

利用改进蚁群算法的可规避威胁源最优航线规划

柴毅哲, 杨任农, 马明杰, 刘孟强

(空军工程大学航空航天工程学院,西安,710038)

摘要 针对复杂环境中飞行器航线规划问题,在基本蚁群算法的基础上,提出一种可规避威胁源的航线规划方法。通过综合分析飞行器飞行环境中的地形信息和威胁信息,考虑航线距离、时耗、能耗、全程费用和威胁规避等因素,重构航线规划目标函数,加强了对飞行器实际飞行环境的描述,从而提高了航线规划的有效性;通过增加目标节点对下一节点的影响来改进状态转移概率,促使蚂蚁向目标方向前进,以节省计算时间,提高优化效率。仿真结果显示,与基本蚁群算法相比,改进算法可以节省 10% 的优化时间且缩短 10 多次迭代次数。

关键词 飞行器;航线规划;可规避威胁源;蚁群算法;状态转移概率

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.04.003

中图分类号 V212.1 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)04-0009-04

Research of Air Route Planning Optimization Method without Threat Based on Improved Ant Colony Algorithm

CHAI Yizhe ,YANG Rennong ,MA Mingjie ,LIU Mengqiang

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Aimed at air route planning problems in complex environment, a route planning optimization method without threat based on the fundamental ant colony algorithm is proposed. The use of this method enhances the descriptive ability of the real flight circumstance to improve the effectiveness of route planning by reconstructing the route planning target function and comprehensively analyzing the information of terrain and threat in aircraft flight environment, including the factors such as route distance, time, fuel, cost and threat evasion ,etc. Still, the use of this method can save algorithm time and enhance efficiency of optimization by improving distance heuristic factor to introduce heuristic direction. The simulation results show that the use of this improved ant colony algorithm can save 10% of the optimization time and reduce 10-odd iterative times compared with that of the fundamental ant colony algorithm.

Key words: aircraft; route planning; ant colony algorithm; optimal route

飞行器航线规划是指在综合考虑飞行器性能、战场威胁、飞行时间、飞行距离、油耗等多约束条件下,规划出一条总代价最小的最优航线。文献[1]利用 A* 算法求解三维航线规划问题,提升了规划速

收稿日期:2014-06-11

作者简介:柴毅哲(1990—),男,河南巩义人,硕士生,主要从事指挥信息系统研究.E-mail:chaiyizhe@126.com

引用格式:柴毅哲,杨任农,马明杰,等.利用改进蚁群算法的可规避威胁源最优航线规划[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(4):9-12. CHAI Yizhe ,YANG Rennong ,MA Mingjie ,et al.Research of Air Route Planning Optimization Method without Threat Based on Improved Ant Colony Algorithm[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(4): 9-12.

度,但在复杂环境中较难得到最优航线;文献[2]的粒子群优化算法通过将各种威胁转化为雷达威胁建立二维模型,从而较好处理了多威胁种类情况下实时航线规划问题;文献[3]提出用遗传算法来解决航线规划问题,实现了在不确定战场环境中自适应航线规划,但是当问题规模较大时,容易陷入局部最优,得不到最优航线。飞行器飞行环境的复杂性使得航线突变性很大,蚁群算法(ant colony algorithm, ACA)^[4-7]虽具有较强的灵活性,但存在搜索速度慢、容易陷入局部最优以致得不到全局最优航线的问题。鉴于基本蚁群算法的不足,本文通过重构航线规划目标函数并引入方向启发来加以改进。

1 航线规划问题描述

欲解决飞行器的航线规划问题,首先就要对众多威胁建模,即根据威胁的特征方程、雷达探测范围、禁飞区范围、导弹火炮射程范围等将威胁信息简化成具有一定作用范围的形状体。本文将各种威胁转化为雷达威胁^[2],并采用数字地图^[8]对地形信息进行建模。

1.1 地形模型

采用数字地形的数学模型为:

$$Z(x, y) = \sum_{i=1}^n z_i \exp\left[-\left(\frac{x-x_{0i}}{x_{si}}\right)^2 - \left(\frac{y-y_{0i}}{y_{si}}\right)^2\right] + \text{random}(x, y) \quad (1)$$

式中: n 表示山峰个数; Z_i 表示第 i 座山峰的高度; (x_{0i}, y_{0i}) 表示第 i 座山峰的坐标; (x_{si}, y_{si}) 表示第 i 座山峰的斜度; $\text{random}(x, y)$ 表示随机地形。

1.2 雷达模型

1.2.1 雷达方程

本文利用雷达方程来对探测距离进行估算,雷达方程为:

$$R = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_s B_n (S/N)_{\min}} \quad (2)$$

式中: P_t 为发射功率; G 为发射接收天线增益; λ 为雷达工作波长; k 为玻尔兹曼常数; T_s 为有效温度; B_n 为噪声带宽; $(S/N)_{\min}$ 为最小信噪比; S 为目标对雷达散射截面积。

1.2.2 雷达散射截面积(RCS)计算

定义在远场条件下,单位立体角内,目标朝接收方向散射的功率与从给定方向入射该目标的平面波功率密度之比的 4π 倍为RCS,RCS计算公式为:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 |E_s|^2 / |E_i|^2 \quad (3)$$

式中: E_i 为目标处入射电场强度; E_s 为接收端目标散射电场强度。

对于单基地雷达,其RCS可表示为:

$$\sigma = \sigma_0 10^{\frac{f(\theta)}{10}} \quad (4)$$

式中: σ_0 为初始雷达散射截面积; $f(\theta)$ 为一个随入射角 θ 变化的函数。

1.2.3 雷达探测区域计算

雷达在目标检测中的探测不等式为:

$$(S/N)_{\min} \leq C\sigma/R^4 \quad (5)$$

式中: C 为确定值; R 为探测距离。

当某参考点满足上述探测不等式时即为可探测点,依据可探测点计算所有可探测区域后进行叠加即可得到可探测区域总面积。

通过以上分析,对飞行器航线规划的地形信息和威胁信息进行建模,规划空间见图1。

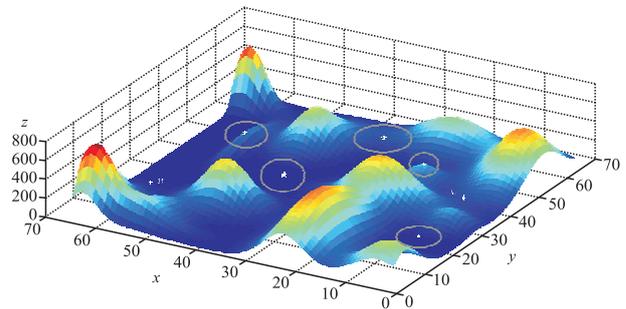


图1 规划空间

Fig.1 Programming space

2 基于改进型蚁群算法的航线规划

2.1 构建航线规划目标函数

本文的航线规划过程综合考虑航线距离、时耗、能耗、全程费用和威胁规避等因素。定义飞行器在威胁区和非威胁区的飞行速度、航程能耗、全程费用,威胁规避对航线规划的影响可以通过航线距离和航线时耗来反映,因此,为达到航线距离和航线时耗总代价的最小,从始发点到终点的规划航线总代价函数^[9]为:

$$M_k = qT_k + \delta pL_k \quad (6)$$

式中: T_k 和 L_k 分别为航线时耗和长度; p 和 q 分别为航线时耗与长度的重要性因子,可以通过设定 p 、 q 的值来控制航线时耗和长度在实际规划航线中的重要性,常数 δ 用来使得二者处于同一数量级。

此外,由于航线威胁的存在, T_k 还受雷达探测范围、禁飞区范围、导弹火炮射程范围等因素影响,通过以上分析可知,本文通过设定飞行器在威胁区和非威胁区飞行速度的不同来考虑这些因素对航线规划的影响,并引入权值体描述,航段权值求取计算为:

$$s(i, j) = d_{ij} (\sigma + \varphi f(x_1, x_2, \dots, x_n)) \quad (7)$$

式中: d_{ij} 为航段长度, x_1, x_2, \dots, x_n 为航段威胁的

影响;函数 $f(x)$ 为这些航段威胁的评测函数; σ, φ 分别为航段长度和航段威胁的相对重要性。

由此可知,航段 (i, j) 上的时耗 t_{ij} 为:

$$t_{ij} = s(i, j) / v_{ij} \quad (8)$$

式中: v_{ij} 为飞行器在航段上的平均飞行速度。

综上,航线规划的目标函数为:

$$M = \min(M_k) = \min(\delta m \sum_{k=1}^n d_k(i, j) + n \sum_{k=1}^n t_k(i, j)) \quad (9)$$

2.2 状态转移概率的改进

在基本蚁群算法中,蚂蚁会根据轨迹上信息素的量和距离启发信息在节点间转移。设每批蚂蚁有 M 个,蚂蚁共出动 N 批,在 t 时刻,蚂蚁 k 由节点 i 转移到节点 j 的状态转移概率为:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{s \in \text{allowed}_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha [\eta_{is}(t)]^\beta} & j \in \text{allowed}_k \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\tau_{ij}(t)$ 为 t 时刻路径 (i, j) 上的信息素浓度,初始时刻各条路径上的信息素浓度相同,即 $\tau_{ij}(0) = C$ (C 为常数); $\eta_{ij}(t)$ 为启发函数,表示蚂蚁从节点 i 转移到节点 j 的期望程度,其表达式一般为 $\eta_{ij}(t) = 1/d_{ij}$, d_{ij} 表示 2 个节点之间的长度; allowed_k 表示蚂蚁 k 下一步可选择的节点集, α 表示蚂蚁在运动过程中所积累的信息量在轨迹选择中所起的作用,其值越大,对其他蚂蚁的轨迹选择影响越大; β 表示蚂蚁在运动过程中启发信息在轨迹选择中所起的作用,其值越大,启发信息在轨迹选择中越受重视。

基本蚁群算法中的距离启发因子只考虑了飞行器当前所行使的航段长度,采用此启发因子对行驶航线进行诱导时,蚂蚁会以较大的概率因贪图眼前的一小步而偏离终点方向,从而陷入局部最优。因此,本文改进距离启发因子,通过增加目标节点对下一节点的影响来改进状态转移概率,促使蚂蚁向目标方向前进,以节省计算时间,提高优化效率。改进公式为:

$$\eta_{ij}(t) = 1/d_{ij} + d_{jg} \quad (11)$$

式中: d_{jg} 为下一节点 j 到目标节点 g 的直线距离。

2.3 信息素更新

当蚂蚁所行轨迹上残留的信息素过多时,会淹没启发信息的影响,所以在蚂蚁行进过程中需要对信息素进行更新,其更新规则为:

$$\begin{cases} \tau_{ij}(t+n) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \\ \Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\Delta\tau_{ij}(t)$ 为信息素变化量; $\Delta\tau_{ij}^k(t)$ 为蚂蚁 k 经过路段 (i, j) 时留在该路段上的信息素量; ρ 为信息

素蒸发因子。

此外,本文航线规划的目标是在规避威胁源的情况下,使达到航线距离和航程时耗总代价最小,因此对蚂蚁 k 经过路段 (i, j) 时留在该路段上的信息素量 $\Delta\tau_{ij}^k(t)$ 进行改进,更新规则为:

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} Q/M_k & \text{若蚂蚁 } k \text{ 经过路径 } (i, j) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

式中: Q 为信息素浓度常数。

2.4 改进型蚁群算法的实现流程

改进型蚁群算法的实现流程见图 2。

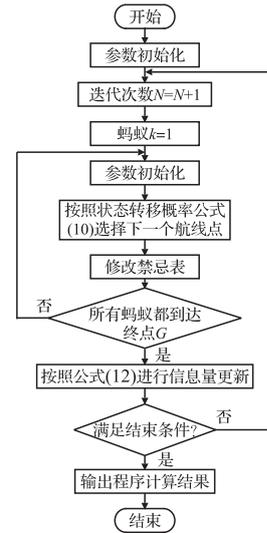


图 2 改进型蚁群算法实现流程图

Fig.2 The program flowchart of improved ACA

3 仿真结果分析

为了验证本文的改进型蚁群算法在航线规划中的性能,选择图 1 所示的规划空间进行仿真实验。将其按照三维网格划分成 50 个 100 m 高的平面体,再把每个平面划分成 40×40 个单元格,每个单元格代表大小为 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ 的实际区域。同时利用文献[2]提出的方法,通过将各种威胁转化为雷达威胁建立模型,以此来处理多威胁种类情况下实时航路规划问题。仿真实验在 matlab2010a 中进行,参数设置见表 1,并假定飞行器在非威胁区的飞行速度为 95 km/h,在威胁区的飞行速度为 85 km/h。选取图 1 中点 O 为出发点,点 G 为目标点,圆形区域为雷达探测范围等威胁区^[10-11]。图 3 为航线规划结果的二维仿真视图,图 4 为航线收敛曲线图。

表 1 改进型蚁群算法参数设置表

Tab.1 Improved ACA parameter

α	β	ρ	p	q	δ	σ	ϕ	Q	M	N
1	7	0.3	1	1	11	1	2	10	50	100

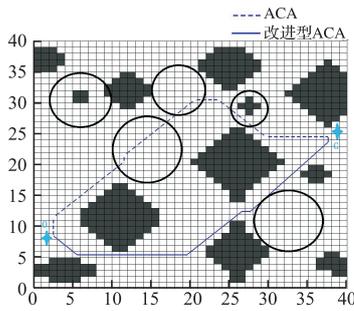


图3 航线规划的二维仿真视图

Fig.3 The two-dimensional simulation view of route planning

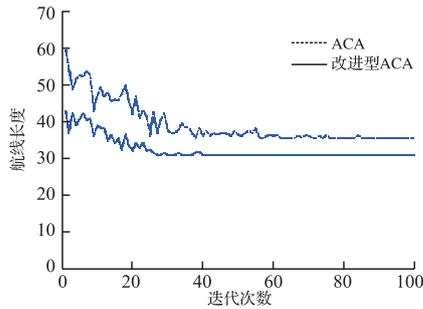


图4 收敛曲线

Fig. 4 The convergence curve

本文通过对比实验,将基本蚁群算法和改进型蚁群算法在所得最优航线长度、航线耗时、算法时间、航线收敛速度等方面进行比较,其仿真结果见表2。本文算法更多地考虑了在规避威胁源的情况下寻求航线长度和航程时耗综合测度的最佳。同时,由于引入了方向启发因子,促使蚂蚁向目标方向前进,从而节省了计算时间,提高了优化效率。

表2 仿真结果对照表

Tab.2 The comparing table of simulation results

算法	最优航线长度/km	航线耗时/min	算法时间/s	收敛速度/次
基本 ACA	26.85	17.43	2.31	62
改进 ACA	23.61	14.91	2.03	40

4 结语

本文对实际复杂环境中综合考虑地形信息和威胁信息的航线规划方法进行了分析,对基本蚁群算法进行改进,通过构建航线规划目标函数,加深了对实际航线复杂环境的描述,提高了航线规划的有效性和可行性;通过增加目标节点对下一节点的影响来改进状态转移概率,提高了算法优化效率。最后通过仿真实验对理论分析进行验证,从实验结果可以看出,本文的改进型蚁群算法达到了提高全局搜索能力、避免陷入局部最优解及提高收敛速度的效果,在一定程度上提高了规划效率和有效性,具有一定的实用价值。

参考文献(References):

[1] 石祥滨,于泳浩,刘东琦,等. 基于A*的快速三维航迹规划

算法[J]. 辽宁大学学报:自然科学版,2012,39(4):295-299.

SHI Xiangbin, YU Yonghao, LIU Dongqi, et al. The Algorithm of 3D - Route - Planning Based on A* [J]. Journal of Liaoning University: Natural Sciences Edition, 2012, 39(4): 295-299. (in Chinese)

[2] 唐上钦,黄长强,胡杰,等. 基于威胁等效和改进 PSO 算法的UCAV 实时航路规划方法[J]. 系统工程与电子技术,2010,32(8):1706-1710.

TANG Shangqin, HUANG Changqiang, HU Jie, et al. Threat Equivalent and Improved PSO Algorithm Based Real-Time Method of UCAV Route Planning[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(8): 1706-1710. (in Chinese)

[3] Eun Y, Bang H. Cooperative Task Assignment /Path Planning of Multiple Unmanned Aerial Vehicles Using Genetic Algorithms[J]. Journal of Aircraft, 2009, 46(1): 38-43.

[4] 段海滨. 蚁群算法原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

DUAN Haibin. Ant Colony Algorithms: Theory and Applications[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)

[5] TANG X, ZHANG P, JIANG B J, et al. Ant Colony Optimization Based on Maximum Selection Probability for Path Planning in Unknown Environment[J]. Journal of Computational Information Systems, 2012, 8(24): 10325-10330.

[6] 刘振峰,谢洪森,危水根. 基于文化蚁群算法的三维飞行器航路规划[J]. 计算机仿真, 2013, 30(5): 99-103.

LIU Zhenfeng, XIE Hongsen, WEI Shuigen. Aircraft 3-D Route Planning Based on Culture - Ant Algorithm[J]. Computer Simulation, 2013, 30(5): 99-103. (in Chinese)

[7] Rongwei Gan, Qingshun Guo, Huiyou Chang, et al. Improved Ant Colony Optimization Algorithm for the Traveling Salesman Problems[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2010, 21(2): 329-333.

[8] 于雷,任波,陈中起,等. 基于数字地图的威胁空间建模与仿真[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(12): 61-63.

YU Lei, REN Bo, CHEN Zhongqi, et al. Modeling and Simulation of the Threaten Space Based on Digital Map[J]. Fire Control & Command Control, 2009, 34(12): 61-63. (in Chinese)

[9] 胡耀民,刘伟铭. 基于改进型蚁群算法的最优路径问题求解[J]. 华南理工大学学报, 2010, 38(10): 105-110.

HU Yaomin, LIU Weiming. Solving of Optimal Path Problem Based on Improved Ant Colony Algorithm[J]. Journal of South China University of Technology, 2010, 38(10): 105-110. (in Chinese)

[10] 华珊珊. 无人机航路自动规划优化方法研究与仿真[J]. 计算机仿真, 2013, 30(4): 45-48.

HUA Shanshan. Research and Simulation of UAV Route Planning Optimization Method [J]. Computer Simulation, 2013, 30(4): 45-48. (in Chinese)

[11] 叶文,廉华耕,漆云海,等. 无人机航路规划算法研究[J]. 光电与控制, 2011, 42(2): 8-12.

YE Wen, LIAN Huageng, QI Yunhai, et al. Path Planning Algorithm for UAV[J]. Electronics Optics & Control, 2011, 42(2): 8-12. (in Chinese)

(编辑:徐敏)