

doi: 10.7690/bgzd.2023.12.004

基于改进粒子群优化算法的多阵地反舰导弹航路规划

李浩民^{1,2}, 王光源¹, 张岩², 陈永展¹

(1. 海军航空大学岸防兵学院, 山东 烟台 264001; 2. 中国人民解放军 92020 部队, 山东 青岛 266000)

摘要: 为满足作战实际需要, 在使用改进的粒子群优化算法基础上, 提出 β 算法和振荡值理论作为约束条件构建数学模型, 以建立多阵地、多方向突击水面舰艇行动中导弹间建立时间、空间上的协同关系。结果表明: 该模型计算收敛速度快, 能有效解决联合行动中导弹航路规划问题。

关键词: 反舰导弹; 航路规划; 战场环境; 粒子群算法

中图分类号: TJ761.1⁺4 **文献标志码:** A

Route Planning of Multi-position Anti-ship Missile Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm

Li Haomin^{1,2}, Wang Guangyuan¹, Zhang Yan², Chen Yongzhan¹

(1. School of Coast Guard, Naval Aviation University, Yantai 264001, China;

2. No. 92020 Unit of PLA, Qingdao 266000, China)

Abstract: In order to meet the actual needs of combat, based on the improved particle swarm optimization (PSO) algorithm, the β algorithm and the oscillation value theory are proposed as constraints to build a mathematical model to establish the time and space coordination relationship between missiles in multi-position and multi-direction assault water surface ship operations. The results show that the model has fast convergence speed and can effectively solve the problem of missile route planning in joint action.

Keywords: anti-ship missiles; route planning; battlefield environment; PSO

0 引言

反舰导弹是一种高精度远程制导武器, 发射平台主要包括岸基、舰艇、飞机^[1]。反舰导弹可以利用航路规划对作战目标实施多阵地、多方向协同突击。在突击行动中, 导弹不仅面临敌方防御体系的抗击, 而且还可能遭受海面静、动态目标的威胁, 从而影响导弹的生存概率, 降低导弹的作战效能。面对错综复杂的战场环境, 反舰导弹对海突击航路规划已成为整个作战行动的关键。

粒子群算法源于对鸟类捕食行为的研究, 最早由 Kennedy 和 Eberhart 等在 1995 年提出^[2-3]。1998 年, Shi Y 等^[4]对该算法进行优化改进。传统的路径规划算法有 RRT 算法^[5]、A-star 算法^[6]等, 这些算法常出现精度低、鲁棒性差等问题。采用粒子群算法解决路径规划问题, 文献[7]提出了靠近目标的粒子群算法, 更好地解决了 AGV 路径规划问题; 文献[8]根据粒子的适应度值对粒子进行 K 均值聚类, 使较好群体的极值位置得到保存, 从而增强粒子的搜索能力。笔者采用改进的粒子群优化算法解决导

弹航路规划问题。

1 导弹航路规划数学模型

航路距离指反舰导弹从发射起点到作战目标之间的空间距离。航路距离越短, 表示反舰导弹沿该航路轨迹直飞段及平飞段越多, 导弹的机动性能就越强, 越有利于发挥导弹的作战效能; 同时, 航路距离越短, 反舰导弹所携带的燃料相对就越少, 导弹本身的总质量也会越轻, 则消耗的飞行时间就越短; 因此, 间接提升了导弹的生存概率。

导弹航路轨迹受诸多因素影响, 不可能是一条严格、规则的直线运动。所以假设导弹航路为一条不规则曲线, 根据微积分中微量的概念, 当直线趋近于无穷小时, 曲线可以由无数条直线构成。

$$ds = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2}。 \quad (1)$$

式(1)表示每一个小微量长度。根据式(1)构建导弹航路距离数学模型:

$$D = \sum_{i=1}^n \sqrt{(dx_i)^2 + (dy_i)^2}。 \quad (2)$$

收稿日期: 2023-08-10; 修回日期: 2023-09-07

第一作者: 李浩民(1985—), 男, 辽宁人, 硕士。

式(2)表示发射阵地与作战目标之间的航路距离。

1.1 静态威胁目标的设置

反舰导弹巡航阶段，采取掠海低空飞行，易受海上岛礁、障碍物等静态目标威胁。导弹航路规划中，应对静态威胁目标实施有效规避。

假设静态威胁目标是一个圆形区域^[9]，中心位置为 $JT_j(x_j, y_j)$ ，威胁目标半径为 R_{JT_j} 。

$$d_{S_i-JT_j} = \sqrt{(dx_i - x_j)^2 + (dy_i - y_j)^2} \quad (3)$$

式(3)表示导弹航路上某一点距离静态威胁目标中心点的距离。

设置静态威胁目标规避规则：

$$d_{S_i-JT_j} \geq 1.4R_{JT_j} \quad (4)$$

式(4)表示导弹航路上某一点距离静态威胁目标中心点的距离是静态威胁目标半径的 1.4 倍，文中 $i, j = 1, 2, \dots, n$ 。

1.2 动态威胁目标的设置

利用反舰导弹实施对海突击，导弹除遭受静态目标威胁外，飞行中还可能遭受海上舰船、电子干扰、恶劣天气等动态目标的干扰，从而影响导弹的命中精度，降低导弹的生存概率。此时，将不确定目标的运动轨迹定义为动态威胁目标。

如图 1 所示，假设理想状态下，动态威胁目标运动轨迹沿着某一特定方向运动，动态威胁目标初始位置为 $DT(x_0, y_0)$ ，移动速度为 v ，方向角为动态威胁目标移动方向与中线之间的夹角 θ 。

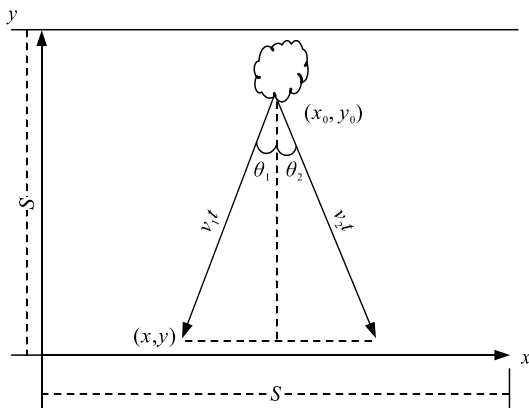


图 1 动态目标位置更新

动态威胁目标向中线左侧方向运动时，方向角为 θ_1 ，速度为 v_1 ，时间 t 时刻后动态威胁目标所在位置为 $DT(x, y)$ ：

$$\left. \begin{aligned} x &= x_0 - v_1 t \sin \theta_1 \\ y &= y_0 - v_1 t \cos \theta_1 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

动态威胁目标向中线右侧方向运动时，方向角为 θ_2 ，速度为 v_2 ，时间 t 时刻后动态威胁目标所在位置为 $DT(x, y)$ ：

$$\left. \begin{aligned} x &= x_0 + v_2 t \sin \theta_2 \\ y &= y_0 - v_2 t \cos \theta_2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(5)–(6)表示 t 时刻后动态威胁目标经过所在位置，此时可将 t 时刻后动态威胁目标视作静态威胁目标，规避规则参照静态威胁目标规避规则。

反舰导弹掠海飞行阶段，需满足导弹规避规则，确保可以规避静态、动态威胁目标，若不符合规避规则，则需要重新规划航路点。

1.3 导弹航路的时间、空间协同

1.3.1 导弹时间协同

单枚反舰导弹对水面舰艇实施突击，很难突破敌方的防空体系；因此，采取多阵地、多方向、多枚导弹集中打击或同时打击的作战方式，有利于增加导弹的突防概率。假设某一阵地到目标的距离为 D_i ，不同阵地发射反舰导弹的速度为 v_i 。

$$t_{\max} = \max(t_i = D_i / v_i) \quad (7)$$

$$t_s = t_{\max} - t_i \quad (8)$$

式(7)表示导弹到达目标所需最长时间；式(8)表示某一发射阵地的导弹攻击目标所需等待时长^[10]。将 t_s 按照从小到大的顺序进行排列， t_s 数值越大，表示导弹等候的时间越长，令等待时间较长的导弹后发射，从而实现多枚导弹同时打击作战目标的目的。

1.3.2 导弹空间协同

多枚导弹协同对海突击，导弹航路规划中应避免两弹之间交叉干扰，以免开启雷达制导时引起两弹碰撞发生爆炸。如图 2 所示，采用自定义 β 算法，利用行列式计算 2 个向量 \otimes 的大小情况，从而判断 2 条导弹航路是否相交，假设 2 条向量线段分别为 \overline{AB} 和 \overline{CD} ：

$$\left. \begin{aligned} (\overline{AB} \otimes \overline{AC}) \cdot (\overline{AB} \otimes \overline{AD}) &< 0 \\ (\overline{CD} \otimes \overline{CB}) \cdot (\overline{CD} \otimes \overline{CA}) &< 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式(9)表示向量线段相交的条件，即导弹轨迹相交则违反导弹规划规则。若 \overline{AB} 逆时针旋转至 \overline{AC} ，则 $\overline{AB} \otimes \overline{AC} > 0$ ； \overline{AB} 顺时针旋转至 \overline{AD} ，则

$\overrightarrow{AB} \otimes \overrightarrow{AD} < 0$, \overrightarrow{CD} 则同理。如果不满足上述条件, 则 \overrightarrow{AB} 和 \overrightarrow{CD} 不相交。

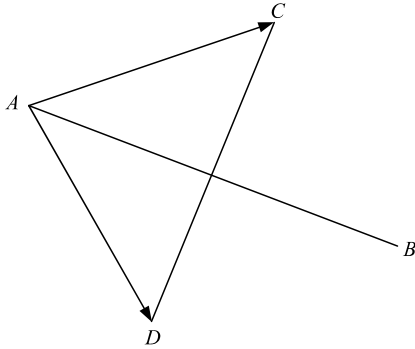


图 2 β 算法图解

1.4 导弹机动性能约束条件

1.4.1 最大偏航角

根据导弹机动性能和作战任务的限制, 为保证导弹命中目标, 通常导弹应在限定的偏航角范围内完成路径规划及姿态调整; 因此, 应当充分考虑导弹的最大偏航角度, 以保证导弹顺利实施对海突击任务。

假设第 i 个航路点坐标为 (x_i, y_i) , 第 $i-1$ 个航路点坐标为 (x_{i-1}, y_{i-1}) , 将第 i 个航路段表示为向量 $\vec{a} = (x_i - x_{i-1}, y_i - y_{i-1})$, 导弹的最大偏航角为 α , 则各航路段之间的几何关系如式(10)所示:

$$\arccos\left(\frac{\vec{a}_i^T \vec{a}_{i+1}}{|\vec{a}_i| |\vec{a}_{i+1}|}\right) \leq \alpha. \quad (10)$$

根据导弹在航路规划中是否满足最大偏航角的约束情况, 来判定该航路规划是否有效可行。

1.4.2 最大航路距离

导弹最大航路距离必须小于等于预先设置的最大距离, 实则为导弹最远攻击距离, 其主要取决于导弹自身所携带的燃料, 完成对海突击任务上级规定的作战时间。

假设导弹航路距离为 D , 设置最大航路距离为 L_{\max} , 即导弹航路距离约束条件:

$$D = \sum_{i=1}^n \sqrt{(dx_i)^2 + (dy_i)^2} \leq L_{\max}. \quad (11)$$

式(11)表示导弹航路距离 \leq 最大航路距离。

2 改进粒子群算法

算法中每个粒子表示目标函数的一个潜在解, 粒子在解空间中搜寻最优解, 并记录粒子本身的个体极值点, 并将个体极值点、整体极值点与其他粒

子进行信息共享, 粒子根据极值点分布情况, 在下次迭代中调整自己的速度和位置, 最终找到最优解。

2.1 粒子群算法原理

假设粒子种群 $B=(B_1, B_2, \dots, B_n)$, 其中第 i 个粒子位置为 $x_i=(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$; 速度为 $v_i=(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$, 则 $t+1$ 次迭代中粒子的位置和速度可更新为:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1}; \quad (12)$$

$$v_i^{t+1} = \omega v_i^t + c_1 r_1 (P_{ibest}^t - x_i^t) + c_2 r_2 (G_{best}^t - x_i^t). \quad (13)$$

式(13)中: 第 1 项为惯性项, 沿着当前方向的飞行趋势; 第 2 项为个体自信度, 朝向自己的飞行趋势; 第 3 项为全局最优项, 朝着种群中最好方向的飞行趋势; ω 为惯性权重; c_1 和 c_2 为非负常数, 称为加速度因子; r_1 和 r_2 为分布于 $[0,1]$ 区间的随机数; P_{ibest} 为个体极值点; G_{best} 为群体极值点。

2.2 惯性权重的优化

粒子的惯性权重表示粒子继承先前速度的能力, 惯性权重的数值越大则有利于粒子在全局中进行搜索, 而惯性权重的数值越小则有利于粒子在局部中进行搜索; 因此, 动态权重的寻优效果要优于固定权重。为更好地平衡算法中全局搜索和局部搜索两者之间的关系, 粒子群搜索过程中将惯性权重进行动态线性调整, 可采用线性递减的权值策略, 即:

$$\omega_k = \omega_{start} - (\omega_{start} - \omega_{end}) (k / T_{max})^2. \quad (14)$$

式中: ω_{start} 为初始惯性权重; ω_{end} 为迭代到最大次数时的惯性权重; k 为当前的迭代次数; T_{max} 为最大的迭代次数。令惯性权重 $\omega_{start}=0.9$, $\omega_{end}=0.4$ 。

随着迭代次数进行, 惯性权重从 0.9 线性递减到 0.4, 算法在迭代过程中既保持了迭代初期粒子较强的全局搜索能力, 同时还保持了迭代后期粒子可以进行更精确的局部搜索。改进的粒子群算法流程如图 3 所示。

2.3 建立适应度函数

对导弹规避规则进行变换, 即

$$a_{ij} = 1 - d_{s_j - T_j} / 1.4R_{T_j} \leq 0. \quad (15)$$

式中 a_{ij} 为振荡值, 即导弹在曲线第 i 段曲线与威胁目标 j 之间的导弹规避规则偏离程度。 $a_{ij} \leq 0$, 数值为负值, 值越小表示导弹遵守导弹规避规则, 偏离威胁目标的中心程度就越大; 若 $a_{ij} > 0$, 数值为正

值，值越大表示导弹违反导弹规避规则，接近威胁目标的中心程度就越大。

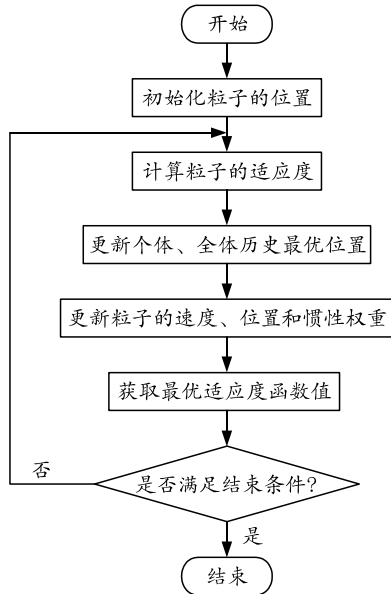


图 3 改进粒子群算法流程

根据导弹规避规则及导弹航路空间协同准则，建立适应度函数：

$$\min[\text{fix}(D)] = D(1 + \rho_1 b + \rho_2 c + \rho_3 d + \rho_4 e); \quad (16)$$

$$b = (\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij}) / k. \quad (17)$$

式中： $\rho_1 - \rho_4$ 均为惩罚系数，符合约束条件时 $\rho = 0$ ，违反约束条件时 $\rho = 200$ ； b 为违背值， $b \leq 0$ 符合条件， $b > 0$ 违反条件； $c = 0.01$ 为导弹航路相交的惩罚因子； k 为违反规避规则点的数量。若航路规划违反约束条件，则导弹航路上某段曲线均违反，所以将振荡值所有正值求和后进行均值处理，缩小到某点不符合约束条件，对其进行惩罚。 $d = e = 0.01$ 分别为导弹最大偏航角的惩罚因子及导弹最大航路距离的惩罚因子，若小于等于最大偏航角及导弹最大航路距离则符合路径规划原则，否则视为违反航路规划原则对其进行惩罚。

3 仿真算例及结果分析

利用改进粒子群优化算法对多导弹通过海上静、动态威胁目标，解决反舰导弹对海突击最优航路规划问题。令种群个数为 150，迭代次数为 30 次， $c_1 = c_2 = 1.5$ 。假设作战区域划定为 $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ ；3 个反舰导弹火力单元所在位置分别为 $(0, 40)$ ， $(50, 0)$ ， $(87, 0)$ ；导弹的巡航速度为 1 马赫 ($1\,225 \text{ km/h}$)；作战目标所在位置为 $(58, 100)$ ；动态目标的移动速度是导弹巡航速度的 $1/18$ ，即 68 km/h ，导弹的最

大偏航角 $\leq 60^\circ$ ，最大航路距离 $\leq 400 \text{ km}$ 。采取多阵地、多方向、集中式对作战目标进行打击，从而实现反舰导弹航路在时间、空间上的协同。海上静止目标位置如表 1 所示。

表 1 静态威胁目标位置 km

序号	静态威胁坐标 (x_j, y_j)	半径	序号	静态威胁坐标 (x_j, y_j)	半径
1	(13, 73)	8	9	(40, 16)	10
2	(38, 55)	7	10	(95, 55)	7
3	(90, 82)	5	11	(70, 40)	9
4	(12, 91)	8	12	(65, 7)	6
5	(25, 45)	7	13	(10, 10)	5
6	(65, 65)	8	14	(62, 81)	4
7	(79, 15)	6	15	(101, 10)	7
8	(40, 70)	6	16	(100, 35)	8

海面静态威胁目标位置固定，从 16 个静态威胁目标中选取前 3 个静态威胁目标作为动态威胁目标。如图 4 所示，圆形浅色区域为静态威胁目标，圆形深色区域为动态威胁目标单位时间内移动的位置。第 1 个动态目标方向角 0° 向下影响导弹 1 航路；第 2 个动态目标方向角 30° 向右下影响导弹 2 航路；第 3 个动态目标方向角 60° 向左下影响导弹 3 航路，图中箭头指向为动态目标移动方向。

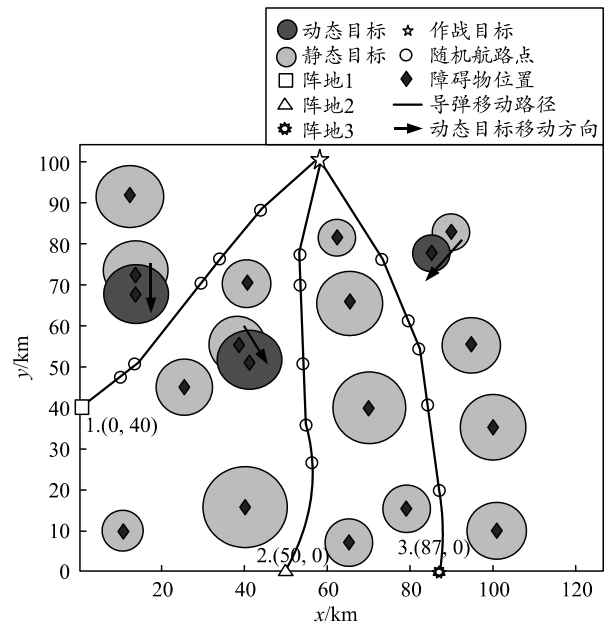


图 4 多火力单元协同航路规划

图 5 为惯性权重 $\omega_k = 1.2$ 时目标函数适应度曲线；图 6 为惯性权重改进后的目标函数适应度曲线。将图 5 与 6 进行对比，未改进算法收敛速度较慢，甚至没有找到最优解，而改进后算法会提升目标函数的收敛速度；因此，采用改进后粒子群优化算法在解决航路规划问题中导弹应对静、动态威胁目标效率得到提升，响应速度更快，更有利于取得制胜先机。

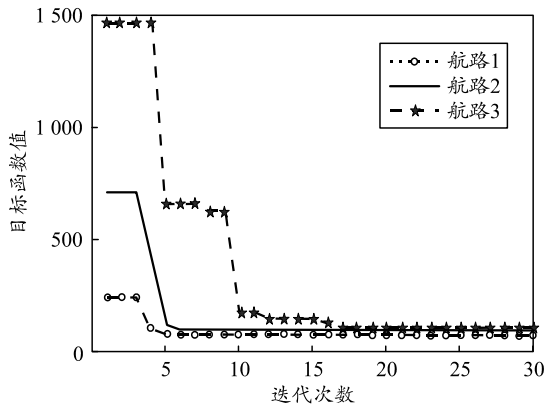


图 5 未改进惯性权重的目标函数适应度曲线

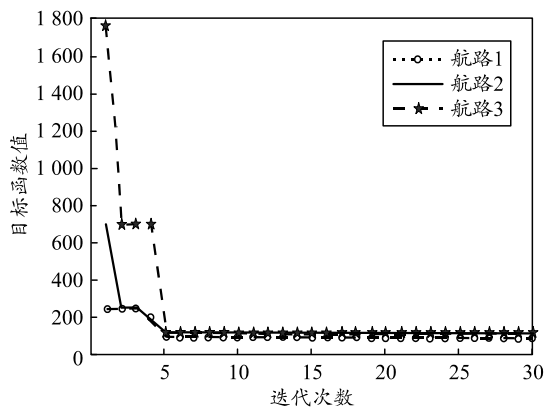


图 6 改进惯性权重的目标函数适应度曲线

3 枚导弹的航路轨迹均符合导弹规避规则，成功规避静、动态威胁目标。根据导弹发射阵地距离作战目标航路距离、导弹飞行速度计算攻击目标所耗时长。采用改进后的粒子群算法计算目标函数，经计算导弹 1 攻击目标所用航程 83 km，耗时 245 s；导弹 2 攻击目标所用航程 101 km，耗时 294 s；导弹 3 攻击目标所用航程 107 km，耗时 314 s。为实现导弹在时间上的协同，满足集中火力打击的要求，令距离较远的导弹 3 先发射，20 s 后导弹 2 发射，69 s 后导弹 1 发射，最终 3 枚导弹实现从多阵地、多方向同时打击作战目标。导弹攻击期间动态威胁目标运动情况如表 2 表示。

表 2 动态目标运动情况

序号	动态目标 方向角/(°)	移动距离/ km	时间/ s	动态威胁坐标 (x_j, y_j)/km
1	0	5	245	(13, 68)
2	30	6	294	(41, 51)
3	60	6	314	(85, 77)

4 结论

笔者通过设置海上静、动态威胁目标的方式，在目标移速小于导弹速度的前提下，基于改进粒子群优化算法分析反舰导弹对海突击最短航路规划避障问题。实施多阵地、多方向突击水面舰艇，导弹之间建立时间、空间上的协同关系。结果表明：建立的数学模型紧贴作战实际，改进后的粒子群算法，在收敛速度、精度、稳定性等方面均有所提升，为解决导弹航路规划问题提供了有效方法。

参考文献：

- [1] 刘钢, 老松杨, 谭东风, 等. 反舰导弹航路规划问题的研究现状与进展[J]. 自动化学报, 2013, 39(4): 347-359.
- [2] POLI R, KENNEDY J, BLACKWELL T. Particle swarm optimization[J]. Swarm Intelligence, 2007, 1(1): 33-37.
- [3] EBERHART R, KENNEDY J. A new optimizer using p-article swarm theory[C]//Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and H-human Science. IEEE, 1995: 39-43.
- [4] SHI Y, EBERHART R. A modified particle swarm optimizer[C]//IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings, 1998 IEEE World Congress on Computational Intelligence. IEEE, 1998: 69-73.
- [5] 崔永杰, 王寅初, 何智, 等. 基于改进 RRT 算法的猕猴桃采摘机器人全局路径规划[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 151-158.
- [6] 宗成星, 陆亮, 雷新宇, 等. 一种基于 A*算法的空间多自由度机械臂路径规划方法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2017, 40(2): 164-168.
- [7] 屈新怀, 单笛, 孟冠军. 基于靠近目标粒子群算法的 AGV 路径规划[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2022, 45(1): 1-6.
- [8] 封建湖, 张婷宇, 封硕, 等. 面向机器人路径规划的改进粒子群算法[J]. 机械设计与制造, 2021(9): 291-294.
- [9] 孔株睿, 刘淑芬. 基于改进粒子群算法的反舰导弹航路规划研究[J]. 测控技术, 2017, 36(11): 66-69.
- [10] 张承果, 丁勇, 申兴盼. 基于量子双向 RRT 算法的多平台反舰导弹协同航路规划[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(4): 36-41.