, 1号从UUV分配到分散机动目标点1, 其他从UUV同理。分散机动规划的结果保证每个从UUV所在的扇形区域只有一个从UUV。

[0138] 步骤六: 主UUV将规划好的每个从UUV的分散机动目标点位置信息发送给所有从UUV。

[0139] 步骤七: 从UUV分散机动。所有从UUV沿着自身当前位置点所在的圆周机动到分散机动目标点, 分散机动过程如图5所示, 1号从UUV从当前位置点1机动到分散机动目标点1, 其他从UUV同理。每个从UUV分散机动完成后告知主UUV。

[0140] 步骤八: 主UUV判断是否所有从UUV完成分散机动。若主UUV判断在 $\lceil 4\pi R_{max} \rceil$ 秒内所

有从UUV完成分散机动,转步骤九,否则认为队形形成失败,转步骤十八。

[0141] 步骤九:主UUV对从UUV进行径向机动规划。主UUV根据所有从UUV当前位置和所有从期望点的位置,将从UUV分配到所有从期望点所在的圆周上,圆周上有几个从期望点就分配几个从UUV,规划的结果是得到每个从UUV的径向机动目标点 $C_{r_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} x_{r_E}(i) \\ y_{r_E}(i) \end{bmatrix}$,具体

过程如下:

[0142] 步骤九(A):求解各从UUV当前位置点所在的扇形区域sector(i)和环形区域ring(i)。根据所有从UUV的当前位置,利用公式(1)、(2)和(3)得到各从UUV当前位置点的相对位置 $P_{f_pole_L}(i)$ 。再利用公式(5)计算各从UUV当前位置点所在的扇形区域sector(i)和环形区域ring(i)。

[0143] 步骤九(B):求解各从期望点所在的扇形区域sectorAim(m)和环形区域ringAim(m)。根据初始化的期望队形指令 $P_{Aim_pole}(m) = \begin{bmatrix} r_{Aim}(m) \\ \theta_{Aim}(m) \end{bmatrix}$,利用公式(7)计算各从期望点所在的扇形区域sectorAim(m)和环形区域ringAim(m)。

$$\begin{aligned} \text{sectorAim}(m) &= \left\lfloor \frac{\theta_{Aim}(m)}{2\pi} N_{real_s} \right\rfloor \\ \text{ringAim}(m) &= \left\lfloor \frac{r_{Aim}(m)}{R_d} \right\rfloor \end{aligned} \quad (7)$$

[0145] 步骤九(C):按如下编号规则,分别对每个从UUV的当前位置点进行编号 $id_f(i)$ 和从期望点进行编号 $id_{Aim}(m)$:

[0146] (1) 各点编号总体按照环形区域从内到外的顺序;

[0147] (2) 若同一环形区域存在多个点,按照各点的相对方位从小到大进行编号;

[0148] (3) 对各点的编号从1开始直到将所有需要编号的点都编上序号为止。

[0149] 结合图6,根据从UUV的当前位置,由步骤九(C)编号规则(1)可知,由于1号和3号UUV在环形2区域,2号和4号UUV在环形3区域,所以先对环形2区域内UUV当前位置点进行编号。由步骤九(C)编号规则(2),由于环形2区域内 $\theta_f(3) < \theta_f(1)$,所以 $id_f(3) = 1, id_f(1) = 2$;对环形3区域内的从UUV当前位置点继续进行编号,由于 $\theta_f(2) < \theta_f(4)$,所以 $id_f(2) = 3, id_f(4) = 4$ 。由步骤九(C)编号规则(3),所有从UUV的当前位置点都已编号,所以从UUV的当前位置点编号完成。同理,对各从期望点进行编号为 $id_{Aim}(1) = 1, id_{Aim}(2) = 4, id_{Aim}(3) = 2, id_{Aim}(4) = 3$ 。

[0150] 步骤九(D):为各从UUV分配径向机动目标从期望点。根据步骤九(C)得到的 $id_f(i)$ 和 $id_{Aim}(m)$,为每一个从UUV分配一个径向机动的目标从期望点。分配方法为:若 $id_f(i) = id_{Aim}(m)$,则i号UUV径向机动分配了m号从期望点。

[0151] 步骤九(E):求解各从UUV径向机动目标点的位置 $C_{r_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} x_{r_E}(i) \\ y_{r_E}(i) \end{bmatrix}$ 。每个从UUV根据分配的径向机动目标从期望点,利用公式(8)得到各自的径向机动目标点的相对位置

$C_{r_pole_L}(i) = \begin{bmatrix} r_r(i) \\ \theta_r(i) \end{bmatrix}$, 再利用公式 (4) 计算得到 $C_{r_pos_E}(i)$ 。 $r_r(i)$ 为各从UUV径向机动目标点的相对距离, $\theta_r(i)$ 为各从UUV径向机动目标点的相对方位, $C_{r_pole_L}(i)$ 求解过程如下:

$$[0152] \quad r_r(i) = r_{Aim}(m) \quad (8)$$

$$[0153] \quad \theta_r(i) = \theta_f(i)$$

[0154] 如图6所示, 图中虚线UUV所在位置点表示的是当前位置点, 实线UUV所在的位置点表示的是径向机动目标点, 1号从UUV分配到径向机动目标点1, 其他从UUV同理。

[0155] 步骤十: 主UUV将规划好的每个从UUV的径向机动目标点位置信息发送给所有从UUV。

[0156] 步骤十一: 从UUV径向机动。所有从UUV沿着自身当前位置点的径向方向机动到各自的径向机动目标点位置, 每个从UUV径向机动完成后告知主UUV。径向机动过程如图6所示, 1号从UUV从当前位置点1机动到径向机动目标点1, 其他从UUV同理。

[0157] 步骤十二: 主UUV判断是否所有从UUV完成径向机动。若主UUV判断在 $[4\pi R_{max}]$ 秒内所有从UUV完成径向机动, 转步骤十三, 否则认为队形形成失败, 转步骤十八。

[0158] 步骤十三: 主UUV对从UUV进行周向机动规划。主UUV根据所有从UUV当前位置和所有从期望点的位置, 为每一个从UUV分配一个从期望点, 规划结果是得到每个从UUV的周向

机动目标点 $C_{c_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} x_{c_E}(i) \\ y_{c_E}(i) \end{bmatrix}$, 具体过程如下:

[0159] 步骤十三(A): 求解各从UUV当前位置点所在的扇形区域 $sector(i)$ 和环形区域 $ring(i)$ 。根据所有从UUV的当前位置, 利用公式 (1)、(2) 和 (3) 得到各从UUV当前位置点的相对位置 $P_{f_pole_L}(i)$, 再利用公式 (5) 计算各从UUV当前位置点所在的扇形区域 $sector(i)$ 和环形区域 $ring(i)$ 。

[0160] 步骤十三(B): 为所有从UUV根据编号规则进行编号。根据步骤九(B)中的编号规则对每个从UUV的当前位置点重新编号, 更新编号 $id_f(i)$ 。如图7所示, 根据各从UUV当前位置点, 可得到如下编号: $id_f(1) = 3, id_f(2) = 2, id_f(3) = 1, id_f(4) = 4$ 。

[0161] 步骤十三(C): 为各从UUV分配从期望点。结合步骤十三(B)得到的 $id_f(i)$ 和步骤九(B)得到的 $id_{Aim}(m)$, 为每一个从UUV分配一个从期望点。分配方法同样为: 若 $id_f(i) = id_{Aim}(m)$, 则 i 号从UUV就分配了 m 号从期望点。

[0162] 步骤十三(D): 求解各从UUV周向机动目标点的位置 $C_{c_pos_E}(i) = \begin{bmatrix} x_{c_E}(i) \\ y_{c_E}(i) \end{bmatrix}$ 。每个从UUV根据分配的从期望点, 利用公式 (9) 得到各自的周向机动目标点的相对位置

$C_{c_pole_L}(i) = \begin{bmatrix} r_c(i) \\ \theta_c(i) \end{bmatrix}$, 再利用公式 (4) 计算得到 $C_{c_pos_E}(i)$ 。 $r_c(i)$ 为各从UUV周向机动目标点的相对距离, $\theta_c(i)$ 为各从UUV周向机动目标点的相对方位, $C_{c_pole_L}(i)$ 求解过程如下:

$$[0163] \quad \begin{aligned} r_c(i) &= r_f(i) \\ \theta_c(i) &= \theta_{Aim}(m) \end{aligned} \quad (9)$$

[0164] 如图7所示,图中虚线UUV所在位置点表示的是当前位置点,实线UUV所在的位置点表示的是周向机动目标点,各周向机动目标点与相应的从期望点重合。图7中,1号UUV分配到从期望点4上,2号UUV分配到从期望点3上,3号UUV分配到从期望点1上,4号UUV分配到出从期望点2上。

[0165] 步骤十四:主UUV将规划好的每个从UUV的周向机动目标点位置信息发送给所有从UUV。

[0166] 步骤十五:从UUV周向机动。所有从UUV从当前位置向各自的周向机动目标点位置进行机动。周向机动过程如图7所示,1号从UUV从当前位置点1机动到从期望点4,其他从UUV同理。每个从UUV周向机动完成后告知主UUV。

[0167] 步骤十六:主UUV判断是否所有从UUV完成周向机动。若主UUV判断在 $[4\pi R_{max}]$ 内所有从UUV完成周向机动,转步骤十七,否则认为队形形成失败,转步骤十八。

[0168] 步骤十七:主UUV向所有从UUV发送队形形成成功指令,所有UUV保持定点、定艏向,转步骤十九。

[0169] 步骤十八:主UUV向所有从UUV发送队形形成失败指令,所有UUV停车。

[0170] 步骤十九:UUV集群编队队形形成结束。

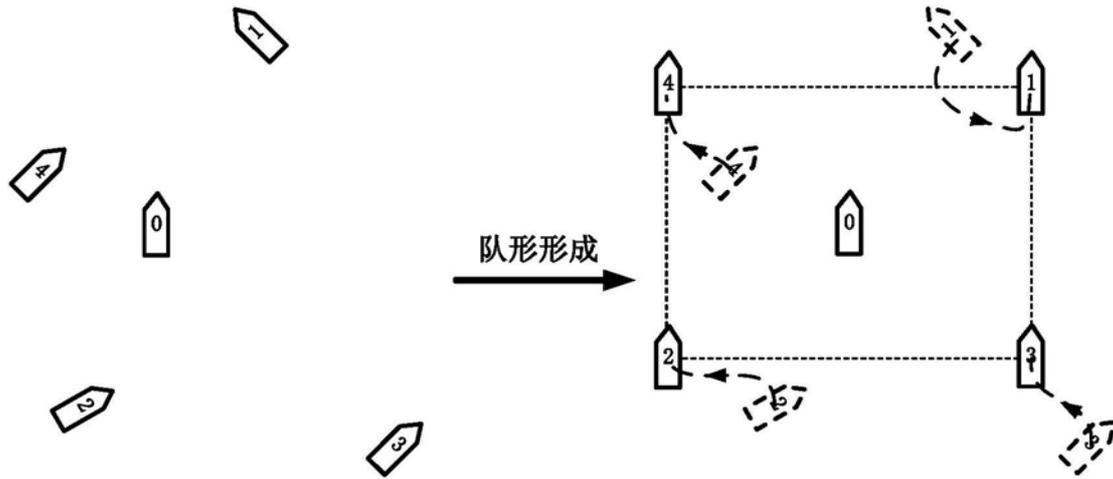


图1

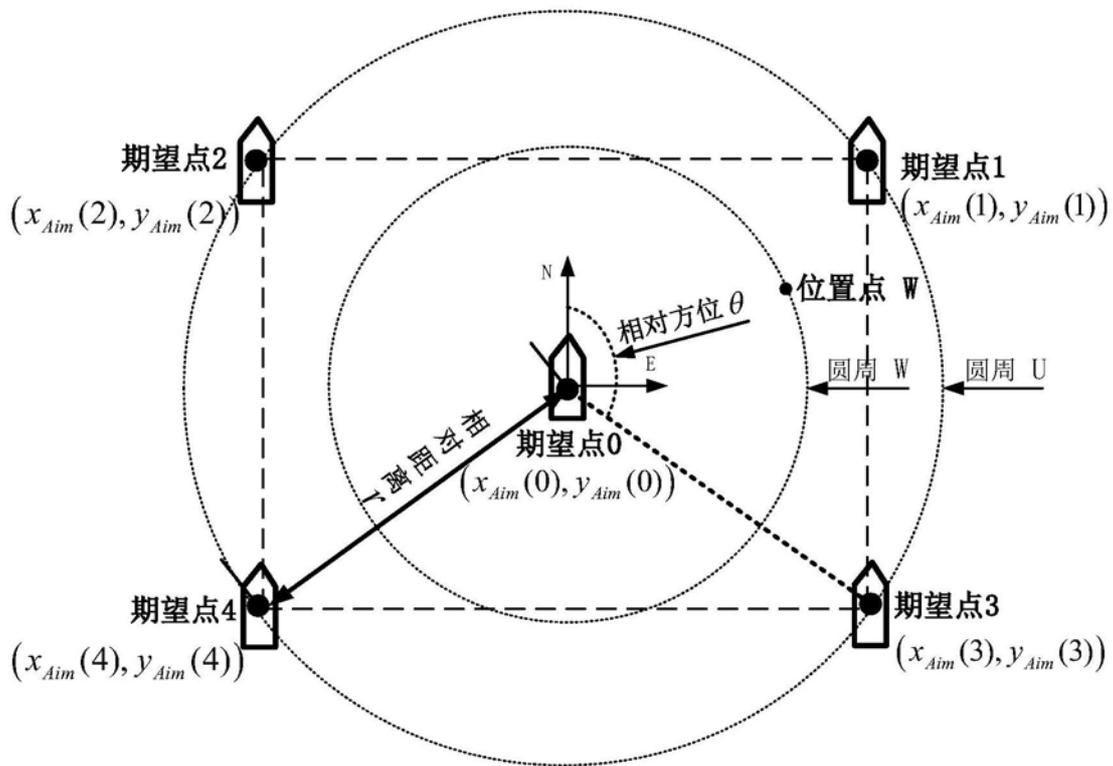


图2

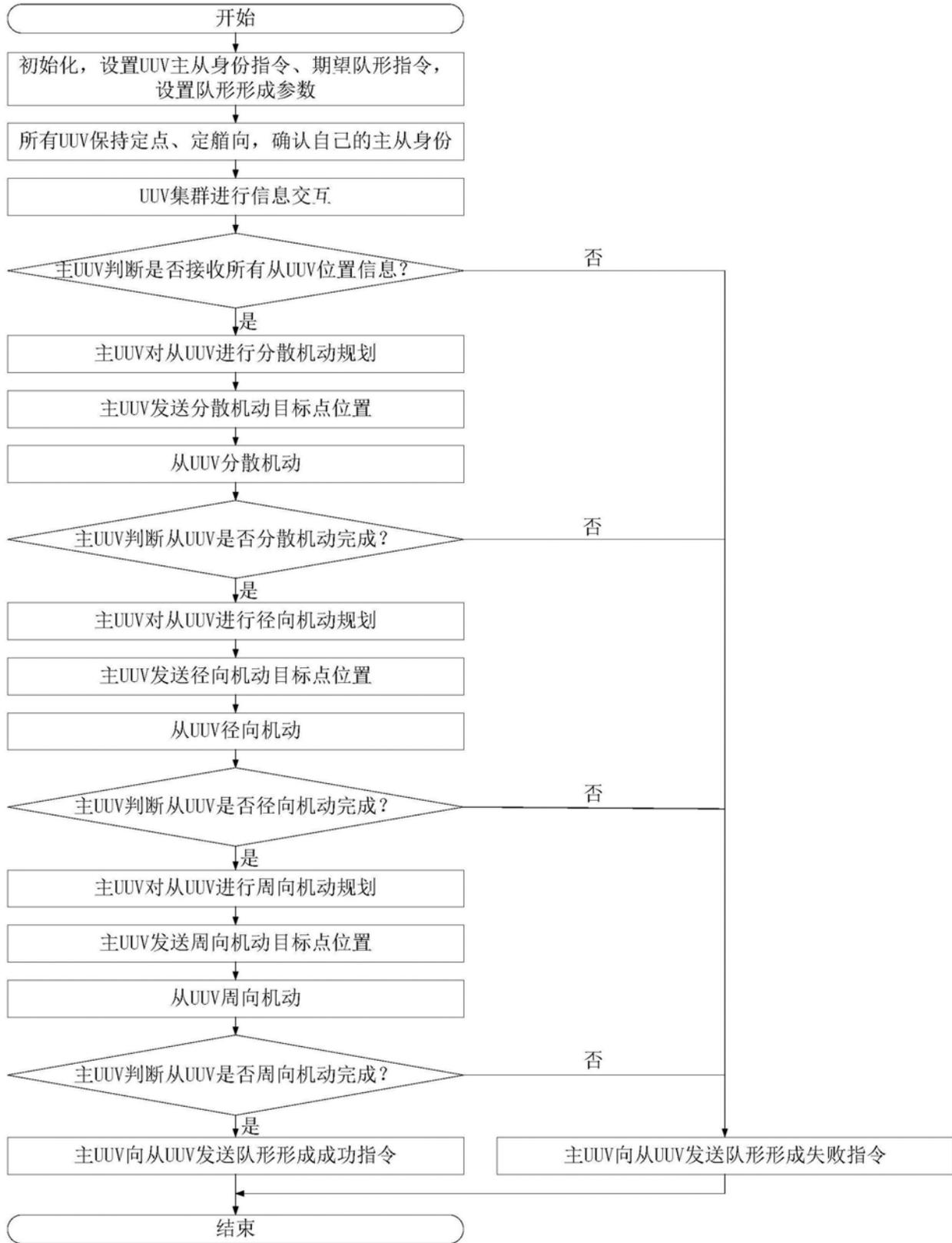


图4

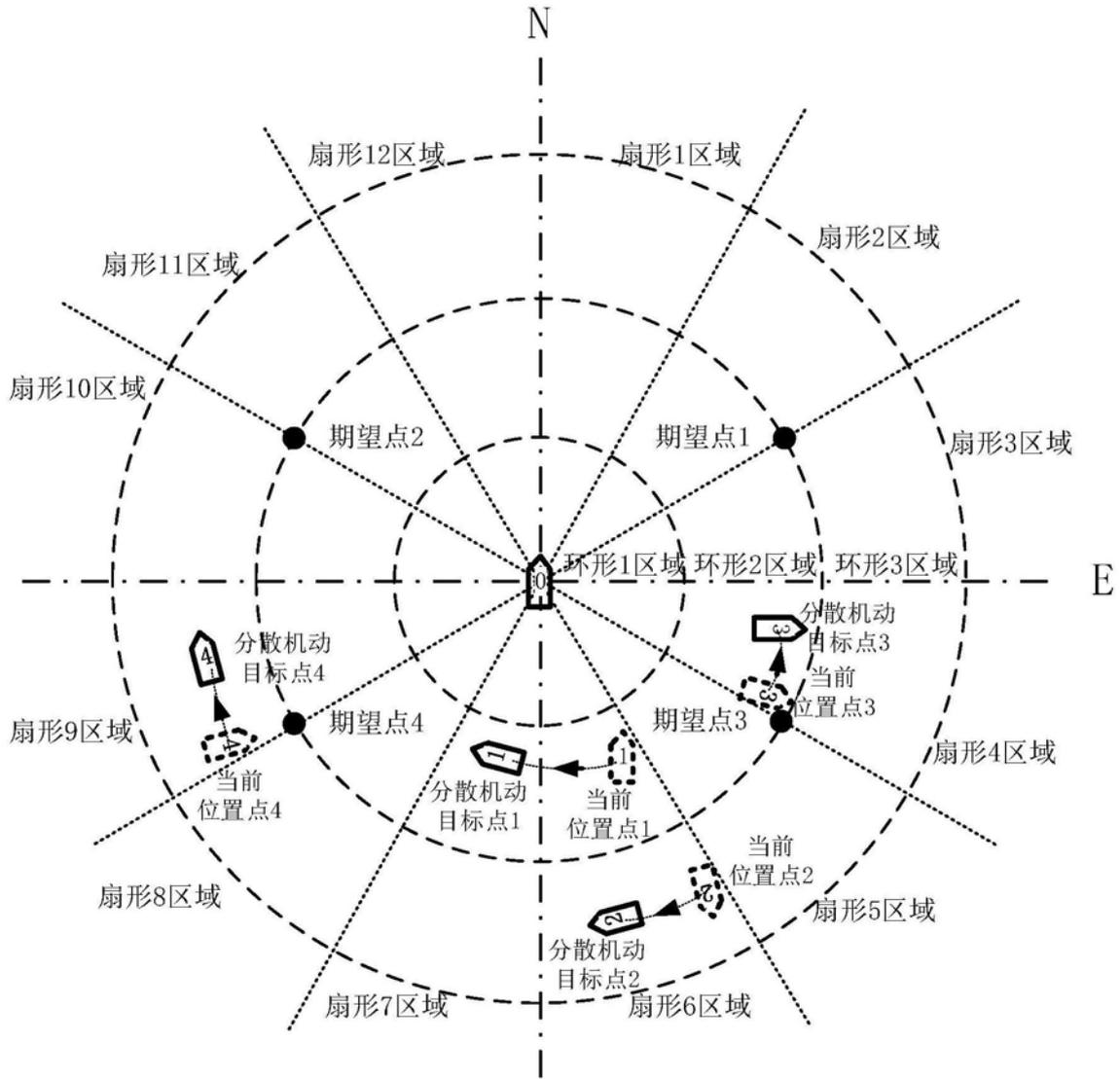


图5

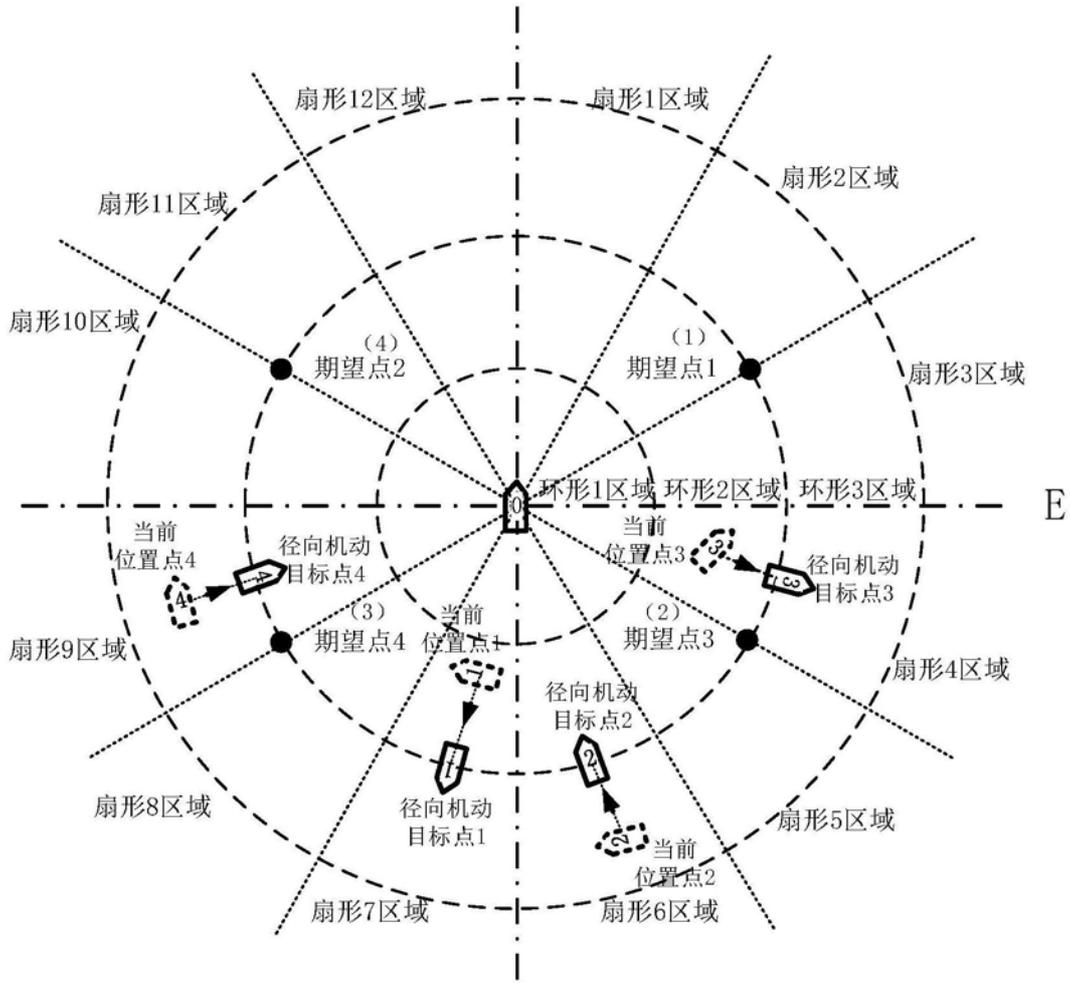


图6

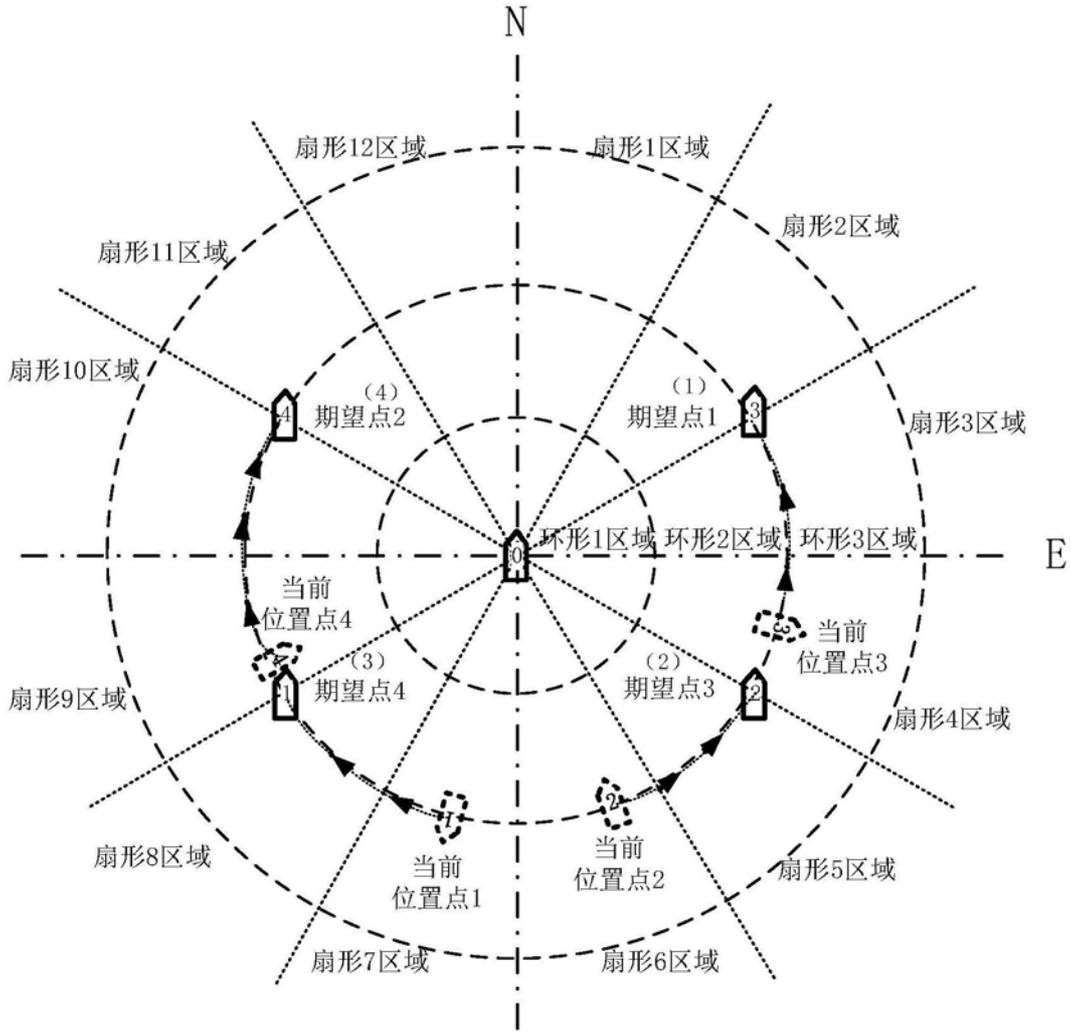


图7