

oi: 10.7690/bgzd.2026.02.012

# 基于遗传算法的反舰导弹航路规划

王泓臻<sup>1</sup>, 郑保华<sup>2</sup>

(1. 海军航空大学研究生队, 山东 烟台 264001; 2. 中国人民解放军海军 92942 部队, 北京 100161)

**摘要:** 为解决传统遗传算法在选择反舰导弹航路规划时存在迭代速度较慢、稳定性较差的问题, 对遗传算法进行改进。构造基于 AHP 的威胁适应度函数以及长度平滑度两者的适应度函数, 并应用 Matlab 进行仿真验证。结果表明, 改进后的遗传算法能够更快收敛于最优解。

**关键词:** 遗传算法; 弹道规划; 适应度函数; AHP

**中图分类号:** TJ761.1<sup>+4</sup> **文献标志码:** A

## Path Planning of Anti-ship Missile Based on Genetic Algorithm

Wang Hongzhen<sup>1</sup>, Zheng Baohua<sup>2</sup>

(1. Brigade of Graduate, Naval Aviation University, Yantai 264001, China;  
2. No. 92942 Navy Unit of PLA, Beijing 100161, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of slow iteration speed and poor stability of traditional genetic algorithm to select anti-ship missile route planning, the genetic algorithm was improved. The threat fitness function based on AHP and the fitness function based on length smoothness are constructed, and the Matlab simulation is carried out. The results show that the improved genetic algorithm can converge to the optimal solution faster.

**Keywords:** genetic algorithm; trajectory planning; fitness function; AHP

### 0 引言

现代战争中, 反舰导弹是水面舰艇所面临的最主要的水上威胁, 尤其是当前反舰导弹发展趋于远程化、精准化、智能化<sup>[1-3]</sup>。反舰导弹具有优异的航路规划能力, 使得对其拦截造成巨大阻碍。反舰导弹发射之前, 根据实际的战场态势、导弹飞行性能和作战需求, 对弹道航路进行规划, 使得导弹在发射后按照预设的航路飞行<sup>[4-6]</sup>。从编队防守方而言, 若可以大致预测反舰弹道规划, 预先布设火力, 拦截效率会大大增加。

当前, 面对前敌作战, 随着敌远程精确打击技术的提高, 导弹及飞机在打击范围、性能及隐身性都显著增强, 核动力平台及武器不断发展, 我航母编队面临的水下、水面及空中威胁程度日益严重, 对其防空预警能力、空中拦截能力及电子作战能力均提出更高的要求<sup>[7-8]</sup>。舰载机作为航母编队防空作战的重要兵力, 其强大的预警探测能力和空中拦截能力很大程度上决定了编队的防空作战效果, 各军事强国均大力发展舰载机。空中预警机的作战使命是尽早发现敌目标, 通报编队, 为编队防空作战提供充足的御敌空间, 此外, 其也担任空中指挥部, 引导空中巡逻及甲板待战的战斗机对目标进行空中

拦截。歼击机是打击敌目标的直接手段, 也是航母编队一道至关重要的空中屏障<sup>[9-10]</sup>。笔者根据已知防守兵力部署, 对反舰导弹弹道进行预测, 从而保卫己方舰艇安全。

### 1 遗传算法在路径规划中的应用

将地图栅格化, 每个小格增加权重。权重的大小为此区域的威胁程度, 威胁程度越大, 权重越大。所谓遗传算法就是模拟种群进化过程, 在可能的选择中通过迭代, 选出最适宜的结果。该算法主要有选择、交叉、变异和再选择 4 个步骤循环往复, 应用于航路规划中的表现形式如图 1 所示。

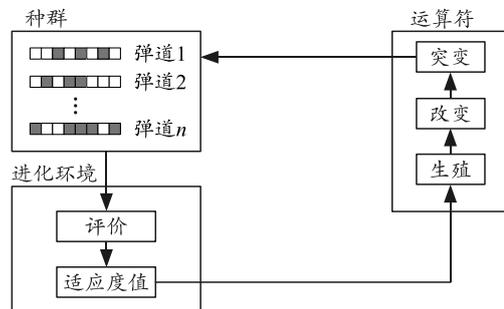


图 1 遗传算法应用于航路规划中的表现形式

如图 2 所示, 在 8×8 的网格中, 设 A 方位于 W 区, 需要发射反舰导弹打击位于 T 区的 B 方, 方格

收稿日期: 2024-11-08; 修回日期: 2024-12-21  
第一作者: 王泓臻(1996—), 女, 山东人, 硕士。

里的数字代表威胁程度，数值越大，威胁越大越高。遗传算法的种群数量为  $N$ ，种群为由  $W$  至  $T$  的路线。

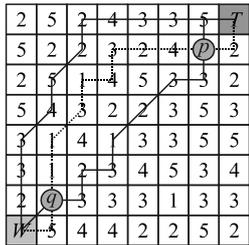


图 2 对弹道进行栅格化

### 1.1 种群初始化：随机生成 $N$ 条路径

1) 从起点出发每行选择一个方格，为了增加种群的收敛性，每行选取方格时，从下至上选取，且上一行只能在下一行选取方格的右方(也就是靠近  $T$  的方向选取)，如图 3 所示。

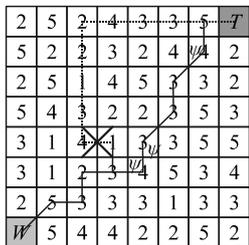


图 3 遗传算法路径生成规则

- 2) 判断相邻行的方格是否连续。
- 3) 不连续时在中间插入方格，直至连续为止。
- 4) 筛选路径长度，长度必须小于导弹最大作战半径。

### 1.2 选择适应度

- 1) 路径长度越小越好。
- 2) 路径越顺滑越好，即相邻 2 条路径的夹角越接近平角越好。
- 3) 突防概率越大越好。

对以上三者进行权衡，确定彼此权重，得到一个总适应度。通过轮盘赌的形式进行选择，根据每条路径的权重所占所有路径总权重的比值为在圆盘中的比例大小，这样就可以保证种群多样化的前提下，选出优秀的个体。

### 1.3 交叉

2 条路径在交点处可以随机交换，以  $p$ 、 $q$  点为例，两点之间线段相互交换，便可以形成 2 条新的路径，丰富了种群多样性。

### 1.4 变异

在一条路径中随机选择 2 个方格，以种群初始化的方式随机生成路径。

按照选择、遗传(交叉、变异)、再选择的方式进行迭代，当达到一定迭代次数后得到最优解。

### 1.5 改进遗传算法

针对在多约束条件下移动机器人在路径规划中的搜索效率低、收敛速度慢的问题，笔者设计的改进的遗传算法流程如图 4 所示。

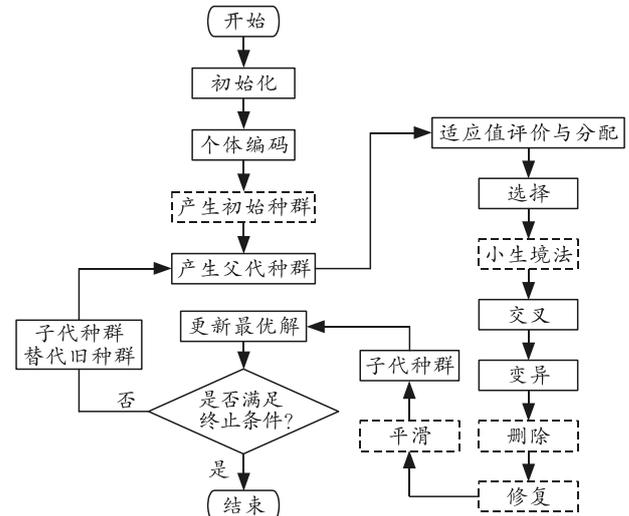


图 4 改进的遗传算法流程

## 2 模型建立

将交战区域进行栅格化，形成一个  $P \times P$  的网格，并将航母编队置于网格区左下角  $O$  处，敌导弹发射点位于右上角  $P$  点，以  $O$  点为原点，正东方向为  $x$  轴建立直角坐标系，并由上至下、由左至右对整个区域内方格进行编号。

### 2.1 选择适应度

#### 2.1.1 弹道长度

设相邻 2 个航路点坐标  $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ ，由 2 点距离公式可得该航路段  $l_n$  的长度为：

$$l_n = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (1)$$

该条航路共有长度  $L_m$  为：

$$L_m = \sum_{n=1}^{p-1} l_n \quad (2)$$

#### 2.1.2 路径顺滑度

路径的顺滑度用 2 个航路段之间的夹角  $\theta$  来表示，夹角越大越平滑。由于航路选择时，下一航路点只能向上、右、右上 3 个格子选择，各夹角  $\psi_i$  有 3 个选择： $90^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $180^\circ$ 。

假设该路径有  $n$  个航路点(不计两端点)，则路径顺滑度为：

$$\Psi = \sum_{i=1}^n \Psi_i \quad (3)$$

2.1.3 威胁程度的量化

威胁程度用毁伤概率表示，计算各弹道的毁伤概率，数值越小说明威胁度越低，越有利于突防。导弹在一个区域内的突击概率与多种因素有关，例如导弹的速度、在该区域的航路长度、防空兵力完成一次攻击所需要的时间等。对单一防空兵力区域的突防概率  $P_{df}$  为：

$$P_{df} = 1 - P_{HS}^{\lceil l_0 / (T_{GJ} \cdot v_{fj}) \rceil + 1} \quad (4)$$

式中： $P_{HS}$  为该防空兵力对反舰导弹的毁伤概率； $l_0$

$$P_{HS_x} = P_{HS_1}^{\lceil l_{1A} / (T_{GJ_1} \cdot v_{fj}) \rceil + 1} \cdot P_{HS_1}^{\lceil l_{1B} / (T_{GJ_1} \cdot v_{fj}) \rceil + 1} \cdot P_{HS_1}^{\lceil l_{1C} / (T_{GJ_1} \cdot v_{fj}) \rceil + 1} \cdot P_{HS_2}^{\lceil l_{2A} / (T_{GJ_2} \cdot v_{fj}) \rceil + 1} \cdot P_{HS_2}^{\lceil l_{2B} / (T_{GJ_2} \cdot v_{fj}) \rceil + 1} \quad (5)$$

式中： $T_{GJ_1}$  为该舰空导弹完成一次攻击所需要的时间； $T_{GJ_2}$  为该空空导弹完成一次攻击所需要的时间。

2.2 轮盘赌选择模型

2.2.1 各适应度权重

每条导弹有 3 种适应度，根据作战需求确定一个总的适应度函数：

$$S = aL_m + b \frac{1}{\Psi} + cP_{HS_x} \quad (6)$$

式中  $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别为弹道长度、路径顺滑度、威胁程度的权重，且  $a+b+c=1$ 。

综合目前的权重计算方法，主要可归纳为主观权重计算法、客观权重计算法及主客观权重组合计算法 3 类。AHP 是权重获取的一种重要方法，它通过将复杂问题分解成递阶层次结构，并利用判断矩阵来比较各因素的重要性。获取步骤为建立递阶层次结构模型，构造准则层和指标层的比较判断矩阵、层次单排序和层次总排序。在构造判断矩阵时，需要计算每个判断矩阵的最大特征根、一致性指标和随机一致性指标。当一致性指标小于 0.1 时，即认为判断矩阵的一致性满足条件；否则，重新调整判断矩阵。

1) 建立多级递阶的结构模型。

多级递阶的结构模型分为目标层、准则层和方案层，应用到反舰导弹航路规划的结构模型如图 5 所示。

2) 构造两两比较判断矩阵。

判断矩阵由主观人物决定，它遵循特定的标度，如表 1 所示。

为该防区内的航路长度； $T_{GJ}$  为该防空兵力完成一次攻击所需要的时间； $v_{fj}$  为反舰导弹的速度； $\lceil \rceil$  为向下取整。

导弹突击航母编队的对象分为：1) 对舰空导弹的突防；2) 对空空导弹的突防。根据各自突防概率对每段航路进行赋值，每段航路的突防概率与该航路所经过防空区的数量及种类有关。假设舰空导弹对反舰导弹的毁伤概率  $P_{HS_1}$ ，空空导弹对反舰导弹的毁伤概率  $P_{HS_B}$ ，航路段  $x$  在舰空导弹防区  $A$  的长度为  $l_{1A}$ ，在舰空导弹防区  $B$  的长度为  $l_{1B}$ ，在舰空导弹防区  $C$  的长度为  $l_{1C}$ ，在空空导弹防区  $A$  的长度为  $l_{2A}$ ，在空空导弹防区  $B$  的长度为  $l_{2B}$ ，则该航路段被毁伤概率  $P_{HS_x}$  为：

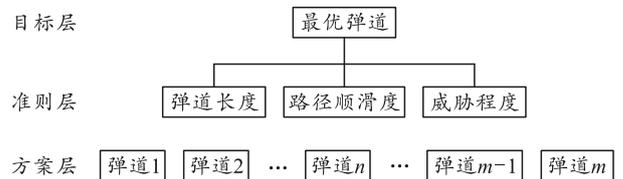


图 5 多级递阶的结构模型

表 1 判断标度

标度	含义
1	表示 2 个元素相比，具有同样的重要性
3	表示 2 个元素相比，前者比后者稍微重要
5	表示 2 个元素相比，前者比后者明显重要
7	表示 2 个元素相比，前者比后者极其重要
9	表示 2 个元素相比，前者比后者强烈重要
2, 4, 6, 8	表示上述相邻判断的中间值
1~9 的倒数	表示相应 2 个因素交换次序比较的重要性

根据表 1 所示的标度，构造判断矩阵如表 2 所示，对角线上的数值为相同 2 个指标自身判断，所以重要性标度为 1。

表 2 弹道规划判断矩阵

最优弹道评价	弹道长度	路径顺滑度	威胁程度
弹道长度	1.0	1.666 7	0.200 0
路径顺滑度	0.6	1.000 0	0.142 9
威胁程度	5.0	7.000 0	1.000 0

3) 权重计算。

① 用求根法计算判断矩阵特征向量的近似值：

$$W_i = \frac{(\prod_{j=1}^n a_{ij})^{1/n}}{\sum_{i=1}^n (\prod_{j=1}^n a_{ij})^{1/n}}, \quad ij=12 kn \quad (7)$$

② 把特征向量标准化后得到权重向量：

$$W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T \quad (8)$$

4) 一致性检验。

根据 CI 和 RI 值求解 CR 的值，判断其一致性是否通过，具体步骤如下：

① 求取最大特征根：

$$\lambda_{\max} = \sum((AW)_i/nW_i)。(9)$$

② 求 CI：

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}。(10)$$

表 3 矩阵阶数对应的 RI 值

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

即：

$$CR=CI/RI。(11)$$

则所得结果如表 4 所示。

表 4 AHP 法得到的权重值

弹道适应度因素	权重向量	权重	最大特征值	CI	CR
弹道长度	0.693 361	0.157 390			
路径顺滑度	0.440 955	0.100 095	3.003 485	0.001 742	0.003 004
威胁程度	3.271 066	0.742 516			

### 2.2.2 轮盘赌

轮盘赌的基本思路是各个个体被选中的概率与其适应度大小成正比。按照以上权重比，得到每条弹道的总适应度函数  $S$ ，适应度越优越，在轮盘中占的面积就越大，则被选中并保留的机会就越大，如图 6 所示。

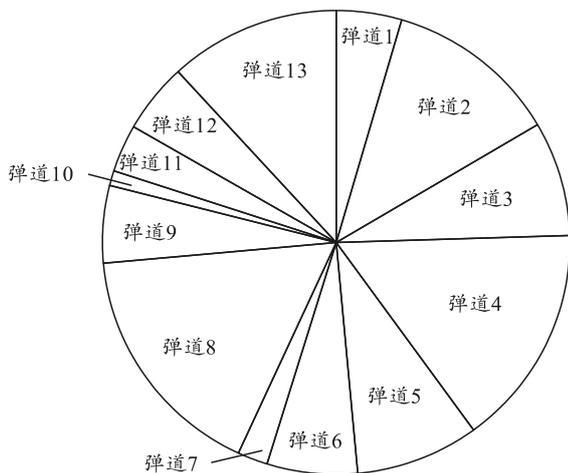


图 6 弹道规划轮盘赌模型

## 3 仿真

### 3.1 仿真初始化

建立直角坐标系  $xoy$ ，对其第二象限进行栅格化为  $20 \times 20$  的小格，每个小格边长为 20 km，选取的航路点位于小格中心点，假设  $A$  方航母母舰为  $(0, 0)$ ， $B$  方反舰导弹发射平台位于右上角方格  $(600 \text{ km}, 900 \text{ km})$ ，布设 9 处防空兵力，位置如表 5 所示。

表 5 防空兵力属性

防空兵力	横坐标	纵坐标	完成单次攻击需要的时间/s	防空半径 $\times 20/\text{km}$	防空武器单次攻击毁伤概率
1	3	7	16	4	0.3
2	5	7	12	5	0.1
3	5	12	10	5	0.5
4	6	14	12	6	0.5
5	9	10	14	4	0.4
6	12	6	13	4	0.4
7	15	8	17	4	0.4
8	16	13	12	4	0.4
9	16	17	12	9	0.5

### 3.2 仿真结果及问题分析

图 7 为迭代 100 次的仿真结果。

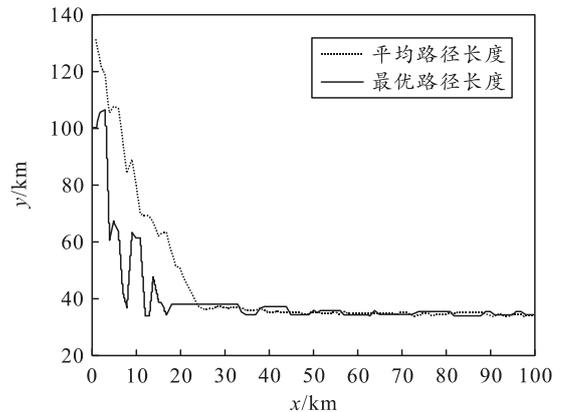


图 7 弹道规划结果

由图 7 可知：为了保证一定的生存概率，最优路径长度在 35~37 区间。

## 4 结束语

本次仿真并未考虑导弹自身航路点数量限制以及最小航路段限制，且在栅格化时，对路径以 20 km 的单位进行划分，较为粗略，为细化研究可在后续研究中对其进行细化。

### 参考文献：

- [1] 单宝英, 郭萍, 张帆, 等. 基于遗传算法与方案优选的多目标优化模型求解方法[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(6): 72-78.
- [2] MONTIEL O, OROZCO-ROSAS U, SEPÚLVEDA R, et al. Path planning for mobile robots using bacterial potential field for avoiding static and dynamic obstacles[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(12): 5177-5191.
- [3] 周文明. 基于智能算法的机器人路径规划研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [4] 赵晓, 王铮, 黄程侃, 等. 基于改进 A\*算法的机器人路径规划[J]. 机器人, 2018, 40(6): 137-144.
- [5] LAMINI C, BENHLIMA S, ELBEKRI A. Genetic algorithm based approach for autonomous mobile robot

path planning[J]. Procedia Computer Science, 2018, 127(8): 180-189.

[6] 张涛, 于雷, 魏贤智, 等. 改进遗传算法的超视距协同多目标攻击决策[J]. 火力与指挥控制, 2013(5): 137-140.

[7] 苏连栋. 超视距攻击模式对机载武器火控系统的要求[J]. 飞机设计, 2005(4): 60-63.

[8] 康志强, 寇英信, 李战武, 等. 双机编队超视距攻击协同优势评估[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(7): 47-50.

[9] 雷宇曜, 姜文志, 顾佼佼, 等. 防空导弹协同制导交接模型研究[J]. 战术导弹技术, 2015(3): 74-81.

[10] 牛冰, 牛智奇, 张晓峰. 基于功能分解组合的协同防空作战体系效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(4): 114-117.

\*\*\*\*\*

(上接第 39 页)

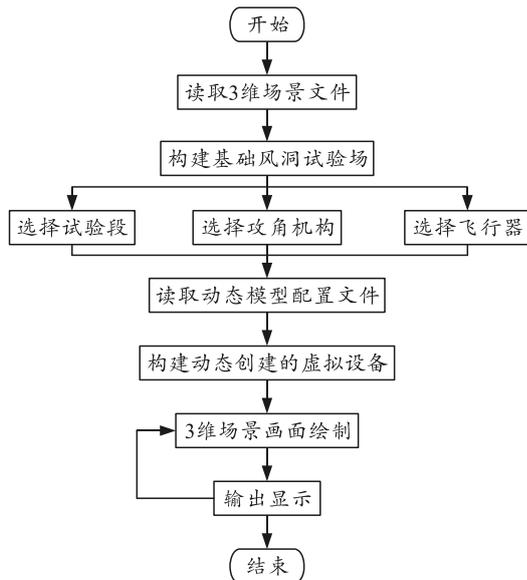


图 5 风洞 3 维模拟显示流程

主界面中央下方的系统菜单栏包括：油源系统和气密封系统及闸阀系统的远程控制、安全连锁系统设置、风洞相关部件详细显示、风洞试验飞行器数字模型的导入、以及故障告警日志的管理等，用二级子菜单的方式完善系统功能。

### 3.3 视频显示

主界面右侧为监控视频显示区域，包括：核心机房的远程监控、试验飞行器模型视频监控和各类特种试验高速摄影监控等内容。作为 2.4 m 风洞的唯一视频显示平台，3 维可视化安全连锁系统将原风洞的视频监控信号纳入一体化管理，整合了原视频监控信号分散繁杂的各类输入信号，并集中显示在监控视频区域，可以根据实际需求调整显示窗口

的内容及数量。该显示区域不但满足了试验过程中，对试验模型的实时安全监控要求，也满足了对核心机房远程监控、无人值守的要求。同时，该系统可以兼容 VGA/DVI/HDMI/DP 等各类输入信号，为今后扩展显示试验相关内容准备了充足的接口<sup>[6]</sup>。

## 4 结论

2.4 m 风洞试验任务日渐繁重，全面、及时、准确地监控风洞试验全过程，以及风洞试验设备的运行状态是保证风洞安全可靠运行的关键。3 维可视化安全连锁监控系统的研制及应用，整合了 2.4 m 风洞现场繁杂、分散的信息，并将关键信息集中形象的显示在统一的系统界面上，同时完善了风洞设备的远程监控功能及故障告警功能，完全满足风洞的使用要求，实际使用效果良好。

## 参考文献：

[1] 郝文山, 马永一, 苏北晨, 等. 基于 LabVIEW 和 OPC 的 2.4 米风洞安全连锁系统[J]. 自动化与仪器仪表, 2014(2): 72-74.

[2] 张卫, 王郁旭, 刘昊, 等. 智能电厂运维三维可视化应用研究[J]. 电力勘测设计, 2023(1): 56-61.

[3] 王杰, 高昆仑, 朱晓东. OPC 通讯系统在可视化界面监控系统中的应用研究[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(1): 74-76.

[4] 李婉, 宋文广, 邹佳伦, 等. C#的三维可视化水平井并眼轨迹跟踪研究与实现[J]. 湖北工业大学学报, 2015, 30(1): 23-25.

[5] 何兰娜. 浅谈信息可视化[J]. 现代制造技术与装备, 2013(5): 68-69.

[6] 曾昭献, 王蓉. 一种 LED 显示原理实验实训平台的研究与应用[J]. 数字技术与应用, 2021, 39(7): 169-171.