

# 基于双旋Lyapunov矢量场的无人机避障算法

张毅<sup>1</sup>, 孟启源<sup>1,2†</sup>, 杨秀霞<sup>1</sup>

(1. 海军航空大学 控制工程系, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空大学 研究生管理大队, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 提出一种基于双旋Lyapunov矢量场的无人机避障算法. 首先, 建立无人机和障碍物的模型, 并根据无人机有限时间是否会侵犯障碍物安全圆设计避障判定规则; 然后, 基于最小侧向偏移量原则选定避障机动中无人机速度旋转方向为最优避障方向, 选定其反方向为矢量场旋转方向, 定义成功避障的标准并进行证明; 最后, 通过建立的障碍物合并规则提升避障效率, 使得上述方法适用于未知环境下的无人机在线避障. 仿真结果表明, 在无人机性能约束下, 所提出的算法对动态和静态障碍都能有效避障, 算法性能优于Dubins路径和人工势场法.

**关键词:** 无人机; Lyapunov矢量场; 在线避障; 动力学约束

**中图分类号:** TP249

**文献标志码:** A

## Obstacle avoidance algorithm for UAV based on bi-rotation Lyapunov vector fields

ZHANG Yi<sup>1</sup>, MENG Qi-yuan<sup>1,2†</sup>, YANG Xiu-xia<sup>1</sup>

(1. Department of Control Engineering, Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China; 2. Graduate Students' Brigade, Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** A bi-rotation Lyapunov vector fields based obstacle avoidance algorithm (BLBOAA) is proposed for unmanned aerial vehicles (UAVs). Firstly, the models of UAV and obstacle are established, and the decision rules of obstacle are established based on an assessment of whether UAV would rush into the safety circle within a finite time. Then, based on the principle of minimum lateral offset, the optimal obstacle avoidance direction is selected from rotation direction of UAV's velocity and its reverse direction is selected as vector field rotation direction. Then, criterion of successful obstacle avoidance is defined and proved. Finally, the established rule of obstacles combination improves the efficiency of obstacle avoidance, and BLBOAA is suitable for on-line obstacle avoidance under the uncertain environment. Simulation results show that the UAV can avoid the dynamic and static obstacles effectively under the dynamic constraint, and the performance of the proposed algorithm is better than that of the Dubins path and artificial potential field.

**Keywords:** unmanned aerial vehicles; Lyapunov vector fields; on-line obstacle avoidance; dynamic constraints

## 0 引言

无人机 (Unmanned aerial vehicles, UAV) 作为一种能够自主控制或者遥控控制的飞行器, 以其高续航性和机动性受到了越来越多的关注, 其飞行过程中的避障技术也成为了研究的热点.

目前, 关于 UAV 避障飞行的研究很多, 现有的避障算法主要可以分为 3 类: 启发式算法、基于图论的方法和几何学方法. 启发式算法主要包括模拟退火算法<sup>[1]</sup>、粒子群算法<sup>[2]</sup>、遗传算法<sup>[3]</sup>和蚁群算法<sup>[4]</sup>, 启发式算法虽然能够快速规划出从起点到目标点的

可行航迹, 但是该类方法存在未考虑 UAV 机动性能、规划的航迹不具有可飞性且需要对规划的航迹进行平滑处理的缺点. 基于图论的方法包括 A\* 算法<sup>[5]</sup>、Voronoi 图<sup>[6]</sup>、搜索图等, 图论法通过对禁飞区外的空间进行几何划分, 并进行空间遍历寻求从起点到目标点之间的避障路径, 该类方法不仅不满足动力学约束, 而且一旦任务空间发生变化, 需要对空间进行重新遍历, 不适合动态障碍的避障规划. 几何学方法主要以 Dubins<sup>[7-8]</sup> 路径为代表, 该方法能够满足转弯半径等飞行动力学约束, 但缺点是仅能对静态目标进行避障<sup>[9]</sup>, 对于动态障碍的规避, 寻找合适的避障切点

收稿日期: 2017-04-18; 修回日期: 2017-11-28.

基金项目: 航空科学基金项目 (20135584010).

责任编辑: 赵珺.

作者简介: 张毅 (1971—), 男, 副教授, 博士, 从事飞行器导航、制导与控制等研究; 孟启源 (1992—), 男, 硕士生, 从事飞行器导航、制导与控制的研究.

†通讯作者. E-mail: 15006502301@qq.com

十分困难.

以上3类方法虽然各有优点,但是均无法同时满足动力学约束和动态障碍的避障.目前,同时满足以上两点要求的避障算法相对较少,相关研究中,通过构建障碍物的斥力场,文献[10]提出了基于势场法的动态障碍规避问题,但是无法忽视避障过程中引力和斥力互相抵消造成的局部最小问题,且由于斥力的影响,在UAV靠近障碍物的过程中,逐步变大的斥力不仅会减缓UAV飞行的速度,而且会造成更大的避障偏量,导致航迹加长.为了克服避障过程中的局部极小值问题,文献[11]对人工势场法进行了一定的改进,确保移动机器人能够快速走出局部极值点,但是移动机器人和UAV运动特性的不同使得该方法不适用于UAV的飞行.文献[12]在势场法中加入了随机可达集,实现了混合动态环境下的避障.文献[13]通过构建UAV和障碍的速度障碍锥,利用PH(Pythagorean hodograph)曲线构建了动态障碍避障的可飞路径,但是由于该方法需要计算4条PH曲线,计算量巨大是该方法无法克服的一个问题.文献[14]通过设计导引控制律,采用导引的方法实现了对动静障碍的避障,但其路径容易产生颤振.此外,通过借鉴自然界流水避石现象,文献[15-16]提出了扰动流体动力系统(Interfered fluid dynamical system, IFDS)并将其成功应用于静态和动态障碍的避障中.文献[17]对IFDS进行了改进,实现了对多个UAV协同避障.考虑到大部分情况下全局环境是未知的,文献[18]提出了一种基于视觉的局部动态障碍避障算法.

针对动态障碍的避障和可飞性要求,本文基于双旋Lyapunov矢量场展开避障研究.Lyapunov矢量场(Lyapunov vector fields, LVF)由Lawrence等<sup>[19]</sup>提出,该方法自提出便被用于动态或静态目标的standoff跟踪中.通过设计最优避障方向、矢量场旋转方向和避障成功的判定标准实施有效的避障,并顺利到达目标点.利用Dubins路径和人工势场法进行对比验证,结果表明,无论在动态障碍还是静态障碍环境下,基于LVF的UAV避障算法都具有优异的避障性能.

## 1 单个障碍避障模型的建立

### 1.1 无人机和障碍物模型

避障规划中要考虑UAV的机动性能约束下航迹的可飞行性,因此,UAV存在最小转弯半径等约束,同时考虑UAV的内部控制结构能够根据其运动信息获取空间位置、转弯角速率等,定义UAV在笛卡尔坐标系下飞行模型为

$$\begin{cases} \dot{x} = V_0 \cos \alpha, \\ \dot{y} = V_0 \sin \alpha, \\ \dot{\phi} = \omega, \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\alpha$ 为速度 $V_0$ 与横坐标正向的夹角.UAV在飞行过程中,速度大小不变,但是存在转弯角速率约束,即速度 $V_0$ 和转弯角速率 $\omega$ 需要满足条件

$$\begin{cases} |V_0| = v_{\max}, \\ |\omega| \leq \frac{v_{\max}}{R}, \\ \dot{\phi} = \omega. \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\omega$ 以逆时针旋转为正,顺时针旋转为负;转弯半径 $R$ 的范围为 $[R_0, +\infty)$ ;速度大小 $v_{\max}$ 和最小转弯半径 $R_0$ 取决于UAV本身的性能.

对于障碍物模型的建立,考虑到障碍物形状较多,需要对其进行规范化处理,将其外接多边形的外接圆作为障碍物范围,同时考虑到UAV具有一定的尺寸,因此将UAV视为质点,将障碍物外接圆膨化一定距离的安全圆作为UAV可飞行的边界,视UAV在边界外的飞行为安全可行的飞行.障碍物模型如图1所示.

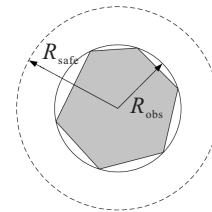


图1 障碍物模型

设UAV从起始点到目标点飞行时间为 $T$ ,则一次安全的飞行中,UAV和障碍的距离需满足 $\forall t \in (0, T], \text{Dist}(P_t(\text{UAV}), P_t(\text{obstacle}))$  恒成立.其中: $\text{Dist}(\cdot)$ 为 $t$ 时刻无人机和障碍的距离, $R_{\text{safe}}$ 为障碍物安全圆半径.

### 1.2 避障判定

UAV在空间飞行时,利用其机载的传感器能够获取一定范围内的环境信息,设UAV的探测半径为 $R_{\text{tect}}$ ,则其避障判定如图2所示.

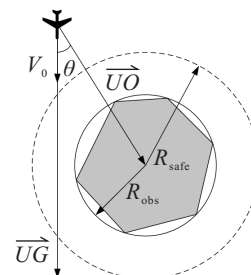


图2 避障判定

UAV飞行过程中探测到一静态障碍,UAV和障碍物的位置矢量为 $\vec{UO}$ ,其2-范数为 $R_{\text{tect}}$ , $\theta$ 为速度 $V_0$

和 $\overrightarrow{UO}$ 的夹角. 是否需要避障的判定式为

$$\varphi(t, V_0, \theta) = \begin{cases} 1, & R_{\text{tect}} \cdot \sin \theta < R_{\text{safe}}; \\ 0, & R_{\text{tect}} \cdot \sin \theta \geq R_{\text{safe}}. \end{cases} \quad (3)$$

当判定式取值为1时, UAV需要进行避障. 若障碍为动态障碍, 则由于障碍的运动使得UAV可能会在探测到障碍后某时刻侵犯障碍安全圆, 对于动态障碍上式是不适用的, 动态障碍是否需要避障的判定, 需要根据探测到障碍后预测UAV按照当前速度飞行一定时间 $\Delta t$ 后是否会碰撞判定. 动态障碍是否需要避障的判定规则为: 当 $t$ 时刻

$$\text{Dist}(P_t(\text{UAV}), P_t(\text{obstacle})) = R_{\text{tect}}$$

时,  $\exists \Delta t > 0$ , 使得

$$\text{Dist}(P_{t+\Delta t}(\text{UAV}), P_{t+\Delta t}(\text{obstacle})) < R_{\text{safe}},$$

其中 $P_t(\text{UAV})$ 为 $t$ 时刻UAV的位置.

### 1.3 避障方向的确定和矢量场旋转方向的选取

Lawrence等<sup>[9]</sup>提出了LVF, 其构建的Lyapunov函数为

$$V(p) = \frac{1}{2}(r^2 - R_0^2)^2. \quad (4)$$

其中:  $\sqrt{(x - x_t)^2 + (y - y_t)^2}$ 为UAV和障碍物中心的距离;  $R_0$ 为期望的跟踪半径, 本文 $R_0 = R_{\text{safe}}$ .

式(4)为正定函数, 由式(4)可定义出速度分量式为

$$v_{\text{aw}}(u) = \begin{bmatrix} v_{\text{aw}x} \\ v_{\text{aw}y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -kx_r(r^2 - R_0^2) - ky_r(2rR_0) \\ -ky_r(r^2 - R_0^2) - kx_r(2rR_0) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中 $k = \frac{V_0}{r(r^2 + R_0^2)}$ .

在式(5)下, UAV收敛到跟踪圆的矢量场旋转方向为逆时针(Anti-clock wise, AW). 对式(4)关于 $t$ 求全导数, 得到

$$\begin{aligned} \frac{dV(p)}{dt} &= \left[ \frac{\partial V(p)}{\partial x_r}, \frac{\partial V(p)}{\partial y_r} \right] \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \\ & \left[ \frac{\partial V}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial x_r}, \frac{\partial V}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial y_r} \right] \begin{bmatrix} \dot{x} - \dot{x}_t \\ \dot{y} - \dot{y}_t \end{bmatrix} = \\ & \frac{-2rV_0(r^2 - R_0^2)^2}{r^2 + R_0^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

由于UAV飞行中, 需要满足 $r \geq R_0$ , 式(6)恒小于等于0, UAV在矢量场的引导下逐渐收敛到跟踪圆, 实现对静态目标的跟踪.

之前关于LVF的研究主要为目标的跟踪, 对矢量场的旋转方向所提不多, 根据矢量场逆时针旋转的速度式(5), 易求得矢量场顺时针(Clock wise, CW)旋转方向的速度式为

$$v_{\text{cw}}(u) = \begin{bmatrix} v_{\text{cw}x} \\ v_{\text{cw}y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -kx_r(r^2 - R_0^2) - ky_r(2rR_0) \\ -ky_r(r^2 - R_0^2) - kx_r(2rR_0) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

文中称顺时针和逆时针的LVF为双旋LVF, 两种矢量场旋转方向的仿真结果如图3和图4所示.

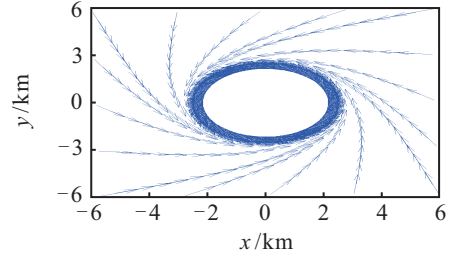


图3 矢量场的逆时针旋转

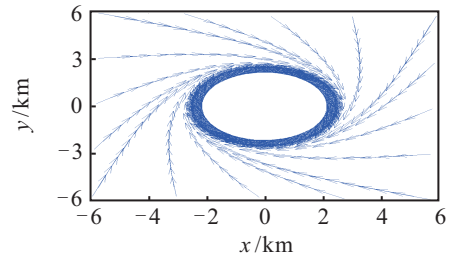


图4 矢量场的顺时针旋转

对于动态目标的跟踪, 首先给出LVF跟踪动态目标的速度式为

$$V_{\text{do}}(u) = \begin{cases} \lambda v_{\text{aw}}(u) + v_b(u), & \text{Anticlockwise;} \\ \lambda v_{\text{cw}}(u) + v_b(u), & \text{Clockwise.} \end{cases} \quad (8)$$

为讨论方便, 仅对逆时针方向的矢量场进行讨论, 顺时针矢量场同逆时针的情况. 式(8)中,  $v_b(u)$ 为所跟踪的动态目标(障碍)的速度,  $\lambda$ 为协同系数, UAV相对目标的速度为 $\lambda v_{\text{aw}}(u)$ . 由于UAV速度值为 $|V_0|$ , 需要满足

$$\begin{aligned} \lambda^2(v_{\text{aw}x}^2 + v_{\text{aw}y}^2) + 2\lambda(v_{\text{aw}x}v_{bx} + v_{\text{aw}y}v_{by}) + \\ (v_{bx}^2 + v_{by}^2) = |V_0|^2. \end{aligned} \quad (9)$$

UAV能够成功实施跟踪的前提条件是UAV飞行的速度矢量 $V_0$ 和目标的速度矢量 $V_b$ 需要满足 $|V_0| > |V_b|$ , 可知式(9)必定存在正数解. 速度式(4)关于时间 $t$ 的全导数为

$$\frac{dV(p)}{dt} = \frac{-2\lambda r V_0 (r^2 - R_0^2)^2}{r^2 + R_0^2}. \quad (10)$$

由 $\lambda > 0$ 易知式(10)恒小于等于0. UAV在障碍物的相对速度坐标系里, 以式(5) $\lambda$ 倍的速度实施跟踪. 此时动态障碍避障问题转化为障碍物相对速度坐标系下的静态障碍避障问题.

下面讨论最优避障方向的选取. 如图5所示, 对于静态障碍, 为了找到最优的避障方向, 考虑UAV和目标点 $G$ 的连线矢量 $\overrightarrow{UG}$ , 与 $\overrightarrow{UG}$ 垂直且过障碍物圆

心的直线交安全圆于点 $T_n$ 和 $T_f$ ,  $T_n$ 为距离UAV较近的点, 可以得到如下定理.

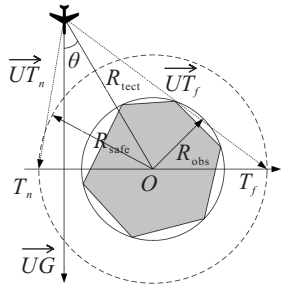


图5 最优避障方向的判定

**定理1** UAV探测到静态障碍并判定其需要避障时, 最优的避障方向为矢量 $\vec{UG}$ 旋转到矢量 $\vec{UT}_n$ 的旋转方向.

当UAV需要确定避障方向时, 最优的避障方向为能避开障碍的最小侧向偏移量的方向. 如图5所示, 从 $T_n$ 点避障侧向偏移量可以用 $\vec{UG}$ 旋转到 $\vec{UT}_n$ 的旋转角 $\gamma_n$ 的正切值表示为

$$\tan \gamma_n = \frac{R_{safe} - R_{tect} \sin \theta}{R_{tect} \cos \theta},$$

其旋转方向为顺时针方向; 从 $T_f$ 点避障的侧向偏移量可以用 $\vec{UG}$ 旋转到 $\vec{UT}_f$ 的旋转角 $\gamma_f$ 的正切值表示为

$$\tan \gamma_f = \frac{R_{safe} + R_{tect} \cdot \sin \theta}{R_{tect} \cdot \cos \theta},$$

其旋转方向为逆时针方向. 由正切函数的单调性易知 $\tan \gamma_f > \tan \gamma_n$ , 结论成立. 因此, 可以根据 $\vec{UG}$ 偏转至 $T_n$ 和 $T_f$ 点的角度大小关系判断最优避障方向.

**注1**  $\vec{UG}$ 偏转至 $\vec{UT}_n$ 偏转过后的角度不是避过该障碍UAV转过的角度, 而是选取用来判定最优避障方向的角度值.

对于动态障碍, 考虑UAV在探测到动态障碍后, 利用避障检测判定其需要避障, 根据图5, 利用即将侵犯安全圆时刻UAV与障碍物的位置关系, 根据定理1,  $\vec{UG}$ 偏转到 $\vec{UT}_n$ 的矢量旋转方向为避障方向, 则UAV在探测到障碍的时刻开始避障机动, 根据式(9), 转化为相对速度坐标系下静态障碍的避障问题, 易知定理1适用于动态障碍.

根据定理1, 可以得出矢量场旋转方向的定理2.

**定理2** UAV探测到障碍并判定该障碍需要避障时, 其选定的矢量场旋转方向为最优避障方向的反方向.

如图5所示, 当 $T_n$ 位于障碍物的左侧时(图5中 $O-T_n$ 方向), 最优的避障方向为顺时针方向, 此时选取的用于避障的矢量场为式(5)生成的逆时针旋转矢量场(如图3所示), 在该矢量场引导下, UAV以较小的侧偏量从左侧避过障碍, 其最小侧偏量为 $R_{safe} - R_{tect} \sin \theta$ ; 当 $T_n$ 位于障碍物的右侧时, 最优

的避障方向为逆时针方向, 此时选取用于避障的矢量场为式(7)生成的顺时针旋转矢量场(如图4所示), 在该矢量场引导下, UAV以较小的侧偏量从右侧避过障碍. 矢量场的旋转方向 and 最优避障方向与左侧时相反, 当 $\vec{UG}$ 过障碍物圆心时, 两种情况等价.

**注2** 若障碍为动态障碍, 则转化为静态障碍避障问题下定理2的判定, 易知其成立.

#### 1.4 成功避障标准的确定

部分文献中, 避障成功是指UAV在一次避障飞行过程中没有侵犯障碍物的安全圆, 本文重新给出了避障成功的定理3, 作为判定摆脱LVF吸引力的标准依据.

**定理3** 在飞行过程中, 若UAV没有侵犯障碍物的安全圆, 且存在某时刻 $t$ , 使得该时刻矢量 $\vec{UD}$ 和矢量 $\vec{UG}$ 的位置关系 $\cos(\vec{UD}, \vec{UG}) = 0$ , 则可以判定避障成功.

当障碍为静态障碍时,  $\cos(\vec{UD}, \vec{UG}) = 0$ 表示 $\vec{UD} \perp \vec{UG}$ , 从 $t$ 时刻起,  $\cos(\vec{UD}, \vec{UG})$ 的值恒小于0, UAV沿着目标引力飞行能够安全到达目标点且不会侵犯该障碍物的安全圆.

若障碍为动态障碍, 如图6所示, 分两种情况进行讨论: 1) 图6中轨迹1, 若根据定理1和定理2判断矢量场旋转方向为顺时针, 存在某时刻 $t$ , 使得该时刻 $\cos(\vec{UD}, \vec{UG}) = 0$ , 则此时障碍的运动不会造成二者碰撞, 定理3中的判定成立. 2) 图6中轨迹2, 文献[20]提出了利用威胁锥判定障碍避碰的方法, 这里引入该方法进行辅助证明.

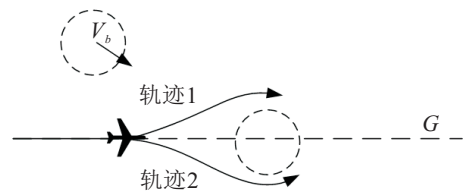


图6 避障成功的判定

首先给出威胁锥的定义.

**定义1** 威胁锥(Collision cone, CC)表示为 $CC = \{l | \exists M = l \cap \odot P_0\}$ . 其中: $l$ 为以UAV为顶点的射线,  $M$ 为射线 $l$ 与障碍物安全圆 $\odot P_0$ 的交点.

威胁锥可以简单理解为以UAV为顶点和安全圆相切的两条射线形成的夹着安全圆的锥形区域.

**定理4**<sup>[20]</sup> 当UAV和障碍的相对速度矢量 $V_{ob}$ 位于威胁锥内时, 障碍会对UAV产生威胁, 反之不会.

下面证明定理3.

**证明** 如图7所示, 在动态障碍转化的静态障碍LVF中, UAV在任意位置跟踪该障碍的相对速度为 $V_{ob}$ , 由式(8)可知,  $\lambda V_0 = V_{ob}$ . 根据几何关系, 任意时

刻 UAV 在动态障碍相对坐标系内的相对速度  $V_{0b}$  是落在威胁锥之外的,即 UAV 在 LVF 引导下最终会收敛到跟踪圆,始终不会与障碍发生碰撞.

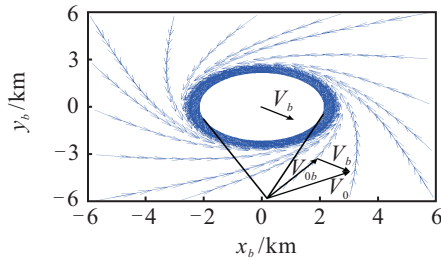


图7 LVF任意位置的威胁锥关系

当  $\vec{UO} \perp \vec{UG}$  时,  $|\vec{UO}| > R_{safe}$ , 如图8所示, 易知此时  $V_{0b}$  仍落在威胁锥外部. 记此时  $V_0$  与  $\vec{UO}$  的夹角为锐角  $\alpha_a$ . 定理3判定, 此时 UAV 不受 LVF 作用, 仅在  $\vec{UG}$  的引力下飞向目标.

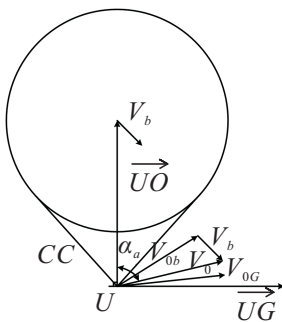


图8 临界时刻威胁锥

如图9所示,  $\vec{UG}$  引力产生的附加速度为  $V_G$ , 根据矢量相加的平行四边形法则, 期望的新速度  $V'_{0G} = [V_{0,x} + V_G, V_{0,y}]^T$ . 由于最大速度的限制, 产生的实际速度  $V_{0G} = V'_{0G}|V_0|/|V'_{0G}|$ , 其大小等于  $V_0$ , 方向与  $V'_{0G}$  相同. 易知  $V_{0G}$  与  $\vec{UO}$  的夹角大于  $\alpha_a$ , 新产生的相对速度仍落在威胁锥之外, 经过多次迭代后, UAV 的相对速度  $V_{0b}$  总是保持在威胁锥外. 可知, UAV 不会与障碍相撞. □

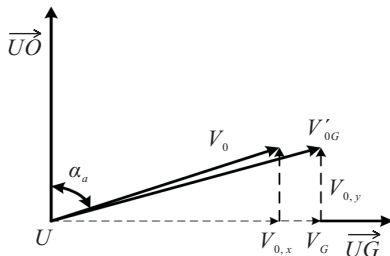


图9 矢量合成图

基于双旋LVF的UAV避障算法的流程(见图10)如下: 任务开始后, UAV 沿着矢量  $\vec{UG}$  的方向飞行; 当检测到障碍后, 判断是否需要避障, 若需要避障则判断最优避障方向和矢量场旋转方向, 并利用双旋LVF引导 UAV 避障; 避障成功后, 在  $\vec{UG}$  的引力作用下飞向目标点.

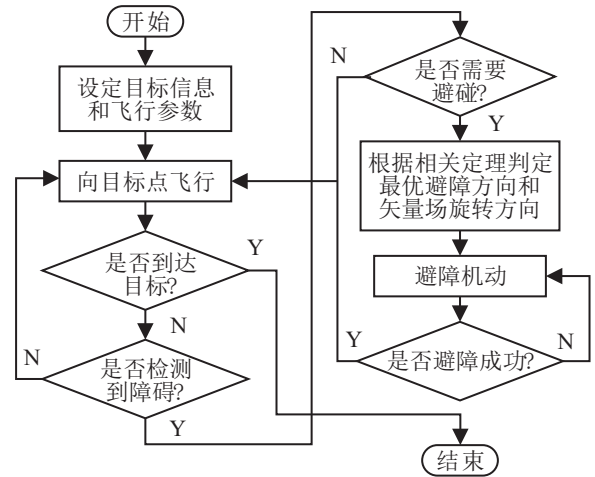


图10 算法流程图

## 2 未知环境下在线避障规划

在未知环境下飞行, UAV 可能遇到多个障碍物同时存在的情况, 因此未知环境下在线避障问题变得更为复杂. 为简化环境复杂度, 提升 UAV 避障效率, 对探测到的障碍物进行合并, 合并情况分以下两种.

### 2.1 安全圆相交

两个静态障碍之间存在一定距离, 但是在该距离下, 其安全圆相交, UAV 在避障过程中会侵犯另一个障碍的安全圆, 从而存在撞毁的风险, 此时需要寻找包络两个障碍物的新的安全圆作为避障参数.

图11中, UAV 探测到障碍物后, 选定的  $\vec{UO}$  偏转到  $\vec{UT}_{n1}$  的方向为最优避障方向. 矢量场旋转方向为逆时针方向. 由于两个障碍物相交, 避障过程中会侵犯另一个障碍的安全圆, 需要对两个障碍进行合并, 合并后障碍的避障判定转化为单个障碍的避障判定, 选定的最优避障方向为  $\vec{UO}$  偏转到  $\vec{UT}_{f1}$  的方向, 此时选定的矢量场旋转方向为顺时针方向, 由定理1和定理2可知, 此时的路径为最优的.

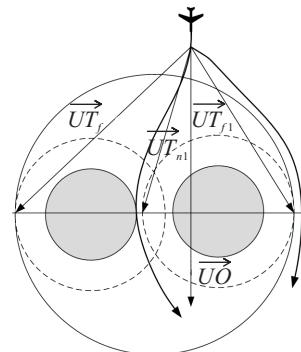


图11 障碍物安全圆相交

### 2.2 多个微小障碍的合并

多个微小障碍存在时, 虽然其安全圆不相交, 利用双旋LVF能够寻找到一条可行的安全路径. 但是, 频繁的避障会导致 UAV 避障次数的增加和路径的

延长,为了减少控制指令的频繁输入,需要将多个微小的障碍物合并,作为一个整体进行避障,如图12所示. 规定包络安全圆的最大半径为 $R_{max}$ ,若超出该半径值则不对障碍进行合并. 考虑多个静态障碍合并,采用几何学方法,寻找合并后障碍物的圆心和半径,并根据单个障碍物的最优避障方向与矢量场旋转方向准则进行避障,方法与安全圆相交的情况相同,此处不做过多赘述.

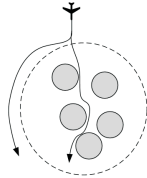


图12 多个微小障碍的合并

对于多个动态微小障碍的处理问题,分为障碍速度相同和不同两种情形. 首先考虑障碍速度相同的情形,在绝对坐标系下,微小障碍速度大小和方向均相同,多个微小障碍的避障可以视作单个动态障碍的避障问题. 考虑障碍速度不相同的情形,由于障碍的相对运动会导致所包络的安全圆的扩大和缩小,为了保证UAV的安全,对于安全圆扩大的情形,以 $R_{max}$ 作为避障半径,若安全圆大于 $R_{max}$ 则取消障碍的合并,对于安全圆缩小的情形,可以根据实时求出的包络安全圆半径值作为避障半径进行避障,方法同第2.1节.

在对障碍进行合并处理后,未知环境下UAV在线避障问题便转化为一组单障碍环境下的避障问题.

### 3 仿真分析

#### 3.1 单个障碍物避障仿真

以单个障碍避障模型为依据,进行单个障碍物的避障仿真验证,仿真参数如表1所示.

表1 仿真参数(单个障碍避障)

参数	数值
UAV速度/( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	0.2
转弯角速率/( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ )	0.05
UAV探测半径/km	9
障碍物半径/km	3
安全距离/km	0.3
起点坐标/(km, km)	(0,0)
目标点坐标/(km, km)	(20,20)

首先验证单个静态障碍物的避障. 图13中,障碍坐标在UAV和目标的连线上,此时两侧的避障效果相同. 当障碍坐标为(13,9)时,根据定理1和定理2,确定UAV左侧为最优避障方向,矢量场旋转方向为顺时针. 当障碍坐标为(9,13)时,结论与(13,9)时相反. 为了验证避障的成功性和UAV动力学约束,以障碍坐标(11,11)的逆时针方向避障进行验证. 图

14为在飞行过程中,UAV与障碍之间的距离变化,可以看出在飞行过程中,UAV一直处于安全圆范围之外. UAV的转弯角速率变化如图15所示,飞行过程中转弯角速率处于UAV最大转弯角速率约束下.

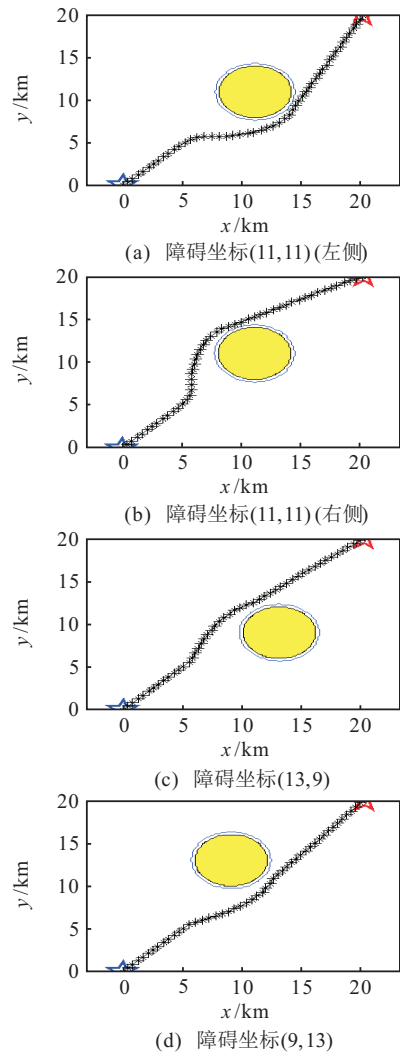


图13 单个静态障碍物避障

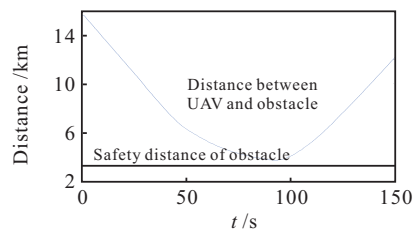


图14 UAV和障碍的距离变化

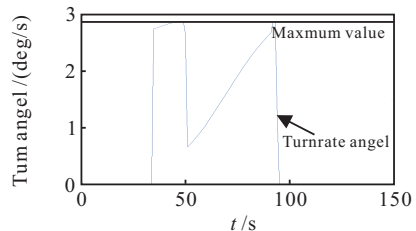


图15 飞行中转弯角的变化

下面验证单个动态障碍物的避障. 对动态目标的避障是避障问题的一个重点,设障碍物的起始位置

为(2.3, 19.7),其运动方向角为 $-45^\circ$ ,在UAV探测到障碍物后进行避障,当 $t = 97$ 时,判定避障成功. UAV与障碍距离变化如图16~图18所示.

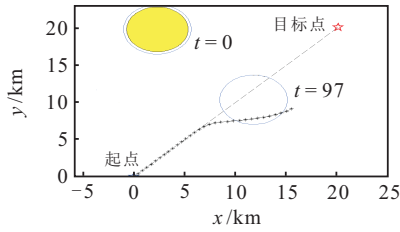


图16  $t = 97$ 时避障成功

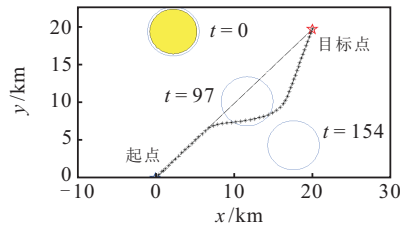


图17 单个动态障碍物避障航迹

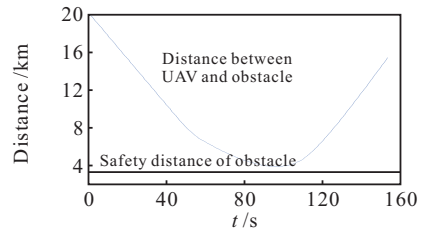


图18 UAV和动态障碍物的距离变化

为了更直观地表明动态障碍避障方法的准确性,针对动态障碍进行两个避障方向仿真结果的对比,仿真中障碍安全圆半径为 $R_{safe} = 3.3$  km,仿真结果如表2所示.

由表2可见,利用基于LVF的避障算法在保持了与障碍较大的安全距离的同时,路径长度更小,3组结果表明了算法的正确性.从非本算法确定的方向进行避障时,路径长度明显更长,甚至有时会侵犯安全圆,导致避障失败.

表2 仿真结果对比

障碍参数	障碍速度方向	CW 矢量场方向		AW 矢量场方向		利用算法判定的方向
		最小距离/km	路径长度/km	最小距离/km	路径长度/km	
(2.3 km, 11 km, $0.1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	0	3.56	30.6	3.73	30	AW
(6.3 km, 11 km, $0.1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	0	3.89	29	3.58	37.8	CW
(2.3 km, 19.7 km, $0.141 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$-45$	2.52	33	3.99	31.2	AW
(6.3 km, 19.7 km, $0.141 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$-45$	3.83	30	3.62	46	CW
(11 km, 19.7 km, $-0.1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$-90$	3.15	32.2	3.94	30.6	AW
(11 km, 16.7 km, $-0.1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$-90$	4.16	29.8	3.48	33	CW

为了验证基于双旋LVF的避障算法的性能,利用基于Dubins路径的方法和人工势场法进行对比验证.考虑对起点坐标为(0,0),目标点坐标为(20,20),障碍物参数为(11, 11, 3)的静态障碍物避障和起点为(2.3, 19.7),速度大小为0.141,速度方向为 $-45$ 的动态障碍物进行避障.由于静态障碍物的位置在起点和目标点连线上,存在极小值点,采用加入扰动因子克服局部极小值点的改进人工势场法进行避障.同时,由于表1中UAV机动性能约束, Dubins路径中UAV最小转弯半径 $R_{min} = 4$ .利用Dubins路径和人工势场法的仿真结果如图19~图21所示.仿真结果如表3所示.

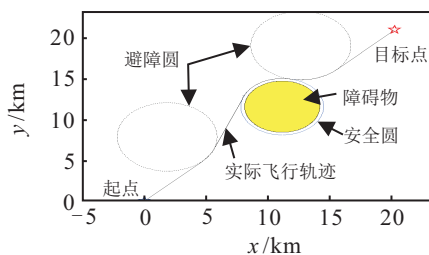


图19 Dubins路径对单个静态障碍物避障

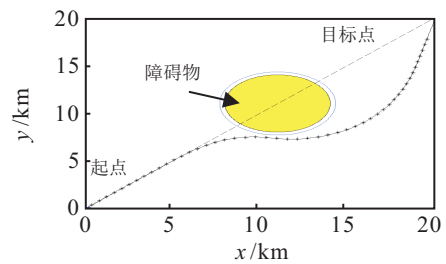


图20 改进人工势场法对单个静态障碍物避障

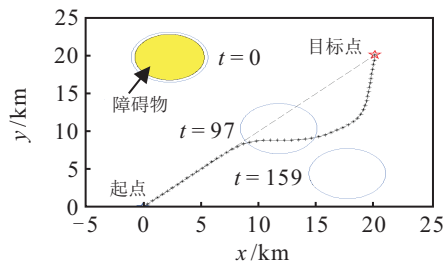


图21 改进人工势场法对单个动态障碍物避障

表3 仿真结果

	路径长度(静态)/km	路径长度(动态)/km
改进人工势场法	31.3	31.8
Dubins 路径	30.1	-
双旋LVF	30.2	30.8

由表3可见:在静态障碍的避障问题中,3种方法都能够成功避障,路径的总长度分别为 $30.1 < 30.2 < 31.3$ .基于双旋LVF的避障算法对静态障碍的避障问题航迹代价小于人工势场法,性能接近Dubins路径.

在动态障碍的避障中,基于双旋LVF的避障算法在成功避障的同时,航迹长度是最小的.改进人工势场法虽然也能成功避障,但航迹长度大于双旋LVF.基于Dubins路径的动态障碍规避,虽然可以根据障碍物状态进行预测求出障碍物圆弧的切入点,但是UAV在圆弧上进行避障机动的同时,障碍的运动势必会导致UAV侵犯安全圆,导致避障失败,因此无法形成有效的避障.综上,基于双旋LVF的避障算法具有良好的动态障碍和静态障碍避障性能.

### 3.2 未知环境下在线避障路径规划

在UAV仅获得本身和目标点坐标,对环境障碍情况未知的条件下,利用LVF进行在线避障路径规划,仿真参数如表4所示.

表4 仿真参数(利用LVF进行规划)

参数	数值
UAV 起点坐标/(x/km, y/km)	(0, 0)
目标点坐标/(x/km, y/km)	(50, 50)
障碍1的参数/(x/km, y/km, r/km)	(9, 11, 3)
障碍2的参数/(x/km, y/km, r/km)	(18, 16, 3)
障碍3的参数/(x/km, y/km, r/km)	(22, 25, 1.2)
障碍4的参数/(x/km, y/km, r/km)	(24, 23, 1.2)
障碍5的参数/(x/km, y/km, r/km)	(30, 40, 3)
障碍6的参数/(x/km, y/km, r/km)	(38, 43, 3)

UAV从起点起飞,向目标点飞行,在 $t = 28$ 时,探测到第1个障碍,并以逆时针方向实施避障;在 $t = 80$ 时,探测到第2个障碍,并以顺时针方向进行避障;在 $t = 135$ 时,UAV探测到第3个和第4个障碍,由于其安全圆相交,将其视为一个障碍进行处理;在 $t = 222$ 时,UAV探测到第5个障碍,由于不会碰撞,UAV按照原来的速度飞行,在 $t = 258$ 时,UAV探测到第6个障碍,并采用逆时针方向进行避障;之后UAV没有遇到其他障碍;在 $t = 374$ 时,UAV飞抵目标点.仿真结果如图22~图27所示.

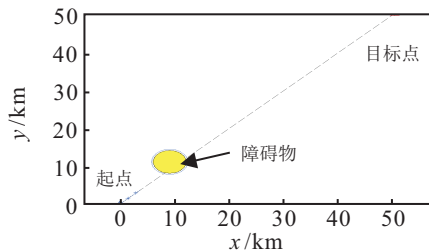


图22  $t = 28$ s时的仿真

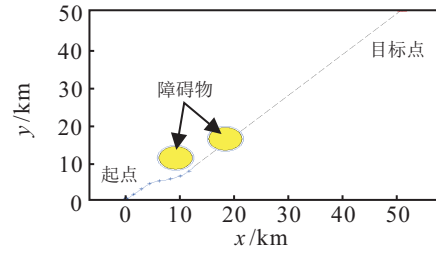


图23  $t = 80$ s时的仿真

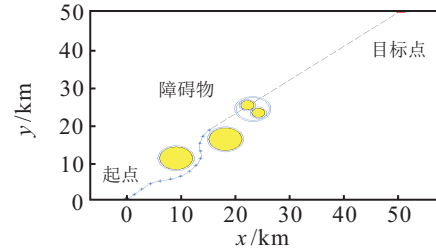


图24  $t = 135$ s时的仿真

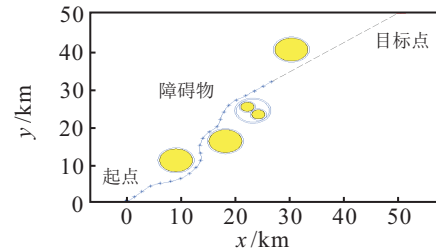


图25  $t = 222$ s时的仿真

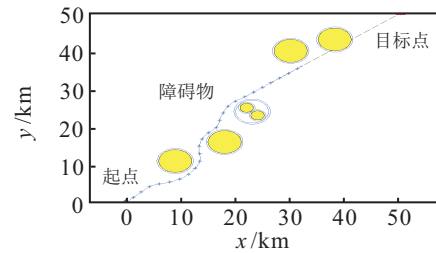


图26  $t = 258$ s时的仿真

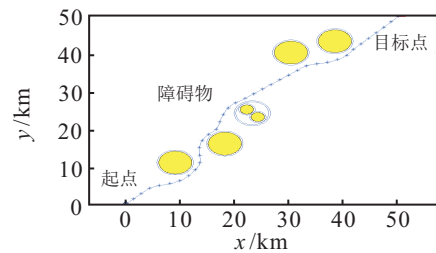


图27 UAV全程航迹仿真

## 4 结论

本文针对UAV避障问题展开研究,提出了一种基于双旋LVF的避障算法.通过确定最优避障方向缩短航迹代价,通过确定矢量场旋转方向引导UAV绕过障碍物,由于Lyapunov函数引导下的UAV始终会收敛到跟踪半径,保证了UAV的安全.仿真结果表明,所提出算法能够实现动、静态障碍的避障和未知环境下的在线避障航迹规划,且性能优于人工势场法和Dubins路径.

## 参考文献(References)

- [1] Miao H, Tian Y C. Dynamic robot path planning using an enhanced simulated annealing approach[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2013, 222(5): 420-437.
- [2] Holub J, Foo J L, Kilivarapu V, et al. Three dimensional multi-objective UAV path planning using digital pheromone particle swarm optimization[C]. *Proc of the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conf. Honolulu*, 2012: 23-26.
- [3] Ahmed F, Deb K. Multi-objective optimal path planning using elitist non-dominated sorting genetic algorithms[J]. *Soft Computing*, 2013, 17(7): 1283-1299.
- [4] 方丹辉, 丁秋峰, 龙晓林. 基于网络模型的多机器人编队优化研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2008, 30(6): 865-868.  
(Fang D H, Ding Q F, Long X L. Network-based Multi-robot Formation Optimization[J]. *J of Wuhan University of Technology*, 2008, 30(6): 865-868.)
- [5] 李季, 孙秀霞. 基于改进 A-Star 算法的无人机航迹规划算法研究[J]. *兵工学报*, 2008, 29(7): 788-792.  
(Li J, Sun X X. A route planning's method for unmanned aerial vehicles based on improved A-Star algorithm[J]. *Acta Armamentarii*, 2008, 29(7): 788-792.)
- [6] Wilburn J N, Perhinschi M G, Wilburn B K, et al. Development of a modified voronoi algorithm for UAV path planning and obstacle avoidance[C]. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf. AIAA*, 2012: 4904.
- [7] Dubins L. On plane curves with curvature[J]. *Pacific J of Mathematics*, 1961, 11(2): 471-481.
- [8] Thomaschewski B. Workspaces of continuous robotic manipulators[D]. *German: TU Ilmenau*, 2002.
- [9] 关震宇, 杨东晓, 李杰, 等. 基于Dubins路径的无人机避障规划算法[J]. *北京理工大学学报*, 2014, 34(6): 570-575.  
(Guan Z Y, Yang D X, Li J, et al. Obstacle avoidance planning algorithm for UAV based on dubins path[J]. *Trans of Beijing Institute of Technology*, 2014, 34(6): 570-575.)
- [10] 段华, 赵东标. 动态环境下基于势场原理的避障方法[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2006, 34(9): 39-41.  
(Duan H, Zhao D B. Potential field based obstacle avoidance algorithm for dynamic environment[J]. *J of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2006, 34(9): 39-41.)
- [11] 卢翔, 刘景泰, 李海丰, 等. 基于人工势场法的竞争型网络机器人攻防规划[J]. *机器人*, 2013, 35(2): 218-226.  
(Lu X, Liu J T, Li H F, et al. Attack and defense planning for competitive networked robots based on artificial potential field method[J]. *Robot*, 2013, 35(2): 218-226.)
- [12] Chiang H T, Malone N, Lesser K, et al. Aggressive moving obstacle avoidance using a stochastic reachable set based potential field[M]. *Switzerland: Springer International Publishing*, 2015: 73-89.
- [13] 张毅, 杨秀霞, 周础础. 基于速度障碍法的多UAV可飞行航迹优化生成[J]. *系统工程与电子技术*. 2015, 37(2): 323-330.  
(Zhang Y, Yang X X, Zhou W W. Velocity obstacles-based collision avoidance feasible trajectory planning optimization algorithm for multiple UAV[J]. *Systems Engineering and Electronics*. 2015: 37(2): 323-330.)
- [14] Shin H S, Tsourdos A, White B. UAS conflict detection and resolution using differential geometry concepts[M]. *Sense and Avoid: Research and Applications*, 2012: 175-204.
- [15] 姚鹏, 王宏伦, 刘畅. 基于动态流体扰动原理的三维滚动航路规划[J]. *北京航空航天大学学报*, 2015, 41(12): 2280-2287.  
(Yao P, Wang H L, Liu C. Three-dimensional rolling path planning via dynamic fluid disturbance [J]. *J of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 41(12): 2280-2287.)
- [16] Yao P, Wang H, Su Z. Real-time path planning of unmanned aerial vehicle for target tracking and obstacle avoidance in complex dynamic environment[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2015, 47: 269-279.
- [17] Yao P, Wang H, Su Z. Cooperative path planning with applications to target tracking and obstacle avoidance for multi-UAVs[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2016, 54: 10-22.
- [18] Kim D O, Lee D Y, Oh J I, et al. Local obstacle avoidance using obstacle-dependent gaussian potential field for robot soccer[M]. *Switzerland: Springer Int Publishing*, 2017: 539-549.
- [19] Lawrence D A, Frew E W, Pisano W J. Lyapunov vector fields for autonomous unmanned aircraft flight control[J]. *J of Guidance, Control, and Dynamics*, 2008, 31(5): 1220-1229.
- [20] 杨秀霞, 周础础, 张毅. 基于速度障碍圆弧法的UAV自主避障规划研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2017, 39(1): 168-176.  
(Yang X X, Zhou W W, Zhang Y. Automatic obstacle-avoidance planning for UAV based on velocity obstacle arc method[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(1): 168-176.)