

基于 Voronoi 图和量子遗传算法的飞行器航迹规划方法

何兵¹, 刘刚¹, 闫建峰², 黄宁¹

(1. 第二炮兵工程大学, 西安 710025; 2. 中国人民解放军 96251 部队, 河南 洛阳 471003)

摘要: 以飞行器航迹规划为应用背景, 提出一种基于 Voronoi 图和量子遗传算法的飞行器航迹规划方法。首先, 建立威胁源的 V 图, 并构建发射点、目标点与威胁源的 V 图赋权有向图, 从而建立飞行器航迹规划 V 图空间; 然后, 对传统量子遗传算法进行改进, 引入了量子门旋转角步长动态调整机制; 并增加了量子交叉操作和量子变异操作, 使得改进后的量子遗传算法具有更高的搜索效率, 采用改进后的量子遗传算法求解 V 图空间中的最优航迹; 最后, 进行了仿真实验。仿真结果表明, 基于 V 图和量子遗传算法的航路规划方法是可行和有效的。

关键词: 航迹规划; 量子计算; 量子遗传; Voronoi 图

中图分类号: V323

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2013)01-0005-04

A UAV Route Planning Method Based on Voronoi Diagram and Quantum Genetic Algorithm

HE Bing¹, LIU Gang¹, YAN Jianzheng², HUANG Ning¹

(1. The Secondary Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;

2. No. 96251 Unit of PLA, Luoyang 471003, China)

Abstract: A new route planning method is proposed, which adopts the quantum genetic algorithm based on the Voronoi Diagram (VD). Firstly, the Voronoi diagram space of the aircraft was established by building up the Voronoi diagrams of start point, target point and threats. Secondly, some improvements was made to the traditional quantum genetic algorithm, such as introducing dynamic changing mechanism of quantum gate rotating, adding quantum crossover operation and quantum mutation operation, to make it had better searching efficiency. Simulation was made and the results of route planning using the Improved Quantum Genetic Algorithm (IQGA) were given. The simulation results show that the IQGA-VD has better convergence speed and searching efficiency than the GA-VD algorithm.

Key words: route planning; quantum computing; quantum genetic algorithm; Voronoi diagram

0 引言

飞行器航迹规划是指在综合考虑飞行器到达时间、油耗、威胁、飞行环境以及飞行任务等因素的前提下, 寻找飞行器从发射点到目标点满足多种性能指标的满意航迹^[1]。飞行器航迹规划由于规划空间大、约束条件多、规划时效性强等原因, 对航迹规划方法提出了很高的要求。航迹规划主要包括规划空间构建和航迹搜索算法两个方面。规划空间的主要构造方法有基于单元分解的方法、人工势场法和基于路线图的规划

方法, 其中, 基于路线图的规划方法主要有通视图法、Voronoi 图(简称 V 图)法和随机路线图法等。在搜索方法上主要有确定型搜索算法和随机型搜索算法。其中: 确定型搜索算法主要包括 A*、稀疏 A*、D*、Dijkstra 算法、Dynamic A* 和动态规划方法; 随机型搜索算法主要有遗传算法、蚁群算法、模拟退火算法、神经网络和粒子群算法等^[1-2]。V 图^[3]由于其特有的简易性, 近几年来在航迹规划中得到了广泛的应用, 目前针对 V 图空间主要采用 Dijkstra 算法、遗传算法^[4]和蚁群算法^[5]求解策略。采用 Dijkstra 算法的确定性搜索方法随着 V 图空间的增大, 搜索效率大大下降, 而基于遗传算法和蚁群算法的航迹规划也存在易陷入局部最优的缺点。量子遗传算法^[6](Quantum Genetic Algorithm, QGA)是一种将量子计算理论与进化算法相结

收稿日期: 2011-11-09

修回日期: 2012-10-18

基金项目: 国防“十二五”预研基金(51322010601)

作者简介: 何兵(1983—), 男, 湖北宜昌人, 博士生, 研究方向为飞行器任务规划。

合的新型概率搜索优化算法,该算法用量子位编码表示染色体,用量子门更新完成进化搜索,具有种群规模却不影响算法性能、收敛速度快和全局搜索能力强等特点,近年来受到了国内外研究人员的广泛关注^[7-8]。文献[9]已将量子遗传算法引进到无人飞行器的航迹规划中,但其针对的是栅格空间的航迹规划,存在规划空间大的问题,文中将量子遗传算法引入基于V图空间的航迹规划中,并对量子遗传算法采取了一些改进措施。本文的研究为飞行器航迹规划提供了一种新的思路。

1 基于V图的航迹规划空间描述

基于V图的航迹规划环境描述,是将敌方雷达位置和防空导弹阵地等威胁源作为V图中的母点 $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$,以任意相邻两点的中垂线组成V图的边,对规划环境进行描述。图1所示为14个威胁点基于V图的规划环境描述。其中:黑色实线为V图的边,代表飞行器通过两个威胁源之间威胁度最小的可行航迹;V图中各条边的交点(图中红色圆圈)为飞行器飞行航迹的导航点;黑色粗实线为从发射点S到目标点G之间的一条可行航迹。

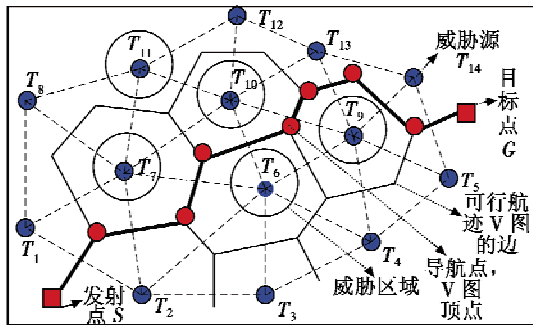


图1 基于V图的规划空间描述

Fig. 1 The description of route planning space based on the Voronoi diagram

在构造V图时,发射点和目标点不在母点范围之内。为简化起见,将发射点和目标点分别与其几何距离最近的3个节点相连,这样使发射点和目标点与威胁场V图形成一个从起点到目标点的有向图。

飞行器航迹规划就是要寻找飞行代价最小的航迹。航迹规划主要考虑两方面的代价:一是飞行器的航程代价;二是飞行器的威胁代价。因此,V图每一条边的代价由航程代价和威胁代价两部分构成。参考文献[4-5],V图的每一条边 P_{ij} 的代价计算如下。

设V图中的边 P_{ij} 的两端顶点分别为 $N_i(x_i, y_i)$, $N_j(x_j, y_j)$ 。

1) 航程代价。

$$C_{D_{ij}} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (1)$$

2) 威胁代价。

威胁代价与V图中的边 P_{ij} 和威胁源(母点)的位置和威胁强度相关。飞行器在航迹 P_{ij} 段(V图的边 P_{ij})的威胁代价等于各个威胁点 $T_i (i = 1, 2, \dots, M)$ 对该段航迹的威胁代价之和。考虑到雷达的探测能力与目标体距雷达的距离的四次方成反比,则飞行器在空间中某一点 x 受威胁点 T_i 的威胁指数 $f_{T_i}(x)$ 主要与飞行器和威胁点间的距离 $r_{T_i}(x)$ 有关,具体计算公式为

$$f_{T_i}(x) = \begin{cases} 0, & r_{T_i}(x) > R_{T_i} \\ K_i / r_{T_i}^4(x), & r_{T_i}(x) \leq R_{T_i} \end{cases} \quad (2)$$

式中: K_i 为第 T_i 个威胁源的威胁强度; R_{T_i} 为威胁源 T_i 的有效作用范围。

在计算航迹 P_{ij} 段的总威胁中,为了计算简便,通常选择航迹段 P_{ij} 的若干点进行计算,然后取平均值。参考文献[3,10],文中取航迹段上1/5,2/5,1/2,3/5,4/5处5个点计算平均威胁代价值,再乘以该航迹段受威胁影响的长度 l_{ij} 。因此,飞行器沿某一航迹段 P_{ij} 飞行的威胁代价为

$$f_{P_{ij}} = \frac{1}{5} l_{P_{ij}} \cdot w_T \cdot \sum_{n=1}^M K_n \left(\frac{1}{d^4(P_{(ij,1/5)}, T_n)} + \frac{1}{d^4(P_{(ij,2/5)}, T_n)} + \frac{1}{d^4(P_{(ij,1/2)}, T_n)} + \frac{1}{d^4(P_{(ij,3/5)}, T_n)} + \frac{1}{d^4(P_{(ij,4/5)}, T_n)} \right) \quad (3)$$

式中: $d(P_{(ij,1/5)}, T_n)$ 为航迹段 P_{ij} 上1/5点距离威胁点 T_n 的距离; K_n 表示威胁源 T_n 的威胁强度; w_T 表示系数,用于控制威胁代价值的变化范围,目的在于将威胁代价值变换到与距离代价值同一数量级范围内,便于后续比较。

因此,航迹段 P_{ij} 的总代价值为

$$C_{P_{ij}} = w C_{D_{ij}} + (1 - w) f_{P_{ij}} \quad (4)$$

式中, w 表示航程代价和威胁代价之间的权重因子。 w 值越大,表示航程代价越重要,反之,威胁代价重要。

2 改进量子遗传算法

2.1 基本量子遗传算法

1) 量子比特。

一个量子比特的状态可以取值0或1,其状态可以表示为

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (5)$$

在量子遗传算法中,使用一种基于量子比特的编码方式,即用一对复数定义一个量子比特位。复数 α 和 β 为0态和1态的概率幅, $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$, $|\alpha|^2$ 和 $|\beta|^2$ 分别给出了量子位取0和取1的概率。

2) 量子观测。

量子观测是将量子染色体转化为某一个问题的过程。量子观测过程如下：生成一个均匀分布的随机数 $r = \text{rand}(0, 1)$ ，如果 $r \leq \alpha_i^2$ ，则问题解个体第 i 位基因 $x_i = 0$ ，否则 $x_i = 1$ ，对其他各位都进行同样的量子观测操作。

3) 量子更新。

量子遗传算法采用量子旋转门作用于量子位进行染色体的更新，量子遗传算法大多采用量子旋转门实现种群的更新操作，其一般形式为

$$U(\theta_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中： θ_i 为旋转角， $\theta_i = S(\alpha_i, \beta_i) \cdot \Delta\theta$ ； $S(\alpha_i, \beta_i)$ 和 $\Delta\theta$ 分别为旋转角的旋转方向和角步长。

2.2 量子遗传算法改进策略

基于量子位编码和通用量子门更新策略，对基本量子遗传算法提出了一些改进措施：1) 采用量子门旋转角步长动态调整机制；2) 增加量子交叉操作，使得量子遗传算法能在短时间内搜索到优良解空间；3) 通过采用量子变异操作，增加种群的多样性，避免陷入局部最优。

1) 旋转角步长动态调整机制。

在基本量子遗传算法中，量子门旋转角步长是固定不变的。随着量子进化过程的进行，量子步长更新应逐渐减小，以增加解的精确性。参考文献[8, 11]给出了 $\Delta\theta_i$ 的一种具体实现形式为

$$\Delta\theta_i = 0.025\pi \left[1 - k \frac{G}{G_{\max} + 1} \right] \quad (7)$$

式中： G 为当前的进化代数； G_{\max} 为最大进化代数； k 为 $[0, 1]$ 之间的常数。

2) 引入量子交叉策略。

引入量子交叉操作，充分利用所有染色体的信息以产生更多的新解，从而提高算法的搜索能力。利用量子相干特性采用文献[12]所设计的一种量子交叉操作，在这种交叉中，所有个体均参与交叉操作，过程如下：

① 为种群中的全部个体随机编号；

② 取第 1 个个体的第 1 个量子基因作为新个体的第 1 个量子基因，取其相邻个体的第 2 个量子基因作为新个体的第 2 个量子基因，循环往复，直到新个体具有相同的基因数；

③ 以此类推，直到新的种群具有相同的规模。

量子交叉可以充分利用种群中尽可能多的染色体信息，改进普通交叉的局部性与片面性，在种群进化出现早熟时，能够产生新个体。

3) 量子变异策略。

变异在进化算法中的作用是产生新个体，以提高种群多样性。采用单点变异方式进行量子变异操作，具体过程描述如下：以一定概率选择种群中的个体；为选中的个体随机选择一位或者几位量子比特作为变异位；然后互换变异位概率幅。

上述改进策略通过引入动态调整量子门旋转角步长机制加快了算法的收敛速度，通过采用量子交叉操作，充分利用量子态的干涉性，使算法具有更加优良的寻优性能，同时采用量子变异算子，能有效防止算法早熟。

3 基于 V 图和量子遗传算法的飞行器航迹规划

3.1 航迹编码和种群初始化

基于 V 图的飞行器航迹规划中，航迹点为顶点，航迹段为边，因此，个体染色体的一种很自然的表示方式为：基于 V 图的飞行器飞行航迹映射为个体染色体，构成航迹的 V 图顶点的编号 ID 映射为染色体的基因位。以非负整数数组表示染色体，飞行器航迹通过染色体中各个 ID 所代表的 V 图顶点的顺序连接而成，编码方式对染色体每一个基因位采用整数编码，分别指代规划环境中的导航节点 p_i 。其中， p_i 为导航节点编号 ID (V 图顶点的编号) 且每一条染色体中各基因位的编码不得重复，即保证规划环境中任一导航点被访问次数小于或等于一次，染色体的第一个基因位和最后一个基因位始终为发射点 S 和目标点 G 。航迹个体染色体编码为 $P = \{S, p_1, p_2, \dots, p_m, G\}$ ，其长度为 $m + 2$ 。设初始种群 Q 为 $\{q_1, q_2, \dots, q_N\}$ ，其中： N 为种群规模大小 (即航迹条数)； q_k ($k = 1, 2, \dots, N$) 为种群中包含的航迹。每一条航迹被看作一个染色体，航迹中每个节点的位置对应一个基因。航迹 q_k 的量子比特编码为

$$q_k = \begin{bmatrix} \alpha_{1,1} & \alpha_{1,2} \cdots \alpha_{1,n} & \alpha_{2,1} & \alpha_{2,2} \cdots \alpha_{2,n} \cdots \alpha_{m,1} & \alpha_{m,2} \cdots \alpha_{m,n} \\ \beta_{1,1} & \beta_{1,2} \cdots \beta_{1,n} & \beta_{2,1} & \beta_{2,2} \cdots \beta_{2,n} \cdots \beta_{m,1} & \beta_{m,2} \cdots \beta_{m,n} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中： m 表示航迹包含的节点个数； n 表示航迹中每个节点里包含的量子比特个数。

3.2 量子门调整策略

参考文献[8, 11-12]设计的旋转角调整策略如表 1 所示。首先，从当前个体 x (航迹) 中随机抽取一个基因 i ，然后结合该基因量子比特 $[\alpha_{i,j}, \beta_{i,j}]^T$ 及其观察值 x_i ，比较当前个体 x 和当前最优个体 b 的适应度函数值来确定量子门旋转方向，旋转角步长 $\Delta\theta_i$ 的取值按照式(7)执行。

表1 量子旋转门策略

Table 1 The strategies of quantum gate rotating

x_i	b_i	$f(x) \geq f(b)$	θ	$\alpha\beta > 0$	$\alpha\beta < 0$	$\alpha = 0$	$\beta = 0$
0	0	true/false	0	0	0	0	0
0	1	false	0	0	0	0	0
0	1	true	$\Delta\theta_i$	-1	+1	± 1	0
1	0	false	$\Delta\theta_i$	-1	+1	± 1	0
1	0	true	$\Delta\theta_i$	+1	-1	0	± 1
1	1	true/false	$\Delta\theta_i$	+1	-1	0	± 1

3.3 改进量子遗传算法描述

通过上述分析,改进量子遗传算法(Improved Quantum Gene Algorithm, IQGA)描述如下:

- 1) $T=0$,初始化种群 $Q(t)$;
- 2) 量子观察,由 $Q(t)$ 生成 $P(t)$;
- 3) 对观察态 $P(t)$ 进行评估;
- 4) 保留最佳个体,判断是否满足终止条件,若满足,算法终止,否则执行5);
- 5) 根据式(7)和表1计算量子旋转门的旋转角大小和方向,并用式(6)的量子旋转门作用于种群中所有个体的量子位,即更新 $Q(t)$;
- 6) 量子交叉操作;
- 7) 量子变异操作;
- 8) $T=T+1$,算法转至2)继续执行,直到算法结束。

4 仿真与分析

基于以上思想和方法,在实验室环境下,对基于V图和量子遗传算法的飞行器航迹规划方法进行仿真试验。计算机硬件环境为 Intel (R) Core (TM) i5; CPU M430,2.27 GHz,1.18 GHz; 内存为1.92 GB;计算机软件环境为 Windows XP 操作系统,仿真软件为 Matlab7.1。

仿真初始条件:规划空间为1000 km × 1000 km,发射点 $S = (-50 \text{ km}, -50 \text{ km})$,目标点 $G = (950 \text{ km}, 950 \text{ km})$,随机产生若干威胁点分布,威胁点强度随机取值,威胁点强度取值范围为0~10之间的整数,威胁区作用半径随机取值,作用半径取值范围为0~200 km,种群规模 $N_{size} = 100$,最大进化代数400,交叉概率 $p_c = 0.5$,变异概率 $p_m = 0.1$,代价函数权值参数 $\omega = 0.6$ 。试验中,将本文所研究的基于V图空间的改进量子遗传算法(Improved Quantum Genetic Algorithm Based on Voronoi Diagram, IQGA-VD)和采用基于V图空间的常规遗传算法(Genetic Algorithm Based on Voronoi Diagram, GA-VD)进行对比试验。

从表2中可以观察到,采用IQGA-VD算法比常规的GA-VD算法可以获得更小的目标函数代价,即可获得更加优良的航迹,IQGA-VD比GA-VD算法在优化性

能上大概可以提高5%左右,同时,在规划时间上IQGA-VD算法优于GA-VD方法,并且威胁数目越多,V图空间越大,节省时间的效果越明显。

表2 IQGA-VD与GA-VD算法仿真结果对比表

Table 2 The simulation results of route planning using the IQGA-VD and GA-VD

次 数	威胁数	目标函数代价值 f				规划时间 T/s		
		f_{GA-VD}	$f_{IQGA-VD}$	Δf	$\Delta f/f_{GA-VD}/\%$	T_{GA-VD}	$T_{IQGA-VD}$	ΔT
1	30	1508.6	1452.8	55.8	3.70	4.4	3.9	0.5
2	30	1425.2	1357.3	67.9	4.76	4.3	3.8	0.5
3	30	1475.8	1398.4	77.4	5.24	4.3	3.9	0.4
4	50	1825.4	1738.3	87.1	4.77	6.2	5.4	1.2
5	50	1785.7	1703.4	82.3	4.61	6.3	5.2	1.1
6	50	1922.4	1774.6	107.8	5.61	6.2	5.0	1.2
7	100	2325.4	2212.6	112.8	4.85	16.6	12.7	4.1
8	100	2385.6	2278.3	107.3	4.50	15.8	12.0	3.8
9	150	2834.2	2687.4	146.8	5.18	22.7	15.9	6.8
10	150	2786.5	2652.3	134.2	4.82	23.3	16.1	7.2

图2所示为分别采用IQGA-VD方法和GA-VD方法的航迹规划效果图,图3所示为分别采用IQGA-VD和GA-VD方法进行航迹规划的目标函数代价值变化图,从图中可以观察到,采用IQGA-VD方法的航迹规划目标函数代价值较小,且收敛速度快。

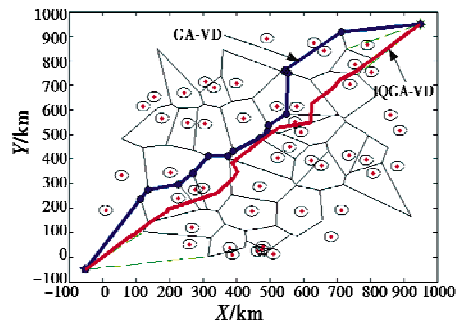


图2 IQGA-VD方法和GA-VD方法航迹规划效果对比图

Fig. 2 The route planning diagram using IQGA-VD and GA-VD

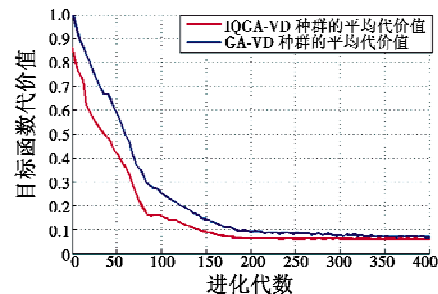


图3 IQGA-VD、GA-VD航迹规划目标函数代价值变化图

Fig. 3 The changing diagram of function cost value using IQGA-VD and GA-VD

能观测到目标的情况下,应该取尽量小的簇首能量阈值和尽量大的距离阈值。

3 结论

本文在考虑节点剩余能量和节点探测到目标信号强度的基础上,提出了一种面向目标跟踪的 WSN 动态分簇方法。由于在簇首选择时考虑了节点的剩余能量,因此可以有效地避免簇首节点能量不足导致的跟踪失败。另外,本文方法既能保证各个节点均衡地担任簇首节点,又能避免簇首切换过于频繁,因此可以减少能耗,延长网络的使用寿命。通过计算机仿真表明,在满足簇首节点能量和簇内节点大部分能观测到目标的情况下,应该取尽量小的簇首能量阈值和尽量大的距离阈值。本文只是对分簇方法进行了初步的分析,下一步将结合目标跟踪算法对 WSN 的分布式目标跟踪做进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] CHONG C Y, KUMAR S P. Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges[J]. Proc. of the IEEE, 2003, 91(8):1247-1256.
- [2] CULLAR D, ESTRIN D, STRVASTAVA M. Overview of sensor network[J]. Computer, 2004, 37(8):41-49.

- [3] LI D, WONG K D, HU Y H, et al. Detection, classification, and tracking of targets[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 19(2):17-29.
- [4] CHEN Weipeng, HOU J C, SHA L. Dynamic clustering for acoustic target tracking in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(3):258-271.
- [5] 邓克波. 基于无线传感器网络的能量有效的目标探测、定位与跟踪技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2009.
- [6] LIU J, REICH J, ZHAO F. Collaborative in-network processing for target tracking[J]. Journal on Applied Signal Processing (EURASIP), 2003, 23(4):378-391.
- [7] 王睿, 梁彦, 潘泉, 等. 无线传感器网络信息感知中的自组织算法[J]. 自动化学报, 2006, 32(5):829-833.
- [8] 周红波, 邢昌凤, 耿伯英, 等. 基于粒子滤波的无线传感器网络分布式目标跟踪研究[J]. 传感技术学报, 2010, 23(2):274-278.
- [9] 邓克波, 刘中. 基于无线传感器网络动态簇的目标跟踪[J]. 兵工学报, 2008, 29(10):1197-1202.
- [10] 王睿. 面向目标感知的无线传感器网络自组织技术[D]. 西安:西北工业大学, 2007.
- [11] SHENG X H, HU Y H. Maximum likelihood multiple-source localization using acoustic energy measurements with wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(1):44-53.

(上接第 8 页)

综合观察,采用 IQGA-VD 方法进行航迹规划的效果要优于 GA-VD 方法,其主要原因是 IQGA-VD 算法采用了量子编码,并且采用了多种进化策略,使得算法在全局最优性和规划时间上都具有一定的优势。

5 小结

以飞行器航迹规划为应用背景,首先基于 V 图构建航迹规划空间,采用当前在优化领域广泛使用的量子遗传算法进行规划,并针对传统遗传算法的不足,引进了量子门旋转角动态调整机制,借鉴遗传算法的交叉和变异思想,引入了量子交叉和量子变异策略,通过综合比较和仿真说明了文中改进的量子遗传算法取得了更好的实验效果,对飞行器航迹规划的进一步发展具有一定的促进作用。

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, 28(6):1141-1146.
- [2] 王维平, 刘娟. 无人飞行器航迹规划方法综述[J]. 飞行力学, 2010, 28(2):6-10.
- [3] 刘振, 史建国, 高晓光. Voronoi 图在航迹规划中的应用

- [J]. 航空学报, 2008, 29(B05):15-19.
- [4] 彭建亮, 戴通伟, 孙秀霞, 等. 基于 Voronoi 图和遗传算法的航迹规划[J]. 电光与控制, 2009, 16(3):9-12.
- [5] 何艳萍, 张安, 刘海燕. 基于 Voronoi 图与蚁群算法的UCAV 航路规划[J]. 电光与控制, 2009, 16(11):22-25.
- [6] NARAYANAN A, MOORE M. Quantum inspired genetic algorithms[C]//Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Evolutionary Computation, 1996:61-66.
- [7] 王凌. 量子进化算法研究进展[J]. 控制与决策, 2008, 23(12):1321-1326.
- [8] XIONG Y, CHEN H H, MIAO F Y, et al. A quantum genetic algorithm to solve combinatorial optimization problem[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(11):1855-1858.
- [9] 钱洁, 郑建国, 张超群, 等. 量子进化算法研究现状综述[J]. 控制与决策, 2011, 26(3):321-326.
- [10] 刘森琪, 段海滨, 余亚翔. 基于 Voronoi 图和蚁群优化算法的无人作战飞机航路规划[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(21):5935-5939.
- [11] 邢焕来, 潘炜, 邹喜华. 一种解决组合优化问题的改进型量子遗传算法[J]. 电子学报, 2007, 35(10):1999-2002.
- [12] 孙阳光, 丁明跃, 周成平, 等. 基于量子遗传算法的无人飞行器航迹规划[J]. 宇航学报, 2011, 31(3):648-654.