

DOI:10.11918/201808108

双层优化的多无人机合作式冲突探测与解脱

付其喜^{1,2}, 梁晓龙¹, 张佳强¹, 侯岳奇¹

(1. 陕西省电子信息系统系统集成重点实验室(空军工程大学), 西安 710051;

2. 中国人民解放军 94582 部队, 河南 驻马店 463200)

摘要:为解决多无人机基于航向的合作式短期冲突探测与解脱问题,提出一种局部集中双层优化的合作式方法.首先将既有冲突约束与潜在冲突约束视为同一类型约束,以保证多无人机冲突问题在最大范围内求解,并设计了基于采样的冲突探测方法;通过旋转局部坐标系减少了搜索的可行区域数量,且分析了终点约束与切线约束两种解脱约束条件;然后运用图论的方法对多无人机冲突问题进行冲突关系划分,将由机动导致的无人机额外飞行距离作为解脱代价设计了机动代价函数,为求解所设计的机动代价函数这个非线性优化问题提出了双层优化策略,即先利用随机并行梯度下降法(stochastic parallel gradient descent,SPGD)搜索航向解脱的初始可行解,再运用序列二次规划(sequential quadratic programming,SQP)求得最优解以进行最优的航向解脱.最后运用蒙特卡洛法对算法进行了可靠性评价.结果表明,本方法能够满足在线规划的需要,在解脱开始距离 $D_{\text{avo}} = \tau \times v_i$ ($\tau = 25$ s)的情况下能够实现100%的冲突解脱,该方法能够在保证多无人机冲突解脱安全性的基础上减少机动消耗.

关键词: 无人机;冲突解脱;双层优化;随机并行梯度下降法;序列二次规划;蒙特卡洛法

中图分类号: V249.1, TP29

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)04-0074-10

Cooperative conflict detection and resolution for multiple UAVs using two-layer optimization

FU Qixi^{1,2}, LIANG Xiaolong¹, ZHANG Jiaqiang¹, HOU Yueqi¹

(1. Shaanxi Province Lab of Meta-synthesis for Electronic & Information System (Air Force Engineering University),

Xi'an 710051, China; 2. Unit 94582 of PLA, Zhumadian 463200, Henan, China)

Abstract: Aiming at the problem of cooperative collision detection and resolution of multi-UAVs by heading control, this paper proposes a local centralized two-layer optimization method. First, the practical conflict constraints and the potential conflict constraints are regarded as the same type of constraints to ensure that the multi-UAV conflict problem can be solved in great degree. The method of conflict detection based on sampling is designed, and the number of searching feasible regions is reduced by rotating local coordinate system, and two kinds of constraint conditions, including the terminal point constraint and the tangential constraint, are analyzed. Then, the conflict relation of multi-UAV conflict problem is divided by graph theory, and the additional flight distance caused by maneuver is taken as the cost of resolution to design the maneuver cost function. In order to solve the non-linear optimization problem of the designed maneuvering cost function, a two-layer optimization strategy is proposed. The initial feasible solution is firstly searched by Stochastic Parallel Gradient Descent (SPGD), and then the optimal solution is obtained by using Sequential Quadratic Programming (SQP). Finally, Monte Carlo method is used to evaluate the reliability of the algorithm. The simulation results show that this method can satisfy the need of online planning and can achieve 100% conflict resolution under the condition of conflict start distance $D_{\text{avo}} = \tau \times v_i$ ($\tau = 25$ s). This method can reduce the maneuvering consumption on the basis of ensuring the security of multi-UAV conflict resolution.

Keywords: UAVs; collision detection and resolution; two-layer optimization; SPGD; SQP; Monte Carlo simulation

无人机(unmanned aerial vehicle,UAV)在基础设施监测、货物运输、精准农业和搜索营救等方面得

到了广泛应用^[1].随着应用的不断拓展,无人机在非隔离空域中运行的需求日益增加^[2].无人机在非隔离空域中一旦发生空中相撞事故将酿成灾难性的后果,所以冲突解脱问题成为亟待研究的重点^[3].

无人机的短期冲突解脱在未来的无人机交通管理系统(unmanned aircraft systems traffic management,UTM)中具有重要地位.文献[4]提出了导航函数

收稿日期:2018-08-22

基金项目:国家自然科学基金(61703427,61472443);陕西省自然科学基金基础研究计划(2017JQ6035)

作者简介:付其喜(1994—),男,硕士

通信作者:梁晓龙,afeu_lxl@sina.com

法,既考虑了安全间隔又兼顾了预先规划的航路点,但是会产生过多额外的飞行距离.文献[5-9]提出并完善了一种双向的分布式优化冲突解脱算法.它的基本思想是冲突双方在解脱过程中处于平等的地位,共同负责完成冲突解脱机动.文献[10]提出了一种选择性速度障碍法,在速度障碍法中借鉴了有人机的目视飞行规则.该方法能够实现有人机/无人机空域飞行规则的兼容,但由于在某些空中态势下冲突双方只有一方负责机动,所以容易产生兜圈的情况,造成了额外的解脱机动消耗.文献[11]提出了一种将集中式优化和双向冲突解脱结合的方法.文献[12-13]拓展和改进了改变速度策略解脱模型,在冲突解脱过程中将非线性航迹考虑在内,并可以通过线性方程来完成解脱方案求解.但方法采用集中式优化,无人机通常采用分布式在线冲突探测与解脱.

本文在无人机双向分布式优化的基础上,提出了一种双层优化的合作式分布冲突解脱的方法.首先分析了无人机的冲突解脱模型,提出了一种基于采样的冲突探测算法,然后考虑了无人机的运动约束条件(运动约束包括飞行包线约束、转弯角度约束和角速度约束等)及无人机的机动消耗,针对多无人机冲突解脱提出了一种双层优化的冲突解脱算法与对应求解过程.最后运用蒙特卡洛法验证了运用双层优化算法进行冲突解脱的安全性.仿真结果表明,该方法能够实现多无人机的双向解脱机动和分布式优化,在保证冲突解脱安全性的基础上减少了解脱机动消耗.

1 冲突解脱模型

1.1 无人机几何模型

$D_{si}(p_i, r_i)$, $i \in N$ 为无人机 A_i 在二维空间的保护区,即

$$D_{si}(p_i, r_i) = \{p \mid \|p - x_i, p_y - y_i\| < r_i\}.$$

式中: i 为无人机编号; $p_i = (x_i, y_i)$ 为 A_i 的坐标; N 为无人机的数量; r_i 为 A_i 保护区半径.

本文采用的无人机运动方程为:

$$\begin{aligned} \dot{p}_i(t) &= \begin{cases} v_i(t) \cos \varphi_i(t), \\ v_i(t) \sin \varphi_i(t), \end{cases} \\ \dot{\varphi}_i(t) &= w(t), \\ 0 < \varphi_i(t) &< 2\pi. \end{aligned}$$

式中: $\varphi_i(t)$ 、 $v_i(t)$ 、 $w(t)$ 分别为 A_i 的航向、速度及角速度.假定无人机在解脱过程中速度大小不变,无人机 A_i 的状态为: $(x_i, y_i, \varphi_i, v_i, w_i)$, 其中 $w_{\max}^i \geq w_i(t) \geq -w_{\max}^i$. A_i 在有限的时间前瞻时间 τ (以下简称

前瞻时间 τ) 内以一定的可调整角度 φ_i 调整航向以确保相互之间的安全间隔.可调整角度 φ_i 表示 A_i 在前瞻时间 τ 内航向改变角与位移偏角均为 φ_i .本文通过 Dubins^[14] 曲线得到 A_i 最大可调整角度 $\varphi_{\max}^i(\tau)$, φ_i 满足:

$$\varphi_i \leq \varphi_{\max}^i(\tau), \forall i \in N.$$

1.2 冲突解脱几何关系

本文通过建立局部坐标系来分析无人机的冲突关系,如图1(a)所示,以 A_j 的当前位置为原点建立局部坐标系.则 A_i 在 $t=0$ 时的坐标为

$$P_i(0) = (x_i(0) - x_j(0), y_i(0) - y_j(0)).$$

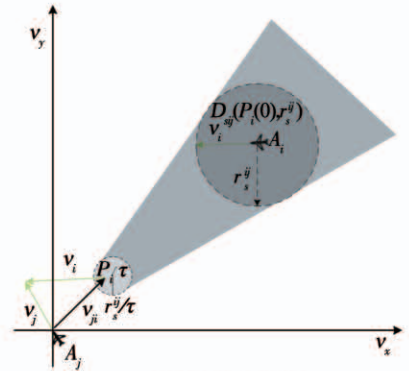
假设 A_i 是静止的,则 A_j 相对于 A_i 的速度为

$$v_{ji}(t) = (\dot{x}_j(t) - \dot{x}_i(t), \dot{y}_j(t) - \dot{y}_i(t)).$$

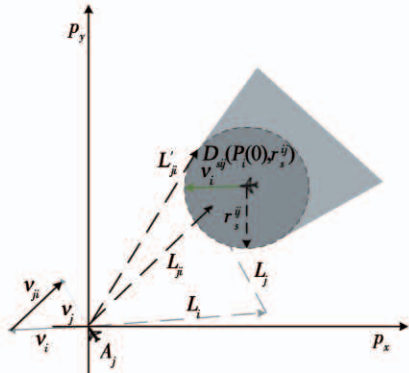
本文采用速度障碍法^[4]描述冲突解脱问题.速度障碍 $VO_{j|i}^t$ 是指在 $[0, \tau]$ 时间段内造成 A_j 与 A_i 冲突的 v_{ji} 的集合,如图1(a)所示. $VO_{j|i}^t$ 定义为

$$VO_{j|i}^t = \{v_{ji} \mid \exists t \in [0, \tau] : tw_{ji} \in D_{ij}(P_i(0), r_s^{ij})\},$$

式中, D_{ij} 为 A_j 与 A_i 的复合保护区,且 $r_s^{ij} = \max(r_i, r_j)$.若 v_{ji} 在 $VO_{j|i}^t$ 内,则 A_j 与 A_i 发生了冲突,否则就没有冲突.因此,冲突解脱就是调整 v_i 与 v_j 使得 v_{ji} 不在 $VO_{j|i}^t$ 内.



(a) 速度障碍示意图



(b) 两机相对位移 L_x 与速度障碍的关系

图1 两机速度障碍示意图

Fig.1 Schematic diagram of the speed obstacle of the two UAVs

为了分析无人机位移之间的关系,本文根据速

度、位移与时间的关系将速度坐标系转换成位移坐标系,如图 1(b)所示。 A_j 与 A_i 在 τ 内的相对位移为 $L_{ji} = L_j - L_i$, 其中 L_j, L_i 分别为 A_j 与 A_i 在 τ 内的位移, L_j, L_i 在线规划过程中视为直线。 L_{ji} 在 A_j 与 A_i 进行解脱机动后改变为 L'_{ji} , 而 L'_{ji} 应位于 D_{ij} 之外。

2 冲突探测

2.1 无人机态势

应用速度障碍模型只能判断一对无人机在前瞻时间 τ 内是否发生冲突。即使两个无人机的当前相对速度 v_{ji} 不在由它们的当前状态所构成的速度障碍 VO_{ji}^* 中, 也有可能由于不当的速度调整使 v_{ji} 进入速度障碍中。由于无人机在一定时间范围内可机动范围有限, 因此不是所有相互临近的无人机都可能在前瞻时间 τ 内发生冲突。因此需要对相互临近的无人机之间的关系进行分析。

图 2 中阴影区域为无人机在 $[0 \sim \tau]$ 时间内的可达区域。临近无人机在 $[0 \sim \tau]$ 时间内存在 3 种态势。图 2(a) 为两机处于安全态势, 在前瞻时间 τ 内不会发生冲突, 图 2(b) 为两机已经有冲突存在, 图 2(c) 为两机在前瞻时间 τ 内若进行不合适的机动就会存在冲突的可能。本文将图 2(b)、图 2(c) 分别定义为既有冲突与潜在冲突。在多无人机的冲突解脱过程中, 若只考虑既有冲突, 则无人机在进行解脱机动时仍会与其他存在潜在冲突的无人机发生冲突, 因此本文将潜在冲突与既有冲突均视为存在冲突危险, 用 cr_{ij} 表示为

$$cr_{ij} = \begin{cases} 1, & A_i \text{ 与 } A_j \text{ 存在既有冲突或潜在冲突;} \\ 0, & \text{其他。} \end{cases}$$

为了避免诱发冲突的出现, 本文将既有冲突约束与潜在冲突约束视为同一类型约束, 这样能够保证多无人机冲突问题在最大范围内求解。

2.2 冲突探测算法

冲突探测算法一般只考虑既有冲突^[15-16], 双层优化算法根据无人机状态, 通过采样进行冲突探测。首先基于位移矢量 L_{ji} 与前瞻时间 τ 在无人机的飞行路径上进行预测采样, 再根据采样值及无人机位置构建空间区域, 最后判断被检测无人机与所构建的空间区域的关系即能进行冲突探测。

二维空间内无人机冲突检测步骤如下。

Step1 根据无人机 A_i 与 A_j 当前的状态以及它们在前瞻时间 τ 内可机动的角度或速度范围采样在 τ 时刻相对位移 L_{ji} 到达的终点散布区域, 如图 3 所示的蓝色散布点。

Step2 根据无人机 A_i 与 A_j 的初始速度和运动

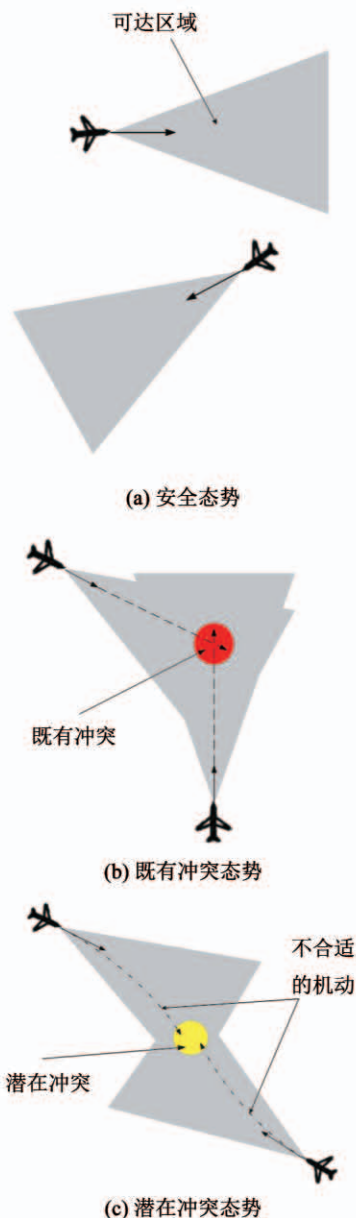


图 2 临近无人机的 3 种态势

Fig. 2 Three situations of adjacent unmanned aerial vehicles

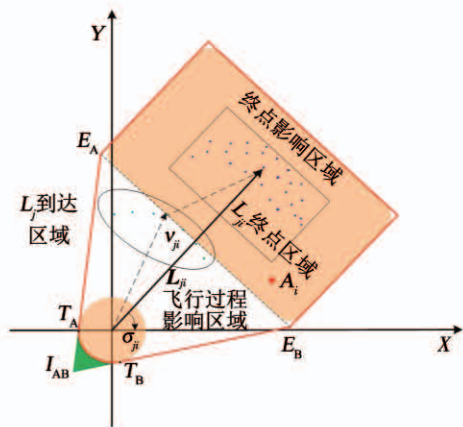


图 3 冲突探测示意

Fig. 3 Schematic diagram of conflict detection

方向获得 A_j 的初始相对速度 v_{ji} . 得到 v_{ji} 与正向 X 坐标轴之间的夹角 σ_{ji} , 将坐标系 XOY 旋转 σ_{ji} . 所有采样点的坐标点在新的坐标系中关于 X 轴对称. 得到采样点集的极值 $x_{\max}, x_{\min}, y_{\max}, y_{\min}$. 根据极值点构建一个包含所有终点的矩形区域, 将其定义为终点区域, 如图3中的黑色矩形框包围的区域.

Step3 综合考虑 A_j 相对位移的终点区域以及无人机之间的安全间隔 r_s^{ij} , 将终点区域向外扩展, 得到形状为圆角矩形的终点影响区域. 为了简化求解将圆角矩形简化为直角矩形区域, 如图3所示. A_j 的安全区域为圆形区域.

Step4 根据冲突的定义, A_j 在 τ 时间段内运动的过程中如果与 A_i 的距离小于 r_s^{ij} , 则说明两个无人机之间存在冲突, 因此从 A_j 的安全区域到终点区域的所有连线都是 A_j 的飞行过程影响区域. 根据终点影响区域与 A_j 的安全区域可以确定 A_j 的飞行过程影响区域, 即由终点影响区域边界点到 A_j 安全区域的切线包裹的凸区域.

Step5 产生各类区域后算法采用分区域的方法检测冲突: 首先检查 A_i 的坐标是否在终点影响区域中, 然后检查 A_i 的位置是否在飞行过程影响区域中. 在检查飞行过程影响区域时首先检查 A_i 的坐标点是否在由终点影响区域边界点 E_A 与 E_B 到安全区域圆的切线的交点 I_{AB} 与 E_A 和 E_B 构成的三角形区域内, 如果在三角形区域中, 需要考虑 A_i 在绿色非威胁区域内的误检测情况.

3 冲突解脱约束条件

3.1 解脱机动的约束条件

如冲突解脱几何关系所述, L'_{ji} 在 $[0 \sim \tau]$ 时间内应位于 D_{ij} 之外, 将其归结为两个约束条件, 即终点约束与切线约束. A_i 与 A_j 在 t 时刻的距离为

$$d_{ij}(t, \varphi_i, \varphi_j) = \|P_i(0) - v_{ji}t\|,$$

则无人机在 τ 的终点约束为

$$d_{ij}(t, \varphi_i, \varphi_j) - r_s^{ij} \geq 0.$$

切线约束为如果两无人机在 $[0 \sim \tau]$ 时间内的最短距离为 $P_i(0)$ 到 L'_{ji} 所在直线的距离 d_{ij}^p , 则 d_{ij}^p 应不小于 r_s^{ij} .

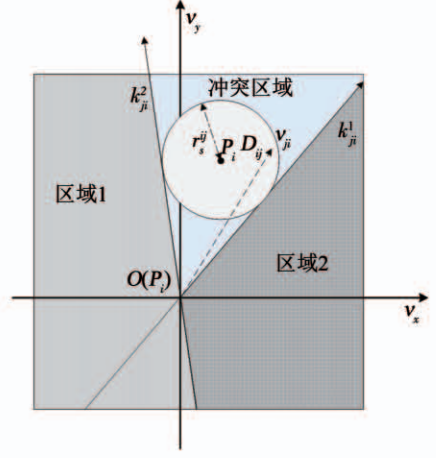
$$d_{ij}^p(\varphi_i, \varphi_j) = |-k_{ji}P_{ix} + P_{iy}| / \sqrt{1 + k_{ji}^2}.$$

式中: k_{ji} 为 L'_{ji} 的斜率; P_{ix}, P_{iy} 为 $P_i(0)$ 的坐标. 其中 k_{ji} 的表达式为

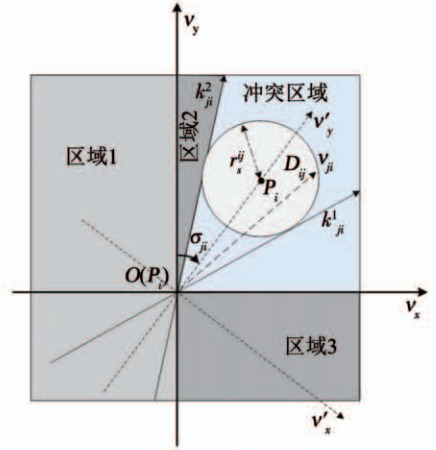
$$k_{ji}(\varphi_j, \varphi_i) = \frac{\sin(\phi_j + \varphi_j)v_j - \sin(\phi_i + \varphi_i)v_i}{\cos(\phi_j + \varphi_j)v_j - \cos(\phi_i + \varphi_i)v_i}.$$

式中: k_{ji} 为周期函数, 其定义域为 $[-\pi/2 + k\pi, \pi/2 + k\pi]$, $k \in \mathbb{Z}$; v_{ji} 的航向范围为 $H_1 = [-\pi/2,$

$\pi/2]$ 和 $H_2 = [\pi/2, 3\pi/2]$, 这是 k_{ji} 的两个不连续的周期. v_{ji} 航向的可行区域如图4所示. 图4(a)表示的是可行区域第1种情况, 两个可行子区域分别位于 k_{ji} 的两个周期内. 图4(b)表示的是可行区域第2种情况. 本文采用旋转局部坐标系的方法将情况1转变为情况2, 如图4(b)所示, 旋转之后 $P'_{ix} = 0$ 且 $P'_{iy} > 0$.



(a) 第1种可行区域



(b) 第2种可行区域

图4 v_{ji} 航向的可行区域

Fig. 4 Feasible region of the heading of v_{ji}

冲突解脱的约束条件中, 终点约束能够保证无人机在解脱过程中进行尽量少的机动, 而切线约束能够保证无人机解脱机动安全性. 考虑到解脱的安全与效率, 不同的态势应该采用不同的约束条件. 本文定义变量 c_v^{ij} 来对约束条件进行选择:

$$c_v^{ij} = \|P_i(0)\|^2 - r_s^{ij2} - (\|S_i\|_2 + \|S_j\|_2)^2,$$

式中 $c_v^{ij} \geq 0$ 为两无人机处于相对较远的距离, 这样就能将 φ_i 与 φ_j 的约束条件总结如下:

$$g(\varphi_i, \varphi_j) \geq r_s^{ij}, g(\varphi_i, \varphi_j) = \begin{cases} d_{ij}(\tau, \varphi_i, \varphi_j), & \text{if } c_v^{ij} \geq 0; \\ d_{ij}^p(\varphi_i, \varphi_j), & \text{otherwise.} \end{cases}$$

人机冲突解脱问题也就被分解为在每个冲突群内搜索可行的解脱方案,因此可以大大降低算法的复杂度.

4.2 SPGD 求解可行区域

产生初始解的随机并行梯度下降算法是一种迭代寻优算法,其流程如图7所示.

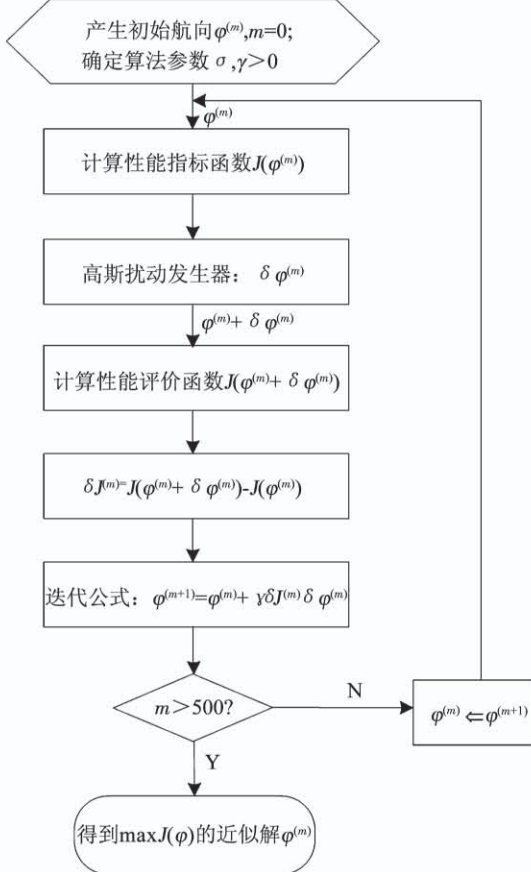


图7 随机并行梯度下降法流程

Fig. 7 Flow chart of SPGD

图中 \$\gamma\$ 为搜索步长,它的取值与迭代次数有关. \$\delta\varphi^{(m)}\$ 服从均值为 0 的高斯分布, \$\sigma\$ 为方差,取值与 \$r_s^{ij}\$ 和 \$g(\varphi_i, \varphi_j)\$ 有关,性能指标 \$J\$ 为

$$J = \frac{1}{2n_c} \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} C_f^{ij},$$

式中, \$C_f^{ij}(\varphi_i, \varphi_j)\$ 为 \$A_i\$ 与 \$A_j\$ 之间关系的归一化函数,即

$$C_f^{ij}(\varphi_i, \varphi_j) = \lambda_0(g(\varphi_i, \varphi_j)) + (1 - \lambda_0(g(\varphi_i, \varphi_j)))g(\varphi_i, \varphi_j)/r_s^{ij}.$$

如果 \$cr_{ij} = 0\$, 则 \$C_f^{ij}(\varphi_i, \varphi_j) = 0\$. \$\lambda_0(x)\$ 为示性函数, 如果 \$x \geq r_s^{ij}\$, 则 \$\lambda_0(x) = 1\$, 否则 \$\lambda_0(x) = 0\$. 根据随机并行梯度下降法, 当且仅当所有无人机都满足解脱条件时性能指标才能取得全局最大值, 能够高效地产生无人机的初始可行解. 如图4所示, 产生初始可行解后就能够得到无人机冲突解脱的可行解区域.

引理1 给定一个由 \$n_1\$ 个无人机构成的冲突簇 (\$n_1 > 2\$), 在局部单调空间中存在能够保证冲突簇中无人机安全间隔可行解区域的前提下, 应用 SPGD 算法求解初始可行解可以保证收敛到该可行区域.

证明 首先假设在当前的搜索区域 \$D_0\$ 内存在保证所有无人机安全间隔的子区域 \$D_0^f\$. 为了不失一般性, 假设冲突簇中有 \$n_1\$ 个无人机. 由于每个一对一冲突的安全约束函数都是局部单调的, 因此可以认为能够保证任意无人机对 \$A_i\$ 与 \$A_j\$ 安全间隔的角度范围 \$D_{i,j}^f\$ 与 \$D_0^f\$ 相连通. 根据 SPGD 算法的迭代规则, 在统计学意义上算法每次迭代时都会向使 \$J\$ 取值增加的方向调整. 由于每个约束函数都是局部单调的, 因此搜索方向会保证 \$J\$ 的取值持续增加.

假设在迭代的过程中, 冲突簇中有一个子集合 \$s_1^1\$ 内数量为 \$n_1^1\$ 的无人机之间相互保持安全间隔, 另一个无人机集合 \$s_1^2\$ 中数量为 \$n_1 - n_1^1\$ 的无人机还没有搜索得到可行解. 因此可以得到以下关系:

$$c_k(\varphi_i, \varphi_j) = 1, i, j \in s_1^1, \text{ and } c_k(\varphi_i, \varphi_j) < 1 \text{ if } i \notin s_1^1 \text{ or } j \notin s_1^1.$$

由于 \$s_1^1\$ 集合中的无人机能够保持安全间隔, 因此迭代的过程中它们的机动对 \$(\varphi_i, \varphi_j)\$ 只要不导致新的冲突都不会影响搜索方向. 而影响搜索飞行的是尚没有找到可行解的冲突对, 根据迭代规则, 搜索算法将搜索能够使尚没有找到可行解的冲突对的函数 \$c_k(\varphi_i, \varphi_j)\$ 取值增加的方向, 循环搜索直到找到可行解.

因此, 在统计意义上, 随机并行梯度下降方法能够找到确保多个无人机安全间隔的初始可行解.

4.3 搜索最优解

本文已经讨论了解脱机动航向的可行解区域的产生, 在此基础上进一步求解机动航向的最优解. 基于航向调整的冲突解脱问题是一个非线性优化问题, 采用序列二次规划来求解最优解. 对于第 \$l\$ 个冲突群, 其优化目标函数为:

$$\min F = \sum_{i=1}^{n_1} f_{\text{addis}}^i(\varphi_j),$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & \varphi_i = \varphi_i(0), v_i = v_i(0), x_i = x_i(0), y_i = y_i(0), \\ & g_{ij}(\varphi_i, \varphi_j) \geq r_s^{ij}, r_s^{ij} = \max(r_i, r_j) \text{ if } cr_{ij} = 1, \\ & -\varphi_{\max}^i(\tau) \geq \varphi_i \geq \varphi_{\max}^i(\tau), i, j \in n_1. \end{aligned}$$

由于每架无人机机动航向的可行区域分为两个子区域, 所以对于 \$n\$ 架无人机, 需要搜索 \$2^n\$ 个子空间. 为保证算法的实时性, 当涉及无人机数量较多时, 将优化目标降低为搜索若干个子空间内的局部最优解.

4.4 算法对比验证分析

为验证 SPGD 算法的有效性, 本文设计了多无人机飞行的冲突场景, 在不同规模下分别利用

SPGD 与遗传算法 (GA) 和典型的非线性优化求解器 (Snopt) 进行 1 000 次冲突解脱解算,并收集了不同数量无人机(2~21)涉及冲突时的算法平均求解时间,将 SPGD 与遗传算法和 Snopt 的平均计算时间进行比较,结果如图 8 所示.

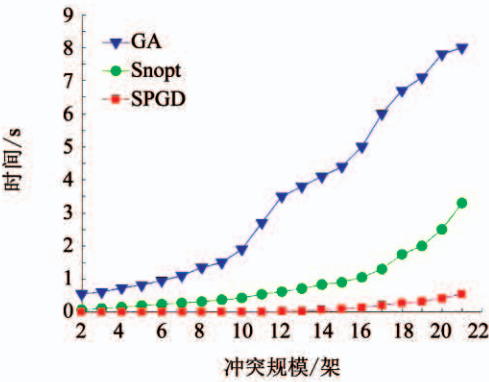


图 8 不同算法对比

Fig. 8 Comparison of Different Algorithms

由图 8 可以看出,SPGD 明显优于 Snopt 和遗传算法,即使当涉及冲突的无人机数量达到 21 时,SPGD 的求解时间也没有超过 0.5 s,能够满足在线求解需要.当涉及冲突的无人机数量小于 14 时,Snopt 的求解时间不超过 1 s,但与 SPGD 相比,明显时间复杂度更高.而遗传算法在求解中明显效率很低,不能满足实时性的要求.

5 仿真分析

本文运用 MATLAB2014 对本文所提方法进行了仿真验证,仿真以小型无人机为例,依据美国颁布的无人机规定 Part107^[19],小型无人机的速度应小于 45 m/s.仿真中最大转弯角速度为 $w_{\max}^i = 5(^{\circ})/s$,预警距离为 $40\text{ s} \times v_i$,且 $\tau = 25\text{ s}, i \in N^{[20]}$.无人机的保护区半径为 $8\text{ s} \times v_i$.

图 9(a) 显示了 8 机相同速度相遇时的情况,共同在 (0 km, 0 km) 处遭遇.无人机的速度为 40 m/s,复合保护区半径为 320 m.图 9(b) 显示了 8 架无人机在解脱过程中任意时刻与它机的最小间隔.仿真结果表明 8 架无人机成功解脱,没有发生冲突,并在解脱完成以后返回到原始路径.

图 10 比较了双层优化法与选择性速度障碍法 (selective velocity obstacle, SVO) 在进行多无人机不同速度解脱中的性能.从图 10 中可以看出, SVO 进行解脱时无人机在某些态势下,只有冲突中的一方负责进行解脱机动,这可能导致无人机出现兜圈的情况.而且某些情况 SVO 会造成无人机进行不可能的机动,比如图 10(b) 中的无人机 A_3 .图 11 对两种方法偏离计划位置的距离进行了比较,在初始阶

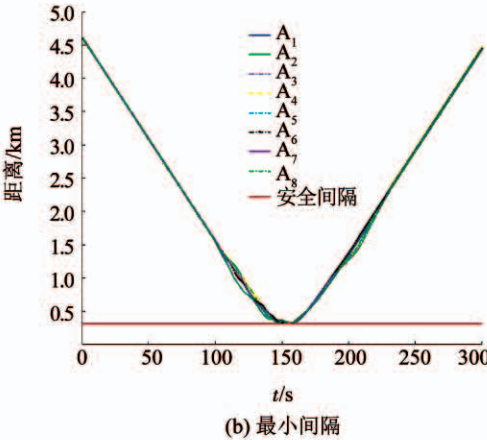
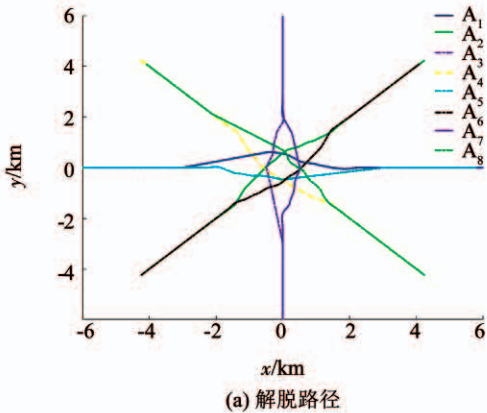


图 9 8 机相同速度

Fig. 9 Eight UAVs with the same speed

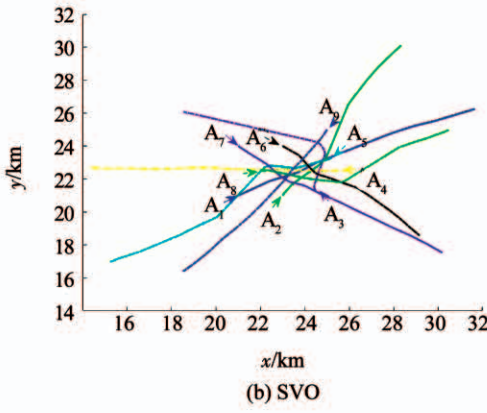
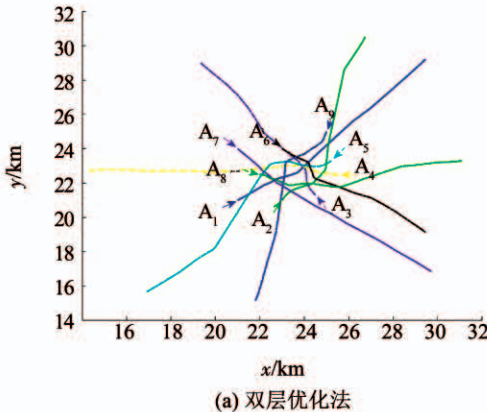


图 10 9 机不同速度

Fig. 10 Nine UAVs with different speeds

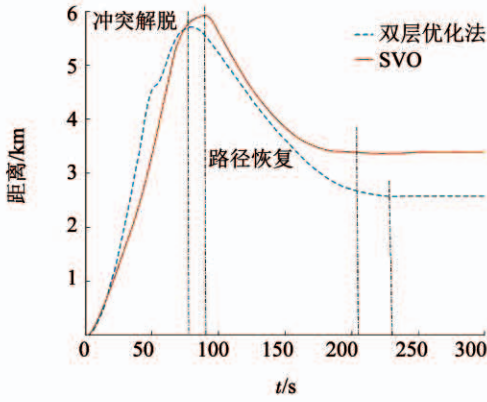


图11 偏离计划位置的距离

Fig. 11 Deviation of the distance from the planned location

段,由于采用双向解脱方案,双层优化法机动更快,能够首先完成解脱机动.解脱完成之后,双层优化法也能够产生更少的额外飞行距离.无人机之间的最小间隔如图12所示,结果表明双层优化法能够保证无人机在冲突解脱时的安全间隔.

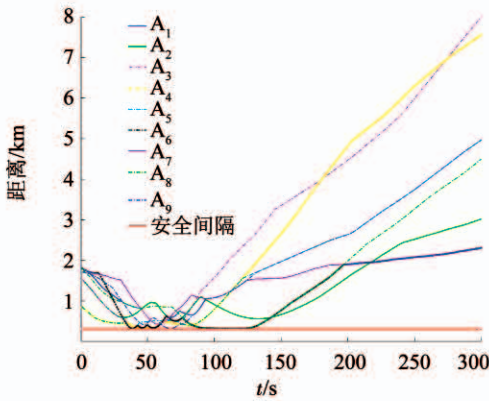


图12 双层优化法无人机之间的最小距离

Fig. 12 Minimum distance between UAVs by two-layer optimization

6 蒙特卡洛法冲突概率分析

在上述仿真分析中,多无人机的冲突全部成功解脱.但是,由于无人机在实际运行过程中环境相当复杂,上述的仿真只是基于位置、速度和航向均固定的冲突态势,不能保证算法的普适性.因此,通过蒙特卡洛法产生大量随机的无人机冲突来得到多无人机的冲突概率.与上述类似,本文依然基于小型无人机来进行仿真.

由于现实中的实验具有高风险、耗费高和耗时长特性,所以本文采用简单、经济、实用的蒙特卡洛法来产生无人机的冲突概率.根据无人机的等效安全水平原则^[21],无人机冲突解脱算法的成功率应为100%.

6.1 蒙特卡洛仿真条件

为了评价本文算法的性能,需要设置一些蒙特卡洛仿真的参数.算法的性能可以通过冲突概率

P_{vio} 来评价.

$$P_{vio} = \frac{N_{vio}}{N_{MC}}$$

式中: N_{vio} 、 N_{MC} 分别为蒙特卡洛仿真过程中的冲突个数和采样个数; P_{vio} 将随着 N_{MC} 波动,但随着 N_{MC} 逐渐增大, P_{vio} 将逐渐趋于一个稳定值.

蒙特卡洛仿真条件如下:

1)为了简化仿真条件,蒙特卡洛仿真中无人机均保持在一个固定的正方形区域 A_{squ} 中飞行,如图13所示.无人机的位置 (x_i, y_i) 随机分布在正方形区域 A_{squ} 中,横纵坐标范围为 $[-4 \text{ km}, 4 \text{ km}]$,无人机的探测半径 A_{det}^i 为 $v_i \times 40 \text{ s}$.

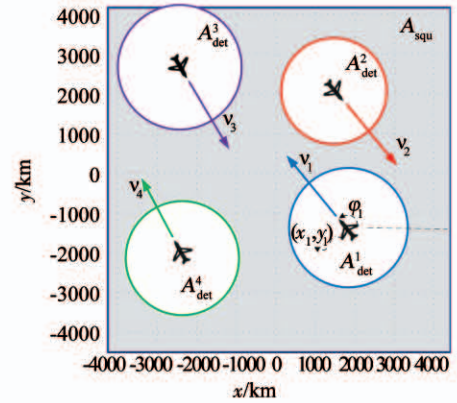


图13 4机随机态势

Fig. 13 Random situation of four UAVs

2)双层优化法中标准无人机解脱开始距离为 $D_{avo} = \tau \times v_i$ ($\tau = 25 \text{ s}$).本文在冲突概率分析中考虑解脱开始距离小于 D_{avo} 的情况,并定义比例系数 ρ_{avo} 为

$$\rho_{avo} = \frac{D'_{avo}}{D_{avo}}$$

式中 D'_{avo} 为仿真中的无人机冲突解脱开始距离.如表1所示,蒙特卡洛仿真采用3种仿真类型:MC1、MC2、MC3. MC1中, $\rho_{avo} \in [0, 0]$,即不使用冲突解脱算法. MC2中, $\rho_{avo} \in [0, 1]$,即所有无人机的解脱开始距离 D'_{avo} 小于标准解脱开始距离 D_{avo} . MC3中, $\rho_{avo} \in [1, 1]$,即所有无人机的解脱开始距离 D'_{avo} 等于标准解脱开始距离 D_{avo} .为了避免无人机的初始间隔对冲突概率的影响,仿真中 $t=0$ 时无人机的间隔均大于 D'_{avo} .

表1 蒙特卡洛仿真参数设置

Tab. 1 Parameter setting of Monte Carlo simulation				
仿真类型	$(x_i, y_i)/\text{km}$	$v_i/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	φ_i/rad	ρ_{avo}/D_{avo}
MC1	$[-4, 4]$	(0, 45)	$(0, 2\pi]$	$[0, 0]$
MC2	$[-4, 4]$	(0, 45)	$(0, 2\pi]$	$[0, 1]$
MC3	$[-4, 4]$	(0, 45)	$(0, 2\pi]$	$[1, 1]$

3) 由于小型无人机的规定速度为小于 45 m/s, 蒙特卡洛仿真中随机产生的无人机初始速度 $v_i \in (0 \text{ m/s}, 45 \text{ m/s})$, 且整个仿真过程中无人机的速度保持不变(见表 1)。

4) 为了产生无人机的所有可能相遇态势(对头相遇、交叉相遇和追及相遇), 仿真产生的无人机初始航向范围为 $(0, 2\pi]$, 且在冲突解脱开始之前航向保持不变(见表 1)。

仿真过程中, 首先在正方形区域 A_{squ} 中产生 N ($N=2, 3, 4, 5$) 架无人机, 并根据仿真类型和表 1 中的参数范围随机产生无人机的位置、速度、航向和比例系数 ρ_{avo} 。若无人机在飞行过程中探测到了冲突存在则无人机运用双层优化法进行冲突解脱, 否则无人机航向保持不变。

6.2 结果分析

蒙特卡洛仿真采样次数为 10^6 次。仿真结果中的 P_{vio} 与采样次数的关系如图 14 所示, 无人机不同数量下的冲突概率如图 15 所示。由图 14、15 中可以看出, MC3 的冲突概率在 2~5 机时的冲突概率均为 0, 符合等效安全水平的要求。MC2 中虽然冲突概率比不使用算法的情况下大幅下降, 但不能够解脱一切冲突, 不满足等效安全水平的要求, 解脱失败的原因在于冲突解脱的距离过短。

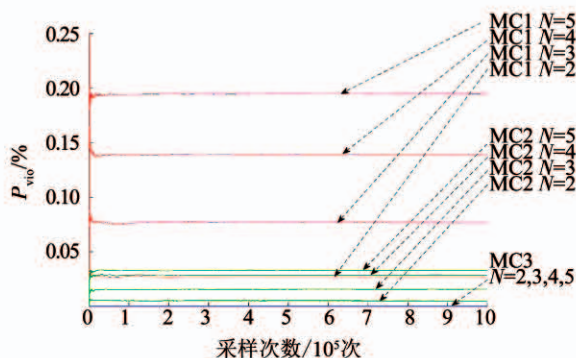


图 14 不同仿真类型的冲突概率

Fig. 14 Collision probability of different simulation types

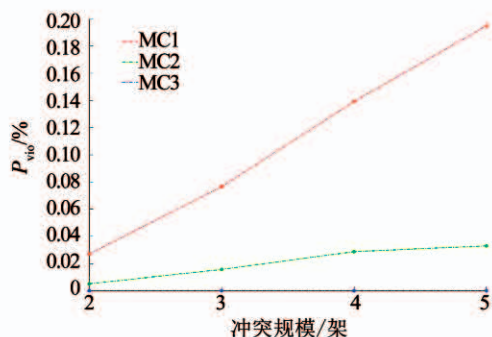


图 15 冲突概率对比

Fig. 15 Comparison of conflict probability

通过分析可以得出, 在标准的冲突解脱开始距

离下双层优化算法的解脱成功率能够达到 100%, 满足无人机等效安全水平的要求。

7 结 论

1) 算法能够解决多无人机的冲突解脱问题, 减少解脱代价, 满足在线规划需要并降低了对空中交通的影响。可满足无人机等效安全水平的要求, 在解脱开始距离 $D_{\text{avo}} = \tau \times v_i$ ($\tau = 25 \text{ s}$) 的情况下能够实现 100% 的冲突解脱。

2) 分析了冲突解脱的几何模型和约束条件, 重点研究了冲突几何的终点约束、切线约束和 k_{ji} 的周期性特点, 并同时考虑了无人机的既有冲突与潜在冲突, 有效避免了诱发冲突, 保证冲突解脱问题在最大范围内求解。

3) 提出了一种双层优化算法, 首先通过随机并行梯度下降法求得冲突群的可行解区域, 再用序列二次规划进行最优解的求解, 能够在保证成功解脱的情况下进行航向机动的优化。通过蒙特卡洛法设置不同的仿真条件比较验证了双层优化算法进行多无人机冲突探测与解脱的安全性。

参考文献

- [1] FLOREANO D, ROBERT J W. Science, technology and the future of small autonomous drones[J]. Nature, 2015, 521(7553): 460. DOI:10.1038/nature14542
- [2] 陈金良, 郭芳月. 基于当前环境的无人驾驶航空器飞行管理设想[J]. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2017, 30(5): 37
CHEN Jinliang, GUO Fangyue. Assumption of UAV flight management based on current environment[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition), 2017, 30(5): 37. DOI:10.13766/j.bhsk.1008-2204.2017.0179
- [3] DALAMAGKIDIS K, VALAVANIS K P, PIEGL L A. On integrating unmanned aircraft systems into the national airspace system: Issues, challenges, operational restrictions, certification, and recommendations[M]. Berlin: Springer, 2012: 22. DOI:10.1007/978-94-007-2479-2
- [4] ROELOFSEN S, MARTINOLI A, GILLET D. Distributed deconfliction algorithm for Unmanned Aerial Vehicles with limited range and field of view sensors[C]//Proceedings of American Control Conference. Chicago, IL: IEEE, 2015, 321: 4356. DOI:10.1109/ACC.2015.7172014
- [5] BERG J V D, GUY S J, LIN Ming, et al. Reciprocal n -body collision avoidance[J]. Springer Tracts in Advanced Robotics, 2011, 70: 3. DOI:10.1007/978-3-642-19457-3_1
- [6] ALEJO D, COBANO J A, HEREDIA G, et al. Optimal reciprocal collision avoidance with mobile and static obstacles for multi-UAV systems[C]//Proceedings of International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Orlando, FL: IEEE, 2014, 3: 1259. DOI:10.1109/ICUAS.2014.6842383
- [7] CONROY P, BAREISS D, BERG J P V D, et al. 3-D reciprocal

- collision avoidance on physical quadrotor helicopters with on-board sensing for relative positioning[J/OL]. Computer Science Robotics (2014-09-14)[2018-06-01]. <https://arxiv.org/abs/1411.3794>
- [8] YANG Jian, YIN Dong, SHEN Lincheng. Reciprocal geometric conflict resolution on unmanned aerial vehicles by heading control [J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2017, 40(10): 2511. DOI:10.2514/1.G002607
- [9] YANG Jian, YIN Dong, CHEN Qiao, et al. Two-layered mechanism of online Unmanned Aerial Vehicles conflict detection and resolution [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 19(10): 3230. DOI:10.1109/TITS.2017.2771465
- [10] JENIE Y I, VAN KAMPEN E-J, DE VISSER C C, et al. Selective velocity obstacle method for de-conflicting maneuvers applied to unmanned aerial vehicles [J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2015, 38(6): 1140. DOI:10.2514/1.G000737
- [11] ALONSO-MORA J, NAEGELI T, SIEGWART R, et al. Collision avoidance for aerial vehicles in multi-agent scenarios [J]. Autonomous Robots, 2015, 39(1): 101. DOI:10.1007/s10514-015-9429-0
- [12] ALONSO-AYUSO A, ESCUDERO L F, MARTIN-CAMPO F J, et al. Collision avoidance in air traffic management: A mixed-integer linear optimization approach [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation System, 2011, 12(1): 45. DOI:10.1109/TITS.2010.2061971
- [13] ALONSO-AYUSO A, ESCUDERO L F, MARTIN-CAMPO F J, et al. A mixed 0-1 nonlinear optimization model and algorithmic approach for the collision avoidance in ATM: Velocity changes through a time horizon [J]. Computers & Operation Research, 2012, 39(12): 3136. DOI:10.1016/j.cor.2012.03.015
- [14] DUBINS L E. On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents [J]. American Journal of Mathematics, 1957, 79(3): 497. DOI:10.2307/2372560
- [15] 韩冬, 张学军, 聂尊礼, 等. 一种基于 SVM 的低空飞行冲突探测算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(3): 576
HAN Dong, ZHANG Xuejun, NIE Zunli, et al. A conflict detection algorithm for low-altitude flights based on SVM [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(3): 576. DOI:10.13700/j.bh.1001-5965.2017.0159
- [16] 刘洋, 向锦武, 罗漳平, 等. 低空自由飞行短期冲突探测算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(9): 1873
LIU Yang, XIANG Jinwu, LUO Zhangping, et al. Short-term conflict detection algorithm for free flight in low-altitude airspace [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(9): 1873. DOI:10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0687
- [17] 梁晓龙, 张佳强, 祝捷, 等. 基于 CPS 的空中交通系统架构及能力涌现方法 [J]. 空军工程大学学报 (自然科学版), 2016, 17(1): 1
LIANG Xiaolong, ZHANG Jiaqiang, ZHU Jie, et al. Air traffic control system architecture and ability emergence method based on Cyber-Physical System [J]. Journal of Air Force Engineering Universit (Natural Science Edition), 2016, 17(1): 1. DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2016.01.001
- [18] 靳冬欢. 基于随机并行梯度下降算法的波前校正技术研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2006: 30
JIN Donghuan. Research on wave-front correction technique based on stochastic parallel gradient descent algorithm [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006: 30
- [19] Federal Aviation Administration (FAA). Summary of small unmanned aircraft rule (part 107): AC No: 107-2[S]. America: Federal Aviation Administration (FAA), 2016: 5-1-5-14
- [20] BARELD F. Autonomous collision avoidance: The technical requirements [C]//Proceedings of the National Aerospace and Electronics Conference. Dayton, OH: IEEE, 2000: 808. DOI:10.1109/NAECON.2000.894998
- [21] 尹树悦, 王少飞, 陈超. 无人机安全性指标要求确定方法研究 [J]. 现代防御技术, 2015, 43(2): 154
YIN Shuyue, WANG Shaofei, CHEN Chao. Research on method for determination of UAV safety index requirements [J]. Modern Defense Technology, 2015, 43(2): 154. DOI:10.3969/j.issn.1009-086x.2015.02.025

(编辑 张 红)