

# Bellhop 模型在拖线阵声呐效能分析中的应用

熊传梁, 王 相, 夏青峰

(复杂舰船系统仿真重点实验室, 北京 100161)

**摘 要** 针对拖线阵声呐反潜作战运用问题, 分析了拖线阵声呐战术决策过程, 提出了基于射线理论的主动拖线阵声呐搜索航线搜索效能统计模型。通过台湾以东海域主动拖线阵声呐声场仿真实例, 分析了台湾以东海域海底地形对主动拖线阵声呐探测的影响, 给出台湾以东海域主动拖线阵声呐反潜运用的相关建议。

**关键词** 拖线阵; 搜索效能; 海底地形; 射线模型

**中图分类号** E933.1      **文献标识码** A      **文章编号** 2096-5753(2020)02-0135-05

**DOI** 10.19838/j.issn.2096-5753.2020.02.008

## Bellhop Model's Application on Efficiency Analysis of Towed Line Array Sonar

XIONG Chuanliang, WANG Xiang, XIA Qingfeng

(Science and Technology on Complex Ship Systems Simulation Laboratory, Beijing 100161, China)

**Abstract** In this paper, the tactical decision-making process of the sonar is analyzed, and a statistical model for the search efficiency of the sonar's search routes based on Ray Model is proposed in response to towed line array sonar's operational application problem in antisubmarine warfare. Based on the simulation of the acoustic field in eastern waters off Taiwan island, the seabed topography's influence on the sonar detection is analyzed. This paper ends up offering suggestions on the sonar anti-submarine search under the influence of seabed topography in eastern waters off Taiwan island.

**Key words** towed line array; search efficiency; seabed topography; ray model

## 0 引言

作为反潜作战装备体系的重要组成部分, 拖曳线列阵声呐系统(下文简称为拖线阵)以其探测距离远、任务适用性强等特点, 在各国海军中得到广泛应用。由于水下战场空间的不透明性, 如何根据任务海区战场环境进行反潜战术决策, 最大限度发挥拖线阵探测效能, 是反潜平台作战运用中的重要课题之一。

由于声波在海洋中的传播受海底地形、海底底质、海面、海洋内部(包括海流、内波、涡、海洋

锋、深水散射层等)的不均匀性的影响, 拖线阵声呐系统的战术运用较为复杂<sup>[1]</sup>。国内学者围绕这一问题, 开展了大量研究。其中文献[2]基于简正波声场模型, 分析了不同工作深度水平线列阵声波的幅度响应、相位响应, 提出以阵列输出信噪比的某一统计特性可作为阵列深度选择标准, 对水平线列阵的最佳工作深度进行预报; 文献[3]分析建立了拖线阵声呐舰位最小配置距离模型, 并给出了拖线阵作战使用建议; 文献[4]提出了目标舷角计算方法, 分析了目标距离、拖线阵缆长对声呐测向的影响, 给出了目标舷角差值随缆长变化规律; 文献[5]

基于抛物方程近似,采用 RAM 软件仿真分析了深海声道下倾斜海底对声传播的影响,得到倾斜海底声传播特性的基本结论,进而总结不同海洋环境对声会聚区和声呐作用距离的影响。本文在拖线阵战术决策框架基础上,基于射线理论采用 BellHop 3D 模型,仿真分析了台湾以东海域海底地形影响下的声传播,并给出拖线阵声呐海底地形影响下的作战运用建议。

### 1 拖线阵战术分析框架

拖线阵声呐战术决策过程主要由海洋环境分析、水声学模型分析、声呐效能分析以及战术分析 4 个部分组成,其分析框架如图 1 所示。

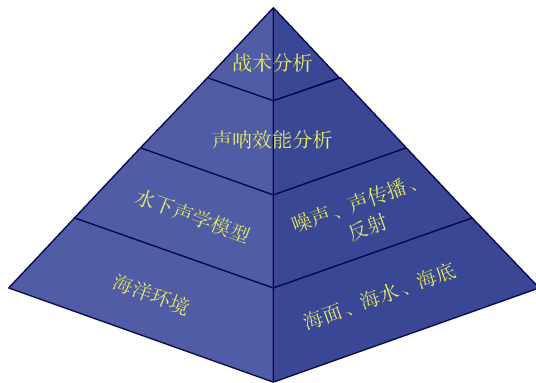


图 1 拖线阵战术分析框架图

Fig. 1 Framework diagram of towed line array's tactical analysis

海洋环境分析部分,包括对海面、海底 2 个声反射界面参数,以及海水温盐密深等数据采集、分析工作。在尽可能详细精确的海面、海底、海水相关数据采集基础上,建立包括海面形状、海底地形与底质类型、海水声速场等任务海区海洋数值模型,为后续工作提供海洋环境数据输入。

水下声学分析部分,包括建立海洋环境噪声、声传播损失以及回声 3 个部分数值模型。海洋环境噪声一般建立在实测海洋环境噪声数据基础上,在任务海区无实测噪声数据时,可采用历史典型噪声代替;声传播损失以及回声数值模型,是在海洋环境数值模型基础上,通过射线模型、简正波模型等水声模型建立,其中声传播损失是拖线阵探测距离

估计中最重要的参数之一,直接影响了拖线阵探测距离估计的准确度与不确定度,而回声在估计中难度较大,在主动线列阵声呐探测效能估计中应用较少。

声呐效能分析部分,结合拖线阵声学参数、任务海区部分数值模型以及其他参数,估计拖线阵优质因子,通过任务海区声传播损失与回声数值模型,估计该海区拖线阵声呐最大探测距离。其中,拖线阵声呐探测效能估计的准确度与效率,是实际反潜战术行动作战效能的主要影响因素。

战术分析部分,在拖线阵探测效能分析基础上,结合水下作战任务需求,按照相应原则综合制定兵力战术行动方案。

### 2 声场仿真与效能评估模型

#### 2.1 Bellhop 模型

Bellhop 模型是一套用于预测海洋环境中声压场的波束追踪模型。通过高斯波束跟踪方法,对决定声束宽度和曲率的 2 个微分方程与标准射线方程一起进行积分,计算出声束内中心声线附近的声束场,把所有声束按权重迭加求得复合声压(权重按照均匀介质中的标准点源确定),计算水平非均匀环境中的声场<sup>[6-7]</sup>。Bellhop 模型计算的声场在频率范围为 0.6~30 kHz 时与实验数据及理论模型符合得很好,被指定为美国海军预报海洋 10~100 kHz 频带声传播的标准模型。模型结构如图 2 所示。

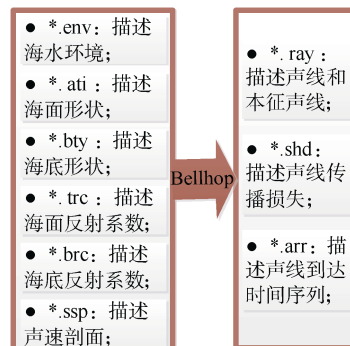


图 2 Bellhop 模型结构图

Fig. 2 Structure diagram of BELLHOP model

利用高斯波束跟踪方法代替几何波束跟踪方法是该模型与传统射线模型的主要区别, 可以克服传统射线模型中声影区强度为 0 和焦散线截面为 0 处声强度为无穷大的缺陷。但由于模型为确定性模型, 不能反映系统的时变特性, 不能处理水平变化的声速问题<sup>[8-9]</sup>。

为分析经纬度平面内声波水平折射现象, 基于 Bellhop 模型的解决思路有: 1) 可以从声源引出的一系列方位线, 在每条方位线上通过 Bellhop 模型进行声场计算, 即所谓的 Bellhop N×2D 或 2.5D 方法。这种方法忽略了声能量逸出每条方位线对应的垂直平面的折射, 在海洋环境强烈的海洋学特征导致声速存在显著水平梯度时, 或在任务海域具有强地形特征情况下, 这种逸出平面的效应不可忽略<sup>[10-11]</sup>。2) 在三维环境下的扩展 Bellhop 模型, 通过两次解算求解波束扩展方程, 第 1 次解算给出垂直平面上的扩展, 第 2 次解算给出经纬度水平平面上的扩展, 计算包含经纬度平面的水平折射和深度方向垂直平面折射的三维声压场<sup>[12-13]</sup>, 即 Bellhop 3D 方法。本文仿真实例采用 Bellhop 3D 方法。

## 2.2 主动拖线阵效能统计模型

本文量化主动拖线阵探测效能的主要思路: 结合对拖线阵优质因子的估计, 以发射声波单程传播损失统计量来衡量拖线阵。

声源平面坐标设为 $(x_0, y_0)$ , 布放深度为 $d_0$ , 设定发射角度等其他参数并输入 Bellhop 模型, 计算声源周围空间内声场, 根据输出的.shd 文件, 提取声源周围空间内各点声压值。设声源周围空间内某点 $(d_i, \alpha_j, l_k)$ 声压值为 $p_{i,j,k}$ , 其中,  $d_i = 10 \times i$ , 为该点处深度值;  $\alpha_j = 10^\circ \times j$ , 为该点位声源方位角;  $l_k = 100 \times k$ , 为该点距声源水平距离。则该点处传播损失 $TL_{i,j,k}$ 为

$$TL_{i,j,k} = 20 \times \log_{10}(p_{i,j,k} / p_{\text{ref}}) \quad (1)$$

式中:  $p_{\text{ref}}$ 为距离声源 1 m 处声压值。

将 $TL_{i,j,k}$ 在方位、深度两维度上取均值, 计算点 $(d_i, \alpha_j, l_k)$ 处平均传播损失 $\overline{TL}_k$ , 即

$$\overline{TL}_k = \sum_{i=1}^{\max(i)} \sum_{j=1}^{36} TL_{i,j,k} \quad (2)$$

设优质因子为 FOM, 则

$$FOM = \frac{1}{2} \times (SE + TS - NL - SL - DI_T + DI_R - DT) \quad (3)$$

式中: SE 为声源级; SL 为拖线阵自噪声级;  $DI_T$ 和  $DI_R$ 分别为发射阵和接收阵空间增益; DT 为检测域; TS 为目标强度; NL 为海洋环境噪声级。通过估算优质因子, 并令 $\overline{TL}_k = FOM$ , 计算出 $k$ 值, 则 $l_k = 100 \times k$ 即为拖线阵位 $(x_0, y_0)$ , 布放深度为 $d_0$ 处的最大探测距离。

对于某搜索航路, 设 $t$ 时刻拖线阵周围空间内发射传播损失为 $TL_{t,i,j,k}$ , 为判断该航路拖线阵搜索效能, 计算时将 $TL_{t,i,j,k}$ 在时域、方位、深度三维上分别取均值, 得出该搜索航路上平均传播损失 $\overline{TL}_k$ , 并令 $\overline{TL}_k = FOM$ , 计算出 $k$ 值, 则 $l_k = 100 \times k$ 即为拖线阵在该搜索航路上的搜索效能。

## 3 仿真分析

选择台湾以东 600 km×600 km 海域作为研究区域, 该区域海底地形渲染图如图 3 所示。台湾以东海区位于太平洋西部, 为诸多群岛所环绕, 南北长 2 900 km, 东西宽 2 400 km, 面积为 $5.12 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 平均水深约为 6 000 m, 最大水深为 10 497 m。研究区域地形复杂多变, 沟谷、海脊纵横交错, 形成复杂的岛坡地形地貌。以加瓜海脊为例, 该海脊是一个高差较大且两侧坡度较陡的巨大深海海脊, 位于水深约 5 000 m 的深海盆地之上。地形变化复杂, 海山为孤峰状海山, 相对高差约为 700~1 500 m, 总体呈南北向延伸。南北向延伸约 350 km, 宽 30 km 左右, 高出海底 3~4 km, 海脊顶部水深小于 2 000 m。从南向北顶部水深逐渐增大, 顶部相对高差减小, 海脊宽度和规模也随之变小, 海脊边缘坡度较陡, 沟、槽、谷发育, 向下直接变为深海平原。

仿真实例中地形、声速数据来源见参考文献[14],

在研究区域布设 6 条航线，以航线上发射声波单程平均传播损失为统计量，分析各航线声场传播及探测效能。其中 1-3 号航线呈南北走向，航线间隔 120 km，4-6 号航线呈东西走向，航线间隔 90 km，在各航线交叉点选取采样点，如图 4 所示。分析航线上各采样点发射声波单程声场传播，统计航线单程平均传播损失作为该航线探测效能量化指标。

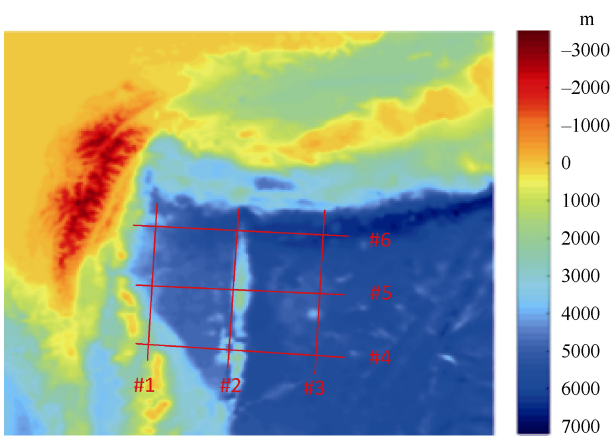


图 3 研究区域  
Fig. 3 Area of research

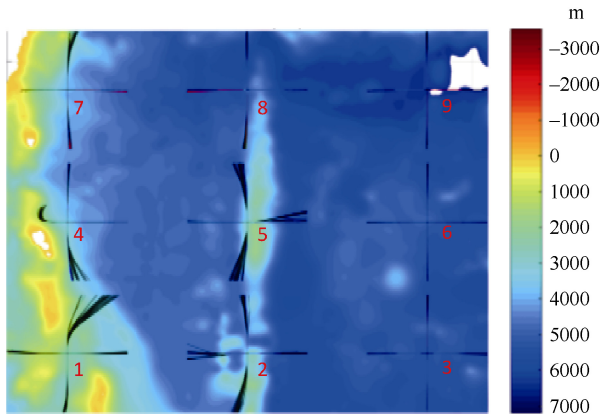


图 4 声源位不同位置发射声线追踪 (部分)  
Fig. 4 Ray tracing of sound source from different points

由于受北吕宋海脊和加瓜海脊附近地形影响，航线 1-6 上的声线传播水平折射效应明显，引起拖线阵探测目标方位角误差。其中采样点 1、采样点 4、采样点 5 处，由于海底地形起伏较大，因此拖线阵探测目标方位角误差较大；由于航线 3 探测范围内海底地形相对平坦，因此其声线传播过程中探

测目标方位角误差较小。

图 5 中，在采样点 1、采样点 4、采样点 5 附近受海底较大起伏地形影响下，航线 1 和航线 5 在 3 km 探测范围内平均传播损失随距离呈现陡增趋势。同时，由于上述地形变化引起的多路径效应，在 3~5 km 探测范围内平均传播损失随距离呈现下降趋势。航线 2、航线 4、航线 6 探测范围内平均传播损失随距离变化趋势相近。相对其它 5 条航线，航线 3 探测范围内海底地形较平坦，平均传播损失整体较小，对于给定 FOM，航线 3 搜索效能明显优于其他 5 条航线。各航线探测范围内平均传播损失统计信息如表 1 所示。

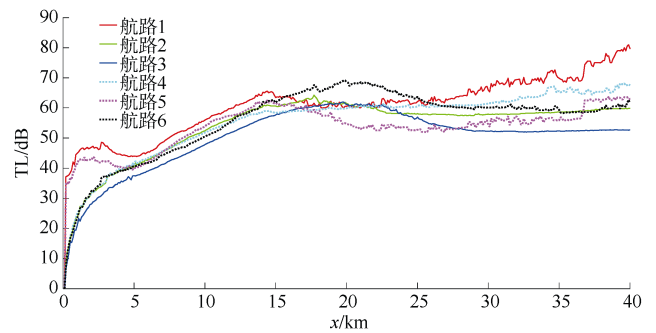


图 5 各航线对应的平均传播损失  
Fig. 5 Average propagation loss in the searching routes

表 1 各航线探测范围内平均传播损失统计表  
Table 1 Statistical table of average propagation loss in the searching routes

航线	均值/dB	标准差/dB
1	60.715 8	9.784 0
2	54.007 3	10.238 2
3	50.223 3	10.442 5
4	55.599 3	11.172 2
5	53.560 3	7.194 4
6	55.786 8	11.684 5

#### 4 结束语

在本文仿真实例中，海底地形起伏一方面影响声线传播路径，在水平方向上声线传播方向发生弯曲，在部分探测范围内引起较大测向误差；另一方

面引起声呐系统近程传播损失显著增加,减小了拖线阵最大探测距离。鉴于上文分析,在海底较平坦的开阔海域,拖线阵拖曳方向可自由布设,在海底地形起伏变化较大的搜索海域,搭载拖线阵的反潜平台搜索航线可垂直于等深线方向布设,由小水深向大水深方向搜索。

在本文提出的效能评估方法中,可改变海洋环境中某一因素,其他因素固定,考察该因素影响下拖线阵声场传播规律,量化分析该因素影响下拖线阵的作战使用问题,对比不同运用方案下作战效能,为反潜任务规划提供参考。同时,本文的统计指标较单一,不能完整地反映声场传播特征,有待进一步完善。

### 参考文献

- [1] Paul C E. 水声建模与仿真[M]. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [2] 王红萍, 孟华, 肖军. 水平线列阵的最佳工作深度选择[J]. 舰船电子工程, 2013, 33 ( 5 ): 159-166.
- [3] 沈治河, 贺扬清, 刘峰. 水面舰艇编队拖曳声呐舰阵位配置及行动方法[J]. 计算机仿真, 2012, 29 ( 3 ): 49-52.
- [4] 王红萍, 孟华, 肖军. 拖曳线列阵声呐作战使用初探[J]. 声学技术, 2012, 31 ( 4 ): 261-264.
- [5] 付留芳, 何卫东, 赵国君, 等. 倾斜海底对声传播的影响[J]. 声学技术, 2016, 35 ( 6 ): 108-111.
- [6] 段乐峥. 基于 BELLHOP 的水声信道时变模型[J]. 电子世界, 2014 ( 9 ): 105-112.
- [7] 肖瑶, 李整林, 李文. Bellhop 在海底水平变化分层导问题中的应用研究[C]//中国声学学会 2017 年全国声学学术会议论文集. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2017.
- [8] 李孟, 周荣艳. 基于 BELLHOP 模型的水下信道仿真方法研究[J]. 舰船电子工程, 2018 ( 8 ): 166-169.
- [9] 惠俊英. 水下声信道[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [10] 魏莉, 许芳, 孙海信. 水声信道的研究与仿真[J]. 声学技术, 2008, 27 ( 1 ): 25-29.
- [11] 杨家轩, 何琳, 帅长庚, 等. 基于 Bellhop 模型的不同海山地形水下声学仿真[J]. 声学技术, 2015, 34 ( 6 ): 1-4.
- [12] 韦强强, 韩东, 徐池, 等. 基于射线模型的典型海底地形下的声传播[J]. 科技创新与应用, 2017 ( 32 ): 3-6.
- [13] 秦凯丽, 胡长清. 基于射线高斯束模型的内波声场环境预报适应性研究[C]//中国声学学术会议论文集. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2017.
- [14] M. Porter. Ocean acoustics library [EB/OL]. [2010-06-15]. <http://oalib.hlsresearch.com/Rays/insex.html>.

(责任编辑: 肖楚楚)