

引用格式:谭安胜,王新为.反潜巡逻机磁探仪巡逻搜索研究[J].电光与控制,2019,26(2):1-4. TAN A S, WANG X W. Research on anti-submarine patrol aircraft patrol search using magnetic detector[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(2):1-4.

反潜巡逻机磁探仪巡逻搜索研究

Research on Anti-submarine Patrol Aircraft Patrol Search Using Magnetic Detector

谭安胜, 王新为

(海军大连舰艇学院舰船指挥系, 辽宁 大连 116018)



谭安胜

基于反潜巡逻机及机载磁探仪性能特点,构建了满足“三性”要求的反潜巡逻机磁探仪巡逻搜索态势分析模型;给出了“两类三种”磁探仪巡逻搜索方法;针对敌潜艇的“V-H模糊性”,通过仿真计算,探讨了不同巡逻搜索方法的适应性;建立了反潜巡逻机使用磁探仪巡逻搜索发现潜艇概率计算模型。本研究为反潜巡逻机磁探仪巡逻搜索提供了理论与技术支持。

关键词:反潜巡逻机;巡逻搜索;磁探仪;搜索态势;搜索效率

中图分类号: E925.4; V271.4

doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.02.001

谭安胜(1963-),山东荣成人,军事学博士,教授,博士生导师,海军专业技术大校军衔,享受国务院政府特殊津贴。中国指挥与控制学会理事,海上指挥控制专业委员会常务委员、副总干事,军事系统工程专业委员会委员,火力与指挥控制专业委员会委员。长期从事军事运筹学、作战指挥学和兵种战术学的教学与科研工作,在军事运筹、作战指挥、兵种战术等领域有较深入的研究。发表学术论文100余篇,出版专著3部,主持完成军队重点科研项目40余项,获军队科技进步一等奖3项、二等奖7项,全军优秀博士学位论文奖,荣立三等功3次。

0 引言

反潜巡逻机在巡逻线上对潜搜索,简称巡逻搜索。巡逻搜索是指为了阻止敌潜艇通过某海域而进行的反潜活动。使用磁探仪进行巡逻搜索的时机通常是:1)在受自然条件限制的狭窄海域(狭窄水道、海峡)时;2)保障己方潜艇进行展开时;3)警戒护航运输队、登陆输送队等的组建区时。由于磁探仪作用距离较小,通常情况下仅在没有其他探测器材或不可能使用其他探测设备时才使用磁探仪在巡逻线上进行搜索^[1]。反潜巡逻机转向时间的不可忽略性、较小的磁探作用距离以及敌潜艇潜航速度模糊性和潜航深度模糊性(简称“V-H模糊性”),对传统搜索方法提出了挑战。

1 磁探仪巡逻搜索态势分析

为了阻止敌潜艇通过某海域,在其必经或可能的展开航路上设置巡逻线,并在巡逻线上使用磁探仪进

行搜索。为了实施对潜艇的搜索,反潜巡逻机必须沿着巡逻线往返飞行,监视磁场的变化。

1.1 基本假设

- 1) 敌潜艇的航向垂直于巡逻线方向;
- 2) 敌潜艇等概率地从巡逻线上的任意点突破;
- 3) 反潜巡逻机在转弯时不使用磁探仪。

1.2 模型建立

如图1所示,反潜巡逻机以 v_a 的搜索飞行速度,在巡逻线 L_d 上长度为 L_D 的某一个巡逻段上往返飞行,对航行速度为 v_q 企图穿越该巡逻段的潜艇进行搜索。

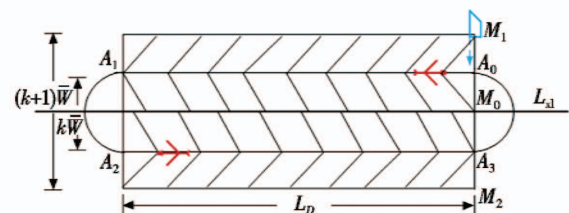


图1 磁探仪巡逻搜索分析示意图

Fig. 1 The sketch map of patrol search by magnetic detector

图1中平行于巡逻线的飞行轨道为反潜巡逻机巡逻搜索时的实际飞行航迹。设反潜巡逻机对可能潜航深度范围为 $[h_{q1}, h_{q2}]$ 的潜艇的平均搜索宽度^[2]为 \bar{W} ,飞行轨道上两个平行航段间距为 $k\bar{W}$, $k \geq 0$ 。若反潜巡逻机在转弯时不使用磁探仪,则其探测范围是沿两个平行航段飞行时,平均搜索宽度 \bar{W} 所扫过的面积,其搜索带宽度为 $(k+1)\bar{W}$ 。

若反潜巡逻机自 A_0 点开始巡逻搜索, 经过 A_1, A_2 到达 A_3 点, 应当不迟于潜艇穿越 M_1, M_2 。则在巡逻段 L_D 上, 反潜巡逻机将以一定的接触概率发现企图穿越巡逻段 L_D 的潜艇。令反潜巡逻机从巡逻段 L_D 端点转向 180° 所需的时间为 t_{π} , 则巡逻段 L_D 的最大值满足^[3-5]

$$\frac{2L_D}{v_a} + t_{\pi} = \frac{M_1 M_2}{v_q} \quad (1)$$

由于

$$M_1 M_2 = (k+1) \bar{W} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)并整理得

$$L_D = \frac{v_a}{2v_q} [(k+1) \bar{W} - v_q t_{\pi}] \quad (3)$$

在式(3)中, 若令 $k > 1$, 则两个飞行航段之间的区域不能保证被磁探仪完全覆盖, 如图2所示。由于敌潜艇潜航速度存在不确定性, 此时可能漏扫穿越 M_1, M_2 的潜艇, 所以, k 的取值应当为 $0 \leq k \leq 1$ 。

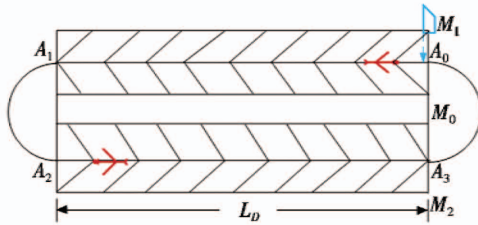


图2 磁探仪巡逻搜索分析示意图 ($k > 1$)

Fig. 2 The sketch map of patrol search by magnetic detector when $k > 1$

另外, 在式(3)中应当满足 $(k+1) \bar{W} > v_q t_{\pi}$, 否则将没有意义。也就是说, 当 $(k+1) \bar{W} \leq v_q t_{\pi}$ 时, $L_D \leq 0$, 反潜巡逻机往返飞行搜索是不可行的。即使 $(k+1) \bar{W} > v_q t_{\pi}$, 如果计算的巡逻段长度 L_D 很小, 频繁转弯将使机组人员产生疲劳, 也是无实际意义的。

实际上, 反潜巡逻机在巡逻搜索飞行时应当满足以下“三性”要求:

- 1) 转向快速性, 即转向时间要尽可能短, 以便控制较长的巡逻段, 从而节省兵力;
- 2) 乘员适宜性, 即转向时横倾角要尽可能小, 确保机组人员能够长时间有效工作;
- 3) 进出准确性, 即转向后进入搜索航段和结束搜索航段时的位置点要准。

这3条要求之间是相互制约的。设反潜巡逻机从一个飞行航段转至另一个飞行航段时的平均飞行速度为 v_{acc} , 转弯时的横倾角为 γ , 则转弯半径 R_a 为

$$R_a = \frac{v_{\text{acc}}^2}{g \cdot \tan \gamma} \quad (4)$$

式中, g 为重力加速度。

要减小转弯半径, 必须增大横倾角, 乘员容易产生疲劳。所以, 为了使反潜巡逻机在巡逻段 L_D 的端点能

够平稳飞行, 转弯时的横倾角 γ 应当控制在一定范围内, 通常取 $\gamma \leq \gamma_0$, γ_0 为常数, 本文取 $\gamma_0 = 20^\circ$ 。将 $\gamma = \gamma_0$ 时的转弯半径称为最小转弯半径, 记为 R_{amin} 。

当满足人员适宜性要求的最小转弯半径 $2R_{\text{amin}} > k\bar{W}$ 时, 必须通过复杂机动才能保证进入搜索航段时位置点的准确性。只有当 $2R_{\text{amin}} \leq k\bar{W}$ 时, 才能找到满足上述3点要求的平衡点。转向时间 t_{π} 为

$$t_{\pi} = \begin{cases} \left(2\pi - 2\arcsin \frac{k\bar{W}}{2R_{\text{amin}}}\right) \cdot \frac{R_{\text{amin}}}{v_{\text{acc}}} & 2R_{\text{amin}} > k\bar{W} \\ 0.5\pi k\bar{W} / v_{\text{acc}} & 2R_{\text{amin}} \leq k\bar{W} \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)代入式(3), 并令 $v_a/v_q = m$, $v_{\text{acc}} \approx v_a$ 整理得

$$L_D = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[(k+1)m \cdot \bar{W} - R_{\text{amin}} \left(2\pi - 2\arcsin \frac{k\bar{W}}{2R_{\text{amin}}}\right) \right] & 2R_{\text{amin}} > k\bar{W} \\ \frac{1}{2} \bar{W} \cdot \left[(k+1)m - \frac{\pi k}{2} \right] & 2R_{\text{amin}} \leq k\bar{W} \end{cases} \quad (6)$$

实践表明, 反潜巡逻机在一个航段上的飞行时间 T_D 通常应为 $3 \sim 4$ min, 否则, 频繁转弯将使机组人员很快产生疲劳, 战斗坚持力下降。针对这种情况可以采取如下措施: 1) 提高磁探仪的性能, 增大其有效探测距离 d ; 2) 基于现有装备性能, 改进搜索方法。在给定装备条件下, 只能通过改进搜索方法来解决。所以, 当 $L_D < v_a T_D$ 时, 可以考虑采用双机编队在同一个巡逻段上进行搜索的方法。

如图3所示, 双机组成右(左)梯队, 横向间距 $k\bar{W}$, 纵向间距 D_x , 到达巡逻段终点转向 180° , 成左(右)梯队。

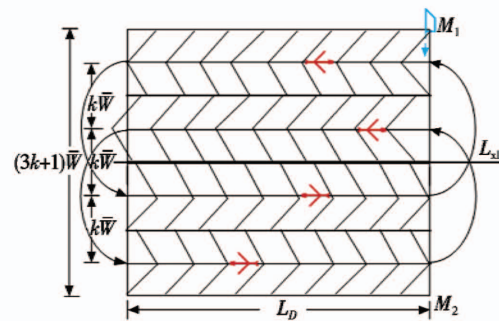


图3 双机编队磁探仪巡逻搜索分析示意图

Fig. 3 The schematic diagram of patrol search by magnetic detector in a formation of two aircrafts
巡逻段长度为

$$L_D = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[(3k+1)m \cdot \bar{W} - R_{\text{amin}} \left(2\pi - 2\arcsin \frac{k\bar{W}}{R_{\text{amin}}}\right) \right] & R_{\text{amin}} > k\bar{W} \\ \frac{1}{2} \bar{W} \cdot \left[(3k+1)m - \pi k \right] & R_{\text{amin}} \leq k\bar{W} \end{cases} \quad (7)$$

根据上述搜索态势的分析,为便于表述和使用,将 $k=0$ 时的巡逻搜索飞行航迹称为直线磁探巡逻轨道;将 $k=1$ 时的巡逻搜索飞行航迹称为标准磁探巡逻轨道。显然,标准磁探巡逻轨道既适用于单机也适用于双机编队,直线磁探巡逻轨道只适用于单机。相应的搜索方法可分为:单机直线磁探巡逻轨道搜索法、单机标准磁探巡逻轨道搜索法和双机标准磁探巡逻轨道搜索法。

1.3 仿真计算与分析

1.3.1 仿真目的

针对敌潜艇潜航速度和潜航深度的模糊性,探讨不同巡逻搜索方法的适应性。

1.3.2 条件设置

反潜巡逻机搜索飞行高度 $h_a \in [100 \text{ m}, 300 \text{ m}]$; 搜索飞行速度 $v_a \in [320 \text{ km/h}, 440 \text{ km/h}]$; 磁探仪最大作用距离 $d_c \in [400 \text{ m}, 1000 \text{ m}]$; 潜艇潜航深度 $h_q \in [50 \text{ m}, 100 \text{ m}]$, 潜航速度 $v_q \in [6 \text{ kn}, 17 \text{ kn}]$ ($1 \text{ kn} = 1.852 \text{ km/h}$)。磁探仪平均搜索宽度 \bar{w} 按文献[1]的模型计算。

1.3.3 单机搜索仿真结果

表1给出了不同条件下,满足乘员适宜性要求时,反潜巡逻机单机巡逻搜索能覆盖的潜艇航速范围。

表1 反潜巡逻机单机巡逻搜索覆盖潜艇航速范围

Table 1 Coverage of single anti-submarine patrol aircraft on submarine speed range in patrol search kn

k	$\Delta d/\text{m}$	d_c/m												
		400		500		600		700		800		1000		
		T_D/min	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
0	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<3	<3
	200	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<4	<3
	300	<3	<3	<3	<3	<4	<3	<4	<3	<5	<3	<4	<3	<3
	400	-	-	<4	<3	<4	<3	<5	<4	<5	<4	<6	<5	<5
	500	-	-	-	-	<5	<4	<5	<4	<6	<5	<6	<5	<5
	700	-	-	-	-	-	-	-	-	<6	<5	<8	<5	<6
1	100	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3
	200	<5	<4	<6	<4	<6	<5	<6	<5	<8	<6	<8	<6	<6
	300	<6	<5	<8	<6	<8	<6	<8	<6	<10	<8	<10	<8	<8
	400	-	-	<8	<6	<8	<6	<10	<8	<12	<8	<14	<10	<10
	500	-	-	-	-	<10	<8	<10	<8	<12	<10	<14	<12	<12
	600	-	-	-	-	-	-	<10	<8	<14	<10	<14	<12	<12
1	700	-	-	-	-	-	-	-	-	<14	<10	<16	<12	<12
	800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<18	<14	<14
	900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<18	<14	<14
	备注	$\Delta d = d_c - h_a; v_a \in [320 \text{ km/h}, 440 \text{ km/h}]; h_q \in [50 \text{ m}, 100 \text{ m}]$												

从表1可以看出:

- 1) 当 $k=0$ 时,只有在 d_c 不小于 800 m 时,才能对航速不大于 5 kn 的低速潜艇进行有效搜索;
- 2) 当 $0 < k \leq 1$ 时,反潜巡逻机有效巡逻段长度 L_D 随着 k 值的增大而增大,在 L_D 满足人员适宜性要求的前提下, k 值的变化使得平行航段的间距具有一定的弹

性,但为了确保较长的 L_D ,实际使用中 k 值应当取 1;

- 3) 当 $k=1$ 时,对于 $d_c=400 \text{ m}$ 的磁探仪,只有当反潜巡逻机的飞行高度不大于 100 m 时,才能对航速不大于 5 kn 的低速潜艇进行搜索;
- 4) 当要求飞行高度在 100 ~ 300 m,能对航速为 6 ~ 8 kn 的潜艇进行搜索时,磁探仪有效作用距离应满足 $500 \text{ m} \leq d_c \leq 700 \text{ m}$;
- 5) 当要求飞行高度在 100 ~ 300 m,能对航速不大于 10 kn 的潜艇进行搜索时,磁探仪有效作用距离 d_c 应不小于 800 m;
- 6) 对于 d_c 不小于 1 km 的磁探仪,当飞行高度在 100 ~ 600 m 时,能对航速不大于 14 kn 的潜艇进行有效搜索。

1.3.4 双机编队搜索仿真结果

表2给出了不同条件下,满足乘员适宜性要求时,反潜巡逻机双机编队巡逻搜索能覆盖的潜艇航速范围。

表2 反潜巡逻机双机编队巡逻搜索覆盖潜艇航速范围
Table 2 Coverage of dual anti-submarine patrol aircraft formation on submarine speed range in patrol search kn

$\Delta d/\text{m}$	d_c/m					
	400		500		600	
	T_D/min	2	3	2	3	2
100	-	-	-	-	-	-
200	<4	<3	<5	<4	<5	<4
300	<10	<8	<12	<10	<12	<10
400	<12	<10	<14	<12	<17	<12
500	-	-	<17	<12	<20	<14
500	-	-	-	-	<22	<17
备注	$\Delta d = d_c - h_a; v_a \in [320 \text{ km/h}, 440 \text{ km/h}]; h_q \in [50 \text{ m}, 100 \text{ m}]$					

从表2可以看出:

- 1) 对于 $d_c=400 \text{ m}$ 的磁探仪,双机编队飞行高度在 100 ~ 200 m 时,能对航速不大于 10 kn 的潜艇进行搜索;
- 2) 当要求双机编队在飞行高度 100 ~ 400 m,能对航速 10 ~ 17 kn 的潜艇进行搜索时,磁探仪有效作用距离应满足 $500 \text{ m} \leq d_c \leq 600 \text{ m}$ 。

1.4 研究结论

- 1) 对于 $d_c=400 \text{ m}$ 的磁探仪,应当采用双机标准磁探巡逻轨道搜索法进行巡逻搜索,飞行高度在 100 ~ 200 m,能覆盖航速在 10 kn 以内的潜艇;
- 2) 单机直线磁探巡逻轨道搜索法只适用于 d_c 不小于 1 km 的磁探仪对航速 6 kn 以下的低速潜艇进行搜索;
- 3) 单机标准磁探巡逻轨道搜索法对不同 d_c 的磁探仪和不同航速范围的潜艇具有一定的适应性;
- 4) 双机标准磁探巡逻轨道搜索法对不同 d_c 的磁探仪和不同航速范围的潜艇具有很强的适应性;
- 5) 双机标准磁探巡逻轨道搜索法与单机标准磁

探巡轨道搜索法相比,具有显著优势,同等条件下,其最大巡逻段长度 L_D 是单机标准磁探巡轨道搜索法的2倍以上。

基于当前装备技术性能,反潜巡逻机使用磁探仪进行巡逻搜索时,最有效的方法应当是双机标准磁探巡轨道搜索法。

2 磁探仪巡逻搜索效率

反潜巡逻机使用磁探仪在巡逻线搜索时,发现目标的概率取决于在一个搜索周期内反潜巡逻机搜索的面积和敌潜艇可能所处的面积。

设磁探仪接触概率为 p_{cjc} ,则一架反潜巡逻机使用磁探仪对处于深度范围为 $[h_{q1}, h_{q2}]$ 的潜艇的平均搜索效率为

$$U_c = \bar{W} \cdot p_{cjc} \cdot v_a \quad (8)$$

设一架反潜巡逻机在巡逻段上飞行的航段数(往返次数)为 n_D ,则其有效搜索时间 T_{yx} 为

$$T_{yx} = t_{xl} - n_D t_{zx} \quad (9)$$

式中: t_{xl} 为反潜巡逻机在巡逻段最大留空时间; t_{zx} 为反潜巡逻机转向 180° 所用时间。

反潜巡逻机在巡逻段最大留空时间内,敌潜艇可能所处的面积为

$$S_q = L_D v_q t_{xl} \quad (10)$$

则反潜巡逻机使用磁探仪在巡逻段 L_D 上搜索时,发现潜艇的概率 P_c 为

$$P_c = 1 - e^{-U_c T_{yx} / S_q} = 1 - \exp\left[-\frac{\bar{W} \cdot v_a (t_{xl} - n_D t_{zx}) N_a \cdot p_{cjc}}{L_D v_q t_{xl}}\right] \quad (11)$$

式中, N_a 为巡逻段上参加搜索的反潜巡逻机数量。

设总长度为 L_{xl} 的巡逻线被划分成 n_a 个巡逻段,第 i 个巡逻段的长度为 L_{Di} , $i = 1, 2, \dots, n_a$, 第 i 个巡逻段发现潜艇的概率为 P_{Ci} 。由于潜艇穿越巡逻线 L_{xl} 对于任意巡逻段 L_{Di} 是等概率的,所以潜艇穿越巡逻线 L_{xl} 时

被发现的概率的算式为

$$P_L = \frac{1}{L_{xl}} \sum_{i=1}^{n_a} (P_{Ci} \cdot L_{Di}) \quad (12)$$

当 $L_{D1} = L_{D2} = \dots = L_D$, $P_{C1} = P_{C2} = \dots = P_c$ 时,代入式(12)有

$$P_L = \frac{n_a L_D}{L_{xl}} P_c = P_c \quad (13)$$

显然,当每个巡逻段上的搜索兵力(反潜巡逻机)具有相同的效能,且在巡逻线上均匀部署时,潜艇穿越巡逻线时被发现的概率就等于潜艇穿越巡逻段时被发现的概率。

3 结束语

反潜巡逻机使用磁探仪在巡逻线上搜索时,根据指定巡逻线的长度、留空时间、单机或双机的搜索能力,将巡逻线划分成若干巡逻段,单机或双机在各自的巡逻段上,按相应的搜索方法进行搜索。由于敌潜艇存在“V-H模糊性”,反潜巡逻机巡逻搜索方法和搜索飞行参数的确定必须具有适应性(应对不确定性的最好方法是适应性)。实际作战中,应根据磁探仪的性能、敌潜艇可能的航速范围、可能的潜航深度范围、可用反潜巡逻机数量以及要求的巡逻线长度进行作战筹划。

参考文献

- [1] 孙明太. 航空反潜战术[M]. 北京:军事科学出版社, 2003.
- [2] 谭安胜,王新为,尹成义. 反潜巡逻机磁探仪区域搜索研究[J]. 电光与控制, 2018, 25(8): 1-6.
- [3] 张最良,李长生,赵文志,等. 军事运筹学[M]. 北京:军事科学出版社, 1993.
- [4] 谭安胜. 水面舰艇编队作战运筹分析[M]. 北京:国防工业出版社, 2009.
- [5] 谭安胜. 舰载预警直升机作战运筹分析[M]. 北京:国防工业出版社, 2017.

Abstract: Based on the performance and features of the anti-submarine patrol aircraft and the airborne magnetic detector, the model for patrol search situation analysis, which meets the three requirements, is established. Two types, totally three kinds of patrol search methods are proposed for magnetic detector. Considering the V-H fuzziness of enemy submarines, the adaptability of different patrol search methods is studied through simulation calculation. The detection probability calculation model of patrol search of anti-submarine patrol aircraft using magnetic detector is set up. The study supplies a theoretical and technical support for the patrol search of anti-submarine patrol aircraft with magnetic detector.

Key words: anti-submarine patrol aircraft; patrol search; magnetic detector; search situation; search efficiency