

引用格式: 宋君才. 敷设某种吸声材料的声诱饵简化模型隔离度仿真计算[J]. 声学技术, 2020, 39(4): 430-433. [SONG Juncai. Simulated calculation of isolation degree for simplified acoustic decoy model laying a certain sound-absorbing material[J]. Technical Acoustics, 39(4): 430-433.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.04.008

# 敷设某种吸声材料的声诱饵简化模型 隔离度仿真计算

宋君才

(海军驻上海地区水声导航系统军事代表室, 上海 201108)

**摘要:** 随着水声电子对抗技术的不断发展, 对于声诱饵系统边收发技术的需求日益增强。实现边收发技术的难点之一在于如何增大声诱饵系统发射端与接收端的隔离度。由于高分子吸声材料对声能的吸收作用, 可以考虑采用在声诱饵接收端敷设吸声材料的方式, 对声诱饵系统的隔离度进行改善。利用有限元计算软件对简化的声诱饵模型的隔离度进行数值仿真计算, 分析声诱饵模型接收端敷设不同厚度的吸声材料时, 对声诱饵系统隔离度的影响。计算结果表明, 在声诱饵接收端敷设吸声材料时, 可以增大声诱饵系统发射端与接收端的隔离度; 当吸声材料达到一定厚度以后, 对声诱饵系统隔离度的影响几乎不变。

**关键词:** 声诱饵; 隔离度; 吸声材料

中图分类号: TB56

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2020)-04-0430-04

## Simulated calculation of isolation degree for simplified acoustic decoy model laying a certain sound-absorbing material

SONG Juncai

(Military Representative Office of Underwater Acoustic Navigation System of Navy in Shanghai Area, Shanghai 201108, China)

**Abstract:** With the continuous development of underwater acoustic electronic warfare technology, the demand for receiving-while-sending technology of acoustic decoy is increasing day by day. One of the difficulties in realizing this technology is how to increase the isolation between the transmitting end and the receiving end in the acoustic decoy. Due to the absorption of acoustic energy by polymer sound-absorbing material, the sound isolation in acoustic decoy can be improved by laying sound-absorbing material at the receiving end. The finite element software is used to simulate the isolation degree for the simplified acoustic decoy model. The effect of different thickness of sound-absorbing material on the isolation degree is calculated. The result shows that the isolation degree between the transmitting end and the receiving end can be improved by laying sound-absorbing material at the receiving end. And the effect on the isolation degree is almost unchanged when the sound-absorbing material reaches a certain thickness.

**Key words:** acoustic decoy model; isolation; sound-absorbing material

## 0 引言

随着水声电子对抗技术的不断发展, 对声诱饵系统的性能要求也日益增高。采用实时收发技术, 即边收发技术可以有效减少转发信号的时延, 提高声诱饵系统的模拟逼真度<sup>[1]</sup>。实现此技术的难点在于如何减小声诱饵发射端对于接收端的干扰, 即如何增大声诱饵发射端和接收端的隔离度。隔离度为从发射端到接收端的总损耗, 对于声诱饵系统,

可定义为声诱饵发射端到接收端的声压级损失。根据以往的经验, 增大声诱饵系统发射端与接收端隔离度的主要方式为增大声诱饵发射端与接收端距离的空间隔离、设计利用接收换能器和发射换能器的指向性隔离、利用声障板结构进行隔离以及发射信号的自适应抵消等<sup>[2]</sup>。

随着高分子水声吸声材料的发展, 也可以考虑采用在声诱饵发射端或接收端敷设吸声材料的方式, 对声诱饵系统的隔离度进行改善。吸声材料是指敷设在物体表面的特殊材料或特殊结构, 能够吸收入射声波的能量, 从而消除或减弱由物体表面产生的反射声波。吸声材料的吸声原理为: 一方面其结构的表面阻抗与介质的阻抗相匹配, 可以减少声诱饵表面的反射声波; 另一方面, 其材料内部存在

收稿日期: 2019-10-09; 修回日期: 2019-11-22

作者简介: 宋君才(1978—), 男, 吉林白城人, 硕士研究生, 研究方向为水下目标回波特性研究。

通讯作者: 宋君才, E-mail: 1770184643@qq.com

一定的内损耗，可以将声能转化为热能损耗掉<sup>[3]</sup>。根据以往的经验，在水下设备表面敷设吸声材料，可以有效地减弱其表面的反射回声。

本文对表面敷设某种吸声材料的声诱饵简化模型的隔离度进行了数值仿真计算。首先对吸声材料的吸声机理进行了简单介绍，接下来利用有限元软件建立简化的声诱饵模型，并对其隔离度进行数值仿真计算。在此基础上，计算在声诱饵模型接收端敷设不同厚度的吸声材料时，声诱饵系统的隔离度，从而分析声诱饵模型接收端敷设吸声材料的厚度对声诱饵系统隔离度的影响。计算结果表明，在声诱饵接收端敷设吸声材料时，可以增大声诱饵系统发射端与接收端的隔离度；但当吸声材料达到一定厚度以后，其厚度变化对声诱饵系统隔离度的影响几乎不变。

### 1 均匀弹性吸声材料吸声机理<sup>[4]</sup>

弹性吸声材料虽然在常温下为固态，但其某些力学性质却与固体材料有着明显的不同，而与高粘性液体更为相近。如弹性模量值只有金属弹性模量的几十万分之一，且其材料的内阻尼也比金属大。

与一般金属材料不同，根据高分子化学理论，橡胶等高分子聚合物弹性材料在外力的作用下会产生高弹性形变，具有极明显的弹性滞后现象，即高弹性形变会表现为弛豫过程。因此，当弹性形变在声波作用下，材料进行交替的压缩伸张形变时，会使得部分声能转变为热能被损耗掉，这便是由弹性弛豫作用引起的介质吸收。

设声波垂直入射至弹性材料表面，在材料中会产生压缩波。考虑材料中平行于其表面的一片无限大薄片，其两面受到材料其他部分作用的压力为  $p(x,t)$ 。由于粘弹性材料的弹性形变表现为弛豫过程，所以会使得其形变落后于加在其上应力的变化。因此，其形变相对应力会存在相位落后  $\delta$ ，于是长度变化  $\varepsilon(x,t)$  可以表示为

$$\varepsilon(x,t) = -\frac{1}{\kappa} p(x,t) e^{-i\delta} = -\frac{e^{-i\delta}}{\kappa} p(x,t) \quad (1)$$

式中， $p(x,t)$  为入射声波的声压； $\kappa$  为实数比例常数。

将式(1)改写为类似于胡克定律的形式：

$$p(x,t) = -(\kappa e^{i\delta}) \varepsilon(x,t) = -\tilde{E} \varepsilon(x,t) \quad (2)$$

式中， $\tilde{E}$  为动态弹性模量，将  $\tilde{E}$  展开可以得到：

$$\tilde{E} = \kappa e^{i\delta} = \kappa \cos \delta (1 + i \tan \delta) = E_\varepsilon (1 + i \eta) \quad (3)$$

其中： $E_\varepsilon = \kappa \cos \delta$ ，为纵向形变等效的弹性模量； $\eta = \tan \delta$  为材料的损耗系数，它直接决定介质的吸收系数。

式(3)表明，具有弹性滞后的弹性材料的动态弹性模型  $\tilde{E}$  为复数。

除弛豫过程引起的介质吸收外，弹性材料中存在的粘滞性吸收也会对声波有吸收作用，其吸收作用与稠密的粘滞性液体情况类似。

### 2 数值计算

利用有限元计算软件 COMSOL Multiphysics 对简化声诱饵模型进行数值仿真计算。首先建立简化的声诱饵计算模型。简化后的声诱饵模型具有二维轴对称结构，总长度为 3 m，壳体厚度 10 mm，材料为铝。发射换能器位于声诱饵尾部正下方 0.1 m 处，等效近似为一个半径 0.05 m 的小球，表面声压为 1 Pa (即发射端声压级为 120 dB)，计算频率为 10 kHz，接收端位于声诱饵模型头部。简化声诱饵模型示意图如图 1 所示。

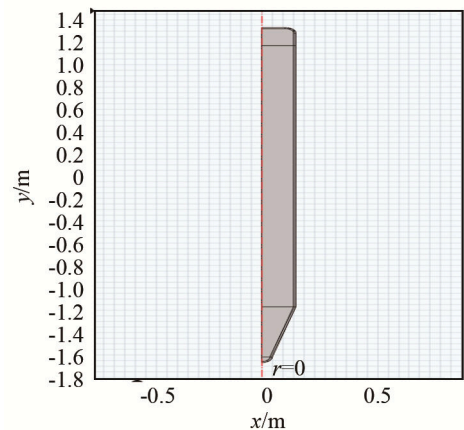


图 1 简化声诱饵模型示意图  
Fig.1 Diagram of simplified acoustic decoy model

计算声诱饵接收端未敷设吸声材料时，声诱饵表面附近区域的声场分布情况，结果如图 2 所示。图 2 中圆圈标识位置为声诱饵头部附近声场，即为

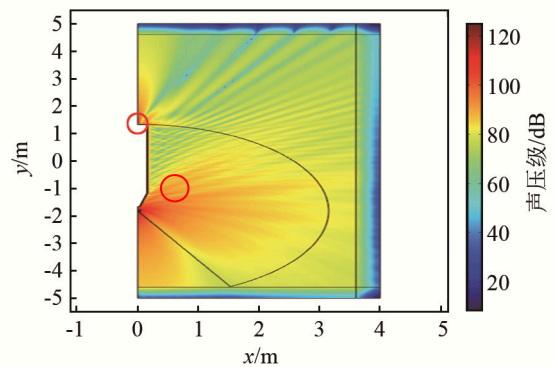


图 2 声诱饵模型表面附近区域声场计算结果  
Fig.2 Calculation of sound field near the surface of acoustic decoy model

观察区域。单独计算出声诱饵接收端即声诱饵头部处的声压级为  $L_p = 111.9$  dB，此时的隔离度为  $-8.1$  dB。

接下来计算在声诱饵系统接收端敷设某种吸声材料时，接收端的声压级。所敷设的吸声材料的泊松比与橡胶接近，同时根据第1节的推导过程可以知道，其弹性模量为一复数，且数值远小于金属材料。

为了计算敷设的吸声材料厚度对声诱饵系统隔离度的影响，分别计算声诱饵系统接收端敷设吸声材料厚度为 10、20 mm 和 30 mm 时，声诱饵系统接收端的声压级。敷设吸声材料的示意图和计算结果分别如图 3 和图 4 所示。图 3 中蓝色部分为在声诱饵接收端处敷设的吸声材料。

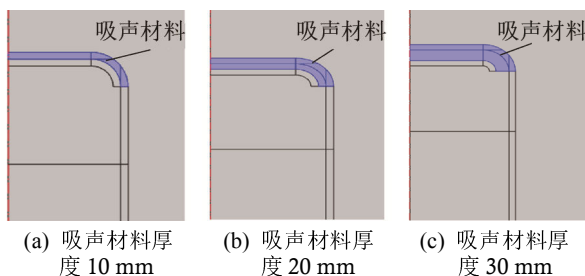
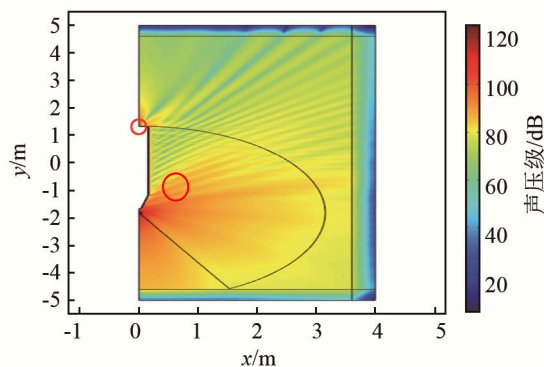
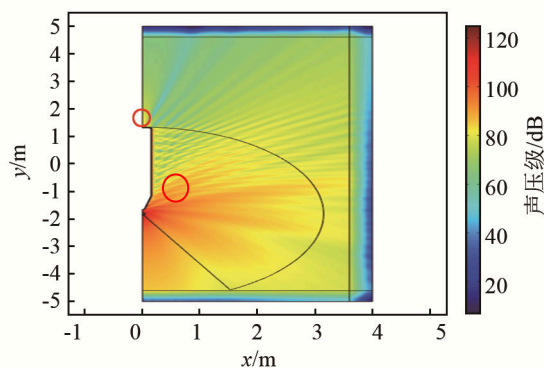


图 3 接收端敷设不同厚度吸声材料示意图

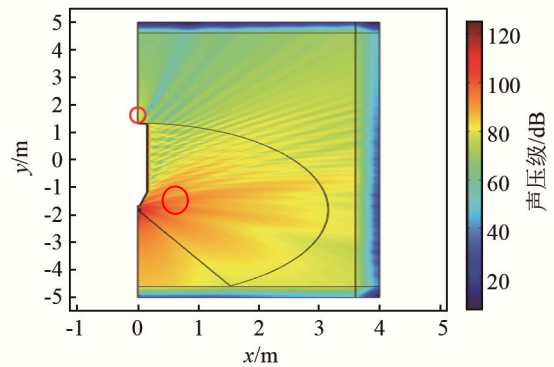
Fig. 3 Diagrams of the sound-absorbing material with different thickness laid at the receiving end



(a) 吸声材料厚度 10 mm



(b) 吸声材料厚度 20 mm



(c) 吸声材料厚度 30 mm

图 4 敷设不同厚度吸声材料后接收端的声压级分布云图  
Fig. 4 Nephograms of sound pressure level at the receiving end after laying sound-absorbing material of different thickness

将图 4 的计算结果与图 2 中的计算结果进行对比。可以看出，声诱饵头部敷设吸声材料后，图 4 中圆圈所标识的观察区域内即声诱饵头部附近的声压级明显地减小，且当所敷设的吸声材料厚度分别为 20 mm 和 30 mm 时，其声压级明显小于敷设吸声材料厚度为 10 mm 时的声压级。为了更准确地得到吸声材料厚度对声诱饵系统隔离度的影响，下面单独计算出声诱饵接收端即声诱饵头部处的声压级，并将结果与未敷设吸声材料时的计算结果对比，结果如表 1 所示。

表 1 敷设不同厚度吸声材料时接收端声压级

Table 1 Sound pressure levels ( $L_p$ ) at the receiving end after laying sound-absorbing material of different thickness

吸声材料厚度/mm	$L_p$ /dB	与未敷设吸声材料时声诱饵头部声压级差值/dB	隔离度/dB
10	97.1	14.8	-22.9
20	80.7	31.2	-39.3
30	80.1	31.8	-39.9

根据表 1 的计算结果，可以得到与图 4 中计算结果一致的结论，即在声诱饵系统接收端敷设吸声材料时，接收端声压级较未敷设吸声材料时明显减小，隔离度有明显改善。当吸声材料厚度为 10 mm 时，接收端声压级较未敷设吸声材料时减小 14.8 dB；当吸声材料厚度为 20 mm 时，接收端声压级较未敷设吸声材料时减小 31.2 dB；当吸声材料厚度为 30 mm，接收端声压级较未敷设吸声材料时减小 31.8 dB，与接收端敷设吸声材料厚度为 20 mm 时相比，其声压级变化不明显。

### 3 结论

本文首先对弹性材料的吸声机理进行了简单

的介绍和推导。弹性材料中的弹性弛豫吸收和粘滞性吸收可以将声能转化为热能损耗掉, 具有弹性滞后的弹性材料的动态弹性模型为复数, 其虚部为材料的损耗系数, 直接决定了介质的吸收系数。然后建立了表面敷设某种吸声材料的声诱饵简化模型隔离度数值仿真计算模型, 简化后的声诱饵模型具有二维轴对称结构, 声诱饵头部所敷设吸声材料的泊松比与橡胶接近, 且其弹性模量为复数, 数值远小于金属材料。利用该模型, 分别计算了声诱饵系统接收端未敷设吸声材料时和分别敷设 10、20 mm 和 30 mm 厚的某种吸声材料时声诱饵头部附近区域的声场和接收端声压级。计算结果表明, 在声诱饵接收端敷设吸声材料时, 其接收端声压级较未敷设时明显减小, 声诱饵系统发射端与接收端的隔离度增大; 当吸声材料厚度分别为 10 mm 和 20 mm 时, 接收端声压级较未敷设吸声材料时分别减小 14.8 dB 和 31.2 dB; 但当吸声材料厚度继续增加至 30 mm 时, 接收端声压级减小 31.8 dB, 与接收端敷设吸声材料厚度为 20 mm 时相比无明显变化。这说明当声诱饵头部敷设吸声材料厚度达到一定后, 再继续增加其厚度, 将不会对声诱饵头部处的声压级产生明显影响, 对声诱饵系

统的隔离度改善也不会产生明显影响。

本文在计算模型中进行了简化处理, 仅考虑发射端声压级到达接收端时的能量损耗(声压级的降低), 尚未计及接收端敷设吸声材料后对接收端接收灵敏度的影响。考虑到声诱饵的工作原理, 这将作为下一步的研究内容开展。

#### 参 考 文 献

- [1] 王守义. 智能声诱饵第一类边发边收方案及信号处理技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.  
WANG Shouyi. Study on the schemes and signal processing of the intelligent underwater acoustic decoy with the transmitting-while-receiving function of class one[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009.
- [2] 周益明, 王建中, 张涛. 一种新型声隔离系统[J]. 声学技术, 2013, 32(6): 519-623.  
ZHOU Yiming, WANG Jianzhong, ZHANG Tao. A new acoustic isolation system[J]. Technical Acoustics, 2013, 32(6): 519-623.
- [3] 王清华. 高分子水声吸声材料的基础研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.  
WANG Qinghua. The basic study on water acoustic absorption polymer materials[D]. Changsha: University of Defense Technology, 2009.
- [4] 何祚镛, 赵玉芳. 声学理论基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.