

单双层壳体潜艇的高频回波特性研究

王二庆¹, 卓琳凯², 王华奎¹

(1. 中国人民解放军 91388 部队, 广东湛江 524022; 2. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 针对鱼雷主动声自导频段范围内潜艇目标的亮点特征问题, 以 Benchmark 潜艇为模型, 利用板块元方法和频率间接法研究了鱼雷自导声纳工作频段范围内, 敷设吸声覆盖层前后单、双层壳体潜艇的回波亮点结构特征, 对比了不同频率时亮点的差异, 分析了敷设吸声材料对潜艇目标亮点结构特征的影响。研究表明, 双层壳体与单层壳体潜艇回波亮点的区别主要体现在艏艉附近角度, 两者在正横附近角度的差别则很小; 在潜艇表面敷设的吸声覆盖层对回波亮点抑制作用较大, 若鱼雷适当降低自导频段范围内发射信号的频率, 潜艇内部结构还是能产生清晰的亮点。

关键词: 潜艇; 吸声覆盖层; 回波特性; 鱼雷

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-05-0486-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.05.008

High-frequency echo characteristics of single and double shell submarine

WANG er-qing¹, ZHUO lin-kai², WANG hua-kui¹

(1. Unit 91388, PLA, Zhanjiang 524022, Guangdong, China;

2. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Based on the benchmark submarine model, the structural characteristics of highlight echoes of single and double shell submarines in the torpedo homing frequency range are studied with planar elements method. The difference of highlights at different frequencies is compared, and the influence of sound absorption material on the highlight echo is analyzed. The results show that the difference of highlight echoes between double shell and single shell submarines is reflected at the angles nearby bow and stern, while the difference in the vicinity of abeam is very little. The anechoic coating has great inhibitory effect on the highlight echo, but the highlight coming from the internal structures is also obvious as frequency decreasing.

Key words: submarine; anechoic coating; echo characteristic; torpedo

0 引言

在水声对抗中, 鱼雷通过识别目标的回波特性来识别目标, 声诱饵模拟水下目标来对抗鱼雷攻击, 潜艇通过敷设吸声覆盖层降低回波强度, 因此水下目标的回波特性是影响对抗效果的关键因素之一。加拿大 DRDC 用几何模型组合体表示水下目标, 研究了水下目标的回波特性^[1]。上海交通大学汤渭霖根据实际声纳系统多采用窄带信号这一事实, 利用“稳相法”^[2], 提出了潜艇的亮点模型。上海交通大学范军运用板块元方法和图形声学方法研究了水下目标回声特性^[3,4]。国内外的研究工作主要是针对单层壳体模型展开的。实际上, 潜艇

的结构比较复杂, 不少是双层壳体结构, 外表敷设吸声覆盖层。单层壳体潜艇的亮点结构特征已不能满足水声对抗的要求。为提高鱼雷、声诱饵、潜艇的水声对抗性能, 必须对双层壳体、敷设吸声覆盖层潜艇的回波亮点结构特征进行深入研究。

本文在 Benchmark 潜艇^[5]模型的基础上, 考虑加入常规潜艇内壳、实肋板等内部主要结构, 并在鱼雷主动声自导声纳的工作频段范围内, 仿真计算了不同频率时该潜艇模型作为单层壳体潜艇、双层壳体潜艇及其敷设吸声覆盖层前后的回波波形, 对比分析了各情况下目标亮点结构的变化。

1 复杂目标的散射函数计算方法

利用上海交通大学所建立的板块元方法^[3]对复杂目标的散射函数进行计算, 该方法的理论基础是

收稿日期: 2011-09-03; 修回日期: 2011-12-31

作者简介: 王二庆(1972-), 男, 河南汝州人, 硕士, 研究方向为水声信号处理。

通讯作者: 王二庆, E-mail: doanything@139.com

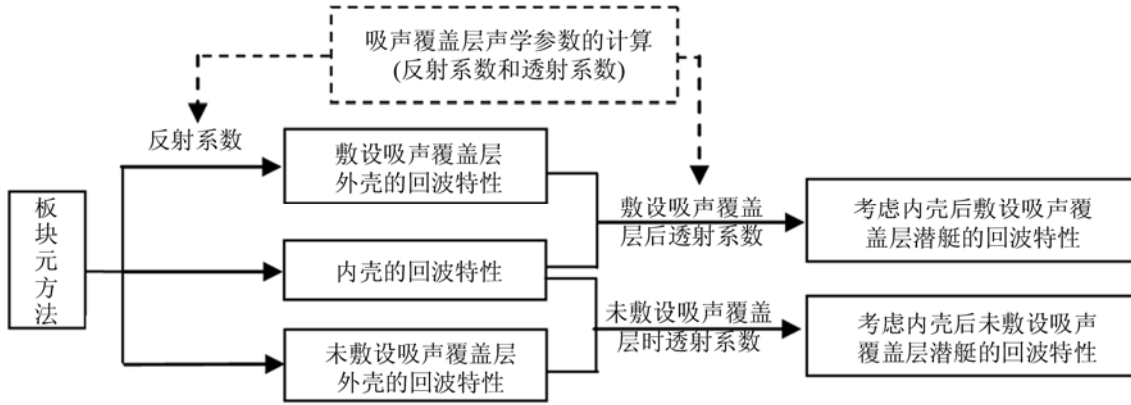


图 1 双层壳体结构的目标强度计算
Fig.1 Computation of target strength for double shell structure

Kirchhoff 近似方法, 对于一个形状复杂的水下目标, 当忽略时间因子 $e^{-i\omega t}$ 时, 入射声波势函数记为 $\varphi_i = (A/r_1)e^{ik_0 r_1}$, k_0 为波数, r_1 为目标距离, 收发合置情况下目标的散射特性可表示为

$$\varphi_s = \frac{-A}{2\pi} \int_{s_0} e^{ik_0 2r} V(\theta) \left(\frac{ik_0 r - 1}{r^3} \cos \theta \right) ds \quad (1)$$

式中: s_0 为目标在声波照射下的亮区部分, k_0 为波数, r 为目标位置矢径, $V(\theta)$ 为目标表面反射系数, θ 为声波入射方向与目标表面法向的夹角。板块元方法将目标表面划分成许多小面元, 上述积分变为一系列面元散射声场的矢量叠加。

根据有无吸声覆盖层, 单层壳体的散射函数利用板块元方法代入合适的反射系数直接可以求得。双层壳体的散射函数计算稍微复杂一些, 其回波结构认为是两层回波的组合^[6], 此时必须考虑外层壳体的反射和透射损失, 定义目标各个方位角度的反射系数为 $R(f, \theta)$, 透射系数为 $D(f, \theta)$, 其中模型敷设吸声材料前后的反射系数和透射系数利用分层介质下的传递函数模型求取。对潜艇外层壳体和内层壳体的散射函数分别计算, 考虑声波进入外壳后经过内壳反射再次透射过外壳进入外部水介质, 共经过两次外壳的透射, 目标整体散射形成的散射函数可以表示为

$$\varphi_s = \varphi_{s_outer} + D^2(f, \theta) \times (\varphi_{s_inner} + \varphi_{s_lei}) \quad (2)$$

式中: φ_{s_inner} 和 φ_{s_lei} 分别为外壳不存在时, 内壳及大的实肋板散射形成的散射函数; φ_{s_outer} 为外层壳体的散射函数。此类复杂双层结构在敷设吸声材料前后的目标强度的计算流程如图 1 所示。

2 吸声材料的结构和声学参数

潜艇表面的吸声覆盖层一般用橡胶制成, 并具

有一定的空腔结构, 其密度为 $\rho_v = 1140 \text{ kg/m}^3$, 泊松比为 $\sigma_s = 0.49$, 橡胶材料的杨氏模量 E 及其损耗因子 η 与频率有关, 一般由声管测试的复反射系数反演得到, 本文中由经典的拟合公式^[7]进行给出。

$$E = 1.102 \times 10^7 + 5447.2 f - 3.515 \times 10^{-2} f^2 \quad (3)$$

$$\eta = 0.401 + 1.21 \times 10^{-4} f - 3.29 \times 10^{-9} f^2 \quad (4)$$

复弹性模量为

$$\tilde{E} = E(1 - i\eta) \quad (5)$$

利用分层介质中波的散射理论^[8], 对由吸声材料和钢板组成的多层结构在水中的反射系数和透射系数进行计算, 计算中参数取值如下: 吸声材料的厚度为 $h_v = 50 \text{ mm}$, 钢板厚度为 $h_s = 8 \text{ mm}$, 水密度、声速分别为 $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ 和 $c_w = 1500 \text{ m/s}$, 钢板的物理参数^[9]如下: 密度为 $\rho_s = 7900 \text{ kg/m}^3$ 、杨氏模量为 $E_s = 2.07 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ 、泊松比为 $\sigma_s = 0.30$ 。

3 潜艇目标的回波特性计算和分析

选取 Benchmark 模型, 其建模结果如图 2 所示, 其中潜艇内壳仅考虑了 10 根实肋板, 在作为双层壳潜艇计算时, 外壳及大肋板的厚度取为 8mm。

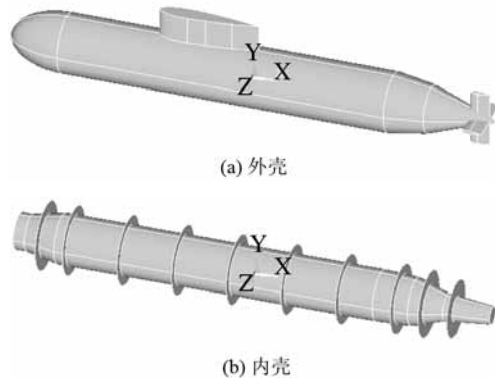


图 2 Benchmark 模型
Fig.2 The Benchmark submarine model

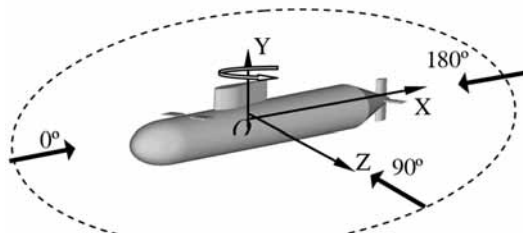


图3 方位角定义
Fig.3 The definition of azimuth angles

基于图3所示的坐标系，利用板块元方法计算潜艇模型的散射函数，并采用频率间接法^[10]对潜艇各方位的回波特性进行仿真，其中假设鱼雷主动声自导系统发射频率为30kHz的CW窄脉冲信号，仿真得到的潜艇模型回波亮点的角度距离二维伪彩图如图4所示。

图4中给出了敷设吸声覆盖层前后单层/双层壳体潜艇回波亮点特征的对比情况，从中可以得出以下结果：

(1) 相对于单层壳体潜艇模型，双层壳体潜艇的回波亮点更加丰富。当声波从潜艇的艇艏、艇艉方位入射时，即使信号频率为30kHz，双层壳体潜艇内部结构产生的回波亮点还是比较清晰的，但是在潜艇的正横附近，内部结构产生的回波亮点消失，双层壳潜艇模型与单层壳潜艇的回波亮点特征相似。

(2) 当潜艇表面敷设某种给定的吸声覆盖层以后，目标模型产生的回波亮点幅度被削弱，内部结构产生的回波亮点也变得难以辨别。

近年来，随着鱼雷自导系统的不断发展，鱼雷主动声自导的频率也在逐步降低，若假设鱼雷发射频率为10kHz的窄脉冲CW信号，仿真得到的潜艇模型回波亮点的角度距离二维伪彩图如图5所示。

由图5可见，当降低鱼雷主动声自导信号的频率后，由于声波的穿透能力增强，潜艇模型内部结构产生的回波亮点更加清晰，而且出现的角度范围更大，即使潜艇表面敷设文中给出的吸声材料，内部结构产生的回波亮点还是可以清晰辨别。

4 结 论

本文针对鱼雷主动声自导频段范围内潜艇目标的亮点特征问题，以Benchmark潜艇为模型，利用板块元方法和频率间接法对敷设吸声覆盖层前后单层/双层壳体潜艇的回波亮点结构进行了计算分析。双层壳潜艇内部结构产生的回波亮点主要在艇艏、艇艉附近，在正横附近单层/双层壳体潜艇的

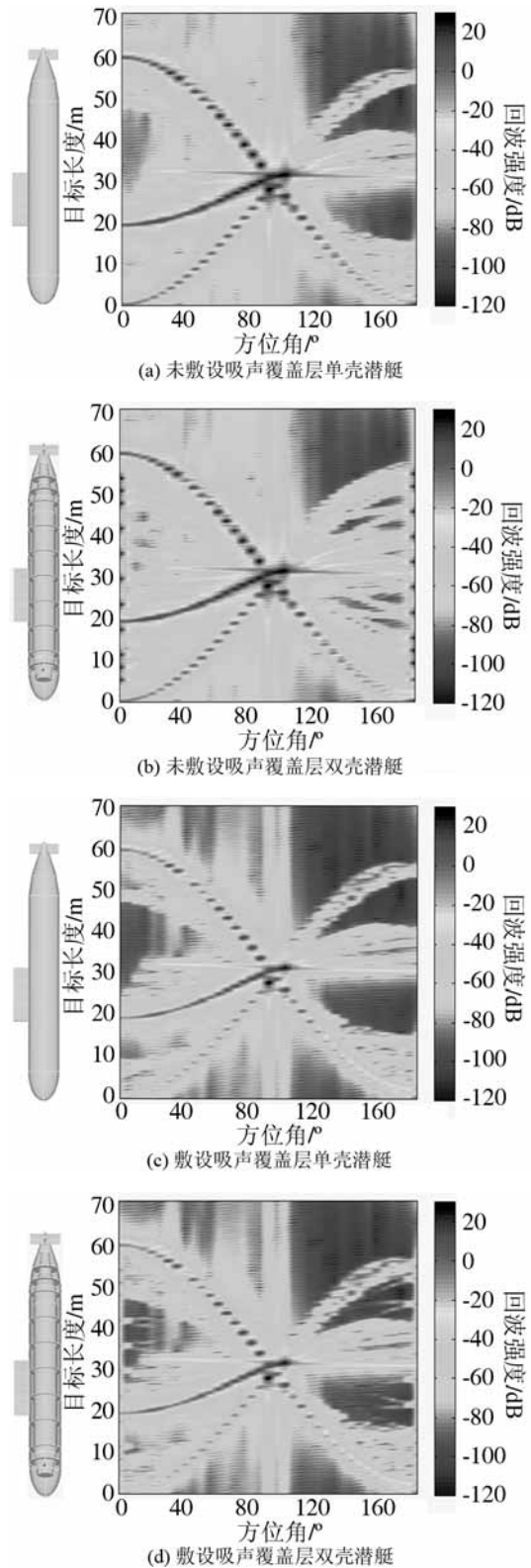


图4 潜艇回波亮点仿真结果($f=30\text{kHz}$)
Fig.4 Simulation results of highlight echoes from submarines of different structures ($f=30\text{kHz}$)

回波亮点结构差异很小；在潜艇表面敷设吸声覆盖层之后，回波亮点的幅度将被压制，但是艇艏、艇艉附近潜艇内部结构的回波亮点还是可以区别，若在鱼雷自导频段范围内适当降低发射信号的频率，

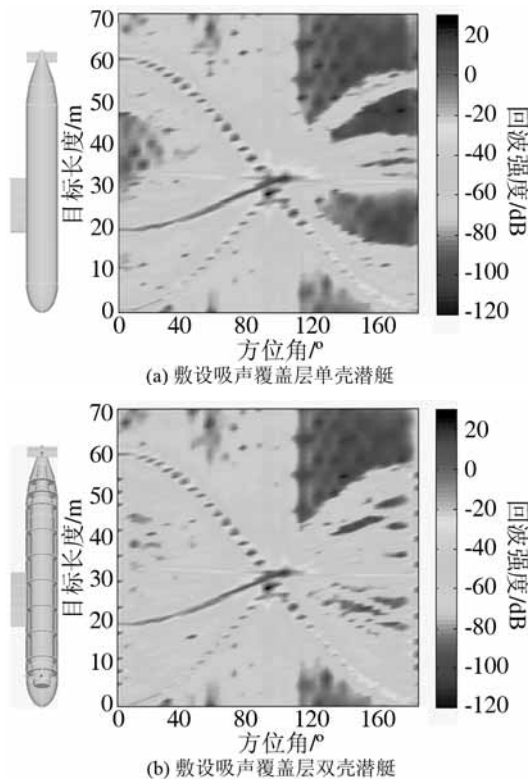


图 5 潜艇回波亮点仿真结果($f=10\text{kHz}$)
 Fig.5 The simulation result of highlight echo from submarine ($f=10\text{kHz}$)

潜艇内部结构的亮点特征将会被增强。

参 考 文 献

[1] Gilroy L E, Brennan D P. Predicting Acoustic Target Strength with

AVAST. DRDC Atlantic TM 2001-071. Defence R&D Canada-Atlantic; 2001.

[2] 汤渭霖, 声呐目标回波的亮点模型[J]. 声学学报, 1994, 19(2): 92-100.

[3] 范军, 汤渭霖. 声呐目标强度(TS)计算的板块元方法[J]. 声学技术, 1999, 24(z1): 31-32.

FAN Jun, TANG Weilin. The planar elements method for forecasting the echo characteristics from sonar targets[J]. Technical Acoustics, 1999, 24(suppl): 31-32.

[4] 范军, 卓琳凯. 水下目标回波特性计算的图形声学方法[J]. 声学学报, 2006, 25(6): 33-38.

FAN Jun, ZHUO linkai. Graphical acoustics computing method for echo characteristics calculation of underwater targets[J]. Acta Acustica, 2006, 25(6): 33-38.

[5] Christopher, W. Nell, Layton, E. Gilroy. An Improved BASIS Model for the BeTSSi Submarine[Z]. DRDC Atlantic TR 2003-199; November 2003.

[6] 汤渭霖, 范军. 水中双层弹性球壳的回声特性[J]. 声学学报, 1999, 24(2): 174-182.

TANG Weilin, FAN Jun. Echoes from double elastic spherical shell in water[J]. Technical Acoustics, 1999, 24(2): 174-182.

[7] 王仁乾, 马黎黎. 吸声材料物理参数优化的研究[J]. 声学技术, 2004, 23(2): 73-78.

WANG Rengian, MA Lili. Optimization of physical parameters of sound-absorbing materials[J]. Technical Acoustics, 2004, 23(2): 73-78.

[8] (苏)布列霍夫斯基赫. 杨训仁译. 分层介质中的波(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 1985, 33-37.

[9] Brennan D P. Further Enhancements to the high frequency target strength prediction capabilities of AVAST[Z]. Defence R&D Canada - Atlantic; August 2007.

[10] 万琳. 水下沉底目标和掩埋目标的回波特性研究[D]. 上海交通大学, 2003.

WAN Lin. Study on echo characteristics of bottom targets and buried targets[D]. Shanghai Jiaotong University, 2003.