

基于改进精英蚁群算法的无人机三维航迹规划*

袁梦顺,陈 谋*,邵书义,吴庆宪,闫 东

(南京航空航天大学自动化学院,南京 211106)

摘 要:针对三维地图中的无人机航迹规划问题,提出了一种基于改进精英蚁群算法的航迹规划算法。将算法中的状态转移策略与人工势场法进行融合设计,为障碍物和目标点分别设置斥力场和引力场,指导航迹搜索方向。添加约束条件限制,使航迹能实际可飞。随后当信息素更新时,设置双精英蚂蚁策略和混沌扰动,提高算法的全局搜索能力。引入视线算法减少航迹节点数,平滑航迹。仿真结果表明,搜索所得的无人机航迹均符合需求。

关键词:无人机,航迹规划,精英蚁群算法,人工势场法,视线算法

中图分类号:TP391.9

文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.1002-0640.2022.02.007

引用格式:袁梦顺,陈谋,邵书义,等.基于改进精英蚁群算法的无人机三维航迹规划[J].火力与指挥控制,2022,47(2):37-42.

Three Dimensional Path Planning of UAV Based on Improved Elite Ant Colony Algorithm

YUAN Meng-shun, CHEN Mou*, SHAO Shu-yi, WU Qing-xian, YAN Dong

(College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: For unmanned aerial vehicle (UAV) path planning in three-dimensional map, an improved elite ant colony algorithm is proposed. Firstly, the state transfer strategy in the elite ant colony algorithm is designed to be integrated with the artificial potential field method. Repulsion field for obstacles and gravitational field for target points are set respectively to guide the path search direction. Secondly, the UAV constraint limits are added to make the path actually flyable. Then, when the pheromone is updated, the double elite ant strategy and chaos disturbance are set to improve the global search ability of the algorithm. In addition, line of sight algorithm is introduced to reduce the number of path nodes and to smooth the path. The simulation results show that the UAV paths obtained from the search all meet the requirements.

Key words: UAV, path planning, elite ant colony algorithm, artificial potential field method, line of sight algorithm

Citation format: YUAN M S, CHEN M, SHAOSY, et al. Three dimensional path planning of UAV based on improved elite ant colony algorithm[J]. Fire Control & Command Control, 2022, 47(2): 37-42.

0 引言

随着无人机技术的进步,军用和民用无人机已

被广泛应用以完成各种任务,其智能化是目前主要的发展方向之一。航迹规划是无人机智能化进程中的重要部分,也是智能控制与决策方向研究的热

收稿日期:2020-12-13

修回日期:2021-02-23

* 基金项目:国家自然科学基金应急管理项目(61751219);航空科学基金(201957052001);装备预研中国电科联合基金(6141B08231110a);“十三五”装备预研基金资助项目(61425040104)

作者简介:袁梦顺(1996-),男,安徽亳州人,硕士研究生。研究方向:无人机飞行控制技术。

* 通信作者:陈 谋(1975-),男,四川南充人,教授,博士。研究方向:非线性系统控制、智能控制、飞行控制。

点。航迹规划首先需要满足约束条件,然后为无人机规划出符合需求的航迹^[1]。在航迹规划问题求解中,常用的搜索算法有 A* 算法^[2]、快速扩展随机树算法^[3]、群智能算法^[4-5]和人工势场法^[6-7]。

在航迹规划算法中,群智能算法全局搜索能力较强;人工势场法能够对搜索方向进行引导,且搜索出的航迹能够与障碍物保持安全距离。文献[4]提出了精英蚁群算法,算法中的信息素更新规则采用双精英蚂蚁策略,提升了算法的快速性。文献[5]研究了自适应蚁群算法,将蚂蚁搜索方式调整为局部搜索,减少了不必要节点的搜索。人工势场法在地图中设置障碍物斥力场和目标点引力场,文献[6]利用人工势场法能够为无人机规划出一条与障碍物保持安全距离的航迹。文献[7]提出了附加势场概念,避免了人工势场法陷入局部极值。

与二维航迹规划问题不同,三维航迹规划地图空间大、约束条件复杂,需在算法快速性和航迹代价之间作出取舍,以满足实际应用场景。解决三维航迹规划问题时,文献[8]中的群智能算法由于起始搜索阶段的随机性,搜索时间较长。文献[9]中的人工势场法核心为势场函数,需要合理转换后才能应用于三维栅格地图中。

基于以上研究,为了规划出一条安全、平滑且代价较小的航迹,本文提出了一种基于精英蚁群算法的改进算法,通过引入人工势场中的引力场与斥力场,蚂蚁的邻节点搜索限制,双精英蚂蚁策略,以及信息素扩散模型,加快算法的收敛速度。然后将混沌扰动添加到信息素更新规则中,增强算法的全局搜索能力。此外,为了处理规划出航迹转弯角较多的问题,引入视线算法以平滑航迹。仿真结果表明,本文算法规划出的航迹能够满足无人机飞行期望需求。

1 问题描述

无人机航迹规划首先需要满足基础地图、威胁区域和本身物理条件等限制,随后从起始点开始搜索,规划出可以到达目标点的可飞航迹^[10]。规划空间为三维栅格地图,每个栅格在算法中都是一个搜索节点,栅格中心为当前节点的坐标。因此,航迹规划问题可以描述为:在满足约束条件的前提下,从栅格地图节点集合中选择航迹节点,使无人机沿航迹节点飞行时与障碍物保持安全距离,且具有较小的航迹代价。图 1 为二维栅格地图中的航迹规划示意图,图中黑色矩形为障碍物,蓝色圆形为威胁区域。

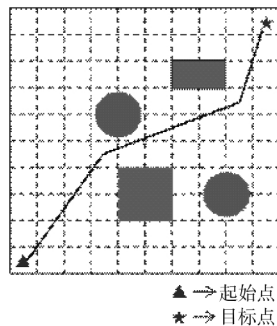


图 1 航迹规划示意图

1.1 约束条件设置

在算法搜索过程中,蚂蚁选择的邻节点必须在无人性能限制范围内,否则不考虑。设置约束条件可以省略不符合约束的邻节点,减少算法运行时间。对于无人机自身性能限制,参考文献[11]中的约束条件,本文主要考虑最大转弯角、最大爬升角、最小相对高度和最远航程约束。对于威胁区域,本文主要考虑导弹威胁区域和天气威胁区域,其中,天气威胁为雷暴和强风等。

1.2 航迹代价函数

在航迹规划中,航迹代价有多种计算公式本文采用的计算公式如下^[12]:

$$\min J = \sum_{i=1}^n k_1 L_i^2 + k_2 G_i^2 + k_3 H_i^2 \quad (1)$$

式中, n 表示航迹段的总数, L_i 表示第 i 段航迹的位置变化值,此项计算长度代价。 G_i 表示进入第 i 段时转弯角度值,此项计算转弯代价。 H_i 表示第 i 段的高度变化值,此项计算高度代价。 k_1 、 k_2 和 k_3 分别为长度代价、转弯代价和高度代价的权重,能够对航迹搜索产生影响,各项权重的取值与实际飞行任务有关。

2 基于改进精英蚁群算法的三维航迹规划

2.1 改进精英蚁群算法基本原理

将精英蚁群算法应用到三维航迹规划中,存在算法运行时间过长和航迹节点数过多等问题,因此,需要对算法进行改进。航迹规划首先需要建立三维栅格地图,在建立地图后,利用算法搜索出可飞航迹。在搜索时,蚂蚁根据邻节点上的信息素浓度选择下一节点, $p_{ab}(t)$ 表示 t 时刻蚂蚁在节点 a 时,选择节点 b 的概率,计算公式为^[13]

$$p_{ab}(t) = \begin{cases} \frac{(\tau_{ab})^\alpha (\eta_{ab})^\beta}{\sum_{b \in S_a} (\tau_{ab})^\alpha (\eta_{ab})^\beta} & b \in S_a \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

式中, τ_{ab} 表示 b 节点上的信息素浓度, 浓度越高, 说明已搜索出的航迹上该节点 b 的出现频率越高。 η_{ab} 表示节点的启发函数计算值, 具体计算方式在后文给出, α 和 β 分别表示信息素浓度和启发函数计算值的权重, S_a 为节点 a 的可达邻节点组成的集合。

算法起始时, 初始化蚁群数量 N 和迭代次数 $Iter$, 蚂蚁从起始点出发, 按照轮盘赌规则选择下一节点, 不断循环, 直至搜索到终点为止。每有一只蚂蚁到达终点, 根据式(1)计算航迹代价, 随后对各节点的信息素浓度进行调整。完成一次迭代时, 对当代蚁群中代价最小的两条航迹进行额外的信息素更新, 即双精英蚂蚁策略, 该策略可以避免蚁群算法过早收敛。

每次迭代完成后, 信息素会同时发生扩散, 即在航迹附近栅格扩散信息素, 可以使算法更快地搜寻到期望航迹, 算法在符合迭代终止条件后, 用视线算法对航迹进行全局优化, 使航迹更加平滑且代价更小, 最后输出满意的航迹。

2.2 三维航迹规划算法具体设计

在应用三维栅格地图进行航迹规划时, 邻节点搜索范围为周围的 26 个栅格, 通过数组索引加减即可访问邻节点。在此基础上, 算法设计主要包括 4 个方面: 启发函数、信息素更新、信息素扩散和航迹优化。

2.2.1 启发函数

传统蚁群算法在初始迭代时, 蚂蚁搜索节点是随机选择下一节点, 算法收敛速度较慢。在栅格地图中, 算法搜索出的航迹可能会与障碍物边缘发生碰撞, 本文引入人工势场法解决这些问题^[14]。

为了使算法快速规划出航迹, 首先为目标点设置引力势场, 节点 b 的引力场值 Att_b 计算公式可表示为

$$Att_b = \frac{1}{d(b, G) - \min d(b, G) + 1} \quad (3)$$

式中, $d(b, G)$ 表示节点 b 与目标点 G 之间的距离, $\min d(b, G)$ 表示节点 b 的所有可达邻节点到目标点距离中的最小值。节点到目标点距离皆为估算, 计算方式为取两节点之间曼哈顿距离。

为了使航迹与障碍物保持安全距离, 为障碍物设置斥力势场。设障碍物 o 对其坐标为圆心, 半径 R 的球体区域产生斥力, 则节点 b 的斥力场值 Rep_b 计算公式如下:

$$Rep_b = \frac{1}{1 + \sum_{o \in S_b} \frac{R}{d(b, o)}} \quad (4)$$

式中, $d(b, o)$ 表示节点 b 到障碍物 o 的距离, 取两节

点之间的欧式距离。 S_b 表示会对节点 b 产生排斥力的障碍节点集合。节点的斥力场值越大时, 越倾向于选择。

综合引力场与斥力场, 得到的启发式函数计算公式可描述为

$$\eta_{ab} = (Att_b)^{\lambda_1} (Rep_b)^{\lambda_2} \quad (5)$$

式中, λ_1 和 λ_2 分别为引力场与斥力场的权重, λ_1 越大, 表示节点离目标点越近, 算法规划速度越快; λ_2 越大, 规划出的航迹越远离障碍物。取 R 的值为 2, 栅格长度为 1, 节点 a 搜索下一节点时, 斥力场与引力场作用效果如图 2 所示, 图中栅格左下角数值为斥力场值, 栅格右上角数值为引力场值, 栅格 a 为当前节点, 黑色栅格为障碍物, 栅格 G 为目标点。为了方便表述, 仅作二维地图说明, 三维地图中规则相同。

					G
0.33	0.5	1			
1	1	1			
0.25	a	0.5			
1		0.29			
0.2	0.25	0.33			
1	0.29	0.16			

图 2 人工势场图

由图 2 分析可知, 节点 a 在选择下一节点时, 倾向于选择斥力场值和引力场值较大的节点, 示意图中为斥力场值和引力场值都等于 1 的节点。

2.2.2 信息素更新

信息素更新时, 航迹节点 a 的信息素会挥发一部分, 则节点 a 在 $(t+1)$ 时刻的信息素浓度计算公式为

$$\tau_a(t+1) = (1 - \rho)\tau_a(t) + \frac{w}{J} + z_t \quad (6)$$

式中, ρ 为挥发系数, $\tau_a(t)$ 为 t 时刻节点 a 的信息素浓度, w 为本次航迹产生信息素的权重, J 为本次航迹的代价, q 为系数, z_t 为混沌扰动变量, 计算公式如下^[15]:

$$z_{t+1} = uz_t(1 - z_t) \quad u \in (2, 4] \quad (7)$$

式中, u 控制参量, 仿真中取 $u=4$ 。

2.2.3 信息素扩散

当蚂蚁搜索到一条可飞航迹时, 航迹节点上的信息素会扩散到临近栅格^[16], 扩散范围为以航迹节点坐标为球心, 半径为 r 的球体区域。节点 a 扩散到节点 b 的信息素 τ_b 可表示为

$$\tau_b = \gamma \varphi(a) \frac{r - d(a, b)}{r} \quad (8)$$

式中, γ 是扩散系数, $\varphi(a)$ 是节点 a 的信息素, $d(a, b)$ 是节点 a 与节点 b 之间的欧式距离。信息素扩散会使可飞航迹附近信息素浓度较快提高, 有利于算法的快速性。仿真时取 r 的值为 2, 信息素扩散模型如图 3 所示, 栅格 a 为航迹节点。

0.29	0.5	0.29
0.5	a	0.5
0.29	0.5	0.29

图 3 信息素扩散模型

根据图 3, 栅格上的数值须与 $\gamma\varphi(a)$ 相乘后, 才可得到节点 a 扩散到节点 b 的信息素 τ_b 。分析可知, 在扩散范围内, 离航迹节点越近的栅格, 扩散的信息素越多。

2.2.4 航迹全局优化

算法中, 蚂蚁搜索邻节点时, 是以栅格为基础的, 所以规划出的航迹中转弯角度为固定角度, 且转弯较多, 需进行全局优化。在全局优化中, 主要运用三维栅格地图中的视线算法^[17], 视线算法在两点之间连接一条直线, 直线经过的栅格无障碍物, 则判定两点是可通视的。利用视线算法, 当判断出两节点可通视, 且省略两节点之间的多余节点后仍满足无人机约束条件, 则将两节点直接相连。航迹优化如图 4 所示, 点虚线为原航迹, 长划虚线为优化后的航迹。

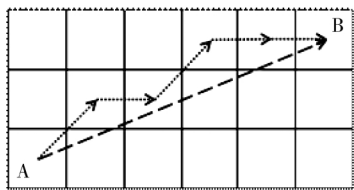


图 4 航迹全局优化

2.3 改进精英蚁群算法流程

基于改进精英蚁群算法的三维航迹规划步骤如下:

1) 初始化地图、信息素浓度矩阵以及参数; 2) 对地图中的障碍物构造斥力场; 3) 将 N 只蚂蚁置于起始点; 4) 每只蚂蚁通过状态转移策略选择下一节点。在邻节点集合中, 蚂蚁会综合考虑引力场、斥力场和信息素浓度信息进行选择。其中, 邻节点集合由符合约束条件的邻节点构成; 5) 所有蚂蚁是否完成搜索, 若否, 则返回到步骤 4), 若是, 则执行下一步; 6) 根据蚂蚁搜索到的航迹对地图节点上的信息素浓度进行更新, 更新规则中添加了混沌扰动; 7) 是否符合迭代终止条件, 若否, 则返回到步骤 3), 若

是, 则执行下一步; 8) 利用视线算法进行航迹全局优化, 输出最终航迹。

算法具体流程图如图 5 所示。

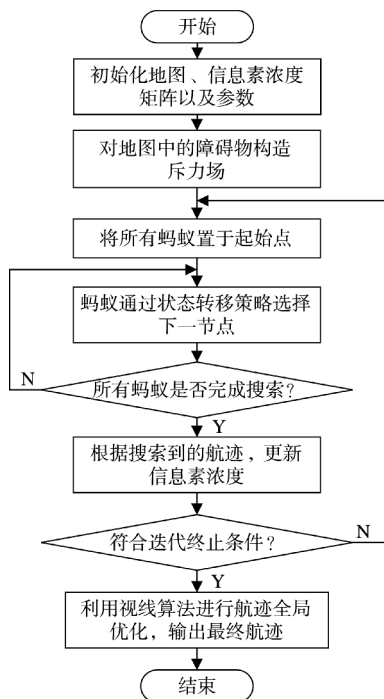


图 5 算法具体流程图

3 仿真结果与分析

为验证算法的有效性, 以 Windows 10 为平台, Python3.6 语言为编程环境进行仿真, 实验的硬件平台为: Intel Core i5 4210M 处理器, 主频 2.6 GHz, 8 GB 内存。在相同硬件平台的条件下, 用不同的地图对本文算法进行了验证。同时, 为了进一步说明本文算法的作用, 进行对比仿真, 分析算法的优点和缺点。

3.1 算法仿真结果

仿真中的主要参数设置为: 蚂蚁数量 $N=30$, 迭代次数 $Iter=30$, 信息素浓度权重 $\alpha=0.9$, 启发函数值权重 $\beta=1.7$, 引力场值权重 $\lambda_1=3$, 斥力场值权重 $\lambda_2=3$, 挥发系数 $\rho=0.3$, 航迹代价权重 $w=4$, 航迹代价的各项权重 $k_1=1, k_2=0.3, k_3=0.4$, 扩散系数 $\gamma=0.2$, 无人机的最大转弯角 $\psi_{\max}=60^\circ$, 最大爬升角 $\theta_{\max}=50^\circ$, 最小相对高度 $h_{\min}=0.1$ km, 最远航程 $L_{\max}=10$ km。

仿真中, 单个栅格长度、宽度和高度均为 100 m。首先在规格为 $64 \times 64 \times 64$ 的栅格地图 1 中, 使用本文算法进行航迹搜索。在地图 1 中, 山峰 1 顶点为 (2.05 km, 1.85 km, 1.15 km), 山峰 2 顶点为 (4.25 km, 2.05 km, 1.55 km), 山峰 3 顶点为 (3.55 km, 4.05 km, 2.05 km)。设定无人机的起始点为 (0.15 km, 0.15 km, 0.25 km), 目标点为 (6.25 km, 6.05 km, 1.45 km)。规

划出的航迹如图 6 所示,其中黑色线段表示规划出的无人机航迹。

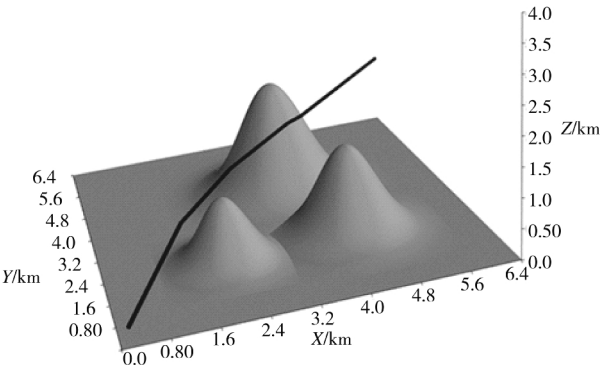


图 6 地图 1 规划航迹

在增加威胁区域后的栅格地图 2 中,使用本文算法进行航迹搜索。球体威胁区域为导弹威胁,球体威胁区域 1 中心为 (1.05 km,0.85 km,0.35 km),半径为 0.3 km;球体威胁区域 2 中心为 (1.05 km,3.05 km,0.55 km),半径为 0.5 km;球体威胁区域 3 中心为 (3.25 km,0.65 m,0.55 km),半径为 0.5 km;球体威胁区域 4 中心为 (3.25 km,3.35 m,0.85 km),半径为 0.3 km。圆柱体威胁区域为天气威胁,圆柱体威胁区域 1 平面中心坐标为 (4.95 km,5.05 km),半径为 0.5 km,高度为 2 km,圆柱体威胁区域 2 平面中心坐标为 (0.95 km,5.35 km),半径为 0.5 km,高度为 1.5 km。搜索起始点和目标点与之前相同,规划出的航迹如图 7 所示。

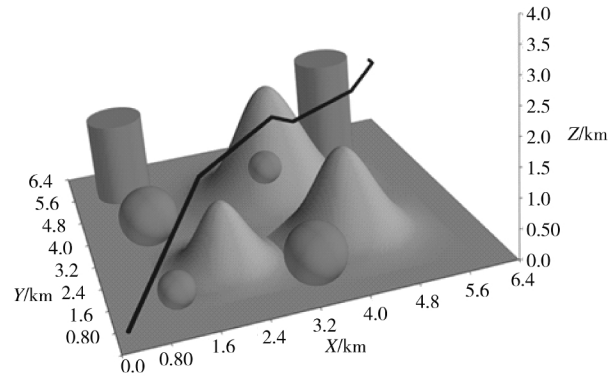


图 7 地图 2 规划航迹

改进精英蚁群算法在不同地图中,规划出航迹的各项指标如表 1 所示。

从不同地图的可视化结果来看,在图 6 中,本文算法规划出的航迹与障碍物能够保持安全距离,且航迹较为平滑。在添加了威胁区域后,图 7 中的航迹能够规避威胁区域,航迹较图 6 有改变,但是航迹仍旧平滑安全。由表 1 中的数据可知,相同规格地图,当地形复杂时,航迹代价和搜索时间都会略有增加。通过不同地图的仿真,在一定时间内均能规划出符合要求的航迹,所以本文算法能够有效

表 1 不同地图航迹数据

本文算法	航程(km)	航迹代价	航迹节点个数	搜索时间(s)
地图 1	8.729	9.589	6	8.756
地图 2	8.942	10.129	7	9.579

解决无人机的航迹规划问题。

3.2 对比仿真结果

在上述规格为 $64 \times 64 \times 64$ 的栅格地图 2 中,搜索起始点和目标点与之前相同,用基础蚁群算法、文献[13]中的改进蚁群算法和本文算法进行对比仿真。文献[13]算法规划出的航迹如图 8 所示。

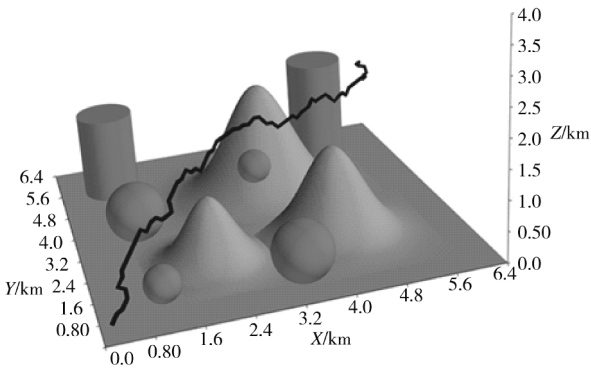


图 8 文献[13]算法规划航迹

不同算法规划出航迹的各项指标如表 2 所示。

表 2 不同算法航迹数据

地图 2	航迹长度(km)	航迹代价	航迹节点个数	搜索时间(s)
基础蚁群算法	14.971	21.373	89	32.768
文献[13]算法	10.590	16.816	70	18.326
本文算法	8.942	10.129	7	9.579

将图 8 与本文算法规划的航迹图比较,本文算法规划出的航迹比较平滑,转弯角较少,符合无人机约束条件,效果较好。分析表 2 数据可知,基础蚁群算法表现较差,算法搜索时间较长,航迹节点数较多,航迹长度较长。因为基础蚁群算法航迹节点之间必须是相邻栅格,所以航迹节点数众多,且算法中没有对目标点的启发函数,所以搜索时间较长。文献[13]算法搜索时间较短,航迹节点数较多,航迹长度略短,因为算法仅添加了启发函数。本文算法航迹代价最小,航迹节点数明显减少,且搜索时间最短。算法的提升在于以下方面,首先将人工势场法与启发函数结合,添加到转态转移策略中,提升了算法快速性;其次通过双精英策略和信息素扩散,进一步减少搜索时间;同时在信息素更新中

加入混沌扰动,增强全局搜索能力;最后利用视线算法进行中间节点的省略,减少了航迹节点数,且降低了航迹代价。

4 结论

本文提出了一种以精英蚁群算法为基础改进的算法,设置斥力场使无人机与障碍物保持安全距离,设置引力场使算法快速规划出期望航迹。在细节方面,设计了算法的启发函数、邻节点搜索、信息素更新、信息素扩散和视线算法。将完成设计的算法应用到三维栅格地图中,最终规划出满意航迹。随后与其他蚁群算法规划出的航迹进行对比,本文算法规划速度较快,航迹平滑,航迹代价小且航迹安全。本文提出的算法为三维静态环境中的航迹规划算法,能够为无人机规划出符合需求的航迹,后续将调整算法中的参数,从而减少算法的运行时间。

参考文献:

- [1] 郑昌文,严平,丁明跃,等.飞行器航迹规划研究现状与趋势[J].宇航学报,2007(6):1441-1446.
- [2] 占伟伟,王伟,陈能成,等.一种利用改进 A* 算法的无人机航迹规划[J].武汉大学学报(信息科学版),2015,40(3):315-320.
- [3] 尹高扬,周绍磊,吴青坡.无人机快速三维航迹规划算法[J].西北工业大学学报,2016,34(4):564-570.
- [4] 汪贵庆,袁杰,沈庆宏.基于精英蚁群算法的交通最优路径研究[J].南京大学学报(自然科学版),2019,55(5):709-717.
- [5] 胡中华,赵敏,刘世豪,等.基于自适应蚁群算法的无人飞行器航迹规划[J].计算机集成制造系统,2012,18(3):560-565.
- [6] 田亚卓,张勇军.基于改进人工势场法的动态环境下无人机路径规划[J].武汉科技大学学报,2017,40(6):451-456.
- [7] 范世鹏,祁琪,路坤锋,等.基于改进人工势场法的巡航导弹自主避障技术[J].北京理工大学学报,2018,38(8):62-68.
- [8] 张楠楠,姜文刚,窦刚.改进蚁群算法在 AUV 三维路径规划中的研究[J].计算机工程与应用,2019,55(11):265-270.
- [9] 卢艳军,李月茹.基于改进人工势场法的四旋翼飞行器航迹规划[J].火力与指挥控制,2018,43(11):119-122,127.
- [10] 杜萍,杨春.飞行器航迹规划算法综述[J].飞行力学,2005,23(2):10-14.
- [11] 丁明跃.无人飞行器航迹规划[M].北京:电子工业出版社,2009.
- [12] 付振秋,季光,杨瑛.改进型蚁群算法的 AUV 三维路径规划[J].舰船科学技术,2018,40(10):72-77.
- [13] 段海滨,王道波,朱家强,等.蚁群算法理论及应用研究的进展[J].控制与决策,2004,19(12):1321-1326,1340.
- [14] 陈余庆,李桐训,于双和,等.基于势场蚁群算法的机器人全局路径规划[J].大连理工大学学报,2019,59(3):316-322.
- [15] 杨帆.基于混沌蚁群算法的无人机航路规划研究及系统实现[D].南京:南京航空航天大学,2018.
- [16] TIAN X, LIU H, GAO M, et al. An improved ant colony algorithm for robot path planning [J]. Soft Computing: A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications, 2017, 21(19): 5829-5839.
- [17] 王志喜,王润云.中点画线算法的三维推广[J].计算机仿真,2004,21(4):40-42,79.

(上接第 36 页)

- system-of-systems scheme generation based on a supernetwork granular analysis [J]. IEEE Systems Journal, 2015(56):1-12.
- [2] 谭跃进,张小可,杨克巍.武器装备体系网络化描述与建模方法[J].系统管理学报,2012,21(6):781-786.
- [3] 李际超,吴俊,谭跃进,等.基于有向自然连通度的作战网络抗毁性研究[J].复杂系统与复杂性科学,2015,12(4):25-31.
- [4] WU J, TAN Y J, DENG H Z, et al. Spectral measure of robustness in complex networks [J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics-Part A: Systems & Humans, 2011, 41(6):1244-1252.
- [5] NAGURNEY A, DONG J. Supernet works: decision-making for the information age [M]. Elgar, Northampton: Edward Publishing, 2002.
- [6] 高翔,吴琳,刘洋,等.基于加权超网模型的武器装备体系效能分析[J].指挥与控制学报,2015,1(2):175-180.
- [7] 王宏宇,吴伟,魏艳艳.基于超网络模型武器装备体系抗毁性分析[J].系统工程与电子技术,2017,39(8):1782-1787.
- [8] 杨迎辉,李建华,沈迪,等.体系作战信息流转超网络结构优化[J].系统工程与电子技术,2016,38(7):1563-1571.
- [9] 刘忠,刘俊杰,程光权.基于超网络的作战体系建模方法[J].指挥控制与仿真,2013,35(3):1-5.
- [10] 胡晓峰,贺筱媛,饶德虎,等.基于复杂网络的体系作战指挥与协同机理分析方法研究 [J]. 指挥与控制学报, 2015, 1(1): 5-13.
- [11] 刘凤增,肖兵,金宏斌,等.预警情报体系超网络建模与分析[J].现代防御技术,2019,47(6):19-26.
- [12] 郭齐胜,郅志刚,杨瑞平.装备效能评估概论[M].北京:国防工业出版社,2005.