

基于分级规划策略的 A^* 算法多航迹规划

李泉扬, 周德云, 冯 琦

(西北工业大学电子信息学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 为了避免设置运行参数, 稳定地生成多条航迹, 提出一种基于分级规划策略的 A^* 算法多航迹规划技术。采用分级规划策略将规划过程分成初始航迹规划和精细航迹规划两部分。在初始航迹规划中, 通过设置中间航迹点并利用 A^* 算法得到多条初始可行航迹, 然后为了避免 K 均值算法对初始聚类中心敏感的问题, 提出采用层次聚类法对所得到的初始可行航迹进行聚类, 得到初始参考航迹。在精细航迹规划中, 设计了一种变宽度的航迹规划通道, 并在通道内进行航迹规划以得到最终的多条航迹。仿真实验证明了算法的可行性。

关键词: 多航迹规划; A^* 算法; 层次聚类; 分级规划

中图分类号: TP 249

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2015.02.14

Multiple routes planning for A^* algorithm based on hierarchical planning

LI Xiao-yang, ZHOU De-yun, FENG Qi

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to avoid setting operating parameters and generate multiple routes steadily, a multiple routes planning for the A^* algorithm based on hierarchical planning is proposed. The hierarchical planning is introduced to divide the planning process into two parts, the initial route planning and the fine route planning. In the initial route planning, many feasible routes are obtained by setting the middle route point and the A^* algorithm, then the hierarchical clustering method is presented to obtain the initial reference route so as to avoid the weakness of K-means clustering sensitive to the initial clustering center. In the fine route planning, a variable width path planning channel is designed, and the final multiple routes are obtained by planning in the channel. Simulation results prove the feasibility of the algorithm.

Keywords: multiple routes planning; A^* algorithm; hierarchical clustering; hierarchical planning

0 引 言

作为任务规划系统的核心之一, 航迹规划技术大大提高了无人机的生存率以及任务的成功率。但是传统的航迹规划方法, 例如概略图法^[1-2]、智能优化算法^[3-4]和人工势场法^[5]等, 都是通过某种约束来得到最优的一条航迹, 无法得到多条备选航迹。然而考虑到实际战场态势的复杂性, 当无人机的飞行任务改变或在飞行过程中遇到未知威胁或突发情况时, 事先规划好的航迹不再适用^[6], 此时备选航迹就成为提高任务成功率的有效保障。

目前, 求解多航迹规划问题通常采用小生境技术^[7-8]、K 均值聚类技术^[9]以及进化计算技术^[10]。因为这些技术都是通过维持种群多样性来生成多条航迹, 所以多航迹规划算法基本集中在遗传算法和粒子群算法这类基于种群的算法中。但是小生境技术存在运行参数难以设置的问题,

并且 K 均值聚类方法对初始聚类中心非常敏感, 如果参数设置或者聚类中心选择的不好, 则会影响最后的规划结果。同时遗传算法和粒子群算法这类基于种群的算法存在早熟收敛的缺陷^[11], 这有可能使算法在某种作战想定下能够稳定运行, 但换一种作战想定却出现早熟收敛的问题。这些不稳定因素都会降低航迹规划系统的稳定性, 影响任务规划的效果。鉴于目前多航迹规划算法存在的这些问题与不足, 以及工程应用中对系统稳定性的高要求, 同时考虑到 A^* 算法的稳定性(已经证明, 只要启发函数设置的合适, 并且搜索区域中存在可行解, A^* 算法就一定能找到其中的最优解^[12]), 本文提出一种基于分级规划策略的 A^* 算法多航迹规划技术, 结合层次聚类法, 无需设置运行参数, 能够稳定地生成多条航迹, 便于工程应用。

算法采用分级规划策略将规划过程分成初始航迹规划和精细航迹规划两部分。初始航迹规划主要完成初始参考

收稿日期:2014-03-19; 修回日期:2014-06-21; 网络优先出版日期:2014-07-30。

网络优先出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20140730.1746.007.html>

基金项目: 国家自然科学基金(61401363)资助课题

航迹的搜索,包括初始可行航迹生成以及航迹的聚类;精细航迹规划主要是在初始参考航迹的基础上进行精细规划,以得到最终航迹,包括规划通道的生成以及航迹的精细规划。

1 航迹寻优算法

航迹寻优算法选用启发式A*算法^[13],A*算法通过利用合适的启发函数,计算当前位置所能到达的所有节点的代价,然后选择其中代价最低的节点作为扩展节点,提高了搜索效率的同时还保证了所得到的航迹代价最优。A*算法的代价函数如下:

$$f(x) = g(x) + h(x) \quad (1)$$

式中, $f(x)$ 为起始点到目标点的航迹代价估计值; $g(x)$ 为起始点到当前节点的真正代价; $h(x)$ 为启发函数。

对于航迹规划问题,一般做以下简化假设:假设飞行器在同一高度飞行,不考虑高度对代价的影响,并且不考虑突发威胁以及移动威胁。鉴于高炮阵地与导弹威胁对于飞行器是致命的,在规划过程中将这两种威胁当作地形威胁处理。根据以上分析,将飞行器的飞行距离以及安全性作为航迹代价的主要考虑因素,选择当前节点到目标点的欧氏距离作为启发函数 $h(x)$,选取飞行距离与雷达威胁构成真实代价 $g(x)$, $g(x)$ 根据式(2)决定。

$$G = \sum_{i=1}^n (\omega_1 l_i + \omega_2 f_{Ti}) \quad (2)$$

式中,航迹代价 G 表示 n 个航迹段代价之和; l_i 表示第 i 个航迹段的长度; f_{Ti} 为第 i 段在雷达威胁中的代价; ω_1 和 ω_2 为加权系数;无人机在第 i 个航迹段的 x 点处受到的第 j 个威胁源的威胁指数 $f_{Tij}(x)$ 由式(3)确定。

$$f_{Tij}(x) = \begin{cases} K_j / (R_j)^4, & x \text{ 被威胁 } j \text{ 覆盖} \\ 0, & x \text{ 未被威胁 } j \text{ 覆盖} \end{cases} \quad (3)$$

式中, K_j 为第 j 个威胁源的强度; R_j 为无人机与第 j 个威胁源之间的距离。为了避免积分减少计算量,本文利用式(4)来确定 f_{Ti} 。

$$f_{Ti} = \sum_{j=1}^{N_T} L_{ij} f_{Tij} \quad (4)$$

式中, N_T 为威胁源个数; L_{ij} 为第 i 段航迹在第 j 个威胁覆盖区域内的长度。

2 初始航迹规划

2.1 初始可行航迹的生成

启发式A*算法只能在规划空间内搜索出一条最优航迹,为了利用A*算法实现多航迹规划,采用分级规划策略,通过分级规划来实现A*算法的多航迹规划。初始航迹规划的目的是生成多条初始参考航迹,为精细航迹规划提供一个规划参考,使其在此基础上规划出最终的多条航迹。

首先确定航迹中间点,然后通过先规划到航迹中间点,再规划到目标点的方式得到多条初始可行航迹。考虑到航

迹所经过的区域是威胁与威胁或威胁与边界间的部分,因此将航迹中间点设置为威胁与威胁和威胁与边界间最短距离连线的中点,航迹中间点示意图如图1所示。

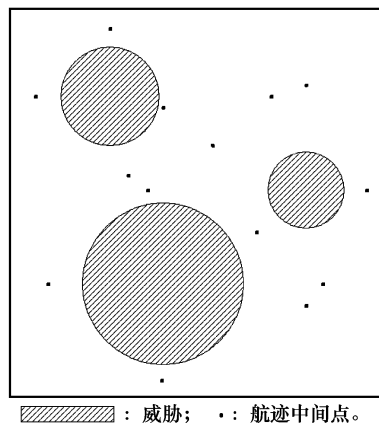


图1 航迹中间点示意图

从图1中可以看出,通过该方法生成的航迹中间点分布均匀,且分布在航迹可能经过的区域内。这样通过利用A*算法经过每一个航迹中间点可以生成许多初始可行航迹。因为每条初始可行航迹都经过航迹中间点,同时最终的航迹也存在于威胁与威胁或威胁与边界之间的区域内,所以通过该方法生成的初始可行航迹能够有效反映出规划区域内最终航迹的趋势,为精细航迹规划提供了一个合理的参考。

当航迹中间点过多时,会在一定程度上降低算法的运行速度,因此可以对航迹中间点数目进行适当删减,使其不超过预先设置的一个航迹中间点最大数量阈值 N_{\max} (通常将 N_{\max} 设置为100即可满足基本规划需要)。具体方法如下:将航迹中间点两两进行比较,找到所有航迹中间点中距离最近的两个点,然后删除两点中离威胁最近的点,循环该操作,直到航迹中间点的个数小于等于最大数量阈值 N_{\max} 。这样不仅能够使算法在可接受的时间范围内得到初始可行航迹,还能保证航迹中间点均匀地分布在规划区域内,使得经过这些航迹中间点生成的初始可行航迹能够满足多航迹规划的准则,即多条航迹在空间内有明显的差异。

2.2 航迹的聚类

2.2.1 层次聚类

初始可行航迹存在很多相似航迹,为了保证精细航迹规划能够得到差异较大的多条航迹,需要对初始可行航迹进行筛选。本文利用层次聚类法将初始可行航迹分成指定的 N 个类别,然后从各个类别中寻找一条代价最优的航迹作为初始参考航迹。

层次聚类法^[14]的核心思想是先将每个待聚类单元单独作为一类,然后按照单元间的距离大小逐步进行类别的合并,减少类别,直到达到类别聚类数目要求为止。层次聚类法能够根据数据潜在的层次关系对单元聚类,无需设置初始聚类中心,并且在运行过程中,无需设置其他任何参数,具有简便直观的特点。

2.2.2 航迹间距离

目前的航迹度量方法大多是根据航迹的长度将航迹 n 等分^[15], 将这些等分点作为航迹特征点, 通过计算特征点间距离作为航迹间的距离。两条航迹间的距离描述如下:

$$d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n D(M_i, N_i) \quad (5)$$

式中, n 表示航迹的等分个数; M_i 和 N_i 分别代表航迹 M 和 N 的第 i 个等分点; $D(M_i, N_i)$ 代表两条航迹第 i 个等分点的距离。

2.2.3 航迹的层次聚类算法步骤

步骤 1 生成 N 条初始可行航迹。

步骤 2 分别将每条航迹当成一个初始类, 记作 C_1, C_2, \dots, C_N 。

步骤 3 根据最短距离法计算各类间距离 $d(n)$ (n 为当前类别个数)。两类间的最短距离 $D_{ij}(n)$ 由式(6)计算:

$$D_{ij}(n) = \min\{D(x_i, x_j)\}, x_i \in C_i, x_j \in C_j \quad (6)$$

步骤 4 合并 $d(n)$ 中最小元素所对应的两个类别, 生成新的类的集合。

步骤 5 判断当前类别的数目是否达到指定要求。若没达到要求则返回步骤 3, 若达到要求则结束聚类。

3 精细航迹规划

3.1 航迹规划通道

通过初始航迹规划得到的初始参考航迹只能代表最终航迹的大致空间方位。为了得到满足要求的多条航迹, 需要在参考航迹的基础上进行精细规划。本文设计了一种变宽度航迹规划通道, 利用 A^* 算法在规划通道内进行精细航迹规划, 以得到最终多条航迹。航迹规划通道设计如图 2 所示。

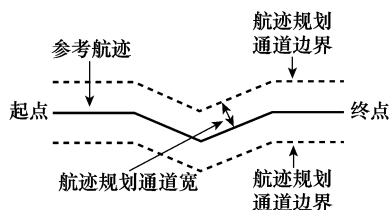


图 2 航迹规划通道

由图 2 所示, 航迹规划通道由两条边界之间的区域构成, 设计规划通道的形状与初始参考航迹一致, 这样能够充分利用初始参考航迹的信息, 保证了精细航迹规划后航迹的可行性以及多条航迹间的空间差异度。

3.2 航迹的失真

航迹规划通道的作用是限制 A^* 算法的寻优范围, 这样能够使 A^* 算法在局部区域内进行。但是, 若规划通道宽度设置不当, 会导致 A^* 算法得到的航迹失真。航迹失真示意图如图 3 所示, 为了便于分析, 图中的精细规划航迹未经过光滑。

由图 3 可见, 若规划通道宽度设置较小, 则会形成图中初始规划通道边界所构成的规划区域, 此时最优航迹有一部分不在规划通道内。当 A^* 算法规划到图中 A 部分时, 由于规划通道的限制, 改变了 A^* 算法的规划方向, 直到算

法运行到 B 部分, 再次遇到规划通道时, 才调整方向规划到终点。若规划通道宽度设置较大, 则有可能导致规划通道覆盖的区域过大, 使算法重新变为“全局最优搜索”。

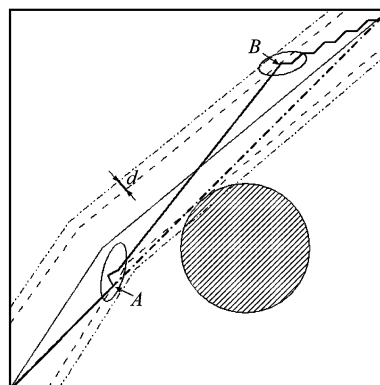


图 3 航迹失真与航迹规划通道宽度调整机制示意图

根据以上分析, 可以认为规划通道内的最优航迹不会与航迹规划通道相交, 因此通过判断精细规划航迹与规划通道的相交情况能够确定航迹是否失真。在此需要指出的是, 判断航迹失真时必须使用未经光滑的规划航迹, 当得到满足要求的精细规划航迹后再对航迹进行光滑, 这样才能准确判断航迹是否失真。

3.3 航迹规划通道宽度调整机制

为了避免航迹的失真, 提出一种航迹规划通道宽度调整机制。首先生成初始航迹规划通道, 考虑到较大的通道宽度会导致局部规划受到影响, 可将初始规划通道的宽度大小设为 A^* 算法的一个步长, 然后在通道内进行精细规划。在精细规划过程中, A^* 算法每扩展一步, 就判断当前生成的航迹是否与通道边界相交, 即判断航迹是否失真, 若航迹出现失真则将规划通道的宽度扩展 A^* 算法的一个步长, 在新产生的通道内重新进行规划, 反复循环该操作直到航迹不出现失真。

通道宽度调整机制示意图见图 3。由图 3 可见, 由于初始规划通道较小, 导致了航迹的失真, 此时将通道扩展 A^* 算法的一个步长 d , 扩展后的通道不再和精细规划航迹相交, 使算法得到了最优航迹。该通道宽度调整机制使规划通道从小到大调整, 每次扩展 A^* 算法的一个步长, 保证了 A^* 算法能在一个相对合适的范围内找到最优解。

4 仿真实验

仿真环境为 VC++6.0 和 MatlabR2012a, 采用了模拟地形及威胁数据。任务规划区域为 $300 \text{ km} \times 300 \text{ km}$, 由多个地形威胁与雷达威胁构成, 雷达威胁以菱形进行了标记, 其余未标记的为地形威胁, 飞行器起始点为 $(0, 0)$, 终点为 $(300 \text{ km}, 300 \text{ km})$ 。为了加快初始可行航迹的搜索速度, 将初始航迹规划中 A^* 算法步长设置为 15 km , 同时为了保证最优航迹的准确性, 将精细航迹规划中的步长设为 3 km 。规划通道初始宽度设为 3 km , 通道扩展步长设为 3 km , $\omega_1 = \omega_2 = 1$ 。因为 A^* 算法得到的航迹是来回曲折的, 无法

直接使用, 所以为了得到可行且平滑的航迹, 仿真对所有生成的航迹(初始可行航迹以及精细规划航迹)在其完成整条航迹规划后进行了光顺。

经过航迹中间点生成的初始可行航迹如图4所示。因为仿真中使用的威胁数量不多, 所以没有减少航迹中间点的数量。由图4可见, 初始可行航迹已经基本覆盖了飞行器所有可能的飞行方向与大致路径, 所以通过设置的航迹中间点生成的初始可行航迹是合理可行的。同时从图4中还能看到, 在这些初始可行航迹中存在许多相似航迹并且这些航迹之间的差异呈现明显的层次关系, 因此非常适合利用层次聚类算法将差异度较大的航迹筛选出来。

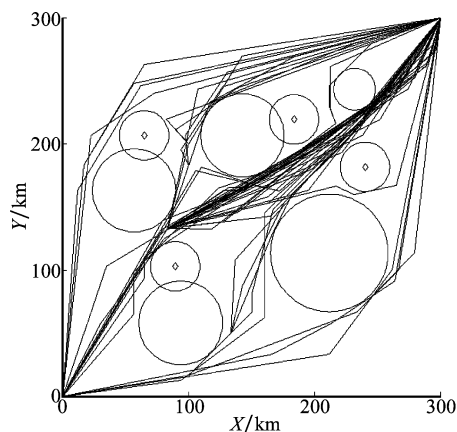


图4 初始可行航迹

聚类个数为4时得到的初始参考航迹如图5所示, 参考航迹的选取以类内代价最优为原则。从图5可以看到, 通过聚类并选择类内最优的航迹后, 已经初步得到了可行的多条航迹, 但由于航迹中间点是人为设置的, 故此时的航迹并不是最优的。因此需要在此基础上进行精细航迹规划。

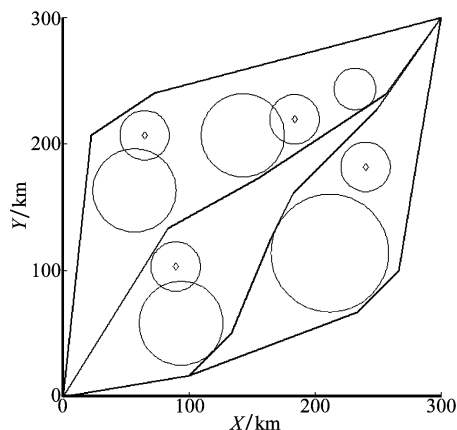


图5 聚类个数为4时的初始参考航迹

图6为精细航迹规划后的最终航迹以及经过自适应调整完成后的最终规划通道。由图6可以看到, 精细规划后的航迹在之前参考航迹的基础上进行了较小的调整, 保持了初始参考航迹的趋势, 并且可以达到区域内最优, 充分体现出A*算法的优势。同时从图中还能看到, 自适应调整后

的每个规划通道独自形成了自己的区域, 这个区域包括了部分威胁并具有航迹的基本形状, 每个区域形成了一种小型的“作战想定”, 类似于“小生境”, 使得A*算法在这个区域内能够找到最优航迹并且不会存在失真以及受到其他区域的影响。图7为聚类个数为5时的最终航迹图。图8为聚类个数为3时的最终航迹图。

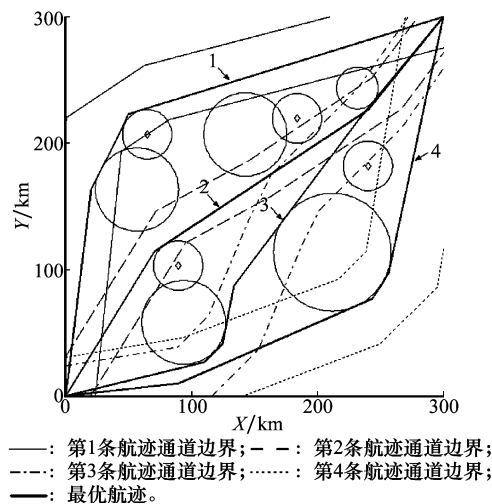


图6 精细航迹规划后的最终航迹及规划通道

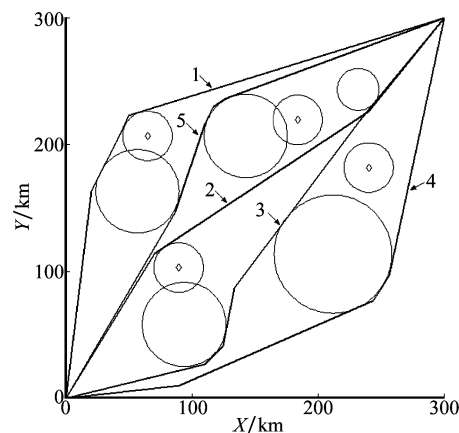


图7 聚类个数为5时的最终航迹图

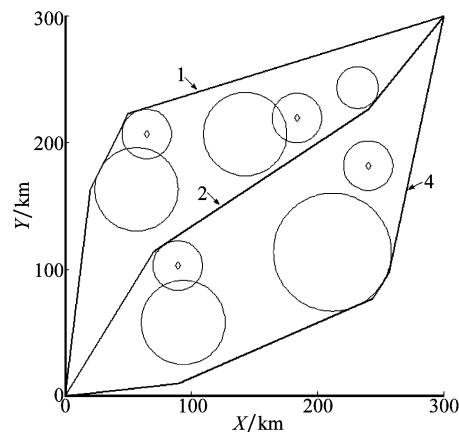


图8 聚类个数为3时的最终航迹图

由图 7 与图 8 可见,当增加聚类个数时 5 号航迹出现,当减少聚类个数时 3 号航迹消失。这是因为层次聚类法每次合并的类别都是当前状态下最相似的两个,从图 6 中可以明显看到 2 号航迹与 3 号航迹最相似(航迹间距离最小),所以当减少聚类个数时 2 号航迹所在的类别与 3 号航迹所在的类别合并,剩下的 1、2 和 4 号航迹所在的类别差异度最大,最终 3 号航迹消失。对比图 4 与图 7 可见,与图 7 中 5 条航迹趋势相似的初始可行航迹组成了全局差异度最大的 5 类航迹,所以增加聚类个数首先出现 5 号航迹。综上所述,无论是增大还是减少聚类个数,层次聚类法总能保证当前所得到的航迹具备最大的差异度,因此本文提出利用层次聚类法对航迹聚类是可行有效的。

5 结 论

本文提出一种基于分级规划策略的 A* 算法多航迹规划技术,克服了传统的多航迹规划技术运行参数设置较多,稳定性较差的问题,该算法有如下优点:

(1)采用分级规划策略,将 A* 算法应用到多航迹规划中,充分利用 A* 算法的优势,避免了基于种群的算法早熟收敛以及小生境技术运行参数难以设置等不稳定的缺陷,非常适合于工程应用;

(2)提出将层次聚类法应用于航迹的聚类,该方法能够避免 K 均值聚类法对初始聚类中心敏感的问题,无需设置运行参数,简单且有效;

(3)设计了一种变宽度的航迹规划通道,使得在该区域内利用 A* 算法进行规划时不受其他区域以及通道边界的影响,保证 A* 算法能在区域内找到最优航迹。

参考文献:

- [1] Han T, Wu W C, Huang C Q, et al. Path planning of UAV based on voronoi diagram and DPSO[C]//*Proc. of the Procedia Engineering*, 2012, 4198-4203.
- [2] Pehlivanoglu Y V. A new vibrational genetic algorithm enhanced with a voronoi diagram for path planning of autonomous UAV[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2012, 16(1): 47-55.
- [3] Pehlivanoglu Y V, Baysal O, Hacıoglu A. Path planning for autonomous UAV via vibrational genetic algorithm[J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2007, 79(4): 352-359.
- [4] Blasi L, Barbato S, Mattei M. A particle swarm approach for flight path optimization in a constrained environment[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2013, 26(1): 128-137.
- [5] Lin C L, Li Y H, Aouf N. Potential field based evolutionary route planner for the control of multiple unmanned aerial vehicles[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2010, 224(11): 1229-1242.
- [6] Zheng C W, Yan P, Ding M Y. Research status and trend of route planning for flying vehicles[J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(6): 1441-1446. (郑昌文, 严平, 丁明跃. 飞行器航迹规划研究现状与趋势[J]. 宇航学报, 2007, 28(6): 1441-1446.)
- [7] Yu H, Yu Z, Li W H. Multiple routes planning for air vehicles based on Niche particle swarm optimization[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2010, 28(3): 415-420. (于会, 于忠, 李伟华. 基于小生境粒子群技术的多航迹规划研究[J]. 西北工业大学学报, 2010, 28(3): 415-420.)
- [8] Ye W, Ouyang Z H, Zhu A H, et al. Niche clone selection algorithm for multi-modal function optimization[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(5): 1100-1104. (叶文, 欧阳中辉, 朱爱红, 等. 求解多峰函数优化的多生境克隆选择算法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(5): 1100-1104.)
- [9] Li M, Wang D B, Sheng S Z, et al. Multiple route planning based on particle swarm optimization and weighted K-means clustering[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(3): 512-516. (李猛, 王道波, 盛守照, 等. 基于加权 K-均值聚类与粒子群优化的多航迹规划[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(3): 512-516.)
- [10] Hocaoglu C, Sanderson A C. Planning multiple paths with evolutionary speciation[J]. *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, 2001, 5(3): 169-192.
- [11] Andre J, Siarry P, Dognon T. An improvement of the standard genetic algorithm fighting premature convergence in continuous optimization[J]. *Advance in Engineering Software*, 2001, 32(1): 49-60.
- [12] Hart P E, Nilsson N J, Raphael B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths[J]. *IEEE Trans. on Systems Science and Cybernetics*, 1968, 4(2): 100-107.
- [13] Szczerba R J, Galkowski P, Glickstein I S, et al. Robust algorithm for real-time route planning[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(3): 869-878.
- [14] Xu R, Wunsch D. Survey of clustering algorithms[J]. *IEEE Trans. on Neural Networks*, 2005, 16(3): 645-678.
- [15] Yan J J, Ding M Y, Zhou C P. Multiple routes planning method based on K-means clustering and genetic algorithm[J]. *Fire Control & Command Control*, 2010, 35(3): 147-150. (严江江, 丁明跃, 周成平. 基于 K 均值聚类和遗传算法的多航迹规划方法[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(3): 147-150.)

作者简介:

李泉扬(1989-),男,博士研究生,主要研究方向为指挥控制、航路规划。

E-mail:winnerlxylee@126.com

周德云(1964-),男,教授,博士,主要研究方向为航空火力控制。

E-mail:dzyzhou@nwpu.edu.cn

冯 琦(1964-),男,副教授,博士,主要研究方向为无人机航路规划。

E-mail:qifeng@nwpu.edu.cn