

## 基于遗传算法的航空磁探仪搜索路径优化算法

张丹<sup>1,2</sup>, 熊雄<sup>3</sup>, 时光<sup>4</sup>

(1. 中国人民解放军91550部队, 辽宁大连 116023; 2. 海军航空工程学院研究生一队, 山东烟台 264001;  
3. 中国人民解放军91498部队, 河北秦皇岛 066200; 4. 海军大连舰艇学院, 辽宁大连 116018)

**摘要:** 为了合理有效设计近似最优航空磁探仪搜索路径, 采用累积探测概率作为适应度评价函数, 提出一种基于遗传算法的航空磁探仪搜索路径优化算法。为了使染色体客观表达真实搜索路径, 采用变长实数编码的方式; 根据目标的先验信息, 限定解空间范围, 并且采用规则搜索阵型和随机搜索阵型组合生成初始种群, 保证了个体的非劣性和多样性; 在遗传算子设计的过程中, 提出基于椭圆约束的交叉和变异方法, 保证生成的子代符合航空磁探仪搜索连续时间和连续空间的约束。仿真实验结果表明, 该算法收敛快、性能稳定, 与传统规则搜索阵型相比能够显著提高航空磁探仪的搜索概率。

**关键词:** 航空磁异常探测; 搜索路径优化; 连续时间和连续空间; 遗传算法; 累积探测概率  
**中图分类号:** V248 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2017)01-0102-06

## Optimal Search Path Planning for Airborne Magnetic Anomaly Detection Based on Genetic Algorithm

ZHANG Dan<sup>1,2</sup>, XIONG Xiong<sup>3</sup>, SHI Guang<sup>4</sup>

(1. No.91550 Unit of PLA, Dalian 116023, China; 2. Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;  
3. No.91498 Unit of PLA, Qinhuangdao 066200, China; 4. Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)

**Abstract:** To design a near-optimal search path for airborne magnetic anomaly detection against a moving target, an optimum algorithm was proposed based on genetic algorithm with cumulative detection probability as fitness evaluation function. Variable-length, real-number encoding was applied to the chromosome to make it close to real search path. Priori-knowledge of the target was applied to limit the path constrains. The initial populations were generated by an initialization strategy with combination of traditional regular pattern and random search pattern, to ensure the individual diversity and high quality. In the process of genetic operator design, we carried out crossover and mutation strategy based on ellipse constraints to ensure the searcher and target follow physically realizable paths where space and time are continuous. Simulation result shows that: The proposed algorithm has rapid convergence speed and stable performance, and it can improve the overall searching effectiveness greatly.

**Key words:** airborne magnetic anomaly detection; search path planning; continuous time and space; genetic algorithm; cumulative detection probability

### 0 引言

航空磁探仪具有方便、快捷、隐蔽性好、不受水文气象条件影响,且搜索效率高的优点,但航空磁探仪的突出问题是作用距离小,根据经验或固定的战术阵型设定搜索路径,在有限时间内无法完全覆盖任务区域。

因此,如何优化航空磁探仪搜索目标的航路,最大限度发挥其作战效能是亟待解决的问题<sup>[1-2]</sup>。

航空磁探仪搜索问题实质是连续时间和空间优化搜索问题<sup>[3]</sup>。目标随机运动,且运动航迹在时间和空间上均是连续的,搜索者搜索航迹同样必须满足物理可实现的连续时间和连续空间的约束。关于最优搜索路径的求解问题通常采用两种方法。1) 基于最优搜索理论求解最优搜索路径,该方法大多针对离散时间和离散空间的最优搜索问题,搜索力可以在搜索空间

上任意分布,这在实际应用中是不可实现的<sup>[4]</sup>;或针对连续时间和空间,因为连续时间和空间的随机运动目标的分布难以用数学解析模型进行描述,通常对其运动模型和探测函数均进行特定假设,这些假设在实际应用中也过于理想化<sup>[5]</sup>。2) 基于现代优化算法求解最优搜索路径,文献[6-7]针对声纳浮标布放进行优化,文献[8]针对离散时间和离散空间声探测问题进行优化,这些优化方法不需要考虑搜索路径的时间连续性和空间连续性,这显然与航空磁探仪搜索问题有较大差异。

本文避开最优搜索理论中复杂的数学推导,基于遗传算法对搜索路径进行优化,采用蒙特卡罗法建立合理的搜索路径适应度评价模型和计算方法,针对航空磁探仪搜索时空连续性的特点提出基于椭圆约束的遗传算子设计方法,进一步给出适用于复杂环境条件下航空磁探仪优化搜索方法,以此提高航空磁探仪的搜索效率。

## 1 问题描述

### 1.1 问题和目的

假设搜索过程中航空磁探仪的搜索高度基本不变,且不考虑目标的变深运动,航空磁探仪搜索空间为二维空间,采用直角坐标系,正东方向为 $x$ 轴,正北方向为 $y$ 轴,坐标原点为 $O$ ,时间域 $t \geq 0$ 。设 $t=0$ 时刻在某海区 $Q$ 发现目标,初始发现位置点 $X_{t_0} = (x_{t_0}, y_{t_0})$ 。一架反潜机使用航空磁探仪立即前往目标位置点进一步确认搜索单个目标,反潜机的初始位置点 $(x_{p_0}, y_{p_0})$ ,以最快允许速度到达目标区域,到达时间为 $T_1$ ,结束搜索时间为 $T_2$ ,且 $T_1$ 和 $T_2$ 可预先估计和设定。设 $t$ 时刻目标位置表示为 $(x_{s,t}, y_{s,t})$ ,航空磁探仪的位置表示为 $(x_{p,t}, y_{p,t})$ 。

航空磁探仪搜索路径优化的基本准则就是在设定的区域和搜索时间 $[T_1, T_2]$ 内确定航空磁探仪的最佳搜索路径,使搜索到目标的累积探测概率(Cumulative Detection Probability, CDP)最大。

因此,航空磁探仪最优搜索问题可以描述为:在区域 $Q$ 内,搜索时间为 $[T_1, T_2]$ ,搜索方案总体为 $\Pi$ ,对于所有搜索方案满足 $\pi \in \Pi$ ,有方案 $\pi^*$ ,满足条件 $C_{CDP, \pi^*}(T) = \sup \{C_{CDP, \pi}(T), \pi \in \Pi\}$ 即为最优搜索方案。

### 1.2 目标分布模型

应召搜索过程中随着时间的推移,目标的位置分布由初始位置分布和目标的随机运动决定。目标的运动具有很大的随机性,要建立完全精确的随机模型很困难,在最优搜索中采用一些特定分布的目标随机运

动模型来近似描述目标的随机运动特性。

应召搜索时概知目标的初始位置,未知目标的运动参数。根据导航误差规律,一般认为目标初始散布服从二维正态分布<sup>[9]</sup>,其概率分布函数满足

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x-x_{t_0})^2 + (y-y_{t_0})^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

式中: $(x_{t_0}, y_{t_0})$ 为目标初始位置发现点; $\sigma$ 为导航误差。

$[0, T_2]$ 时间段内目标做机动航行,目标运动的随机性表现为航向和航速的随机性,在整体航迹上,目标可以多次改变航向和航速,但是在每一个航段上则认为目标航速和航向恒定,可以设定其航向和航速改变的时间步长 $\tau$ 服从均值为 $\lambda$ 的指数分布。每一个航段上,目标的 $v$ 服从 $[V_{\min}, V_{\max}]$ 之间的均匀分布,航向角 $\beta$ 服从 $[0, 2\pi)$ 之间的均匀分布,其速度、航向和时间间隔 $\tau$ 的分布函数分别为

$$f_v(v) = \frac{1}{V_{\max} - V_{\min}} \quad v \in [V_{\min}, V_{\max}] \quad (2)$$

$$f_\beta(\beta) = \frac{1}{2\pi} \quad \beta \in [0, 2\pi) \quad (3)$$

$$f(\tau) = \lambda e^{-\lambda\tau} \quad \tau > 0 \quad (4)$$

### 1.3 探测函数模型

在现有的航空磁探仪搜索问题中,判断搜索过程中是否探测到目标的准则一般采用简单的定距原则,即目标处于探测宽度范围之内时,会被探测到,否则不会被探测到。在实际反潜作战中,复杂环境条件下需要根据目标的磁异常信号来判断是否探测到潜艇。目标的磁异常信号与双方的运动态势、目标固有的材料磁特性、环境噪声等级,以及磁探仪工作方式都有很大关系。提出基于概率准则的探测函数,可以表示为

$$d(t) = \begin{cases} 1 & P_d(t) > 0.5 \\ 0 & P_d(t) \leq 0.5 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $P_d(t)$ 表示 $t$ 时刻检测概率。

由于在反潜机和潜艇运动模型建立过程中,认为它们是分段匀速直线运动模型,因此,可以在每段直线运动中建立目标信号和检测模型,且分段计算检测概率。因为,搜索者和目标直线运动检测概率最大点为最近距离点(Closest Point of Approach, CPA),取每一段CPA点检测概率作为每一段的检测概率。根据反潜机和潜艇运动态势判断反潜机和潜艇每段检测概率计算时可采用文献[10]中提及的方法。

## 2 搜索路径优化算法设计

遗传算法是一类借鉴生物界自然选择和遗传机制的随机化搜索算法,其主要特点是群体搜索策略和群体中基因之间的信息交换,搜索不依赖于外部信息,具有较强的全局搜索能力<sup>[11]</sup>。基本的遗传算法只使用

选择算子、交叉算子和变异算子,可以将其形式化定义为一个 7 元组集合。

基本遗传算法的集合论定义为

$$GA := \langle CC, SS, FF, PI, St, Co, Mt \rangle \quad (6)$$

式中:GA 表示基本遗传算法;CC 表示染色体编码;SS 表示解空间范围;FF 表示适应度函数;PI 表示种群初始化;St 表示选择算子;Co 表示交叉算子;Mt 表示变异算子。

针对遗传算法集合论定义中的 7 个基本要素,分别对这些要素进行具体分析和设计。

### 2.1 染色体编码

一条染色体表示搜索总体中的一条备选搜索路径,因此,每一条染色体的基因序列应该能够准确高效地描述每条搜索路径信息,并且能够根据这些信息完成适应度函数的评价。染色体编码的方式有多种,编码方式越接近问题原始形式越能反映问题本质,更容易得到近似最优解,本文采用变长实数编码的方式。每条搜索路径对应一个染色体,搜索路径中每个节点的位置对应染色体的一个基因。基因表示方法采用直角坐标系法,每个基因包含搜索路径二维坐标点信息和时间信息,基因序列按时间顺序排列,连续两个节点之间,搜索者速度恒定、航向恒定。根据上述特点,设计变量  $G$  表示染色体(搜索路径)种群,  $N_g$  为种群大小,  $G_i$  表示种群中第  $i$  条染色体,若  $G_i$  由  $k$  个基因组成,则  $G_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{ik})$ ,其中,  $p_{ij}$  表示第  $i$  条染色体的第  $j$  个基因(搜索路径节点),  $p_{ij} = (X_{ij}, t_{ij})$ ,  $X_{ij} = (x_{ij}, y_{ij})$  表示搜索路径节点的坐标点位置,  $t_{ij}$  表示到达该节点的时刻。

### 2.2 解空间范围

从染色体编码结构可知,基因位中搜索航路节点是需要优化的参数。由于每个基因位都直接来源于航路坐标值,因此需要定义边界区域界定航路点的选择范围。航空磁探仪应召搜索条件下,概知目标的位置点先验信息,因此,设定潜艇最大航速  $V_{\max}$  的条件下,搜索结束时刻  $T_2$ ,目标的分布区域不超过以发现点为中心、 $V_{\max} \cdot T_2$  为半径的圆,则搜索路径基因位中位置点信息  $X_{ij}$  的取值范围可以表示为

$$|X_{ij} - X_{ix}| \leq V_{\max} \cdot T_2 \quad (7)$$

### 2.3 适应度函数

解空间中存在无数条搜索航路,需要设计目标函数(适应度函数)评价搜索路径,并确定最优搜索路径。本文采用 CDP 作为适应度函数,可根据 CDP 计算方法,结合目标分布模型以及探测函数模型由蒙特卡罗法完成适应度函数的计算。第  $g$  代种群第  $i$  条染色体的适应度表示为  $f(G_i^g)$ 。

### 2.4 种群初始化

遗传算法是一种群体生物进化模拟算法,即需要

维持一个由若干个初始解组成的具备一定规模的初始种群,初始种群的优劣对算法收敛速度和精度有着极大的影响,初始种群中的个体多样性越强,个体性状越优,其产生优良子代的可能性越大。因此,需要生成若干条具备一定精度和多样性的搜索路径。本文采用规则阵和随机阵相结合的方法产生初始种群。

#### 1) 初始种群产生的方法。

航空磁探仪常用的搜索方法有随机搜索方法和传统规则阵型搜索方法。随机搜索就是在限定的解空间范围内随机产生搜索轨迹,具体产生方法可参考文献[8]。随机搜索轨迹 CDP 可能不高,但是可以提供较好的基因片段。由文献[2]可知,规则的航空磁探仪搜索阵型有平行航向搜索和扩展矩形搜索等,其中,矩形扩展搜索概率更高。依据文献[8]中的比例,设定初始种群中,75%的染色体由随机阵产生,20%的染色体由扩展矩形搜索阵型产生,5%的染色体由其他规则阵型产生。

#### 2) 初始搜索点和时间。

概知目标初始发现点位置  $(x_{ix}, y_{ix})$ ,由于目标运动的不确定性,将潜艇初始位置分布的中心点作为首次探测点,初始搜索时间为反潜机到达目标初始位置分布中心点的时间  $T_1$ 。

#### 3) 规则阵型搜索路径间隔的确定方法。

确定规则搜索阵型的一个重要因素是探测宽度(搜索路径间隔)。在复杂的环境下,探测宽度随着搜索双方态势、背景磁环境以及目标磁特性的变化而变化。但是设定任务区域之后,认为基本参数条件如任务区域地磁环境、背景磁噪声等要素是基本恒定的,而且搜索过程中设定反潜机的搜索高度基本不变。但是磁探仪和潜艇的航向是随机变化的,在其他参数设定的条件下,磁探仪的探测宽度随着磁探仪和目标的磁航向的变化而变化。

根据文献[3]可知,探测宽度定义为

$$w = 2 \int_0^{+\infty} P_d(r) dr \quad (8)$$

式中: $r$  表示搜索器材和目标的横向距离;  $P_d(r)$  表示在  $r$  横向距离上的检测概率。根据该定义并结合参考文献[10]中  $P_d(r)$  的计算方法可以求得探测宽度。

不同反潜机航向和不同潜艇航向条件下存在最大和最小探测宽度,分别记为  $w_{\min}$  和  $w_{\max}$ ,据此即可确定初始种群中规则阵型的搜索路径间隔参数,以扩展矩形初始种群为例说明。设定初始种群总数各个部分的比例后,可计算得到扩展矩形的种群数为  $N_{ix} = 20\% \times N_g$ ,则扩展矩形初始种群中第  $i$  条染色体的搜索路径间隔确定为

$$W_i = (i - 1) \frac{w_{\max} - w_{\min}}{N_{ix} - 1} + w_{\min} \quad (9)$$

确定初始种群中每个规则阵型的初始搜索点和搜索路径间隔之后,即可确定每个规则阵型产生的染色体的搜索路径及其节点信息。

### 2.5 遗传算子设计

#### 1) 选择。

遗传算法的选择算子可以保留当代种群中适应度较高的个体,从而保留较优解中的某些优质特性,缩小算法寻优空间,加速算法收敛。本文使用对适应度进行惩罚的方式进行选择操作。将父代种群中适应度最大的  $m$  条染色体直接复制保留到下一代,父代中进行交叉和变异的个体采用轮盘赌选择法进行选择<sup>[11]</sup>。

#### 2) 交叉。

交叉是遗传算法的关键,是形成新一代种群的基础。采用单点交叉策略容易陷入局部最优解,而且航空磁探仪是连续空间连续时间的搜索,单点交叉也不满足物理可实现路径限制,本文提出基于椭圆约束的连续多点交叉策略。交叉规则如下所述。

① 在种群中随机选择  $N_g \times P_c$  条染色体,任意两两组合,进行交叉运算,其中,  $P_c$  为交叉概率。

② 假定交叉的同组染色体为  $(G_a, G_b)$ , 随机选择互换基因位的时间点  $t_c$ , 且有  $T_1 \leq t_c \leq T_2$ 。

③ 对同组染色体  $(G_a, G_b)$  进行交叉运算,采用基于椭圆约束的交叉策略。 $G_a$  和  $G_b$  这 2 条染色体的部分路径如图 1 中实线连线所示,其中,  $G_a$  搜索路径的  $t_c$  时刻位于  $C_1$  点,  $G_b$  搜索路径的  $t_c$  时刻位于  $C_2$  点。理论上  $(G_a, G_b)$  交叉可以产生 4 条子染色体,两个父体可以产生 4 个子代,但是选择其中 2 条最优的作为遗传子代。以第 1 条子染色体产生方法为例说明交叉运算的策略。假定  $G_a$  搜索路径上  $t_c$  时刻之前的第一个节点为  $A$ , 设节点  $A$  表示为  $p_A = (X_A, t_A)$ 。在  $G_b$  路径上寻找节点  $B$ , 使得  $A$  和  $B$  满足

$$|X_B - X_A| \leq v(t_B - t_A) \quad (10)$$

式中:  $v$  为航空磁探仪的搜索速度;  $|\cdot|$  为欧氏距离。如果  $B$  不存在则不产生该子染色体; 如果存在节点  $B$ , 则引入新的节点  $D$ , 用  $p_D(X, t_D)$  表示, 使得节点  $A, B$  和  $D$  满足

$$|X - X_A| + |X_B - X| = v(t_B - t_A) \quad (11)$$

很显然, 满足该条件的位置点位于以  $A, B$  为焦点的椭圆上, 该椭圆即为约束椭圆, 在约束椭圆上随机选择一个位置点  $X_D$ , 显然有

$$t_D = t_A + |X_D - X_A|/v = t_B - |X_B - X_D|/v \quad (12)$$

则节点  $D$  表示为  $p_D(X_D, t_D)$ , 于是得到第 1 条子染色体  $(p_{a1}, p_{a2}, \dots, p_{aA}, p_D, p_{bB}, p_{bB+1}, \dots, p_{bB})$ , 其中,  $p_{bkB}$  表

示  $G_b$  搜索路径最后一个基因位位置点。显然, 该子染色体由  $G_a$  路径上的  $t_c$  时刻之前路径、新引入的节点  $D$ 、以及  $G_b$  路径上节点  $B$  之后的路径组成。

类似地可以产生第 2 条子染色体, 但是该子染色体由  $G_b$  路径上  $t_c$  时刻位置点之前的路径、新引入的节点  $G_a$  路径上的  $t_c$  时刻之后的路径组成。特别地, 新产生的节点同样满足速度和运动限制。变换  $G_a$  和  $G_b$  的角色即可产生第 3 和第 4 条子染色体。

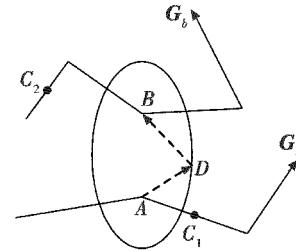


图 1 交叉运算示意图

Fig. 1 Sketch map of crossover operation

④ 判断所有参与交叉的染色体是否交叉完毕。若交叉操作完毕, 则结束交叉运算。

#### 3) 变异。

变异操作是实现全局最优解的关键环节, 增加变异运算可以防止过早陷入局部最优解。变异过程同样采用基于椭圆约束的策略, 变异规则如下所述。

① 在种群中随机选择  $N_g \times P_m$  条染色体进行变异运算, 其中,  $P_m$  为变异概率, 且有  $(N_g \times P_m) \in \mathbf{Z}, \mathbf{Z}$  表示正整数。

② 随机选择染色体  $G_i$  变异基因节点  $p_{ij}$ , 如图 2 所示,  $p_{ij-1}$  和  $p_{ij+1}$  分别为  $p_{ij}$  的前一个节点和后一个节点。

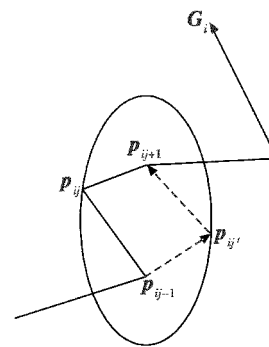


图 2 变异运算示意图

Fig. 2 Sketch map of mutation operation

③ 对染色体  $G_i$  进行变异运算。变异产生新的节点  $p_{ij'}$ , 使得该节点满足

$$|X_{ij'} - X_{ij-1}| + |X_{ij+1} - X_{ij'}| = v(t_{ij+1} - t_{ij-1}) \quad (13)$$

显然, 该节点满足椭圆约束, 且有

$$t_{ij'} = t_{ij-1} + |X_{ij'} - X_{ij-1}|/v = t_{ij+1} - |X_{ij+1} - X_{ij'}|/v \quad (14)$$

如果  $p_{ij}$  恰好是最后一个节点, 则  $p_{ij'}$  满足圆约束, 即

$$|X_{ij'} - X_{ij-1}| = v(t_{ij} - t_{ij-1}) \quad (15)$$

且  $t_y = t_{y_0}$ 。

### 2.6 算法整体步骤

综上所述,基于遗传算法的航空磁探仪搜索路径优化算法如下:

- 1) 选择合适的种群规模  $N_g$ , 以及最大进化代数  $g_{max}$ , 设定蒙特卡罗计算次数  $N_s$ , 设定交叉概率  $P_c$ , 设定变异概率  $P_m$ , 并令  $g = 1$ ;
- 2) 初始化染色体种群, 得到候选搜索路径总体  $G = (G_1, G_2, \dots, G_{N_g})$ ;
- 3) 生成  $N_g$  条随机运动目标轨迹评价样本  $S = (S_1, S_2, \dots, S_{N_g})$ ;
- 4) 计算第  $g$  代每条染色体的适应度  $f(G_i^g)$ , 并且按照适应度大小降序排列;
- 5) 在第  $g$  代种群中随机选择  $N_g \times P_c$  条染色体, 任意两两组合进行交叉运算, 并选择适应度最高的两条染色体遗传至下一代, 直至所有选择的染色体交叉完毕;
- 6) 在第  $g$  代种群中随机选择  $N_g \times P_m$  条染色体进行变异运算, 直至所有选择的染色体变异运算完毕;
- 7)  $g = g + 1$ , 判断  $g$  是否大于  $g_{max}$ , 如果是, 输出结果, 否则转入 4)。

## 3 仿真实验及结果分析

### 3.1 仿真参数设定

地磁场为 50035.05 nT, 地磁倾角为 45°。根据文献[10]设定典型的潜艇目标纵向、横向和垂向的导磁系数分别为  $7.3 \text{ Oe} \cdot \text{cm}^3/\gamma \cdot \text{t}$ ,  $1.6 \text{ Oe} \cdot \text{cm}^3/\gamma \cdot \text{t}$ ,  $1.6 \text{ Oe} \cdot \text{cm}^3/\gamma \cdot \text{t}$ , 设定潜艇排水量为 6000 t, 最小航速为 4 kn, 最大航速为 30 kn, 航行深度为 100 m, 潜艇初始发现位置点为 (50, 50), 单位为 km。

反潜机速度为 400 km/h, 高度为 150 m; 磁探仪采样频率为 20 Hz, 积分时间为 20 s, 虚警概率为 3 次/h; 磁噪声方差为 0.2 nT; 延迟时间为 0.1 h, 搜索时间为 0.5 h。

为了使结果更接近全局最优解, 设定初始种群的数量为 100, 进化代数为 200, 交叉算子为 0.9, 变异算子为 0.1, 蒙特卡罗仿真次数为 3000。

### 3.2 仿真结果分析

根据式(9)及文献[10]计算不同反潜机航向和不同潜艇航向条件下航空磁探仪的探测宽度。在 3.1 节目标特性参数及环境参数条件下, 航空磁探仪探测宽度最大值为 812.5 m, 探测宽度最小值为 260.3 m。遗传算法初始种群中的规则阵型以最小和最大探测宽度为准则设计初始种群。

在相同实验条件下, 分别生成扩展矩形搜索航路和基于遗传算法优化的搜索航路, 如图 3 所示, 图中,

星形点表示概略发现位置点。

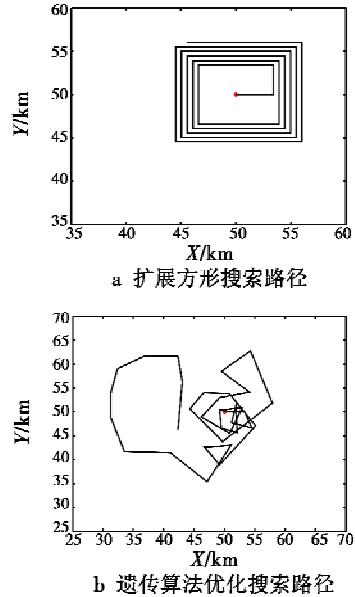


图3 扩展矩形搜索和遗传算法搜索航路

Fig.3 Search path of extended square and GA

根据蒙特卡罗仿真计算, 扩展矩形搜索的累积探测概率为 0.38, 遗传算法的累积探测概率为 0.63。遗传算法搜索航路累积探测概率明显优于扩展矩形搜索航路, 而且从遗传算法优化搜索航路可以看出其搜索航路基本也呈扩展形状, 扩展航路不规则。这是由于扩展矩形搜索是基于概知目标初始位置点, 未知目标运动方向这个先验信息, 逐步扩大搜索区域的搜索方法。遗传算法优化搜索航路继承了该先验信息, 并且扩展航路生成过程中吸收不规则阵部分良好基因, 使得累积探测概率明显升高。

图 4 给出了设定仿真参数下得到的遗传算法 200 次迭代的最大、平均及最差适应度的进化曲线。由图 4 可以看出, 进化代数越大, 最优解提高的速度越慢, 即最优解的进化曲线并非和进化代数成线性比例关系。进化到大约 40 代时, 累积探测概率基本保持稳定, 这说明设计算法具有较快的收敛速度, 可以适当减少迭代次数, 加快算法运算速度。

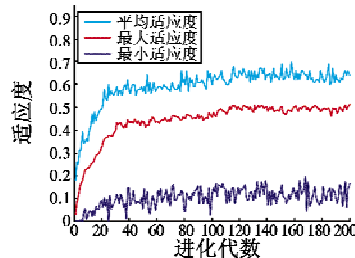


图4 适应度进化曲线

Fig.4 Fitness evolutionary curve

不同延迟时间条件下, 扩展矩形搜索航路和基于

遗传算法优化的搜索航路累积探测概率如图 5 所示。随着延迟时间的增加,两种搜索航路的搜索概率均下降,但是从图中可以看出,遗传算法搜索航路明显优于扩展矩形搜索航路,而且遗传算法搜索航路对于延迟时间的影响有一定的调节能力。

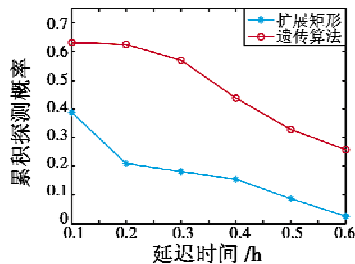


图 5 累积探测概率随着延迟时间的变化

Fig. 5 CDP vs delay time

#### 4 结论

1) 在实际应用过程中,首先根据遗传算法计算得到近似最优搜索路径,然后将搜索路径的转折点依次加载到反潜机导航设备中,反潜机搜索飞行按照关键点导航飞行从而实现近似最优搜索。

2) 根据航空磁探仪搜索问题实质,有效设计了优化搜索算法的各个要素,特别是提出了基于椭圆约束的遗传算子设计方法,使得算法迭代过程完全契合航空磁探仪搜索连续时间和空间的约束,并且算法收敛速度较快。

3) 通过仿真表明,遗传算法优化路径优于传统的布阵方法,能极大地提高搜索概率,而且利用遗传算法设计航路对于不利影响因素也具有一定的调节能力。

4) 由于遗传算法进行优化的计算时间较长,并且目标可能采取变深运动,与实际应用有一定差距。因此,下一步可以从两方面入手:一方面根据三维目标运动模型优化探测函数判决准则;另一方面利用遗传算法的并行性,研究并行计算方法以加快运算速度。

#### 参考文献

- [1] THOMAS A J. Tri-level optimization for anti-submarine warfare mission planning [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2008.
- [2] 蒋志忠,杨日杰,熊雄,等. 磁探仪应召搜潜建模与仿真 [J]. 海军航空工程学院学报, 2011, 26(1): 75-80.
- [3] 朱清新. 离散和连续空间中的最优搜索理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [4] BROWN S S. Optimal search for a moving target in discrete space and time [J]. Operations Research, 1980, 28(6): 1275-1289.
- [5] 陈建勇,王健,单志超. 离散时间探测随机恒速目标的最优搜索算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(8): 1627-1630.
- [6] 周旭,杨日杰,高学强,等. 基于遗传算法的被动浮标阵优化布放技术研究 [J]. 电子与信息学报, 2008, 30(10): 2532-2536.
- [7] 曾海燕,杨日杰,周旭. 声纳浮标搜潜优化布放技术研究 [J]. 指挥控制与仿真, 2012, 34(1): 82-85.
- [8] CHO J H, KIM J S, LIM J S. Optimal acoustic search path planning in realistic environments based on genetic algorithm [C] // Proceedings of MTS/IEEE Conference on Oceans, 2008: 1-8.
- [9] 屈也频,廖瑛. 潜艇位置散布规律与搜潜效能评估模型研究 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(12): 3280-3283.
- [10] FORREST R N. A program to compute magnetic anomaly detection probabilities [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 1990.
- [11] GOLDBERG D E. Genetic algorithm in search, optimization and machine learning [M]. New Jersey: Addison Wisely Publishing Company, 1989.
- [12] MISRA P, ENGE P. 全球定位系统——信号、测量与性能 [M]. 2 版. 罗鸣,曹冲,肖雄兵,等译. 北京: 电子工业出版社, 2008: 373-379.
- [13] 谢钢. 全球导航卫星系统原理——GPS、格洛纳斯和伽利略系统 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013: 91-93.

(上接第 90 页)

1549-1563.

- [10] Navistar Global Positioning System Joint Office. Interface Specification: IS-GPS-800A [EB/OL]. [2010-06-01]. <http://www.gps.gov/technical/icwg/>.
- [11] AVILA-RODRIGUEZ J A, HEIN G W, WALLNER S, et al. The MBOC modulation: the final touch to the Galileo

frequency and signal plan [J]. Journal of the Institute of Navigation, 2008, 55(1): 15-28.