

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.09.004

改进蚁群算法在潜艇规避机载声纳探测的路径优化应用

戴明强, 李旺, 项浩

(海军工程大学 理学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 在引用的敌反潜直升机探测我潜艇的概率模型的基础上, 给出一种新的改进蚁群算法。通过可挥发系数 $1-\rho$ 概率和引入风险规避指数 γ , 使路径具有远离非安全区域时有风险规避能力。为加快算法程序的实现速度, 引入了目标方向系数方阵 W , 使收敛速度成倍提高。并运用实例分析了 γ 、 W 对最优路径的影响与 W 对程序运算速度的影响。实例表明, 该方法是有用的, 说明引入 $1-\rho$ 、 γ 、 W 的合理性与科学性, 特别是 γ 、 W 有很好的控制能力与实用性。

关键词: 蚁群算法; 挥发系数; 潜艇; 路径

中图分类号: TP301.6; C934 **文献标识码:** A

Application of Improved Ant Colony Algorithm in Path Optimization of Submarine Evading Search of Dipping Sonar on Aircraft

Dai Mingqiang, Li Wang, Xiang Hao

(College of Science, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Based on the probability model of enemy aircraft sensor on research submarine, an improved ant colony algorithm (ACA) is presented. The algorithm makes sure that the path has the ability of keeping away from the unsafe area far away by the coefficient of pheromone volatile $1-\rho$ and the index of evading risk γ . The coefficient matrix of direction to target W is introduced to save running time. Finally, the analysis result of the example indicates that using $1-\rho$, γ , W are reasonable and useful. Especially, the right using of γ , W is helpful and can improve the control ability as well as practicability.

Keywords: ant colony algorithm; coefficient of pheromone volatile; submarine; path

0 引言

由于高新技术在现代海战中的应用, 使潜艇阵地伏击、区域游猎、引导截击的传统战法发生了改变, 被潜艇奔袭战、机动伏击战、潜艇截击战、协同突击战、水雷打击封锁战、防御反击战、潜艇袭岸战等灵活多样的新战法所丰富与替代^[1]。而任何战术的成功实现都离不开有利的战场占位, 潜艇有其隐蔽性的优点, 但又有被现代水面以上敌兵发现即等同被消灭的致命弱点。因此, 海战中潜艇安全快速的机动路径是获得有利占位的必要条件。故通过建立模型给出求解方法来解决该问题, 为潜艇战术的成功实施提供决策参考。

1 模型

1.1 战场环境简化

首先把连续战场空间离散, 以一定比例, 把战场划分为如图 1 的网格平面, 按文献[2]给出的评估方法, 将网格中标有 1 的格子评价为不安全航行区域, 这里的安全影响原因不包括敌方军事存在因素:

该区域内水深、障碍物、水文气象等, 只要其中一项不满足潜艇安全航行条件, 便认为不安全, 标记为 1。A、B 分别表示 1 存在反潜直升机声纳搜索的区域, 可以是岛礁上的固定机场反潜直升机或航母上的反潜直升机。为方便起见, 假设反潜直升机搜索区域为分别以 R_a 、 R_b 为半径的圆形域。假设我方潜艇初始位置为 $O=(0.5,0.5)$ (各坐标单位为 1, 下同), 实施期望战术的有利位置为 $D=(29.5,29.5)$ 。

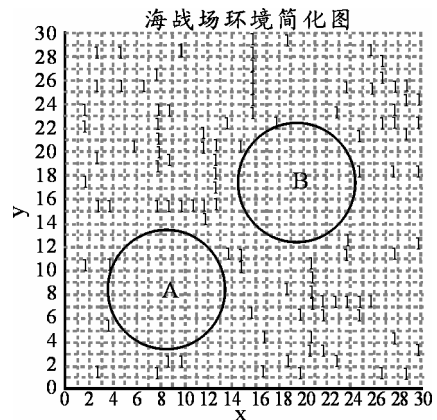


图 1 海战场环境简化图

收稿日期: 2010-03-14; 修回日期: 2010-04-23

作者简介: 戴明强 (1964-), 男, 浙江人, 教授, 从事军事系统优化建模与决策研究。

敌方反潜直升机探测区域中心坐标分别为： $A(8.5,8.5), B(19.5,17.5)$ ，探测区域半径均为 $R=5$ 。

1.2 反潜直升机探测我潜艇概率的数学模型

在舰载反潜直升机搜索面积 SK 的区域内，反潜直升机使用一种被动声纳探测时，我潜艇被发现概率为式 (1)^[3]：

$$p_m = 1 - \exp\left(-A \frac{T_n}{R^2}\right) \quad (1)$$

其中，A 为常数，可根据文献[3]计算得到。我潜艇在直升机探测区的航行路程 L_n 作为航行时间 T_n 的等价量度，则我潜艇在直升机探测区生存概率为：

$$P = \exp\left(-A \frac{L_n}{R^2}\right) \quad (2)$$

1.3 模型目标

显然，算法目标是求解一条从起点 O 到终点 D 的最优路径，因此模型目标是使该路径：1) 长度尽可能短，即战术机动时间尽可能少；2) 我潜艇战术机动时的生存概率尽可能大。根据模型特点，采用蚁群算法求该多目标模型的满意解。

2 蚁群算法

2.1 蚁群算法基本思想

基本蚁群算法模拟蚁群觅食行为的仿生，蚂蚁在觅食过程中对所经过路段释放一种被称为信息素的物质，其他蚂蚁通过对可供选择的路段残留信息素的数量，选择下一步的搜寻路段。显然，若路段越短，走完时间就越少，重复走的次数就越多，则该路段残留信息素越多，各蚂蚁选择该路段的可能性也就越大。因此，足够长时间后，几乎所有蚂蚁都走同一条路，即最短路径。同时，蚁群还能适应环境的变化^[4]：当蚁群的运动路径上突然出现障碍物时，蚂蚁也能很快地重新找到最优路径。可见，在整个寻径过程中，虽然单只蚂蚁的选择能力有限，但是通过信息素的作用使整个蚁群行为具有非常高的自组织性，蚂蚁之间交换着路径信息，最终通过蚁群的集体自催化行为找出最优路径。

2.2 改进蚁群算法设计

用 m 表示蚁群中蚂蚁的数量， $[(i,j),(w,u)]$ 表示联接点 (i,j) 到点 (w,u) 的边， $d_{(i,j)(w,u)}$ 是点 (i,j) 到

点 (w,u) 的距离，这里 $(w,u) \in allowed_{(i,j)}$ ， $allowed_{(i,j)}$ 为点 (i,j) 的非障碍的相邻点集合，例如点 $(2.5,3.5)$ 的相邻点集合为 $\{(1.5,3.5), (1.5,4.5), (1.5,2.5), (2.5,4.5), (2.5,2.5), (3.5,4.5), (3.5,3.5), (3.5,2.5)\}$ 。 $\eta_{(i,j)(w,u)} = 1/d_{(i,j)(w,u)}$ 是点 (i,j) 到点 (w,u) 的边的能见度，反映由点 (i,j) 到点 (w,u) 的启发程度， $\tau_{(w,u)}$ 是点 (w,u) 上的信息素强度， $p_{(i,j)(w,u)}^k(t)$ 是时段 t 到 $t+1$ (即第 t 次循环) 内蚂蚁 k 从点 (i,j) 到点 (w,u) 的转移概率， (w,u) 是蚂蚁 k 尚未访问的点，则转移概率为：

$$p_{(i,j)(w,u)}^k(t) = \begin{cases} \frac{\omega_{(w-i,u-j)} \tau_{(w,u)}^\alpha(t) \eta_{(i,j)(w,u)}^\beta}{\sum_{(w,u) \in allowed_{(i,j)}} \omega_{(w-i,u-j)} \tau_{(w,u)}^\alpha(t) \eta_{(i,j)(w,u)}^\beta} & (3) \\ , \text{ 当 } (w,u) \in allowed_{(i,j)} \\ 0, \text{ 否则} \end{cases}$$

式 (3) 中， α 、 β 为 2 个参数，分别反映了蚂蚁在运动过程中积累的信息和启发信息在蚂蚁选择路径中的相对重要性^[5]。 $\omega_{(w-i,u-j)}$ 称为目标方向系数，它的相对大小反映了蚂蚁对目标方向的大体判断， $\omega_{(w-i,u-j)}$ 的取值反映了蚂蚁对目标的方位判断，它的取值反映蚂蚁对该方向在地理信息上的选择大小。 $\omega_{(w-i,u-j)}$ 的方位对应值见表 1。

表 1 $\omega_{(w-i,u-j)}$ 与方位对应值表

$\omega_{(w-i,u-j)}$	$\omega_{(-1,-1)}$	$\omega_{(0,-1)}$	$\omega_{(1,-1)}$	$\omega_{(1,0)}$	$\omega_{(1,1)}$	$\omega_{(0,1)}$	$\omega_{(-1,1)}$	$\omega_{(-1,0)}$
方位	左下	下	右下	右	右上	上	左上	左

例如，若 (w,u) 在 (i,j) 的左下方时 ω 取 1，即 $\omega_{(w-i,u-j)} = \omega_{(-1,-1)} = 1$ ，其余方位取 2。方位阵 $W = \begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 \\ 2 & 0 & 2 \\ 1 & 2 & 2 \end{bmatrix}$ 称为目标方向系数方阵。设计一个禁忌表 $tavuk(k=1,2,\dots,m)$ ，记录在 t 次循环中蚂蚁 k 已走过的点，不允许该蚂蚁在一次循环中重复经过。每次循环结束后该禁忌表被清空。

蚂蚁完成一次循环, 对各路径上的信息素进行更新, 更新规则为:

$$\tau_{(w,u)}(t+1) = \rho_{(w,u)} \cdot \tau_{(w,u)}(t) + \Delta\tau_{(w,u)}(t,t+1) \quad (4)$$

其中, $\Delta\tau_{(w,u)}(t,t+1)$ 表示第 t 次循环中路段 (w,u) 的信息素增量, 并由式 (5) 确定。 $\rho_{(w,u)}$ 为 (w,u) 上的信息素残留系数, $1-\rho_{(w,u)}$ 则表示 (w,u) 上的信息素的挥发系数, $\rho_{(w,u)}$ 由式 (6) 确定。

$$\Delta\tau_{(w,u)}(t,t+1) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{(w,u)}^k(t,t+1) \quad (5)$$

$$\rho_{(w,u)} = \rho_0 \cdot \theta_{(w,u)} \quad (6)$$

式 (5) 中, $\Delta\tau_{(w,u)}^k$ 是蚂蚁 k 在点 (w,u) 上留下的信息素量, 由式 (7) 确定。式 (6) 中, ρ_0 为一常数, 且 $\rho_0 \in (0,1)$; $\theta_{(w,u)}$ 是 (w,u) 的函数, 且 $\theta_{(w,u)} \in (0,1]$, 主要是由点 (w,u) 处的风险程度确定, 该处风险越大, 则取值越小, 文中 $\theta_{(w,u)}$ 由式 (8) 确定。

$$\Delta\tau_{(w,u)}^k(t,t+1) = \begin{cases} \frac{Q \cdot P^\gamma}{L^k(t)}, & \text{蚂蚁 } k \text{ 经过 } (w,u) \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (7)$$

$$\theta_{(w,u)} = \begin{cases} C, & \text{当 } (w,u) \in \text{非安全区域;} \\ 1, & \text{否则} \end{cases} \quad (8)$$

式 (7) 中, Q 为常数, $L^k(t)$ 为第 k 只蚂蚁在第 t 次循环中所走路径的总长度。 $P_{(w,u)}$ 为蚂蚁 k 经过 (w,u) 时路径的生存率, γ 为一个参数, 反映了蚂蚁对风险的规避程度, 可以称为风险规避指数。式 (8) 中, C 为一常数, 且 $C \in (0,1)$, $\theta = 1$ 时, 表示 (w,u) 不在非安全区。算法流程如框图 2。

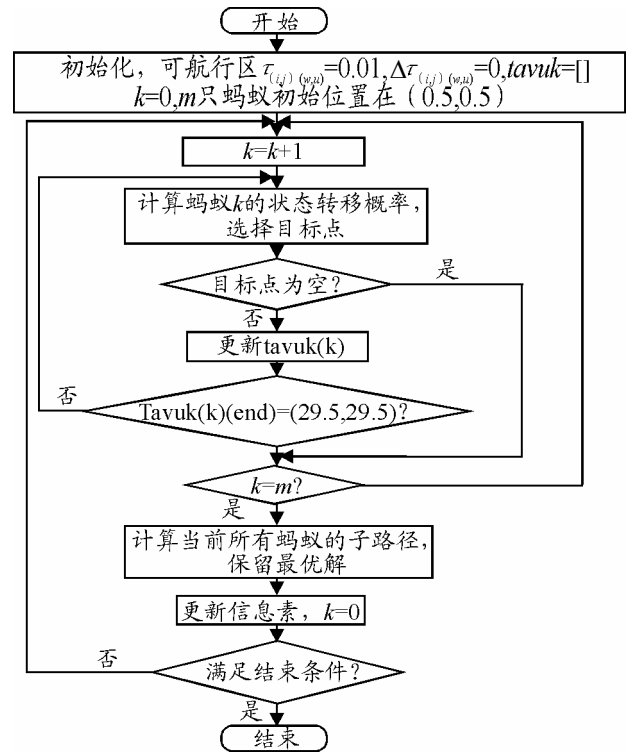


图 2 算法流程图

3 算法实例应用分析

以按图 1 给出战场环境为例, 用 Matlab7.1 按算法流程框图编程求解。并分析风险规避指数 γ 取值对最优路径搜索的影响以及目标方向系数方阵 W 对算法速度的影响。

3.1 γ 对最优路径搜索的影响

参数取值: 式 (2) 中 $A=1$, 反潜直升机探测半径均取 $R=5$ 。迭代次数取 50, $m=50$, $\alpha=2$, $\beta=1$, $\rho=0.9$, $C=0.95$, $Q=1$, 目标方向系数方阵取:

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 4 \\ 1 & 0 & 4 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

通过对 γ 的不同取值得到的最优路径与 γ 取值的关系见表 2 及图 3~图 10。

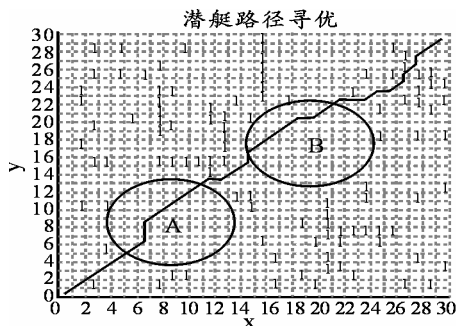


图 3 $\gamma=0$ 路径

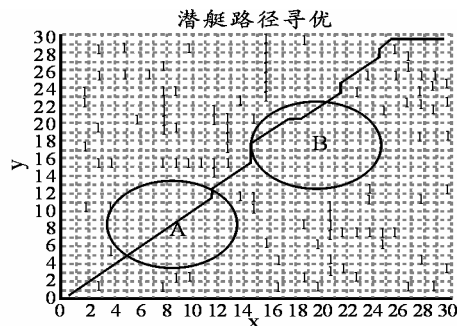


图 4 $\gamma=1$ 路径

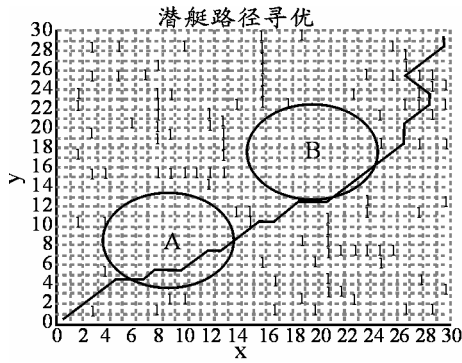


图 5 $\gamma=2$ 路径

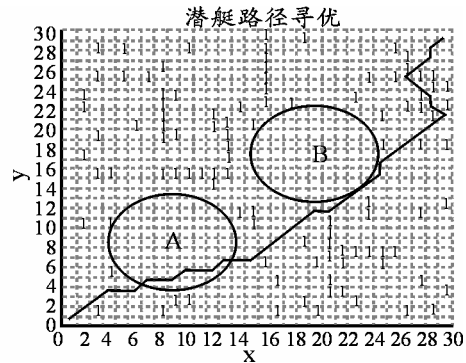


图 6 $\gamma=3$ 路径

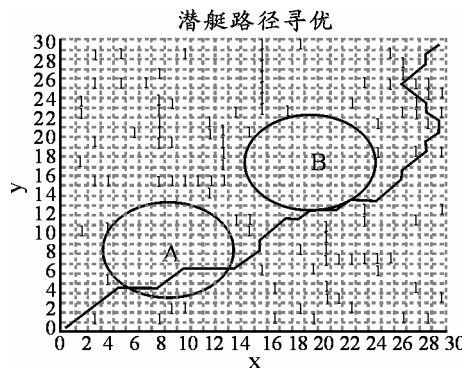


图 7 $\gamma=4$ 路径

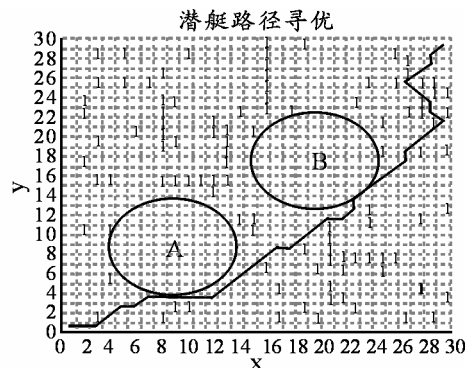


图 8 $\gamma=5$ 路径

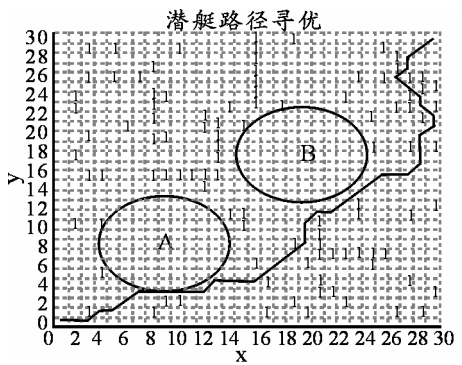


图 9 $\gamma=6$ 路径

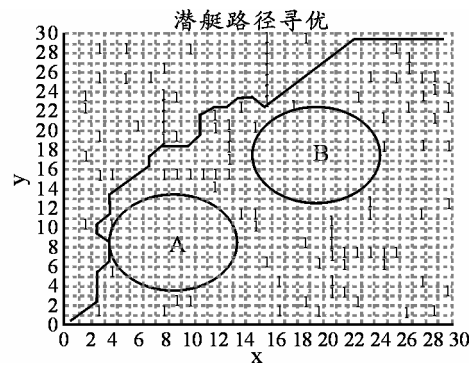


图 10 $\gamma=7$ 路径

表 2 程序最优路径与 γ 取值的关系表

γ 取值	生存率	路径长/km	路径说明
0	0.55	43.9	图 3
1	0.57	43.9	图 4
2	0.64	47.4	图 5
3	0.73	48.7	图 6
4	0.79	50.5	图 7
5	0.96	49.4	图 8
6	1.0	51.7	图 9
7	1.0	50.3	图 10

从表 2，可以得到如下结论：

- 1) 最优路径生存率随 γ 取值增大而增大，直到生存率为 1，见图 11；
- 2) 当 γ 取值较小时，最优路径长度随 γ 取值增大有增大趋势，当 γ 取值较大时，路径长随 γ 取值增大无明显变化，见图 12。

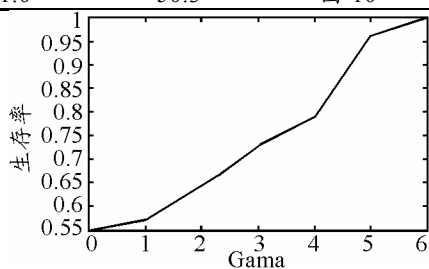


图 11 最优路径生存率随 γ 取值关系示意图

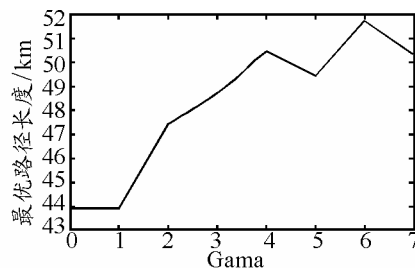


图 12 最优路径长随 γ 取值关系示意图

结论的算法理论解释为:

(1) 结论 1)出现的算法理论是: 由式 (9) 知, 当 γ 取值越大, 则在式中其它量相同的情况下, $\Delta\tau_{(w,u)}^k(t, t+1)$ 只能是越小, 即有经过非安全区的路径上点的信息素更新增量就越小, 因而以后路径可能选择非安全区点的可能性就必然要减小, 即以后路径规避非安全区的能力越强。

(2) 结论 2)出现的算法理论是: 在不考虑风险的情况下, 从出发点到终点的捷径直接穿过非安全区, 因此, 当 γ 取值增大 (此时 γ 取值还是比较小), 由结论 1)知, 规避风险能力变强, 最优路径长必然要增大; 当 γ 取值进一步增大, 生存率很大, 甚至生存率等于 1 时, 最优路径很少甚至不通过非安全区时, 式 (9) 中的 $P_{(w,u)}$ 接近或等于 1, 式 (8) 中的 $\theta_{(w,u)}$ 几乎或完全取 1, 这时, 几乎是在安全区域搜索最短路, 因而, 即使 γ 取值再进一步增大, 对在安全区域搜索也没有影响, 故当 γ 取值较大时, 路径长随 γ 取值增大无明显变化。

3.2 W 对算法速度的影响

首先给出蚂蚁寻路路长概念。蚂蚁寻路路长是指在程序运行中, 某只蚂蚁搜索到的路长, 这里的长度用单位 ‘跳’ 计, 1 跳指从一个点向另一个点移动 1 次。

在蚁群算法的每次迭代中, 程序运行时间除蚂蚁寻路时间不确定外, 其余运行时间一般相对稳定, 因此, 缩短蚂蚁寻路时间也就是减小蚂蚁寻路路长是能够提高运算速度的。在程序的蚂蚁寻路过程中, 有的蚂蚁甚至可能进入死角, 不能找到终点, 在兜圈子, 这时程序会进入 “死循环”, 显然速度就成了算法可操作性的关键。因此, 程序必须限制蚂蚁寻路路长的最大长度, 以快速求解。为了使蚂蚁寻路路长得到较好的限制, 利用目标方向系数方阵 W 赋予蚂蚁一定的 “方向感”, 使程序运行速度大大加快。

文中 W 的形式为: $W(x) = \begin{bmatrix} 1 & x & x \\ 1 & 0 & x \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$, 其中

$x \geq 1$, 可以不是整数。显然, x 越大, “方向感” 越强。 W 的引入有利于蚂蚁更快找到目标点。为了充分探究 W 对算法速度的影响, 不妨对 x 取 $x=1, 2, \dots, 6$ 分别进行实验。即对 W 作出以下取值:

$$W_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \dots, W_7 = \begin{bmatrix} 1 & 7 & 7 \\ 1 & 0 & 7 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}。$$

限制蚂蚁寻路路长的最大长度为 200, 并称路长超过该长的为坏路。取 $\gamma=3$, 其余参数同 3.1 节。实验结果见表 3。

表 3 W 对算法速度的影响

W 取值	坏路数	生存率	最优路长/km	说明
W_1	2 000			无路
W_2	648	1.00	53.4	
W_3	308	0.96	53.1	
W_4	255	0.82	49.5	
W_5	147	0.82	50.5	
W_6	78	0.57	44.5	
W_7	82	0.57	45.1	

从表 3, 可以得到以下结论:

1) 当 $W(x)$ 中 x 不是很大时, 坏路数随 x 的增大而迅速减小; 当 x 比较大时, 坏路数随 x 的增大无明显变化。2) 随 x 的增大, 得到的最优路径长减小, 生存率降低, 显然, 最优路寻找逐步偏向 “最短路” 的捷径搜索, 规避风险能力减弱。当 x 足够大时, 程序得到的最优路便成为的纯粹的 shortest path, 算法的自适应能力下降。

因此, 若能恰当选取 W 的取值, 便能在很大程度上提高算法程序速度, 并且不影响算法的自适应能力。同时, 也只有恰当选取 W 的取值, 才能体现蚁群算法的自适应性, 得到理想解。

4 结束语

从实验结果与结论可知, 通过 γ 能很好地对法规避风险的能力进行控制, 目标方向系数方阵 W 的正确选取能大大地提高算法速度, 但 W 的不当选取会很大程度上影响法规避风险的能力, 因此, 必须要正确处理好 γ 与 W 的关系。

参考文献:

- [1] 董安山. 浅谈潜艇在未来海战中的作用[J]. 海洋世界, 1996(12): 25.
- [2] 刘森民, 宋剑. 潜艇航行安全战场海洋环境评估[J]. 指挥控制与仿真, 2008, 30(3): 85-88.
- [3] 汤智胤, 何琳. 基于直升机声纳探测的潜艇被发现概率仿真[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(17): 4751-4755.
- [4] 夏兰. 基于改进蚁群算法的交通最佳路径研究[J]. 计算机与数字工程, 2009, 37(1): 28-31.
- [5] Dennis Huisman, Albert P. M. Wagelmans. A solution approach for dynamic vehicle and crew scheduling[J]. European Journal of Operational Research Volume, 2006, 16(7): 453-471.
- [6] 高桂清, 王汉坤, 武建, 等. 基于模糊理论及蚁群算法打击任务量化限[J]. 四川兵工学报, 2009(10): 1-3.