

基于协同进化的复杂低空下多飞行器协同航迹规划方法

管祥民 吕人力

(中国民航管理干部学院通用航空系,北京,100102)

摘要:由于低空空域环境复杂,威胁通用航空器运行安全。复杂低空多飞行器航迹规划方法是保障安全、提高效率的关键技术。在特定空域范围内,依据地形特点、环境威胁以及飞行器自身物理条件等约束和安全效率等性能指标,为飞行器规划出最优航迹。然而,多飞行器的航迹规划问题存在多约束、强耦合、多目标等难点,现有方法缺乏对问题先验知识的挖掘和利用,导致难以兼顾安全与效率。针对多飞行器航迹规划问题,建立了多飞行器航迹优化多目标模型。为了进一步提升优化效率,基于启发式算子的自适应差分多目标进化算法,引入多种群协同进化,每个飞行器通过不同种群独立进化,建立合作机制提升种群进化质量,避免陷入极值。最后通过二维与三维仿真实验验证了算法的可行性和有效性。

关键词:复杂低空;多飞行器;多目标;进化算法;路径规划

中图分类号: TP202.7

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2017)S-0089-07

Complex Low-Altitude Airspace Multi-aircraft Cooperation Path Planning Method Based on Cooperative Coevolutionary

GUAN Xiangmin, LÜ Renli

(General Aviation Department, Civil Aviation Management Institute of China, Beijing, 100102, China)

Abstract: The situation under low-altitude airspace is much more complex and dangerous, and especially it is difficult to keep safety of aircraft when many aircraft are in a limited airspace. Therefore, it is necessary and important to develop path planning methods under low-altitude airspace which is the key technology to keep aircraft safety. Path planning for aircraft under the low-altitude airspace is to optimize the paths for aircraft with consideration of avoiding the obstacles and satisfying the physical constraints of aircraft. However, it is difficult to solve the characteristics such as multi-objective, many constraints and tightly coupled. Path planning for multi-aircraft under the low-altitude airspace is researched. An adaptive multi-objective evolutionary algorithm with heuristics operator and adaptive differential evolution multi-objective algorithm is proposed. The model of collision avoidance for aircraft is established firstly. Then, the cooperative coevolution is introduced to the proposed method. Each aircraft optimizes its path by using the multi-objective optimization algorithm, and avoids collision through cooperation among different aircraft. The experimental results show the proposed method is effective and can obtain optimal paths for aircraft in real time.

Key words: low altitude airspace; multi aircraft; multi-objective; evolutionary algorithm; route planning

基金项目:国家自然科学基金民航联合基金(U1533119)资助项目。

收稿日期: 2017-05-15; **修订日期:** 2017-06-20

通信作者: 管祥民,男,博士,讲师, E-mail: guanxiangmin@camic.cn。

引用格式: 管祥民,吕人力. 基于协同进化的复杂低空下多飞行器协同航迹规划方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2017,49(S):89-95. GUAN Xiangmin, LÜ Renli. Complex low-altitude airspace multi-aircraft cooperation path planning method based on cooperative coevolutionary[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017,49(S):89-95.

随着中国低空空域的开放,通用航空飞行已经在许多领域得以应用。尤其航空应急救援作为最快速有效手段,是当今世界许多国家重点发展方向。然而,由于低空飞行环境复杂、危险多样,单纯依靠飞行员驾驶完成复杂的飞行任务,事故率超过运输航班的10倍以上。如何保障复杂低空多飞行器安全有效飞行是国内外航空领域面临的关键难题^[1]。

复杂低空多飞行器航迹规划是指在特定的空域环境和时间要求下,根据飞行器动力学约束,以经济安全为主要目标,为飞行器规划最优轨迹。多飞行器航迹规划是保障低空安全飞行的关键技术,核心是航迹规划算法设计,成为国际航空领域研究的热点,许多专家学者针对航迹规划进行了深入细致的研究。

20世纪80年代初期,主要依靠飞行员规划航迹。随着飞行任务日益复杂,为了保障安全,美国开展自动航迹规划技术研究。NASA的Ames research center致力于研究高效且稳健的障碍区域导航算法,在已知/未知障碍区域快速规划出飞行器的可行航迹。并且针对黑鹰直升机,开展实时航迹规划系统研究^[2]。目的是研发直升机避开威胁和障碍的贴地(Nap-of-the-earth)飞行的导航算法。针对航迹优化问题,国内学者也开展了大量研究,主要采用A*搜索法、进化算法等优化飞行航迹^[3-7]。在问题建模与方法设计方面,与国际的研究水平尚有一定的距离^[8-20]。

针对多飞行器航迹规划多约束、强耦合、多目标的难题,以安全、高效为优化目标,建立多飞行器航迹优化多目标模型。基于启发式算子的自适应差分多目标进化算法,引入多种群协同进化,每个飞行器通过不同种群独立进化,建立合作机制提升种群进化质量,避免陷入极值。最后通过二维与三维仿真实验验证算法的可行性和有效性。

1 算法设计

1.1 航迹优化模型的建立

复杂低空多飞行器运行,每架飞行器不仅要满足规避地形障碍约束、最大俯仰角约束、最大偏转角约束、最小航程约束,还需满足多飞行器之间保持安全间距,避免碰撞风险的发生。

1.1.1 地形障碍模型

数学模型定义为

$$\text{terrain}(x_i, y_i) =$$

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{mount}}} T_i * \exp \left[- \left(\frac{x - x_{mi}}{x_{\text{gradi}}} \right)^2 - \left(\frac{y - y_{mi}}{y_{\text{gradi}}} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中: $T(x, y)$ 为对应水平面坐标为 (x, y) 点的山峰地形高度; T_i 表示第 i 座山体轮廓; (x_{mi}, y_{mi}) 为第 i 座山峰的坐标; x_{gradi} 和 y_{gradi} 为第 i 座山峰在 x 方向和 y 方向的地形轮廓参数,其值越大,山峰在该方向越陡峭。通过改变以上参数的取值可模拟不同数量和高度的山峰地形。

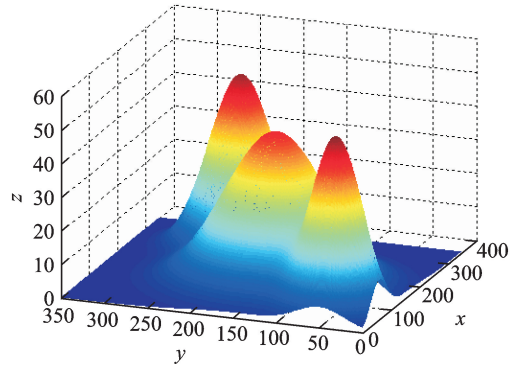


图1 地势模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the terrain model

地形障碍约束为

$$c_{\text{terrain}} = \sum_{i=0}^N c_{\text{ter}_i} \quad (2)$$

$$c_{\text{ter}_i} = \begin{cases} 1 & z_i \leq \text{terrain}(x_i, y_i) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\text{terrain}(x_i, y_i)$ 为返回点 (x_i, y_i) 处的地势高度函数。

1.1.2 最大偏转角约束模型

最大偏转角约束考虑到飞行器航向是通过调整方向舵和副翼舵角度来实现,由于飞行器自身的物理性能限制与惯性作用,改变航向的角度大小不能超过飞行器允许的最大偏转角,即转弯角限制在小于或者等于预先确定的最大偏航角范围。最大偏转角 turn_θ 如图所示。

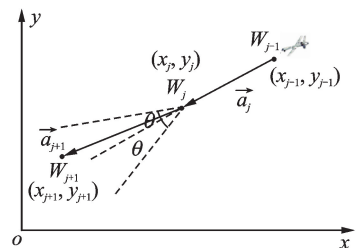


图2 飞行器最大偏转角示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the maximum deflection angle of the aircraft

航迹的偏转角约束为

$$c_{\text{turn}} = \sum_{j=1}^{N-1} c_{\text{t}_j} \quad (4)$$

$$c_{\text{t}_j} = \begin{cases} 0 & \cos(\text{turn}_\theta) - \frac{\mathbf{a}_j^T \mathbf{a}_{j+1}}{|\mathbf{a}_j| |\mathbf{a}_{j+1}|} < 0 \\ \cos(\text{turn}_\theta) - \frac{\mathbf{a}_j^T \mathbf{a}_{j+1}}{|\mathbf{a}_j| |\mathbf{a}_{j+1}|} & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中: \mathbf{a}_j 代表第 j 段路径段的向量; $\mathbf{a}_j = (x_{j+1} - x_j, y_{j+1} - y_j, z_j)$ 和 $(x_{j+1}, y_{j+1}, z_{j+1})$ 分别表示第 j 个航迹节点和第 $j+1$ 个航迹节点。

1.1.3 最大俯仰角约束模型

β 表示最大爬升角/俯冲角,见图3。

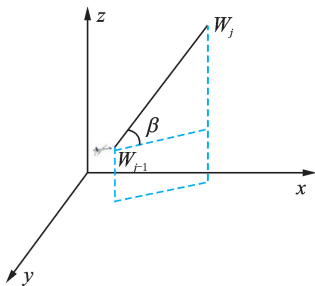


图3 最大俯仰角示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the maximum pitch angle

航迹的俯仰角约束为

$$c_{\text{pitch}} = \sum_{j=1}^{N-1} c_{\text{p}_j} \quad (6)$$

$$c_{\text{p}_j} =$$

$$\begin{cases} \left(\beta - \arctan \left[\frac{|z_{j+1} - z_j|}{\sqrt{(x_{j+1} - x_j)^2 + (y_{j+1} - y_j)^2}} \right] \right) < 0 \\ \beta - \arctan \left[\frac{|z_{j+1} - z_j|}{\sqrt{(x_{j+1} - x_j)^2 + (y_{j+1} - y_j)^2}} \right] & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中: (x_j, y_j, z_j) 和 $(x_{j+1}, y_{j+1}, z_{j+1})$ 分别表示第 j 个航迹节点和第 $j+1$ 个航迹节点。

1.1.4 最大航迹长度约束模型

由于燃料供给存在限制,飞行器的航迹长度有限。最大航迹约束值表示为

$$c_{\text{dis}} = \begin{cases} 0 & \text{Max}L - \sum_{i=1}^{N-1} l_i \geq 0 \\ 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

1.1.5 安全间隔约束

飞行器A航迹 a 与其他飞行器航迹的违反安全间隔,可表示为

$$C_{\text{co}} = \sum_{B=1}^M \sum_{i=0}^{N_{\text{tab}}+1} c_i \quad (9)$$

$\forall A \neq B$

$$c_i = \begin{cases} 1 - \frac{d_i^{ab}}{d_{\text{min}}} & d_i^{ab} < d_{\text{min}} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

$$d_i^{ab} = \sqrt{(x_{ai} - x_{bi})^2 + (y_{ai} - y_{bi})^2 + (z_{ai} - z_{bi})^2} \quad (11)$$

式中: b 为飞行器B的种群的代表航迹个体; d_i^{ab} 为遍历航迹 a 与航迹 b 对应采样测试点 $\{x_{ai}, y_{ai}, z_{ai}\}$ 与 $\{x_{bi}, y_{bi}, z_{bi}\}$ 的空间距离。

1.1.6 最小化潜在威胁目标模型

复杂低空空域环境尽力避开潜在威胁目标。采用各个航迹段的威胁指数之和来表示整个航迹的威胁指数。因此,航迹最小风险目标值为

$$f_{\text{risk}} = \sum_{j=1}^{N-1} \text{risk}(\text{seg}_j) \quad (12)$$

式中: $N-1$ 表示航迹段的数目; $\text{risk}(\text{seg}_j)$ 表示第 j 段航迹的威胁指数。它的方法是通过选取航迹段中的某几个点,计算其受到威胁,然后求和,代替整个航迹段受到的威胁。

1.1.7 最短化航迹长度目标

航迹长度短意味着所需要的时间短、油耗少。最小飞行距离 l_{min} 表示为

$$f_{\text{lenr}} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2}}{l_{\text{min}}} \quad (13)$$

$$l_{\text{min}} =$$

$$\sqrt{(x_{\text{end}} - x_{\text{start}})^2 + (y_{\text{end}} - y_{\text{start}})^2 + (z_{\text{end}} - z_{\text{start}})^2} \quad (14)$$

式中: l_{min} 为起点到终点的直线距离; $(x_{\text{start}}, y_{\text{start}}, z_{\text{start}})$ 和 $(x_{\text{end}}, y_{\text{end}}, z_{\text{end}})$ 分别为起始点和目标点坐标。

1.2 基于协同自适应差分多目标进化算法

基于自适应差分多目标进化算法,引入协同进化思想,将高维复杂问题进行分解,每个飞行器根据自身相关约束条件、目标等自主优化飞行航迹,通过飞行器间协作,获取整体最优方案。基于协同自适应差分多目标进化算法的多飞行器航迹规划算法的流程如图4所示。

2002年,Deb等人对其多目标遗传算法NSGA进行了改进,从而提出了NSGA-II。它是迄今为止最优秀的进化多目标优化算法之一。

NSGA-II不同于之前提出的多目标遗传算法,该算法中并没有采用外部档案,而是在进化的每一代,首先对整个种群进行遗传操作,得到新的种群后将两个种群合并,再进行非支配排序和拥挤度距离排序,再从排序后的合并种群中选取新的种

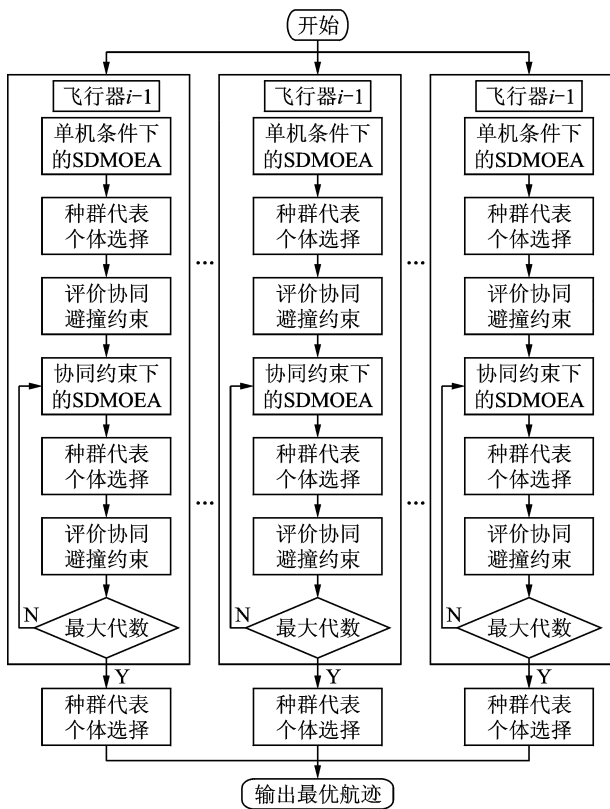


图4 基于协同差分多目标进化算法的多飞行器航迹规划流程图

Fig. 4 Flow chart of multi-aircraft path planning based on cooperative differential multi-objective evolutionary algorithm

群进入下一代循环。NSGA-II 具有以下优点:

(1)新的基于分级的快速非支配解排序方法将计算复杂度由 $O(mN^3)$ 降到 $O(mN^2)$, 其中 m 表示目标函数的数目、 N 表示种群中个体的数目。

(2)为了标定快速非支配排序后同级中不同元素的适应度值,同时使当前 Pareto 前沿面中的个体能够扩展到整个 Pareto 前沿面,并尽可能地均匀遍布,该算法提出了拥挤距离的概念,采用拥挤距离比较算子代替 NSGA 中的适值度共享方法,拥挤距离的时间复杂度为 $O(m(2N)\log(2N))$ 。

(3)引入了精英保留机制,经选择后参加繁殖的个体所产生的后代与其父代个体共同竞争来产生下一代种群,因此有利于保持优良的个体,提高种群整体进化水平。

不同于 NSGA-II,其中关键步骤为多种群合作评估机制与合作个体选取机制,下面进行重点介绍。

①合作评估机制

合作评估算法流程如下。

S1:对每架飞行器对应的种群,计算其所有与自身相关约束与目标值,完成种群排序。

S2:在各种群非支配层中,选定种群最佳航迹方案,并发送给其他飞行器种群,同时接收其他飞行器种群的最佳航迹信息。

S3:协同计算出所有飞行器的碰撞违反值。

S4:每架飞行器种群快速自适应更新非支配排序和改进的聚集距离。

②合作个体选取机制

对于同一个染色体个体,如果合作者不一样,得到的适应度也不一样。假若其他子群体中所有的个体都选作合作者,复杂度高,计算量巨大。而如果随机选取合作者,又存在着子种群个体计算得到的适应度偶然性大,无法获得较优方案。本文提出子种群代表选取机制为合作个体选取机制。

下面以一个飞行器种群为例,介绍种群代表个体选择的流程。

S1:选择出种群中所有非支配层的个体,形成待选集合。

S2:在待选集合中,寻找安全飞行目标 $f_{risk} = 0$ 的个体,如果 $f_{risk} = 0$ 的个体有多个,则转至 S3;如果没有 $f_{risk} = 0$ 的个体,即所有个体 $f_{risk} > 0$,则进入 S4;如果 $f_{risk} = 0$ 的个体只有一个,则该个体作为代表个体,并结束代表个体选择操作。

S3:对所有 $f_{risk} = 0$ 的个体进行航迹长度 f_{lenr} 的比较,找到将待选集合中具有最小航迹长度 $\min(f_{lenr})$ 的个体作为代表个体,并结束代表个体选择操作。

S4:所有 $f_{risk} > 0$ 的个体进行 f_{risk} 的大小比较,找到待选集合中的最低威胁指数 $\min(f_{risk})$ 。

S5:以 $\min(f_{risk})$ 对所有 $f_{risk} > 0$ 个体的 f_{risk} 进行归一化处理,如个体 i 对应相对威胁指数为 $Re f_{riski} = \frac{f_{riski}}{\min(f_{risk})}$ 。

S6:摒弃 $Re f_{riski} \geq V$ 的解,其中 V 为设定的相对安全阈值。

S7:在待选集合保留的个体中进行航迹长度 f_{lenr} 的比较,将待选集合中具有最小航迹长度 $\min(f_{lenr})$ 的个体作为代表个体,并结束代表个体选择操作。

最终选出一个潜在威胁指数较低并且合理大小路径长度 PLR 的解。此外,种群代表个体选择算子除了用于飞行器航迹协同约束评价外,还当跑完最大代数后得到了非支配 pareto 解集,也可以使用本算子从非支配 pareto 解集中挑选出最终解,作为飞行器的最终选择航迹。

2 仿真环境

实验中对于飞行器的物理约束条件规定如下:

最大偏转角 turn_θ 和最大俯仰角 β 都分别为 30° 。最小航迹段长度 Minseg 为 1 km;最大航程 maxL 为起始点到目标点距离直线距离的 1.5 倍。

实验中种群大小 popsize 设置为 50,飞行器速度 V 为定值。分别在二维复杂飞行场景和三维复杂飞行场景下展开实验。

3 仿真结果与分析

3.1 二维复杂场景仿真验证

多机二维复杂飞行场景目的是测试对存在多个障碍物和禁飞区的二维空间中多架飞行器规划优化路径的效率。在二维场景中设置一个禁飞区和 4 个潜在威胁区域,环境参数与飞行器起始位置信息的设置如表 1 所示。

表 1 二维场景环境参数设置

Tab. 1 Two-dimensional scene environment parameter settings

Type	Ranges/km	
Map	x	y
	$x'_{\text{map}} = 0, x''_{\text{map}} = 60$	$y'_{\text{map}} = -20, y''_{\text{map}} = 150$
PFZ	x	y
	$x^1_{\text{PFZ1}} = 50, x^2_{\text{PFZ1}} = 50, x^3_{\text{PFZ1}} = 55, x^4_{\text{PFZ1}} = 55$	$y^1_{\text{PFZ1}} = 60, y^2_{\text{PFZ1}} = 40, y^3_{\text{PFZ1}} = 130, y^4_{\text{PFZ1}} = 115$
Risk	center	radius
	Risk1 (40,60)	8
Risk	Risk2 (45,60)	10
	Risk3 (70,60)	7
	Risk4 (75,75)	6
	Risk5 (62,52)	2

图 5 是该二维场景的实验仿真图,矩形代表禁止飞行区域 PFZ,虚线圆形代表潜在威胁区域,飞

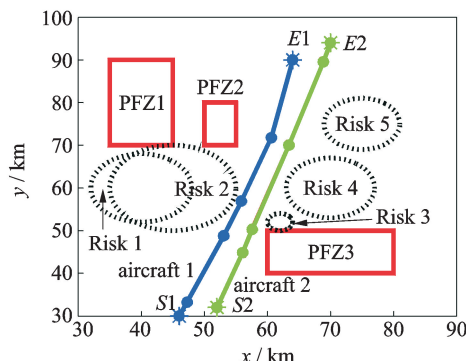


图 5 使用自适应多目标协同优化的双机路径规划仿真

Fig. 5 Two-aircraft path planning simulation using adaptive multi-objective co-optimization

飞行器 1 和飞行器 2 需要分别由不同的起点飞向各自终点, $S1E1$ 航迹和 $S2E2$ 航迹分别代表它们各自的航迹。显然,基于自适应差分进化算法能为两架飞行器找到规避禁飞区、逃离危险区域并且满足航迹间避撞约束的航迹。

3.2 三维复杂飞行场景下多机航迹规划

在对多飞行器航迹规划二维空间完成实验验证的基础上,将多飞行器航迹规划推广到三维复杂低空。三维复杂低空环境加大了解的搜索空间,对航迹规划算法性能要求更高。三维复杂低空下航迹规划的场景参数设置包括地势威胁、其他环境约束的参数设置及多机起始点位置的设置,具体如表 2,3 所示。

表 2 地形山峰模拟参考数值

Tab. 2 Topographic peak simulation reference value

	T_i	x_{mi}	y_{mi}	x_{gradi}	y_{gradi}
$i=1$	20	10	15	10	10
$i=2$	30	10	55	6.5	7
$i=3$	30	30	50	8	6
$i=4$	20	30	10	9	8
$i=5$	25	45	50	4.7	3.7
$i=6$	20	55	45	6	8

表 3 三维场景环境参数设置

Tab. 3 3D scene environment parameter settings

Type	Ranges/km	
Map	x	y
	$x'_{\text{map}} = 0, x''_{\text{map}} = 60$	$y'_{\text{map}} = -20, y''_{\text{map}} = 150$
PFZ	x	y
	$x^1_{\text{PFZ1}} = 20, x^2_{\text{PFZ1}} = 20, x^3_{\text{PFZ1}} = 30, x^4_{\text{PFZ1}} = 30$	$y^1_{\text{PFZ1}} = 10, y^2_{\text{PFZ1}} = 15, y^3_{\text{PFZ1}} = 15, y^4_{\text{PFZ1}} = 10$
PFZ2	x	y
	$x^1_{\text{PFZ2}} = 60, x^2_{\text{PFZ2}} = 60, x^3_{\text{PFZ2}} = 65, x^4_{\text{PFZ2}} = 65$	$y^1_{\text{PFZ2}} = 25, y^2_{\text{PFZ2}} = 25, y^3_{\text{PFZ2}} = 30, y^4_{\text{PFZ2}} = 30$
Risk	center	radius
	Risk1 (20,50)	5
Risk	Risk2 (30,30)	6
	Risk3 (31,50)	5
	Risk4 (45,45)	6

图 6,7 分别为三维复杂低空多机航迹规划的三视图和俯视图。实验结果表明,基于协同自适应差分算法的航迹规划算法能够在保障飞行器航迹间避撞的前提下,寻找经济和最小风险的路径。

4 结束语

针对复杂低空下多飞行器协同飞行情况,在满足单架飞行器航迹环境和动力学约束的基础上,建立了多航迹优化数学模型。通过问题特点的分析,

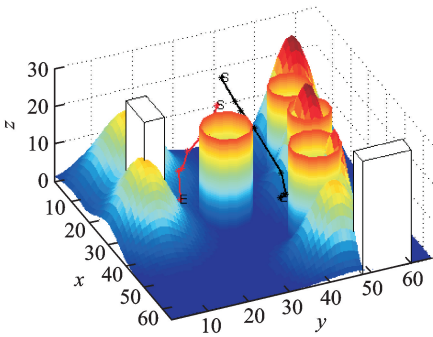


图6 三维复杂飞行场景下多机航迹规划三视图

Fig. 6 Three-dimensional complex flight scenarios under the multi-aircraft track planning three views

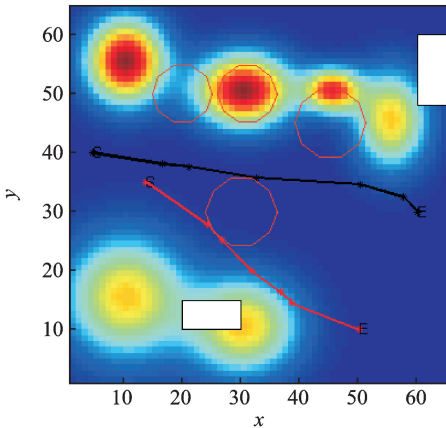


图7 三维复杂飞行场景下多机航迹规划俯视图

Fig. 7 Three-dimensional complex flight scenarios under the multi-aircraft track planning plan view

基于协同自适应差分多目标进化算法,提出了协同多飞行器航迹规划算法,即基于自适应差分多目标进化算法的协同航迹规划算法。该算法有如下特点:(1)采用协同进化的方法,将各架飞行器分别由不同的种群各自独立进化;(2)采用种群代表个体选择机制,挑选各种群中最优个体作为其余种群的合作者;(3)种群个体评估分两次,先评估自身相关约束和目标,然后评估碰撞违反情况。最后通过二维和三维实验仿真,验证了算法的可行性和有效性。

参考文献:

[1] HASIRCI O G L U I, TOPCU O G L U H R, Ermis M. 3-d path planning for the navigation of unmanned aerial vehicles by using evolutionary algorithms[C]// Proc Genet Evol Comput Conf. 2008: 1499-1506.

[2] PEHLIVANO G L U Y V, BAYSAL O, HACIO G L U A. Vibrational genetic algorithm based path planner for autonomous UAV in spatial data based environ-

ments[C]// Proc 3rd Int Conf Recent Adv Space Technol. 2007: 573-578.

- [3] 李春华,郑昌文,周成平,等.一种三维航迹快速搜索方法[J].宇航学报.2002,23(3):13-17.
- LI Chunhua, ZHENG Changwen, ZHOU Chengping, et al. A fast search method for three-dimensional trajectory [J]. Journal of Astronautics, 2002, 23 (3): 13-17.
- [4] 严平,丁明跃,周成平.航迹规划的一种路线图方法[J].计算机工程与应用,2004(17):218-221.
- YAN Ping, DING Mingyue, ZHOU Chengping. A real-time route planner based on roadmap[J]. Journal of Computer Applications and Applications, 2004 (17): 218-221.
- [5] 马云红,周德云.基于遗传算法的无人机航路规划[J].光电与控制,2005(5):28-31.
- MA Yunhong, ZHOU Deyun. A genetic algorithm for path planning of UAV[J]. Journal of Optoelectronics and Control, 2005(5): 28-31.
- [6] 郑昌文.无人机航路规划方法研究[D].武汉:华中科技大学,2003.
- ZHENG Changwen. Unmanned aerial vehicle route planning method research [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2003.
- [7] Holland.从混沌到有序[M].陈禹译.上海:上海科学出版社,2001.
- [8] NIKOLOS I K, TSOURVELOUDIS N C, VALAVANIS K P. Evolutionary algorithm based path planning for multiple UAV cooperation [C]// Advances in Unmanned Aerial Vehicles. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2007: 309-340.
- [9] NIKOLOS I K, TSOURVELOUDIS N C. Path planning for cooperating unmanned vehicles over 3-d terrain[J]. Inf Control Autom Robot, 2009, 24: 153-168.
- [10] QU Y, PAN Q, YAN J. Flight path planning of UAV based on heuristically search and genetic algorithms [C]// Industrial Electronics Society, 2005. [S. l.]: IEEE, 2005.
- [11] SHASHI M, DEB K. Three-dimensional offline path planning for UAVs using multi-objective evolutionary algorithms[C]// Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation (CEC-2007). [S. l.]: Singapore, 2007.
- [12] MAO Z, FERON E, BILIMORIA K. Stability and performance of intersecting aircraft flows under decentralized conflict avoidance rules[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2001,

- 2:101-109.
- [13] TRELEAVEN K, MAO Z H. Conflict resolution and traf-fic complexity of multiple intersecting flows of air-craft [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2008, 9:633-643.
- [14] ALLIOT J M, GRUBER H, JOLY G, et al. Genetic algo-rithms for solving air traffic control conflicts[C] //The Ninth Conference on Artificial Intelligence for Applications. 1993.
- [15] DURAND N, ALLIOT J M, NOAILLES J. Auto-matic aircraft conflict resolution using genetic algo-rithms[C]// Proceedings of the Symposium on Applied Computing. Philadelphia: ACM, 1996.
- [16] MONDOLONI S, CONWAY S. An airborne conflict resolution approach using a genetic algorithm [R]. NASA-AIAA-2001-4054, 2001.
- [17] VIVONA R, KARR D, ROSCOE D. Pattern based ge-netic algorithm for airborne conflict resolution [R]. AIAA 2006-6060, 2006.
- [18] FRAZZOLI E, MAO Z, OH J H, et al. Resolution of conflicts involving many aircraft via semi-definite programming[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1999, 24:79-86.
- [19] HART P, NILSSON N, RAPHAEL B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths[J]. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, 1968, 2: 100-107.
- [20] SISLAK D, VOLF P, PECHOUCEK M, et al. Au-tomated conflict resolution utilizing probabilitycollec-tives optimizer[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part C: Applications and Re-views, 2011, 41:365-375.