

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.06.002

## 反潜巡逻机磁探仪检查搜潜效能研究

章尧卿<sup>1</sup>, 王光源<sup>1</sup>, 林芳慧<sup>2</sup>

(1. 海军航空工程学院指挥系, 山东 烟台 264001; 2. 山东商务职业学院外语系, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 针对潜艇自身的磁异常会引起地磁场扰动的特点, 可以利用磁探仪探测安静型潜艇。根据检查搜潜的特点, 结合反潜巡逻机使用磁探仪对潜搜索的方法, 分别建立单机和双机使用磁探仪检查搜潜的数学模型, 并通过仿真计算, 分析搜索区域面积、磁探仪探测作用距离的变化对搜索发现概率的影响。仿真结果证明, 该方法能为磁探仪的优化使用提出有效建议。

**关键词:** 反潜巡逻机; 磁探仪; 检查搜索; 发现概率

**中图分类号:** TJ67 **文献标志码:** A

## Research on Efficiency of Checking Search Submarine by Magnetic Anomaly Detector on Antisubmarine Patrol Aircraft

Zhang Yaoqing<sup>1</sup>, Wang Guangyuan<sup>1</sup>, Lin Fanghui<sup>2</sup>

(1. Dept. of Command, Naval Aeronautical &amp; Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. Dept. of Foreign Language, Shandong Business Vocational Institute, Yantai 264001, China)

**Abstract:** Aiming at the magnetic abnormality causing magnetic field disturbance, use magnetic anomaly detector (MAD) to detect quiet submarine. According to checking search features, combined with the method which anti-submarine patrol aircraft using MAD to search submarine, establish the math models of single-aircraft and double-aircraft using MAD to detect math model of submarine searching. Through simulation calculating, analyze the influence of change of search acreage and MAD detecting distance on search detecting probability. The result proved that this method can gives effective suggestions for the optimization use of MAD.

**Key words:** anti-submarine patrol aircraft; MAD; checking search; detecting probability

## 0 引言

检查反潜是指反潜机在特定时间内对指定的海域实施反潜搜索, 以查明此海域有无敌潜艇并采取跟踪或攻击的活动。检查反潜的特征是: 在不了解目标位置和运动要素等信息的条件下, 对指定区域相对反潜机而言运动缓慢的潜艇目标进行的搜索。检查搜索多属于面搜索(区域搜索), 可认为潜艇的初始位置分布是均匀的<sup>[1]</sup>, 在给定海域任意一点发现潜艇的概率相等, 目的是在指定区域内发现敌潜艇或检查有无潜艇。

潜艇自身的磁异常会引起地磁场的扰动, 通过检测这种磁异常扰动可以对潜艇进行检测和跟踪。与其他探测设备相比, 磁探仪具有不受水文气象条件限制、可以连续搜索、使用简单可靠、反应迅速、定位精度高、隐蔽性好等优点<sup>[2]</sup>。因此, 笔者设计一种利用磁异常扰动探测安静型潜艇的反潜巡逻机磁探仪, 并对其搜潜效能进行研究。

## 1 检查搜潜概率模型

## 1.1 磁探仪搜索宽度

磁探仪的搜索宽度是体现其搜索能力的重要指

标, 它不仅与其发现距离有关, 而且与反潜机飞行高度和潜艇所在深度有关。如图 1 所示, 反潜机在一定高度飞行, 潜艇在一定深度时的搜索宽度<sup>[3]</sup>为:

$$W = 2\sqrt{d^2 - (H+h)^2} \quad (1)$$

式中:  $W$  为磁探仪的搜索宽度;  $d$  为磁探仪的作用距离;  $H$  为飞机的飞行高度;  $h$  为潜艇所在深度。

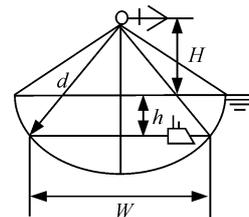


图 1 磁探仪的搜索宽度

磁探仪一旦发现潜艇, 就能够结合巡逻机导航系统对潜艇进行定位, 但是由于磁探仪测量的是潜艇磁场强度的标量值, 只能判断出潜艇位于磁探仪的作用范围之内, 而不能得到飞机与潜艇的相互位置关系<sup>[4]</sup>。因此使用磁探仪对潜艇定位时, 其定位误差就是磁探仪的搜索半宽。

收稿日期: 2012-01-25; 修回日期: 2012-03-15

作者简介: 章尧卿(1984—), 男, 浙江人, 硕士, 讲师, 从事航空反潜、武器系统效能评估研究。

### 1.2 潜艇机动模型

#### 1.2.1 潜艇的初始位置散布

对指定海域进行检查搜索时, 不能确定该区域是否存在潜艇。现假设在该区域存在一艘潜艇, 则该潜艇在指定海域内任意点出现的概率是相同的。因此当巡逻机开始搜索时, 其初始位置在该海域内服从均匀分布。

设指定的搜索海域为:

$$D = \{ (x, y) \mid x \in [0, a], y \in [0, b] \}$$

则潜艇初始位置点  $(x_0, y_0)$  的概率密度函数为:

$$f(x_0, y_0) = \begin{cases} \frac{1}{ab} & x_0 \in [0, a], y_0 \in [0, b] \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

#### 1.2.2 潜艇的运动模型

由于不知道潜艇的运动信息, 假设潜艇的初始航向  $H_q$  服从  $[0, 2\pi]$  区间上的均匀分布, 航速服从以经济航速  $V_{sc}$  为均值的正态分布。为确保在搜索过程中, 检查区域内始终有一艘潜艇。假设潜艇的运动轨迹是: 以随机抽取的航向和航速作定速直航运动, 当潜艇运动到搜索区边界时, 以镜面反射的形式改变潜艇航向, 航速不变<sup>[5]</sup>。

根据潜艇机动的假设, 由于巡逻机开始搜索时, 潜艇的初始位置服从均匀分布, 因此可在搜索区域内随机选取初始位置点  $(x_{q0}, y_{q0})$ , 则任意  $t$  时刻潜艇的位置坐标为:

$$\begin{cases} x_{qi} = x_{q0} + V_q \cdot \Delta t \\ y_{qi} = y_{q0} + V_q \cdot \Delta t \end{cases} \quad (3)$$

计算出下一点潜艇的位置坐标  $(x_{q1}, y_{q1})$  之后, 需要判断此刻潜艇的位置是否出了搜索区域的边界。如果出了边界, 则潜艇此刻的位置坐标应该是以边界为对称中线, 在边界另一侧相对称的位置点, 同时, 以反射线方式改变航向。

在改变航向的同时, 对潜艇位置坐标进行重新赋值。

### 1.3 巡逻机搜索模型

检查搜索分为多机并行搜索法和平行多段搜索法。当采用密集队形进行并行搜索时, 相临机之间的间隔为磁探仪搜索宽度  $W$ <sup>[6]</sup>。采用平行多段搜索时, 每段航线之间的间距为磁探仪搜索宽度  $W$ 。在仿真计算中讨论了使用单机和使用双机进行平行多段搜索的情况。

分别建立单机搜索和双机搜索的坐标系如图 2 所示, 以搜索区域的左下角为坐标原点,  $Y$  轴为北方向。

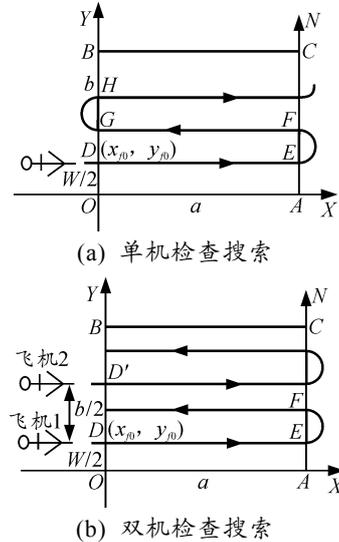


图 2 检查搜索坐标系

#### 1.3.1 单机检查搜索

如图 2(a)所示, 巡逻机的初始进入点坐标为  $D(x_{f0}, y_{f0})$ , 其中  $x_{f0} = 0, y_{f0} = \frac{W}{2}$ , 记巡逻机进入搜索区域的时刻为 0, 则分析可知, 巡逻机的任意  $t$  时刻坐标  $x_{fi}, y_{fi}$  均为周期函数。

取一个周期为巡逻机从  $D$  点飞行到  $H$  点, 则巡逻机一个周期内飞过的时间为:

$$T = 2 \frac{a}{V_f} + 2t_{zw} \quad (4)$$

$$\text{设: } t_1 = \frac{a}{V_f}, t_2 = \frac{a}{V_f} + t_{zw}, t_3 = 2 \frac{a}{V_f} + t_{zw} \circ$$

图 3 为  $x$  坐标的一个变化周期。

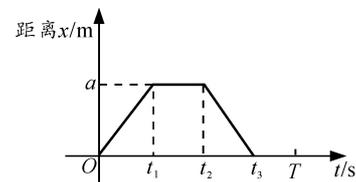


图 3 巡逻机横坐标解算

解算  $t$  时刻巡逻机的  $x$  坐标得

$$x_{fi} = \begin{cases} V_f \cdot t_p & 0 < t_p \leq t_1 \\ \text{不记} & t_1 < t_p \leq t_2 \\ V_f \cdot \left( 2 \frac{a}{V_f} + t_{zw} - t_p \right) & t_2 < t_p \leq t_3 \\ \text{不记} & t_3 < t_p \leq T \end{cases} \quad (5)$$

由于在  $x$  坐标计算过程中已经过滤了巡逻机转向过程中的坐标值, 因此在计算  $y$  坐标时不需要考虑转向的时间段。

图 4 为  $y$  坐标的一个变化周期。

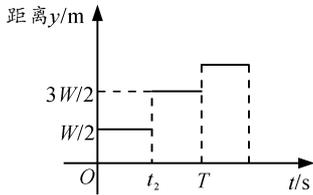


图 4 巡逻机纵坐标解算

解算  $t$  时刻巡逻机的  $y$  坐标得

$$y_{fi} = \begin{cases} \frac{W}{2} + \text{floor}\left(\frac{t}{T}\right) \cdot W & 0 < t_p \leq t_2 \\ \frac{3W}{2} + \text{floor}\left(\frac{t}{T}\right) \cdot W & t_2 < t_p \leq T \end{cases} \quad (6)$$

$$t_p = t - \text{floor}\left(\frac{t}{T}\right) \cdot T \quad (7)$$

式中:  $t_1 < t_p \leq t_2$  和  $t_3 < t_p \leq T$  两段为飞机转弯时间, 不记飞机坐标。  $T$  为飞机飞行一个周期所需要的时间,  $T = 2\frac{a}{V_f} + 2t_{zw}$ ;  $V_f$  为飞机飞行速度;  $t_{zw}$  为飞机转弯从  $E$  点到  $F$  点所需要的时间;  $a$  为  $OA$  段长度;  $b$  为  $OB$  段长度;  $W$  为磁探仪有效作用宽度; floor 表示向下取整。

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  $d_{fq}$ , 得

$$d_{fq} = \sqrt{(x_{fi} - x_{qi})^2 + (y_{fi} - y_{qi})^2} \quad (8)$$

若  $d_{fq} \leq \frac{W}{2}$ , 则认为磁探仪发现潜艇。

### 1.3.2 双机检查搜索

如图 2(b)所示, 2 架反潜巡逻机对同一区域进行检查搜索时, 可以假设两机同时进入搜索区域, 两机的航向航速相同。2 架飞机飞入搜索区域的进入点分别为  $D(x_{f0}, y_{f0})$  和  $D'(x'_{f0}, y'_{f0})$ , 其中:

$$\begin{cases} x_{f0} = x'_{f0} = 0 \\ y'_{f0} = y_{f0} + \frac{b}{2} \end{cases} \quad (9)$$

可知, 飞机 2 任意时刻的  $x$  坐标与飞机 1 任意时刻的  $x$  坐标相同, 为:

$$x'_{fi} = \begin{cases} V_f \cdot t_p & 0 < t_p \leq t_1 \\ \text{不记} & t_1 < t_p \leq t_2 \\ V_f \cdot \left( 2\frac{a}{V_f} + t_{zw} - t_p \right) & t_2 < t_p \leq t_3 \\ \text{不记} & t_3 < t_p \leq T \end{cases} \quad (10)$$

飞机 2 任意时刻的  $y$  坐标比飞机 1 任意时刻的  $y$  坐标大  $b/2$ , 为:

$$y'_{fi} = \begin{cases} \frac{W}{2} + \text{floor}\left(\frac{t}{T}\right) \cdot W + \frac{b}{2}, & 0 < t_p \leq t_2 \\ \frac{3W}{2} + \text{floor}\left(\frac{t}{T}\right) \cdot W + \frac{b}{2}, & t_2 < t_p \leq T \end{cases} \quad (11)$$

飞机 1 的坐标与单机搜索时相同, 因此需要同时判断潜艇的位置与 2 架飞机之间的距离, 分别为  $d_{fq}$  和  $d'_{fq}$ , 若  $d_{fq} \leq \frac{W}{2}$  or  $d'_{fq} \leq \frac{W}{2}$ , 则认为磁探仪发现潜艇。

## 2 检查搜潜发现概率仿真计算

对以上建立的模型进行仿真计算, 并对参数作如下假设:

- 1) 根据文献[7], 磁探仪作用距离取:  $d=400$  m。
- 2) 根据文献[8], 反潜巡逻机巡航速度取:  $V_{fh}=500$  km/h, 抵达战区低空巡逻高度  $H_f=150$  m, 速度为  $V_{fs}=320$  km/h, 低空飞行搜索时间最长为  $T=3$  h; 航速误差为  $\sigma_{vf}=10$  km/h, 航向误差  $\sigma_{Hf}=3^\circ$ 。
- 3) 根据文献[9], 潜艇的航速取: 最大航速  $V_{qmax}=13$  kn, 最小巡航速度  $V_{sc}=5$  kn; 潜艇航速误差  $\sigma_{Vq}=2$  kn, 潜艇航行深度  $h_q=100$  m。

在以上条件下, 对反潜巡逻机使用磁探仪对潜搜索的发现概率进行仿真计算, 结果如图 5、6。

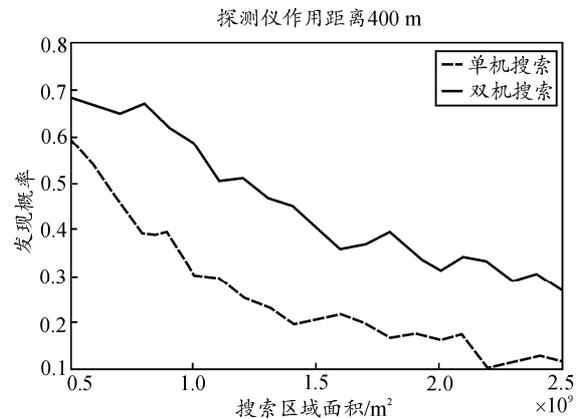


图 5 搜索区域面积对发现概率的影响