

基于空间分解网络的无人机航路规划

杨 遵, 雷虎民

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要:设计了一种无人机航路规划方法,首先通过作战任务想定构造 Voronoi 图,利用空间分解网络和 Rosenthal 算法确定初始航路,然后进行样条插值对初始航路光滑修正,最终得到一条可飞航路。仿真计算表明该方法简单、有效。

关键词:无人机;航路规划;空间分解网络;三次样条插值

中图分类号: V279 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2006)04-0013-04

无人机(Unmanned Air Vehicle, UAV)的航路规划最初来源于移动机器人路径规划的概念,其目的是在适当的时间内计算出最优或次优的飞行轨迹,使 UAV 能回避敌方威胁环境,安全有效地完成预定的任务^[1]。航路规划算法有很多,它们或属于最优式和启发式算法,如动态规划、梯度法、A* 算法、神经网络、遗传算法;或属于基于栅格和图形的算法,如基于可视图的 djikstra 算法等。本文给出了这样一种航路规划方法:首先做出基于 Voronoi 图的 UAV 所有可能飞行轨迹,利用空间分解网络模型和 Rosenthal 算法选择初始航路,然后用三次样条插值对初始航路光滑修正,得到一条最优的可飞航路。

1 初始航路的建立

1.1 作战任务想定

如图 1 所示,选择典型的压制敌防空火力(Suppression of Enemy Air Defence, SEAD)作战任务想定为背景。图中圆圈表示 UAV 的出发点,星形表示目标点,圆点表示威胁中心点;UAV 的初始航向和对目标的攻击航向已知。为简单计,作如下假设:①UAV 在巡航阶段航速恒定,

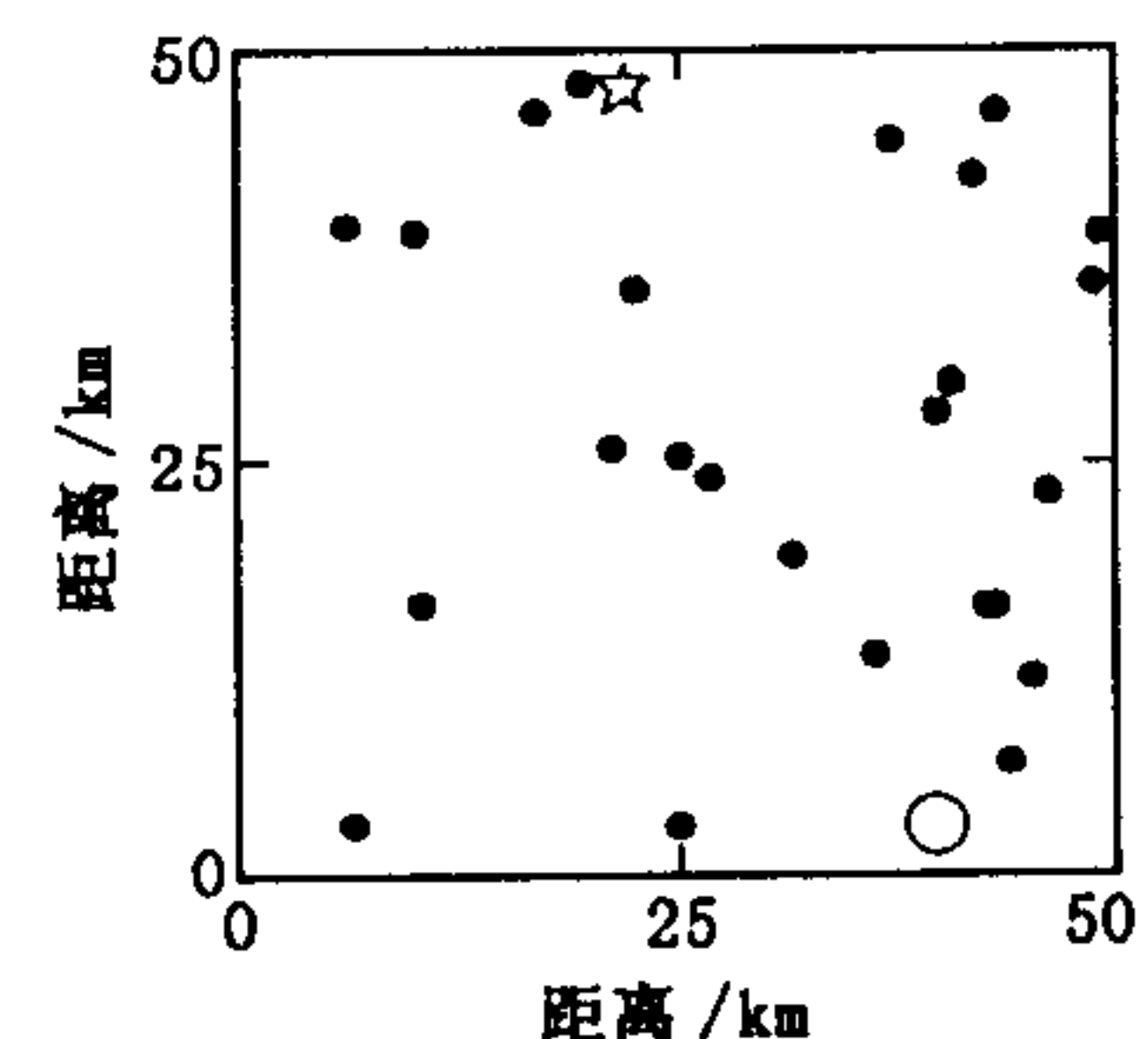


图 1 作战任务想定示意图

飞行达到足够高度,没有地形遮蔽,只考虑横侧运动,飞行航路简化为水平面内的“二维”问题;②威胁模型为敌方雷达或导弹阵地,威胁区域简化为已知半径的圆柱或圆锥等几何体的组合,威胁区域内危险概率均为 1;③UAV 具有相同的雷达反射截面(RCS),雷达探测特征固定。

1.2 基于 Voronoi 图的航路优化代价计算

根据作战任务想定构造如图 2 所示的 Voronoi 图^[2]。图中虚线表示 Voronoi 边,再分别连接出发点和目标点与距离自身最近的三个 Voronoi 顶点,这些虚线的组合就构成了 UAV 从出发点到目标点的备选航路集,Voronoi 图的顶点则构成初始航路节点,从而将航路规划问题从无限维空间简化到有限维空间中来,避免了由于计算时间随问题规模的变大而爆炸式增长所造成的“维数灾难”。

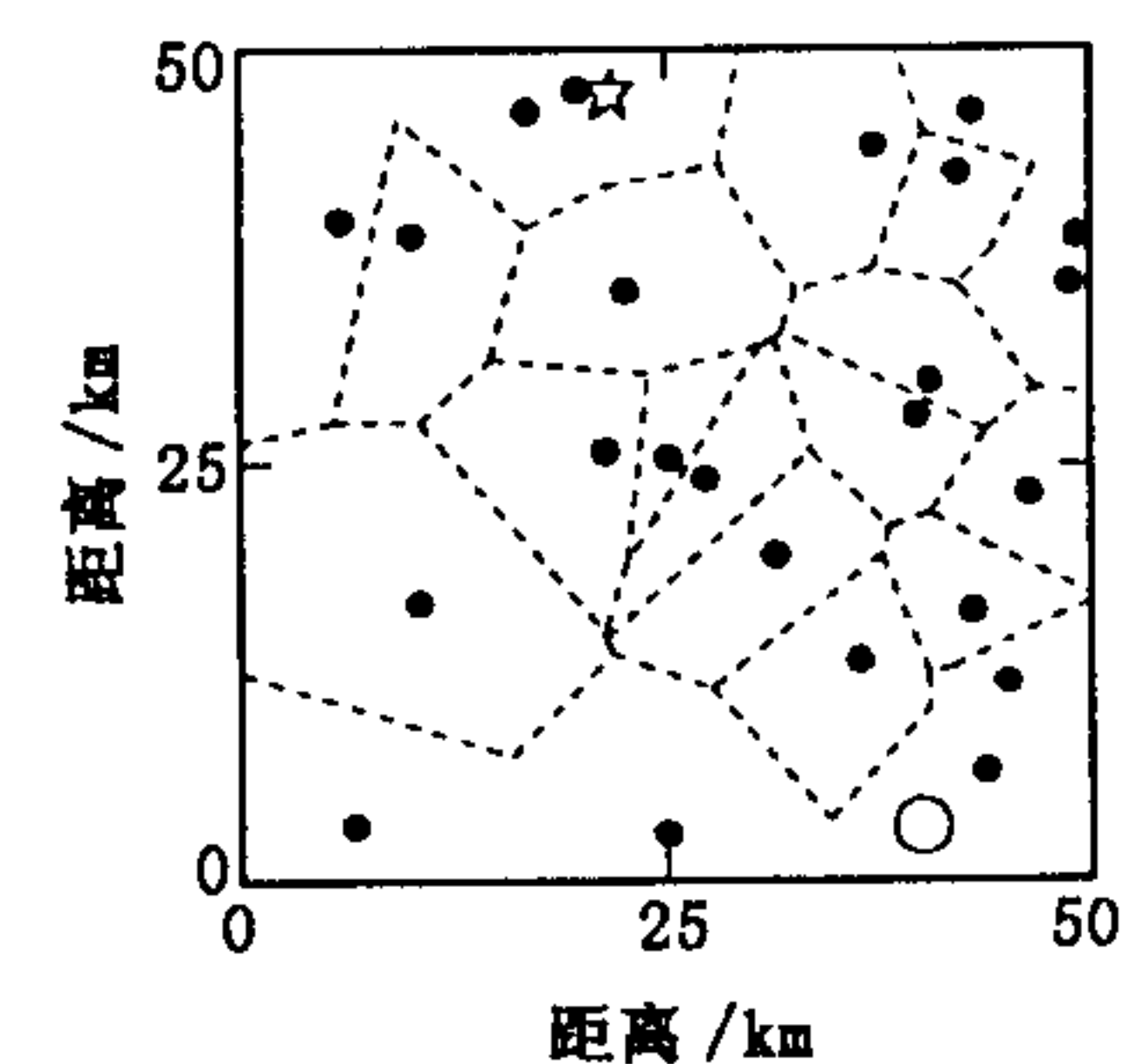


图 2 Voronoi 图

对于 N 个雷达或导弹阵地的作战任务想定,由 Voronoi 图最多可

收稿日期:2005-07-15

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2004F19)

作者简介:杨 遵(1979-),男,河南镇平人,博士生,主要从事无人机综合控制系统研究;

雷虎民(1960-),男,陕西合阳人,教授,博士生导师,主要从事飞行器制导与控制技术研究。

以产生 $(2N-5)$ 个顶点和 $(3N-6)$ 条边^[3],加上出发点和目标点以及它们与最近3个Voronoi顶点的连线,则共 $(2N-3)$ 个顶点和 $3N$ 条边,我们把由此形成的网络记作 $G=(V,L)$, $V=\{v_1, v_2, \dots, v_N, \dots, v_{2N-3}\}$ 表示节点的集合,包括出发点、目标点以及所有航路点,而 $L=\{l_{ij} | v_i, v_j \in V\}$ 则是初始航路段的集合。

对于网络 G ,单架UAV沿其中的某一条备选航路飞行时,航路优化代价 J_{pa} 由两部分组成^[4]:威胁代价 J_{th} 和燃油代价 J_{fu} ,采用它们的加权形式来表示:

$$J_{pa} = \sum_{i=1}^M J_{pa,i} = \sum_{i=1}^M [wJ_{th,i} + (1-w)J_{fu,i}] \quad (1)$$

式中, M 表示备选航路的 G 边数; $J_{pa,i}$ 表示第 i 条 G 边总的航路优化代价; $w \in [0,1]$ 表示威胁代价在航路代价中所占的权重,体现决策者对于两个因素的倾向: $w=0$ 表明决策者不考虑安全,仅追求燃油代价最小,而 $w=1$ 则表明不惜燃油代价,仅追求航路的安全性。

考虑到UAV以定常速度飞行,根据雷达的可探测概率,可以近似认为 G 边上某一点的威胁代价与当前位置威胁距离的4次方的倒数成正比,第 i 条 G 边总的威胁代价 $J_{th,i}$ 可以用边上 K 个离散航路点到 N 个威胁的距离量化得到,因此

$$J_{th,i} = \sum_{j=1}^N J_{th,ij} = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K \frac{L_i}{d_{ijk}^4} \quad (2)$$

式中, $J_{th,ij}$ 表示第 i 条 G 边对于第 j 个雷达的威胁代价。 d_{ijk} 表示第 i 条 G 边的第 k 个航路点对于第 j 个雷达的威胁距离。对于第 i 条 G 边的燃油代价,可以简单地认为 $J_{fu,i} = L_i$ 。因此,UAV沿备选航路集的某一条航路飞行时,航路的优化代价可以表示为

$$\min J_{pa} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N L_i [w \sum_{k=1}^K \frac{1}{d_{ijk}^4} + (1-w)] \quad (3)$$

1.3 空间分解网络算法

对于网络 G ,给出如下定义^[5,6]

代价矩阵 $C=[c_{ij}]$,如果节点 v_i 和节点 v_j 相关联, c_{ij} 就等于连接 v_i 和 v_j 的航路段的代价,否则为无穷大。

最优代价矩阵 $M=[m_{ij}]$, m_{ij} 是从节点 v_i 到节点 v_j 之间最优航路的总代价。

后续矩阵 $S=[s_{ij}]$, s_{ij} 表示在节点 v_i 到节点 v_j 之间的最优航路上和 v_i 相邻的节点编号。

子网 $G_\alpha \subseteq G$ $G_\alpha = (V_\alpha, L_\alpha)$, $V_\alpha \subseteq V$, $L_\alpha = \{l_{ij} | v_i, v_j \in V_\alpha, l_{ij} \in L\}$ 。

显然, G 是一个连通网络,而且它的子网 V_α 也是连通的。定义一个割点集 V_x ,若把 V_x 及与它关联的航路段移开,则 G 将被分解成相应的子网。在 G 中寻找割点集的过程就称为网络分解。

根据上述矩阵的定义,可知最优航路问题就是由已知的 C 来计算 M 和 S 。计算出 M 和 S 后,对于任意的节点对,最优航路代价可由 M 得到,最优航路可由 S 获得。对于每一个子网,用Rosenthal算法来计算其中所有节点对的最优航路^[7]

$$(M, S) = \text{Rosenthal}(C) \quad (4)$$

网络 G 通过割集被空间分解成若干个子网的同时,UAV的航路相对应地被割点分解为若干段,它们分别处于不同的子网中,运用Rosenthal算法可以求得所有割点之间的最优航路,进而得到每个子网的最优航路,两个不同子网之间的最优航路为

$$d_{ij} = \min_{v_k \in V_x} (d_{ik} + d_{kj}) \quad (5)$$

由此,空间分解网络算法的步骤为:①根据作战任务想定构造Voronoi图,形成网络 G ;②通过割集将网络 G 空间分解成 n 个子网,确定每个子网的代价矩阵、后续矩阵;③Rosenthal算法求所有割点之间找到最优航路;④求每个子网的最优航路;⑤运用式(5)求子网间的最优航路;⑥计算最优航路 $\min_c(d) = \sum (d_{ij})$,得到初始航路。

2 航路光顺优化

由网络 G 获得的初始航路是由一组折线组成的,是不可飞的。要使该航路成为可飞的,必须进行光顺修正。本文采用三次样条插值的方法来光顺航路,详细算法见文献[4]。

对于航路的起始段来说,以 UAV 出发点和第一条 Voronoi 边中点作为三次样条插值的两个节点,中间节点插入到两条边的交点附近,样条起始部分方向与 UAV 的初始航向相同,终止部分与第一条 Voronoi 边相切。同样地,对于末段航路,将目标点和最后一条 Voronoi 边中点作为航路的两个节点,中间节点插入到两条边的交点附近,样条起始部分与最后一条 Voronoi 边相切,终止部分方向由 UAV 的攻击航向确定。

把航路离散为 K 段并线性化,该段航路的二次优化指标可表示为

$$\min J_{pa} = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K w \frac{1}{d_{ij}^4} + (1-w)L_a \quad (6)$$

将航路段用其对应的参数方程表示: $x = x(t)$ 、 $y = y(t)$, 并令 $p = d/dt$, 则航路曲率应不大于 UAV 的最大转弯曲率,即

$$\rho(t) = \frac{|px \cdot p^2y - py \cdot p^2x|}{((px)^2 + (py)^2)^{3/2}} \leq \rho_{\max} \quad (7)$$

逐渐改变插入节点的位置,使优化指标(6)达到最小并满足约束条件(7),就可得到起始段和末段的平滑航路。对于中间航路,航路的起始部分和终止部分分别固定且相切于两条 Voronoi 边中点,中间节点插入到两条 Voronoi 边的交点附近,然后改变中间节点位置,依次进行序列二次规划即可。约束条件不变,只是航路段的优化指标有所不同,譬如,对某一段航路来说,其二次优化指标用该段航路上各点到其对应初始航路段距离 4 次方的加权和表示为

$$\min J_{pa} = \sum_{k=1}^K d_k^4, d = \frac{\| \overline{PQ} \times \mathbf{u} \|}{\| \mathbf{u} \|} \quad (8)$$

式中: d 表示样条上的点 Q 到其相对应初始航路段的距离; P 则表示该初始航路段上的任一点; \mathbf{u} 表示该初始航路段的单位向量。

3 仿真计算

根据图 1 的作战任务想定,在 $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$ 范围内,分布了 24 个雷达或导弹威胁阵地^[8]。UAV 进入敌防御区域后,根据所处的威胁环境,采用前述的航路规划方法,取权重 $w = 0.7$, 在 MATLAB 6.5 下进行仿真计算得到如图 3 所示的初始航路示意图。运用三次样条插值对初始航路光顺优化,得到图 4 所示的可飞航路。

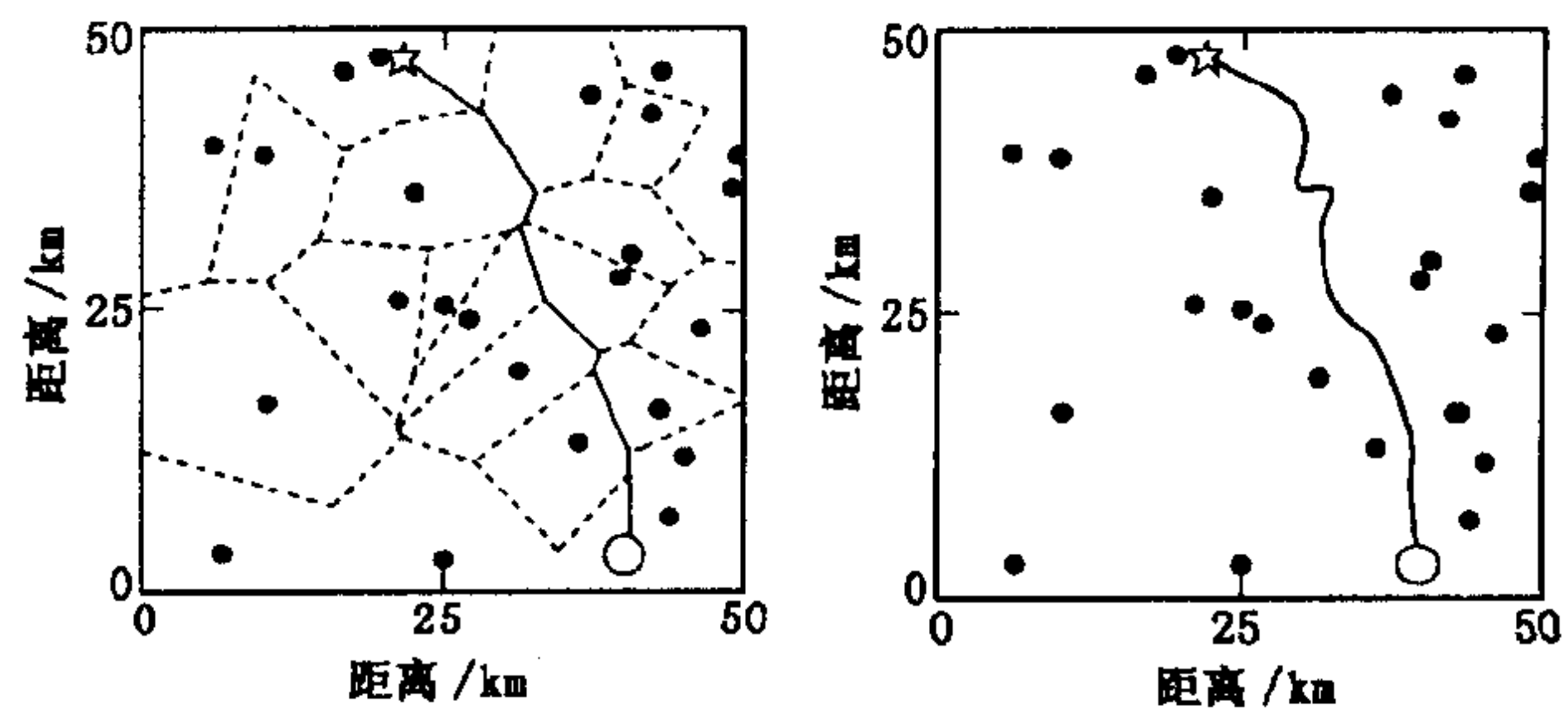


图3 初始航路示意图

图4 光顺航路示意图

4 结论

从仿真计算可以看出,基于空间分解网络模型的 UAV 航路规划方法能够有效地寻找一条完全满足优化性能指标要求的最优航路,保证 UAV 能够回避各种威胁,顺利地飞抵目标点。同时,该方法具有快速、存储容量小的特点,和别的矩阵类算法相比,能够明显地降低对计算机存储容量和计算时间的要求。

参考文献:

- [1] 唐 强,张翔伦,左 玲. 无人机航迹规划算法的初步研究[J]. 航空计算技术,2003,33(2):125-132.
- [2] 肖位枢. 图论及其算法[M]. 北京:航空工业出版社,1993.
- [3] 叶媛媛,闽春平,沈林成,等. 基于 VORONOI 图的无人机空域任务规划方法研究[J]. 系统仿真学报,2005,17(6):1353-1355.
- [4] Kevin B Judd, Timothy W McLain. Spline Based Path Planning for Unmanned Air Vehicles[A]. Proceeding of AIAA[C]. 2001, 1183-1189.
- [5] 陈则王,袁 信. 基于分层分解的一种实时车辆路径规划算法[J]. 南京航空航天大学学报,2003,35(2):193-197.

- [6] Lee J. Calculation of the Shortest Paths by Optimal Decomposition[J]. IEEE Trans on System, Man and Cybernetics, 1982, SMC - 12(3):410 - 415.
- [7] Rosenthal A. On Finding Shortest Paths in Nonnegative Networks[J]. Discrete Math, 1974, 10(1):159 - 162.
- [8] 柳长安,李为吉,王和平. 基于蚁群算法的无人机航路规划[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2004, 5(2):9 - 12.

(编辑:田新华)

Space Decomposition Network Based Path Planning for Unmanned Air Vehicles

YANG Zun, LEI Hu - min

(The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan, Shaanxi 713800, China)

Abstract: A path planning method for UAVs is presented. First, through mission scenario, a Voronoi diagram is constructed, based on this, space decomposition network model and Resenthal algorithm are used to compute the coarse path - a series of straight - line segments and not flyable. Then, using a series of cubic splines to connect these straight - line segments, the path is refined into an optimal one that is flyable for the UAVs. Simulation result shows that this method is simple, effective and of a certain value in application.

Key words: unmanned air vehicle; path planning; space decomposition network; cubic spline interpolation

.....
(上接第 12 页)

4 结论

通过对飞机的动力学模型进行分析,利用定性分析的方法,得出了飞机在俯仰条件下的动力学特性,并提出了飞行稳定性的理论判据。本文的研究是基于二维系统进行的,它是研究高维系统的基础,但高维系统有更多且更复杂的动力学行为,若要考虑更复杂情况下的飞机机动特性,需要作进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] 陆夕云,杨国伟. 大攻角下有限振幅俯仰飞行的非线性动稳定性分析[J]. 空气动力学学报, 1999, 17(2):177 - 182.
- [2] 王树禾. 微分方程模型与混沌[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 1999.
- [3] 马知恩,周义仓. 常微分方程定性方法与稳定性[M]. 北京:科学出版社, 2001.
- [4] Guckenheimer J, Holmes P. Nonlinear Oscillations Dynamical Systems, and Bifurcation of Vector Fields[M]. New York: Springer - verlag, 1991.

(编辑:姚树峰)

Stable Field Analysis of Aircraft Flying at High Angles of Attack

ZOU Yi^{1,2}, YAO Hong²

(1. National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China; 2. The Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710051, China)

Abstract: Based on dynamics equation of aircraft flying at high angles of attack, the dynamical characteristics of aircraft flying at pitching on condition of high angles of attack are qualitatively analyzed. The flying stabilities are raised on the basis of various matching parameters, and then the stable field of aircraft can be divided.

Key words: high angle of attack; pitching flying; stable field