

文章编号: 1000-8055(2023)09-2288-11

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20210722

基于环流斥力势场的改进 APF 导弹航路规划

卢发兴, 戴秋洋, 许俊飞, 贾正荣
(海军工程大学 兵器工程学院, 武汉 430033)

摘 要: 为解决人工势场 (artificial potential field, APF) 方法容易陷入局部最小值的问题, 提出基于环流斥力势场的改进 APF 航路规划方法 (改进 APF 方法), 改变斥力势场方向使其变成围绕障碍物的环流, 并结合导弹由航路点控制的特点, 进一步由约束法和切线法得到导弹飞行航路点。在不同场景下分别采用传统 APF 方法与改进 APF 方法进行航路规划求解, 以及使用切线法和约束法进行导弹航路点求解。结果表明: 改进 APF 方法有效提高可解概率, 能够在多边形障碍密集、障碍边界与导弹航向垂直的情况下得到航路。同时, 相比传统 APF 方法, 改进 APF 方法生成的航路较平滑。对于导弹航路点求解, 切线法和约束法所得到的导弹航路航程相差不大, 但约束法的解算时间较短且生成航点数量较少, 而切线法的安全性能较好。

关 键 词: 航路规划; 导弹; 人工势场法; 局部最小值; 航路点

中图分类号: V219

文献标志码: A

Improved APF missile route planning based on circulation repulsion potential field

LU Faxing, DAI Qiuyang, XU Junfei, JIA Zhengrong

(College of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Given the proneness of artificial potential field (APF) method to fall into the local minimum, an improved APF route planning based on circulation repulsion potential field (improved APF) method was proposed. This method changed the direction of repulsion potential field into a circulation around the obstacle. The waypoints of missile flight were obtained by constraint method and tangent method. In different scenarios, traditional APF method and improved APF method were used to solve route planning, and the tangent method and constraint method were adopted to solve the missile route point. The results showed that the improved APF method can effectively improve solvable probability, the route can be obtained under the condition of dense polygonal obstacles, and the obstacle boundary ran perpendicular to platform course. At the same time, the route generated by the improved APF method was smoother than traditional APF method. For the missile waypoint solution, there was little difference between the tangent method and the constraint method, but the constraint method had a shorter solution time and fewer waypoints, while the tangent method had better safety performance.

Keywords: route planning; missiles; artificial potential field method; local minimum; waypoints

人工势场 (artificial potential field, APF) 方法作为一种传统航路规划算法, 其基本原理是将终

点作为引力源, 障碍作为斥力源, 生成一个空间内的势场, 移动平台沿着势场方向运动规避障碍

收稿日期: 2021-12-22

作者简介: 卢发兴 (1974—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事智能武器控制和多智能体协同控制方面的研究。

通信作者: 戴秋洋 (1999—), 男, 硕士生, 主要从事多智能体协同控制方面的研究。E-mail: 1638443928@qq.com

引用格式: 卢发兴, 戴秋洋, 许俊飞, 等. 基于环流斥力势场的改进 APF 导弹航路规划[J]. 航空动力学报, 2023, 38(9): 2288-2298. LU Faxing, DAI Qiuyang, XU Junfei, et al. Improved APF missile route planning based on circulation repulsion potential field[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(9): 2288-2298.

从而到达终点。

APF 方法存在的一个主要问题是容易陷入势场的局部极小值,在局部极小值点处,引力和斥力相互平衡,合力为零,导致平台在该点处无法移动至下一点,陷入停滞。现有文献为解决 APF 方法容易陷入局部最小值问题提出了各种方法策略,帮助平台逃离局部最小值。文献[1]在传统 APF 方法的基础上引入角度和速度调节因子以及辅助避障力,有效避开局部最小值的同时提高了飞行轨迹的平滑性。文献[2]引入势场合力递减系数解决了势场蚁群算法因势场而陷入的局部最小值。文献[3]增设虚拟子目标。文献[4]提出添加附加控制力。文献[5]采用了模拟退火算法。文献[6]引入填平势场引导机器人走出局部极小值点。文献[7]通过在势场局部极小值点附近增加虚拟障碍以改变附近的势场分布。文献[8]增加控制力的作用规避无解的情况。文献[9]通过引入一种引力势场选择策略以规避势场的局部极小值。文献[10]通过改进斥力函数并引入协调力解决传统势场法的局部最小值问题。

采用 APF 方法得到的航路为一条平滑的曲线,但是在导弹飞行过程中,平滑航路无法作为控制信息引导其飞行,因此需要将航路曲线转化成航路点来控制导弹飞行,进而需要考虑导弹飞行的约束条件以及攻击角选取等问题。

现有文献对导弹航路规划提供相关方法,一般有两种解决方法,一是文献[11-15]提出的基于几何原理的导弹航路规划方法:一般采用递推与切线的方法得到飞行过程中航路点,该方法简单易实现,适用于简单障碍物战场环境下的航路规划,规划效率高;二是文献[16-19]提出的基于智能算法的航路规划方法,对于复杂环境下的航路规划,智能算法能够较好地解决规划问题,但是不同的智能算法都有各自存在的缺陷,因此在面对具体问题通常会对算法进行改进或者同时运用多种算法,提高算法的收敛性和运算速度。

综上,为了满足导弹航路规划的实用性,一方面要保证导弹在不同障碍物条件下的飞行航路的稳定性;另一方面要获得控制导弹飞行的关键航路点。

1 问题描述

平面内的导弹需要到达指定位置(终点、目标),在运动过程中,需要规避已经给出的障碍。

当采用传统 APF 方法时,斥力方向垂直于多边形的各边向外,如图 1(a)所示,当采用这种形式的斥力后,得到的航路可能会在障碍附近振荡,如图 1(b)所示,不失一般性,在分析中,位置与速度均经过归一化,单位为 1。

如果障碍物某一边垂直于导弹的航向,且同时垂直于导弹与终点的连线,则会使导弹陷入势场的局部极小值而导致航路无解,如图 2 所示。

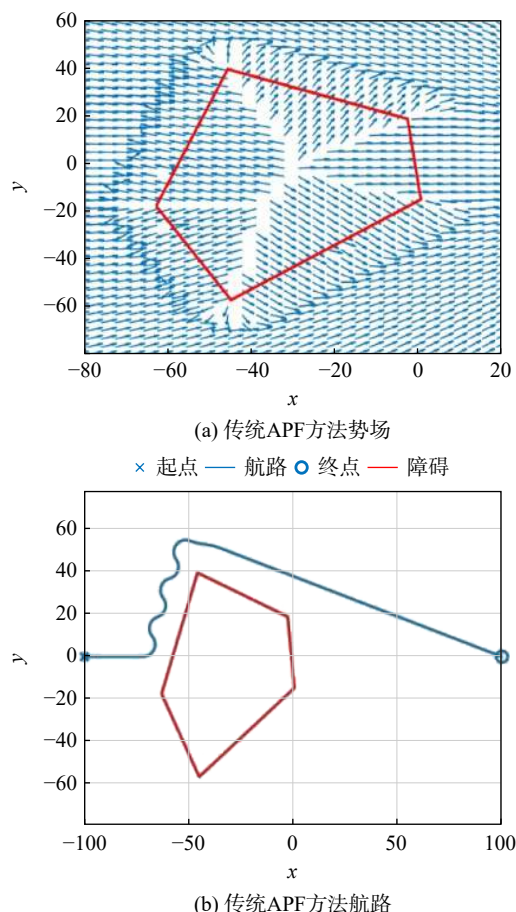
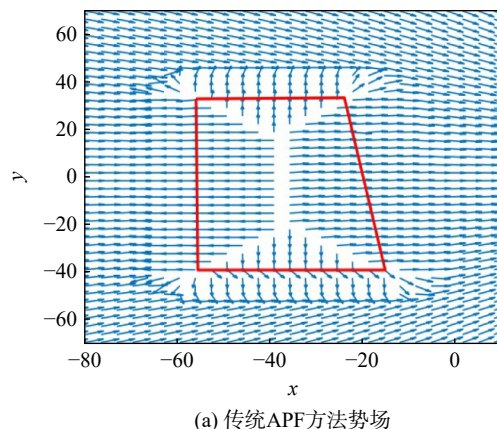


图1 传统 APF 方法的势场与航路(振荡)

Fig. 1 Potential field and route of traditional APF method (oscillation)



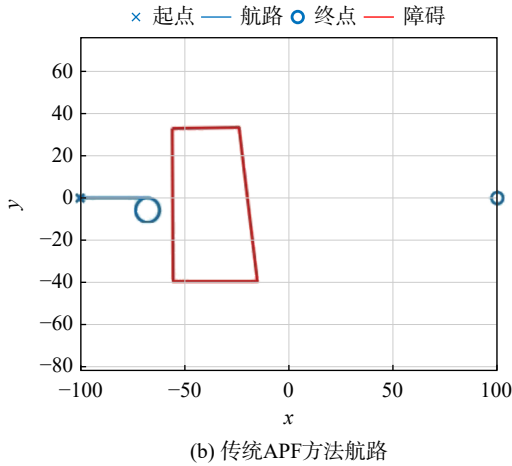


图 2 传统 APF 方法的势场与航路(无解)

Fig. 2 Potential field and route of traditional APF method (no solution)

然而,理想的情况是导弹能够在保持一定距离的条件下贴着障碍运动至终点,传统 APF 方法的斥力势场形式无法达到这种效果,如果采用一种环流形的斥力,如图 3(a)所示,斥力绕多边形障碍流动,则可以得到图 3(b)中的光滑航路。

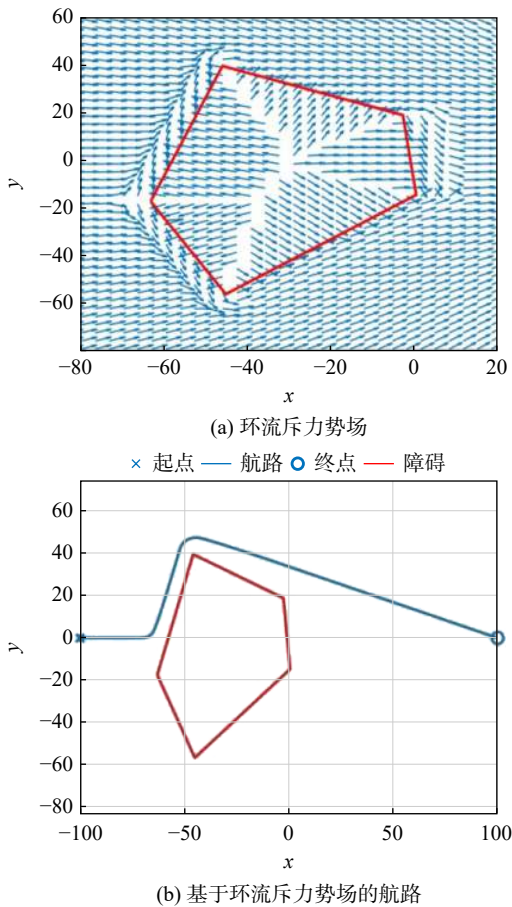


图 3 环流斥力势场与航路

Fig. 3 Circulation repulsion potential field and route

本文主要解决两个问题:一是多边形障碍空间内的航路规划问题,基于导弹与多边形距离的定义,计算多边形障碍上与导弹最近距离的边界点,以该边界点作为斥力源,从而将多边形障碍转换为点障碍。通过改变 APF 斥力势场的方向,使斥力势场形成一个绕多边形障碍的环流,环流方向与导弹的航向相关,确保不与导弹当前航向相反,从而一定程度避免了斥力与引力的合势场抵消而使导弹进入势场局部极小值而导致无解的情况。二是将改进 APF 方法应用于导弹航路规划之中,运用约束法和切线法生成飞行过程中的关键航路点,从而得到导弹飞行的航路。

2 考虑不同障碍物条件下的改进 APF 斥力计算方法

2.1 导弹运动模型及航路规划约束条件

设导弹状态向量为 $\mathbf{X}_d = (x_d, y_d, \psi_d)^T$, x_d, y_d 为平面内的位置坐标,因而导弹的运动微分方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_d = v_d \cos \psi_d \\ \dot{y}_d = v_d \sin \psi_d \\ \dot{\psi}_d = \omega_d(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\dot{x}_d, \dot{y}_d, \dot{\psi}_d$ 为二维平面位置和偏航角(ψ_d)的一阶导数, $\omega_d(t)$ 为角速度, v_d 为导弹速度,通过角速度 $\omega_d(t)$ 控制导弹的航路。

在离散形式下,导弹的运动可以描述为

$$\begin{cases} x_d(k+1) = x_d(k) + \Delta t v_d(k) \cos \psi_d(k) \\ y_d(k+1) = y_d(k) + \Delta t v_d(k) \sin \psi_d(k) \\ \psi_d(k+1) = \psi_d(k) + \Delta t \omega_d(k) \end{cases} \quad (2)$$

式中 Δt 为时间步长。

在引入导弹后需要结合导弹自身的实际特点和攻击时的特殊需求提出相应的以下五个方面约束条件:第一个航路点、最后一个航路点、每一个航路点、相邻航路点之间、导弹总航程^[20]。

2.2 圆形障碍斥力计算方法

一般 APF 方法假设障碍物为点障碍,从而斥力 U_r 可以直接表示为障碍物 $\mathbf{X}_{ob}$ 与导弹当前位置 $\mathbf{X}_s$ 的函数。对于圆形障碍物直接将障碍物圆心作为斥力点计算。

U_r 为导弹 $\mathbf{X}_s$ 与圆形障碍 Ω_o 的斥力

$$U_r = \begin{cases} \exp \left[-\left(\frac{d_{op}}{\rho/3} \right)^2 \right] & d_{op} \leq \rho \\ 0 & d_{op} > \rho \end{cases} \quad (3)$$

式中 d_{op} ($d_{op} = |\mathbf{X}_s - \mathbf{X}_{ob}|$)为导弹与障碍物圆心的距离, ρ 为安全距离。

导弹飞行过程中遇到的障碍物按威胁等级排序大致可以分为3类:

第1类, 飞行过程中仅需要避碰的障碍物, 如固定岛屿、禁飞区等, 威胁等级设置为 w_1 。

第2类, 存在敌侦查探测设备的障碍物, 如装载探测设备的舰船或岛屿, 威胁等级设置为 w_2 。

第3类, 存在敌防空火力的障碍物, 如具有防空能力的舰船或岛屿, 威胁等级设置为 w_3 , 其中 $w_1 < w_2 < w_3$ 。

结合圆形障碍物斥力计算模型, 可以通过 ρ 值设置的不同, 体现威胁程度的差异, 进一步符合导弹航路控制的客观实际。

从而 $\mathbf{X}_s$ 与边 $\mathbf{X}_{op,ij} \rightarrow \mathbf{X}_{op,ij+1}$ 的最短距离

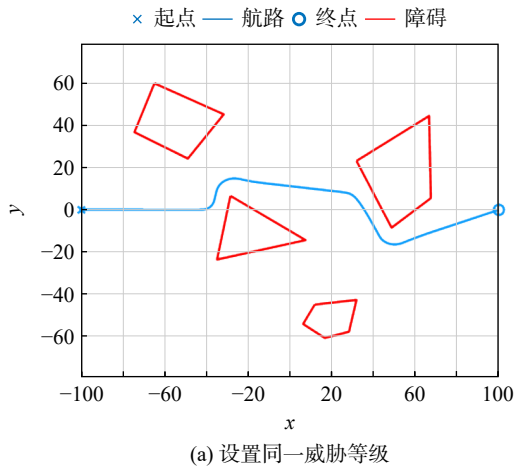
$$d_{op,ij} = \begin{cases} |\mathbf{X}_s - \mathbf{X}_{\tau,ij}^*| & \tau^* \in [0, 1] \\ |\mathbf{X}_s - \mathbf{X}_{op,ij}| & \tau^* \notin [0, 1], |\mathbf{X}_s - \mathbf{X}_{op,ij}| \leq |\mathbf{X}_s - \mathbf{X}_{op,ij+1}| \\ |\mathbf{X}_s - \mathbf{X}_{op,ij+1}| & \tau^* \notin [0, 1], |\mathbf{X}_s - \mathbf{X}_{op,ij+1}| < |\mathbf{X}_s - \mathbf{X}_{op,ij}| \end{cases} \quad (6)$$

对应边 $\mathbf{X}_{op,ij} \rightarrow \mathbf{X}_{op,ij+1}$ 上的点 $\mathbf{X}_{d,ij}$ 为

$$\mathbf{X}_{d,ij} = \begin{cases} \mathbf{X}_{\tau,ij}^* & \tau^* \in [0, 1] \\ \mathbf{X}_{op,ij} & \tau^* \notin [0, 1], |\mathbf{X}_s - \mathbf{X}_{op,ij}| \leq |\mathbf{X}_s - \mathbf{X}_{op,ij+1}| \\ \mathbf{X}_{op,ij+1} & \tau^* \notin [0, 1], |\mathbf{X}_s - \mathbf{X}_{op,ij+1}| < |\mathbf{X}_s - \mathbf{X}_{op,ij}| \end{cases} \quad (7)$$

依次求解多边形障碍物 Ω_i 的所有边 $d_{op,ij}$, 取 $d_{op,ij}$ 的最小值作为 $\mathbf{X}_s$ 与 Ω_i 的距离, 之后即可直接采用点障碍的斥力模型进行斥力求解。

结合文中第2.2节对障碍物设置不同威胁等级如图4所示, 图中障碍物从左至右的威胁等级为 $w_1 \rightarrow w_2 \rightarrow w_3 \rightarrow w_1$ 。



2.3 多边形障碍斥力计算方法

当障碍为多边形时, 需要得到计算斥力点的位置, 一般可以将 $\mathbf{X}_s$ 到多边形障碍最近点作为障碍点计算斥力^[20]。

多边形障碍记为 Ω_i , 其中 i 为多边形障碍序号, 每一个多边形障碍 Ω_i 由有序顶点集合构成, 记为 $\{\mathbf{X}_{op,ij} = (x_{op,ij}, y_{op,ij})^T\}$ 。求解导弹 $\mathbf{X}_s$ 与多边形障碍 Ω_i 的距离, 设线段 $\mathbf{X}_{op,ij} \rightarrow \mathbf{X}_{op,ij+1}$ 上的点 $\mathbf{X}_{\tau,ij}$ 通过参数 τ 描述, 即

$$\mathbf{X}_{\tau,ij} = \mathbf{X}_{op,ij} + \tau(\mathbf{X}_{op,ij+1} - \mathbf{X}_{op,ij}) \quad (4)$$

其中 $\tau \in [0, 1]$, 从而 $\mathbf{X}_s$ 与 $\mathbf{X}_{\tau,ij}$ 的距离为 $|\mathbf{X}_s - \mathbf{X}_{\tau,ij}|$, 距离极值对应参数 τ^* 为

$$\tau^* = \frac{[\mathbf{X}_s^T (\mathbf{X}_{op,ij+1} - \mathbf{X}_{op,ij}) - \mathbf{X}_{op,ij}^T (\mathbf{X}_{op,ij+1} - \mathbf{X}_{op,ij})]}{(\mathbf{X}_{op,ij+1} - \mathbf{X}_{op,ij})^T (\mathbf{X}_{op,ij+1} - \mathbf{X}_{op,ij})} \quad (5)$$

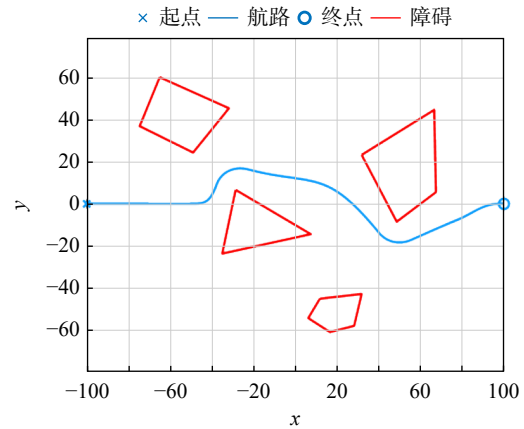


图4 考虑障碍物威胁等级的航路规划

Fig. 4 Route planning considering obstacle threat level

由此可见, 障碍物设置为同一威胁等级和不同威胁等级时, 所得航路是有区别的, 障碍物设置威胁等级所得的航路对于威胁等级较高的障碍

物会进行产生疏远,一定程度上提高了航路的安全裕度。

3 考虑障碍物的环流斥力势场的改进 APF 航路规划方法

改进 APF 方法的与传统 APF 方法区别在于斥力势场^[21-23]。

对于导弹位置 $\mathbf{X}_s$ 与障碍 Ω_i , 斥力负梯度为 $-\nabla U_{r,i}$, 环流斥力势场 $\mathbf{F}_{c,r,i}$ 与斥力梯度 $\nabla U_{r,i}$ 垂直, 且

$$\mathbf{F}_{c,r,i} = \begin{cases} \nabla U_{r,i,+} & \mathbf{v}_d^T \nabla U_{r,i,+} > 0 \text{ 或 } \mathbf{v}_d^T \nabla U_{r,i,+} = 0 \wedge -\mathbf{v}_d^T \nabla U_{r,i} < 0 \\ \nabla U_{r,i,-} & \mathbf{v}_d^T \nabla U_{r,i,-} > 0 \text{ 或 } \mathbf{v}_d^T \nabla U_{r,i,-} = 0 \wedge -\mathbf{v}_d^T \nabla U_{r,i} > 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中 $\wedge$ 表示且。

基于环流斥力势场的改进 APF 航路规划方法的流程图如图 5 所示。

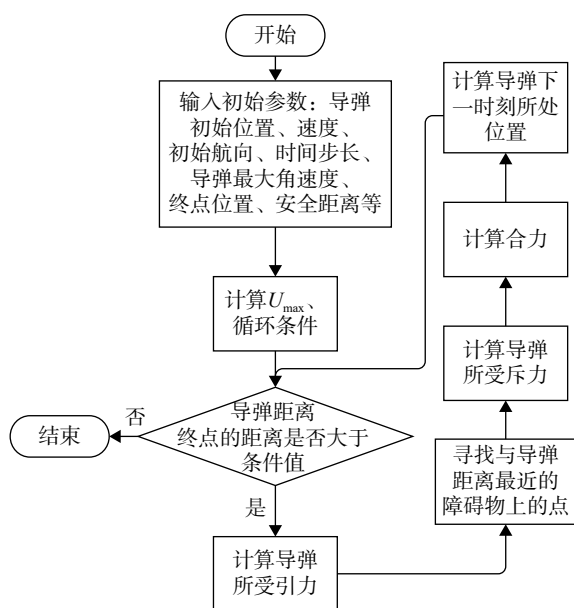


图 5 改进 APF 方法流程图

Fig. 5 Flow chart of improved APF method

4 考虑导弹的基于环流斥力势场的改进 APF 航路点求解

在得到光滑航路后, 结合导弹飞行控制的基本特点, 需要对光滑航路进行离散化^[23] 处理, 得到关键航路点, 以下介绍两种求取关键航路点的方法: 约束法和切线法。

以上所得的光滑曲线是基于数量足够多的点所形成的, 而约束法和切线法则是基于形成航线的点集进行讨论的, 即从中提取关键航路点。

大小相等, 即

$$\begin{cases} \mathbf{F}_{c,r,i}^T \nabla U_{r,i} = 0 \\ |\mathbf{F}_{c,r,i}| = |\nabla U_{r,i}| \end{cases} \quad (8)$$

记 $\nabla U_{r,i} = (x_{r,i}, y_{r,i})^T$, 此时有两个方向均满足要求, 即 $\nabla U_{r,i,+} = (-y_{r,i}, x_{r,i})^T$ 与 $\nabla U_{r,i,-} = (y_{r,i}, -x_{r,i})^T$ 方向, 环流斥力势场应当与导弹原有的运动方向保持一致, 记导弹运动方向为 $\mathbf{v}_d = (\cos \psi_d, \sin \psi_d)^T$, 则 $\mathbf{F}_{c,r,i}$ 为

4.1 约束法

基于离散形式下导弹的运动模型, 可以得到航线点集为 $A, x_{A,i} \in A, i = 1, 2, 3, \dots, x_{A,i}$ 为航线上的任意一点, 建立关键航点集合 P_k , 用来存放约束法从航线点集中筛选出的能够完成导弹航路规划任务的关键航路点。

约束法的原则是将航路里的转弯点作为航路关键点来对导弹进行飞行控制。

关键航点集合 P_k 为约束法所提取的所有关键航路点集合。约束法流程图如图 6 所示, 通过算法 1 实现。

算法 1: 约束法求解航路点

输入: 航线点集 A

步骤 1: 初始化 P_k 关键航路点集, 点集序列号 num; 根据式(2)构建航向矩阵 $\Psi_1 = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n]$;

步骤 2: 计算航向变化矩阵 $\Psi'_1 = [\Delta\psi_1, \Delta\psi_2, \dots, \Delta\psi_{n-1}]$;

步骤 3: 设置拐角变化阈值 σ , 判断航向变化, 筛选并记录临时序号 T_{num} ;

步骤 4: 符合步骤 3 的点进行航路点距离判断 $|P_{k,new} - x_{A,i}|$;

步骤 5: 符合两次判别则记录为关键航路点, 更新 $P_{k,new}$;

步骤 6: 遍历航向变化矩阵;

输出: 关键航路点集 P_k 。

以上则为约束法的基本过程, 从原理上看, 约束法原则简单, 求解速度快, 适合于简单环境下的导弹航路规划, 但是当障碍物增多或者密集, 周围环境变得复杂时, 约束法缺少安全避碰准则, 相比于切线法安全裕度低。

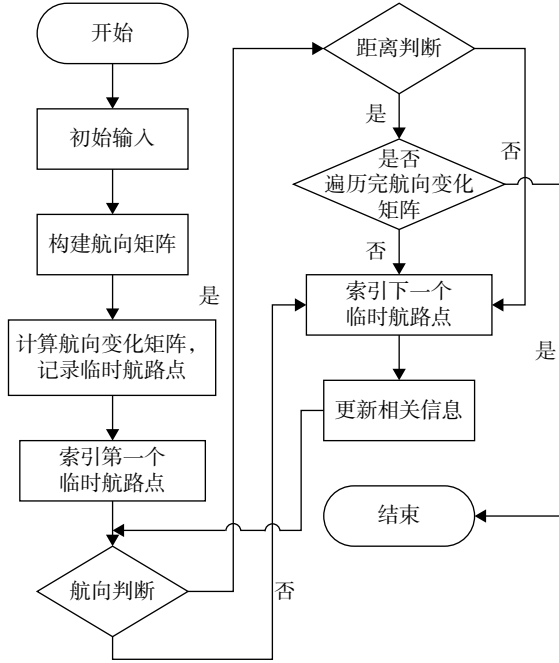


图6 约束法流程图

Fig. 6 Flow chart of constraint method

4.2 切线法

基于约束法本身所存在的缺点, 提出了增加了安全性判别准则的切线法。

同样, 设航线点集为 A , $x_{A,i} \in A$, $i = 1, 2, 3, \dots$, $x_{A,i}$ 为航线上的任意一点, 建立关键航点集合 P_k , 用来存放切线法从航线点集中筛选出的能够完成导弹航路规划任务的关键航路点。

切线法的核心在于安全距离的判断, 对于航线上的每一个点都会进行一次安全判断以保证航路的安全性。

关键航点集合 P_k 为切线法所提取的所有关键航路点集合。切线法的流程见图7, 通过算法2实现。

算法2: 切线法求解航路点

输入: 航线点集 A

步骤1: 初始化 P_k 关键航路点集, 点集序列号 num 根据式(4)~式(6)构建威胁距离矩阵 $D_2 = [D_1, D_2, \dots, D_n]$;

步骤2: 设置安全距离阈值 D_{safe} , 进行安全判断, 符合转入步骤3, 否则转入步骤5;

步骤3: 进行航路点距离判断 $|P_{k,new} - x_{A,i}|$;

步骤4: 符合两次判别则记录为关键航路点, 更新 $P_{k,new}$;

步骤5: 索引下一个威胁距离;

步骤6: 遍历威胁距离矩阵;

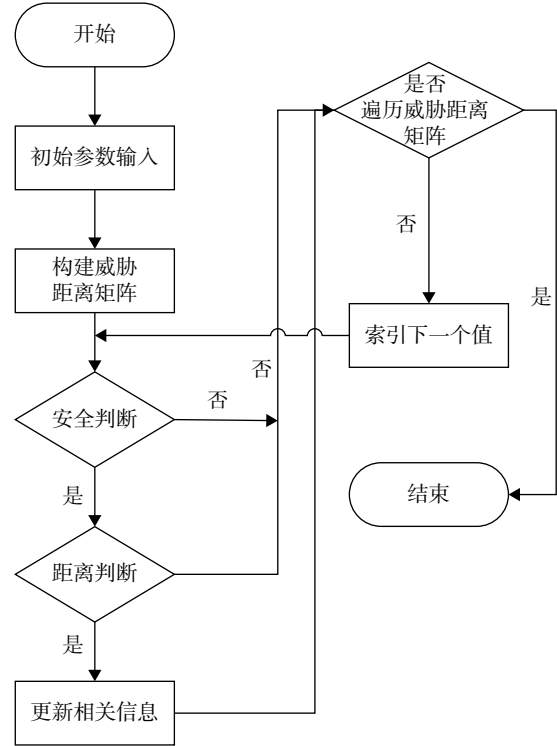


图7 切线法流程图

Fig. 7 Flow chart of tangent method

输出: 关键航路点集 P_k 。

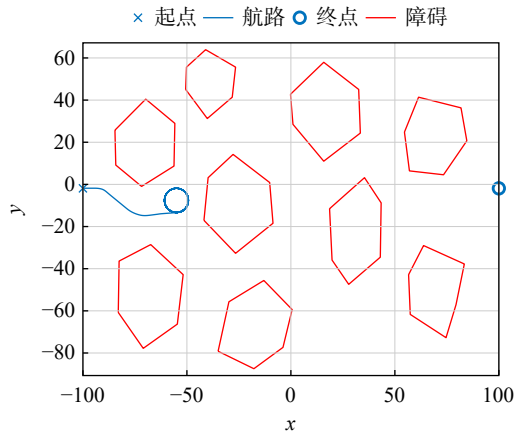
5 仿真分析

通过仿真分析比较传统 APF 方法与基于环流斥力势场的改进 APF 方法的性能以及在改进 APF 方法下, 通过切线法和约束法对导弹进行航路规划。不失一般性, 在仿真分析中, 位置与速度均经过归一化, 单位为 1, 时间单位为 s 。

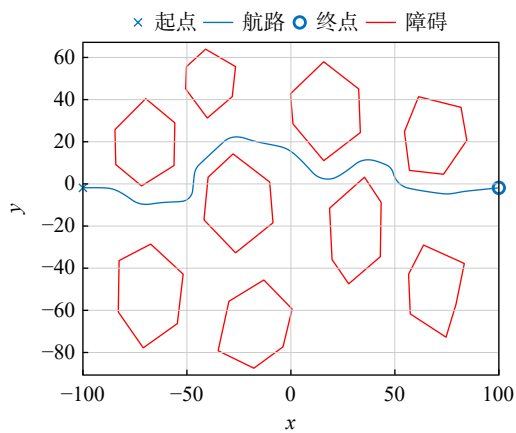
5.1 传统 APF 方法与改进 APF 方法的求解可行性对比

分别在不同场景下采用传统 APF 方法与改进 APF 方法进行航路求解, 其中, 导弹初始位置固定为 $(-100, 0)$, 导弹速度 v_d 为 3, 导弹初始偏航角 $\beta_{d,0}$ 为 0° , 导弹最大角速度 $\omega_{d,max}$ 为 $60(^\circ)/s$, 终点位置 X_g 固定为 $(100, 0)$, 安全距离 ρ 取 15, 环流斥力势场选取合成形式 F_{cr}^* , 时间步长 Δt 取 $0.1 s$ 。

不同场景的障碍分布不同, 得到的航路规划结果如图8、图9所示。可见, 传统 APF 方法容易陷入局部收敛的状态而无法抵达终点, 这些情况主要发生在导弹航向与障碍边界垂直的情况中。相比之下, 改进 APF 方法的斥力势场方向不会与导弹航向相反, 使得成功到达终点的可能性



(a) 传统APF方法



(b) 改进APF方法

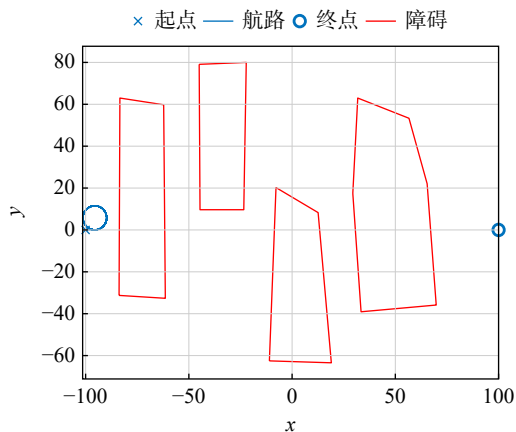
图 8 场景 A

Fig. 8 Scenario A

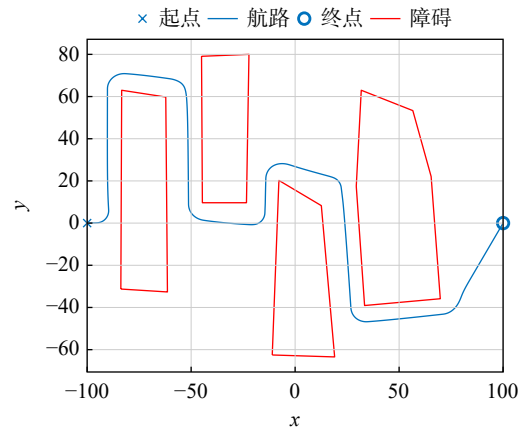
提高。

5.2 传统 APF 方法与改进 APF 方法的航路振荡程度对比

由于在特定场景下,传统 APF 方法可能无解,因此在两种方法均求解可行的条件下对比传统 APF 方法与改进 APF 方法的航路振荡程度。



(a) 传统APF方法



(b) 改进APF方法

图 9 场景 B

Fig. 9 Scenario B

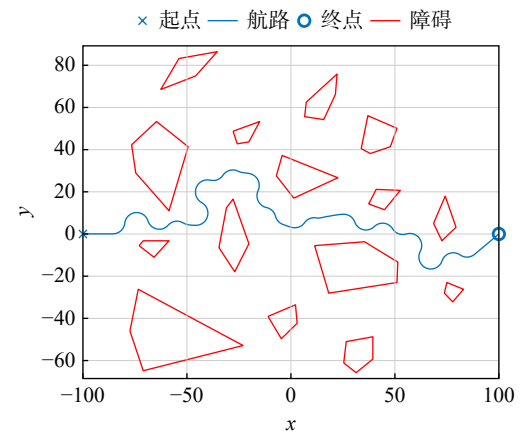
理想的航路应当是光滑的曲线,对应航路上偏航角变化较少,而振荡的航路偏航角变化剧烈,因此以整个航路上导弹偏航角速度绝对值对时间的积分作为航路振荡程度的指标。在离散空间内,航路的角速度为 $\omega_d(k)$,时间步长为 Δt ,则航路振荡指标 H 为

$$H = \Delta t \sum_k |\omega_d(k)| \quad (10)$$

分别在不同场景下采用传统 APF 方法与改进 APF 方法求解航路,导弹参数、终点参数与时间步长与文中第 5.1 节相同,得到结果如图 10、图 11 所示。

不同场景下两种方法对应的航路振荡指标如表 1 所示,耗时间对比如表 2 所示。

在能够求解的情况下,当障碍较为密集时,由于斥力势场与导弹航向垂直,导弹的航路将会有较大幅度的频繁振动。在障碍密集的位置,斥力势场能够保证导弹沿着障碍之间的缝隙运动,有效避免了导弹航路的振荡,如图 12 所示。



(a) 传统APF方法

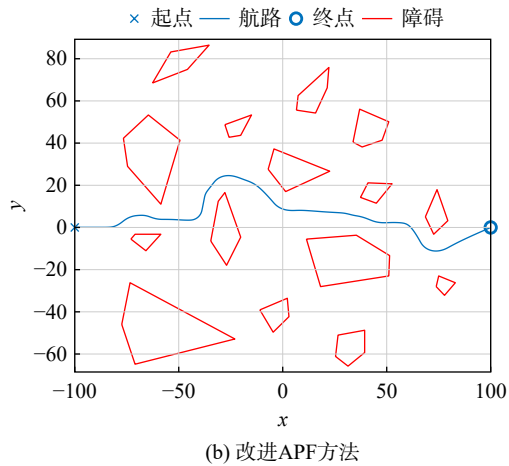


图 10 场景 C
Fig. 10 Scenario C

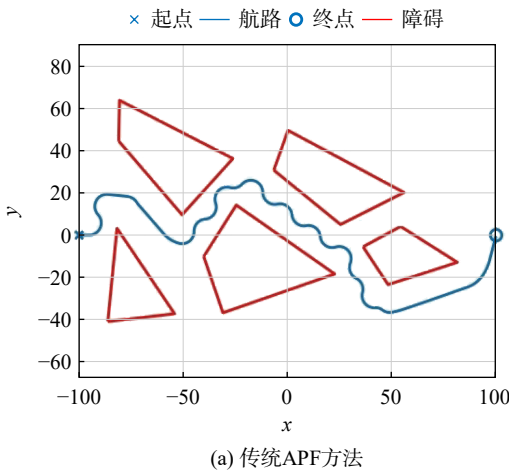


图 11 场景 D
Fig. 11 Scenario D

另外,表 1、表 2 定量地给出了传统 APF 方法与改进 APF 方法航路的平滑程度以及耗时对比,可见,改进 APF 方法较为显著地提升了航路的平滑程度和实时性。

表 1 航路振荡指标对比		
Table 1 Route oscillation index contrast		
场景	H	
	传统 APF 方法	改进 APF 方法
C	29.441 0	4.100 8
D	34.122 5	7.844 5

表 2 耗时对比		
Table 2 Time contrast		
场景	耗时/s	
	传统 APF 方法	改进 APF 方法
C	0.649 3	0.570 8
D	0.339 9	0.252 7

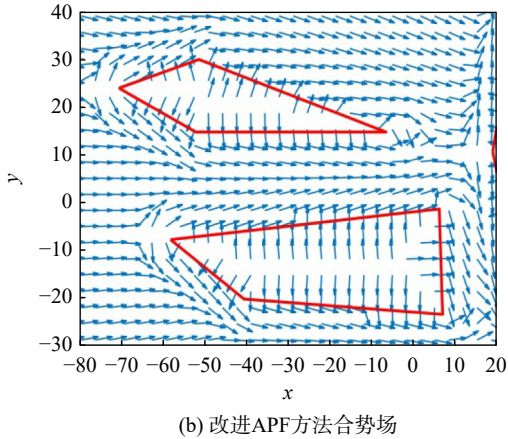
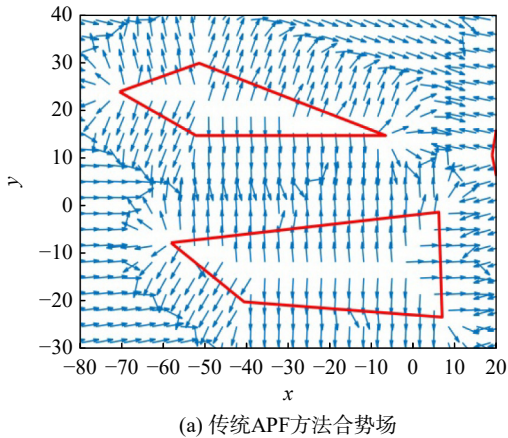


图 12 障碍之间的合势场比较
Fig. 12 Comparison of potential fields between obstacles

5.3 切线法与约束法求解导弹关键航路点

不同场景下,切线法与约束法的效果如图 13、图 14 所示。

不同场景下的关键航路点见表 3~表 6。
不同场景下两种方法对应的航路距离以及解算时间见表 7、表 8。

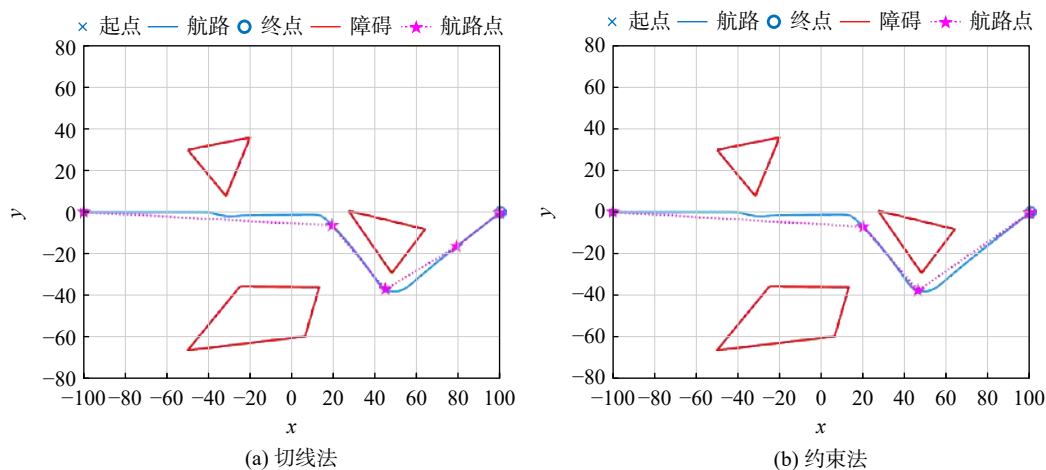


图 13 场景 E

Fig. 13 Scenario E

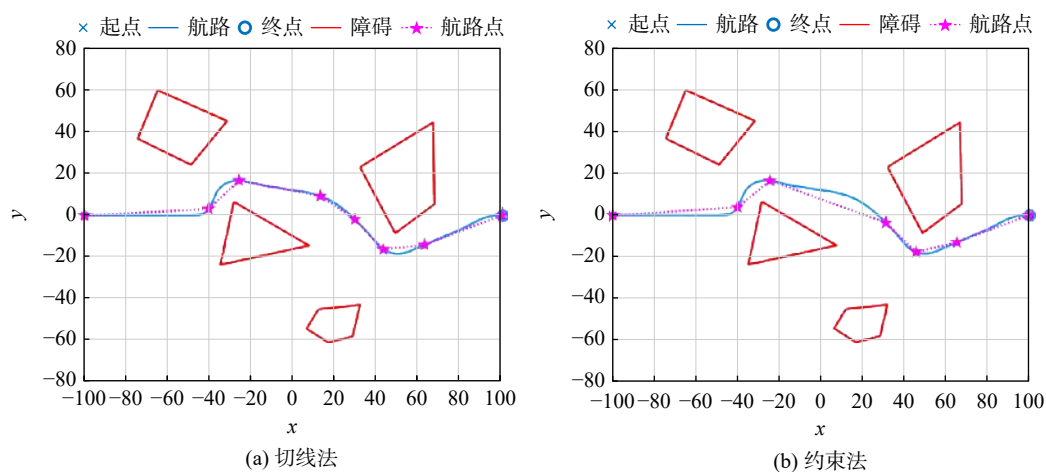


图 14 场景 F

Fig. 14 Scenario F

表 3 图 13(a)关键航路点

Table 3 Key waypoints for Fig.13(a)

x	-100	8.966 1	41.402 4	99.541 2
y	0	-1.100 6	-33.787 2	-0.353 4

表 4 图 13(b)关键航路点

Table 4 Key waypoints for Fig.13(b)

x	-100	19.190 6	44.704 7	78.921 0	99.541 18
y	0	-6.287 6	-36.771 3	-16.353 2	-0.353 37

通过仿真对比,可以得到:切线法和约束法提取导弹关键航路点所形成的航路航程相差不大;约束法所形成的航路点数量更少,解算时间更短,但是安全裕度不够,而切线法在保证安全性的基础上,增加了结算时间,实时性减弱;随着导弹

表 5 图 14(a)关键航路点

Table 5 Key waypoints for Fig.14(a)

x	-100	-40.676 1	-26.043 2	12.800 5
y	0	3.191 0	16.763 3	9.346 3
x	29.324 8	42.886 4	62.660 2	99.645 76
y	-1.809 8	-16.188 3	-13.940 4	0.082 511

表 6 图 14(b)关键航路点

Table 6 Key waypoints for Fig.14(b)

x	-100	-48.402 5	-34.156 4	8.777 6
y	0	0.085 5	14.164 7	10.546 8
x	39.825 1	77.851 5	99.645 8	
y	-13.337 9	-7.501 3	0.082 5	

飞行的环境逐渐复杂,航路变化逐渐变大,切线法和约束法所提取的航路点逐渐相似。

表7 导弹航程对比

Table 7 Missile range contrast

场景	航路距离	
	切线法	约束法
E	224.551 94	225.226 98
F	218.072 00	214.717 17

表8 解算时间对比

Table 8 Solving time comparison

场景	解算时间/s	
	切线法	约束法
E	0.121 0	0.082 9
F	0.106 6	0.071 5

6 结 论

在可行性方面, 基于环流斥力势场的改进 APF 方法有效解决了传统 APF 陷入局部最小值的问题, 大大提高航路规划的可行性。

在导弹航路规划应用方面, 相比于传统 APF 方法, 所得到的航路更加平滑, 适合于导弹航路规划, 并且针对障碍物类型进行威胁程度分类, 更贴近实际应用。

在导弹航路点选取方面, 约束法和切线法都能完成导弹航路点提取的任务。约束法得到的航路点数量较少且解算时间较短, 实时性高, 适用于环境简单或应急导弹发射过程, 而切线法得到航路安全裕度更大, 适用于复杂环境下的导弹航路规划。

参考文献:

- [1] 韩尧, 李少华. 基于改进人工势场法的无人机航迹规划[EB/OL]. [2021-10-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20210531.1117.014.html>.
- [2] 马小陆, 梅宏. 基于改进势场蚁群算法的机器人全局路径规划[J]. 机械工程学报, 2021, 57(1): 19-27.
MA Xiaolu, MEI Hong. Mobile robot global path planning based on improved potential field ant colony algorithm[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(1): 19-27. (in Chinese)
- [3] 王洪斌, 郝策, 张平, 等. 基于A-*算法和人工势场法的移动机器人路径规划[J]. 中国机械工程, 2019, 30(20): 2489-2496.
WANG Hongbin, HAO Ce, ZHANG Ping, et al. Mobile robot path planning based on A-* algorithm and artificial potential field method[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(20): 2489-2496. (in Chinese)
- [4] 张建英, 赵志萍, 刘瞰. 基于人工势场法的机器人路径规划[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(8): 1306-1309.
ZHANG Jianying, ZHAO Zhiping, LIU Tun. Robot path planning based on artificial potential field method[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(8): 1306-1309. (in Chinese)
- [5] 张培艳, 吕恬生. 基于模拟退火-人工势场法的足球机器人路径规划研究[J]. 机械科学与技术, 2003, 22(4): 547-548, 555.
ZHANG Peiyan, LÜ Tiansheng. Research on soccer robot path planning based on simulated annealing-artificial potential field method[J]. Mechanical Science and Technology, 2003, 22(4): 547-548, 555. (in Chinese)
- [6] 李晋. 改进人工势场法的移动机器人路径规划[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
LI Jin. Improved artificial potential field method for mobile robot path planning[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [7] MIN C L, MIN G P. Artificial potential field based path planning for mobile robots using a virtual obstacle concept[C]//Proceedings 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003). Kobe, Japan: IEEE, 2003: 735-740.
- [8] CHEN Y B, LUO G C, MEI Y S, et al. UAV path planning using artificial potential field method updated by optimal control theory[J]. International Journal of Systems Science, 2016, 47(6): 1407-1420.
- [9] FEDELE G, D'ALFONSO L, CHIARAVALLI F, et al. Obstacles avoidance based on switching potential functions[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2018, 90(3): 387-405.
- [10] 邓叶, 姜香菊. 基于改进人工势场法的四旋翼无人机航迹规划算法[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(7): 130-133.
DENG Ye, JIANG Xiangju. A four-rotor UAV trajectory planning algorithm based on improved artificial potential field method[J]. Sensors and Microsystems, 2021, 40(7): 130-133. (in Chinese)
- [11] 史岩, 张立华, 董受全, 等. 基于ACO算法和Bezier曲线优化的巡航导弹航路规划[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(1): 122-129.
SHI Yan, ZHANG Lihua, DONG Shouquan, et al. Cruise missile route planning based on ACO algorithm and Bezier curve optimization[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(1): 122-129. (in Chinese)
- [12] 史岩, 张立华, 董受全, 等. 基于Voronoi图与Bezier曲线算法的反舰导弹航路规划方法[J]. 弹箭与制导学报, 2018, 38(5): 111-116.
SHI Yan, ZHANG Lihua, DONG Shouquan, et al. Anti-ship missile route planning method based on Voronoi diagram and Bezier curve algorithm[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Rockets and Guidance, 2018, 38(5): 111-116. (in Chinese)
- [13] 刘钢, 陈国生, 老松杨, 等. 反舰导弹航路规划的几何学特征及规律[J]. 电光与控制, 2013, 20(9): 23-28.
LIU Gang, CHEN Guosheng, LAO Songyang, et al. The geometric characteristics and laws of anti-ship missile route planning[J]. Electro-Optics and Control, 2013, 20(9): 23-28. (in Chinese)
- [14] 王庆江, 盛沛, 彭军. 基于几何原理的反舰导弹协同攻击时航路规划方法[J]. 电光与控制, 2019, 26(9): 19-25.
WANG Qingjiang, SHENG Pei, PENG Jun. Route planning method for coordinated attack of anti-ship missiles based on geometric principles[J]. Electro-Optics and Control, 2019, 26(9): 19-25. (in Chinese)
- [15] 刘钢, 老松杨, 谭东风, 等. 反舰导弹航路规划图形化快速逆推方法[J]. 弹道学报, 2011, 23(2): 52-56, 61.
LIU Gang, LAO Songyang, TAN Dongfeng, et al. Graphical and fast backstepping method for anti-ship missile route planning[J]. Journal of Ballistics, 2011, 23(2): 52-56, 61. (in Chinese)
- [16] 杨咪, 张安, 毕文豪, 等. 基于改进遗传算法的多弹协同攻击航路规划[J]. 兵工自动化, 2020, 39(2): 28-32, 40.

- YANG Mi, ZHANG An, BI Wenhao, et al. Multi-projectile coordinated attack route planning based on improved genetic algorithm[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2020, 39(2): 28-32, 40. (in Chinese)
- [17] 孔姝睿, 刘淑芬. 基于改进粒子群算法的反舰导弹航路规划研究[J]. *测控技术*, 2017, 36(11): 66-69.
- KONG Shurui, LIU Shufen. Research on anti-ship missile route planning based on improved particle swarm algorithm[J]. *Measurement and Control Technology*, 2017, 36(11): 66-69. (in Chinese)
- [18] 李红亮, 宋贵宝, 刘铁. 基于自适应A-*算法和改进遗传算法的反舰导弹航路规划[J]. *弹箭与制导学报*, 2013, 33(2): 7-11, 18.
- LI Hongliang, SONG Guibao, LIU Tie. Anti-ship missile route planning based on adaptive A-* algorithm and improved genetic algorithm[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Rockets and Guidance*, 2013, 33(2): 7-11, 18. (in Chinese)
- [19] 刘钢, 老松杨, 侯绿林, 等. 约束引导的反舰导弹航路规划遗传算法[J]. *弹道学报*, 2012, 24(4): 11-17.
- LIU Gang, LAO Songyang, HOU Lulin, et al. Anti-ship missile route planning genetic algorithm guided by constraints[J]. *Journal of Ballistics*, 2012, 24(4): 11-17. (in Chinese)
- [20] 罗木生, 吴铭, 王培源. 反舰导弹“双一”攻击最大攻击角计算[J]. *火力与指挥控制*, 2020, 45(2): 141-144, 149.
- LUO Musheng, WU Ming, WANG Peiyuan. Calculation method of the maximum attack angle of anti-ship missile “double one” attack[J]. *Firepower and Command Control*, 2020, 45(2): 141-144, 149. (in Chinese)
- [21] 贾正荣, 王航宇, 卢发兴. 基于障碍凸化的改进环流APF路径规划[J]. *航空学报*, 2019, 40(10): 254-268.
- JIA Zhengrong, WANG Hangyu, LU Faxing. Improved circulation APF path planning based on obstacle convexity[J]. *Acta Aeronautica Sinica*, 2019, 40(10): 254-268. (in Chinese)
- [22] 贾正荣, 卢发兴, 王航宇. 基于解耦优化和环流APF的多平台协同攻击任务规划[J]. *北京航空航天大学学报*, 2020, 46(6): 1142-1150.
- JIA Zhengrong, LU Faxing, WANG Hangyu. Multi-platform cooperative attack mission planning based on decoupling optimization and circulation APF[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 46(6): 1142-1150. (in Chinese)
- [23] 贾正荣, 卢发兴, 王航宇. 多平台协同突防航路规划[J]. *弹道学报*, 2019, 31(4): 57-62.
- JIA Zhengrong, LU Faxing, WANG Hangyu. Multi-platform coordinated penetration route planning[J]. *Journal of Ballistics*, 2019, 31(4): 57-62. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)