

doi: 10.7690/bgzdh.2018.12.001

# 反潜巡逻机使用磁探仪应召搜潜效能模型

章尧卿, 王光源

(海军航空大学军事教育训练系, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 为快速发现锁定潜艇位置, 对反潜巡逻机使用磁探仪应召搜潜效能模型进行研究。根据应召搜潜的特点, 结合反潜巡逻机使用磁探仪对潜搜索的方法, 分析在应召搜潜条件下潜艇的机动模型和反潜巡逻机的航路模型方法, 建立反潜巡逻机使用磁探仪应召搜潜的效能模型, 并进行仿真计算。在此基础上, 分析了应召距离、潜艇航速、磁探仪作用距离、飞机飞行高度、潜艇航向对发现概率的影响, 对反潜巡逻机使用磁探仪应召搜潜的效能研究有一定参考价值。

**关键词:** 反潜巡逻机; 磁探仪; 应召搜索

**中图分类号:** TJ810.2 **文献标志码:** A

## Latent Efficiency Model of Anti-submarine Patrol Plane Using Magnetic Finder

Zhang Yaoqing, Wang Guangyuan

(Department of Military Education & Training, Navy Aeronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** For fast finding out submarine location, research on anti-submarine plane based on magnetic finder responding search model. According to the characteristic of responding-antisubmarine, combine with the magnetic finder searching method and analyze the submarine maneuver model and anti-submarine patrol plane track model under responding search condition. Establish efficiency model of magnetic finder responding search and carry out simulation calculation. Based on this, analyze the influence of responding distance, submarine navigation speed, magnetic finder operation range, plane flight height, and submarine navigation direction on detection probability. It has some reference for efficiency research of magnetic finder responding search.

**Keywords:** anti-submarine patrol plane; magnetic finder; responding search

### 0 引言

随着高新技术的迅猛发展, 现代潜艇在隐蔽性、活动水域的广泛性、威胁时间的长期性、攻击手段的多样性等方面有了很大提高, 使得潜艇成为许多国家和地区海军兵力与装备建设的重点。我国拥有广阔的海上领土, 面临复杂的海上安全形式, 来自潜艇的威胁程度不断增长; 因此, 如何快速发现锁定潜艇位置是当前亟待解决的重点问题。

反潜巡逻机具有速度快、航程远、续航时间长和机上装载的反潜作战装备数量、种类多等优势, 是重要的航空反潜兵力。应召搜潜是反潜巡逻机最基本和常用的一种活动方式。它是指反潜巡逻机在指定位置待命, 当获得潜艇的活动情况后, 飞往发现潜艇的海区, 搜索潜艇的战斗行动, 其特征是已知潜艇在搜索前某一时刻的位置<sup>[1]</sup>。由于反潜巡逻机的飞行速度快, 实施应召反潜时, 能够极大地减少延迟时间。磁探仪具有不受水声环境影响、连续搜索、定位精度高等特点, 因此反潜巡逻机使用磁探仪可以在到达应召海域之后立即投入搜索作业,

缩小了潜艇可能的运动范围, 从而提高了发现潜艇的概率<sup>[2]</sup>。笔者通过建立应召搜索解算模型, 运用控制变量法, 分析了应召距离、潜艇航速、磁探仪作用距离、飞机飞行高度、潜艇航向对发现概率的影响。

### 1 潜艇机动模型

#### 1.1 潜艇的初始位置散布

由于其他兵力(如水面舰艇、声纳浮标)首次得到的潜艇位置数据具有很大的不确定性, 一般认为潜艇的初始位置服从 2 维正态分布, 散布中心为通报的初始位置点<sup>[3]</sup>。设初始位置的散布中心位于坐标原点, 即期望值为 0, 初始位置点  $(x_0, y_0)$  在  $X$ 、 $Y$  方向上满足独立同分布, 设均方差为  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_0$ , 得初始位置点  $(x_0, y_0)$  的联合概率密度函数为

$$f(x_0, y_0) = \frac{1}{2\pi\sigma_0^2} \exp\left(-\frac{x_0^2 + y_0^2}{2\sigma_0^2}\right) \quad (1)$$

#### 1.2 潜艇的运动模型

当巡逻机到达海域开始搜索时, 设由于潜艇运

收稿日期: 2018-10-10; 修回日期: 2018-11-16

作者简介: 章尧卿(1984—), 男, 浙江人, 讲师, 硕士, 从事航空反潜装备使用研究。

动引起的位置散布服从 2 维正态分布, 运动后的位置点为  $(x_1, y_1)$  同样满足独立同分布<sup>[4]</sup>, 其均方差为  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_1$ , 设  $x_1 = R \cos \theta, y_1 = R \sin \theta$ , 得联合密度函数为

$$\varphi(R, \theta) = \frac{R}{2\pi\sigma_1^2} \exp\left(-\frac{R^2}{\sigma_1^2}\right). \quad (2)$$

其中  $R > 0, \theta \in [0, 2\pi]$ .  $R$  为潜艇运动后散布圆的半径。

求  $\varphi(R, \theta)$  关于  $R$  和  $\theta$  的边缘密度函数, 得  $R$  和  $\theta$  的概率密度函数为:

$$\varphi(R) = \int_0^{2\pi} \varphi(R, \theta) d\theta = \frac{R}{\sigma_1^2} \exp\left(-\frac{R^2}{\sigma_1^2}\right), R \in [0, +\infty); \quad (3)$$

$$\varphi(\theta) = \int_0^{+\infty} \varphi(R, \theta) dR = \frac{1}{2\pi}, \quad \theta \in [0, 2\pi]. \quad (4)$$

设潜艇的速度为  $v_q$ , 则  $R = v_q t_0$ , 将  $\sigma_1 = \sigma_v t_0$  代入式(3)得:

$$\varphi(v_q t_0) = \frac{v_q t_0}{(\sigma_v t_0)^2} \exp\left(-\frac{(v_q t_0)^2}{2(\sigma_v t_0)^2}\right). \quad (5)$$

式中  $t_0$  为常量, 因此可得潜艇速度  $V_q$  的概率密度函数为:

$$f(v_q) = \int_0^{2\pi} \varphi(R, \theta) d\theta = \frac{v_q}{\sigma_v^2} \exp\left(-\frac{V_q^2}{2\sigma_v^2}\right). \quad (6)$$

取潜艇的水下经济航速  $v_{sc}$  作为潜艇分布函数的数学期望, 求得

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{2}{\pi}} v_{sc}. \quad (7)$$

## 2 反潜巡逻机搜索模型

应召搜索时, 如图 1 所示, 当巡逻机到达可能相遇点  $A_0$  时, 以期望航速进行直航向机动的潜艇位置散布圆的半径为:

$$R_0 = v_q t + r. \quad (8)$$

式中:  $t$  为巡逻机起飞到飞行至与潜艇分布位置圆相遇所用时间;  $r$  为潜艇位置误差(文中忽略不计)。

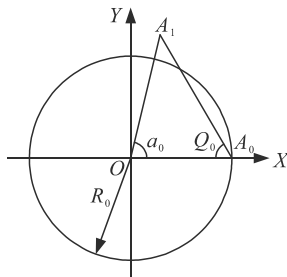


图 1 相遇条件分析

巡逻机到达  $A_0$  点后, 如果没有发现潜艇, 假设巡逻机向  $A_0 A_1$  线搜索, 巡逻机从  $A_0$  点航行到  $A_1$  点所用的时间设为  $\Delta t_0$ <sup>[5]</sup>, 求解三角函数得:

$$\Delta t_0 = \frac{2R_0(v_q + v_{is} \cos X_0)}{v_{is}^2 - v_q^2}; \quad (9)$$

$$\alpha_0 = \arccos \frac{v_{is}^2 - v_q^2 - 2v_{is}v_q \cos X_0 - 2v_{is}^2(\cos X_0)^2}{v_{is}^2 + v_q^2 + 2v_{is}v_q \cos X_0}. \quad (10)$$

从式(9)可以看出: 巡逻机要和定速直航潜艇有相遇点, 则使  $v_q + v_{is} \cos X_0 \geq 0$ , 当  $X_0 = 180^\circ - \arccos(v_q/v_{is})$  时, 即  $\Delta t_0 = 0$ , 当巡逻机保持  $180^\circ - \arccos(v_q/v_{is})$  的定舷角搜索时, 与目标潜艇的每个可能位置点都相遇, 此时搜索效率最高<sup>[6]</sup>。

设相遇点的轨迹方程为  $y = f(x)$ , 建立微分方程:

$$\tan\left(180^\circ - \arccos \frac{v_q}{v_{is}}\right) = \frac{\left(f'(x) - \frac{y}{x}\right)}{\left(1 + f'(x) \frac{y}{x}\right)}. \quad (11)$$

解方程(11), 并将结果变为极坐标形式的轨迹方程:

$$\rho(\varphi) = R_0 \exp(k\varphi). \quad (12)$$

其中:  $k = \tan\left(\arcsin \frac{v_q}{v_{is}}\right)$ ;  $\varphi \in [0, 2\pi]$ 。巡逻机与潜艇

所有可能相遇点的集合轨迹是螺旋线。

从以上分析可知: 采用螺旋线搜索的过程中, 螺旋线上的每一点都为可能相遇点; 因此, 应召搜潜采用螺旋线模型搜索的效率最高, 发现潜艇的概率最大<sup>[7]</sup>。但实际执行过程中存在一个问题: 采用螺旋线搜索时, 飞机将一直处于转弯状态, 而且转弯过程中必须保证与初始可能相遇点的舷角为定值。这种方式在实际执行过程中是很难实现的<sup>[8]</sup>, 因此, 采用“以直代曲”的方法, 用直线航线来近似代替螺旋线航线。即以失去接触点为极点, 以一定的角度将螺旋线分成若干等份, 螺旋线上点与点之间的连线即为直线搜索航线。

## 3 应召搜潜效能解算模型分析

### 3.1 潜艇位置坐标解算

根据潜艇机动模型可知, 潜艇的初始位置点  $(x_{q0}, y_{q0})$  位于坐标原点  $(0, 0)$ , 根据航向和航速的概率密度函数, 抽取航向  $H_{q0}$  和航速  $v_q$  之后, 潜艇将做定速直航运动。则任意时刻  $t$  的潜艇位置坐标为:

$$\left. \begin{aligned} x_{qi} &= v_q t \cos H_{q0} \\ y_{qi} &= v_q t \sin H_{q0} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

### 3.2 巡逻机位置坐标解算

根据第 2 节的分析, 采用以直代曲的方法, 求出各航路点的坐标。巡逻机位置坐标如图 2 所示, 图中  $AB$  段为航段中的一段, 已知  $A$  点坐标  $(x_0, y_0)$  求下一点  $B(x_1, y_1)$  的坐标。

由余弦定理得:

$$AB^2 = OA^2 + OB^2 - 2OA \cdot OB \cos e. \quad (14)$$

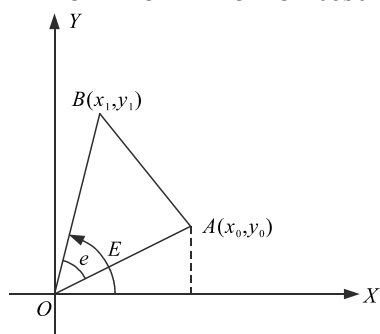


图 2 巡逻机位置坐标解算

推导得任意时刻点的坐标为:

$$\left. \begin{aligned} x_i &= x_0 + k(x_1 - x_0) \\ y_i &= y_0 + k(y_1 - y_0) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

其中  $k$  为给定的时刻  $t$  所属搜索航段的斜率。

### 3.3 应召搜潜发现概率解算

通过以上分析解得任意时刻巡逻机的坐标  $(x_{fi}, y_{fi})$  和潜艇的坐标  $(x_{qi}, y_{qi})$ , 求两者间的距离  $d_{iq} = \sqrt{(x_{fi} - x_{qi})^2 + (y_{fi} - y_{qi})^2}$ , 设磁探仪的搜索宽度  $W$ , 若  $d_{iq} \leq \frac{W}{2}$ , 则认为磁探仪发现潜艇<sup>[9]</sup>。

## 4 仿真分析

### 4.1 条件假设

仿真计算过程中如无特殊说明参数假设如下:

反潜巡逻机巡航速度  $v_{th} = 500$  km/h, 抵达战区低空巡逻高度  $H_f = 150$  m, 速度为  $v_{fs} = 320$  km/h; 航速误差为  $\sigma_{vf} = 10$  km/h, 航向误差  $\sigma_{Hf} = 3^\circ$ ; 螺旋线的平分角为  $\pi/6$ ; 潜艇的最大航速  $v_{qmax} = 13$  kn, 最小航速  $v_{qmin} = 2$  kn, 巡航速度  $v_{sc} = 5$  kn, 航行深度  $h_q = 100$  m; 磁探仪作用距离  $d = 400$  m。在此假设条件的基础上, 对影响潜艇发现概率的影响因素进行仿真分析如 4.2—4.6 节所示。

### 4.2 应召距离对发现概率的影响

图 3 为应召距离对发现概率的影响。由图可知: 随着应召距离的增大, 磁探仪对潜艇的发现概率不断减小。在 100 km 应召距离内, 对潜艇的发现概率大于 0.9; 应召距离达到 300 km 时, 磁探仪对潜艇的发现概率在 0.8 以上; 应召距离达到 800 km 时, 对潜艇的发现概率在 0.4 以下。

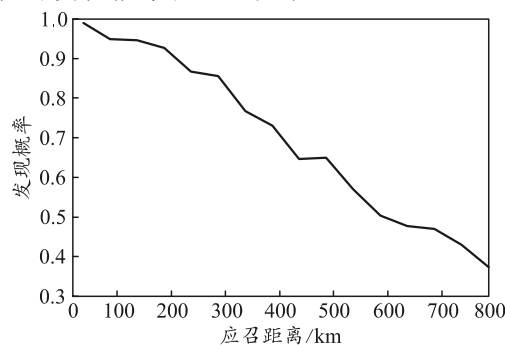


图 3 应召距离对发现概率的影响

### 4.3 潜艇航速对发现概率的影响

图 4 为潜艇航速对发现概率的影响。由图可知: 在应召距离为 200 km 的条件下, 当潜艇航速在 5~10 kn 范围内时, 磁探仪对潜艇的发现概率大于 0.9, 几乎不随潜艇航速的增大而变化; 当潜艇航速大于 10 kn 时, 磁探仪的发现概率随潜艇航速的增大急剧下降, 对航速为 14 kn 的潜艇, 磁探仪的发现概率已经下降到 0.5, 而对大于 20 kn 的高速潜艇, 磁探仪应召发现概率小于 0.3, 失去了搜索价值。因此, 磁探仪适用于对低航速潜艇进行应召搜索, 不适合对高速潜艇进行应召搜索。

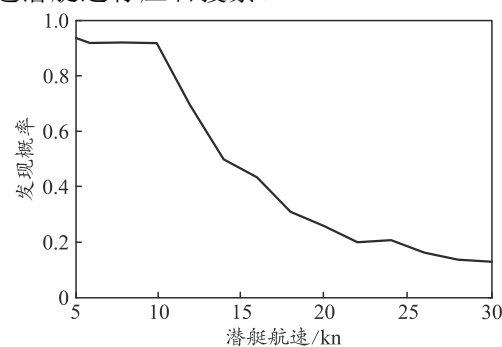


图 4 潜艇航速对发现概率的影响

### 4.4 磁探仪作用距离对发现概率的影响

图 5 为磁探仪作用距离对发现概率的影响。从图可知: 在 200 km 的应召距离条件下, 磁探仪作用距离达到 400 m 时, 对潜艇的发现概率为 0.93, 已有较高的发现概率; 因此随磁探仪作用距离的增大, 发现概率虽然有所增加, 但是增幅不大。

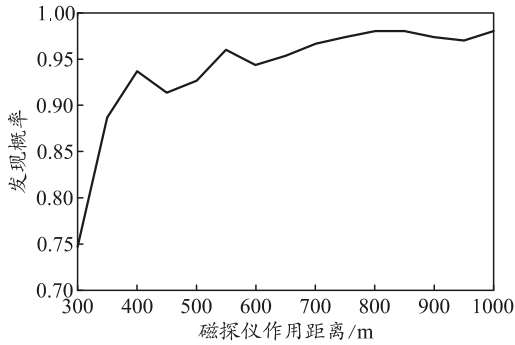


图 5 磁探仪作用距离对发现概率的影响

#### 4.5 飞机飞行高度对发现概率的影响

飞机飞行高度与磁探仪作用距离影响的都是磁探仪的探测宽度。磁探仪探测宽度越大，发现潜艇的概率就越高，但同时也降低了对潜艇的定位精度。图 6 为飞机飞行高度对发现概率的影响。由图可知：只要飞机与潜艇间的距离在磁探仪作用范围之内，飞机高度变化对发现概率影响不大。

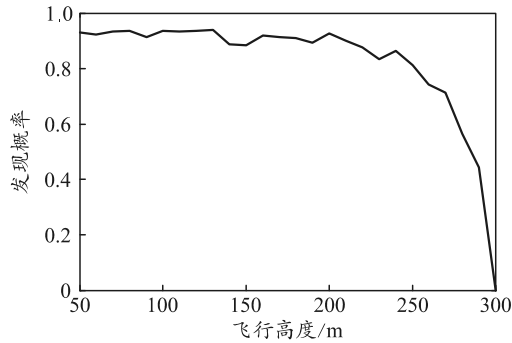


图 6 飞机飞行高度对发现概率的影响

#### 4.6 潜艇航向对发现概率的影响

图 7 为潜艇航向对发现概率的影响。由图可知：随着潜艇航向角的增大，概率总体趋势不断减小，说明对潜艇初始航向的判断非常重要，如果能够得到较为准确的潜艇航向，将大大提高对潜艇的发现概率，同时也节约了搜索的时间。

在图中某些特殊点上发现概率为 1。从对仿真计算数据的分析可得，这些发现概率为 1 的点为巡逻机航线上的转向点，这是因为用“以直代曲”的方法进行螺旋搜索时，转向点均位于螺旋线上，而螺旋线为最优的搜索模型，螺旋线上的每一点均为与潜艇的可能相遇点；因此，理论计算时在转向点处的发现概率为 1。在实际情况下，当飞机在转向时，将引起自身的涡流磁场，使得磁噪声增大，如

果此时潜艇的磁异常强度小于磁噪声，磁探仪将发现不了潜艇。

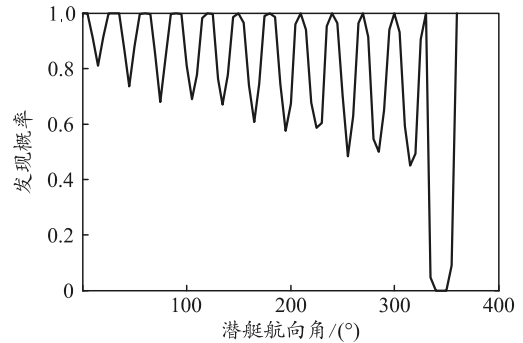


图 7 潜艇航向对发现概率的影响

### 5 结束语

笔者根据应召搜索的反潜作战样式，通过建立潜艇机动模型以及反潜巡逻机应召搜索的航路模型，分析了潜艇初始位置散布和开始搜索后的运动方式，得到了潜艇的初始位置散布函数和运动函数，推算了潜艇的位置坐标和巡逻机的位置坐标解算函数。在此基础上，建立了磁探仪应召搜潜的效能解算模型，并进行了仿真计算，得出在各种不同因素影响下，反潜巡逻机使用磁探仪应召搜潜的效能。

#### 参考文献：

- [1] 蒋志忠, 杨日杰, 郭新奇, 等. 风对反潜巡逻机应召搜索延迟时间的影响研究[J]. 指挥控制与仿真, 2010, 32(1): 89-91.
- [2] 孙明太. 航空反潜战术[M]. 北京: 军事科学出版社, 2003: 4.
- [3] 岳增坤, 高晓光. 固定翼反潜巡逻机及其作战效能分析[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(5): 27-30.
- [4] 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): 3281-3182.
- [5] 张圣云, 张安, 王连柱, 等. 反潜飞机对潜搜索方法研究[J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(1): 70-71.
- [6] 张之駸. 搜索论[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1992: 6.
- [7] 吴福初, 徐寅, 于昊天, 等. 单舰拖曳线列阵声纳检查反潜模型与仿真研究[J]. 兵工自动化, 2017, 36(7): 76-79.
- [8] 王文海. 对运动目标螺旋搜索误区分析[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(6): 48-50.
- [9] 盛文平, 王磊, 汪浩, 等. 反潜直升机吊放声纳应召搜潜仿真研究[J]. 指挥控制与仿真, 2009, 31(6): 84-88.