

doi: 10.7690/bgzdh.2022.06.014

基于改进 GA 的多机舰面转运规划

韩啸华¹, 黄葵¹, 朱兴动², 范加利¹, 王正¹

(1. 海军航空大学青岛校区舰面航空保障与场站管理系, 山东 青岛 264001;

2. 海军航空大学岸防兵学院, 山东 烟台 266041)

摘要: 针对复杂环境下的多舰载机舰面同时转运避碰规划问题, 提出基于遗传算法的路径规划方法。分析多机同时转运问题, 设计目标函数和约束条件; 建立舰载机碰撞检测计算公式、基于交通规则等的停策略和重规划策略、非均匀有理 B 样条 (non-uniform ration B-spline, NURBS) 平滑策略; 通过遗传算法对不同数量舰载机同时转运场景进行仿真。仿真试验结果表明: 该方法在复杂环境下能有效规划出转运路径, 可靠性好、适航性强, 能为多机舰面同时转运提供科学有效的决策方法。

关键词: 多舰载机; 同时转运; 遗传算法; 非均匀有理 B 样条; 交通流量

中图分类号: TJ85 **文献标志码:** A

Multi-aircraft Shipboard Transfer Planning Based on Improved Genetic Algorithm

Han Xiaohua¹, Huang Kui¹, Zhu Xingdong², Fan Jiali¹, Wang Zheng¹

(1. Department of Ship Surface Aviation Support and Station Management,
Qingdao Campus of Naval Aviation University, Qingdao 264001, China;

2. School of Coastal Defense, Naval Aviation University, Yantai 266041, China)

Abstract: A genetic algorithm based path planning method is proposed to solve the collision avoidance planning problem of multiple carrier-based aircrafts in complex environment. The problem of multi-machine simultaneous transshipment is analyzed, and the objective function and constraints are designed; the calculation formula of carrier-based aircraft collision detection, the stop-waiting strategy and re-planning strategy based on traffic rules, and the non-uniform ration B spline (NURBS) smoothing strategy are established; the simultaneous transfer scenarios of different numbers of carrier-based aircraft are simulated by genetic algorithm. The simulation results show that the method can effectively plan the transfer path in the complex environment with good reliability and airworthiness, and can provide a scientific and effective decision-making method for the multi-aircraft shipboard simultaneous transfer.

Keywords: multi-carrier-based aircraft; simultaneous transfer; genetic algorithm; NURBS; traffic flow

0 引言

舰载机在甲板上的转运策略直接影响其出动能力, 进而影响航母群战斗能力^[1-2]。根据任务需求, 舰载机需要在飞行甲板上成批次同时出动, 如何在障碍密集、空间狭小的条件下合理地同时规划舰载机出动路径、提高转运效率, 是实现舰载机自动牵引的核心问题。

舰载机舰面转运问题可看作是 2 维平面内多机器人路径规划问题, 文献[3]建立了以最小化时间为目标函数的多机转运模型, 并采用粒子群算法进行了求解, 但其仅考虑了 2 个中间节点的路径方案, 当舰载机数量较多时, 转运成功率较低。文献[4]在多目标协同优化任务中, 利用稀疏 A*算法获取初始航路点信息, 并通过遗传算法获取可行的航路点,

虽然实现了目标最优化航路规划, 但其未考虑到多机之间的碰撞问题。文献[5]提出了一套适用于多机器人协同运行的交通规则, 并通过引入车辆交通流量理论说明了多机交通模型的优势。该模型仅适用某些特定地图, 但其理论仍可借鉴参考。

综上, 笔者针对多舰载机舰面转运过程, 建立多机转运目标函数以及多机避碰模型, 基于 GA 算法和交通规则对目标函数求解, 得出转运规划方案。此模型也可用来求解其他具有类似约束的不规则目标路径规划。

1 多机转运模型

1.1 转运描述

舰载机在转运过程中, 当初始位置和目标位置

收稿日期: 2022-02-27; 修回日期: 2022-03-26

作者简介: 韩啸华(1998—), 男, 河北人, 硕士, 从事指挥自动化研究。E-mail: 912153428@qq.com。

确定后，应按照一定的转运原则做出规划方案。以 3 架舰载机转运为例，其转运过程如图 1 所示。

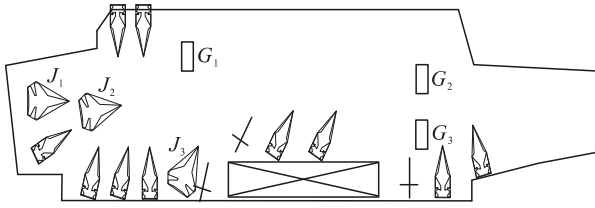


图 1 3 机转运过程

上图中： J_1 、 J_2 、 J_3 为 3 架转运舰载机， G_1 、 G_2 、 G_3 为目标位置，其余舰载机可视为障碍物。可以看出，3 架舰载机转运到 3 个目标位置，理论上有多种规划方案，但由于空间狭小，转运需要考虑到避碰等因素；因此，需要建立舰载机避碰模型和基于交通规则避让策略，来保证舰载机可以安全转运到目标位置。为提高舰载机出动效率，转运应当按照总时间最短的原则，故需建立时间约束的转运模型。

1.2 多机转运模型

根据上述作业流程，现提出以下假设。

1) 舰载机在转运时通常是由牵引车转运，但牵引车相较于舰载机较小，故忽略牵引车，简化牵引系统的转运模型。

2) 舰载机在转运过程中一般以加速-匀速-减速的形式进行移动，但其速度较小，故假设牵引作业速度匀速。

3) 以舰载机几何中心为参考点进行路径规划。

根据上述假设，给出目标函数和约束条件。

目标函数表示为：

$$F = \min \left\{ \sum_{i=1}^N \left[\min_{j=1}^M [T_i(A_j)] \right] \right\};$$

$$A_j = (a_{j_1}, a_{j_2}, \dots, a_{j_n}) = ((x_{j_1}, y_{j_1}), (x_{j_2}, y_{j_2}), \dots, (x_{j_n}, y_{j_n}));$$

$$i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, M. \quad (1)$$

约束条件表示为：

$$\left. \begin{aligned} a_{j_1} &= a_0 = (x_0, y_0) \\ a_{j_n} &= a_n = (x_n, y_n) \\ a_{j_n} &\notin D_{obs} \end{aligned} \right\}; \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} l_{ij} &\geq l_{min} \\ \sum l_{ij} &\leq l_{max} \end{aligned} \right\}; \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta_{j_n}^T \Delta_{j_{(n+1)}}}{(\|\Delta_{j_n}\| \cdot \|\Delta_{j_{(n+1)}}\|)} &\geq \cos \phi \\ \phi &\leq \phi_{max} \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

式中： F 为在确保安全的前提下，多机转运总时间最短的路径方案； N 为转运舰载机数量； M 为第 M 条路径； $T_i(A_j)$ 为舰载机 i 的第 j 条路径所用时间； a_{j_n} 为第 j 条移动路径中第 n 个节点，其坐标为 (x_{j_n}, y_{j_n}) ； a_0 为路径起止点； a_n 为路径目标点； D_{obs} 为障碍区域；对于路径节点 n 的选值，应考虑到路径起点、终点和舰载机转运步长 l_{ij} ； l_{min} 为舰载机每次移动的最小路径段长度； l_{max} 为舰载机移动路径最大长度； Δ_{j_n} 为第 j 条路径的第 n 个路径段向量，即 $\Delta_{j_n} = (x_{j_n} - x_{j_{(n-1)}}, y_{j_n} - y_{j_{(n-1)}})$ ； $\|\Delta_{j_n}\|$ 为向量 Δ_{j_n} 的长度； ϕ 为舰载机转向角； ϕ_{max} 为舰载机最大转向角。

式(1)给出了时间目标函数；式(2)给出了路径起点、路径终点和障碍区域，对于全局规划过程来说，起点、终点和障碍区域是已知的；式(3)约束了舰载机每次移动时的步长，避免舰载机频繁转向；式(4)约束了舰载机的转向角，给出最大转向角，避免舰载机转弯角度过大。

2 舰载机避碰模型

2.1 舰载机轮廓描述

舰载机在飞行甲板转运过程中，需根据任务要求在展翼和收翼状态中进行切换，因此笔者对舰载机 2 种状态的轮廓进行描述。为降低模型复杂度，在包含舰载机轮廓且不损失较多有效空间的前提下，引入如图 2 所示的包围盒^[6]进行描述。

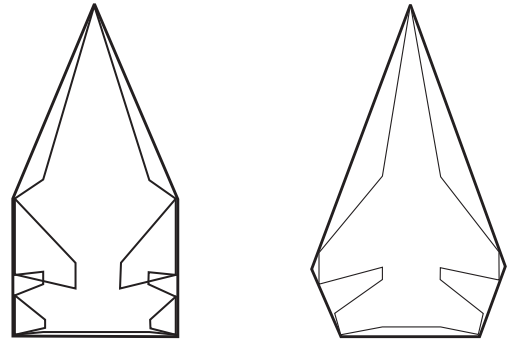


图 2 舰载机轮廓描述

2.2 多机距离推导

由包围盒描述的舰载机模型本质上是多条封闭线段形成的集合，避碰的核心是计算线段间距离。

在同一平面内，线段间的位置关系主要有相交、平行等关系，但在舰载机碰撞过程中，舰载机间的最短距离只会以下几种情况中产生：线段端点到另一条线段端点的距离、线段端点到另一条线段间的直线距离和线段间的垂直距离。

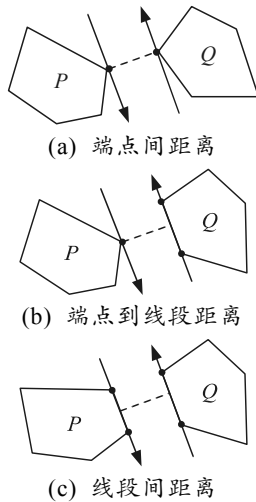


图 3 碰撞距离检测

设线段 l_1 的端点为 $P_1(x_{P_1}, y_{P_1})$ 、 $P_2(x_{P_2}, y_{P_2})$ ，线段 l_2 的端点为 $Q_1(x_{Q_1}, y_{Q_1})$ 、 $Q_2(x_{Q_2}, y_{Q_2})$ ，按照以下步骤计算最短距离：

1) 计算线段端点之间的距离，分别计算 $d_{P_1-Q_1}$ 、 $d_{P_1-Q_2}$ 、 $d_{P_2-Q_1}$ 和 $d_{P_2-Q_2}$ ，以 $d_{P_1-Q_1}$ 为例，计算公式如下：

$$d_{P_1-Q_1} = \sqrt{(x_{P_1} - x_{Q_1})^2 + (y_{P_1} - y_{Q_1})^2} \quad (5)$$

2) 计算线段端点到线段之间的直线距离，首先需计算线段端点到线段的垂足坐标，计算公式如下：

$$x_{P_1 \perp l_2} = \frac{(x_{Q_2} - x_{Q_1})^2 x_{P_1} + (y_{Q_2} - y_{Q_1})(x_{Q_2} - x_{Q_1})y_{P_1} - (y_{Q_2} - y_{Q_1})^2 + (x_{Q_2} - x_{Q_1})^2}{(y_{Q_2} - y_{Q_1})(x_{Q_2}y_{Q_1} - x_{Q_1}y_{Q_2})}; \quad (6)$$

$$y_{P_1 \perp l_2} = \frac{(y_{Q_2} - y_{Q_1})^2 y_{P_1} + (y_{Q_2} - y_{Q_1})(x_{Q_2} - x_{Q_1})x_{P_1} - (x_{Q_2} - x_{Q_1})(x_{Q_2}y_{Q_1} - x_{Q_1}y_{Q_2})}{(y_{Q_2} - y_{Q_1})^2 + (x_{Q_2} - x_{Q_1})^2} \quad (7)$$

3) 求得垂足坐标后，需判断该点是否在其线段上，判断公式如下：

$$x_{Q_1} \leq x_{P_1 \perp l_2} \leq x_{Q_2}; \quad (8)$$

$$y_{Q_1} \leq y_{P_1 \perp l_2} \leq y_{Q_2} \quad (9)$$

若满足上述关系式，则线段端点在该条线段上，所计算距离为有效距离。

2.3 避碰距离计算

根据以上推导的多目标间的距离计算公式，进

一步对舰载机之间的安全距离进行推导。假设舰载机 1 由 M 条边组成，舰载机 2 由 N 条边组成，则 2 架舰载机之间的最短距离计算公式如下：

$$d_{1-2} = \min_{i=1}^M \min_{j=1}^N (l_{1i}, l_{2j}) \quad (10)$$

式中 $d(l_{1i}, l_{2j})$ 为舰载机 1 的第 i 条线段到舰载机 2 的第 j 条线段间最短距离。

检测舰载机是否发生碰撞，只需判断舰载机间距离是否等于 0，在转运过程中，舰载机需要在一定范围内进行转弯等操作；因此，可设定安全阈值 d_{safe} ，当 $d(l_{1i}, l_{2j}) \leq d_{safe}$ 时，视为发生碰撞。

如图 4 所示，描述了多架舰载机在转运过程中的避碰过程。除了舰载机以外还有诸如牵引车、舰岛等，均可通过包围盒进行描述，碰撞距离计算方法与舰载机相同。

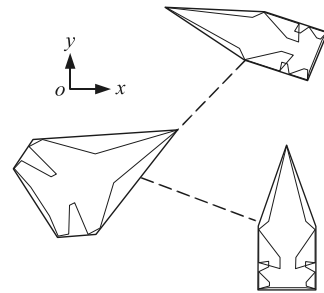


图 4 舰载机碰撞距离计算

3 算法求解

3.1 GA 算法求解

步骤 1：路径编码。

舰载机路径编码方式如图 5 所示，Start 为初始节点，End 为目标节点。每个中间节点矢量在每个离散空间内随机分布。设定路径搜索空间范围为 $330 \text{ m} \times 76 \text{ m}$ 的 2 维矩形区域（覆盖整个航母甲板）并取栅格数为 330×76 ，即每个栅格为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的区域。

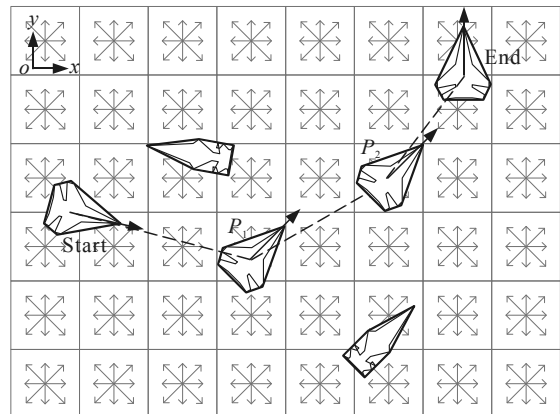


图 5 舰载机路径编码方式

需说明的是，仅中间节点进行离散编码，提前设定初始位置和目标位置。笔者选取的分辨率远小于运动目标的尺寸(飞机机身长度约为 20 m)。

步骤 2: 初始化染色体。

每一条染色体个数代表一条转运方案，其维数代表路径转运过程中节点数量。已知起点 $a_0=(x_0, y_0)$ 和终点 $a_n=(x_n, y_n)$ ，则染色体维数为：

$$n = \text{round}(\max\{|x_n - x_0|, |y_n - y_0|\} / L) + 1. \quad (11)$$

式中 L 为地图栅格单位长度。由上式可依次确定每一个中间点 a_{ij} 。

步骤 3: 适应度函数。

适应度函数由目标函数式(1)和避障函数式(10)组成。目标函数即计算最短时间路径，由于假设舰载机匀速转运，即计算最短路径。第 2 节推导了避障距离计算公式，对于节点需要考虑是否在障碍物，且与其相邻节点的连线是否与障碍物相交。

步骤 4: 遗传操作。

笔者采用的遗传算子主要有选择、交叉和变异。需说明的是由于随机变异存在将可行路径变异成不可行路径的可能，故引入基因修补策略。

修补策略：将适应度较好的不可行路径记录下来，对其中的坏点进行修补，以得到可行路径，并参与到下次遗传操作；若变异后的节点位于不可行区域，需重新变异。

步骤 5: 路径解码。

当优秀个体满足相应指标或迭代一定代数后，进行相应的路径解码，还原完整路径。

3.2 NURBS 曲线

NURBS 作为 B 样条曲线的一种形式，为每个控制点分配相应的权重值，在 B 样条曲线的基础上，通过改变控制点、节点、阶次和权重，可使曲线向任意理想控制点位置变换，提高了其局部灵活性，NURBS 公式为：

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)\omega_i P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)\omega_i}. \quad (12)$$

式中： ω_i 为控制点 P_i 的权重； $N_{i,p}(u)$ 为定义在节点矢量 $U=\{u_0, u_1, \dots, u_m\}$ 上的 p 次基函数，表示为^[7]：

$$N_{i,p}(u) = \begin{cases} 1, & u_i \leq u \leq u_{i+1}, P=0. \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

NURBS 可通过修改各控制点权重值对局部曲线进行控制，如图 6 所示。

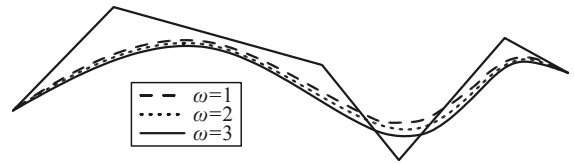


图 6 不同权重值比较

由上图可知：随着权重增加，NURBS 向控制点方向移动，对不同控制点选择合适的权重值，会得到更为理想的局部控制与平滑效果。

如图 7 所示，利用其特性可通过在 2 个成功控制点之间“中点插值”^[8]，实现路径精确跟随并保持连续性。

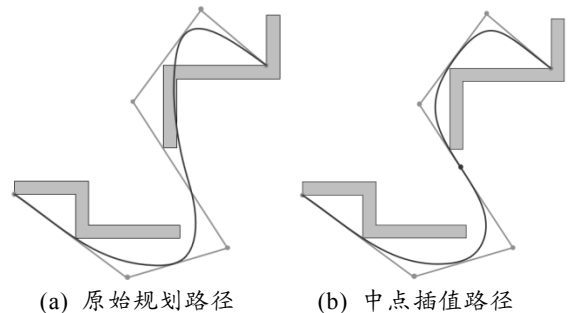


图 7 中点插值

通过图 7(b)可以看出：增加的中点插值可以有效地利用切线特性更精确地跟随原路径，保持与原规划路径的相似性。

3.3 基于交通规则避障策略

交通规则策略思想总结为^[9]：模仿汽车在公路上行驶时遵守的交通规则，防止多目标运动时的碰撞冲突。针对飞行甲板复杂的情况，制定一定的交通规则，将会提高路径规划的成功率，从而进行高效的转运。

若某一条转运路径上存在一点，使得在某一时刻(可通过路径长度除以速度得到某一时间)存在多架舰载机发生碰撞冲突，则采用以下 2 种策略：

1) 等停策略：优先级较高的舰载机按规划路径行驶，优先级较低的舰载机进行等待，直到可安全行驶，记等待时间为 T_w 。

2) 重新规划策略：将舰载机的规划路径集按照时间长短顺序进行排序，若最优路径不符合转运要求，则选择次条路径，并将最优路径与当前路径的时间差记为 T_r 。

舰载机的优先级可根据舰载机的任务重要程度和距离目标位置远近等因素进行设定。

针对上述 2 种策略，以图 8 所示为例，根据任务要求，需将舰载机 J_2 和 J_3 转运到目标位 G_2 和 G_3 ，

J_3 的优先级最高，规划的路径为 A_2 和 A_3 。根据时间计算，2 架舰载机将会在 Obs 点处发生碰撞，可先采用 2 种策略：1) 进行等停，即 J_3 优先通过， J_2 在 B 点等候，直到 J_3 通过 A 点后， J_2 继续行驶，记等待时间 T_w ；2) 从路径集中选择一条转运时间次之，且不会与 J_3 碰撞的路线 A_2 ，记 2 条路线时间差 T_r 。比较时间 T_w 和 T_r ，选取用时最短的策略。

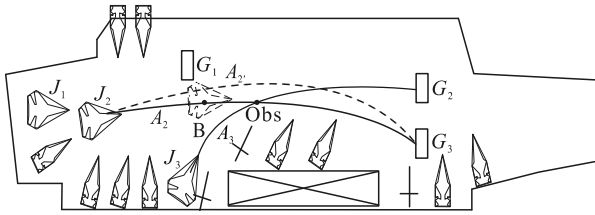


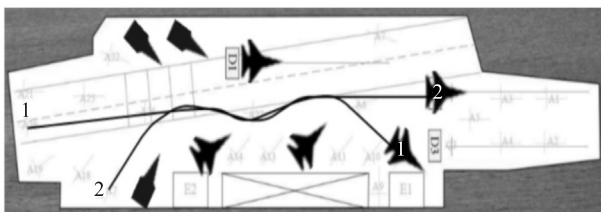
图 8 转运路径

由上述策略可知，转运时间需要考虑到避碰策略时间，故对目标函数进行修正，其公式为：

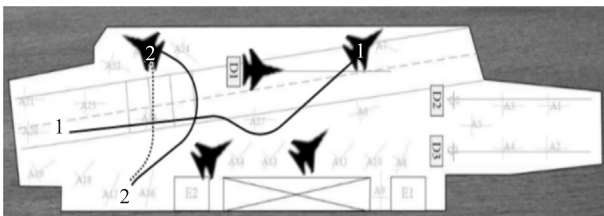
$$F = \min \left\{ \sum_{i=1}^N \left\{ \min_{j=1}^M T_i(A_j) + \min \{T_w, T_r\} \right\} \right\} \quad (14)$$

4 仿真结果

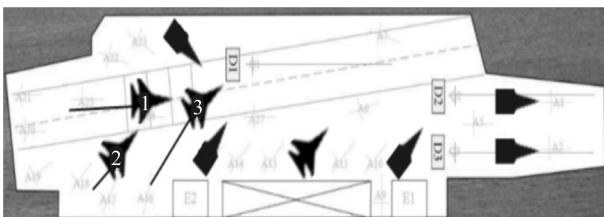
依据第 3 节算法步骤，选取初始规模为 300，交叉概率为 0.5，变异概率为 0.05，代数为 100。对多架舰载机同时转运进行仿真，且认为优先级顺序为：舰载机 1 > 舰载机 2 > 舰载机 3。仿真结果如图 9 所示。



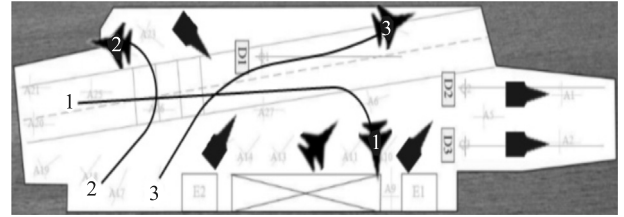
(a) 路径规划仿真 1



(b) 路径规划仿真 2



(c) 路径规划仿真 3a



(d) 路径规划仿真 3b

图 9 路径规划仿真

图 9(a) 舰载机 1 设定起始坐标为(27.50, 31.75)，末端坐标为(229.13, 19.05)；舰载机 2 设定起始坐标为(54.99, 8.89)，末端坐标为(262.12, 40.64)。图 9(b) 舰载机 1 设定起始坐标为(27.50, 31.75)，末端坐标为(216.29, 57.15)；舰载机 2 设定起始坐标为(54.99, 8.89)，末端坐标为(111.81, 66.04)。图 9(c) 舰载机 1 设定起始坐标为(32.99, 44.45)，末端坐标为(229.13, 13.97)；舰载机 2 设定起始坐标为(76.99, 12.7)，末端坐标为(183.3, 54.61)；舰载机 3 设定起始坐标为(40.326, 16.51)，末端坐标为(78.82, 54.61)。

图 9(a) 所规划的路径不会发生碰撞冲突；图 9(b) 舰载机 2 采用了重新规划策略，规划出了另一条较优路线；图 9(c) 由于舰载机 1 的优先级最高，因此舰载机 3 采用等停策略，如图 10 所示，可以看到最优解在 20 代以内完成收敛，20~100 代以内趋于稳定。仿真结果表明，笔者提出的遗传避碰方法是有效的。

可以看出，随着舰面舰载机数量的增多，可规划路径较少，采用等停策略能够起到较好转运效果。

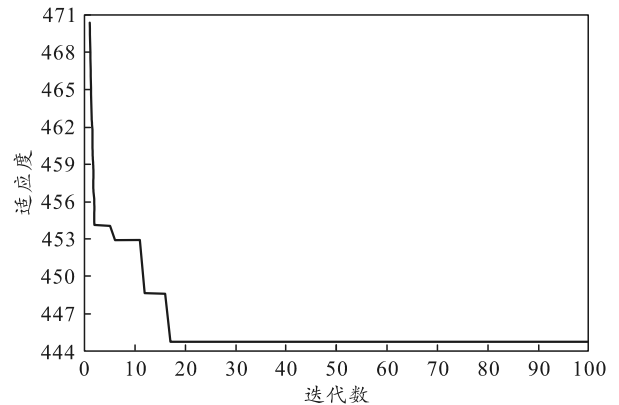


图 10 最优解收敛曲线

5 结束语

针对复杂环境下的多舰载机舰面同时规划问题，提出基于 NURBS 和交通策略的遗传方法结论如下：