

直升机声纳浮标包围阵搜潜模型研讨

戚学文¹, 严建钢¹, 金复鑫^{1,2}, 高冬飞³

(1. 海军航空工程学院, 山东 烟台 264001; 2. 陆军航空兵学院, 北京 101123;

3. 中国人民解放军91278部队, 辽宁 大连 116041)

摘要: 介绍了直升机声纳浮标包围阵的典型阵型, 建立了其浮标位置模型, 为浮标阵的实际布放提供科学的理论依据。建立了潜艇初始位置散布模型, 给出了潜艇位置散布半径的计算方法。然后, 基于一定的假设条件, 对潜艇最大航速进行了估计, 将两倍的经济航速作为潜艇的最大航速, 并从概率的角度验证了该结论的合理性, 此时, 潜艇的速度服从瑞利分布。最后, 对潜艇初始位置散布以及潜艇经济航速对直升机声纳浮标包围阵搜潜概率的影响进行了仿真分析, 得出了仿真结果。

关键词: 声纳浮标包围阵; 搜潜; 位置散布; 经济航速

中图分类号: V271.4; TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2013)12-0010-04

Submarine Searching Models for Helicopters' Encircled Sonobuoy Array

QI Xuewen¹, YAN Jian'gang¹, JIN Fuxin^{1,2}, GAO Dongfei³

(1. Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China; 2. Aviation Institute Army,

Beijing 101123, China; 3. No. 91278 Unit of PLA, Dalian 116041, China)

Abstract: Several typical styles of helicopters' encircled sonobuoy arrays are introduced, and the sonobuoys' position models are established, which provides a scientific theoretical basis for sonobuoy placing. The distribution model of submarines' initial position was set up and the method for calculating the distribution radius of the submarines was described. Then, the submarines' maximum velocity was estimated mathematically based on some specific hypotheses. The submarines' maximum velocity was defined as twice of its economical speed, which rationality was demonstrated through the probability theory. In this way, the submarines' velocity obeys Rayleigh Distribution. Finally, simulation was made about the effect of the submarines' initial position distribution and their economical speed on the antisubmarine searching probability of the encircled sonobuoy arrays, and some results were obtained.

Key words: encircled sonobuoy array; submarine searching; position distribution; economical speed

0 引言

为了取得较好的搜潜效果, 并节省浮标, 正确地选择浮标阵型是反潜直升机使用声纳浮标搜潜时要考虑的重要环节^[1-2]。实际作战中, 一般应根据任务要求、反潜作战方法、搜索区域的形状和大小以及反潜直升机所携带的声纳浮标数量^[3-5], 采取不同的浮标阵型。

直升机使用声纳浮标应召反潜作战中, 当已知目标潜艇初始发现位置, 但不知其概略航向时, 通常将声纳浮标布放呈包围阵型。大量计算结果表明, 声纳浮标搜潜概率与潜艇的散布半径、潜艇散布中心置信度、潜艇航速、浮标作用距离、导航系统误差、布阵方式等诸多因素有关^[6-7]。因此, 定量研究潜艇位置散布, 科学、合理地估计其航速对声纳浮标反潜效能的提高具有重要的意义^[8]。

1 声纳浮标包围阵的典型阵型

声纳浮标包围阵的典型阵型主要有圆形阵、方形阵和三角形阵^[9]3种。

收稿日期: 2013-02-04

修回日期: 2013-03-06

基金项目: 国家社会科学基金军事学项目资助(11GJ003-074); 航空基金(20110184)

作者简介: 戚学文(1983—), 男, 河北唐山人, 博士生, 研究方向为海军兵种作战数理战术分析。

1) 圆形阵。

圆形阵即将多枚声纳浮标布放在以潜艇的初始发现位置为圆心的圆上,其浮标位置及相关参数如图 1 所示。

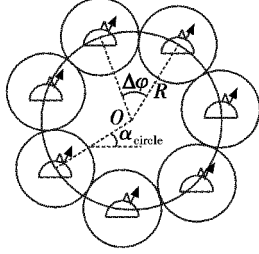


图 1 圆形阵示意图

Fig. 1 Schematic diagram of circular sonobuoy array

图 1 中:圆心 O 为潜艇初始发现位置; R 为圆的半径; $\Delta\varphi$ 为相邻两浮标之间圆弧对应的圆心角; α_{circle} 为圆形阵中直升机所在位置与圆心 O 的连线的角度。

由图 1 可知,第 1 枚浮标的位置为

$$\begin{cases} x_{\text{buoy1}} = x_{\text{sub0}} - R \cdot \cos \alpha_{\text{circle}} \\ y_{\text{buoy1}} = y_{\text{sub0}} - R \cdot \sin \alpha_{\text{circle}} \end{cases} \quad (1)$$

假设布设浮标的数量为 N ,按逆时针方向布放,则第 i ($i=1,2,3,\dots,N$) 枚浮标的位置为

$$\begin{cases} x_{\text{buoy}i} = x_{\text{sub0}} - R \cdot \cos(\alpha_{\text{circle}} + (i-1) \cdot \Delta\varphi) \\ y_{\text{buoy}i} = y_{\text{sub0}} - R \cdot \sin(\alpha_{\text{circle}} + (i-1) \cdot \Delta\varphi) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\Delta\varphi = 2\arcsin \frac{k \cdot D_{\text{det}}}{2R}$; k 为声纳浮标间隔系数; D_{det} 为声纳浮标的探测距离。

2) 方形阵。

方形阵即将多枚声纳浮标布放在以潜艇的初始发现位置为中心的方形的各条边上,其浮标位置及相关参数如图 2 所示。

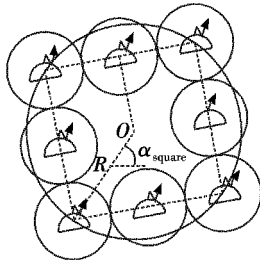


图 2 方形阵示意图

Fig. 2 Schematic diagram of square sonobuoy array

图 2 中:方形阵中心 O 为潜艇的初始发现位置; R 为 O 与方形顶点的距离; α_{square} 为方形阵中直升机所在位置与方形中心 O 的连线的角度。设方形阵每条边上的浮标数量为 N ,第 i ($i=1,2,3,4$) 条边上第 1 枚浮标(即 4 个顶点)所对应浮标的位置记为 $(x_{(i,1)}, y_{(i,1)})$,则 $(x_{(1,1)}, y_{(1,1)})$ 即为方形阵中第 1 枚浮标的位置。

根据目标潜艇的初始发现位置,由图 2 可知,方形阵第 i ($i=1,2,3,4$) 个顶点所对应浮标的位置为

$$\begin{cases} x_{(i,1)} = x_{\text{sub0}} - R \cdot \cos(\alpha_{\text{square}} + \frac{i-1}{2}\pi) \\ y_{(i,1)} = y_{\text{sub0}} - R \cdot \sin(\alpha_{\text{square}} + \frac{i-1}{2}\pi) \end{cases} \quad (3)$$

假设直升机按照逆时针方向依次布放方形浮标阵,则第 i ($i=1,2,3,4$) 条边上第 j ($j=1,2,3,\dots,N$) 枚浮标的位置为

$$\begin{cases} x_{(i,j)} = x_{(i,1)} + (j-1) \cdot k \cdot D_{\text{det}} \cdot \cos(\alpha_{\text{square}} + \frac{2i-3}{4}\pi) \\ y_{(i,j)} = y_{(i,1)} + (j-1) \cdot k \cdot D_{\text{det}} \cdot \sin(\alpha_{\text{square}} + \frac{2i-3}{4}\pi) \end{cases} \quad (4)$$

3) 三角形阵。

三角形阵即将多枚声纳浮标布放在以潜艇的初始发现位置为中心的等边三角形的各条边上,其浮标位置及相关参数如图 3 所示。

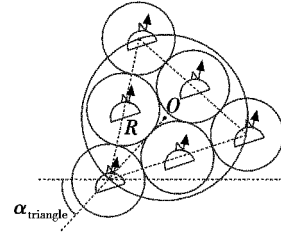


图 3 三角形阵示意图

Fig. 3 Schematic diagram of triangular sonobuoy array

图 3 中:等边三角形中心 O 为潜艇的初始发现位置; R 为 O 与三角形顶点的距离; α_{triangle} 为三角形阵中直升机所在位置与等边三角形中心 O 的连线的角度。设三角形阵每条边上的浮标数量为 N ,第 i ($i=1,2,3$) 条边上第 1 枚浮标(即 3 个顶点)所对应浮标的位置记为 $(x_{(i,1)}, y_{(i,1)})$,则 $(x_{(1,1)}, y_{(1,1)})$ 即为三角形阵中第 1 枚浮标的位置。

由图 3,根据目标潜艇的初始发现位置可得三角形阵第 i ($i=1,2,3$) 个顶点所对应浮标的位置为

$$\begin{cases} x_{(i,1)} = x_{\text{sub0}} - R \cdot \cos(\alpha_{\text{triangle}} + \frac{2(i-1)}{3}\pi) \\ y_{(i,1)} = y_{\text{sub0}} - R \cdot \sin(\alpha_{\text{triangle}} + \frac{2(i-1)}{3}\pi) \end{cases} \quad (5)$$

假设直升机按照逆时针方向依次布放三角形浮标阵,则第 i ($i=1,2,3$) 条边上第 j ($j=1,2,3,\dots,N$) 枚浮标的位置为

$$\begin{cases} x_{(i,j)} = x_{(i,1)} + (j-1) \cdot k \cdot D_{\text{det}} \cdot \cos(\alpha_{\text{triangle}} + \frac{4i-5}{6}\pi) \\ y_{(i,j)} = y_{(i,1)} + (j-1) \cdot k \cdot D_{\text{det}} \cdot \sin(\alpha_{\text{triangle}} + \frac{4i-5}{6}\pi) \end{cases} \quad (6)$$

2 潜艇的初始位置散布

直升机接到命令飞向发现潜艇的海域进行搜索时,

潜艇位置存在一定的散布^[10]。散布区域的大小与潜艇的航速和延迟时间(即从发现潜艇开始到直升机到达潜艇的初始位置开始搜索的时间)有关^[11-13]。对于潜艇的航速,目前主要有两种说法:一是假设潜艇的逃跑航速为最大航速的0.7倍;二是根据潜艇是否知道自身已被发现而采取不同的航速,若未知被发现,则假设其以经济航速航行,若已知被发现,则假设其以最大航速航行。

潜艇位置的实际最大散布范围为一个圆^[14],为了保证声纳浮标包围阵能够包围潜艇散布圆,在理论计算圆的半径时,采用潜艇的最大航速,因此,潜艇散布圆的半径 R_0 为

$$R_0 = V_s \cdot t_0 \quad (7)$$

式中: V_s 为潜艇执行战斗任务时的最大航速; t_0 为延迟时间。直升机开始搜索后,随着时间的推移,潜艇的散布范围将不断增大。假设直升机开始搜索潜艇的瞬间为零时刻,经过时间 t 后潜艇的最大散布半径 R_t 为

$$R_t = V_s \cdot (t_0 + t) \quad (8)$$

在上文得到的潜艇位置的最大散布范围内研究潜艇位置的概率分布。

3 对潜艇最大航速的估计

由上文分析可知,要得到潜艇的逃跑航速进而计算其散布范围,需首先确定潜艇的最大航速 V_s ,而当最大航速未知时,需对其进行估计。

潜艇位置的分布是由其运动特性决定的,通常假设潜艇的航速在 $[0, V_s]$ 内呈均匀分布,航向在 $[0, 2\pi]$ 内呈均匀分布,或者假设潜艇的位置呈正态分布。实际作战中究竟取哪一种假设,可根据当时获取目标的信息量等因素确定。下面将分别对上述两种假设进行讨论。

由于正态分布具有许多良好的性质,且其是一种较为精确的近似方法^[15],在对随机变量的研究中应用广泛,因此在条件允许时通常采用第2种假设,本文亦将第2种假设作为研究的重点。

1) 假设潜艇的航速 V_t 在 $[0, V_s]$ 内呈均匀分布,航向在 $[0, 2\pi]$ 内呈均匀分布。则其位置的概率密度函数 $f(r, \theta)$ 为

$$f(r, \theta) = \frac{1}{2\pi \cdot V_s t} \quad (9)$$

2) 假设潜艇的位置呈正态分布。则其位置的概率密度函数 $f(X, Y)$ 为

$$f(X, Y) = \frac{1}{2\pi\delta^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\delta^2}} \quad (10)$$

根据速度、方位角与坐标点的关系,随机变量 X, Y 与潜艇速度 V_t 和方位角 α 的关系如图4所示。

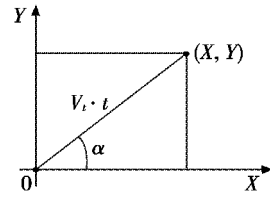


图4 潜艇位置与速度和方位角的关系

Fig. 4 Relation between position and azimuth of the submarine

由图4可以看出

$$\begin{cases} V_t t_1 = \sqrt{X^2 + Y^2} \\ \alpha = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \end{cases} \quad (11)$$

利用随机向量的变换求 V_t 与 α 的概率分布密度,其反函数为 $X = V_t \cdot t_1 \cdot \sin \alpha; Y = V_t \cdot t_1 \cdot \cos \alpha$ 。其雅可比行列式为

$$J = \frac{\partial(X, Y)}{\partial(V_t t_1, \alpha)} = \begin{vmatrix} \sin \alpha & V_t t_1 \cos \alpha \\ \cos \alpha & -V_t t_1 \sin \alpha \end{vmatrix} \quad (12)$$

可得 $V_t t_1, \alpha$ 的联合概率密度为: $f(V_t t_1, \alpha) =$

$$|J|f(X, Y) = \frac{V_t t_1}{2\pi\delta^2} \exp\left(-\frac{V_t^2 t_1^2}{2\delta^2}\right); f(V_t t_1) = \frac{V_t t_1}{\delta^2} \exp\left(-\frac{V_t^2 t_1^2}{2\delta^2}\right);$$

$$f(\alpha) = \frac{1}{2\pi}.$$

因此, V_t 呈瑞利分布, α 呈均匀分布,可求得潜艇速度 V_t 与方位角 α 的概率密度函数为

$$\begin{cases} f(V_t) = \frac{V_t}{\delta_1^2} \exp\left(-\frac{V_t^2}{2\delta_1^2}\right) \\ f(\alpha) = \frac{1}{2\pi} \end{cases} \quad (13)$$

在瑞利分布中, $V_t \in [0, \infty)$ 。实际上,在本文中 V_t 只在 $[0, V_s]$ 区间上取值,当潜艇速度 V_t 大于 V_s 时是不合理的,但不合理的概率是很小的,下面进行推导证明。

首先,求 V_t 的均值

$$E[V_t] = \int_0^\infty V_t f(V_t) dV_t = \int_0^\infty \frac{V_t^2}{\delta_1^2} e^{-V_t^2/2\delta_1^2} dV_t = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \delta_1 \quad (14)$$

均值的物理意义表示随机变量 V_t 最大可能的取值点,经济航速 V_{es} 是潜艇经常选取的航速^[16],因此假设经济航速就是潜艇速度的均值,可得均方差 δ_1 。

因为 $E[V_t] = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \delta_1 = V_{es}$,所以

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{2}{\pi}} V_{es} \quad (15)$$

然后求 V_t 在区间 $[0, 2V_{es}]$ 的概率分布函数为 $F(V_t) = \int_0^{2V_{es}} f(V_t) dV_t = 1 - e^{-\pi} \approx 0.9568$ 。

可见,不合理的概率只有0.0432,属于小概率事件。因此,如果以 $2V_{es}$ 作为潜艇的最大速度 V_s ,可以保证至少在95%的情况下是合理的。

4 仿真实例

下面基于蒙特卡罗法^[17]仿真思想,在第 2 种假设的前提下,对 3 种声纳浮标包围阵中潜艇初始位置散布以及潜艇经济航速与搜潜概率的关系进行仿真分析。由于本文侧重于整个声纳浮标阵作战使用方面的研究,不重点研究单枚浮标,因此,暂不考虑单枚浮标的漏报问题。

1) 潜艇初始位置散布对搜潜概率的影响。

仿真设定:假设反潜直升机初始位置为(200 km, 200 km),潜艇初始概略位置为(400 km, 400 km),布放声纳浮标 12 枚。对潜艇初始位置散布范围 0.5 ~ 8 km (0.27 ~ 4.32 nmile) 仿真 10000 次,仿真结果如图 5 所示。

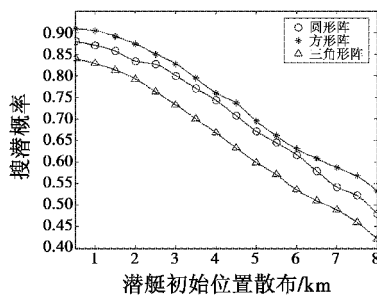


图 5 潜艇初始位置散布对搜潜概率的影响

Fig.5 Effect of initial position distribution on search probability

由图 5 可知,圆形阵、方形阵和三角形阵的搜潜概率均随潜艇初始位置散布的增大而降低;相同潜艇初始位置散布条件下,方形阵的搜潜概率要高于圆形阵和三角形阵的搜潜概率。

2) 潜艇经济航速对搜潜概率的影响。

仿真设定与仿真 1) 相同,对潜艇经济航速范围 4 ~ 40 km/h (2.16 ~ 21.60 kn, 1 kn ≈ 0.51 m/s, 基本涵盖常规潜艇与核潜艇的经济航速范围) 仿真 10000 次,仿真结果如图 6 所示。

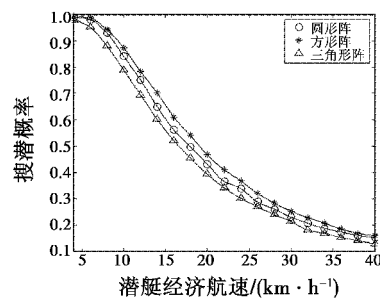


图 6 潜艇经济航速对搜潜概率的影响

Fig.6 Effect of economical speed on search probability

由图 6 可知,圆形阵、方形阵和三角形阵的搜潜概率均随潜艇经济航速的增大而降低;在浮标数量以及潜艇经济航速相同的条件下,方形阵的搜潜概率要略

高于圆形阵和三角形阵的搜潜概率。

浮标数量以及间隔系数相同时,直升机布放 3 种浮标阵的航程基本相同,但是直升机在布放点之间过渡时,不同阵型的转弯次数是不同的,而频繁转弯容易导致直升机飞行员的疲劳以及浮标阵布放时间的延长,因此转弯次数是衡量布放工作强度的重要指标。由于圆形阵转弯次数最多,其次为方形阵,而三角形阵最少,因此,相对而言,三角形阵最易于布放,其次为方形阵,圆形阵布放难度最大。

5 结论

由本文所建模型以及仿真结果可得如下结论:

1) 声纳浮标包围阵的搜潜概率均随着潜艇初始位置散布以及潜艇经济航速的增大而降低;

2) 在文中设定的仿真条件下,方形阵的搜潜概率在潜艇初始位置散布和潜艇经济航速两个参数的分别影响下均高于圆形阵和三角形阵的搜潜概率;

3) 在一定程度上,三角形阵较方形阵、圆形阵更易于布放。

因此,实际作战中布放声纳浮标包围阵时,应综合考虑战场实际情况以及作战需求,选择合适的浮标阵型。

参考文献

- [1] EDMUND C K. A helicopter submarine search game[R]. Naval Postgraduate School, 1988, 12.
- [2] KETTER T N. Antisubmarine warfare in the 21st century ADA27660[R]. 2004.
- [3] 顾晓东,袁志勇,周勋. 声纳浮标最优布站数探讨[J]. 指挥控制与仿真, 2007, 26(3): 83-84.
- [4] MAREH D. Decision-making process of an antisubmarine warfare commander, ADA176049[R]. 2003.
- [5] 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): 82-84.
- [6] 包小林,谢灵珠,翟丽雪. 航空浮标在反潜作战中的使用[J]. 中国高新技术企业, 2009(12): 46-47.
- [7] 杨根源,吴福初,周国庆,等. 反潜直升机应召搜索使用浮标的作战运用[J]. 海军航空工程学院学报, 2004, 19(3): 370-372.
- [8] DAWSON H C. Antisubmarine warfare: Still an essential warfare art ADA263556[R]. 1993: 56-74.
- [9] 叶敬礼,罗德刚,宋裕农. 舰载飞机使用浮标搜潜阵式分析[J]. 火力与指挥控制, 2002, 27(2): 53-55.
- [10] SCOTT R. Royal navy anti-submarine[J]. International Navy, 1993(1/2): 41-45.

(下转第 83 页)

到验证,在实际工程中得到了成功的应用。

参考文献

- [1] 王仁勇, 俞建新. 基于 VxWorks 的 TrueFFS 分析与实现 [J]. 计算机工程, 2007, 12: 68-70.
- [2] BEZ R, CAMERLENGHI E, MODELLI A, et al. Introduction to flash memory [C]//Proceedings of the IEEE, 2003, 91: 489-502.
- [3] CORP T. NAND vs NOR flash memory technology overview [EB/OL]. (2006-4-25) [2013-01-05]. [http://www.toshiba.com/taec/components/Generic/Memory.Resources/NAND vs NOR.pdf](http://www.toshiba.com/taec/components/Generic/Memory.Resources/NAND%20vs%20NOR.pdf).
- [4] Samsung Company. Electronics S [EB/OL]. <http://www.samsung.com/global/business/semiconductor/products/Flash/Products.NANDFlash.html>.
- [5] 朱汉德, 梁杰申. 通过 TFFS 加载和升级 VxWorks 映像 [J]. 微计算机信息, 2008(14): 36-38.
- [6] Technical Note. TureFFS wear-leveling mechanism [EB/OL]. (2002-05) [http://m-sys.com/Dmitry Shmidt](http://m-sys.com/Dmitry%20Shmidt).
- [7] 薛原. 基于 VxWorks 的文件系统的研究与实现 [J]. 电子设计工程, 2009(8): 107-109.
- [8] WOODHOUSE D. JFFS: The journalling flash file system [EB/OL]. [2001-10-10]. <http://sources.rhdat.com/Jffs2/jffs1.pdf>.
- [9] White Company. White electronic designs W78M32V-XBX. [EB/OL]. [2013-01-05]. <http://www.whitecdc.com>.
- [10] White Company. White electronic designs W78M32VP-XBX [EB/OL]. [2013-01-05]. <http://www.whitecdc.com>.
- [11] STMicroelectronics. UM0116 STR7 family flash programming user manual Rev4 [EB/OL]. (2006-09-20). <http://www.st.com/stonline/books/pdf/docs/11130.pdf>.
- (上接第 13 页)
- [11] 王景奇, 范奎武, 张最良. 机动目标对搜索的最优规避 [J]. 军事系统工程, 2001, 11(1): 4-9.
- [12] 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.
- [13] 屈也频, 廖英. 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.
- [14] PATRICIA A T. Some priorities for a target probability area ADA085057 [R]. 2001.
- [15] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 56-62.
- [16] 陆光宇, 董志荣, 惠小霞. 被动浮标目标运动分析及其仿真计算 [J]. 指挥控制与仿真, 2006, 28(6): 31-34.
- [17] 徐钟济. 蒙特卡罗法 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985: 24-55.

下 期 要 目

多子阵平板天线峰值旁瓣优化

空空导弹武器系统作战效能评估系统设计

车载平视显示技术

空空导弹用于舰载反导拦截的导引策略

多无人机时序到达协同控制方法

面向不确定性环境的多无人机协同防碰撞

节点崩溃条件下信息系统安全风险传播

对地观测相机像移速度矢量建模

直升机侧翼护航倾斜三角形搜潜方法及其仿真

基于 Snake 模型的波门自适应跟踪算法