水下复合层吸声结构中反向声能与 振动能量传输的研究

王 曼 何祚镛

(哈尔滨工程大学 哈尔滨 150001) 1995 年 8 月 23 日收到

摘要 本文对文献[1,2]所讨论的水下复合层吸声结构中能量的反向传输进行了研究.利用多层结构的传递矩阵求逆,导出声能和振动能的反向传输关系,给出传递损失.数值计算分析了结构的各 层参数变化对能量传递损失的影响.

关键词 水声,吸声结构,反向能量传输

Investigation of inverse energy transmission in composite sound absorption structures in water

Wang Man, He Zuoyong

(Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract In this paper, inverse energy transmission in composite sound absorption structures mentioned in references [1] and [2] is investigated. By inversion of transfer matrixes of the composite structures, relations describing the inverse transmission of sound energy and of vibrational energy are deduced. The transmission losses of sound intensity and of vibrational power per unit area are calculated, and their variations with the parameters of each structure layer are analysed.

Key words Underwater acoustics. Sound absorption structure. Inverse energy transmission

1 引言

• 14 •

结构表面粘贴吸声复盖的主要作用是消减 反射声,我们曾对一些复合层结构消反射声的 特性进行了较详细的研究^[1,2].在实际应用中, 常希望吸声复盖能对结构本身振动引起的声辐 射起到抑制作用,因而了解吸声结构的反向能 量传输特性也很有意义.为此,本文对文献 [1]中所讨论的包含均匀吸声橡胶复盖的多层 均匀结构以及文献[2]中包含打有截面变化孔 的非均匀吸声复盖的多层结构的反向能量传输 过程进行了研究.对声波由结构后面入射以及 在后界面施加均匀力激励两种情况下,声能和 振动能的反向传递损失进行了数值计算;还对 结构有无橡胶吸声层的情况以及吸声层为均匀 橡胶板或穿有非均匀孔的橡胶板情况下的传递

16 卷 3 期

损失分别做了对比.

本文研究三种典型结构. 它们前面为水, 后面为空气:

(1) 钢板-水层-钢板,是未粘贴吸声复盖。 的结构,(图1(a)).

(1)中结构的前界面加均匀复盖层,(图1(b)).

(3) 非均匀橡胶吸声复盖-钢板-水层-钢 板,是(1)中结构的前界面粘贴非均匀的橡胶 吸声复盖层,(图1(c)).所谓非均匀吸声复盖 包含三层橡胶板, 第一层不穿孔, 第三层穿均 (2) 橡胶吸声复盖-钢板-水层-钢板,是 匀圆柱孔,第二层中穿孔的截面随深度变化.





图 1 三种典型的复合层结构 (a) 钢板-水-钢板 (b) 橡胶板-钢板-水-钢板 (c) 非均匀橡胶板-钢板-水-钢板

2 理论关系式 $T = 1/D, D = I_o/I_o$

2.1 吸声结构反向声能传递损失和振动能传 递损失定义

吸声结构的反向传声损失T,定义为声强 传声系数 D 的倒数

或定义反向隔声指数

 $TL_a = 10 \lg(1/D) = 10 \lg(I_i/I_a)$ (1)

式中, I, ——吸声结构后面空气介质中入射声 强度;

I.——吸声结构前面水中的声强度.

吸声结构的反向振动能传递损失级,或称

• 15 •

应用声学

$$TL_{\mathcal{M}} = 10 \lg(I_{\mathcal{M}}/I_o) \tag{2}$$

式中, *I_M* ——吸声结构后界面受力激励时, 单位面积激振机械功率.

2.2 单层介质的反向传递矩阵

对无限大的多层结构,截取一个长方体单 元,按波导理论计算^[2],对单一均匀介质层或 单元截面满足(\sqrt{S})"/ \sqrt{S} 为常数 μ_2 的非均 匀介质层,其正向传递矩阵为

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ u_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} F_2 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A \end{bmatrix} \begin{pmatrix} F_2 \\ u_2 \end{pmatrix}$$
(3)

式中, F_1 、 u_1 和 F_2 、 u_2 分别为介质层前、后界面的力和质点振速; [A]为层的传递矩阵.对钢板或水层, [A]中各元素为

$$a_{11} = a_{22} = \cos(kl) a_{12} = j\rho c S \sin(kl)$$
(3-1)

 $a_{21} = j\sin(kl) / \rho c S$] $(S=d^2, d$ —单元边长,也等于孔的间距)

对均匀橡胶板或带有孔但孔径不变的橡胶层, [A]中各元素为

$$a_{11} = a_{22} = \cos(\bar{k}l)$$

$$a_{12} = j\rho\bar{c}S\sin(\bar{k}l)$$

$$a_{21} = j\sin(\bar{k}l)/\rho\bar{c}S$$

$$(S = d^2 - \frac{\pi}{4}\varphi^2, \varphi - \mathcal{I}\mathbb{E}) \quad (3-2)$$

式中, \tilde{k} 为复数波数, $\tilde{k} = -, \tilde{c} = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$

 $\tilde{E} = E(1+j\eta), \eta$ 为材料的损耗因子. 对带有截面变化的孔的橡胶层, [A]中各

$$a_{11} = \sqrt{\frac{S_{1}}{S_{2}}} \left[\cos(\tilde{K}l) + \frac{(\frac{dS}{dx})_{1}}{2\tilde{K}S_{1}} \sin(\tilde{K}l) \right]$$

$$a_{12} = \frac{j\rho\tilde{c}\sqrt{S_{1}S_{2}}}{\tilde{k}} \left\{ \frac{\cos(\tilde{K}l)}{2} \left[\frac{(\frac{dS}{dx})_{2}}{S_{2}} - \frac{(\frac{dS}{dx})_{1}}{S_{1}} \right] + \sin(\tilde{K}l) \left[K + \frac{(\frac{dS}{dx})_{1}(\frac{dS}{dx})_{2}}{4\tilde{K}S_{1}S_{2}} \right] \right\}$$

$$a_{21} = \frac{j\tilde{k}\sin(\tilde{K}l)}{\tilde{K}\rho\tilde{c}\sqrt{S_{1}S_{2}}}$$

$$a_{22} = \sqrt{\frac{S_{2}}{S_{1}}} \left[\cos(\tilde{K}l) - \frac{(\frac{dS}{dx})_{2}}{2\tilde{K}S_{2}} \sin(\tilde{K}l) \right]$$
(3-3)

元素为

• 16 •

式中,
$$\psi_1$$
、 ψ_2 为介质层单元前、后的孔径
 $S_1 = d^2 - \frac{\pi}{4} \psi_1^2$, $S_2 = d^2 - \frac{\pi}{4} \psi_2^2$,
 $\left(\frac{dS}{dx}\right)_1 = \left(\frac{dS}{dx}\right)\Big|_{x=0}$, $\left(\frac{dS}{dx}\right)_2 = \left(\frac{dS}{dx}\right)\Big|_{x=l}$,
 $\widetilde{K} = \sqrt{k_2 - \mu^2}$
对(3)式求逆,得

$$\begin{pmatrix} F_2 \\ u_2 \end{pmatrix} = [A]^{-1} \begin{pmatrix} F_1 \\ u_1 \end{pmatrix} = \frac{1}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}} \begin{bmatrix} a_{22} & -a_{12} \\ -a_{21} & a_{11} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} F_1 \\ u_1 \end{pmatrix}$$
(4)

可以征明,无论材料有无损耗、均匀或非均 匀,由(3-1)、(3-2)和(3-3)式均可得 $a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} = 1$,于是(4)式可以写成

$$\binom{F_2}{u_2} = \begin{bmatrix} a_{22} & -a_{12} \\ -a_{21} & a_{11} \end{bmatrix} \binom{F_1}{u_1}$$
(4)'

当空气声从结构后面入射,或当在后界面施加 均匀分布的激励力时,有

$$\begin{vmatrix} u'_1 = -u_1 \\ u'_2 = -u_2 \end{vmatrix}$$
 (5)

则由(4)'式得单层介质的反向传递矩阵为

$$\begin{pmatrix} F_2 \\ u'_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} a_{22} & a_{12} \\ a_{21} & a_{11} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} F_1 \\ u'_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} C \end{bmatrix} \begin{pmatrix} F_1 \\ u'_1 \end{pmatrix}$$
(6)

2.3 多层介质的反向传递矩阵

由各层交界面上总压力连续,材料接触面 上质点振速连续的边界条件^[2],将各单层介质 的反向传递矩阵相联,得到整个结构的反向传 递矩阵,为

$$\begin{cases} F_{N+1} \\ u'_{N+1} \end{cases} = \begin{bmatrix} C^{(N)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C^{(N-1)} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} C^{(1)} \end{bmatrix} \begin{cases} F_1 \\ u'_1 \end{cases} = \begin{bmatrix} D \end{bmatrix} \begin{cases} F_1 \\ u'_1 \end{cases}$$

$$= \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} \begin{cases} F_1 \\ u'_1 \end{cases}$$

$$(7)$$

16卷3期

2.4 多层结构的反向传声损失

对所截取的单元,截面积 $S_1 = S_{N+1} = d^2 =$ S,则

$$p_{1} = \frac{F_{1}}{S}$$

$$p_{N+1} = \frac{F_{N+1}}{S}$$
(8)

空气声由多层结构后面入射时,后界面边界条 件为

$$p_{N+1} = p_i(1+R)$$

$$u_{N+1} = u_i(1-R)$$

$$p = \rho_i \cdot u_i$$
(9)

式中p为空气中入射波声压,R为后界面的反 射系数.

多层结构前面为水,故其端面边界条件为

$$\frac{p_1}{u_1} = \rho_u c_u \tag{10}$$

以上各式中, ρ_{ulu} 和 ρ_{ulu} 分别为空气和水的特 性阻抗.

由(7)-(10)式,得多层结构后界面的输 入阻抗 Zi 和反射系数 R

$$Z_{i} = \frac{p_{N+1}}{u_{N+1}} = \frac{S\rho_{u}c_{u}d_{11} + d_{12}}{S(S\rho_{u}c_{u}d_{21} + d_{22})}$$
(11)

$$R = \frac{Z_1 - \rho_a c_a}{Z_1 + \rho_a c_a} = \frac{(S\rho_u c_u d_{11} + d_{12}) - S\rho_a c_a (S\rho_u c_u d_{21} + d_{22})}{(S\rho_u c_u d_{11} + d_{12}) + S\rho_a c_a (S\rho_u c_u d_{21} + d_{22})}$$
(12)

并且

$$p_{t} = \frac{p_{N+1}}{1+R} = \frac{p_{N+1}}{2} \left[1 + \frac{S\rho_{a}c_{a}(S\rho_{u}c_{u}d_{21} + d_{22})}{S\rho_{u}c_{u}d_{11} + d_{12}} \right]$$
(13)

则结构后界面入射波声强为

$$I_{t} = \frac{(p_{t})^{2}}{2\rho_{a}c_{a}} = \frac{|p_{N+1}|^{2}}{8\rho_{a}c_{a}} \left| 1 + \frac{S\rho_{a}c_{a}(S\rho_{u}c_{u}d_{21} + d_{22})}{S\rho_{u}c_{u}d_{11} + d_{12}} \right|^{2}$$
(14)

由(7)、(8)两式得结构前界面

$$p_1 = \frac{p_{N+1}}{d_{11} + d_{12}/(S\rho_w c_w)}$$
(15)

则水中的透射波声强为

$$I_{o} = \frac{|p_{1}|^{2}}{2\rho_{w}c_{w}} = \frac{|p_{N+1}|^{2}S^{2}\rho_{w}c_{w}}{2|S\rho_{w}c_{w}d_{11} + d_{12}|^{2}} \quad (16)$$

将最后二式代入(1)式,得结构的反向传声损 失

$$TL_{a} = 10 \lg [|(S\rho_{w}c_{w}d_{11} + d_{12}) + S\rho_{a}c_{a}(S\rho_{w}c_{w}d_{21} + d_{22})|^{2}/(4S^{2}\rho_{a}c_{a}\rho_{w}c_{w})]$$

2.5 多层结构的反向振动能传递损失

设在结构后界面受均匀的单频力激励,压 力幅值 *p*_{N+1}为常数. 这时结构后界面上单位面 积输入的机械功率为

$$I_{M} = \frac{|p_{N+1}|^{2}}{2|Z_{i}|^{2}}R_{e}(Z_{i})$$
(18)

而结构前界面的边界条件及透射波声强仍分别 为(10)式和(16)式,将(16)和(18)式代人(2) 式,得结构的振动能反向传递损失

 $TL_{M} = 10 \log[R_{e}(Z_{i}) | S\rho_{u}c_{u}d_{21} + d_{22} |^{2} / (\rho_{u}c_{w})]$ (19)

多层结构反向能量传递损失的数值 3 计算与分析

3.1 数值计算模型

用计算机模拟,数值计算了图1(b)、(c) 所示的均匀多层结构和非均匀多层结构中声能 和振动能的反向传递损失.为便于对结构粘贴 吸声复盖前后的传递损失做对比,又计算了图 1(a)未粘贴吸声复盖的结构,即钢板-水层-钢 板三层结构的声能和振动能反向传递损失. 各 层的材料参数和尺寸见表 1. 橡胶板复盖层总 厚度为4,在非均匀结构中它由三层橡胶板组 成,厚度分别为 l11、l12和 l13. 表1 中各层的厚 度都用其与4、的比值来表示.

橡胶板中打孔的间距与复盖层厚之比 d/l, =0.19, 且非均匀打孔层前、后端孔径与复盖 层之比分别为 $\phi_1/l_s=0.028$ 和 $\phi_2/l_s=0.14$,均 匀打孔层的孔径为 ϕ_{n}

3.2 计算结果及分析

对三种结构,分别以 l。与水中波长 Au 之 比的 4 倍 4 l_s/λ_w 为变量, 计算 TL_a 和 TL_M 的 频响曲线.

为分析吸声结构诸参数对能量传输的影 响,改变吸声复盖层中穿孔板厚度112,或改变 吸声材料声速、密度和损耗系数的数值, 它们 分别增大或减小20%时,计算TL。和TL,值, 并加以对比:

(1) 钢板-水层-钢板三层结构的传声损失 (17) 均大于 30 dB(图 2). 表明,即使没有吸声复盖

• 17 •

应用声学

层	材	材料参数[3] 各层厚度与1、之比					
序		声速 c	密度ρ	损耗系数	三层	四	层结构
号	料	(m s)	(kg/m ³)	η	结构	均匀	非均匀
							均匀层 0.028
1	橡胶	1470	1039	0.49		1.0	非均匀打孔层 0.094
							均匀打孔层 0.028
2	钢	5941	7840	0.00	0.083	0.083	0.083
3	水	1500	1000	0.00	4.17	4.17	4.17
4	钢	5941	7840	0.00	0.28	0.28	0.28

表1 多层吸声结构各层尺寸及材料参数

层,夹水层的钢板结构,空气声向水中传出去 的能量也是微乎其微的.当频率很低时,四层 的均匀或非均匀结构的传声损失与三层结构的 值相等,这时因为低频声在吸声层中传播时的 衰减很小,传声损失主要决定于三层结构后界 面的反射损失.而在较高频,四层结构比三层 结构的传声损失更大,且其差随频率升高而增 大,即粘贴吸声复盖后,多层结构的传声损失 增大,且随频率升高,因吸声层中声吸收增大 而增大.吸声层打孔后,结构的传声损失比不 打孔的均匀结构还略有增大. 层越厚, 共振峰越密(图略), 进而证明以上结 论可靠. 由图还可见, 加吸声复盖后, 可补偿 由于水层共振对传声损失的负影响.

(3)分别改变吸声层材料声速或损耗系数时,由于声波在吸声层中的传播衰减因子 *exp* (-η, ω/c₁l₁)随着η,增大而增大,随着c₁减小而 增大,故声速减小或损耗增大时,传声损失都 增大(图 3).另外,吸声材料的密度变化对传 声损失几乎没有影响(图略).





(2)由图2可见,三层和四层结构的传声 损失频响中都出现许多共振峰,使传声损失减 小.而在同一图内曲线(4)所给出的橡胶板-钢 板二层结构的传声损失频响中却没有共振峰, 证明三层和四层结构的共振峰是由于结构中间 存在水层引起的.还试改变水层厚度发现,水 ·18·



反向传声损失的影响 (1) $\eta_1 = 0.49, c_1 = 1470 \text{ m/s}$ (2) $\eta_1 = 0.59, c_1 = 1470 \text{ m/s}$ (3) $\eta_1 = 0.49, c_1 = 1764 \text{ m/s}$

(4) $\eta_1 = 0.49$, $c_1 = 1176$ m/s.

(4)改变吸声层中打孔间距d,分别由标 准值增大或减小时,可见间距减小或孔数加密 时,传声损失略有增大.而当穿孔吸声层l₁₂增 厚时,传播衰减因子随l/λ增大而增大,故传 声损失也增大.看来增加厚度比增大孔密度效 16卷3期









(2) 増大 c₁, c₁=1764 m/s
(3) 増大 η₁, η₁=0.59
(4) 増大 l₁₂, l₁₂ L₁=1.22

(5) 三层结构的反向振动能传递损失恒为 零, 不随频率变化. 即多层结构介质层中没有 吸收时,振动能量全部传递出去,粘贴均匀或 非均匀吸声复盖的结构,振动能传递损失随频 率升高而增大,频响曲线接近于直线,见图 5 曲线(1).

(6)改变吸声材料的声速、损耗系数或层的厚度,可见结构的振动能传递损失随着声速的增大而减小(图5曲线(2)),随着损耗系数的增大而增大.(图5曲线(3)),又随着层的厚度增大而增大(图5曲线(4)).而改变材料密度对振动能传递损失没有影响.

(7)对比图2和图5,对同一结构,在整个 频带内、振动能都比声能的传递损失小得多, 这是由于空气声从结构后界面入射时发生反 射,而振动能则更易于沿弹性结构传出去.

4 结论

(1)在结构表面粘贴吸声复盖后,不仅有减弱反射声的吸声作用,还可起到反向的减振、隔声作用,且频率越高,效果越好.

(2)吸声层的厚度增大、材料和声速减小 或阻尼增大时,结构的反向声能和振动能传递 损失都增大.

(3) 在吸声层中打孔,结构的反向传声损 失略有增大,而振动能传递损失变化不大.

(4)多层结构的反向传声损失频响中存在 由于两钢板间的水层引起的共振峰,水层越厚,峰越密.而增加吸声层则可补偿共振峰的 效应.

参考文献

- [1] 何祚镛,王曼,应用声学,1996,15(5):6-11.
- [2] 何祚镛,王曼,应用声学,1996,15(5):12-19.

[3] 王荣津,水声材料手册,北京:科学出版社,1983,26.