

被动定向浮标探潜模型研究

战 和^{1,2}, 杨日杰¹, 金中原¹

(1. 海军航空工程学院, 山东烟台 264001; 2. 92074 部队, 浙江宁波 315020)

摘要: 反潜战中, 被动定向声呐浮标是一种主要的探潜手段, 两枚被动定向浮标同时发现目标即可对其进行定位。研究了初始浮标阵中仅有一枚浮标能够发现目标但不能实现定位的情况下, 如何通过补投被动定向浮标对目标进行定位的模型问题。根据水下目标和反潜机的运动特点, 将实际中所有可能出现的情况进行了分类讨论, 建立了被动定向浮标的补投模型。通过仿真分析了模型的探测效能, 验证了模型的正确性和可用性, 为被动定向浮标的战术使用提供了一定的理论基础。

关键词: 航空反潜; 被动定向浮标; 发现概率

中图分类号: E273.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2016)-02-0125-04

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2016.02.008

Research on detection model of passive directional buoys

ZHAN He^{1,2}, YANG Ri-jie¹, JIN Zhong-yuan¹

(1. Naval Aeronautics and Astronautics University, Yantai 264001, Shandong, China; 2. Unit 92074, Ningbo 315020, Zhejiang, China)

Abstract: In Anti-Submarine Warfare, passive directional sonar buoy is a main method to detect submarine. When two directional buoys have detected the same underwater target at the same time, its position could be fixed. A model about how to lay the supplementary passive directional buoys is researched to fix the position of underwater target in the condition that one and only one directional buoy in the original array has affirmed the existence of underwater target, but could not fix its position. According to the motion features of both underwater target and antisubmarine aircraft, supplementary dropping model of passive directional buoy is established in consideration that all possible situations may occur in practice. By simulation, the detection efficiency of the model is analyzed and the applicability is proved. All of these provide a theoretical foundation for tactical uses of passive directional buoys.

Key words: aviation antisubmarine; passive directional buoy; detection probability

0 引言

反潜战中, 航空搜、探潜发挥着重要的作用, 反潜机扮演着水面舰艇编队探路者和保卫者的重要角色^[1-2]。对于反潜机(尤其是固定翼反潜机)而言, 声呐浮标是对水下目标进行探测的一种主要手段。浮标按声呐工作方式分为主动浮标和被动浮标, 按数据处理能力分为全向浮标和定向浮标, 两者均为全向监听, 其中被动定向浮标能够对发现的目标进行定向, 因此, 两枚同时发现目标即可进行定位^[3-4]。本文的研究内容即是在原始浮标阵中仅有一枚被动定向浮标发现目标的基础上, 反潜直升机如何进行后续补投及补投后浮标的探测效率问题。

1 问题描述

假设布设的原始浮标阵为圆形阵^[5], 圆阵半径为 R , 其中发现目标的浮标编号定义为 O_1 , 坐标为 (x_1, y_1) , 发现目标方位(与正东方向的夹角)为 θ_1 , 反潜机坐标为 (x_{hel}, y_{hel}) , 反潜机航速为 V_{hel} 。由于被动浮标的隐蔽性能非常好, 潜艇不会发现威胁而采取规避措施, 故可以假设其航速不变, 记为 V_{sub} 。浮标探测半径 r 由被动声呐方程 $TL=SL1-NL+DT+DI$ 确定, 其中被动声源级 $SL1$ 与潜艇航速有关, 且满足

$$SL1=60\lg V_{sub}+9\lg T-20\lg F-66$$

式中: T 为吨位, 单位 t; F 为频率, 单位 kHz^[6]。态势如图 1 所示。为统一编号和明确物理意义, 将后续补投的浮标记为 O_2, O_3, \dots , 对应的坐标记为 $(x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots$; 反潜机在布放 O_2 过程中 O_1 能发现潜艇的最后方位角记为 θ_{last} ; 反潜机到达 O_2 投放点时目标活动范围的半径记为 R_{sub} 。

收稿日期: 2015-10-10; 修回日期: 2016-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61271444)

作者简介: 战和(1984-), 男, 山东龙口人, 博士研究生, 研究方向为水声工程与航空反潜。

通讯作者: 战和, E-mail: zhanhe@foxmail.com

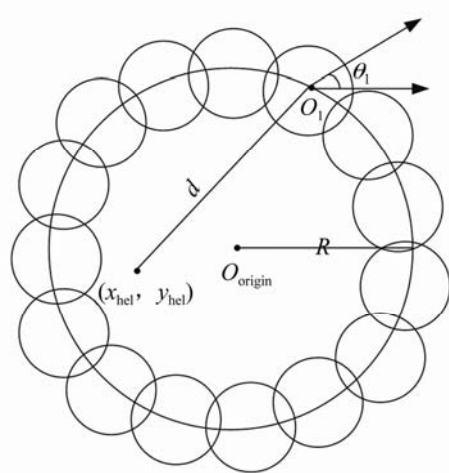


图1 初始情况态势图
Fig.1 Initial situation map

2 被动定向浮标补投模型

反潜直升机在初始位置监听到 O_1 发现目标的情况后，应立即前往补投位置补投 O_2 等后续浮标，以达到两枚同时发现目标从而实现对潜艇进行定位的目的。当反潜直升机到达补投位置时，潜艇与发现它的浮标 O_1 之间的关系有两种，一种是潜艇仍在浮标的探测范围内，另一种则是已逃出其探测范围。因此，对于补投浮标的位置，需要分两种情况进行讨论。

2.1 潜艇尚未逃出浮标 1 的探测范围

在这种情况下，反潜直升机从初始位置到浮标 O_2 投放处的整个运动过程中，浮标 O_1 始终都能够测定潜艇方位，那么，潜艇肯定位于以 O_1 为起点、方位 θ_1 、距离 r 的线段上，因此，若将补投的浮标 O_2 选择在线段的终点处，则必定可以探测到潜艇。此时 $\theta_{last} = \theta_1$ ， $x_2 = x_1 + r \cos \theta_{last}$ ， $y_2 = y_1 + r \sin \theta_{last}$ 。如图 2 所示，可由 O_1 和 O_2 实现对潜艇的定位，图中虚线表示初始圆形浮标阵。

2.2 潜艇已逃出浮标 1 的探测范围

在反潜直升机从初始位置前往 O_2 位置的这段时间内，潜艇的运动区域半径 R_{sub} 可表示为

$$R_{sub} = \frac{d}{V_{hel}} \times V_{sub}$$

式中： d 为直升机初始监听位置到 O_1 的距离，用于近似表示直升机到 O_2 的距离。

在这种情况下，潜艇最有可能存在的位置即在 O_1 最后能发现目标的方位角 θ_{last} 上，因此可考虑将 O_2 投放在如下位置：

$$x_2 = x_1 + r \cos \theta_{last}, \quad y_2 = y_1 + r \sin \theta_{last}$$

同理，浮标 O_2 投放后，也不一定能够发现潜艇，因此仍需分类进行讨论。

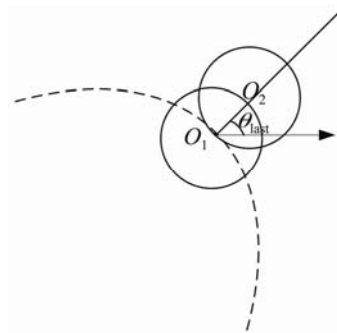


图2 浮标 2 位置示意图
Fig.2 Position of Buoy No.2

2.2.1 浮标 2 发现潜艇

在这种情况下，可根据浮标 O_2 发现目标的方位角 θ_2 投放第三枚浮标 O_3 ，其位置可表示为 $x_3 = x_2 + r \cos \theta_2$ ， $y_3 = y_2 + r \sin \theta_2$ ，如图 3 所示，此时可由 O_2 和 O_3 实现对目标的定位，原理同 2.1 节。

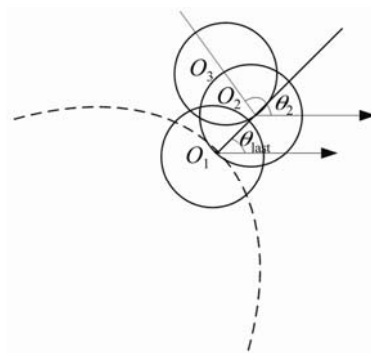


图3 浮标 3 位置示意图
Fig.3 Position of Buoy No.3

2.2.2 浮标 2 未发现潜艇

在这种情况下， O_2 未发现潜艇，且潜艇是由 O_1 的 θ_{last} 方向消失，那么其最有可能存在的区域是以 O_2 为圆心、 R_{sub} 为半径的半圆内(同时在 O_2 探测范围外)，半圆起始角度 $\theta_{last} - \pi/2$ ，终止角度为 $\theta_{last} + \pi/2$ ，如图 4 所示。此时潜艇相对于 O_1 或 O_2 最有可能位于 θ_{last} 方位附近，距离则不定，因此可考虑在 O_2 的 θ_{last} 方位、1.8 倍浮标作用距离处^[7]首先投放浮标 O_3 ，再在其两侧对称布放浮标 O_4 和浮标 O_5 ， O_4 和 O_5 的先后顺序可互换^[8-9]。后续补投浮标的坐标为：

$$x_3 = x_2 + 1.8r \cos \theta_{last}$$

$$y_3 = y_2 + 1.8r \sin \theta_{last}$$

$$x_4 = x_2 + 1.8r \cos(\theta_{last} + \pi/4)$$

$$y_4 = y_2 + 1.8r \sin(\theta_{last} + \pi/4)$$

$$x_5 = x_2 + 1.8r \cos(\theta_{last} - \pi/4)$$

$$y_5 = y_2 + 1.8r \sin(\theta_{last} - \pi/4)$$

投放完 3、4、5 号浮标后，应持续监听，若其中有两枚能够发现潜艇则可以对其进行定位，若其中只有一枚能够发现潜艇，则可按 2.1 节的方法补投一枚浮标，若仍无法发现，则认为潜艇已逃逸。

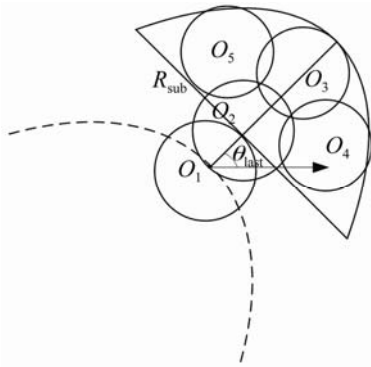


图 4 浮标 3、4、5 位置示意图
Fig.4 Positions of Buoy NO.3, NO.4 and NO.5

3 效能分析

假设初始浮标阵中发现目标的浮标编号为 O_1 ，其与反潜机监听位置之间的距离为 d ；目标初始位置在 O_1 内随机生成，航速保持为 V_{sub} ，每个仿真步长随机改变一次航向，且每 5 次改变航向的范围都在原航向的 $\pm 20^\circ$ 区间内；直升机保持监听状态，航速为 120 km/h。

仿真从 O_1 第一次发现目标时开始，直升机按上节介绍的模型补投被动定向浮标，当有包含 O_1 在内的任意两枚浮标能够同时发现目标时认为补投成功，若 30 min 内未发现目标则认为补投失败。以 Monte Carlo 方法仿真 3000 次，分析该补投方案的发现概率与初始距离、目标航速的关系。

3.1 发现概率随初始距离的变化关系

假设潜艇航速为 10 kn，当初始距离在 25~50 km 变化时，被动定向浮标补投模型的发现概率变化情况如图 5 所示。

由图 5 可见，发现概率随初始距离的增大而减小。当初始距离小于 30 km 时，此时直升机的监听位置距浮标较近，前往补投位置的时间较短，潜艇在该时间段内的活动半径较小，补投的浮标能够完全覆盖潜艇的活动区域，发现概率为 100%。当初始距离达到监听距离极限的 50 km 时，直升机前往补投位置的时间较长，潜艇活动半径较大，可能存在的位置较分散，发现概率下降至 57%。

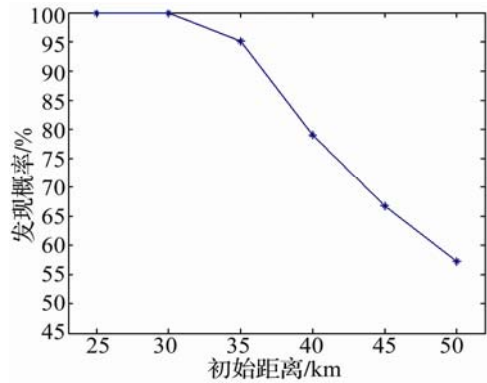


图 5 发现概率随初始距离的变化关系
Fig.5 Detection probability vs. initial distance

3.2 发现概率随潜艇航速的变化关系

假设初始距离为 35 km，当潜艇航速在 6~16 kn 变化时，被动定向浮标补投模型的发现概率变化情况如图 6 所示。

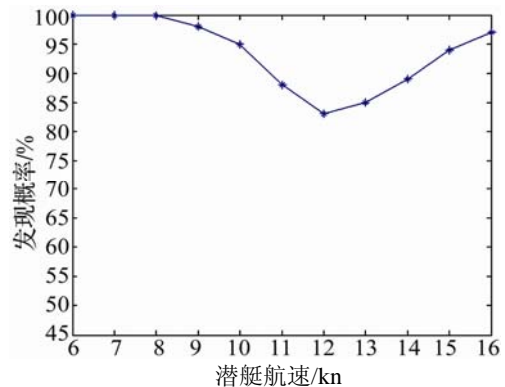


图 6 发现概率随潜艇航速的变化关系
Fig.6 Detection probability vs. submarine velocity

由图 6 可见，图像大致呈现为“V”字型，当潜艇航速低于 12 kn 时，发现概率随航速增大而减小，这是因为在直升机执行补投阶段低航速潜艇的活动半径较小，被浮标发现的概率则相对较大。特别是当潜艇航速小于 8 kn 时，潜艇所有可能活动的区域均被按补投模型投放的浮标所覆盖，发现概率为 100%。当潜艇航速大于 12 kn 以后，辐射噪声有所增加，使浮标探测距离有明显增大，发现概率也随之增大，到 16 kn 时已可达 97%。

3.3 发现潜艇的浮标对分析

在以上的仿真分析中，所有成功发现目标的情况都是由至少一对浮标完成的，下面在成功发现目标的案例中分析各浮标对的表现情况，结果如图 7 所示。

由图 7 可见，在所有发现目标的情况中，由 $O_1 O_2$ 和 $O_2 O_3$ 两对浮标完成发现的情况占全部发

现情况的 65%，其中由 $O_2 O_3$ 浮标对发现的情况更是独占 41%，说明前两枚补投的浮标 O_2 和 O_3 的位置选择是较为科学的，可以在绝大部分情况下实现对目标的定位。对应初始距离较远和潜艇航速较高的极端情况， $O_3 O_4$ 和 $O_3 O_5$ 两对浮标在 O_2 未能发现目标时发挥了替补的作用，分别占发现比重的 15% 和 17%。 $O_2 O_4$ 和 $O_2 O_5$ 两个浮标对从投放位置上讲是为了应付潜艇突破 O_2 后分别采取左转和右转掉头的情况，此时占发现比重的 2%。

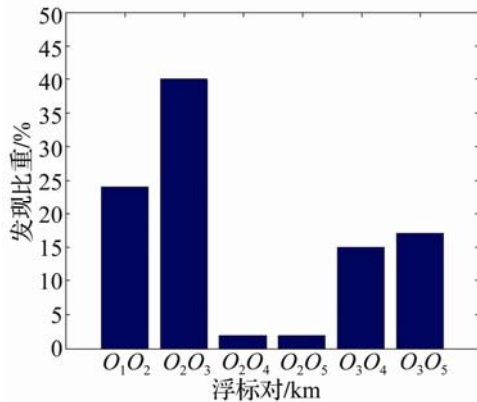


图 7 各浮标对发现比重

Fig.7 Successful detection proportions of 6 pairs of buoys

4 结 论

在航空反潜作战中，使用声呐浮标对潜艇进行探测和定位是一种主要手段。本文研究了初始浮标阵中已有一枚能够探测到潜艇的情况下后续浮标的补投问题，建立了补投模型，该模型确定了各枚补投浮标的补投位置和补投顺序，并使用蒙特卡洛方法仿真分析了在多种初始距离和潜艇航速条件下模型的探潜效能，分析了由补投浮标两两组成的

浮标对在所有发现情况中的发现比重，验证了模型的可用性，为被动定向浮标的战术使用提供了一定的理论基础。

参 考 文 献

- [1] 罗锐. 反潜巡逻机技术的发展动向与分析[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(10): 14-17.
LUO Ri. Development Trend and Analysis of the Anti-submarine Patrol Aircraft Technique[J]. Ship Electronic Engineering, 2014, 34(10): 14-17.
- [2] 刘军伟, 陈超, 杜正军. 应召搜潜中直升机六边形搜索方法[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(11): 11-13.
CHEN Junwei, CHEN Chao, DU Zhengjun. Research on hexagonal searching method in answering the call to anti-submarine[J]. Fire Control & Command Control, 2011, 36(11): 11-13.
- [3] 刘海波, 马建毅. 反潜机技术的装备与发展[J]. 舰船电子工程, 2015, 35(2): 17-21.
LIU Haibo, MA Jianyi. Equipment technique and development of the antisubmarine aircraft technique[J]. Ship Electronic Engineering, 2015, 35(2): 17-21.
- [4] 刘波. 反潜直升机装备技术与发展[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(11): 16-18.
LIU Bo. Equipment technique and development of the anti-submarine helicopter[J]. Ship Electronic Engineering, 2014, 34(11): 16-18.
- [5] 谢振华, 李林, 程江涛. 圆形浮标阵搜潜效能评估研究[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(12): 168-170.
XIE Zhenhua, LI Lin, CHENG Jiangtao. Evaluation of circular sonobuoy array on the efficiency of searching submarine[J]. Ship Electronic Engineering, 2011, 31(12): 168-170.
- [6] 李启虎. 声呐信号处理引论[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [7] De Groot M H, Optimal Statistical Decisions[M]. New York: McGraw-Hill, 1997.
- [8] Grundel D A. Searching for a moving target: Optimal path planning[C]//Networking, Sensing and Control, 2005. Proceedings. 2005 IEEE. 2005: 867-872.
- [9] 孙国振, 董真杰, 连丽婷. 多浮标定位系统最优布站分析[J]. 声学技术, 2013, 32(6): 477-480.
SUN Guozhen, DONG Zhenjie, LIAN Liting. Optimal station arrangement of multi-buoy positioning system[J]. Technical Acoustics, 2013, 32(6): 477-480.