

气幕对潜艇声屏蔽作用的数值计算

宋志杰 王 冰 徐世昌

(海军潜艇学院 青岛 266071)

1999 年 3 月 2 日收到

摘要 本文利用惠更斯-菲涅尔原理和虚源方法建立了均匀海水中障碍物后声传播损失的计算模型,对模型进行了数值实验验证,并与海上试验数据对比,得到了较为合理的结果。

关键词 声传播, 声屏蔽, 衍射

A numerical calculation of the acoustic shielding effect of air bubble screen on a submarine

Song Zhijie Wang Bing Xu Shichang

(Naval Submarine Academy, Qingdao 266071)

Abstract This paper presents a numerical calculation model of the transmission loss of acoustic field behind obstacles in homogeneous water based on Huygens-Fresnel principle and the method of virtual source. The model is verified through a numerical experiment, whose results agree quite well with the data of the marine practice.

Key words Acoustic transmission, Acoustic shielding, Diffraction

1 引言

潜艇在使用气幕弹对抗目标探测时,气幕弹产生的气幕对声波有较大的插入损失(高于20dB),从而对潜艇有声屏蔽作用。基于波动方程得出的各种声传播预报模型,如射线模型、简正波模型和抛物方程^[1]等,在计算海水中气幕后的声场时,只限于折射和界面的反射,未考虑声波的衍射。而气幕后的声场,尤其是气幕后较远处的声场,如不考虑衍射,预报结果会产生很大的误差。关于海水中的声衍射,文献^[2]用衍射声线的方法进行了定量描述。本文利用惠更斯-菲涅尔原理和虚源方法建立了均

匀海水中气幕后声传播损失的计算模型,对模型进行了数值实验验证,并与海上试验数据对比,得到了较为合理的结果。

2 声传播模型

按照惠更斯-菲涅尔原理,声源与场点之间任意闭合分割面 Σ 上的面元 $d\Sigma$,均可作为新的声源发出次级声波,场点处的声场是 Σ 面上所有面元 $d\Sigma$ 的贡献之和,见图1。 Σ 面上的面元 $d\Sigma$ 对场 $P(r, z)$ 点处声场的贡献,与面元的面积成正比,与面元到 $P(r, z)$ 的距离成反比,与入射声波对面元 $d\Sigma$ 的倾角 θ_0 有关,并

和面元 $d\Sigma$ 对场点 $P(r, z)$ 的倾角 θ 有关, 其方向因子 $\gamma(\theta_0, \theta)$ 由下式确定 [3]:

$$\gamma(\theta_0, \theta) = \frac{1}{2}(\cos \theta_0 + \cos \theta) \quad (1)$$

整个 Σ 面在场点 $P(r, z)$ 处产生的声场为 [4]:

$$\psi = C \int_{\Sigma} \frac{\alpha(\Sigma)\gamma(\theta_0, \theta)}{r_p} \cos[kr_p + \varphi(\Sigma)] d\Sigma \quad (2)$$

式中, $\alpha(\Sigma)$ 为分割面 Σ 上的振幅分布, $\varphi(\Sigma)$ 为分割面 Σ 上的相位分布, k 为波数, C 为比例系数。

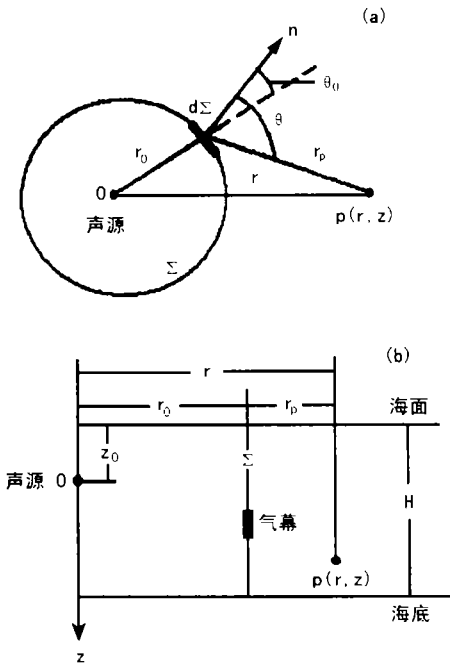


图 1 声传播模型示意图

(a) 水平剖面 (b) 深度剖面

假定分割面 Σ 为距离初级声源一定距离 r_0 上的圆柱面。在均匀海水的条件下, Σ 上声场分布可由虚源方法给出 [5]:

$$\begin{aligned} \psi(r_0, z) = & \sum_{I=0}^{\infty} (V_1 V_2)^I \left(\frac{e^{ikR_{I,1}}}{R_{I1}} \right. \\ & + V_1 \frac{e^{ikR_{I2}}}{R_{I2}} + V_2 \frac{e^{ikR_{I3}}}{R_{I3}} \\ & \left. + V_1 V_2 \frac{e^{ikR_{I4}}}{R_{I4}} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, V_1 和 V_2 分别为海底和海面反射系数; R_{Ii} 分别为各虚源到面元 $d\Sigma$ 的距离; $\psi(r_0, z)$ 为面元 $d\Sigma$ 处的声势, 它与声压之比为常数。分割面 Σ 上面元 $d\Sigma$ 在场点 $P(r, z)$ 处产生的声场仍可由虚源方法得出, 并考虑到面元 $d\Sigma$ 发射次级声波的方向性, 整个分割面 Σ 在场点 $P(r, z)$ 处产生的声场为:

$$\begin{aligned} \psi(r, z) = & C \int_{\Sigma} \psi(r_0, z) \sum_{m=0}^{\infty} (V_1 V_2)^m \\ & \left[\gamma(\theta_{0m1}, \theta_{m1}) \frac{e^{ikR_{m1}}}{R_{m1}} \right. \\ & + V_1 \gamma(\theta_{0m2}, \theta_{m2}) \frac{e^{ikR_{m2}}}{R_{m2}} \\ & + V_2 \gamma(\theta_{0m3}, \theta_{m3}) \frac{e^{ikR_{m3}}}{R_{m3}} \\ & \left. + V_1 V_2 \gamma(\theta_{0m4}, \theta_{m4}) \frac{e^{ikR_{m4}}}{R_{m4}} \right] d\Sigma \end{aligned} \quad (4)$$

场点 $P(r, z)$ 处的传播损失为:

$$TL(r, z) = 20 \log(C'' |\psi(r, z)|) \quad (5)$$

式中 C'' 包含了菲涅耳原理中的比例系数和声势与声压之间的比例系数。

当海水中有气幕存在时, 气幕后声场由透射声场 $\psi_{透}$ 与衍射声场 $\psi_{衍}$ 叠加而成, 透射声场 $\psi_{透}$ 与衍射声场 $\psi_{衍}$ 相互独立, 可以分别考虑。利用公式 (4) 和 (5) 可以计算 $\psi_{衍}$, 即把气幕作为非透声屏障, 取包含气幕的圆柱面为 $\Sigma(r_0)$ 当远大于气幕水平尺度时, 气幕可近似为圆柱面的一部分, 声源 O 位于圆柱面中心, $\psi_{衍}$ 取决于圆柱面上无气幕的部分, 公式 (2) 中的积分曲面为 $\Sigma - \Sigma_{幕}$, $\Sigma_{幕}$ 为气幕所占部分, 见图 1。

3 与虚源方法的对比实验

为检验上述模型的合理性, 取相同计算条件, 对比由上述模型和虚源模型所得的计算结果。给定海深 H 、声源深度 z_0 和接收深度 z , 为

简单计, 设边界为绝对硬海底和绝对软海面, 取距声源 r_0 处的圆柱面为积分曲面, 运用上述模型计算 $r(r > r_0)$ 处的声传播损失, 得声强随距离的变化曲线 $TL_2(r)$, 再用虚源模型直接计算, 得变化曲线 $TL_1(r)$, 对比两者可对上述模型进行数值验证。对比结果在图 2 中给出, 计算条件为海深 100m 的均匀海水, 声源深度 30m, 接收深度 30m, 圆柱面距声源 500m。分别对两组数据进行数值拟合, 可得声传播损失分贝差近似为一常数, 说明 $TL_1(r)$ 与 $TL_2(r)$ 有相同的变化规律, 表明了两种计算模型的一致性。两者的差值可确定 (5) 式中的比例系数 C'' 。

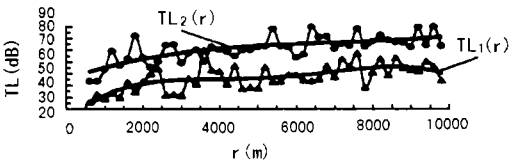


图 2 两个模型数值计算结果的对比

4 与海上试验数据对比

海上试验时, 试验海区深度 57m, 声速分布为均匀层; 探测声纳深度 7m, 水下静止, 与潜艇初始距离为 3600m; 潜艇航深 25m, 速度 6 节, 发射气幕弹形成了 45m 宽的气幕, 而后潜艇转向气幕后方等速直航。探测声纳测得潜艇噪声信号级 S, 可转换为各测点的声传播损失。图 3 分别给出了无气幕时虚源方法计算结果的拟合曲线、有气幕时二次虚源方法计算结果的拟合曲线和实测有气幕时的声传播损失曲线。

根据前述二次虚源模型, 在气幕后方, 影响传播损失随距离变化的因素有两个: 一是气幕的声屏蔽作用, 它是基于声波的衍射效应, 声源离气幕越远, 传播损失越小。二是由于界面反射、扩散和吸收等方面的影响, 使得气幕后的传播损失随距离增加而增加。综合考虑两个因素的影响, 当声源距离气幕较近时, 声波

的衍射效应起主要作用, 传播损失随距离增加而减小, 随着声源与气幕距离的增大, 声波的衍射效应越来越弱, 后一因素将起主要作用, 传播损失随距离增加而增加。

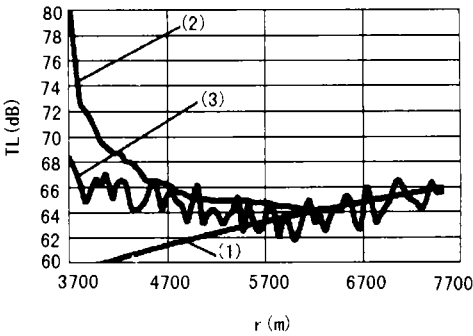


图 3 实测传播损失与数值模型计算结果的对比

- (1) 无气幕时虚源模型计算结果;
- (2) 有气幕时二次虚源模型计算结果;
- (3) 有气幕时实测结果;

分析图 3, 从实测有气幕时的声传播损失曲线可以看出: 在潜艇与气幕距离 (1000m 以内) 较近时, 声传播损失随距离增加呈较明显的衰减, 表明气幕的声屏蔽效果在近距离上较明显; 随潜艇与气幕距离的增大 (2000m 以内), 声传播损失随距离增加而衰减的趋势逐渐平缓, 表明气幕的声屏蔽效果变差; 当潜艇与气幕距离增大至一定值 (约 2000m) 后, 声传播损失随距离增加而增加, 表明气幕对潜艇不再具有声屏蔽作用。很明显, 这一试验结果与理论分析结果基本一致。

我们用气幕存在和不存在两种情况计算的传播损失差值作为气幕引起的附加传播损失, 其与虚源模型计算的传播损失之和作为总的传播损失 TL 。 TL 在较近距离范围内随距离增加而减小; 随着距离的增加, 这种减小趋势逐渐平缓; 当距离增加至某一数值后, TL 随距离增加而增加, 变化趋势与无气幕时虚源模型计算结果一致。在近距离上, 二次虚源模型与实测结果差别较大, 可能起因于把潜艇作为点源的假设。

5 讨论

- (1) 文献 [6] 给出气幕插入损失的测量结果, 其范围 26-50dB。而理论计算和海上实验结果都表明: 当接受位置位于气幕后方 3-5 倍幕宽后, 由气幕所导致的传播损失差就已经减小到 15dB 以下, 见图 3, 由此可见: 此时气幕后 $\psi_{衍}$ 远大于 $\psi_{透}$ 。因此, 在研究潜艇如何利用气幕屏蔽作用机动时, 可不考虑 $\psi_{透}$ 的影响。
- (2) 文中所建模型假定海水中的声速为均匀分布。因此, 该模型只适用于均匀海水。在非均匀海水中, 方向因子的表式和振幅与距离的反比关系都将发生变化, 模型的建立还有待于进一步工作。
- (3) 该模型有利于气幕弹使用方法优化, 不仅

适用于连续气幕, 也适用于离散的不连续气幕。

- (4) 该模型以虚源方法为基础, 不能反映频率变化的影响, 在其使用上有一定的局限性。

参 考 文 献

1 汪德昭, 尚尔昌. 水声学. 北京: 科学出版社, 1981. 445-462.

2 Brekhovskikh L M 著, 杨训仁译. 海洋声学. 第二版. 北京: 科学出版社, 1983. 125-127.

3 赵凯华, 钟锡华. 光学 (上册). 北京: 北京大学出版社, 1984. 186-190.

4 母国光, 战元龄. 光学. 北京: 人民教育出版社, 1978. 267-309.

5 Brekhovskikh L M 著, 杨训仁译. 分层介质中的波. 第二版. 北京: 科学出版社, 1985. 195-198.

6 钱祖文. 气幕插入损失的测量. 大连: 水声对抗会议交流论文. 1990.

~~~~~

(上接第 47 页)

3 Ericsson L. *NDT International*, 1992. **25**(2): 59-64.

4 李月. 粗晶超声检测中两种提高信噪比的方法. 硕士学位论文, 1985.

5 Li X. *IEEE Trans. UFFC*, 1992. **39**(2): 279-284.

6 Li X. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1993. **41**(6): 2067-2074.

7 Tian Q. *IEEE Trans. UFFC*, 1998. **45**(1): 251-256.

8 Zhu Y. *IEEE Trans. UFFC*, 1994. **41**(1): 26.

9 简晓明. 超声检测中信号处理研究. 博士学位论文, 1999.

10 Abbate A. *IEEE Trans. UFFC*, 1997. **44**(1): 14-25.

11 刘镇清. 声学学报, 1996. **21**(4 增刊): 714-725.

12 刘镇清. 声学学报. 1997. **22**(4): 297-302.

13 刚铁. 无损检测, 1995. **17**(9): 248-251.

14 Lorenz M. *NDT International*, 1993. **26**(3): 127-133.

15 Fukuda Y. Classification of ultrasonic flaw signal by means of time-frequency analysis, 14th WCNDT, Dec. 8-13, 1996: 2113-2116.

16 简晓明等. 声学学报, 1999. **24**(6): 637-644.

17 Burch S F. *NDT International*, 1986. **19**(3): 145-153.

18 MacNab A. *British Journal of NDT*, 1991. **33**(1): 11-18.

19 黄德双. 神经网络模式识别系统系统理论. 北京: 电子工业出版社, 1996.

20 Baker A R. *NDT international*, 1989. **22**(2): 97-105.

21 简晓明. 声学学报. 2000. **25**(1): 71-77.

22 Hayward G. *IEEE Trans. UFFC*, 1989. **36**(3): 356-363.