

引用格式: 郁红波, 鞠建波, 魏帅, 等. 浅海海底地形对吊放声呐探测距离的影响[J]. 声学技术, 2021, 40(1): 49-56. [YU Hongbo, JU Jianbo, WEI Shuai, et al. Effects of shallow seabed topography on the detection range of hanging sonar[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(1): 49-56.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.01.008

浅海海底地形对吊放声呐探测距离的影响

郁红波¹, 鞠建波¹, 魏帅², 杨少伟²

(1. 海军航空大学, 山东烟台 264001; 2. 中国人民解放军 95910 部队, 甘肃酒泉 935000)

摘要: 吊放声呐的探测距离不仅与装备的自身性能和海洋水声环境特性有关, 还受海底地形影响。利用射线声学模型, 仿真分析了正声速梯度和带有跃变层声速梯度下, 不同高度和深度的海底山体和海底盆地(简称: 海盆)两种典型地形下的声传播特性。通过声传播特性, 得出了不同高度和深度的海底山体和海盆两种典型地形对吊放声呐作用距离的影响。根据声传播特性, 得出了不同海底地形下潜艇规避吊放声呐搜索的大致航行区域, 给出了吊放声呐增加搜潜概率的可行性方案。

关键词: 吊放声呐; 海底地形; 声线轨迹; 声速梯度; 作用距离

中图分类号: E925.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2021)-01-0049-08

Effects of shallow seabed topography on the detection range of hanging sonar

YU Hongbo¹, JU Jianbo¹, WEI Shuai², YANG Shaowei²

(1. Naval Aviation University, Yantai 264001, Shandong, China; 2. Unit 95910 of the people's liberation army, Jiuquan 935000, Gansu, China)

Abstract: The detection range of the hanging sonar is not only related to the performance of the equipment and the characteristics of the marine acoustic environment, but also affected by the seabed topography. In this paper, the acoustic propagation characteristics of two typical seabed topographies (undersea mountain and basin) of different heights and depths are simulated and analyzed by ray acoustic model under the sound velocity profile of positive gradient and the sound velocity profile with a leaping layer. Based on the characteristics of acoustic propagation, the influences of the two typical seabed topographies on the detection distance of hanging sonar are obtained. According to the characteristics of acoustic propagation, the approximate navigational areas of submarine avoiding sonar search under different undersea terrain are obtained, and the feasible scheme to increase the submarine search probability of hanging sonar is given.

Key words: hanging sonar; seabed topography; ray trace; sound velocity gradient; detection range

0 引言

作为现代反潜中一项重要的数据, 准确地掌握作战海域吊放声呐的作用距离, 将大大提高吊放声呐的搜潜效率。吊放声呐的作用距离不仅与声呐设备的性能有关, 还受海洋环境和海底地形等有关因素的影响。海底地形作为水声传播的下边界, 不同的海底地形对水下声传播有着重要的影响^[1], 海底地形的复杂多变, 相应声呐作用距离也千差万别。因此有必要研究海底地形对作用距离的影响, 为声呐设备的设计和作战使用提供可靠的参考和依据。

曲晓慧等在文献[2]和[3]中研究了浅海平坦海

底地形下不同声速剖面中的声传播特性, 通过仿真声线轨迹分析了正声速梯度和存在一个声道轴时的声速分布两种典型声速剖面对声传播的影响, 得出了浅海中不同声速剖面下主动声呐的作用距离。但没有考虑复杂地形对声传播特性的影响。支绍龙^[4]研究了海底地形为山体情况下吊放声呐不同入水深度时的作用距离, 为如何使用声呐装备提供了数据支撑, 极大发挥了声呐设备的探测性能, 但此文献把海底地形设置为山体这一特殊地形, 不具有很强的说服力。韩引海等^[5]中研究了海底山体和海底盆地(简称: 海盆)对声传播规律的影响, 并仿真得到了两种典型地形下的声呐设备作用距离, 对水声装备的研制和使用有重大的影响, 但本文没有研究不同高度或深度的两种地形对声传播的影响。针对上述文献的不足, 本文研究了不同高度和深度的海底山体和海盆对声线传播特性的影响, 并通过

收稿日期: 2019-11-30; 修回日期: 2019-12-24

作者简介: 郁红波(1996—), 男, 山东菏泽人, 研究生, 研究方向为水下目标探测与识别。

通信作者: 郁红波, E-mail: 2986575128@qq.com

仿真得出了主动声纳的作用距离,为吊放声纳设备的设计,操作和作战使用提供了参考。

1 射线声学模型

假设声传播过程中某条声线的声压 p 为

$$p(s, n) = A(s)\phi(s, n)e^{j\omega\tau} \quad (1)$$

式中: ω 为角频率; A 为声线传播方向的振幅; ϕ 为垂直于声线方向的影响函数; s 为声线传播方向的弧长; n 为垂直于声线中心方向的位移; τ 为声线传播的时间^[2]。 ϕ 和 A 可表示为高斯声线宽度 W 的函数^[3]:

$$\phi(n, s) = \exp[-(n/W)^2] \quad (2)$$

$$A(s) = \frac{1}{(2\pi)^{0.25}} \sqrt{\frac{c}{c(0)} \frac{2 \cos \alpha}{r W}} \quad (3)$$

$$W = v(s) d\alpha / c(0) \quad (4)$$

式(4)中, $d\alpha$ 为临近声线夹角的微分。

将 $p_j(s, n)$ 转化为柱面坐标系下的声压 $p_j(r, z)$, 最终的声场是由携带不同能量的声线叠加而成。本文采用非相干声压的计算方法, 声压 p_c 为^[8]

$$p_c(r, z) = \sum_{j=1}^N P_j(r, z) \quad (5)$$

式中: N 表示特征声线的个数。

2 浅海不同地形下吊放声纳探测距离仿真分析

在海洋环境噪声下主动声纳方程表达式为^[9]

$$L_S - 2L_T + S_T - (L_N - D_I) = T_D \quad (6)$$

根据式(6)可以得出优质因数 F_{OM} 为:

$$F_{OM} = \frac{L_S + S_T - (L_N - D_I) - T_D}{2} \quad (7)$$

当 $F_{OM} \geq L_T$ 时, 认为能检测到目标。本文中设定吊放声纳声源级 $L_S = 210$ dB, 目标强度 $S_T = 15$ dB, 检测阈 $T_D = 10$ dB, 指向性指数 $D_I = 8$ dB, 海洋环境噪声为 $L_N = 60$ dB^[10-11]。

在本文的研究中, 海底山体和海盆的形状服从均值为 10 km, 方差为 0.3 的高斯分布, 海盆的直径为 9 km。

2.1 正声速梯度

正声速梯度指的是声速随深度的增加而增加, 这类声速剖面一般发生在冬季, 原因是海水表面温度比海底温度低。图 1 为海底地形示意图, 图 2 为正声速梯度剖面图。

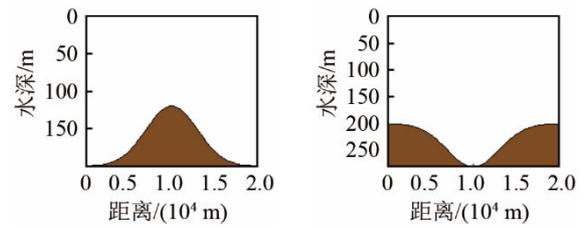


图 1 两种典型的海底地形示意图
Fig.1 Two typical seabed topographies

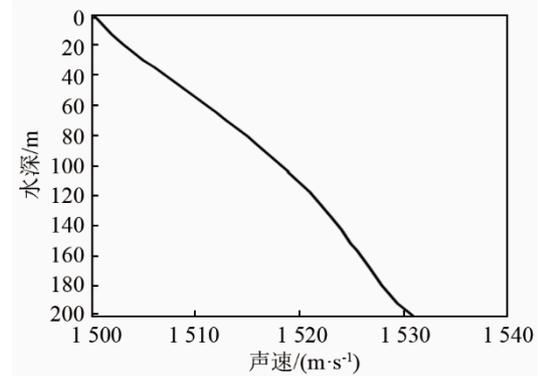


图 2 浅海正声速梯度剖面图
Fig.2 Sound velocity profile of positive gradient in shallow sea

本文基于射线声学, 利用 BELLHOP 模型计算声场。假设浅海海域水深 200 m, 声纳发射的初始掠射角为 $\pm 10.3^\circ$ 。声源工作深度为 80 m, 工作频率为 3 000 Hz, 声束柱数为 50, 本征声线的个数 $N=2$ 。海底参数的设定: 声速 $c=1 535$ m·s⁻¹, 海底吸收系数 $\alpha=0.5$, 密度 $\rho=1.43$ g·cm⁻³。

2.1.1 海底地形为高斯分布的“海底山体”

图 3 为海底山地高度分别为 0、50、100、150 m 情况下的声线传播图和声波传播损失图。

图 4 为正声速梯度下海底山体的高度对吊放声纳作用距离的影响。

图 4 纵轴为潜艇的航行深度(m); 横轴为吊放声纳的探测距离(m)。假设吊放声纳的入水深度为 80 m, 每隔 2 m 取一点作为潜艇的航行深度, 研究吊放声纳深度确定后, 对航行在不同深度的潜艇的探测距离进行分析。

(1) 正声速梯度下, 声线向海面弯曲。从图 3(a)、3(c)、3(e)、3(g)和图 4 中可得出下列两点结论:

(a) 山体以上区域。在声线传播过程中, 声线到达海底山体表面并发生反射, 通过图 3(a)、3(c)、3(e)、3(g)可以看出, 随着山体高度的增加, 声线传播的跨度不断变小, 造成声线向声源附近海域聚集。从图 4 可见, 随着山体高度的增加, 声纳设备的作用距离不断减小。

(b) 山体以下区域。由于山体的阻挡, 随着山体高度的增加, 山体另一侧的声线不断减少, 形成

大面积的声影区，并且声呐设备的作用距离也不断减小。

(2) 由于山体的存在，潜艇可以借助影区来逃

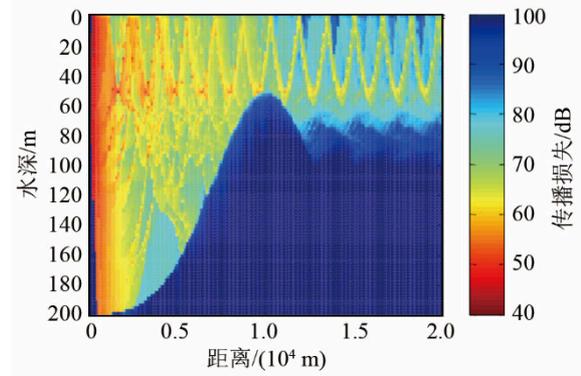
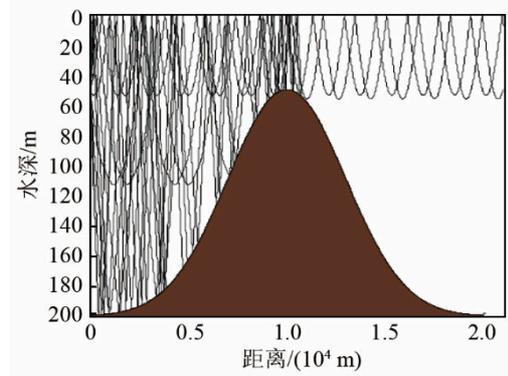
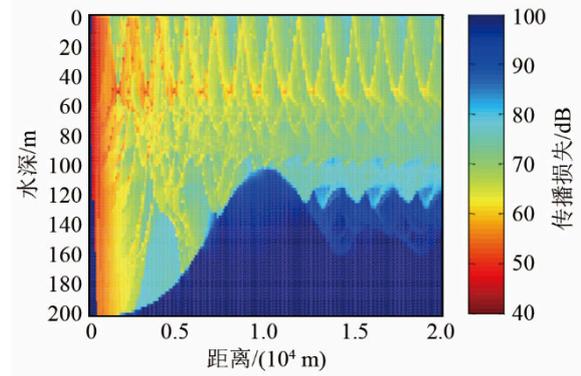
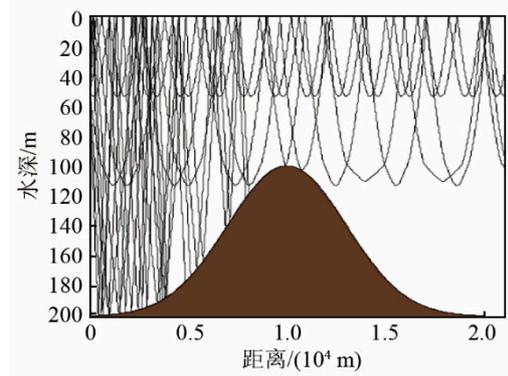
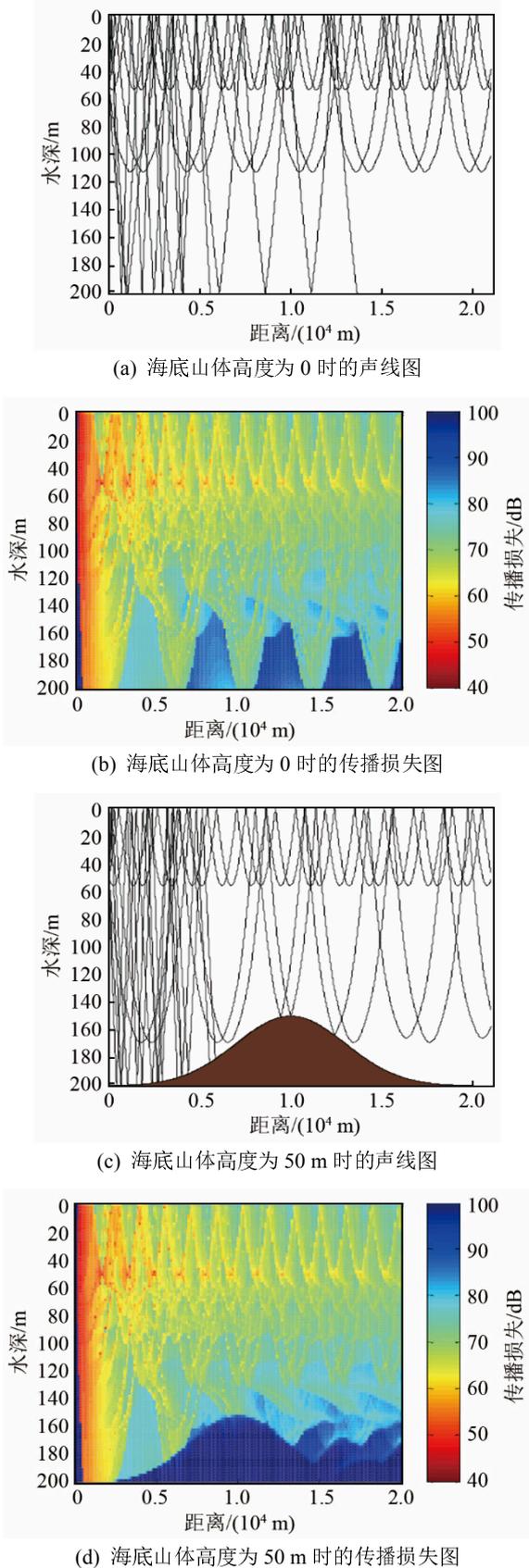


图 3 正梯度声速剖面 and 不同海底山高度情况下的声线图 and 声传播损失图

Fig.3 Ray trace maps and sound propagation loss maps under the sound velocity profile of positive gradient and different heights of undersea mountain

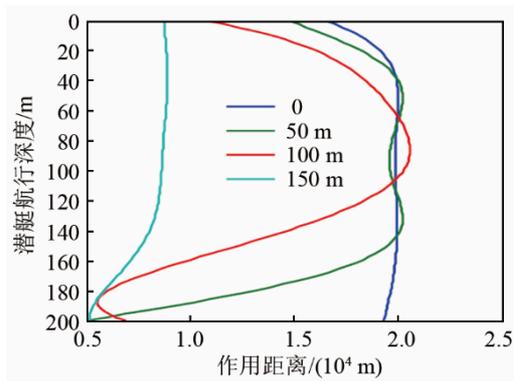


图4 正梯度声速剖面下海底山体高度对主动探测的影响
Fig.4 Influence of the height of undersea mountain on active detection under the sound velocity profile of positive gradient

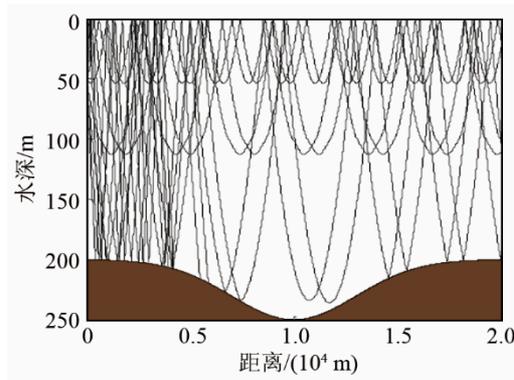
避主动声呐的搜索。为了减少声影区的面积，直升机在搜潜时声呐装备应尽量在山体的上方，同时减少吊放声呐的入水深度，从而提高搜潜效率。

2.1.2 海底地形为高斯分布的海盆

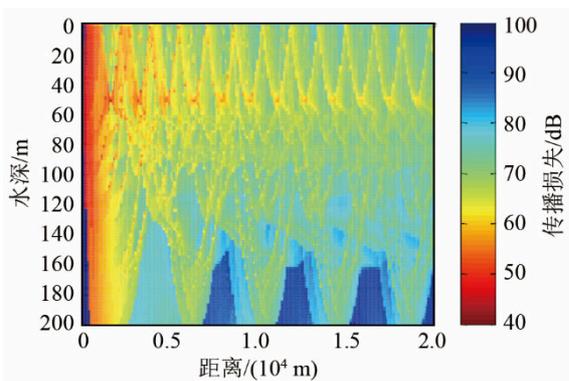
图5是海盆深度分别为50、100、150 m情况下的声线传播图和传播损失图。以海底200 m为基准，海盆深度为0时与海底山体规律相同，将不在图5中列举。

图6为正梯度声速剖面下不同海盆深度对吊放声呐作用距离的影响。

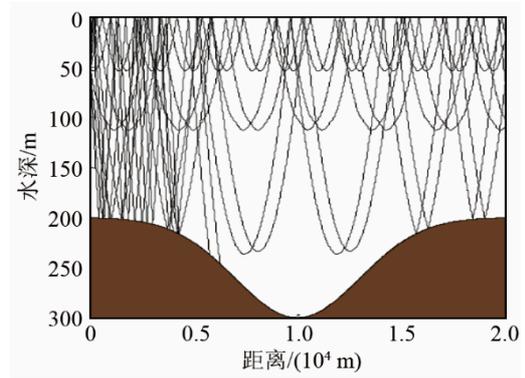
(1) 由图5(a)、5(c)、5(e)可以看出，大部分声



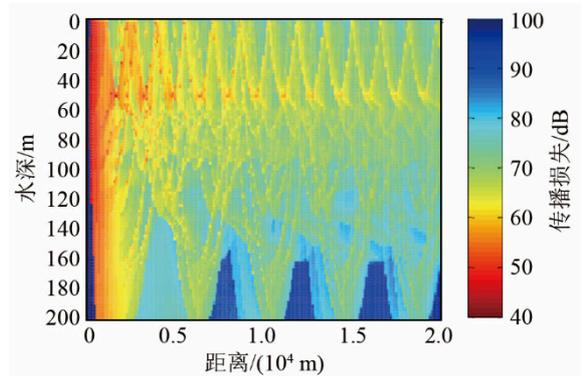
(a) 海盆深度为 50 m 时的声线图



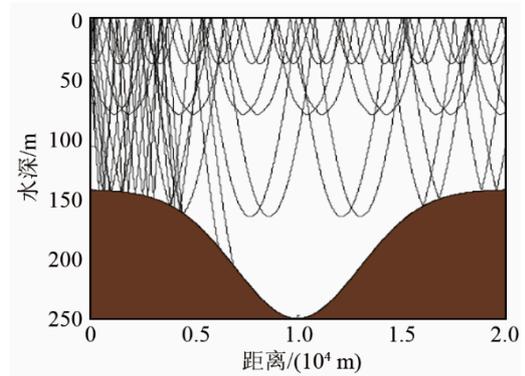
(b) 海盆深度为 50 m 时的传播损失



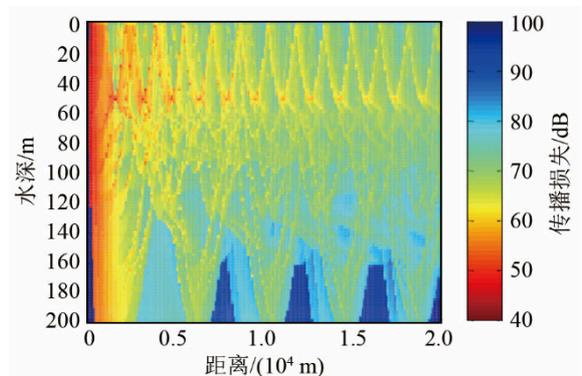
(c) 海盆深度为 100 m 时的声线图



(d) 海盆深度为 100 m 时的传播损失



(e) 海盆深度为 150 m 时的声线图



(f) 海盆深度为 150 m 时的传播损失

图5 正梯度声速剖面下不同海底盆地深度情况下的声线图和声传播损失图

Fig.5 Ray trace maps and sound propagation loss maps under the sound velocity profile of positive gradient and different undersea basin depths

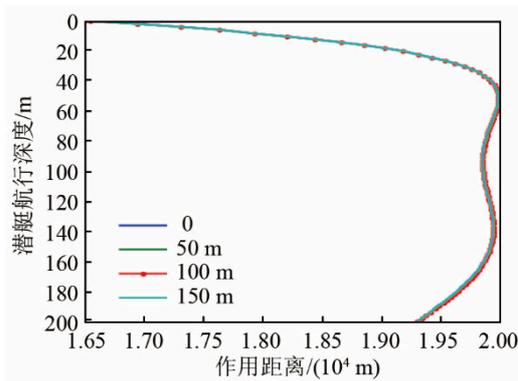


图 6 正梯度声速剖面下海盆深度对作用距离的影响
Fig.6 Influence of undersea basin depth on detection range under the sound velocity profile of positive gradient

线在到达海底前发生反射，经过海盆的声线很少，因此在海盆中形成大量影区。随着海底盆地深度的增加，对整体声线的传播影响不大。从图 6 中可以看出随着海盆的深度变化，声呐装备的作用距离发生较小的变化。

(2) 潜艇驶入海盆是逃避吊放声呐搜索的方法之一。由于吊放声呐入水深度越深距离海盆越近，海盆中的声线越多，海盆中的声影区随之减少，因此，为了提高声呐设备的搜潜概率，通过增加吊放声呐的入水深度来增加海盆中的声线数量，从而减少影区的面积是最有效的方法。

2.2 带有跃变层的声速梯度

由于负声速梯度不常见，因此本节分析某海域中常见的带有跃变层的声速梯度分布。该声速的特点为大约在 60 m 处声速梯度从微弱正声速梯度转变为负声速梯度。图 7 为带有跃变层的声速梯度剖面图。

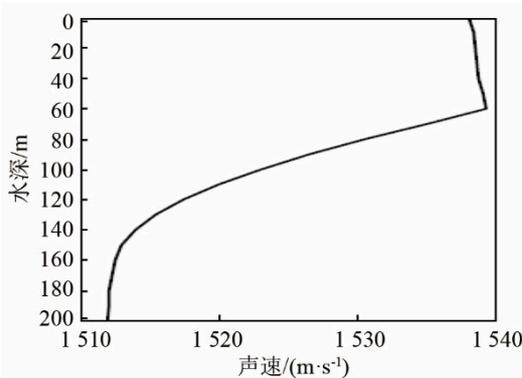


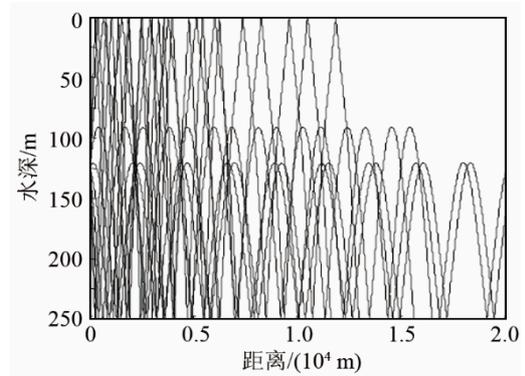
图 7 带有跃变层的声速梯度剖面图
Fig.7 Sound velocity profile with a leaping layer

2.2.1 海底地形为高斯分布的海底山

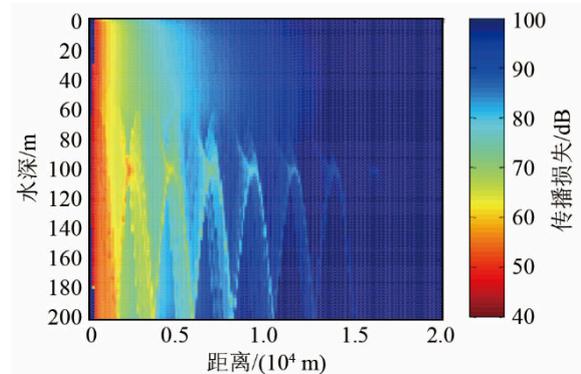
仿真数据同 2.1 节。图 8 是海底山体高度分别为 0、50、100、150 m 情况下的声线传播图和传播损失图。

图 9 为不同海地山体高度对吊放声呐作用距离的影响。

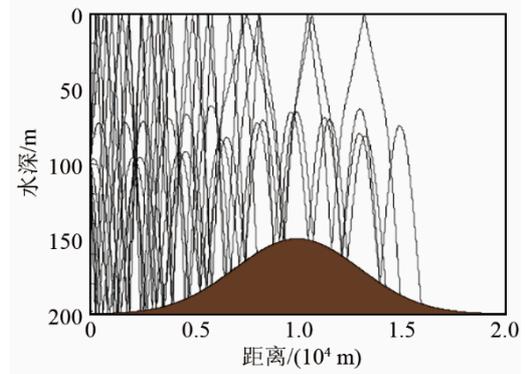
(1) 由于带有跃变层的声速梯度的分布的特点



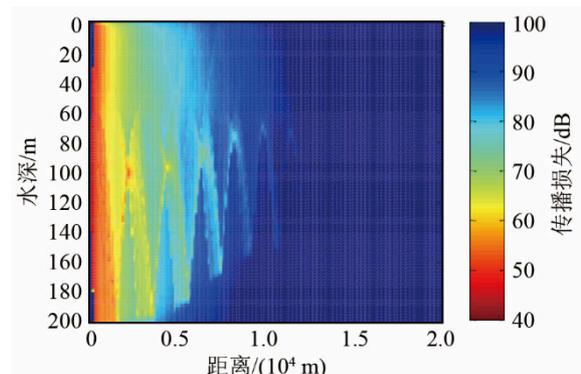
(a) 海底山体高度为 0 时的声线图



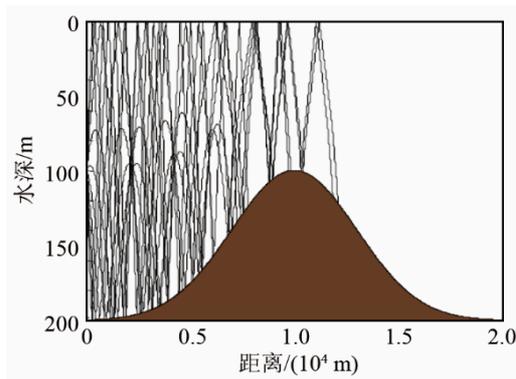
(b) 海底山体高度为 0 时的传播损失



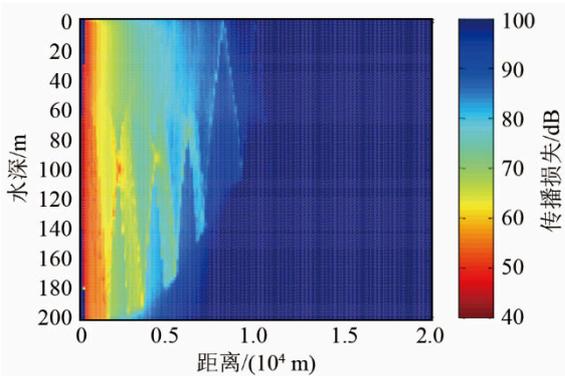
(c) 海底山体高度为 50 m 时的声线图



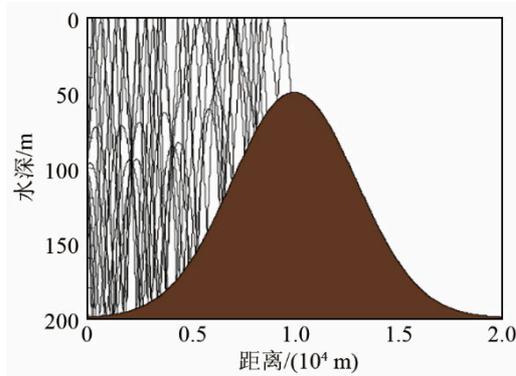
(d) 海底山体高度为 50 m 时的传播损失



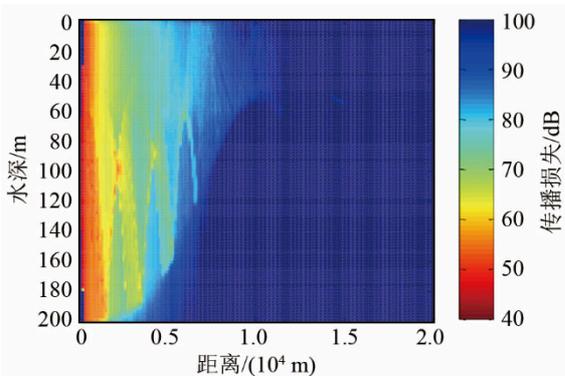
(e) 海底山体高度为 100 m 时的声线图



(f) 海底山体高度为 100 m 时的传播损失



(g) 海底山体高度为 150 m 时的声线图



(h) 海底山体高度为 150 m 时的传播损失

图 8 带有跃变层的声速剖面下不同海底山地高度情况下的声线图 and 声传播损失图

Fig.8 Ray trace maps and sound propagation loss maps under the sound velocity profile with a leaping layer and different heights of undersea mountain

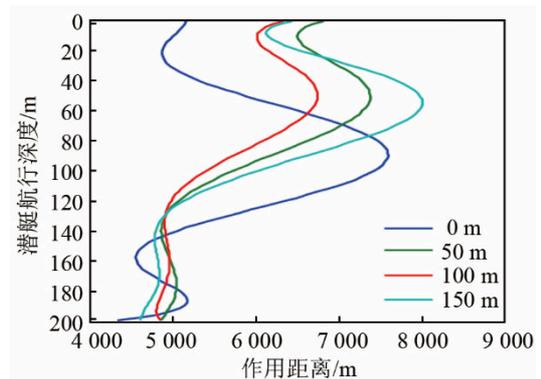


图 9 带有跃变层的声速剖面下海底山体高度对主动探测距离的影响

Fig.9 Influence of the height of undersea mountain on active detection distance under the sound velocity profile with a leaping layer

为声线在 0~60 m 时向上弯曲, 在 60 m 以下时向下弯曲。

当吊放声呐的深度为 80 m 时, 根据图 8 和图 9 可以得到两点结论:

(a) 山体以上区域。山体表面的存在, 导致向下传播的声线发生反射, 向海面聚集, 山体越高, 海面聚集的声线越多, 根据图 9 可以看出, 潜艇航行在 0~60 m 深度时, 随着山体高度的增加, 声呐装备在海面附近的作用距离也不断增加。

(b) 山体以下区域。由于山体的阻隔, 导致声线无法穿过山体到达海山的另一侧, 所以根据图 8(b)、8(d)、8(f)、8(h)可以看出, 在山体另一侧出现大面积的影区。

(2) 海底山体的出现会导致山体另一侧出现大面积的影区, 利于潜艇的规避。因此为了减少影区面积, 需要通过减少吊放声呐的入水深度来增加山体另一侧的声线数量, 进而提高吊放声呐的探潜效率。

2.2.2 海底地形为高斯分布的海盆

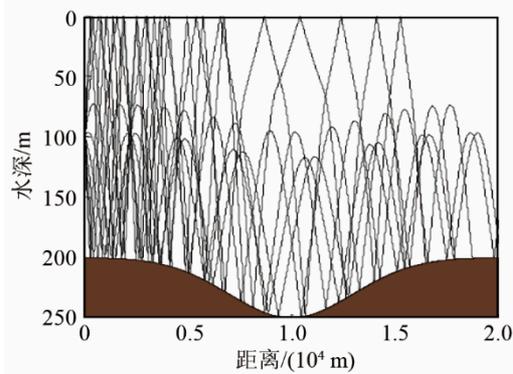
图 10 为海底海盆深度分别为 50、100、150 m 时声线传播和声传播损失图。由于深度为 0 时与海底山体相同, 将不在图 10 中列举。

图 11 为不同海盆深度对吊放声呐作用距离的影响。

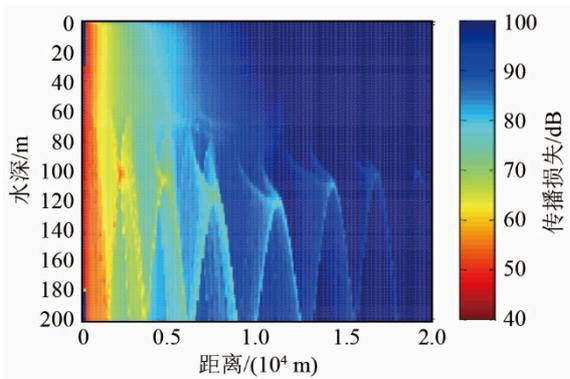
(1) 由于声线向下传播, 由图 10(a)、10(c)、10(e)可以看出, 随着海盆深度的不断增加, 海盆中的声线不断聚集, 在海盆上方海面形成了大面积的影区, 并且由于海盆对声线的吸收, 造成声线的数量在海盆的另一侧减少, 相对于平坦海底, 声呐设备的作用距离会随着海盆深度的增加不断降低。

(2) 从图 11 可以看出, 当海底平坦时, 吊放声

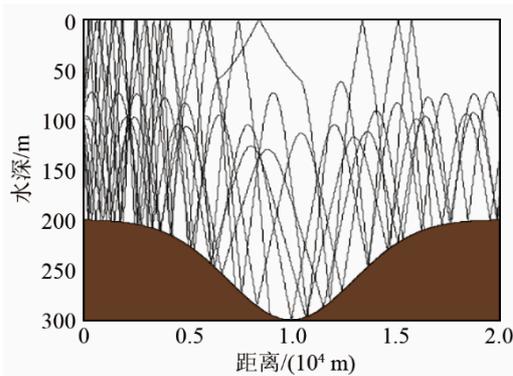
呐对处在同一平面的潜艇具有最大探测距离，当海底地形为海盆时，吊放声呐对航行在深度较浅的潜艇具有较大的探测距离，当潜艇航行深度较浅时，



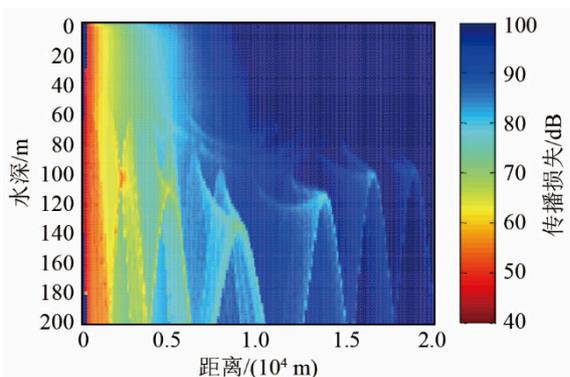
(a) 海盆深度为 50 m 时的声线图



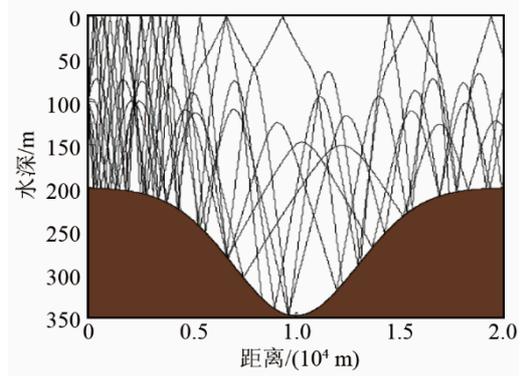
(b) 海盆深度为 50 m 时的传播损失



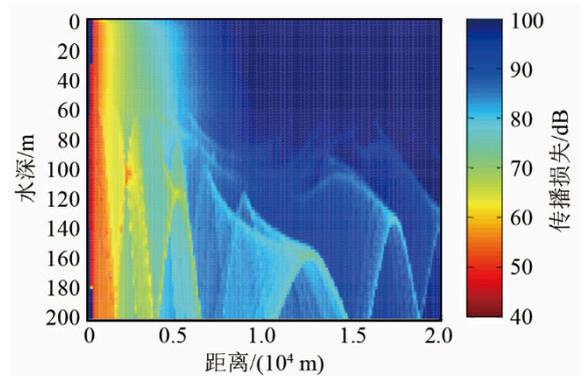
(c) 海盆深度为 100 m 时的声线图



(d) 海盆深度为 100 m 时的传播损失



(e) 海盆深度为 150 m 时的声线图



(f) 海盆深度为 150 m 时的传播损失

图 10 带有跃变层的声速剖面不同海盆深度和情况下的声线图 and 声传播损失图

Fig.10 Ray trace maps and sound propagation loss maps under the sound velocity profile with a leaping layer and different undersea basin depths

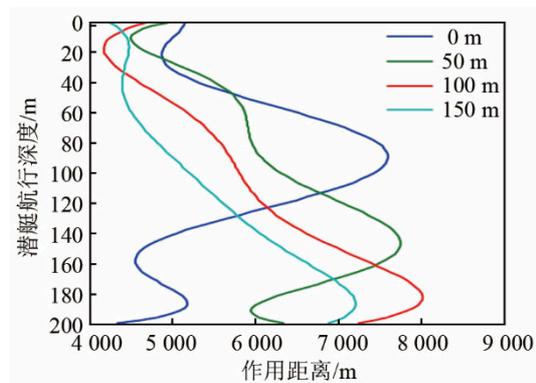


图 11 带有跃变层的声速剖面下海盆深度对主动探测的影响

Fig.11 Influence of undersea basin depth on active detection under the sound velocity profile with a leaping layer

会容易被反潜设备发现，因此为了躲避反潜设备的搜索，充分利用地形，潜艇应尽量航行在跃层以下，并且尽量避免与搜潜设备处在同一平面。

3 结论

本文通过分析浅海海底地形下声传播特性，利用射线声学模型仿真了不同高度和不同深度海底

山体、海盆两种典型地形下声传播特性和对吊放声呐主动探测距离的影响。同时根据声传播特性分析了不同地形下潜艇规避声呐设备搜索最有可能航行的区域,为后续反潜作战中如何最大概率地探测到潜艇提供了可行性方案。海底地形仅是影响声呐作用距离一个因素,在本文的基础上,考虑海面形状对声呐设备作用距离的影响将是下一步研究的重点。

参 考 文 献

- [1] 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[C]//中国声学学会第十一届青年学术会议会议论文集,2015.
- [2] 曲晓慧,曲鲁辉,单志超.典型声速剖面对吊声探测距离的影响研究[C]//中国声学学会水声学分会 2011 年全国水声学学术会议论文集,2011.
QU Xiaohui, QU Luhui, SHAN Zhichao. Influence of typical sound velocity profile on the sounding distance of crane[J]. Technical Acoustics, 2011, 34(4): 57-59.
- [3] 曲晓慧,单志超,陈建勇,等.深海声速剖面对吊放声呐探测距离的影响研究[J].计算机仿真,2012,29(5): 144-147.
QU Xiaohui, SHAN Zhichao, CHEN Jianyong, 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] 支绍龙.射线跟踪模型在吊放声纳性能预报中的应用研究[J].声学技术,2013,32(S1): 123-124.
ZHI Shaolong. Research of application of the beam tracing model in the performance prediction of dipping sonar[J]. Technical Acoustics, 2013, 32(S1): 123-124.
- [5] 韩引海,江国进,李春风.“海底山”地形的水下声传播分析[J].声学技术,2018,37(6): 545-548.
HAN Yin Hai, JIANG Guojin, LI Chunfeng. Analysis of underwater acoustic propagation under the terrain of “seabed mountain”[J]. Technical Acoustics, 2018, 37(6): 545-548.
- [6] 高学强,杨日杰,周旭.跃变层对主动声纳搜潜概率影响仿真研究[J].测试技术学报,2008,22(1): 55-58.
GAO Xueqiang, YANG Rijie, ZHOU Xu. Simulation research on the effects of thermocline on active sonar searching submarine[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2008, 22(1): 55-58.
- [7] 王辉.基于声线理论的水声信道传播特性研究[D].西安:西北工业大学,2003.
WANG Hui. Research on the features of underwater acoustic channel based on acoustic ray theory[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003.
- [8] 杨家轩,帅长庚,何琳,等.不同掠射角下 Bellhop 模型声学仿真及应用[C]//2015'中国西部声学学术交流会议论文集,2015.
- [9] 曲晓慧,喻荣兵,邱玮玮.浅海声速剖面对吊放声纳探测距离的影响[J].测试技术学报,2011,25(6): 471-476.
QU Xiaohui, YU Rongbing, QIU Weiwei. Effect of sound speed profiles in shallow sea on detection range of dipping sonar[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2011, 25(6): 471-476.
- [10] WAITE A D.实用声呐工程[M].王德石,译.北京:电子工业出版社,2004: 95-96.
Waite A D. Practical Sonar Engineering[M]. Wang deshi, trans. Beijing: ELECTRONIC INDUSTRY Press, 2004: 95-96.
- [11] 田坦.声呐技术[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2010.