

反潜直升机吊放声纳被动搜潜仿真与优化

李祥珂, 赵志允, 杜毅
(海军潜艇学院, 山东 青岛 266071)

摘要: 现有的水声环境对吊声探测的影响研究难以形成有效的装备使用结论。根据被动声纳方程和潜艇噪声模型建立潜艇噪声信号余量的计算方法, 通过其与吊声检测概率的关系, 仿真计算吊放声纳被动探测域, 并研究该探测域分布规律及其对搜潜策略的影响; 在此基础上, 结合任务、环境、装备等参数, 采用仿真实验的方法研究了吊声搜潜策略问题, 最后得出吊放声纳探测点间距应使得相邻吊点探测空间的闭合、正梯度吊放深度应较浅和双吊深组合使用以提高探测效能等结论, 对反潜直升机吊放声纳优化使用具有针对性的指导意义。

关键词: 反潜直升机; 吊放声纳; 被动探测域; 优化使用

中图分类号: TP319.9; V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)11-0095-05

Passive Searching Simulation and Optimization of Dipping Sonar for Anti-submarine Helicopter

LI Xiang-ke, ZHAO Zhi-yun, DU Yi
(Naval Submarine Academy, Qingdao 266071, China)

Abstract: Traditional research on the influence of acoustics environment on dipping sonar detection can hardly come to an effective conclusion of equipment usage. According to the passive sonar equation and submarine noise model, a method for computing submarine noise signal margin is established. Through its relationship with the dipping sonar detection probability, the passive detection region of dipping sonar is simulated, and the distribution law of this detection region and its influence on the submarine searching strategy are studied. On the basis of which, and in combination with such parameters as tasks, environment and equipment, research on the submarine searching strategy for dipping sonar is conducted by simulation experiment. It is concluded that: to improve the detection efficiency, the distance between the detection points of dipping sonar should make the detection space of adjacent dipping points be closed, the positive gradient dipping depth be shallow, and double-dipping depths should be used in combination. The study is of specific guiding significance in optimum usage of dipping sonar for anti-submarine helicopter.

Key words: anti-submarine helicopter; dipping sonar; passive detection region; optimum usage

0 引言

反潜直升机吊放声纳(简称吊声)搜索具有快速、高效和工作深度可变等优点, 特别适合执行应召搜潜任务。水声环境对吊声探测效能影响显著。近年来, 关于吊声利用水声环境因素的研究逐渐深入, 从水声环境因素对声纳探测概率的影响^[1-3]到声纳作用距离的预报^[4-5], 再到声纳探测概率在深度维的变化^[6-8]。这些研究由于局限于水声环境对装备性能的影响规

律, 未深入到利用该规律战术优化使用的层面。为此, 文献[9]综合水声环境影响和吊声探测机理等要素, 建模并仿真分析了吊声三维主动非连续探测域, 提出了采用仿真实验的方法有效解决复杂因素影响下的装备战术使用问题。本文遵循该思路, 采用仿真实验的方法, 研究吊声被动探测域分布及其装备优化使用策略的问题, 为吊声优化使用提供方法指导。

1 吊放声纳被动探测建模与仿真分析

吊声被动探测效果主要取决于吊声信号接收端的信号余量, 信号余量主要与潜艇辐射噪声、水声环境和吊声装备有关。

收稿日期: 2015-02-09 修回日期: 2015-03-30

作者简介: 李祥珂(1979—), 男, 山东济宁人, 博士生, 研究方向为潜艇作战指挥。

1.1 被动声纳方程

如图 1 所示,直升机探潜声纳采用被动工作方式时,声纳基阵检测由潜艇噪声源处发出并经过传播达到的噪声信号(已融合背景干扰),被动声纳方程^[10]为

$$S_L - T_L - (N_L - D_I) = D_T \quad (1)$$

式中: S_L 为潜艇声源级; T_L 为传播损失; N_L 为背景干扰级; D_T 为检测阈; D_I 为指向性系数。以上各物理量单位都为 dB。则信号余量 S_E 的表达式为

$$S_E = S_L - T_L - N_L - D_I - D_T \quad (2)$$

式中, N_L 为海洋环境噪声级,单位为 dB。

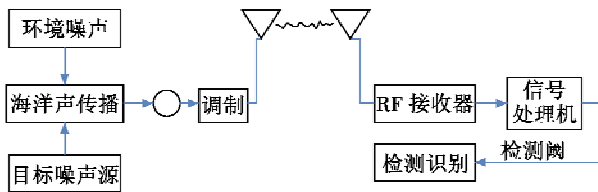


图 1 被动声纳探潜原理图

Fig.1 Principle of submarine searching by passive sonar

1.2 潜艇辐射噪声分析与建模

由于保密原因,潜艇辐射噪声值难以准确获取,一般可根据潜艇螺旋桨未空化时潜艇辐射噪声等级将潜艇噪声类型分为三类(见表 1)。

表 1 潜艇辐射噪声级分类

Table 1 Submarine radiation noise grades

潜艇类型	代表潜艇	降噪措施	噪声级/dB
极静型	基洛级、弗吉尼亚级	机械减震、敷设消声瓦和泵喷推进等	110
静音型	苍龙级、洛杉矶级	减震浮阀、敷设消声瓦等	120
噪音型	台湾海龙	无	130

潜艇噪声与速度密切相关,一旦航速增大至临界航速,空化骤然增加,产生的连续谱噪声级随之急剧增加,然后连续谱噪声以 1.0~2.0 dB/kn 的速度增加直至空化充分保持平稳。同时空化与静压力有关,航深增加,临界航速随之增加。上述两种噪声哪种是主要的辐射噪声构成,取决于频率、航速和深度。如图 2 所示,高速时螺旋桨噪声谱增强并移向低频段,谱峰频率向着低频段移动;而以恒速转动产生的机械噪声谱线不受航速影响,保持稳定。潜艇在不同航行深度时的临界速度可参考文献[11-12]计算。

当潜艇速度超过临界速度时,潜艇辐射噪声级算式为

$$S_L = \begin{cases} S_{L0} & V_m < V_T \\ S_{L0} + \Delta & V_m = V_T \\ S_{L0} + \Delta + b(V_m - V_T) & V_m > V_T \end{cases} \quad (3)$$

式中: V_m 为潜艇航速; V_T 为潜艇的临界航速; $\Delta = 10 \sim 30$ dB(通常依据不同类型潜艇的实测数据指标选取)为潜

艇到达临界航速后噪声声源级的增量; b 为潜艇到达临界航速后辐射噪声随航速变化的斜率, $b \in [1, 2]$ 。

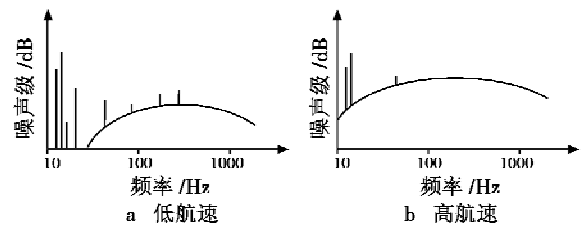


图 2 潜艇辐射噪声谱

Fig.2 Submarine radiation noise spectrum

1.3 吊放声纳被动探测概率

吊声被动采用宽带检测,若根据声纳作用过程建模则涉及时间采样数、带宽、积分时间和信噪比门限等一系列装备性能参数,以及误差补偿函数和其反函数等,计算过程较为繁琐,且由于不受自身混响干扰,探测概率的不确定性减小。文献[13]基于统计理论给出了探测概率计算公式,在避免繁琐计算的同时,能够反映信号余量和被动声纳检测概率的函数关系,吊声被动探测概率的算式为

$$P_d = \begin{cases} \int_{-\infty}^{\frac{S_E}{\sigma_{S_E}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2} dx & S_E \geq 0 \\ 0 & S_E < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, σ_{S_E} 为信号余量方差,单位为 dB。

1.4 吊放声纳被动探测域仿真与分析

直升机与水面舰艇相配合,大大扩展了水面舰艇的反潜空间,弥补了舰潜对抗的劣势,本文以典型的被动“三点式”搜索阵形(见图 3)为例研究。

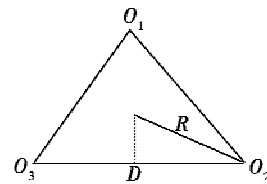


图 3 “三点式”搜索吊点示意图

Fig.3 Helicopter searches submarine with “three-point mode”

1.4.1 基本参数假设

1) 任务背景:水面舰艇发现概略潜艇目标,初始潜艇散布误差圆半径 1 km,距离约 40 km,发现目标至直升机起飞延迟时间 10 min。

2) 环境参数:水深为 70 m;平均声速为 1500 m/s;海况为 3 级;船运密度为低等;沉积层厚度为 50 m,底质为泥沙;声速梯度值如表 2 所示,正梯度。

表 2 正梯度声速值

Table 2 Positive gradient SSP

深度/m	0	30	50	70
声速/(m·s ⁻¹)	1500	1505	1510	1515

3) 直升机兵力和装备参数(略)。

4) 目标潜艇参数:苍龙级潜艇,巡航航速 8 kn (1 kn = 1.852 km/h)。在没有先验信息的情况下,难以对潜艇航行深度进行估计,考虑到安全深度假设潜艇在区间[25 m, 50 m]内服从均匀分布。

1.4.2 吊放声纳探测域仿真与分析

为了探索吊点深度对探测效果的影响规律,合理设计实验指标,首先分析不同吊深时的探测域分布,选择吊点深度 15 m, 25 m, 35 m, 45 m, 55 m, 仿真实验探测域如图 4 所示。

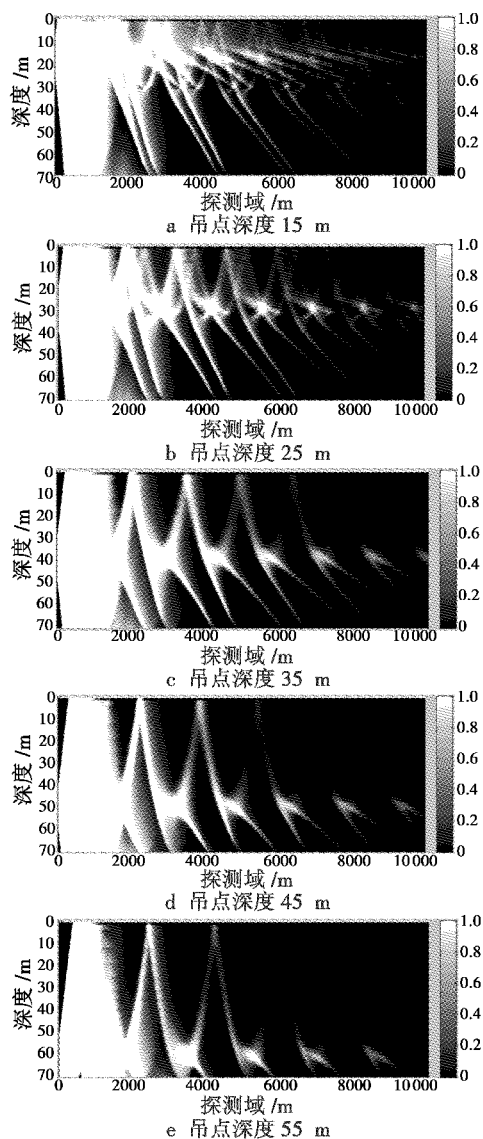


图 4 不同吊点深度的被动探测域分布图

Fig. 4 Detection area distribution of dipping sonar at different depths

由图 4 可知,正梯度吊声纳被动探测域总体为非连续立体探测域,包括近距离盲区、稳定探测区域和远距离零星探测区域三部分,与吊声主动探测域类似^[9],不同之处在于不存在混响干扰从而探测域较为平滑,规

律如下所述。

1) 在正梯度条件下,吊声被动方式总体探测效果良好,比如吊深 15 m 时稳定探测域约 3 km,零星探测区域可达 6 km 以上,水文条件利于声纳探测。

2) 探测效果在深度维上变化较大,浅层水域相对探测效果更好,这与潜艇辐射噪声声线向上弯曲有关。

3) 吊深确定时,吊声与潜艇基本在同一深度的(正梯度条件下潜艇深度略大于吊深时)探测效果最好,证明了同深探测的原理,探测效果明显优于目标潜艇处于其他深度时。

4) 综合比较,吊点 15 ~ 25 m 时探测域分布较为广泛,探测效果较好,但由于潜艇航行深度一般在 25 m 以下,因此具体的探测效能还要根据具体情况在实验中进行验证。

5) 为了形成严密搜索,应当根据稳定探测域大小合理设定吊点间距;当兵力不足时,则应充分利用远距离零星探测区域。

由此可见,吊声被动探测域分布是吊深和吊点间距的基础,而该域的断续性和不规则性使以有效作用距离为基础的传统解析法难以为继;采用战法实验的理论和方法则在解决非结构化的问题上具有突出优势,能在模拟装备探测的基础上结合具体的搜潜阵形进行针对性的搜潜策略研究。

2 吊放声纳被动“三点式”搜潜实验设计与推进

2.1 实验设计

1) 实验目的:探寻吊声被动“三点式”搜索阵形中吊深和吊点间距对探测效果的影响规律和优化使用方法。

2) 实验指标:根据易于观测和度量,能够反映实验目的的要求,选择发现概率 P_{fa} 作为实验指标。

3) 实验因素:根据实验目的,实验因素选择为吊深 H_{ds} (m) 和吊点间距 D_{ds} (km)。

4) 实验水平的设定。

实验水平对于实验精度和效率都至关重要,通过以上吊声被动探测域的仿真分析可知,15 ~ 55 m 5 个吊深对应的探测效果具有较为合适的区分度,因此选择吊深 H_{ds} 为 {15, 25, 35, 45, 55} (单位, m); 通过应召搜索基本战术计算,直升机开始搜索时潜艇扩散半径 R_0 为 4.6 km,参考图 3 有 $D_{ds} = 1.732R$, 对应的吊点间距为 7.9 km,考虑到搜索完成后潜艇的扩散^[16],则吊点间距设为 $D_{ds} = \{8, 9, 10, 11, 12\}$ (单位, km)。

2.2 实验推进

利用仿真实验系统,在加载吊声被动探测仿真模

型的基础上,根据重复性原则,设置单次仿真次数为 1000,仿真步长为 6 s;根据梯度类型分 3 种情况对吊点深度 H_{ds} 和吊点间距 D_{ds} 进行遍历性实验。

3 吊放声纳被动“三点式”搜潜策略分析

3.1 单吊深搜潜策略优化

通过实验数据可以看出单一最优搜潜策略为 [H_{ds} :25 m, D_{ds} :10 km],具体分析如下。

1) 正梯度低噪声条件下吊声“三点式”被动搜潜效果总体较好,最高发现概率可达 78.70%,但吊深和吊点间距的影响作用很大,最低发现概率为 35%,可见吊深和吊点间距的选择对于优化探测效果影响明显。

2) 发现概率值受吊点深度的影响很大,吊深 25 m 处的综合发现概率最高,各吊点深度探测效果排序为:25 m > 35 m > 15 m > 45 m > 55 m,与上节探测域仿真情况基本一致,反映了正梯度条件下声线向上弯曲,较浅处探测比较有利的规律;15 m 处吊深探测效果不如 25 m,35 m 时探测效果是因为与潜艇活动深度有落差,吊声探测域未能充分利用(见图 5)。

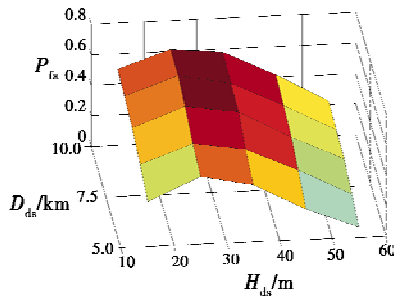


图 5 正梯度条件下不同吊深被动搜潜概率图

Fig. 5 Dipping sonar detection probability of positive gradient SSP at different depths

3) 在不同吊深情况下,吊点间距对发现概率的影响规律一致:存在最优值 $D_{ds} = 10$ km。这是因为:① 各吊深同深稳定探测域范围均在 5 km 以内,并相差不大,采用 10 km 的吊点间距基本可以实现相邻吊点探测域的联结,完成相对严密的连续搜索;② 初始潜艇扩散半径 R_0 为 4.6 km,根据应召搜索潜艇概率密度,吊声探测域恰好能够覆盖潜艇扩散高概率区,具体如表 3 所示。

表 3 正梯度条件下吊声搜索概率值

Table 3 Dipping sonar detection probability of positive gradient SSP

D/km	H_{ds}/m				
	15	25	35	45	55
12	0.5470	0.7580	0.7200	0.5190	0.3700
11	0.5110	0.7830	0.7220	0.5610	0.3710
10	0.5730	0.7870	0.7550	0.5900	0.4020
9	0.5010	0.7930	0.7510	0.5840	0.3690
8	0.4750	0.7920	0.7440	0.5650	0.3500

3.2 双吊深搜潜策略优化

吊声探测的一个重要优势就是可以变深探测,吊声可以进行多种变深的组合,双吊深两两组合为 10 种,通过分析可以缩小搜索空间。排除严格最差深度 55 m,其他双吊深组合为: $\{(15, 25), (15, 35), (15, 45), (25, 35), (25, 45), (35, 45)\}$,组合之后,吊点探测周期增加,随之潜艇散布扩大,因此设置 $D_{ds} = \{9, 10, 11\}$ (单位, km)。

通过实验数据(见表 4)可以看出,双吊深的组合能够明显优于单吊深的探测效果,即使对于单吊深最优探测深度 25 m(探测概率 78.70%), (25 m, 35 m) 的组合探测仍可提高探测概率约 10%,这是因为不同的探测深度,吊声的探测域能够相互补充,以期在深度维上形成严密覆盖。本文实验设定的海区深度较浅,潜艇活动范围设为 25 ~ 50 m,因此双吊深的探测效果优化效果不太明显,对于较深海域探测时,多吊深组合探测对于优化探测效果将具有突出的应用价值。

表 4 正梯度吊深组合搜索探测概率

Table 4 Dipping sonar detection probability of positive gradient SSP with combined depths

D/km	H_{ds}/m					
	(15, 25)	(15, 35)	(15, 45)	(25, 35)	(25, 45)	(35, 45)
11	0.7800	0.7700	0.6630	0.8320	0.7380	0.6610
10	0.7900	0.8020	0.7180	0.8850	0.7700	0.6940
9	0.7760	0.7650	0.6890	0.8340	0.7410	0.6650

3.3 结论

综上所述,弱正梯度低噪声和潜艇散布范围较小的条件下,直升机吊声被动“三点式”阵形搜索总体效果良好,但吊深和吊点间距对于探测效果的影响明显:吊点间距应位于潜艇散布高概率密度区,并尽量满足相邻吊点的稳定探测域的严密联结;由于声线向上弯曲,吊声应位于较浅水层探测,并可以根据具体水深采取双(多)吊深组合探测以提高探测效果。

4 结束语

本文在吊声被动探测仿真建模的基础上,对弱正梯度低噪声条件下吊声被动探测域进行了分析,发现其对吊深敏感,并呈现非连续、不规则等特征。针对该立体探测域的非结构化特性,基于战法仿真实验的理论和方法,结合常用应召搜索“三点式”阵形,从吊点间距和吊深两个方面对吊声搜潜优化策略进行了有益探讨,研究结论对于指导装备使用具有较强的应用价值,并展示了战法仿真实验在解决复杂非结构化问题的重要作用。同时,也为采用仿真实验研究吊声主动探测优化使用问题提供了参考。

参考文献

- [1] 梁民赞, 孟华, 陈迎春, 等. 水声环境复杂性对声纳探测距离的影响[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(4): 45-48. (LIANG M Z, MENG H, CHEN Y C, et al. Effect of underwater acoustics-environmental complexity on sonar detecting range [J]. Ship Science and Technology, 2013, 35(4): 45-48.)
- [2] 金立峰, 周易, 邓歌明. 声速跃变层对吊放声纳搜潜的影响[J]. 现代电子技术, 2013, 36(1): 19-22. (JIN L F, ZHOU Y, DENG G M. Effect of thermocline on submarine search using dipping sonar [J]. Modern Electronics Technique, 2013, 36(1): 19-22.)
- [3] 曲晓慧, 单志超, 陈建勇, 等. 深海声速剖面对吊放声纳探测距离的影响研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(5): 144-147. (QU X H, SHAN Z C, CHEN J Y, et al. Study on effect of sound speed profiles in blue water on detection distance of dipping sonar [J]. Computer Simulation, 2012, 29(5): 144-147.)
- [4] 季蓓, 程健庆, 曹志敏. 被动声纳作用距离预报的仿真研究[J]. 计算机仿真, 2007, 24(3): 31-34. (JI B, CHENG J Q, CAO Z M. Simulation of detection range forecast for passive sonar [J]. Computer Simulation, 2007, 24(3): 31-34.)
- [5] 过武宏, 笄良龙. 环境的不确定性对声纳作用距离预报的影响[J]. 装备环境工程, 2008, 5(2): 25-28. (GUO W H, DA L L. Effect of environmental uncertainty on sonar detecting range prediction [J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(2): 25-28.)
- [6] 范培勤, 笄良龙, 李玉阳, 等. 基于直觉模糊推理的水声探测环境效能评估[J]. 指挥控制与仿真, 2012, 34(2): 9-12. (FAN P Q, DA L L, LI Y Y, et al. Underwater acoustic detection operational effectiveness based on intuitionist fuzzy sets theory [J]. Command Control & Simulation, 2012, 34(2): 9-12.)
- [7] 孙明太, 周利辉, 赵志允. 负梯度浅海混响条件下吊放声纳主动探测深度研究[J]. 海军航空工程学院院报, 2013, 28(3): 221-225. (SUN M T, ZHOU L H, ZHAO Z Y. Research on the dipping sonar active investigation depth in negative gradient shallow water reverberation [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2013, 28(3): 221-225.)
- [8] 杨传奇, 杨日杰, 周旭. 基于简正波模型的航空声纳作用距离建模与仿真[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(1): 24-26. (YANG C Q, YANG R J, ZHOU X. Modeling and simulation on the detection range of the aviation sonar using normal mode [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2012, 31(1): 24-26.)
- [9] 赵志允, 孙明太, 任东彦. 吊声主动工作方式探测域建模与仿真[J]. 指挥控制与仿真, 2013, 35(6): 49-51. (ZHAO Z Y, SUN M T, REN D Y. Modeling and simulation of dipping sonar active detection region [J]. Command Control & Simulation, 2013, 35(6): 49-51.)
- [10] 刘伯胜. 水声学原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1989. (LIU B S. Acoustics theory [M]. Harbin: Harbin Engineering University Publishing Company, 1989.)
- [11] 徐亦凡, 何成, 何斌. 潜艇螺旋桨空化临界特性仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(16): 5022-5024. (XU Y F, HE C, HE B. Avitating-critical characteristics simulation of submarine propeller [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(16): 5022-5024.)
- [12] 孙炯, 刘凯, 邵松世, 等. 一种临界速度估算方法及其对潜艇隐蔽作战的影响[J]. 海军工程大学学报, 2011, 23(2): 87-89. (SUN J, LIU K, SHAO S S, et al. A feasible estimation method of submarine critical speed and its effect on submarine's quiet operation [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2011, 23(2): 87-89.)
- [13] WAGNER D H, MYLANDER W C, SANDERS T J. 海军运筹分析[M]. 3 版. 姜青山, 郑保华, 译. 北京: 国防工业出版社, 2008. (WAGNER D H, MYLANDER W C, SANDERS T J. Naval operational analyse [M]. 3rd ed. Translated by JIANG Q S, ZHENG B H. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.)

下期要目

基于航空器航迹预推的飞行冲突探测模型
空投水雷布雷间隔的战术应用问题
基于遗传算法的变结构导引律研究
基于匹配滤波原理的 MIMO 雷达信号分选算法
基于滤波的协同探测去偏融合算法研究

一种改进的多特征融合目标跟踪算法
一种前视红外视觉导航连续跟踪导航区选取方法
光纤陀螺温度漂移建模与预测
温度对车载瞄准镜成像质量影响的仿真研究
基于同步压缩小波变换的通信信号调制识别