

基于改进的随机路径图及和声算法的舰船航线规划

吕进锋^{1,2†}, 马建伟¹, 李晓静¹

(1. 河南科技大学 信息工程学院, 河南 洛阳 471000; 2. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘要: 针对海上航行中障碍物躲避问题, 提出改进的随机路径图及和声算法为舰船进行航线规划. 该算法首先利用改进的随机路径图, 在障碍物边缘、起点与终点连线等关键区域进行节点设置及扩充, 根据舰船及障碍物运动特征, 分阶段在海图上设置节点并连接, 利用较少的节点生成完备的路径网络图, 基于此选择节点生成初始全局航线; 其次利用改进的和声算法对航线进行优化, 障碍物的运动特性导致解空间为复杂的多峰形态, 为避免节点位置变动导致新生成航线不可行, 设置限定条件, 仅对满足要求的航线利用航线交叉、消除节点、微调等策略进行优化. 实验结果表明, 相较对比算法, 所提算法能够有效生成更高质量的全局航线, 且在优化过程中生成的不可行航线数量远低于其余几种算法, 具有更高的可靠性及稳定性.

关键词: 随机路径图; 和声; 航线规划; 避障

引用格式: 吕进锋, 马建伟, 李晓静. 基于改进的随机路径图及和声算法的舰船航线规划. 控制理论与应用, 2020, 37(12): 2551 – 2559

DOI: 10.7641/CTA.2020.90979

Route planning based on improved probabilistic roadmap and harmony search

LÜ Jin-feng^{1,2†}, MA Jian-wei¹, LI Xiao-jing¹

(1. School of Information Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471000, China;

2. China Airborne Missile Academy, Luoyang Henan 471009, China)

Abstract: Aiming at obstacle avoidance during marine navigation, improved probabilistic roadmap and harmony search are proposed to design routes for ships. The proposed algorithm makes use of an improved probabilistic roadmap at first. It sets and expands nodes around obstacles and the line which connects the starting point and ending point. All nodes are set and connected in phases according to the motion characteristics of obstacles and ships. A complete path network map is generated by making use of a relatively small number of nodes, based on which initial global routes can be generated by choosing nodes. Then the initial global routes are optimized by employing an improved harmony search. The motion characteristics of obstacles result in the multimodal solution space. Slight changes of the nodes can make the new routes unworkable. To avoid situations like that, only the routes which satisfy the optimization conditions can be updated by overlapping, nodes elimination and fine-tuning. Experimental results show that compared with other algorithms, the proposed algorithm can generate global routes with higher quality. The number of unworkable routes generated in the optimization process is less than that of other algorithms. The proposed algorithm is more applicable and stable.

Key words: probabilistic roadmap; harmony search; route planning; obstacle avoidance

Citation: LÜ Jinfeng, MA Jianwei, LI Xiaojing. Route planning based on improved probabilistic roadmap and harmony search. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(12): 2551 – 2559

1 引言

海上航行通常具有航程较远、难以避免海上灾害性天气等特点. 舰船在航行中与障碍物相撞引起的事

故危害通常较大. 海上障碍物主要包括静态障碍物(如海岸、海岛、暗礁、禁行海域)及动态障碍物(如台风、气旋、其他舰船). 舰船航线规划是指根据水文、气象等信息, 为舰船设计从指定位置到达目的地的可行路线的过程^[1-2].

收稿日期: 2019-11-28; 录用日期: 2020-08-03.

[†]通信作者. E-mail: jinfengnn@163.com; Tel.: +86 379-64231793.

本文责任编辑: 王卓.

国家自然科学基金项目(U1404610), 国家重点研发计划项目(2016YFE0104600)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (U1404610) and the National Key Research and Development Project of China (2016YFE0104600).

本文旨在利用现有的电子海图系统,考虑舰船行驶期间障碍物躲避问题,为舰船规划航程最短的安全航线.类似于机器人路径规划,航线设计问题本质上为优化问题^[3-6].常见的路径规划方法包括A*(A-star)算法、D*(Dijkstra)算法、人工势场法及相应的改进算法;和声算法、遗传算法、蚁群算法、粒子群算法等群智能优化算法.

利用A*, D*算法及其改进算法进行航线规划的局限性在于:算法计算量随着地图栅格数的增多呈指数级增长^[7-8];其生成的路线转向较频繁且转向角较大,不利于舰船安全行驶.人工势场法的常见不足为当舰船距障碍物较近而距终点较远时,可能由于斥力过大而远离终点;或当障碍物距终点较近时,舰船由于斥力大于引力而无法到达终点^[9-11].利用蚁群^[12-14]、粒子群^[15-16]、人工蜂群^[17-19]等群智能优化算法进行路径规划时,优点在于算法结构简单、易于实现,不足为当问题复杂度较高、解空间为高维且呈现多峰形态时,种群易因快速收敛而陷入局部最优解,所得路径质量无法保证.

和声算法为模仿音乐家创作新乐曲提出的优化算法^[20-21].该算法利用随机生成、选择部分和声、微调等策略对记忆库中存储的解进行优化.其所得解的质量很大程度上依赖于记忆库中初始解质量.若初始解多样性较好且质量较高,则较容易获得全局最优解.遗传算法为模拟自然界进化过程而提出的一种优化算法,其利用遗传因子交叉、变异等操作搜索最优解.交叉算子决定算法的全局搜索能力,变异算子决定局部搜索能力.

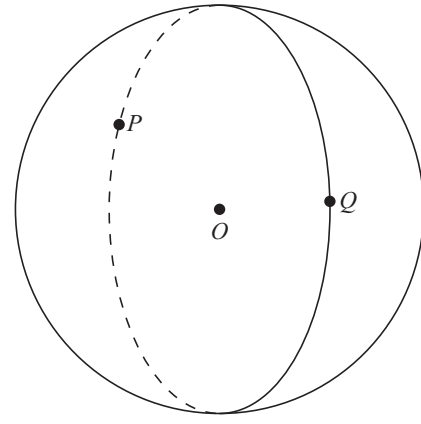
随机路径图通过在地图上设置节点并连接生成全局路径,其所得路径质量很大程度上依赖于节点的数量及位置.该算法主要包含节点设置与查询两阶段,其查询阶段通常具有一定的随机性.多次重复该算法可得到多个不同的全局路径.

对舰船航线规划问题,由于障碍物的运动特性,相应的解空间为复杂的多峰形态.利用常见优化算法的局限性在于,由于参数轻微变动导致备选解适应度值变化较大,种群通常会越过全局最优解.基于以上分析,针对舰船航行中障碍物躲避问题,本文拟提出一种改进的随机路径图及和声算法.该算法首先利用改进的随机路径图生成全局航线,通过多次重复得到多个质量较高的初始航线;其次将其作为改进和声算法的输入量,利用改进的优化策略对初始航线进行交叉、消除节点、微调等操作;最终生成高质量的全局航线.

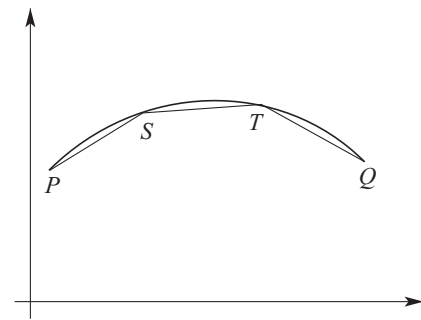
2 问题描述

海上航线在几何上分为恒向线航线、大圆航线等.大圆航线为沿着经过起始点与终点的地球大圆弧航行的航线,为地面两点距离最短的航线.恒向线航线

为沿着两点间恒向线方向航行的航线,通常为非最短航线.大圆航线要求时刻改变舰船航向,在海上航行中难以实现;因此常用多段恒向线航线代替大圆航线.如图1(a)所示, PQ 为大圆航线,可用多段恒向线航线 PS, ST, TQ 代替 PQ , 如图1(b)所示.



(a) 大圆航线



(b) 恒向线航线

图1 大圆航线及恒向线航线

Fig. 1 A great circle route and its corresponding rhumb line route

对于多段恒向线组成的航线 R , 可用 $R = (P_1, P_2, \dots, P_n)$ 表示, 其中 P_i 为航线中的转向点, 即节点. 整个航线的航程为多段子航线航程之和. 对一段恒向线航线 (P_1, P_2) , 起点与终点经纬度分别为 $P_1: (\varphi_1, \lambda_1)$, $P_2: (\varphi_2, \lambda_2)$. 该恒向线航线航程 S 、航向 C 可通过中分纬法求出:

$$C(P_1, P_2) = \arctan \frac{D_\lambda}{D_\varphi} \cos \varphi_m, \quad (1)$$

$$S(P_1, P_2) = \frac{D_\varphi}{\cos C}, \quad (2)$$

其中: D_φ, D_λ 分别为经差与纬差, $\varphi_m = \frac{(\varphi_1 + \varphi_2)}{2}$.

对于航线 R , 其航程 $f(R)$ 为

$$f(R) = \sum_{i=1}^{n-1} S(P_i, P_{i+1}). \quad (3)$$

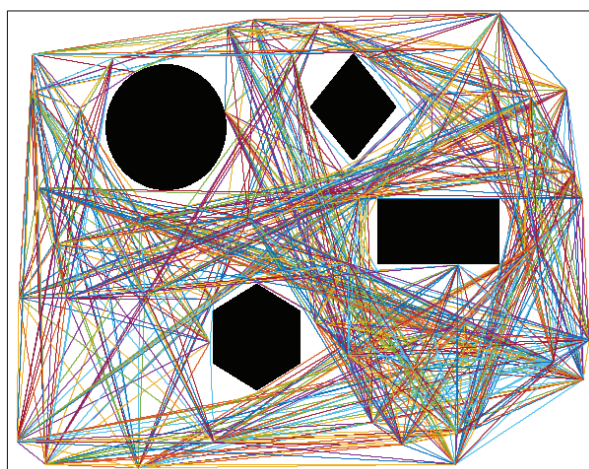
本文规定, 在不与障碍物相遇的前提下, 航程是衡量航线优劣的唯一指标. 本文拟利用群智能优化算法, 为舰船进行航线规划, 生成可行的由多段恒向线航线

组成的全局航线, 确定航线节点位置、航程及航向。

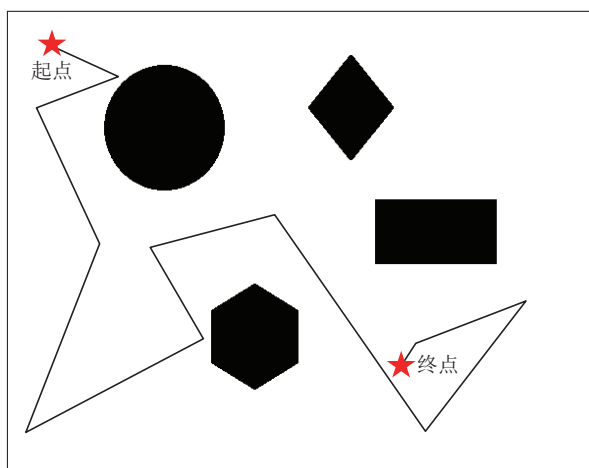
3 改进的随机路径图及和声算法

3.1 基于改进随机路径图的初始航线生成

随机路径图 (probabilistic roadmap, PRM) 通过在地图上设置节点并连接最终生成全局路径, 从而构建路径网络图 $R = (N, E)$; N 为随机点集, E 为任意两点之间的可行路径集。其在学习阶段随机生成多个节点并连接, 在查询阶段则从路径网络中选择多个子路径, 最终获得连接起点与终点的全局路径。考虑到若 PRM 在学习阶段生成的节点数较少, 则在查询阶段有可能无法获得全局路径; 若构造的路径网络图较复杂, 在查询阶段得到的全局路径质量难以保证, 见图 2。



(a) 路径网络图



(b) 全局路径

图 2 PRM 生成的路径网络图及全局路径

Fig. 2 The path network map and global route generated by PRM

本文采用改进的随机路径图 (improved probabilistic roadmap, IPRM) 为舰船规划初始全局航线。对航线规划问题, 若连接起点与终点, 以该直线为中心线向周围区域膨胀; 则对任一全局航线, 其子航线距离

该中心线越近, 可认为该航线具有较短航程的可能性越大。考虑到障碍物躲避问题, IPRM 将起点与终点连线、与该连线距离较近的障碍物的边缘区域作为关键区域, 进行节点扩充; 基于此可利用较少节点生成完备的网络路径图。考虑障碍物及舰船的运动特性, IPRM 分阶段查询节点, 可有效减少需查询节点数量、减少计算量、获得可行的全局航线。

航线规划任务中若存在动态障碍物躲避问题, 同一航线在不同时间的可行性通常有较大差异。图 3 中, 海图每 12 h 进行一次更新。



(a) 第1阶段海图



(b) 第2阶段海图

图 3 不同时段海图示例

Fig. 3 Nautical charts of different periods

根据舰船航速, 本文首先计算舰船在一定阶段相应海图上的行驶范围, 其次在该范围内设置节点。考虑到节点数量及位置在很大程度上决定了全局航线的质量; 因此在学习阶段, 除随机生成节点外, 本文在关键区域进行节点扩充, 即最佳路线可能经过的区域。具体策略为: 连接起点与终点, 在该直线上等间隔取点作为扩充节点; 以该直线上的点为圆心, 以 D_1 为直径作圆, 对与该圆相交的障碍物, 围绕其边缘取点进行节点扩充。在连接节点生成路径网络图时, 对每个节点, 选择与其最近邻的若干个节点进行连接, 生成局部路径。相较随机生成的节点, 对关键区域选择较

多节点与其连接,增大其在查询阶段被选择的概率;基于此生成路径网络图.重复此过程,获得每一阶段相应的路径网络图.如上海-马尼拉的航线规划任务,大型集装箱船只行驶速度为36~52 km/h,取中间值为估计航速,则其在不同时段可选择节点如图4所示.在获得路径网络图的基础上,从第1阶段开始,依次查询路径网络图,选择节点及相应的路径进行连接,直至生成全局航线,对航线可行性进行进一步检验.分阶段设置与选择节点可有效减少计算量.

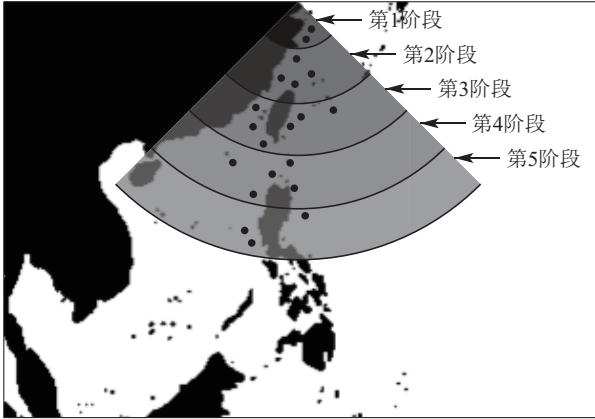


图4 改进的随机路径图节点选择范围

Fig. 4 The regional scope of nodes in different periods

3.2 基于改进和声搜索的航线优化

和声搜索算法(harmony search, HS)首先随机生成初始解保存在记忆库中,其次利用随机生成、组合、微调等策略对初始解进行优化.其初始解对最终所得解质量影响较大.航线规划问题相应解空间为复杂的多峰形态,直接利用HS优化策略任意改变航线节点可能导致新航线不可行.较随机生成的航线,利用IPRM生成的航线质量较高.为有效提高初始航线质量,本文利用改进的和声搜索算法(improved harmony search, IHS)对其进行优化. IHS的初始解为IPRM生成的全局航线. IHS引入遗传算法中交叉策略,结合节点消除与微调策略对航线进行优化.为保证新生成航线的可行性, IHS首先检测其是否满足相应的更新条件.在此基础上选择相应的优化策略生成新航线. IHS具体优化策略如下.

对解空间为 n 维的优化问题,任一备选解可用 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 表示.由多个备选航线构成的记忆库HM可表示为

$$HM = \begin{bmatrix} X^1 & f(X^1) \\ X^2 & f(X^2) \\ \vdots & \vdots \\ X^{HMS} & f(X^{HMS}) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中: X^i 为由IPRM生成的全局航线, $1 \leq i \leq HMS$, HMS表示记忆库中航线数量; f 为评价航线质量的适

度函数,如式(3)所示.

IHS针对记忆库中的备选航线,通过交叉航线、消除节点、微调节点位置对其进行优化. IHS首先从记忆库中选择两条初始航线,若其满足交叉要求,则通过交叉生成两条新航线,即:若两条航线存在交点,或者在海图区域中存在直径小于 D_2 、不包含障碍物的圆,且两条航线同时穿过该圆,此时可对两条航线进行交叉操作.若有路径 $X^1 = \{x_1^1, \dots, x_i^1, p_c, x_l^1, \dots, x_n^1\}$, $X^2 = \{x_1^2, \dots, x_k^2, p_c, x_j^2, \dots, x_m^2\}$,其交点为 p_c ,交叉操作后两条新航线分别为 $X_1^{\text{new}} = \{x_1^1, \dots, x_i^1, p_c, x_j^2, \dots, x_m^2\}$, $X_2^{\text{new}} = \{x_1^2, \dots, x_k^2, p_c, x_l^1, \dots, x_n^1\}$.若两条航线不存在交点,但在 X^1 上存在点 $p_1: (\varphi_1, \lambda_1)$,在 X^2 上存在点 $p_2: (\varphi_2, \lambda_2)$, p_1 和 p_2 同时位于直径小于 D_2 、不包含障碍物的圆内,则 X^1 和 X^2 在点 $p_m: (\varphi_m, \lambda_m)$ 处进行交叉,生成新路径 $\{x_1^1, \dots, x_i^1, p_m, p_2, \dots, x_m^2\}$, $\{x_1^2, \dots, x_k^2, p_m, p_1, \dots, x_n^1\}$, $\varphi_m = (\varphi_1 + \varphi_2)/2$, $\lambda_m = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$.

对新生成的两条航线,若其可行,则将其与原航线进行比较,选择质量较高的两条航线保存在记忆库中,并按以下策略进行节点消除及微调操作:生成随机数 r , r 在0和1之间均匀分布;若 $r < \text{PAR}$,则尝试消除航线中的节点,PAR为消除节点的概率.对航线 $X^1 = \{x_1^1, \dots, x_i^1, \dots, x_j^1, \dots, x_n^1\}$,若其节点 x_i^1, x_j^1 之间存在不与障碍物相交的子路径,则消除原航线中 x_i^1, x_j^1 之间的节点;否则对节点位置按式(5)–(6)进行微调,得到新的航线:

$$x_{i1}^{\text{new}} = x_{i1} + r_1, |r_1| < \text{BW}, \quad (5)$$

$$x_{i2}^{\text{new}} = x_{i2} + r_2, |r_2| < \text{BW}, \quad (6)$$

其中: BW为节点位置微调幅度; r_1, r_2 为绝对值小于BW的随机数; x_{i1}, x_{i2} 为节点 x_i 的经、纬度.考虑到能消除节点可有效减小航程,但其为不可逆操作,相对地微调策略对航线的改动较小;因此,本文中PAR取值较小.

对新生成的航线 X^{new} ,若其可行,将其与记忆库中最差航线 X^{worst} 进行比较:若 $f(X^{\text{new}}) < f(X^{\text{worst}})$,则将 X^{new} 代替 X^{worst} ;否则,不改变记忆库.对优化过程中生成的不可行航线,直接舍弃,记忆库保留原航线.

3.3 改进的随机路径图及和声算法步骤

综上所述,利用改进的随机路径图及和声算法进行航线规划的步骤为

步骤1 根据海图更新频率及舰船航速,确定不同阶段海图上节点范围;

步骤2 按阶段在海图上相应区域随机生成节点,并在关键区域进行节点扩充;

步骤3 有侧重地选择节点并连接,生成各个阶段对应的路径网络图;

步骤4 按阶段查询路径网络图进行路径连接, 生成初始全局航线;

步骤5 重复步骤2–4生成多条全局航线保存在记忆库中, 并计算其适应度值;

步骤6 随机选择两条航线, 若满足相应要求, 则进行交叉操作, 比较新航线与原航线的适应度值, 选择质量较高的两条航线保存在记忆库中; 若新航线不可行, 则舍弃, 记忆库中保留原航线;

步骤7 生成随机数, 尝试消除航线中的节点、调整航线节点位置, 将生成的新航线与记忆库中最差航线进行比较, 选择质量较高的航线保存在记忆库中; 若新航线不可行, 则舍弃, 记忆库保留原航线;

步骤8 重复步骤6–7直至算法结束.

本文算法在可行的初始航线的基础上进行优化, 改进的和声搜索策略能有效保证新生成航线的可行性, 对解空间进行有效搜索.

4 实验结果与分析

为验证所提算法的有效性, 本文利用多个舰船航线规划任务进行实验验证. 任务1中舰船起点为上海, 终点为马尼拉. 舰船行驶过程中无台风、气旋等运动障碍物出现. 任务2、3均存在台风、气旋等障碍, 海图每12小时进行更新. 任务2中舰船起点为上海, 终点为马尼拉, 包含8个不同时段海图信息. 任务3起点为上海, 终点为胡志明市, 包含12个不同时段海图信息.

本文将所提算法(IPRM-IHS)与和声搜索算法

(HS)、粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)、蚁群算法(ant colony algorithm, ACA)、人工蜂群算法(artificial bee colony algorithm, ABC)等进行比较. 实验环境为 Windows 10 64 bit, CPU 为 Intel Core 2.80 GHz, 内存为4.0 GB, MATLAB 2014b. 实验输入为舰船航速、起点与终点、海图信息等; 输出为相应航线信息. 实验中, 种群规模均为30, 迭代次数上限为1000. 对IPRM-IHS, PAR决定了节点被消除的概率; 相对于微节点位置, 消除节点对航线的改动较大. 考虑到迭代次数上限较大及节点消除操作不可逆, PAR取值不应过大. 本文中 $PAR = 0.2$, 即在每次迭代过程中, 对任意航线, 消除其节点的概率不大于20%. BW决定节点经纬度变化范围, 考虑节点位置的较大改变可能导致航线不可行; 因此BW应取较小值. 本文中 $BW = 0.005$, 即节点位置微调上限约为0.6 km. HS中, $HMCr = 0.9$, $PAR = 0.5$, $BW = 0.005$; PSO中, 惯性常数 $\omega = 0.7$, $c_1 = c_2 = 2$; ACA中, 启发式因子重要程度 $\beta = 7$, 信息素重要程度 $\alpha = 0.0001$, 信息素挥发系数 $c = 0.5$; ABC中, φ 为 $[-1, 1]$ 之间的随机数. 若连续迭代200次仍未有更优航线出现, 则算法结束.

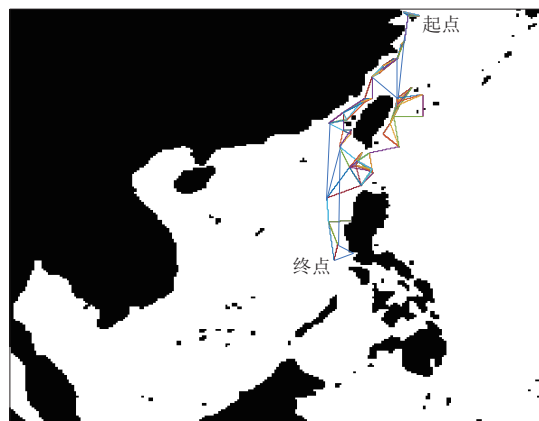
对每个航线规划任务, 每个算法重复运行30次, 相应航线航程的均值及归一化方差如表1所示. 图5–7分别为IPRM-IHS针对任务1–3生成的路径网络图及全局路径.

表1 实验结果: IPRM-IHS与启发式优化算法对比

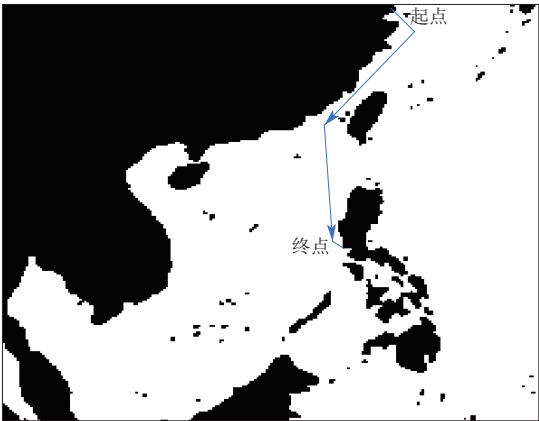
Table 1 Experimental results: the comparison between IPRM-IHS and other heuristic algorithms

任务	IPRM-IHS		HS		PSO		ACA		ABC	
	航程 均值/km	归一化 方差	航程 均值/km	归一化 方差	航程 均值/km	归一化 方差	航程 均值/km	归一化 方差	航程 均值/km	归一化 方差
1	2331	8.45e-3	2508	1.53e-2	2615	2.16e-2	2446	1.31e-2	2495	1.25e-2
2	2472	1.01e-2	2677	1.96e-2	2743	2.58e-2	2608	1.42e-2	2631	1.49e-2
3	3126	1.22e-2	3469	2.49e-2	3586	2.94e-2	3324	1.95e-2	3387	1.78e-2

从表1中可知, 对3个航线规划任务, IPRM-IHS生成的航线航程均值及归一化方差均为最小; 验证了相较其余几种算法, IPRM-IHS在航线规划问题上的适用性. 在其余几种优化算法中, ACA表现略优于ABC, HS和PSO所得航线质量较差. 在实验中发现, 对初始航线进行更新优化时, HS通过随机生成航线中节点位置, PSO利用向更优航线靠近的策略更改航线中节点位置, 都可能导致新生成的航线与障碍物相遇而不可行, 即搜索无效; 这是降低算法有效性的重要原因. 相应的, ACA, ABC围绕可行航线进行优化, 也会产生新生成的航线与障碍物相遇的情况, 但比例相对较小.



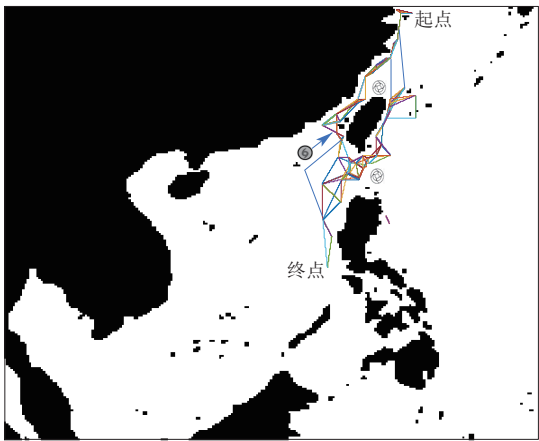
(a) 路径网络图



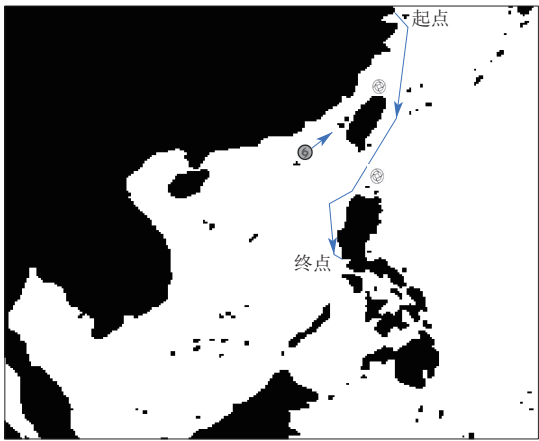
(b) 全局路径

图 5 任务1路径网络图及全局路径

Fig. 5 The route map and global route for Task 1



(a) 路径网络图



(b) 全局路径

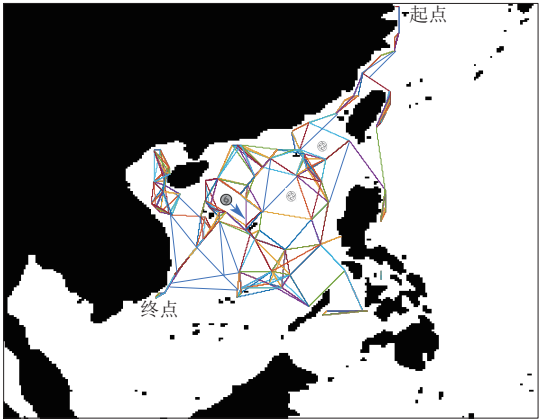
图 6 任务2路径网络图及全局路径

Fig. 6 The route map and global route for Task 2

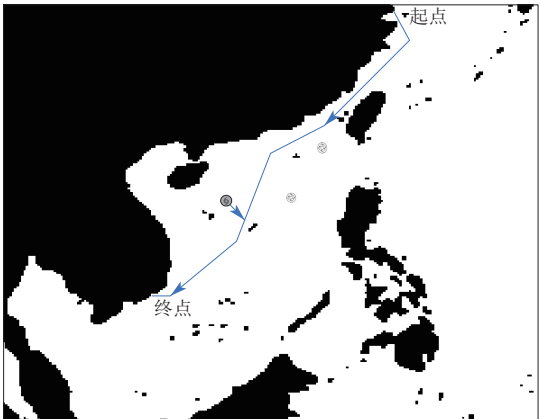
统计实验结果发现, IPRM-IHS在优化过程中生成不可行航线26次, HS为403次, PSO为352次, ABC为189次, 即本文采用的改进和声算法在航线优化问题上效率远高于其余几种对比算法. 本文提出的优化策略较好保证新生成航线的可行性.

IPRM-IHS稳定较好, 即相应的航线航程方差较小. PSO, HS无法保证新生成航线的可行性, 算法稳定性相对较差, 相应的方差较大. 从表1中可知, 随问题复杂度上升, 算法稳定性均有所下降, IPRM-IHS所得归一化方差变化相对较小; 验证在存在动态障碍物的复杂海况下, IPRM-IHS更具优越性.

为分析所提算法效率, 表2给出每个算法平均运行时间. 对任务2、任务3, 图8给出随机抽取的一组算法收敛曲线.



(a) 路径网络图



(b) 全局路径

图 7 任务3路径网络图及全局路径

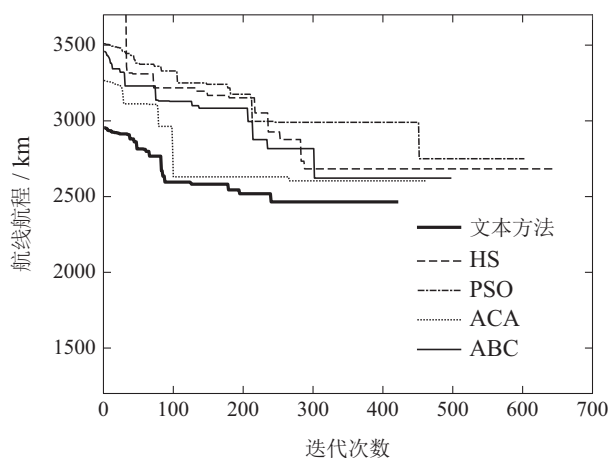
Fig. 7 The route map and global route for Task 3

表 2 IPRM-IHS与启发式优化算法运行时间
Table 2 The running time of IPRM-IHS and other heuristic algorithms

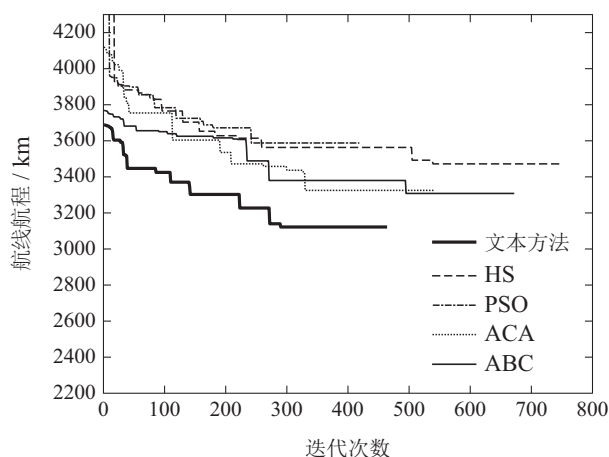
运行时间	IPRM-IHS/s	HS/s	PSO/s	ACA/s	ABC/s
任务1	17	14	21	23	26
任务2	27	26	35	34	40
任务3	35	33	51	47	58

从表2可知, HS的运行时间最短, PSO的运行时间最长. IPRM-IHS的效率与HS相当. 从图8中同时可知, IPRM-IHS的初始航线具有较好的质量, 同时其收敛速度最快. IPRM-IHS在利用种群进行优化前首先

利用改进的PRM生成可行航线, 该过程耗费一定时间。



(a) 任务2收敛曲线



(b) 任务3收敛曲线

图 8 任务2与任务3的收敛曲线

Fig. 8 The convergence curves for Task 2 and Task 3

所有算法的运行时间随着问题复杂度的上升而增

长. 对涉及动态障碍物躲避的航线规划问题, 需处理的海图信息较多, 导致算法运行时间增长。

为进一步验证IPRM-IHS的有效性, 本文将其与改进的PRM算法(LPRM, GSPRM, VPRM)进行对比^[22-24], 所得实验结果如表3所示。

表 3 IPRM-IHS与LPRM, GSPRM, VPRM对比

Table 3 Comparison between IPRM-IHS, LPRM, GSPRM and VPRM

航程/km	IPRM-IHS	LPRM	GSPRM	VPRM
任务1	2331	2488	2531	2439
任务2	2472	2634	2675	2583
任务3	3126	3285	3371	3402

分析表3可知, IPRM-IHS 相较 LPRM, GSPRM, VPRM在航线规划问题上具有更好的适用性. LPRM利用贪婪搜索的策略, 在已有路径网络图的基础上可查找出连接起点与终点的最短路径. 其所得航线质量严重依赖于节点的分布. GSPRM引入高斯滤波函数, 增大靠近障碍物的节点被存储在路径网络图中的概率. 该策略可有效增大生成可行路线的概率; 但在障碍物较为分散且距终点相对较远时, 有可能降低全局航线质量. VPRM通过设置节点, 完成对整个地图的可视性覆盖; 但对于动态障碍物躲避问题, 其原先有效可视范围会发生相应变化, 在一定程度增大获得高质量全局航线的难度。

为分别验证PRM改进策略与和声改进策略的有效性, 本文将IPRM与PRM, IHS与HS进行比较, 其中: IPRM与PRM利用相同数量的节点构造路径网络图; IHS与HS的记忆库初始解均为IPRM生成的多个备选航线, 实验结果如表4所示。

表 4 实验结果: IPRM与PRM, IHS与HS对比

Table 4 Experimental results: the comparison between IPRM and PRM, the comparison between IHS and HS

任务	IPRM		PRM		IHS		HS	
	航程均值/km	归一化方差	航程均值/km	归一化方差	航程均值/km	归一化方差	航程均值/km	归一化方差
1	2530	2.39e-2	2759	2.72e-2	2331	8.45e-3	2411	1.19e-2
2	2685	3.07e-2	2937	3.76e-2	2472	1.01e-2	2587	1.35e-2
3	3412	3.25e-2	3853	4.50e-2	3126	1.22e-2	3306	1.87e-2

分析表4可知, IPRM与PRM相比, 获得的航线质量更高. IPRM的主要优势体现在: 其按阶段查询节点并连接; 在构造全局路径时选择的节点数量较少, 且其节点大部分为围绕障碍物分布或位于连接起点与终点的连线区域附近; 相较PRM, 其构造的路径网络图更加完备, 更有可能生成高质量的全局航线. 分析

实验结果同时可知, 将IPRM生成的全局航线作为IHS及HS的初始解, IHS能更加有效地对初始解进行优化. HS利用随机生成、从记忆库中随机选择备选解进行改进的策略易造成新生成航线不可行, 造成搜索资源的浪费. 考虑初始解已有较好的质量及多样性, IHS仅对满足限制条件的航线进行优化, 该策略有效避免种

群在解空间中无效搜索.

为验证IPRM与IHS结合策略的有效性, 本文将IP

RM与ACA, PSO分别进行组合, 将其作为对比算法, 实验结果如表5所示.

表5 实验结果: IPRM-IHS与IPRM-ACA, IPRM-PSO对比

Table 5 Experimental results: the comparison between IPRM-IHS, IPRM-ACA and IPRM-PSO

任务	IPRM-IHS		IPRM-ACA		IPRM-PSO	
	航程均值/km	归一化方差	航程均值/km	归一化方差	航程均值/km	归一化方差
1	2331	8.45e-3	2376	1.07e-2	2565	1.88e-2
2	2472	1.01e-2	2538	1.35e-2	2728	2.06e-2
3	3126	1.22e-2	3274	1.62e-2	3460	2.79e-2

分析表5可知, IPRM-ACA, IPRM-PSO较ACA, PSO所得航线质量略有提高. IPRM算法生成的航线相较随机生成的航线具有更高的质量. ACA, PSO均围绕解空间中较高质量的解展开搜索. 由于航线规划问题中障碍物为运动状态, 相应的解空间为复杂的多峰形态, 仅改变ACA, PSO的初始解而采用同样的优化策略, 对航线进行有效优化的难度较大.

综上可知, 本文利用IPRM-IHS为舰船进行航线规划, 相较其余几种对比算法具有明显的优越性. IPRM-IHS的节点设置与查询策略, 可有效减少计算量, 增大生成高质量全局航线的概率. 本文利用随机路径图查询阶段的随机性, 多次重复随机路径图生成多条初始全局航线, 并将其作为IHS的输入量, 设定优化条件使种群对解空间进行有效搜索. 实验结果验证该策略的可靠性与稳定性.

5 结论

针对舰船航线规划问题, 本文提出一种改进的随机路径图及和声算法. 该算法首先利用改进的随机路径图生成多条可行的初始航线, 随后利用改进的和声搜索算法, 通过交叉、节点消除、微调策略对航线进行优化, 最终获得全局航线. 实验结果表明, 相较对比算法, 本文所提算法生成的航线质量更高, 算法的稳定性更好. 进一步提高算法效率是本文下一步工作的重点.

参考文献:

- [1] JIA Maoliang. *Unmanned vehicle path planning based on electronic chart*. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2019.
(贾茂良. 基于电子海图的无人艇路径规划. 天津: 天津理工大学, 2019.)
- [2] TANG Lei. *Ship scheduling and speed optimizing in tramp shipping*. Dalian: Dalian Maritime University, 2014.
(唐磊. 不定期运输船舶调度及航速优化研究. 大连: 大连海事大学, 2014.)
- [3] ZHANG Fuhai, LI Ning, YUAN Rupeng, et al. Robot path planning algorithm based on reinforcement learning. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (National Science Edition)*, 2018, 46(12): 65 – 70.
(张福海, 李宁, 袁儒鹏, 等. 基于强化学习的机器人路径规划算法. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(12): 65 – 70.)
- [4] CUI R X, LI Y, YAN W S. Mutual information-based multi-AUV path planning for scalar field sampling using multidimensional RRT. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(12): 9585 – 9596.
- [5] LI J Q, DENG G Q, LUO C W, et al. A hybrid path planning method in unmanned air/ground vehicle (UAV/UGV) cooperative systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2015, 46(7): 993 – 1004.
- [6] ZHU Daqi, LIU Yu, SUN Bing, et al. Autonomous underwater vehicles path planning based on autonomous inspired Glasius bio-inspired neural network algorithm. *Control Theory & Applications*, 2018, 36(2): 183 – 191.
(朱大奇, 刘雨, 孙兵, 等. 自治水下机器人的自主启发式生物启发神经网络路径规划算法. 控制理论与应用, 2019, 36(2): 183 – 191.)
- [7] WANG Dianjun. Indoor mobile robot path planning based on an improved A* algorithm. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2012, 52(8): 1085 – 1089.
(王殿君. 基于改进A*算法的室内移动机器人路径规划. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(8): 1085 – 1089.)
- [8] XIN Yu, LIANG Huawei, DU Mingbo, et al. An improved A* algorithm for searching infinite neighbourhoods. *Robot*, 2014, 36(5): 627 – 633.
(辛煜, 梁华为, 杜明博, 等. 一种可搜索无限个邻域的改进A*算法. 机器人, 2014, 36(5): 627 – 633.)
- [9] BARRAQUAND J, LANGLOIS B, LATOMBE J C. Numerical potential field techniques for robot path planning. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1992, 22(2): 224 – 241.
- [10] ZHU Yi, ZHANG Tao, SONG Jingyan. Study on the local minima problem of path planning using potential field method in unknown environments. *Acta Automatica Sinica*, 2010, 36(8): 1122 – 1130.
(朱毅, 张涛, 宋靖雁. 未知环境下势场法路径规划的局部极小问题研究. 自动化学报, 2010, 36(8): 1122 – 1130.)
- [11] XIE Long, LIU Shan. Dynamic obstacle-avoiding motion planning for manipulator based on improved artificial potential filed. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(9): 1239 – 1249.
(谢龙, 刘山. 基于改进势场法的机械臂动态避障规划. 控制理论与应用, 2018, 35(9): 1239 – 1249.)
- [12] WANG Xiaoyan, YANG Le, ZHANG Yu, et al. Robot path planning based on improved ant colony algorithm with potential field heuristic. *Control and Decision*, 2018, 33(10): 1775 – 1781.
(王晓燕, 杨乐, 张宇, 等. 基于改进势场蚁群算法的机器人路径规划. 控制与决策, 2018, 33(10): 1775 – 1781.)
- [13] ZHU Qingbao, ZHANG Yulan. An ant colony algorithm based on grid method for mobile robot path planning. *Robot*, 2005, 27(2): 132 – 136.
(朱庆保, 张玉兰. 基于栅格法的机器人路径规划蚁群算法. 机器人, 2005, 27(2): 132 – 136.)

- [14] YOU Xiaoming, LIU Sheng, LÜ Jinqiu. Ant colony algorithm based on dynamic search strategy and its application on path planning of robot. *Control and Decision*, 2017, 32(3): 552 – 556.
(游晓明, 刘升, 吕金秋. 一种动态搜索策略的蚁群算法及其在机器人路径规划中的应用. 控制与决策, 2017, 32(3): 552 – 556.)
- [15] WANG Xuewu, YAN Yixin, GU Xingsheng. Welding robot path planning based on Levy-PSO. *Control and Decision*, 2017, 32(2): 373 – 377.
(王学武, 严益鑫, 顾幸生. 基于莱维飞行粒子群算法的焊接机器人路径规划. 控制与决策, 2017, 32(2): 373 – 377.)
- [16] DAS P K, BEHERA H S, PANIGRAHI B K. Intelligent-based multi-robot path planning inspired by improved classical Q-learning and improved particle swarm optimization with perturbed velocity. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2016, 19(3): 651 – 669.
- [17] BANSAL P, SABHARWAL S, MITTAL N. A hybrid artificial bee colony and harmony search algorithm to generate covering arrays for pair-wise testing. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 2017, 9(8): 59 – 70.
- [18] LIU Meiyao, LEI Deming. New artificial bee colony for distributed unrelated parallel machine scheduling. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(5): 1080 – 1089.
(刘美瑶, 雷德明. 基于新型人工蜂群算法的分布式不相关并行机调度. 控制理论与应用, 2020, 37(5): 1080 – 1089.)
- [19] ZHENG Xiaocao, GONG Wenxin. An improved artificial bee colony algorithm for fuzzy flexible job-shop scheduling problem. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(6): 1284 – 1292.
(郑小操, 龚文引. 改进人工蜂群算法求解模糊柔性作业车间调度问题. 控制理论与应用, 2020, 37(6): 1284 – 1292.)
- [20] GEEM Z W, KIM J H, LOGANATHAN G V. A new heuristic optimization algorithm: harmony search. *Simulation*, 2001, 76(2): 60 – 68.
- [21] KUMAR V, CHHABRA J K, KUMAR D. Parameter adaptive harmony search algorithm for unimodal and multimodal optimization problems. *Journal of Computational Science*, 2014, 5(2): 144 – 155.
- [22] BOHLIN R, KAVRAKI L E. Path planning using lazy PRM. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. San Francisco: IEEE, 2000, 1: 521 – 528.
- [23] SIMÉON T, LAUMOND J P, NISSOUX C. Visibility-based probabilistic roadmaps for motion planning. *Advanced Robotics*, 2000, 14(6): 477 – 493.
- [24] BOOR V, OVERMARS M H, STAPPEN F V D. The Gaussian sampling strategy for probabilistic roadmap planners. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Michigan: IEEE, 1999, 2: 1018 – 1023.

作者简介:

吕进锋 博士, 讲师, 研究方向为路径规划、群智能算法及其在海上搜救中的应用, E-mail: jinfengnn@163.com;

马建伟 博士, 教授, 研究方向为模式识别、人工智能及导航制导, E-mail: lymjw@163.com;

李晓静 博士研究生, 研究方向为导航制导、智能算法及应用, E-mail: lixiaojing@163.com.