

doi: 10.7690/bgzdh.2022.03.008

# 无人机跟踪地面目标无碰撞航迹规划

陈飞鹏, 张 民

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 211106)

**摘要:** 针对无人机自动跟踪目标过程中需要规避障碍物的问题, 设计一种将跟踪制导律与改进人工势场法相结合的航迹规划算法。对人工势场法进行适应性改进, 建立无人机动力学模型, 阐述定距跟踪制导律的设计方法, 并采取加权求和与运动学约束的方式将定距跟踪制导律与人工势场法二者结合。仿真实验结果表明: 该策略具备有效性和可行性。

**关键词:** 目标跟踪; 制导律; 人工势场; 航迹规划

**中图分类号:** V279 **文献标志码:** A

## Collision Free Path Planning for UAV Tracking Ground Target

Chen Feipeng, Zhang Min

(College of Automation Engineering, Nanjing University of  
Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that UAV needs to avoid obstacles in the process of automatic target tracking, a route planning algorithm is designed, which combines tracking guidance law with improved artificial potential field method. The artificial potential field method was improved adaptively, and the dynamic model of UAV was established. The design method of the constant range tracking guidance law was described, and the constant range tracking guidance law and the artificial potential field method were combined by weighted summation and kinematic constraints. The simulation results show that the strategy is effective and feasible.

**Keywords:** target tracking; guidance law; artificial potential field; path planning

### 0 引言

无人机对地面目标的自动跟踪, 是无人机应用领域中的重要内容, 无人机在搭载相应设备后可对敏感目标进行跟踪监视、城市追逃、战场近距离侦察、灾害现场测量与评估, 以及贴近干扰等任务。无人机航迹规划是指在一定约束条件作用下, 寻找满足环境信息限制与无人机机动性能, 从起始点到目标点的最佳航迹; 因此, 无人机航迹规划的关键任务是采取合理的环境模型与航迹规划算法<sup>[1]</sup>。无人机路径规划算法的研究发展程度, 是无人机执行任务的首要前提, 决定了无人机智能化水平的高低。

无人机在执行任务过程中, 需在短时间内完成航迹规划; 因此, 提高无人机的避障精确度、速度是目前研究领域的重点<sup>[2]</sup>。文献[3]提出了一种导航向量场与避障势场相融合的航迹规划方法, 文献[4]提出了导航向量场、避障势场和相对速度空间相结合的动态规划方法。这 2 种方法计算量小、规划速度快, 但数学描述相对复杂。文献[5]提出了一种积分向量场法用于风扰动下的航迹规划, 没有涉及障

碍物的规避方法。文献[6]给出了基于 Dijkstra 算法的避障航迹规划算法。文献[7]给出了基于碰撞预测和动态碰撞规避策略的方法。这 2 种方法能够得到最优航迹, 但描述复杂, 实时计算量大。

笔者以无人机定距跟踪制导律为航迹规划基础, 采用制导律与人工势场共同作用的方式, 并对无人机进行运动学约束, 兼顾了跟踪任务与避障任务。该方法仅依赖距离传感器提供的位置信息, 数学描述简单、计算量小、效率高, 达到了良好的无碰撞航迹规划效果。

### 1 动力学模型

传统的无人机动力学模型由力方程组、运动方程组、力矩方程组和导航方程组的 12 个方程组成, 在无人机跟踪目标时, 默认无人机最低速度大于目标最高速度, 因此认为无人机的速度不变。如图 1 所示, 因无人机飞行在固定高度, 进一步认为无人机的高度不变, 则无人机对地面目标的跟踪问题, 可以看成是 2 维平面上的跟踪问题。

收稿日期: 2021-11-13; 修回日期: 2021-12-04

作者简介: 陈飞鹏(1995—), 男, 天津人, 硕士, 从事飞行器编队与航迹规划算法、飞行器控制律与制导律等研究。

E-mail: 1397048551@qq.com。

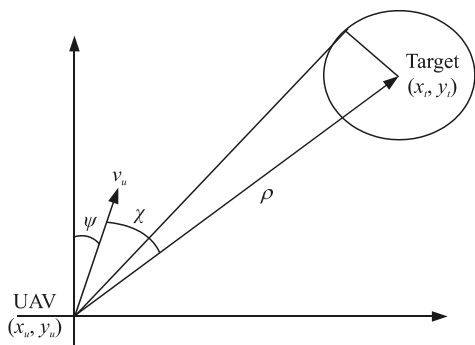


图1 无人机跟踪目标

无人机的运动学模型可以表述成经典的 Dubins 模型如下：

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_u &= v_u \cos(\psi) \\ \dot{y}_u &= v_u \sin(\psi) \\ \dot{\psi} &= \omega \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： $[x_u, y_u]^T$  为无人机在 2 维平面上的坐标； $v_u = \sqrt{\dot{x}_u^2 + \dot{y}_u^2}$  为无人机的速度； $\psi$  为无人机的航向角； $\omega$  为控制输入。式(1)也可转化为极坐标的形式：

$$\left. \begin{aligned} \dot{\rho} &= -v_u \cos(\theta) \\ \dot{\theta} &= \omega + v_u \sin(\theta)/\rho \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： $[x_t, y_t]^T$  为地面目标的坐标； $\rho = \sqrt{(x-x_t)^2 + (y-y_t)^2}$  为无人机与目标的相对距离； $\dot{\rho}$  为距离变化率； $\theta \in [0, 2\pi)$  为无人机的速度与相对距离的夹角，定义为视线角。当  $\theta = \pi/2$ ， $\dot{\rho} = 0$  时，无人机处于顺时针盘旋稳定状态。

笔者默认无人机姿态控制回路已经设计完成，无人机定距跟踪制导律采用顺时针盘旋跟踪的方式。由式(2)可知： $\cos(\theta)$  可由  $\dot{\rho}$  表示，因此采取基于距离信息的无人机定距盘旋跟踪制导律：

$$\omega = \begin{cases} -k\dot{\rho} - v_u/\rho_d & \rho \geq \rho_d \\ -k(\rho_d\dot{\rho}/\rho) - v_u/\rho_d & \rho < \rho_d \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)的制导律代入式(2)的动力学模型中，得到最终的无人机闭环系统：

$$\begin{aligned} \dot{\rho} &= -v_u \cos(\theta); \\ \dot{\theta} &= \begin{cases} -k\dot{\rho} - v_u/\rho_d + v_u \sin(\theta)/\rho & \rho \geq \rho_d \\ -k(\rho_d\dot{\rho}/\rho) - v_u/\rho_d + v_u \sin(\theta)/\rho & \rho < \rho_d \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)所得到的闭环系统在文献[8]中给出了详细的稳定性证明。最终无人机稳定在目标上空，以目标为中心、 $\rho_d$  为半径，进行圆形轨迹盘旋飞行。

## 2 人工势场法

人工势场法最初应用于机器人机械臂的实时避

障，后来这种方法被广泛应用于移动机器人的路径规划，目前已成为路径规划技术的重要方法。人工势场法将物理学中场的概念引入到规划环境的表达当中<sup>[9]</sup>，该方法也被引入到无人机航迹规划，其基本思想是将无人机在周围环境中的运动设计成一种抽象的人造引力场中的运动，目标点对无人机产生“引力”，障碍物对无人机产生“斥力”，最后通过求合力来控制无人机的运动<sup>[10]</sup>。将无人机的运动看成 2 种力共同作用的结果<sup>[11]</sup>，目标产生的吸引力将无人机拉向目标点，障碍物产生的排斥力使无人机远离威胁源，无人机在势场中的受力情况如图 2 所示。

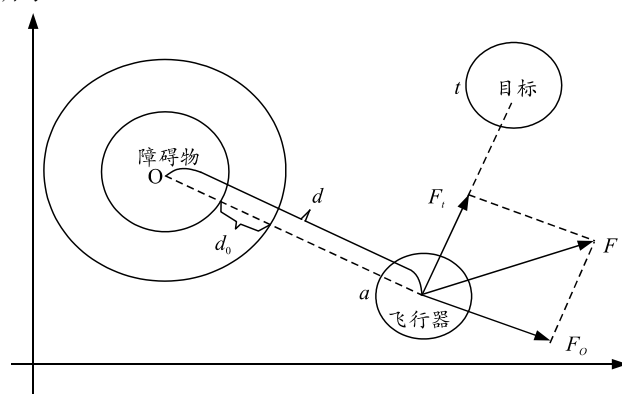


图2 势场中飞行器受力

人工势场法不需要利用图形的形式表示规划空间，该方法目前已经广泛应用于无人机的无碰撞航迹规划，其显著优势是规划速度快、效率高、计算量小，但存在 3 个固有缺陷：不可到达性、局部极小点和震荡问题。笔者对人工势场法进行了应用策略上的改进。

### 2.1 不可到达性

当目标附近存在障碍物时，由于障碍物产生的斥力远大于目标对无人机的引力，导致无人机无法到达目标点。笔者将基于定距跟踪制导律的无人机闭环系统中的速度输出转化成势场引力，即由跟踪制导律代替传统势场引力完成目标跟踪，并限制斥力作用范围，解决了传统引力函数随着无人机靠近目标而引力减小的问题。飞行器所受合力  $F$  表示为：

$$F = F_o + F_t \quad (5)$$

其中： $F_o$  为障碍物对无人机的斥力； $F_t$  为目标对无人机的引力。

在势场中某一点处，定义斥力函数为：

$$F_o = k_o(1/d - 1/d_o)/d_o^2 \quad d_o \leq d \quad (6)$$

其中： $d$  为无人机与障碍物间的距离； $d_o$  为斥力作

用范围； $k_o$  为斥力系数。

式(5)中飞行器所需引力由无人机当前速度矢量转换得到：

$$F_t = k_t m v_u / \delta \quad (7)$$

其中： $v_u$  为无人机当前速度； $m$  为无人机质量； $k_t$  为引力系数； $\delta$  为仿真步长。

### 2.2 局部极小点

当目标对无人机的引力和障碍物对目标的斥力相互抵消时，此时算法会陷入局部极小；因此，笔者采用基于虚拟力的随机波动法，来摆脱局部极小点。

定义随机虚拟力函数  $F_s = k_r |F_r|$ 。如图 3 所示，当算法因陷入局部极小点导致无人机无法继续前进时，在人工势场中引入一个作用在无人机上的虚拟力<sup>[12]</sup>，其方向与斥力垂直，并偏向目标一侧。

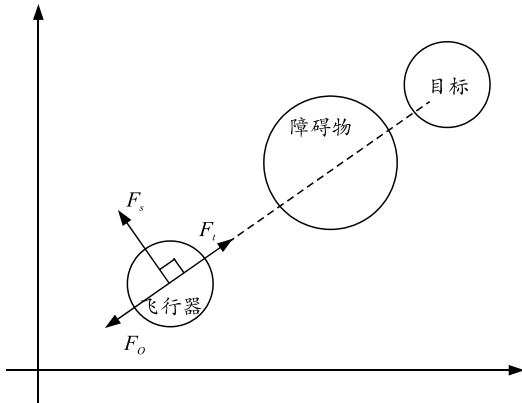


图 3 虚拟力作用原理

### 2.3 震荡问题

当无人机反复经过斥力势场，在引力和斥力反复作用下，容易产生震荡问题，导致无人机来回摆动，不能继续前进。对无人机进行运动学约束，即设定其最小转弯半径，来保证无人机的飞行安全。

设无人机最小转弯半径为  $R_{min}$ ：

$$R_{min} = v_u^2 / (g \tan(\phi_{max})) \quad (8)$$

其中： $v_u$  为无人机速度； $g$  为重力加速度； $\phi_{max}$  为无人机最大滚转角。

## 3 航迹规划策略

在多无人机航迹规划中，首先建立合理环境模型，然后应当对无人机进行任务分配。笔者提出一种简单有效的任务分配策略，假设无人机数量多于目标数量，首先对无人机和目标进行编号，对无人机与目标间距离和航向差进行权重配比，定义权重

函数：

$$J = r_1 \rho + r_2 \psi \quad (9)$$

其中： $r_1, r_2$  为权重系数； $\rho$  为无人机与目标的相对距离； $\psi$  为无人机航向角。

规划分以下 2 次进行：

1) 保证每个目标都有无人机追踪。

首先，目标 1 获取一架航向/距离最优的无人机，并绑定；其次，目标 2 获取一架除去已经绑定的航向/距离最优的无人机，并绑定；再次，目标 3 获取一架除去已经绑定的航向/距离最优的无人机，并绑定；以此类推直至每个目标都绑定一架无人机。

2) 保证剩余的无人机都能分配到目标跟踪。

除去已绑定无人机，剩下编号最小的目标首先获取航向/距离最优的无人机，并绑定；以此类推直至分配完所有无人机。

笔者航迹规划策略主要包含 3 个重要组成部分：1) 建立环境模型，对无人机进行任务分配；2) 通过跟踪制导律对无人机进行航迹规划；3) 遇到障碍物时基于改进的人工势场法，重新规划航迹。航迹规划策略如图 4 所示。

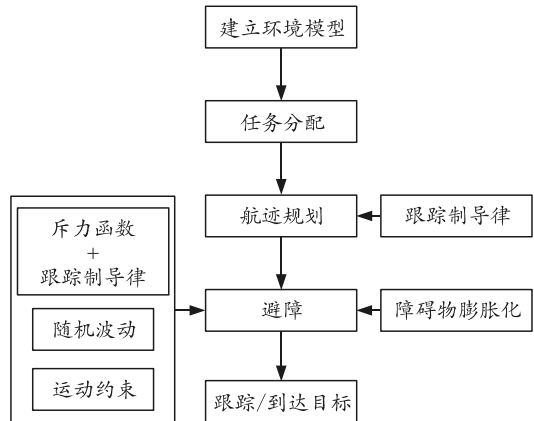


图 4 航迹规划策略

避障算法流程如图 5 所示。

## 4 仿真实验

笔者在 3 km×3 km 的环境模型中，对 4 架无人机跟踪 3 个移动目标的航迹规划效果进行验证。无人机速度在 20~40 m/s 之间，绕航跟踪半径  $\rho_d$  为 100 m，仿真时间为 200 s，被跟踪目标分别做匀速直线运动和变速运动。设定无人机周围 10 m 为危险区域。

为了直观体现障碍物对航迹的影响，笔者分别给出了无人机在有障碍物时的航迹效果，在无障碍物干扰时，无人机跟踪目标航迹如图 6 所示。

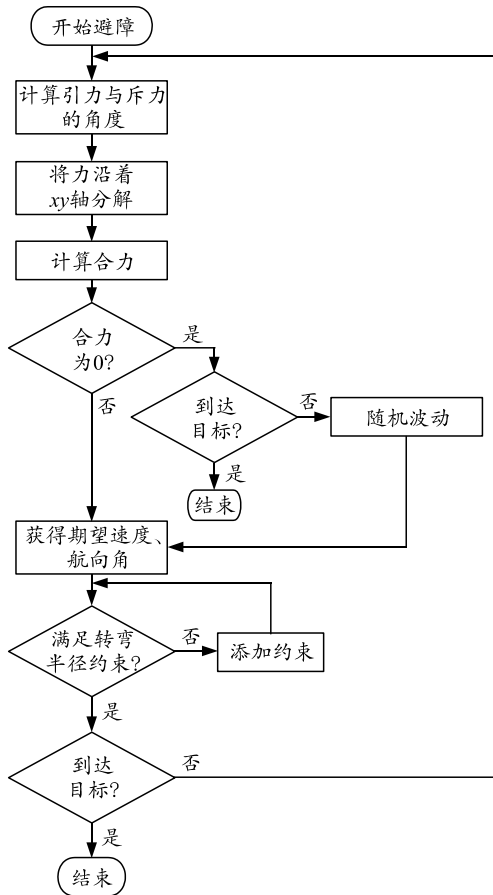


图 5 避障算法流程

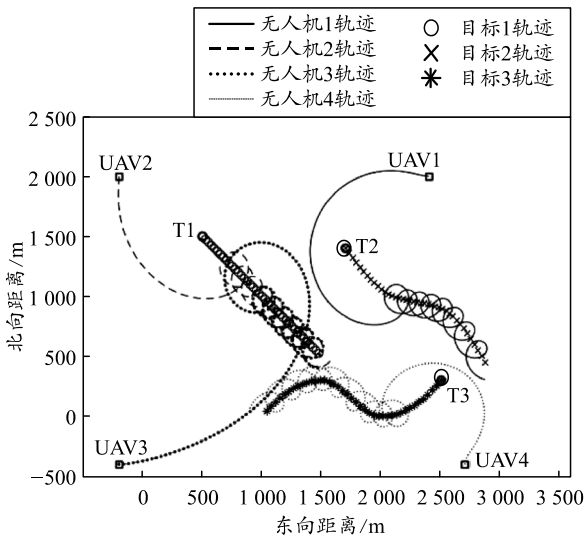


图 6 无障碍物下无人机跟踪目标航迹

上图中 4 架无人机的起始位置用正方形表示, 3 个目标的起始位置用空心圆圈表示, 在其基础上任意添加 5 个直径为 50 m 的障碍物, 障碍物影响范围是直径 200 m 的圆形区域, 在障碍物干扰下, 无人机跟踪目标航迹如图 7 所示。

由图 6 和 7 可知: 无人机 1 跟踪目标 2, 无人机 2、3 跟踪目标 1, 无人机 4 跟踪目标 3, 任务分

配效果良好, 在跟踪目标的同时能够很好地避开障碍物, 且航迹较为平滑。

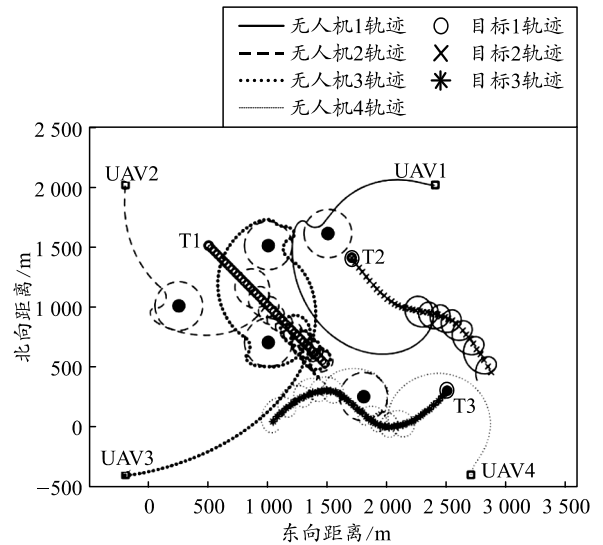
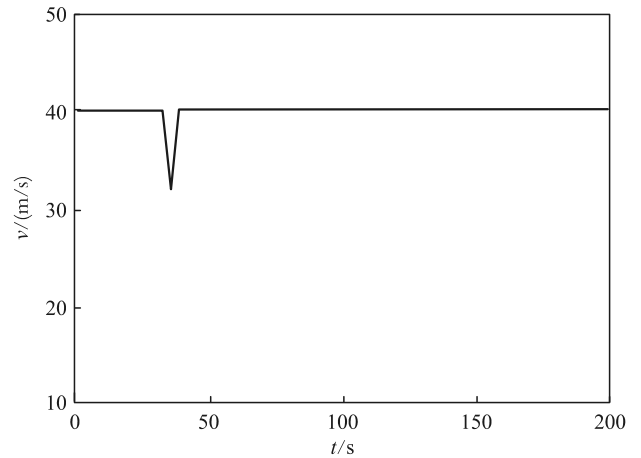
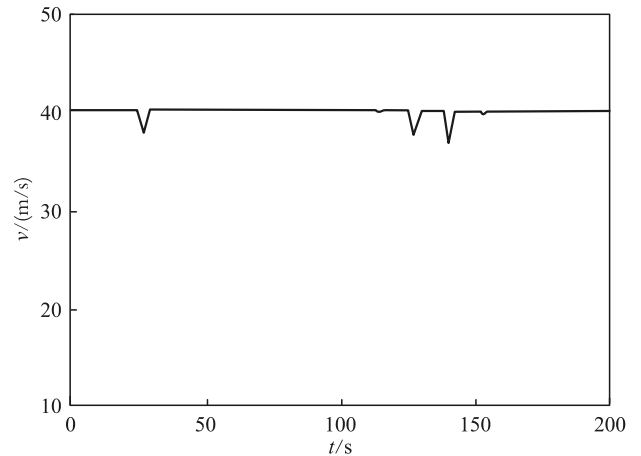


图 7 无人机跟踪目标避障航迹

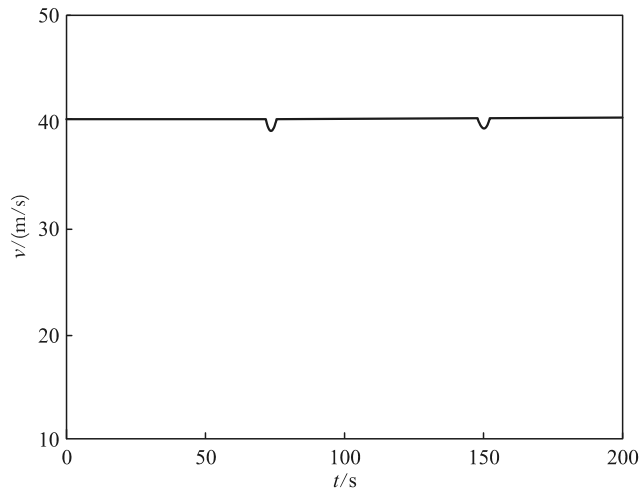
图 8 给出了无人机的速度变化, 无人机在靠近障碍物时减速, 距离障碍物越近, 减速越明显, 远离障碍物时加速到原状态, 符合无人机的安全需求。



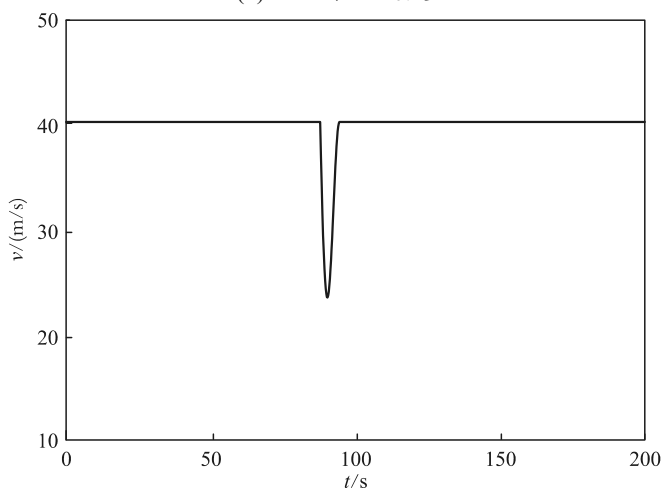
(a) 无人机 1 速度



(b) 无人机 2 速度



(c) 无人机 3 速度



(d) 无人机 4 速度

图 8 无人机速度变化

表 1 给出了无人机与各个障碍物之间的最小距离。

表 1 无人机与各障碍物最小距离情况 m

障碍物	无人机 1	无人机 2	无人机 3	无人机 4
1	953.09	68.39	294.70	1 048.68
2	370.61	63.84	81.21	361.01
3	47.82	581.80	230.56	1 081.05
4	151.41	171.29	77.17	1 100.29
5	271.81	320.65	329.75	37.55

由上表可知,无人机 4 与障碍物 5 的距离最近,为 37.55 m, 满足无人机的安全需求。

## 5 结论

笔者提出一种数学描述清晰、实时计算量小、简单高效、可靠性高的无人机无碰撞航迹规划算法。该算法将人工势场法与跟踪制导律结合使用,对人工势场法进行了适应性改进,提出一种简单有效的多无人机任务分配方法,给出了完整的无碰撞航迹规划策略。最终,仿真结果说明了策略的有效性,能够满足工程中的实用性需求。

## 参考文献:

- [1] 龚清萍, 许宇. 地图投影在无人机航迹规划中的应用[J]. 航空电子技术, 2009, 40(2): 48-52.
- [2] 徐卓. 基于神经网络算法的无人机航迹规划研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2016.
- [3] 邓伟栋, 唐大全, 唐管政. UAV 编队协同跟踪目标航迹规划[J]. 电光与控制, 2020, 27(9): 43-49.
- [4] 陈智民. 复杂环境下多无人机协同地面目标跟踪问题研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [5] 赵述龙, 王祥科, 张代兵, 等. 固定翼无人机曲线路径跟踪的积分向量场方法[J]. 国防科技大学学报, 2018, 40(2): 119-124.
- [6] 李寰宇, 陈延龙, 张振兴, 等. 基于 Dubins 的无人机自动避障路径规划[J]. 飞行力学, 2020, 38(5): 44-49.
- [7] 李霞, 张际海, 谢文俊, 等. 无人机自主防碰撞方法研究[J]. 飞行力学, 2011, 29(6): 48-51.
- [8] 张民, 田鹏飞, 陈欣. 一种无人机定距盘旋跟踪制导律及稳定性证明[J]. 航空学报, 2016, 37(11): 3425-3434.
- [9] 杨柳. 移动机器人动态路径规划方法研究[D]. 无锡: 江南大学, 2011.
- [10] 陈龙. 服务机器人自主导航系统关键技术的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2017.
- [11] 廖智麟. 无人直升机地面指挥控制站任务规划系统研究[J]. 直升机技术, 2011(1): 45-48.
- [12] 韩知玖, 吴文江, 李孝伟, 等. 一种改进的动力学约束人工势场法[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2019, 25(6): 879-887.