



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116257067 A

(43) 申请公布日 2023. 06. 13

(21) 申请号 202310399624.4

(22) 申请日 2023.04.14

(71) 申请人 上海交通大学

地址 200240 上海市闵行区东川路800号

(72) 发明人 黄文焘 李昊 余墨多 邵能灵

(74) 专利代理机构 上海交达专利事务所 31201

专利代理师 王毓理 王锡麟

(51) Int. Cl.

G05D 1/02 (2020.01)

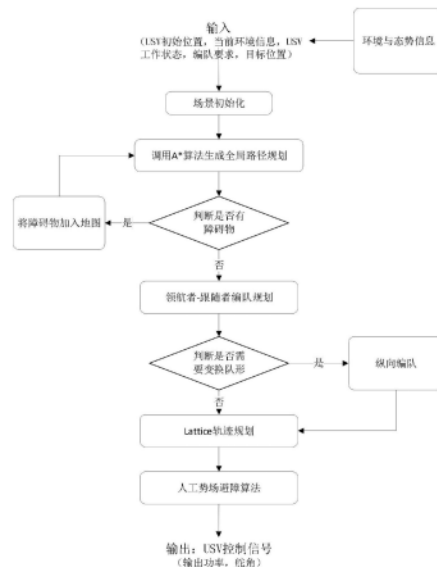
权利要求书3页 说明书6页 附图6页

(54) 发明名称

无人艇集群的协同编队多层次规划控制方法

(57) 摘要

一种无人艇集群的协同编队多层次规划控制方法,根据单艘无人艇在各个自由度的运动特性,建立单艇运动学模型并基于避障需求,通过A\*算法进行单艇路径的动态重规划,得到全局路径规划生成的路径;建立无人艇集群编队方法,以全局路径规划生成的路径为参考线,通过改进Lattice规划算法生成集群中各无人艇的规划路径点;构建集群间单艇避障模型,在艇与艇之间或艇与障碍物之间距离过近的情况下,通过避障模型实现集群中各无人艇能够保持安全距离。本发明从全局路径规划、局部的集群控制以及单艇避障算法三个层面对无人艇艇群的运动进行规划及控制,并在轨迹评价中添加补偿措施;通过基于改进人工势场法的无人艇集群避障算法,解决集群间无人艇的避障需求。



CN 116257067 A

1. 一种无人艇集群的协同编队多层次规划控制方法,其特征在于,根据单艘无人艇在各个自由度的运动特性,建立单艇运动学模型并基于避障需求,通过A\*算法进行单艇路径的动态重规划,得到全局路径规划生成的路径;建立无人艇集群模型,以全局路径规划生成的路径为参考线,通过改进Lattice规划算法生成集群中各无人艇的规划路径点;构建集群间单艇避障模型,在艇与艇之间或艇与障碍物之间距离过近的情况下,通过避障模型实现集群中各无人艇能够保持安全距离。

2. 根据权利要求1所述的无人艇集群的协同编队多层次规划控制方法,其特征是,具体包括:

步骤1) 建立无人艇单艇模型:对于无人艇而言,通常忽略垂荡、横摇和纵摇3个自由度上的运动,在两艘坐标系下对无人艇的运动进行描述:选取地球坐标系 $X_E-Y_E$ 作为参考坐标系,固连在无人艇上的坐标系 $X_B-Y_B$ 作为无人艇坐标系,考虑N艘无人艇组成的集群系统,第i艘无人艇的运动学和动力学方程可由三自由度非线性模型描述为: $\eta_i = R(\psi_i) v_i$ ,  $M_i \dot{v}_i + C_i(v_i)v_i + D(v_i)v_i + g_i(v_i) = \tau_i + \tau_{dis}$ ,其中: $\psi_i$ 为艏摇角, $v_i = [u_i, v_i, r_i]$ 为第i艘无人艇的线速度和角速度向量, $u_i$ 和 $v_i$ 分别为 $X_B-Y_B$ 坐标系下的纵荡速度和横荡速度, $r_i$ 为艏摇角速度, $\beta_i$ 为侧滑角, $\eta_i = [x_i, y_i, \psi_i]$ 为第i艘无人艇在参考坐标系下的位置和艏摇角度, $\tau_i$ 为控制输入, $\tau_{dis}$ 为由风浪及海洋环境引起的扰动输入, $g_i(v_i)$ 包括未建模流体动态和建模误差,无人

艇坐标系相对于参考坐标系的旋转矩阵  $R(\psi_i) = \begin{bmatrix} \cos(\psi_i) & \sin(\psi_i) & 0 \\ -\sin(\psi_i) & \cos(\psi_i) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ , 惯性质量矩阵  $M_i =$

$\begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}$ , 向心力和科氏力矩阵  $C_i(v_i) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} \\ 0 & 0 & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & 0 \end{bmatrix}$ , 阻尼矩阵  $D(v_i) =$

$\begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & d_{23} \\ 0 & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix}$ ,  $m_{ij}, c_{ij}, d_{ij}$  均为常系数,无人艇在航行时由于横漂速度产生的侧滑角  $\beta_i = a$

$\tan 2(v_i, u_i)$ ;

步骤2) 通过A\*算法进行单艇路径的动态重规划,得到全局路径规划生成的路径:根据起始点坐标、目标点坐标、障碍物坐标及所占栅格大小,以A\*算法通过最小化实际成本和启发式成本的总和选择后继点并得到起始点到目标点的无碰撞路径点;并在无人艇探测到周边障碍物时,将根据感知识别结果将障碍物位置及所占地图栅格大小加入到环境信息中,此时重新调用A\*算法计算出新的无碰撞规划路径,直至探测不到新的障碍物为止;

步骤3) 建立无人艇集群模型:以两艘无人艇为例, $(x_l, y_l, \varphi_l)$ 、 $(x_f, y_f, \varphi_f)$ 分别为领航艇和跟随艇的位置和航向, $l$ 为领航艇和跟随艇之间的相对距离, $l_x$ 和 $l_y$ 为两艘艇之间的横纵距离, $\varphi_l$ 和 $\varphi_f$ 分别为领航艇和跟随艇的航向,在实际航行中,当给定领航艇的位置并确定两艘艇之间的相对距离和角度,则 $l_x$ 和 $l_y$ 的值为固定值,即跟随艇的位置唯一,所以可通过对编

队间距 $(l_x, l_y)$ 的控制来实现多艘无人艇编队控制,具体包括:
$$\begin{cases} l_x = -(x_l - x_f)\cos \varphi_l - (y_l - y_f)\sin \varphi_l \\ l_y = (x_l - x_f)\sin \varphi_l - (y_l - y_f)\cos \varphi_l \\ e_\varphi = \varphi_l - \varphi_f \end{cases}$$

对其求导得到领航者与跟随者的相对运动方程 
$$\begin{cases} \dot{l}_x = -u_l + u_f \cos e_\varphi + v_f \sin e_\varphi + l_y r_l \\ \dot{l}_y = -v_l - u_f \sin e_\varphi + v_f \cos e_\varphi - l_x r_l; \text{进而得} \\ \dot{e}_\varphi = r_l - r_f \end{cases}$$

到运动学目标 
$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \|l_x - l_x^d\| = \lim_{t \rightarrow \infty} \|e_x\| = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|l_y - l_y^d\| = \lim_{t \rightarrow \infty} \|e_y\| = 0 \end{cases}$$
, 动力学目标 
$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \|u_f - u_l\| = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|\varphi_f - \varphi_l\| = 0 \end{cases}$$
, 其中:  $u_l, v_l$  为领航

艇在纵荡和横荡方向上的速度,  $u_f, v_f$  为跟随艇在纵荡和横荡方向上的速度,  $r_l$  和  $r_f$  分别为领航艇和跟随艇的角速度,  $l_x^d, l_y^d$  分别为两艘艇间希望保持的距离的x轴和y轴分量,  $e_x$  和  $e_y$  为x和y方向上的距离跟踪误差, 从而在行进过程中, 编队中各艇间的相对位置尽量保持不变, 并且与领队艇的运动误差尽可能小;

步骤4) 以步骤2全局路径规划生成的路径为参考线, 采用改进Lattice规划器完成无人艇局部轨迹规划, 即将无人艇坐标系转换到Frenet坐标系后, 在Frenet坐标系下分别对Frenet的d轴和s轴进行规划, 形成Frenet坐标系下的规划轨迹, 然后将Frenet坐标系下的轨迹合成到世界坐标系下还原为世界坐标系下的轨迹;

步骤5) 采用改进人工势场法设计无人艇的避障算法建立单艇避障模型以避免由于实际仿真运行过程中, 无人艇可能会偏离参考路径造成与其他艇距离过近的问题, 具体为: 将起点、终点、障碍物以及机器人模拟成人造势场, 将机器人的运动抽象成为具有不同符号的电子势场中的运动粒子或磁场中的两个磁极的同时考虑多艘无人艇的协作避障动作, 以最小代价完成避障动作。

3. 根据权利要求2所述的无人艇集群的协同编队多层次规划控制方法, 其特征是, 所述的步骤4具体包括:

4.1) 将无人艇当前位姿信息转换到Frenet坐标系下, 获得无人艇在Frenet坐标系的初始状态; 根据当前速度计算前瞻距离, 获得前瞻点以及无人艇在前瞻点位置Frenet坐标系下的目标状态; 将无人艇的坐标点P投影到参考线上, 得到一个参考线上的投影点R, 从参考线起点到投影点的路径长度为无人艇在Frenet坐标系下的纵向偏移量s, 从投影点R到无人艇位置的距离l(s)为无人艇在Frenet坐标系下的横向偏移量;

4.2) 以轨迹运行时间t, 目标速度v以及到参考线的横向位移d作为规划参数获得采样状态, 通过Lattice规划器进行用于形成不同的横向偏移量的横向采样、纵向采样以及对轨迹的运行周期时间进行采样的轨迹时间周期采样, 具体为: 根据采样状态生成通过多项式进行拟合求解生成的横向偏移量l(s)和纵向偏移量s(t)和规划函数, 纵向拟合5次多项式函数为:

$$s(t) = c_1 t^5 + c_2 t^4 + c_3 t^3 + c_4 t^2 + c_5 t + c_6$$

$$v(t) = 5c_1 t^4 + 4c_2 t^3 + 3c_3 t^2 + 2c_4 t + c_5 ;$$

$$a(t) = 20c_1 t^3 + 12c_2 t^2 + 6c_3 t + 2c_4$$

$$s(t_0) = c_6 = s_0$$

$$v(t_0) = c_5 = ts_0$$

$$a(t_0) = 2c_4 = tts_0$$

约束函数:  $s(t_1) = c_1 t_1^5 + c_2 t_1^4 + c_3 t_1^3 + c_4 t_1^2 + c_5 t_1 + c_6 = s_1$ , 其中: s(t), v(t) 和a(t) 分别

$$v(t_1) = 5c_1 t_1^4 + 4c_2 t_1^3 + 3c_3 t_1^2 + 2c_4 t_1 + c_5 = ts_1$$

$$a(t_1) = 20c_1 t_1^3 + 12c_2 t_1^2 + 6c_3 t_1 + 2c_4 = tts_1$$

为无人艇在 $t$ 时刻的纵向偏移量、速度及加速度, $c_1 \sim c_6$ 分别为线性插值的系数; $s(t_0), v(t_0), a(t_0)$ 分别为无人艇轨迹规划初始时刻的位置,速度和加速度; $s(t_1), v(t_1), a(t_1)$ 分别为无人艇轨迹规划结束时刻的纵向偏移量,速度和加速度;

4.3) 构建横向偏移量和纵向偏移量的多项式规划函数 $s(t), d(s)$ ,获得横向位移和纵向位移的规划函数后,进行时间插值获得参考线Frenet坐标系下的轨迹点,最后将轨迹点从Frenet坐标系转换到cartesian坐标系,获得物理世界采样轨迹;

4.4) 通过轨迹评价函数对采样轨迹的碰撞检测、曲率约束及最优轨迹打分,以获得一条最优的满足约束条件的无碰撞光滑轨迹,即Lattice输出到控制器用于无人艇跟随的轨迹。

4. 一种实现权利要求1-3中任一所述的无人艇集群的协同编队多层次规划控制方法的多层次规划控制系统,其特征在于,包括:无人艇单艇仿真模块、集群规划算法模块以及系统配置模块,其中:无人艇系统配置模块设置环境信息并输出至集群规划算法模块;集群规划算法模块根据环境信息计算全局最优路径及局部轨迹平滑路径,得到全局和局部轨迹参考路径;单艇仿真模块基于轨迹参考路径,根据无人艇动力学约束和避碰约束计算得到无人艇集群中各无人艇的实时路径。

## 无人艇集群的协同编队多层次规划控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及的是一种无人艇航迹规划领域的技术,具体是一种无人艇集群的协同编队多层次规划控制方法。

### 背景技术

[0002] 基于无人艇(USV)的海上自主作业近年来受到世界各国广泛关注,USV具备体积小,速度快,布置灵活等优势,由于无需人的直接操控,使得海上作业的安全性大大提高,在海上救援、海洋调查等场景具有极佳的应用潜力。相比单艘USV,由多艘USV组成的无人艇集群能够弥补单艇可靠性不足,作业能力有限的劣势,具有更好的任务能力。而集群带来的主要问题是USV之间的相互配合较为复杂,这种复杂性主要表现在两个方面,一是集群之间的无人艇需要满足避碰要求,而是集群间的USV需要保持较为稳定的相对距离,因此USV编队技术对于提高USV集群的整体效能具有关键作用。

### 发明内容

[0003] 本发明针对现有技术无法处理上层路径规划的实时更新,且没有针对艇群间的避碰要求提供解决方案不足,提出一种无人艇集群的协同编队多层次规划控制方法,从全局路径规划、局部的集群控制以及单艇避障算法三个层面对无人艇艇群的运动进行规划及控制,通过降次规划解决针对Lattice规划线性插值计算量大的问题,并在轨迹评价中添加补偿措施;通过基于改进人工势场法的无人艇集群避障算法,解决集群间无人艇的避障需求。

[0004] 本发明是通过以下技术方案实现的:

[0005] 本发明涉及一种无人艇集群的协同编队多层次规划控制方法,根据单艘无人艇在各个自由度的运动特性,建立单艇运动学模型并基于避障需求,通过A\*算法进行单艇路径的动态重规划,得到全局路径规划生成的路径;建立无人艇集群模型,以全局路径规划生成的路径为参考线,通过改进Lattice规划算法生成集群中各无人艇的规划路径点;构建集群间单艇避障模型,在艇与艇之间或艇与障碍物之间距离过近的情况下,通过避障模型实现集群中各无人艇能够保持安全距离。

[0006] 本发明涉及一种实现上述方法的多层次规划控制系统,包括:无人艇单艇仿真模块、集群规划算法模块以及系统配置模块,其中:无人艇系统配置模块设置环境信息并输出至集群规划算法模块;集群规划算法模块根据环境信息计算全局最优路径及局部轨迹平滑路径,得到全局和局部轨迹参考路径;单艇仿真模块基于轨迹参考路径,根据无人艇动力学约束和避碰约束计算得到无人艇集群中各无人艇的实时路径。

### 技术效果

[0007] 本发明同时考虑全局最优和局部约束,以全局路径规划作为局部路径规划的参考线,能够反映无人艇集群的真实轨迹特点。基于改进Lattice的局部轨迹规划能够提升无人艇集群轨迹规划的实时性,轨迹重规划时间不大于0.5s。同时考虑到无人艇的机动性能及能耗约束,生成的参考轨迹避免无人艇的动作输出幅度变化过大。单艇避障考虑集群间无

人艇的协同关系,所提方法使得输出给动力系统的控制信号较为平滑,能够较好地满足无人艇集群间的实时避障需求。

### 附图说明

- [0008] 图1为本发明流程图;  
 [0009] 图2为实施例中无人艇单艇动力学模型示意图;  
 [0010] 图3为实施例中A\*算法路径动态重规划示意图;  
 [0011] 图4为实施例中无人艇集群领航者-跟随者编队模式示意图;  
 [0012] 图5为实施例中Lattice规划器输入输出示意图;  
 [0013] 图6为实施例中Lattice规划不同坐标系下的相互关系示意图;  
 [0014] 图7为实施例中无人艇集群改进人工势场法避障示意图;  
 图8-图10为实施例效果示意图。

### 具体实施方式

[0015] 如图1所示,为本实施例涉及一种无人艇集群协同编队分层规划控制方法,包括:

[0016] 步骤1) 建立如图2所示的无人艇单艇模型:对于无人艇而言,通常忽略垂荡、横摇和纵摇3个自由度上的运动,一般在两艘坐标系下对无人艇的运动进行描述:选取地球坐标系 $X_E-Y_E$ 作为参考坐标系,固连在无人艇上的坐标系 $X_B-Y_B$ 作为无人艇坐标系,图中: $\psi_i$ 为艏摇角, $v_i = [u_i, v_i, r_i]$ 为第*i*艘无人艇的线速度和角速度向量, $u_i$ 和 $v_i$ 分别为 $X_B-Y_B$ 坐标系下的纵荡速度和横荡速度, $r_i$ 为艏摇角速度, $\beta_i$ 为侧滑角。

[0017] 考虑*N*艘无人艇组成的集群系统,第*i*艘无人艇的运动学和动力学方程可由三自由度非线性模型描述为: $\eta_i = R(\psi_i) v_i$ ,  $M_i \dot{v}_i + C_i(v_i) v_i + D(v_i) v_i + g_i(v_i) = \tau_i + \tau_{dis}$ ,  $\eta_i = [x_i, y_i, \psi_i]$ 为第*i*艘无人艇在参考坐标系下的位置和艏摇角度, $\tau_i$ 为控制输入, $\tau_{dis}$ 为由风浪及海洋环境引起的扰动输入, $g_i(v_i)$ 包括未建模流体动态和建模误差,无人艇坐标系相对于参考坐

标系的旋转矩阵  $R(\psi_i) = \begin{bmatrix} \cos(\psi_i) & \sin(\psi_i) & 0 \\ -\sin(\psi_i) & \cos(\psi_i) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ , 惯性质量矩阵  $M_i = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}$ , 向心力

和科氏力矩阵  $C_i(v_i) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} \\ 0 & 0 & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & 0 \end{bmatrix}$ , 阻尼矩阵  $D(v_i) = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & d_{23} \\ 0 & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix}$ ,  $m_{ij}, c_{ij}, d_{ij}$  均为常

系数,无人艇在航行时由于横漂速度产生的侧滑角  $\beta_i = \text{atan2}(v_i, u_i)$ 。

[0018] 所述的控制输入满足约束条件:  $-\tau_{ic} \leq \tau_i \leq \tau_{ic}$ , 其中: $\tau_{ic}$ 为 $\tau_i$ 的上下限值。

[0019] 步骤2) 通过A\*算法进行单艇路径的动态重规划,得到全局路径规划生成的路径:如图3所示,根据起始点坐标、目标点坐标、障碍物坐标及所占栅格大小,以A\*算法通过最小化实际成本和启发式成本的总和选择后继点并得到起始点到目标点的无碰撞路径点;并在无人艇探测到周边障碍物时,将根据感知识别结果将障碍物位置及所占地图栅格大小加入到环境信息中,此时重新调用A\*算法计算出新的无碰撞规划路径,直至探测不到新的障碍物为止。

[0020] 步骤3) 如图4所示,建立无人艇集群Leader-Follower模型:以两艘无人艇为例,

$(x_l, y_l, \varphi_l)$ 、 $(x_f, y_f, \varphi_f)$ 分别为领航艇和跟随艇的位置和航向,  $l$ 为领航艇和跟随艇之间的相对距离,  $l_x$ 和 $l_y$ 为两艘艇之间的横纵距离,  $\varphi_l$ 和 $\varphi_f$ 分别为领航艇和跟随艇的航向。在实际航行中, 当给定领航艇的位置并确定两艘艇之间的相对距离和角度, 则 $l_x$ 和 $l_y$ 的值为固定值, 即跟随艇的位置唯一。所以可通过对编队间距 $(l_x, l_y)$ 的控制来实现多艘无人艇编队控制, 具体

体包括: 
$$\begin{cases} l_x = -(x_l - x_f)\cos\varphi_1 - (y_l - y_f)\sin\varphi_1 \\ l_y = (x_l - x_f)\sin\varphi_1 - (y_l - y_f)\cos\varphi_1 \\ e_\varphi = \varphi_l - \varphi_f \end{cases}$$
, 对其求导得到领航者与跟随者的相对运动

方程 
$$\begin{cases} \dot{l}_x = -u_l + u_f\cos e_\varphi + v_f\sin e_\varphi + l_y r_l \\ \dot{l}_y = -v_l - u_f\sin e_\varphi + v_f\cos e_\varphi - l_x r_l \\ \dot{e}_\varphi = r_l - r_f \end{cases}$$
; 进而得到运动学目标 
$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \|l_x - l_x^d\| = \lim_{t \rightarrow \infty} \|e_x\| = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|l_y - l_y^d\| = \lim_{t \rightarrow \infty} \|e_y\| = 0 \end{cases}$$
,

动力学目标 
$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \|u_f - u_l\| = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|\varphi_f - \varphi_l\| = 0 \end{cases}$$
, 其中:  $u_l, v_l$ 为领航艇在纵荡和横荡方向上的速度,  $u_f, v_f$ 为跟随艇在纵荡和横荡方向上的速度,  $r_l$ 和 $r_f$ 分别为领航艇和跟随艇的角速度,  $l_x^d, l_y^d$ 分别为两艘艇间希望保持的距离的x轴和y轴分量,  $e_x$ 和 $e_y$ 为x和y方向上的距离跟踪误差, 从而在行进过程中, 编队中各艇间的相对位置尽量保持不变, 并且与领队艇的运动误差尽可能小。

[0021] 所述的无人艇集群Leader-Follower模型, 进一步包括安全距离约束, 具体为:  $\|l_v - l_{obs}\| \geq d_{safe}$ , 其中:  $d_{safe}$ 为预定的安全距离,  $l_v$ 为无人艇v的x, y坐标,  $l_{obs}$ 为障碍物边界的x, y坐标, 实现在纵向编队的过程中, 各艇的运动路径相对重合, 同时需要保持与周围障碍物留有一定的安全距离。

[0022] 步骤4) 如图5所示, 以步骤2全局路径规划生成的路径为参考线(Reference line), 采用改进Lattice规划器完成无人艇局部轨迹规划, 即将无人艇坐标系转换到Frenet坐标系后, 在Frenet坐标系下分别对Frenet的d轴和s轴进行规划, 形成Frenet坐标系下的规划轨迹, 然后将Frenet坐标系下的轨迹合成到世界坐标系下还原为世界坐标系下的轨迹, 具体包括:

[0023] 4.1) 如图6所示, 将无人艇当前位姿信息转换到Frenet坐标系下, 获得无人艇在Frenet坐标系的初始状态; 根据当前速度计算前瞻距离, 获得前瞻点以及无人艇在前瞻点位置Frenet坐标系下的目标状态; 将无人艇的坐标点P投影到参考线上, 得到一个参考线上的投影点R, 从参考线起点到投影点的路径长度为无人艇在Frenet坐标系下的纵向偏移量s, 从投影点R到无人艇位置的距离 $l(s)$ 为无人艇在Frenet坐标系下的横向偏移量。

[0024] 本实施例将横向偏移量 $l(s)$ 设计成纵向偏移量s的函数, 将坐标点转换到Frenet坐标系的目的则是为方便规划曲线的生成和道线横向和纵向方向上的轨迹采样, 从而获得覆盖整个航道的光滑采样轨迹。

[0025] 4.2) 以轨迹运行时间t, 目标速度v以及到参考线的横向位移d作为规划参数获得采样状态, 通过Lattice规划器进行用于形成不同的横向偏移量的横向采样、纵向采样以及对轨迹的运行周期时间进行采样的轨迹时间周期采样, 具体为: 根据采样状态生成通过多项式进行拟合求解生成的横向偏移量 $l(s)$ 和纵向偏移量s(t)和规划函数, 纵向拟合5次多

$$s(t) = c_1 t^5 + c_2 t^4 + c_3 t^3 + c_4 t^2 + c_5 t + c_6$$

项式函数为:  $v(t) = 5c_1 t^4 + 4c_2 t^3 + 3c_3 t^2 + 2c_4 t + c_5$  ;

$$a(t) = 20c_1 t^3 + 12c_2 t^2 + 6c_3 t + 2c_4$$

$$s(t_0) = c_6 = s_0$$

$$v(t_0) = c_5 = ts_0$$

$$a(t_0) = 2c_4 = tts_0$$

[0026] 约束函数:  $s(t_1) = c_1 t_1^5 + c_2 t_1^4 + c_3 t_1^3 + c_4 t_1^2 + c_5 t_1 + c_6 = s_1$ , 其中:  $s(t)$ ,  $v(t)$  和  $a(t)$

$$v(t_1) = 5c_1 t_1^4 + 4c_2 t_1^3 + 3c_3 t_1^2 + 2c_4 t_1 + c_5 = ts_1$$

$$a(t_1) = 20c_1 t_1^3 + 12c_2 t_1^2 + 6c_3 t_1 + 2c_4 = tts_1$$

分别为无人艇在 $t$ 时刻的纵向偏移量、速度及加速度,  $c_1 \sim c_6$ 分别为线性插值的系数;  $s(t_0)$ ,  $v(t_0)$ ,  $a(t_0)$ 分别为无人艇轨迹规划初始时刻的位置, 速度和加速度;  $s(t_1)$ ,  $v(t_1)$ ,  $a(t_1)$ 分别为无人艇轨迹规划结束时刻的纵向偏移量, 速度和加速度。

[0027] 本实施例采用降次采样方法, 即采用三次函数对轨迹进行拟合, 且仅对速度和轨迹进行拟合, 保证生成轨迹的平滑度。对于加速度, 通过在轨迹评价的目标函数中添加惩罚项的方式进行约束, 通过惩罚项对无人艇执行动作过程中的加速度进行约束, 尽量保证其变化不会过快。降次拟合曲线表达式为:  $s(t) = c_1 t^3 + c_2 t^2 + c_3 t + c_4$ ,  $v(t) = 3c_1 t^2 + 2c_2 t + c_3$ ; 约

$$s(t_0) = c_4 = s_0$$

$$v(t_0) = c_3 = ts_0$$

束条件:  $-a_{max} < a < a_{max}$ , 其中:  $a_{max}$ 为无人艇最大加速度, 与无人艇本身性能相关。

$$s(t_1) = c_1 t_1^3 + c_2 t_1^2 + c_3 t_1 + c_4 = s_1$$

$$v(t_1) = 3c_1 t_1^2 + 2c_2 t_1 + c_3 = ts_1$$

能相关。

[0028] 4.3) 构建横向偏移量和纵向偏移量的多项式规划函数 $l(s)$ ,  $s(t)$ , 获得横向位移和纵向位移的规划函数后, 进行时间插值获得参考线Frenet坐标系下的轨迹点, 最后将轨迹点从Frenet坐标系转换到cartesian坐标系, 获得物理世界采样轨迹。

[0029] 由于横向和纵向都是通过高次多项式插值获得, 以此cartesian坐标系下的轨迹也是光滑的。

[0030] 4.4) 通过轨迹评价函数对采样轨迹的碰撞检测、曲率约束及最优轨迹打分, 以获得一条最优的满足约束条件的无碰撞光滑轨迹, 即Lattice输出到控制器用于无人艇跟随的轨迹。

[0031] 所述的轨迹评价函数为:  $TrajCost = k^{lat} Cost^{lat} + k^{obs} Cost^{obs}$ ;  $k^{lat} Cost^{lat} = k_1^{lat} \sum_t (s(t) - s_{opt}) + k_2^{lat} \sum_t (a(t) - a_0) + k_3^{lat} \sum_t (j(t) - j_0)$ ;  $k^{obs} Cost^{obs} =$

$$\begin{cases} k^{obs} (R^2 - \|x(t) - x_{obs}\|^2 - \|y(t) - y_{obs}\|^2), & \text{if } \sqrt{\|x(t) - x_{obs}\|^2 + \|y(t) - y_{obs}\|^2} \leq R \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \text{ 其中: } s$$

( $t$ ),  $a(t)$ ,  $j(t)$ 为无人艇在 $t$ 时刻的位置, 加速度和加加速度,  $s_{opt}$ ,  $a_0$ ,  $j_0$ 分别为无人艇的参考位置、加速度和加加速度, 由线性插值得到。  $k_1^{lat}$ ,  $k_2^{lat}$ ,  $k_3^{lat}$ 为常系数。  $k^{lat} Cost^{lat}$ 为无人艇实际速度/加速度/加加速度和理想速度/加速度/加加速度的偏差总和。  $R$ 为障碍物威胁半径,  $x(t)$ ,  $y(t)$ 为 $t$ 时刻无人艇 $x$ ,  $y$ 坐标,  $x_{obs}$ ,  $y_{obs}$ 为障碍物坐标,  $k^{obs} Cost^{obs}$ 为无人艇和障碍物间的距离惩罚, 当无人艇进入障碍物威胁半径 $R$ 时, 此项为正。生成期望输出轨迹后, 无



人艇底层控制器调用PID控制,最终生成无人艇的控制信号,包括加加速度(螺旋桨输出功率)和角速度(舵角)。

[0032] 步骤5)采用改进人工势场法设计无人艇的避障算法建立单艇避障模型以避免由于实际仿真运行过程中,无人艇可能会偏离参考路径造成与其他艇距离过近的问题,具体为:将起点、终点、障碍物以及机器人模拟成人造势场,将机器人的运动抽象成为具有不同符号的电子势场中的运动粒子或磁场中的两个磁极的同时考虑多艘无人艇的协作避障动作,以最小代价完成避障动作。

[0033] 例如,无人艇和障碍物粒子均带正电,障碍物对无人艇产生斥力势场;目标对无人艇产生引力势场,则障碍物与目标产生的合力势场会使得无人艇朝向目标运动,并自发地避开障碍物。

[0034] 如图7所示,所述的斥力势场为  $U_R^i(X) = \begin{cases} \frac{1}{4}\lambda_1(\frac{1}{d_{ij}(X_{ij})} - \frac{1}{d_{ij}^0})^2, & d(X_{ij}) \leq d_{ij}^0 \\ -\frac{1}{4}\lambda_2(\frac{1}{d_{ij}(X_{ij})} - \frac{1}{d_{ij}^0})^2, & d(X_{ij}) \geq d_{ij}^0 \end{cases}$  其中:  $\lambda_1 > 0$

为常数,  $d(X_{ij}) = ||X_i - X_{tar}||$  为无人艇i与目标点  $X_{tar}$  的距离。  $d_{ij}^0$  为第i个障碍物的影响距离,  $d_{ij}(X_{ij})$  为无人艇到障碍物的垂线距离。其中势场力正比于势场函数负梯度,势场引力与势

场斥力分别为:  $f_R^i(X) = \begin{cases} -\frac{1}{2}\lambda_1 \frac{X_i - X_j}{d_{ij}(X_{ij})^3} (\frac{1}{d_{ij}(X_{ij})} - \frac{1}{d_{ij}^0})^2, & d(X_{ij}) \leq d_{ij}^0 - \Delta d \\ \frac{1}{2}\lambda_2 \frac{X_i - X_j}{d_{ij}(X_{ij})^3} (\frac{1}{d_{ij}(X_{ij})} - \frac{1}{d_{ij}^0})^2, & d(X_{ij}) \geq d_{ij}^0 + \Delta d \end{cases}$ ,  $\angle\phi = \begin{cases} \angle\phi_i = \delta_i - \frac{\pi}{2} \\ \angle\phi_j = \delta_j + \frac{\pi}{2} \end{cases}$  其

中:  $\Delta d$  为考虑实际工程应用过程中无人艇的动力输出尽量线性,设定一定的操作死区,即在死区内,无人艇的功率输出和舵角不作调整。考虑无人艇在前进方向上的驱动力

$\vec{f}_{adv}(X) = \begin{cases} f_{adv}(X_i)\angle\phi_1 \\ f_{adv}(X_j)\angle\phi_2 \end{cases}$ , 无人艇的合力  $\vec{F}(X) = \vec{f}_R(X) + \vec{f}_{adv}(X)$ , 对大于2艘无人艇组成的编队集群,

其合力表达式同理,即考虑多个无人艇之间的势场力矢量的叠加:  $\vec{F}(X) = \sum_i \vec{f}_R^i(X) + \vec{f}_{adv}(X)$ 。

[0035] 经过具体实际实验,在仿真平台对本方法进行模拟实验,设置5艘无人艇组成无人艇编队,初始位置位于笛卡尔坐标系下(200,200)为圆心,150米半径的圆内。无人艇前往的目标点为(3200,5000),无人艇集群的巡航速度设置为6节。设置无人艇集群在开阔水域采取菱形编队方式。环境参数方面,模拟艇群通过狭窄水道的场景,设置障碍物威胁半径100米,5艘无人艇需要通过狭窄水道后前往目标点。运行仿真程序,得到的试验结果如图8-图10所示。由图8可以看出,无人艇集群在开阔水域能够保持队形间距基本不变,在进入狭窄水道后,由于同时需要满足障碍物和艇间的避碰约束,无人艇群无法并行通过,因而采取一字型通过狭窄水道。由图9可以看出,艇群间的间距通过改进人工势场法保持在一定范围内,且艇群的航速基本保持一致。由图10可以看出,在开阔水域,无人艇群重新回到菱形编队,根据所提轨迹规划方法给出参考轨迹,无人艇按照参考轨迹进行队形的平滑切换。

[0036] 与现有技术相比,本发明采用分层规划控制的思想,将上层路径规划,中层集群规划,轨迹规划及底层单艇的避障控制结合考虑,在全局路径最优的前提下,以全局路径为参

考规划局部路径,生成的局部路径更符合实际意义。本发明对Lattice算法进行简化和改进,提升局部路径规划的速度,同时考虑到线性插值降次导致加速度不够平滑的问题,在评价函数中设计相应的惩罚项,保证无人艇的控制动作不会剧烈变化。本发明考虑集群间无人艇的协同效应,基于传统人工势场法改进,提出集群间无人艇势场力计算方法。所提算法能够反映集群间无人艇的势场力关系,指导每个无人艇的避障动作。提出的方法将避障动作分摊到集群中所有相关的无人艇,优化单个无人艇的动作幅度,即使得无人艇的输出能够更加平滑。

[0037] 上述具体实施可由本领域技术人员在不背离本发明原理和宗旨的前提下以不同的方式对其进行局部调整,本发明的保护范围以权利要求书为准且不由上述具体实施所限,在其范围内的各个实现方案均受本发明之约束。

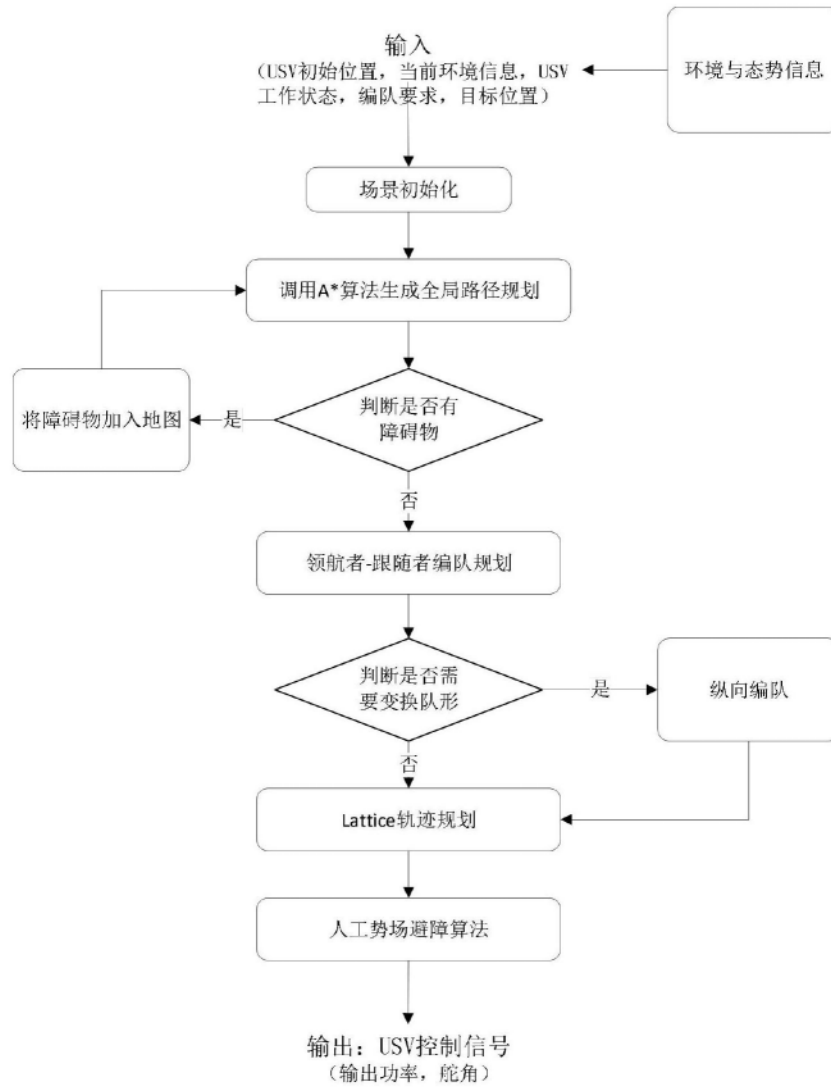


图1

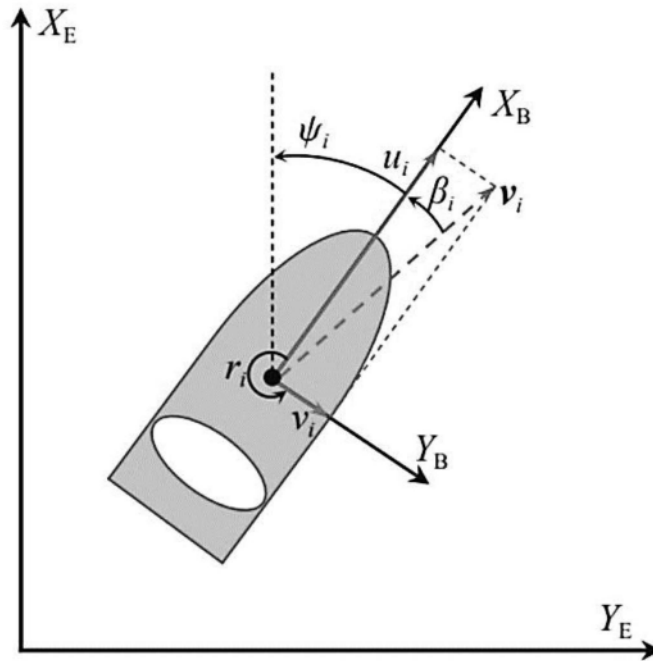


图2

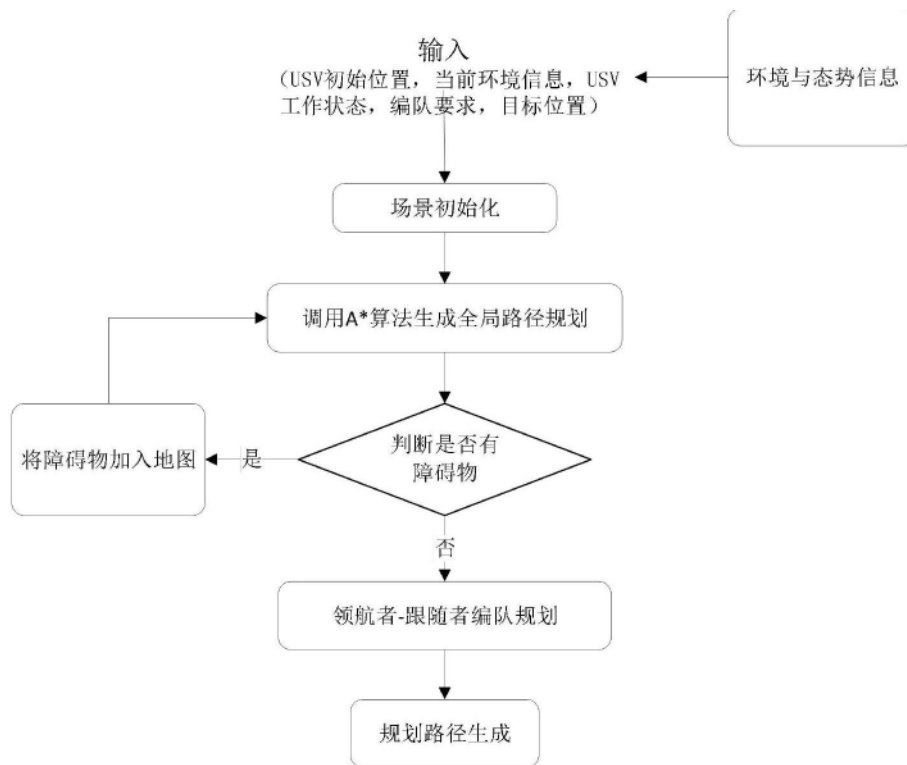


图3

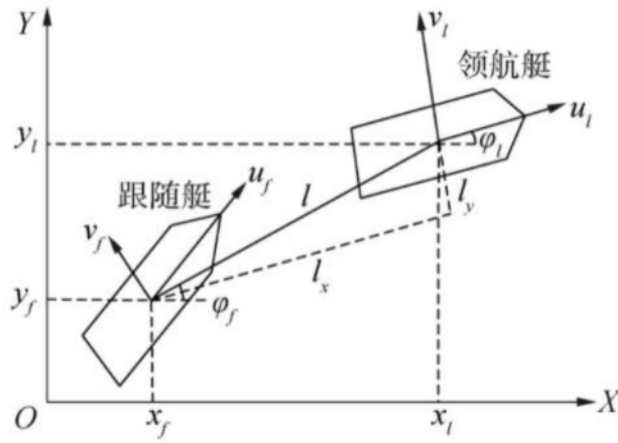


图4

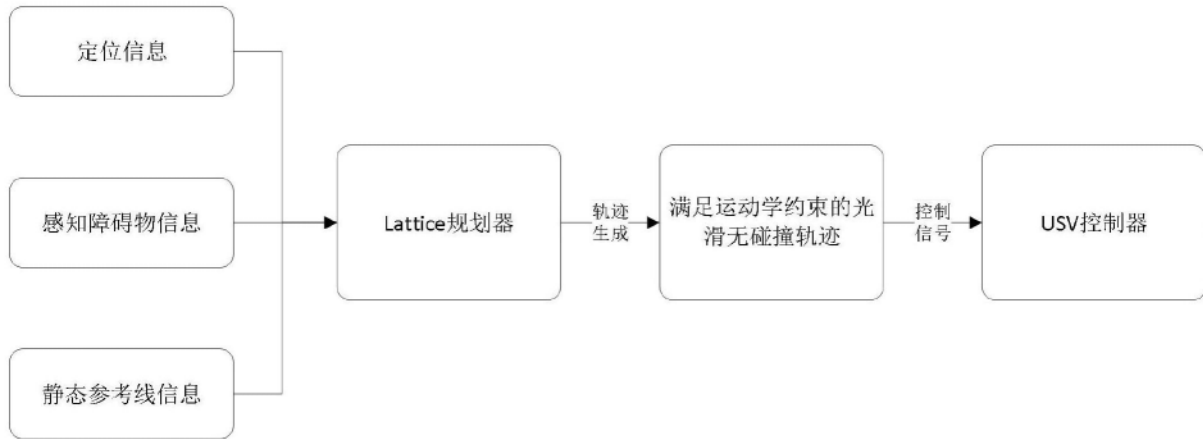


图5

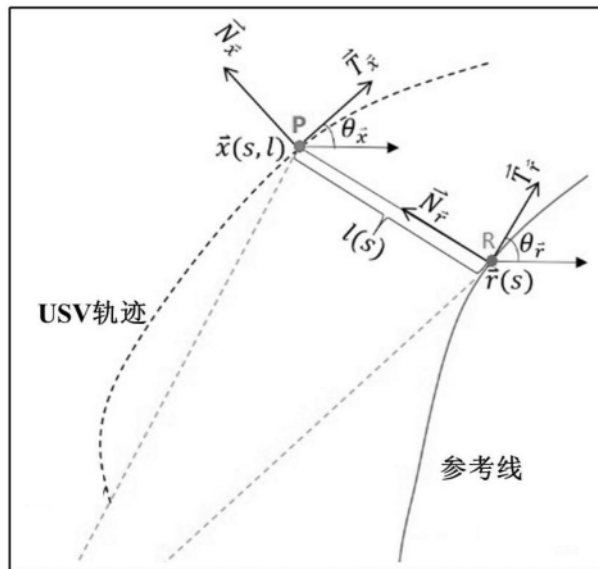


图6

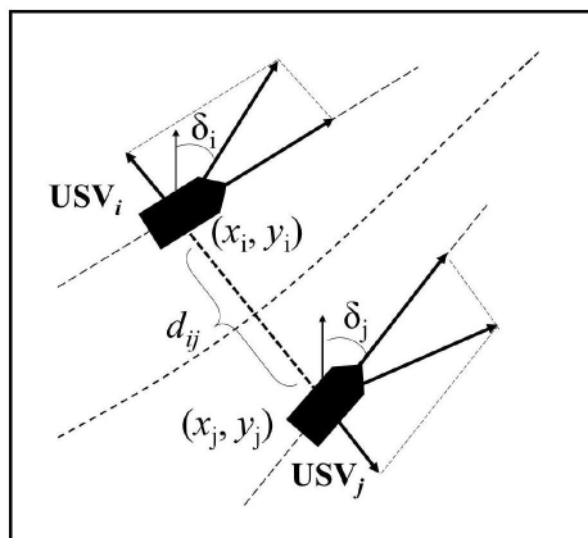


图7

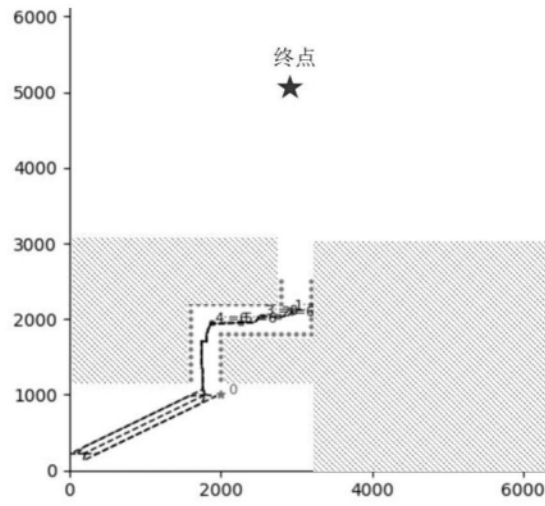


图8

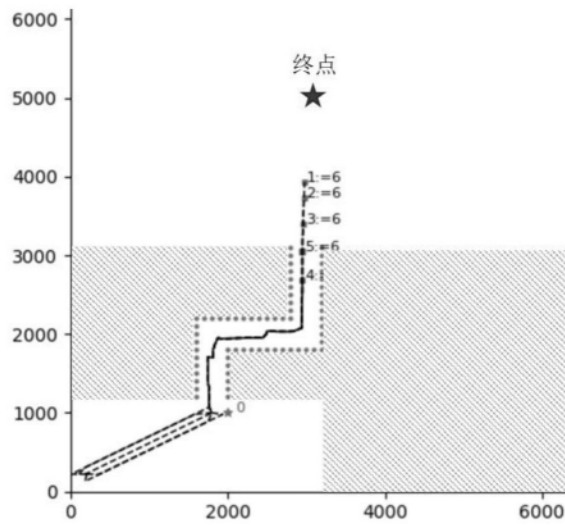


图9

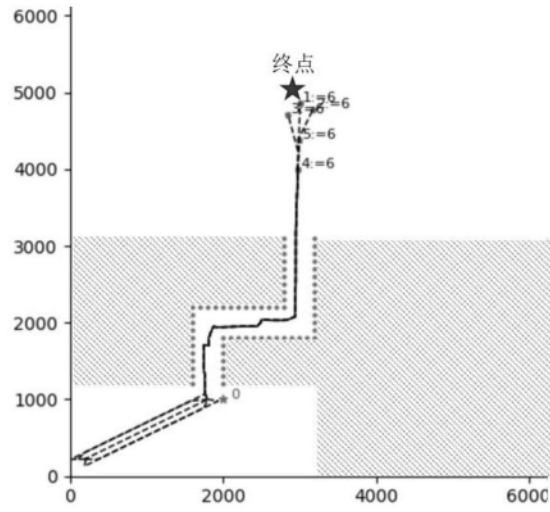


图10