

doi: 10.7690/bgzd.2018.02.022

反潜巡逻机应召布放多基地声纳阵搜潜效能研究

鞠建波, 祝超, 单志超, 徐永力, 杨卫国

(海军航空大学电子信息工程系, 山东烟台 264001)

摘要: 为提高反潜巡逻机传统应召搜潜效能, 提出采用反潜巡逻机应召布放多基地声纳阵的方法。在传统方法的基础上, 根据已知的潜艇信息, 利用多基地声纳的优势建立反潜巡逻机应召布放圆形、方形、三角形多基地声纳浮标阵搜潜模型, 依据声波衰减原理, 通过 Matlab 仿真初始距离, 潜艇初始概略分布、潜艇经济航速、布放半径和被动浮标布放个数对各方搜索潜效能的影响。仿真结果表明: 3 种多基地阵方案的搜潜效能随着初始距离、初始概略位置分布、潜艇经济航速的增大而减小。在相同条件下, 圆形多基地阵的搜潜效能最佳, 且相比同样基于传统方法的圆形被动浮标阵搜潜效能提高明显, 并能根据实际情况选择合适的布放半径和被动浮标布放个数。该方法适用于反潜巡逻机应召搜潜, 对反潜作战具有一定的军事意义。

关键词: 反潜巡逻机; 多基地声纳; 浮标阵型; 搜潜效能

中图分类号: TJ86 **文献标志码:** A

Efficiency Research for On-call Anti-submarine by Anti-submarine Patrol Aircraft Dropping Multistatic Sonar Array

Ju Jianbo, Zhu Chao, Shan Zhichao, Xu Yongli, Yang Weiguo

(Department of Electronic Engineering, Navy Aeronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to increase the traditional on-call submarine search efficiency by anti-submarine patrol aircraft, a method of using anti-submarine patrol aircraft dropping multistatic sonar array is presented. On the basis of the traditional method, according to the known information of submarine, taking advantage of the multistatic sonar, circle, square and triangle anti-submarine patrol aircraft on-call searching models are dropped, using acoustic attenuation principle, through Matlab, the influence of the initial distance, initial position of the submarine, submarine economic speed, dropping radius and dropping quantity on searching submarine efficiency is analyzed. The simulation results shows that, under the same condition, searching submarine efficiency of three methods decreasing with the increase of the initial distance, initial position of the submarine, submarine speed, searching submarine efficiency of circle multistatic sonar array is the best and comparing with the circle passive buoy array search efficiency increase obviously, and according to the actual situation to choose the appropriate dropping radius and dropping number. This method is suitable for anti-submarine patrol aircraft on-call searching submarine and has some significance on anti-submarine warfare.

Keywords: anti-submarine patrol aircraft; multistatic sonar; sonobuoy array; searching submarine efficiency

0 引言

随着潜艇降噪、规避反潜机探潜等方面技术的发展, 使得现代反潜作战更加困难。而反潜巡逻机的快速机动性, 巡航时间长, 不易被攻击的优点使其越来越被各国海军所重视。声纳浮标是反潜巡逻机的主要装备, 具有携带、布放方便, 快速形成大面积搜索阵等优点^[1]。传统应召搜潜方法主要分为应召布放圆形阵、方形阵和三角阵 3 种, 且前人已验证, 在只使用被动浮标的情况下, 圆形阵相比其他 2 种阵效能最优^[2], 但其搜潜效能已无法满足当今搜潜需求。笔者在传统方法的基础上, 考虑声波衰减和反潜巡逻机最小转弯半径等因素, 利用多基地声纳的优势, 建立圆形、方形、三角形多基地声

纳浮标阵模型, 并分别对多基地声纳浮标阵和圆形被动浮标阵搜潜概率进行仿真。

1 双基地声纳作用距离原理

双基地声纳系统的研究已较为成熟。系统由一个声源浮标与被动浮标组成, 相比单基地声纳系统具有作用距离远, 搜索范围大的优点。工作原理如图 1。

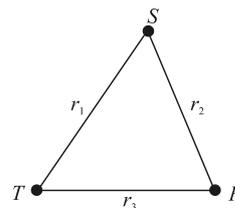


图 1 双基地声纳工作原理

收稿日期: 2017-10-21; 修回日期: 2017-11-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60874112); 军队科研专项资助项目(41512322)

作者简介: 鞠建波(1961—), 男, 山东人, 硕士, 教授, 从事水下目标探测与识别研究。

双基地声纳系统在噪声背景下的声纳方程^[3]为

$$TL_1 + TL_2 = SL - NL + DI - DT + TS。 \quad (1)$$

声传播损失按球面扩展加海水吸收考虑：

$$TL = 20 \lg r + \alpha r + 60。 \quad (2)$$

由于双基地声纳下潜艇的目标强度 TS 与其姿态角以及分置角有关，为简化分析，构设潜艇目标强度的取值概率密度如下：

$$f(x) = \begin{cases} -4 \times 10^{-3}(x-15)^2 + 0.1 & (10 \leq x \leq 15) \\ -10^{-3}(x-15)^2 + 0.1 & (15 \leq x \leq 25) \end{cases}。 \quad (3)$$

2 反潜巡逻机布放多基地声纳浮标阵模型

假设反潜巡逻机处于待飞状态，第一次获得潜艇信息直到其接到起飞命令时间为 $t_{\text{发接}}$ ，起飞所消耗时间为 $t_{\text{起飞}}$ ，飞至搜索区所需时间为 $t_{\text{飞行}}$ ，在搜索区布放完浮标所需时间为 $t_{\text{布放}}$ ^[4]。反潜巡逻机从 P_1 点出发，坐标为 $(x_{\text{pla}0}, y_{\text{pla}0})$ ，潜艇目标 S 的初始概略位置在 P_2 点，坐标为 $(x_{\text{sub}0}, y_{\text{sub}0})$ ，巡逻机的速度为 v_{pla} ，最大转弯坡度角为 ω ，巡逻机的初始航向角为 θ ，应召任务海域重力加速度为 g ，从 $P_i \rightarrow P_{i+1}$ 的飞行距离为 L_i ，对应所需时间为 t_i ，即 $\sum t_i = t_{\text{飞行}} + t_{\text{布放}}$ ，则从获得潜艇信息至反潜巡逻机布放浮标结束总需时间为

$$t_{\text{总}} = t_{\text{发接}} + t_{\text{起飞}} + \sum t_i。 \quad (4)$$

反潜巡逻机的最小转弯半径^[5]可由上述已知条件求得

$$R = \frac{(v_{\text{pla}})^2}{g \tan \omega}。 \quad (5)$$

2.1 反潜巡逻机布放圆形多基地阵

如图 2 所示，当反潜巡逻机接到命令后，从 P_1 点出发，飞至 P_2 点投放声源浮标 T ，再沿以 a 为半径的半圆弧飞至 P_3 点，然后从 P_3 点沿以 P_2 为圆心， $2a$ 为半径的圆周线均匀布放被动浮标 R_i 。

当巡逻机由 P_1 飞至 P_2 时，由已知条件可求得：

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= \sqrt{(x_{\text{sub}0} - x_{\text{pla}0})^2 + (y_{\text{sub}0} - y_{\text{pla}0})^2} \\ t_1 &= \frac{L_1}{v_{\text{pla}}} \end{aligned} \right\}。 \quad (6)$$

巡逻机由 P_2 飞至 P_3 时，可求得：

$$\left. \begin{aligned} L_2 &= a\pi \\ t_2 &= \frac{L_2}{v_{\text{pla}}} \end{aligned} \right\}。 \quad (7)$$

巡逻机沿圆周均匀投放被动浮标 R_i ，可求得：

$$\left. \begin{aligned} L_3 &= 4a\pi \\ t_3 &= \frac{L_3}{v_{\text{pla}}} \end{aligned} \right\}。 \quad (8)$$

获得潜艇信息至反潜巡逻机布放浮标结束总需时间为

$$t_{\text{总}} = t_{\text{发接}} + t_{\text{起飞}} + \frac{L_1}{v_{\text{pla}}} + \frac{L_2}{v_{\text{pla}}} + \frac{L_3}{v_{\text{pla}}}。 \quad (9)$$

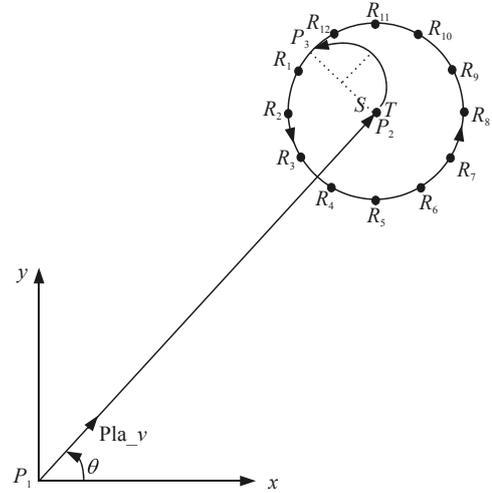


图 2 巡逻机布放圆形多基地阵模型

2.2 反潜巡逻机布放方形多基地阵

如图 3 所示，当反潜巡逻机接收到命令后，从 P_1 出发，飞至 P_2 处投放声源浮标 T ，再沿以 b 为半径的半圆弧飞至 P_3 点，然后沿以 P_2 为对角线交点， $|P_4P_{11}|=|P_5P_6|=|P_7P_8|=|P_9P_{10}|=c$ ，直角处为半径为 r 的 $1/4$ 圆弧的正方形边线等间距布放被动浮标 R_i 。

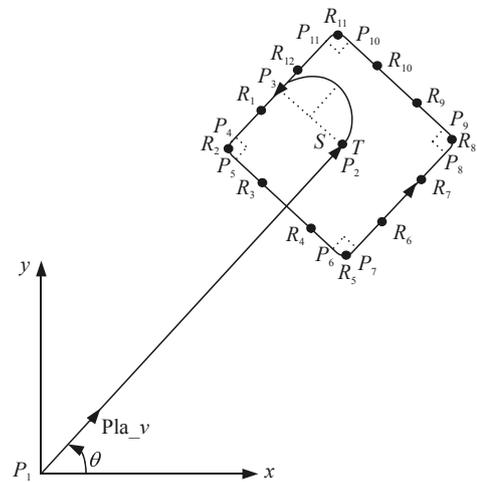


图 3 巡逻机布放方形多基地阵模型

当巡逻机由 P_1 飞至 P_2 时，距离和飞行时间与圆形多基地声纳相同。

巡逻机由 P_2 飞至 P_3 时，可求得：

$$\left. \begin{aligned} L_2 &= b\pi \\ t_2 &= \frac{L_2}{v_{\text{pla}}} \end{aligned} \right\}。 \quad (10)$$

巡逻机沿正方形边线均匀布放被动浮标 R_i 时，可求得：

$$\left. \begin{aligned} L_3 &= L_{11} = c \\ L_4 &= L_6 = L_8 = L_{10} = \frac{1}{2}\pi r \\ L_5 &= L_7 = L_9 = 2c \\ \sum_{i=3}^{11} t_i &= \frac{8c + 2\pi r}{v_{pla}} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

获得潜艇信息至反潜巡逻机布放浮标结束总需时间为

$$t_{总} = t_{发接} + t_{起飞} + \frac{L_1}{v_{pla}} + \frac{L_2}{v_{pla}} + \frac{8c + 2\pi r}{v_{pla}} \quad (12)$$

2.3 反潜巡逻机布放三角形多基地阵

如图 4 所示, 当巡逻机接收到命令时, 从 P_1 出发, 飞至 P_2 处投放声源浮标 T , 再沿以 d 为半径, 弧度为 β 的弧线飞至 P_3 点, 然后从 P_3 点沿以 P_2 为等边三角形的中心, $|P_4P_9|=|P_5P_6|=|P_7P_8|=e$, 直角处为半径 r 的 $1/6$ 圆弧的等边三角形边线等间距布放被动浮标 R_i 。

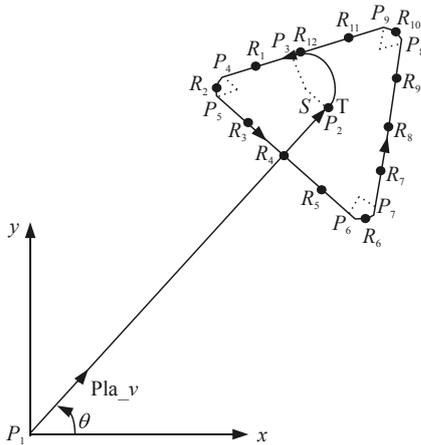


图 4 巡逻机布放三角形多基地阵模型

当巡逻机由 P_1 飞至 P_2 时, 距离和飞行时间与圆形多基地声纳相同^[6]。

巡逻机由 P_2 飞至 P_3 时, 可求得:

$$\left. \begin{aligned} L_2 &= \beta d \\ t_2 &= \frac{L_2}{v_{pla}} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

当巡逻机沿等边三角形边线均匀布放被动浮标 R_i 时, 可求得:

$$\left. \begin{aligned} L_3 + L_9 &= e \\ L_4 &= L_6 = L_8 = \frac{1}{3}\pi r \\ L_5 &= L_7 = e \\ \sum_{i=3}^9 t_i &= \frac{3e + \pi r}{v_{pla}} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

获得潜艇信息至反潜巡逻机布放浮标结束总需时间为

$$t_{总} = t_{发接} + t_{起飞} + \frac{L_1}{v_{pla}} + \frac{L_2}{v_{pla}} + \frac{3e + \pi r}{v_{pla}} \quad (15)$$

3 搜潜效能仿真分析

3.1 多基地声纳阵搜潜概率模型

假设反潜巡逻机接到命令之后, 立即起飞前往潜艇目标所在海域应召搜潜, 以巡逻机出发时间作为时间起点, 巡逻机和潜艇各自独立行动, 潜艇所处深度与多基地声纳浮标阵的工作深度一致, 潜艇初始位置分布满足正态分布, 航速满足以经济航速为均值的瑞利分布, 航向在 $[0, 2\pi]$ 上均匀分布^[7]。

反潜巡逻机布放完多基地声纳浮标阵后, 在声纳阵的有效工作时间内连续采集 K 次潜艇位置坐标为 (x_{subk}, y_{subk}) , 每次对应的目标强度为 TS_k , 且满足式 (3), $k \in [1, K]$, 布放的被动浮标坐标为 (x_{buon}, y_{buon}) , $n \in [1, N]$, 声源浮标 T 的坐标与潜艇初始概略位置坐标 (x_{sub0}, y_{sub0}) 一致, 若满足下式, 即

$$\left. \begin{aligned} |R_n S_k| &= \sqrt{(x_{subk} - x_{buon})^2 + (y_{subk} - y_{buon})^2} \\ |TS_k| &= \sqrt{(x_{sub0} - x_{subk})^2 + (y_{sub0} - y_{subk})^2} \\ Q &= SL - NL + DI - DT + TS_k - 120 \\ 20\lg|R_n S_k| + 20\lg|TS_k| + \alpha(|R_n S_k| + |TS_k|) &\leq Q \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

则认为多基地声纳浮标阵搜索到潜艇, 利用 Monte Carlo 方法仿真 K 次搜索, 如果其中潜艇被搜索到 M 次, 那么该多基地声纳浮标阵的搜潜概率 $P^{[8]}$ 为:

$$P = \frac{M}{K} \times 100\% \quad (17)$$

3.2 搜潜仿真分析

为直观准确体现方案差距, 在将方案进行搜潜效能比较时, 使 3 种多基地声纳浮标阵所覆盖的海洋面积相等, 圆形被动浮标阵采用文献[2]中模型, 与图 2 中模型相比, 缺少声源浮标 T , 布放轨迹由 P_1 点出发, 沿直线飞至与圆周相切点, 并沿圆周均匀布放被动浮标, 其余参数一致。其中取 $t_{发接} + t_{起飞} = 0.25$ h, 反潜巡逻机出发位置为 $(0,0)$ km, 巡航速度为 600 km/h, 布放浮标及监听搜索航速为 350 km/h, 初始航向角为 45° , 最大转弯坡度角为 30° , 所在海域重力加速度为 9.8 m/s^2 , 海水吸收系数 $\alpha = 0.0946$, 声源浮标为主动全向, 工作频率为 1.5 kHz, 声源级为 $SL = 230 \text{ dB}$, 被动浮标为被动全向, 有效作用距离取 2 km, 检测阈为 $DT = 14 \text{ dB}$, 噪声 $NL = 70 \text{ dB}$ 。下面将在同等条件下, 分别对多基地声纳浮标阵和

圆形被动浮标阵进行搜潜概率仿真。

仿真 1：初始距离对搜潜效能的影响。

仿真参数：潜艇初始概略位置为 (m, m) km，初始位置分布为 2 km，经济航速为 10 kn，取 $a=6$ km， $b=5.337 5$ km， $c=8.675$ km， $d=7.213$ km， $e=28.46$ km， $r=2$ km， $\beta=135^\circ$ ，圆形被动浮标阵所需的被动浮标个数为 18 个。当 m 为 100~800 km 时，仿真次数 20 000 次，结果如图 5、图 6 所示。

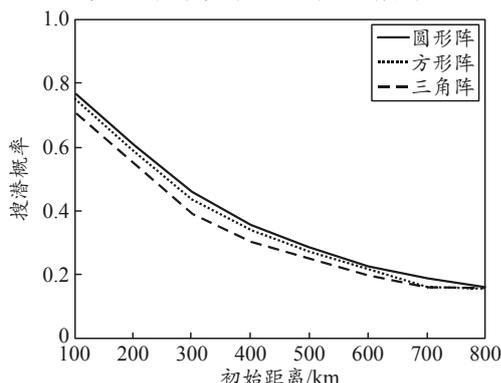


图 5 初始距离对多基地阵搜潜概率的影响

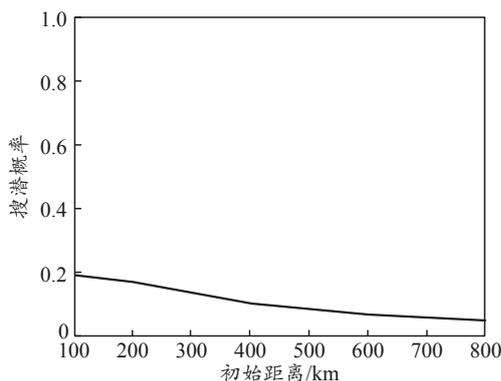


图 6 初始距离对圆形被动浮标阵搜潜概率的影响

由图 5、图 6 可知：3 种多基地声纳浮标阵的搜潜效率随着初始距离的增大而降低，在相同条件下，多基地声纳浮标阵的搜潜效率远高于圆形被动浮标阵，其中，圆形多基地阵的搜潜效能又优于方形多基地阵和三角多基地阵。

仿真 2：潜艇初始位置分布对搜潜效能的影响。

仿真参数：潜艇初始概略位置为 $(100, 100)$ km，其余仿真参数与仿真 1 相同。潜艇初始位置分布为 0.5~7.0 km 时，仿真次数 20 000 次，结果如图 7、图 8 所示。

由图 7、图 8 可知：3 种多基地声纳浮标阵的搜潜效能随着初始位置分布的增大而降低，在相同条件下，多基地声纳浮标阵的搜潜效率远高于圆形被动浮标阵，其中圆形多基地阵的搜潜效能又优于方形多基地阵和三角形多基地阵。

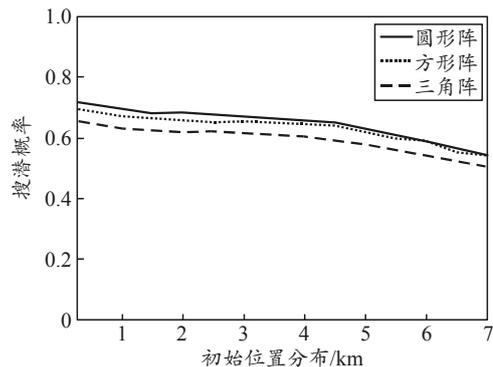


图 7 初始位置分布对多基地阵搜潜概率的影响

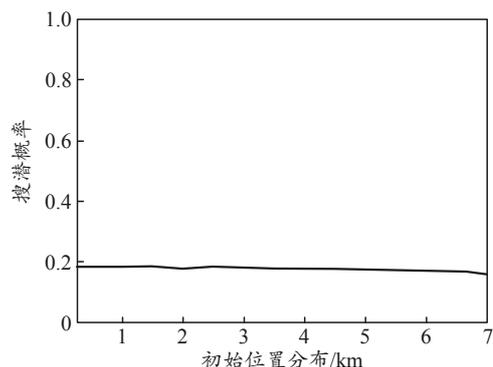


图 8 初始位置分布对圆形被动浮标阵搜潜概率的影响

仿真 3：潜艇经济航速对搜潜效能的影响。

仿真参数：潜艇初始概略位置为 $(300, 300)$ km，其他仿真参数与仿真 1 相同，潜艇经济航速为 4~16 kn，仿真次数 20 000 次，结果如图 9、图 10。

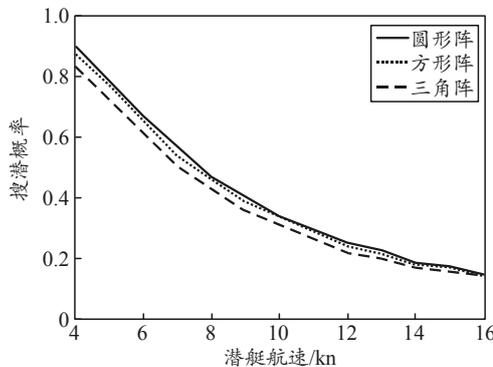


图 9 潜艇航速对多基地阵搜潜概率的影响

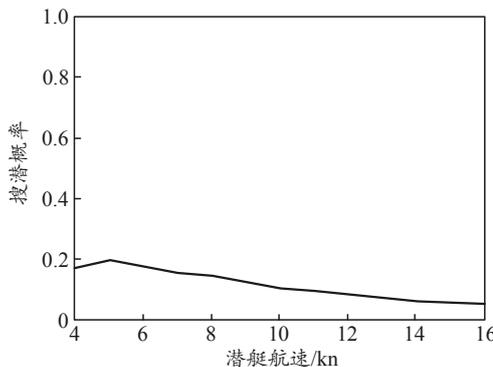


图 10 潜艇航速对圆形被动浮标阵搜潜概率的影响

由图 9、图 10 可知：3 种多基地声纳浮标阵的搜潜效率随着潜艇航速的增大而降低，在相同条件下，多基地声纳浮标阵的搜潜效率远高于圆形被动浮标阵，其中圆形多基地阵的搜潜效能又优于方形多基地阵和三角形多基地阵。

仿真 4：圆形多基地阵布放半径，被动浮标布放个数对搜潜效能的影响。

由前 3 个仿真结果可知：在相同条件下，圆形多基地阵的搜潜效能是最优的，故分别进行圆形多基地阵的布放半径和被动浮标布放个数对搜潜效能影响的研究。

仿真参数：潜艇初始概略位置为(300, 300) km，初始位置分布为 2 km，经济航速为 10 kn。1) 圆形多基地阵布放被动浮标的个数为 12 个，布放半径(即 2a)为 6~20 km 时，仿真次数 20 000 次，结果如图 11 所示。2) 圆形多基地阵布放半径为 16 km，被动浮标布放个数为 4~22 个时，仿真次数 20 000 次，结果如图 12 所示。

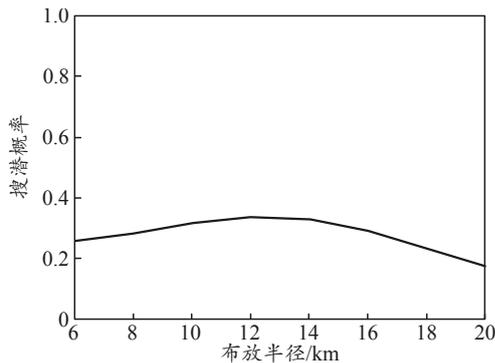


图 11 布放半径对圆形多基地阵搜潜概率的影响

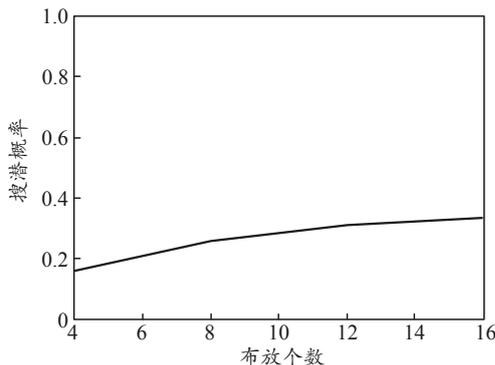


图 12 布放个数对圆形多基地阵搜潜概率的影响

由图 11、图 12 可知：圆形多基地阵在一定的被动浮标布放个数条件下，其搜潜概率随着布放半径先增大再减小；在一定的布放半径条件下，其搜潜概率先随着布放个数的增多而增大，并渐渐趋于平缓。故针对不同情况，选择合适的布放半径和布放个数能够提高搜潜概率和经济性。

4 结束语

笔者为提高反潜巡逻机应召搜潜效能，采用应召布放多基地声纳浮标阵的方法，建立了 3 种反潜巡逻机应召布放多基地声纳浮标阵搜潜模型，仿真了初始距离、潜艇初始概略分布、潜艇经济航速、布放半径和被动浮标布放个数对各方方案搜潜效能的影响。仿真结果表明：同等条件下，反潜巡逻机应召布放圆形多基地阵的搜潜效能最好，且相比圆形被动浮标阵提高明显，其在实际应用中，能根据实际情况选择合适的布放半径和被动浮标的布放个数。该研究对提高反潜巡逻机反潜作战能力具有一定的意义。

参考文献：

- [1] 蒋志忠, 杨日杰, 李大龙, 等. 反潜巡逻机布放包围浮标阵应召搜潜建模与仿真[J]. 海军航空工程学院学报, 2011, 26(4): 422-425.
- [2] 杨兵兵, 鞠建波, 张鑫磊. 反潜巡逻机浮标布阵应召搜潜效能研究[J]. 系统仿真技术, 2015, 11(3): 202-206.
- [3] 阎宜生, 丁玮, 徐贵英, 等. 双基地声纳作用距离估计[J]. 西北工业大学学报, 1996, 14(4): 545-548.
- [4] 杨根源, 吴福初, 周国庆, 等. 反潜直升机应召搜索使用声纳浮标的作战运用[J]. 海军航空工程学院学报, 2004, 19(3): 370-372.
- [5] 方振平. 飞机飞行动力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005: 122-123.
- [6] 吴福初, 徐寅, 蓝天. 单舰巡逻反潜战术行动方法及对潜警戒能力分析[J]. 兵工自动化, 2016, 35(12): 45-48.
- [7] 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.
- [8] 杨日杰, 王正红, 周旭, 等. 浮标阵型对搜潜效能影响的研究[J]. 计算机仿真, 2009, 26(12): 16-19.