

钛板夹芯结构透声窗设计方法

李科技, 陈志坚

(海军工程大学船舶与动力学院, 武汉 430033)

摘要: 对两层金属平板、中间橡胶夹芯的结构进行了设计, 认为金属平板和芯层中都有纵波和横波的传播, 应用传递矩阵法建立了平板夹芯结构声学设计的理论模型。利用该模型设计出一种钛板夹芯结构, 并对该夹芯结构进行了透声性能分析。数值计算结果表明该方法设计出的钛板夹芯结构具有良好的透声性。

关键词: 钛板; 夹芯结构; 传递矩阵; 透声性能

中图分类号: U663.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2010)-02-0198-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2010.02.017

Design of titanium sandwich sound transmission window

LI Ke-ji, CHEN Zhi-jian

(College of Naval Architecture and Power, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: A sandwich structure, in which the intermediate layer is rubber and the others are metal plates, is considered as sound transmission window. It suggests that both the longitudinal wave and transverse wave can transmit in the metal plate and rubber. By using transfer matrix, a plate sandwich model for acoustic designing is established. A titanium sandwich construction is designed by the model, and the sound transmission performance is analyzed for the construction. Numerical analysis shows that the titanium sandwich construction has good sound transmission.

Key words: titanium plate; sandwich construction; transfer matrix; sound transmission

1 引言

声纳透声窗用来保护声纳基阵不受外来损害, 改善运动时的流体动力特性, 增加声纳作用距离^[1]; 除要求其具有良好的透声性外, 还需要良好的强度、刚度性能。现有舰船上普遍使用的玻璃钢透声窗存在易老化、连接性能不好、经常出现渗水等故障, 因此对声纳透声窗进行改进和提高显得十分必要。钛合金材料具有优良的透声性能、较高的机械强度^[2]、耐海水腐蚀及不易老化等优点^[3], 符合透声窗功能的要求。

国外海军曾采用双壳结构建造钛合金透声窗, 如俄罗斯的明斯克号航母, 其首部的钛合金球鼻首就是采用双壳结构。这种双壳结构的透声窗具有较好的透声性能^[4], 由于双壳结构一般依靠两层壳体间的支柱传递载荷, 不能很好地利用壳体材料的强度和刚度性能。为了得到透声性良好且强度、刚度更为优良的声纳透声窗, 我们进行了钛板夹芯结构

透声窗的研究, 设计出由两层钛板蒙皮、中间夹透声橡胶并且窗体内部无任何加强筋的钛板夹芯结构透声窗。

钛板夹芯结构透声窗设计的主要任务是确定具有良好透声性能的几何和物理参数。本文采用沈杰罗夫^[5]在 Thompson W. T. 的基础上提出的声波通过弹性层系统的透射模型即透声窗为处于液体中由三层平行平板组成的系统, 透声窗厚度方向全模拟, 淡化窗体表面线型的影响^[6], 设计钛板夹芯透声窗结构。

2 理论模型

当平面声波以 θ 角入射于单层弹性板时, 声透射模型如图 1 所示, 图中 p_o 、 p_{omp} 、 p_{np} 分别表示入射波、反射波和透射波的声压; h 为弹性板的厚度; θ_l 、 θ_t 分别是纵波和横波的折射角, c_l 、 c_t 分别是纵波和横波的波速。

对于均匀的、各向同性的弹性介质, 声波的波动方程为:

$$(\lambda + 2\mu)\Delta\mathbf{u} + (\lambda + \mu)\text{rot}(\text{rot}\mathbf{u}) = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \quad (1)$$

收稿日期: 2009-02-07; 修回日期: 2009-04-12

基金项目: 十一五预研项目资助(403458263002)

作者简介: 李科技(1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为船体结构振动与噪声控制。

通讯作者: 李科技, E-mail: likejilikeji@126.com

其中: λ 、 μ 为拉梅系数; \mathbf{u} 为弹性介质的位移; ρ 为介质的密度。

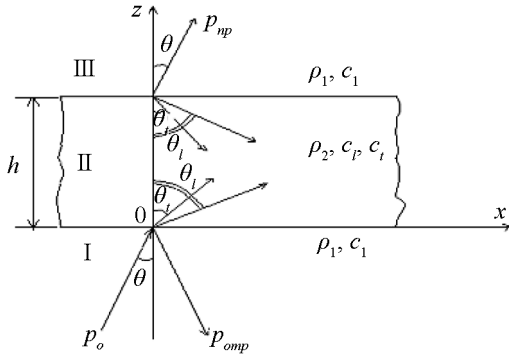


图 1 弹性板的声透射
Fig.1 Sound transmission of elastic plate

对于谐和运动 $\mathbf{u}=\mathbf{u}'e^{-i\omega t}$, 由于 $\mathbf{v}=-i\omega\mathbf{u}$, 所以式(1)可写为:

$$(\lambda+2\mu)\Delta\mathbf{v}+(\lambda+\mu)\text{rot}(\text{rot}\mathbf{v})=-\omega^2\rho\mathbf{v} \quad (2)$$

这里 ω 为弹性介质振动的圆频率。

速度场 \mathbf{v} 可以写成: $\mathbf{v}=\text{grad}\Phi+\text{rot}\Pi$ 。

Φ 和 Π 分别为对应于速度场的标量势函数和向量势函数。

对应于图 1 的坐标系, 方程(2)的解为:

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= \Phi' e^{ik_l(x\sin\theta_l+z\cos\theta_l)} + \Phi'' e^{ik_l(x\sin\theta_l-z\cos\theta_l)} \\ \Pi &= \Pi' e^{ik_l(x\sin\theta_l+z\cos\theta_l)} + \Pi'' e^{ik_l(x\sin\theta_l-z\cos\theta_l)} \end{aligned} \right\}$$

入射波、反射波和透射波的声压表示为:

$$\left. \begin{aligned} p_o &= e^{ik_l(x\sin\theta_l+z\cos\theta_l)} \\ p_{omp} &= A e^{ik_l(x\sin\theta_l-z\cos\theta_l)} \\ p_{np} &= B e^{ik_l(x\sin\theta_l+z\cos\theta_l)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(3)中: A -反射系数;
 B -透射系数。

由 $p=\rho\frac{\partial\Phi}{\partial t}$ 并联立以上各式, 便可得到声波透过弹性板的透射系数 B 。

当平面声波入射到由 N 层弹性板组成的弹性层系统时, 透射模型如图 2 所示。图中对每层弹性板进行了编号, 分别为 $1, 2, \dots, N$; h 为第 n 层的厚度, H 为弹性层系统的总厚度。

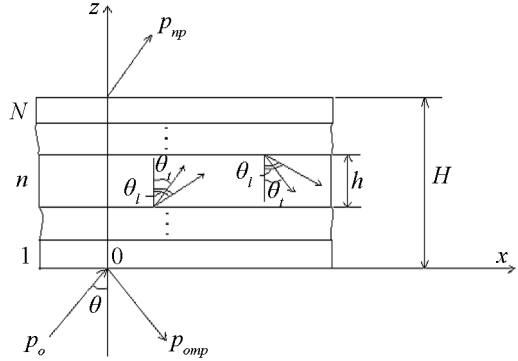


图 2 声波经过 N 层弹性板系统的声透射
Fig.2 Sound transmission through N layers of elastic plates

对第 n 层弹性板建立局部坐标系, 坐标原点位于第 n 层和 $n-1$ 层之间的交界面上。令第 n 层和第 $n+1$ 层交界面上的振速向量的分量值以及应力张量的法向和切向分量值分别为 $\mathbf{v}_x^{(n)}$ 、 $\mathbf{v}_z^{(n)}$ 、 $\sigma_{zz}^{(n)}$ 、 $\sigma_{zx}^{(n)}$, 并引入标量和向量势函数(Φ 和 Π), 若:

$$\left. \begin{aligned} k_l h \cos\theta_l = P; \quad k_l h \cos\theta_l = Q; \\ k_l \cos\theta_l = \alpha; \quad k_l \cos\theta_l = \beta; \\ \gamma = k_l \sin\theta_l = k_l \sin\theta_l \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

则对于第 n 层的上边界(当 $z=h$ 时)有:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_x^{(n)} \\ \mathbf{v}_z^{(n)} \\ \sigma_{zz}^{(n)} \\ \sigma_{zx}^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i\gamma\cos P & -\gamma\sin P & -i\beta\cos Q & \beta\sin Q \\ -\alpha\sin P & i\alpha\cos P & -\gamma\sin Q & i\gamma\cos Q \\ -\frac{i}{\omega}(\lambda k_l^2 + 2\mu\alpha^2)\cos P & \frac{(\lambda k_l^2 + 2\mu\alpha^2)}{\omega}\sin P & \frac{-i2\mu\beta\gamma}{\omega}\cos Q & \frac{2\mu\beta\gamma\sin Q}{\omega} \\ \frac{2\mu\alpha\gamma}{\omega}\sin P & \frac{-i2\mu\alpha\gamma}{\omega}\cos P & \frac{-\mu}{\omega}(\beta^2 - \gamma^2)\sin Q & \frac{i\mu}{\omega}(\beta^2 - \gamma^2)\cos Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi' + \phi'' \\ \phi' - \phi'' \\ \Pi' - \Pi'' \\ \Pi' + \Pi'' \end{bmatrix} \quad (5)$$

对于第 n 层的下边界(当 $z=0$ 时)有:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_x^{(n-1)} \\ \mathbf{v}_z^{(n-1)} \\ \sigma_{zz}^{(n-1)} \\ \sigma_{zx}^{(n-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i\gamma & 0 & -i\beta & 0 \\ 0 & i\alpha & 0 & i\gamma \\ -\frac{i}{\omega}(\lambda k_l^2 + 2\mu\alpha^2) & 0 & \frac{-i2\mu\beta\gamma}{\omega} & 0 \\ 0 & \frac{-i2\mu\alpha\gamma}{\omega} & 0 & \frac{i\mu}{\omega}(\beta^2 - \gamma^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi' + \phi'' \\ \phi' - \phi'' \\ \Pi' - \Pi'' \\ \Pi' + \Pi'' \end{bmatrix} \quad (6)$$

$v_x^{(n)}, v_z^{(n)}, \sigma_{zz}^{(n)}, \sigma_{zx}^{(n)}$ 和 $v_x^{(n-1)}, v_z^{(n-1)}, \sigma_{zz}^{(n-1)}, \sigma_{zx}^{(n-1)}$ 满足以下矩阵关系式:

$$\begin{bmatrix} v_x^{(n)} \\ v_z^{(n)} \\ \sigma_{zz}^{(n)} \\ \sigma_{zx}^{(n)} \end{bmatrix} = A_{jk}^{(n)} \begin{bmatrix} v_x^{(n-1)} \\ v_z^{(n-1)} \\ \sigma_{zz}^{(n-1)} \\ \sigma_{zx}^{(n-1)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $A_{jk}^{(n)}$ 为第 n 层的传递矩阵, $j, k=1, 2, 3, 4$ 。解方程组(4)和(6)即可得到 $A_{jk}^{(n)}$ 。

应用 N 次递推关系式(7), 得:

$$\begin{bmatrix} v_x^{(N)} \\ v_z^{(N)} \\ \sigma_{zz}^{(N)} \\ \sigma_{zx}^{(N)} \end{bmatrix} = A_{jk}^{(N)} \cdot A_{jk}^{(n-1)} \dots A_{jk}^{(1)} \begin{bmatrix} v_x^{(0)} \\ v_z^{(0)} \\ \sigma_{zz}^{(0)} \\ \sigma_{zx}^{(0)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $v_x^{(0)}, v_z^{(0)}, \sigma_{zz}^{(0)}, \sigma_{zx}^{(0)}$ 和 $v_x^{(N)}, v_z^{(N)}, \sigma_{zz}^{(N)}, \sigma_{zx}^{(N)}$ 分别为第 1 层下表面和第 N 层上表面的四个量值, 满足以下关系式:

$$\begin{bmatrix} v_x^{(N)} \\ v_z^{(N)} \\ \sigma_{zz}^{(N)} \\ \sigma_{zx}^{(N)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & B_{14} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} & B_{24} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} & B_{34} \\ B_{41} & B_{42} & B_{43} & B_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x^{(0)} \\ v_z^{(0)} \\ \sigma_{zz}^{(0)} \\ \sigma_{zx}^{(0)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: B_{jk} 为弹性层系统的传递矩阵, 元素 B_{jk} ($j, k=1, 2, 3, 4$) 的值与所在层的弹性常数有关。

由式(8)和(9)可得:

$$B_{jk} = A_{jk}^{(N)} \cdot A_{jk}^{(n-1)} \dots A_{jk}^{(1)} \quad (10)$$

引入如下符号:

$$\begin{cases} M_{22} = B_{22} - \frac{B_{21}B_{42}}{B_{41}}; & M_{23} = B_{23} - \frac{B_{21}B_{43}}{B_{41}} \\ M_{32} = B_{32} - \frac{B_{31}B_{42}}{B_{41}}; & M_{33} = B_{33} - \frac{B_{31}B_{43}}{B_{41}} \\ R = kH \cos \theta, & Z_0 = \frac{\rho c}{\cos \theta} \end{cases} \quad (11)$$

对系数 A 和 B 解方程组, 得:

$$\begin{cases} A = \frac{M_{22} + \frac{M_{32}}{Z_0} - (M_{33} + M_{23}Z_0)}{M_{22} + \frac{M_{32}}{Z_0} + (M_{33} + M_{23}Z_0)} \\ B = \frac{2(M_{33}M_{22} - M_{32}M_{23})}{M_{22} + \frac{M_{32}}{Z_0} + (M_{33} + M_{23}Z_0)} e^{-iR} \end{cases} \quad (12)$$

2 结构方案

依据以上的理论模型, 参考实际工程背景, 设计出由两层钛板蒙皮、中间夹透声橡胶^[7]组成的钛板夹芯结构, 透声窗内部无任何加强筋, 依靠夹芯

结构型式提高其强度和刚度。两层钛板的厚度均为 1mm, 夹芯板厚 18mm。进行声学性能分析时采用这种总厚度为 20mm 的夹芯结构。利用大型有限元分析软件 Patran/Nastran 对该模型进行了强度分析, 计算结果表明, 设计的钛板夹芯结构具有良好的强度和刚度性能。表 1 列出了钛合金及相关材料的声学性能参数。

表 1 钛合金及相关材料的声学性能参数
Table 1 Acoustic parameters of titanium alloy and related material

| | $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$ | $c_l/(\text{m}/\text{s})$ | $C_l/(\text{m}/\text{s})$ | 特性阻抗 |
|------|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------|
| 钛合金 | 4.5 | 6070 | 3230 | 2.73×10^6 |
| 透声橡胶 | 1.03 | 1560 | 780 | 1.607×10^5 |
| 海水 | 1.025 | 1500 | - | 1.54×10^5 |

3 透声性能分析

按照第 2 节建立的数学模型, 设计编制了 Fortran 计算程序, 对声波通过钛板夹芯结构的透射系数进行计算, 分析比较了透射系数随钛板及夹芯板的厚度、声波频率、入射角等参数的变化规律。

图 3 为钛板夹芯结构的声波透射系数随入射角的变化规律, 计算参数: 内外两层钛板厚度均为 1mm, 夹芯板厚 18mm, 频率 $f=4000\text{Hz}$ 。图 4、5 中 h_1, h_3 分别表示上、下钛板的厚度, h_2 为夹芯板的厚度; f 为声波的频率。从图 3 可以看出, 总体上声波透射系数随入射角的增大而减小, 在 $0^\circ \sim 70^\circ$ 范围内变化比较缓慢, $70^\circ \sim 90^\circ$ 之间透射系数急剧减小, 在 28° 左右出现一凹点。在弹性层中, 当每次入射波的滑行速度和层中任一简正波的波速相吻合时, 都出现奇异点。不过, 相邻层的弹性常数对给定层中的简正波的波速影响很大, 所以声波透射系数与入射角的关系很复杂, 通常难以作简单解释。

图 4 为声波垂直入射时透射系数随频率的变化

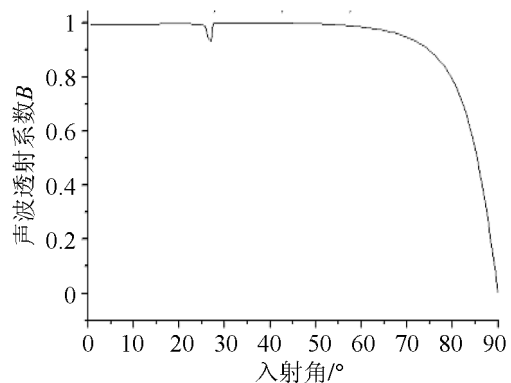


图 3 钛板夹芯结构的声波透射系数随入射角的变化规律
Fig.3 Relation between the sound transmission coefficient of titanium sandwich and incident angle

规律, 由三条曲线组成, 夹芯结构的总厚度保持 20mm, 由图 4 可知: 三条曲线的变化规律相似, 都随着频率的增大而减小; 频率相同时, 钛板越薄 (或夹芯板越厚), 透射系数越大, 这是因为钛板与海水的特性阻抗^[8]相差较大, 而夹芯板与海水的特性阻抗比较接近的缘故。

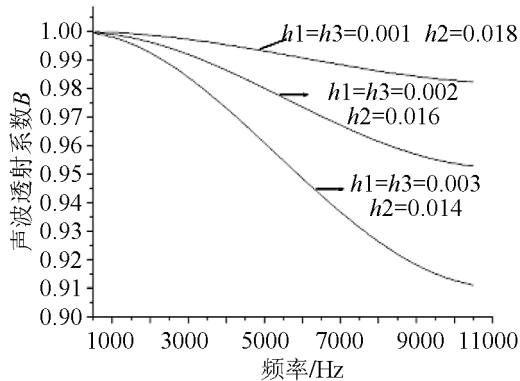


图 4 声波垂直入射时透射系数随频率的变化规律

Fig.4 Relation between the transmission coefficient and frequency for sound vertical incidence

图 5 为声波垂直入射时透射系数随比值 h_2/h_1 的变化关系, 由图 5 可知: 钛板厚度一定时, 透射系数随夹芯板厚度的增大而减小; 当夹芯板厚度达到 30mm 时, 透射系数为 0.9945, 仍是一个很可观的数值。可见当夹芯板的特性阻抗与海水的特性阻抗很接近时, 夹芯板厚度的变化对透射系数的影响并不大。

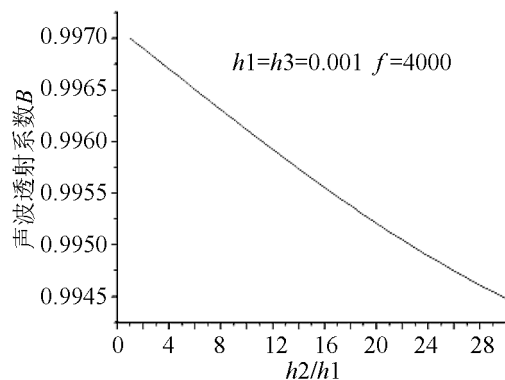


图 5 声波垂直入射时透射系数随比值 h_2/h_1 的变化规律

Fig.5 Relation between the transmission coefficient of vertical incidence and the ratio of h_2/h_1

4 结论

对于两层钛板蒙皮、中间橡胶夹芯的透声窗结

构的数值计算结果表明:

(1) 从总体上来说, 透射系数随入射角的增大而减小。当入射角为 60° 时, 透射系数约为 0.98, 仍为一可观的数值。

(2) 透射系数随频率的增大而减小, 即钛板夹芯结构对低频波有优良的声学性能。在夹芯结构总厚度不变的情况下, 钛板越厚, 随着频率的增大, 透射系数衰减的越快。

(3) 钛板厚度一定时, 透射系数随比值 h_2/h_1 的增大而减小, 不过减小量非常小。当夹芯板厚度为 30mm 时, 透射系数仍为 0.9945, 所以当夹芯材料的特性阻抗与海水的特性阻抗非常接近时, 可以不考虑夹芯板厚度对透射系数的影响。

(4) 在满足结构强度和刚度的要求下, 为了达到理想的透射系数, 应尽可能地减小钛板的厚度。根据以上的计算分析可知, 本文提出的钛板夹芯结构具有良好的透声性, 满足声学性能的要求。

(5) 本文的方法还可用于更多层夹芯结构的设计。

参 考 文 献

- [1] 俞孟萨, 叶剑平, 吴有生. 船舶声呐部位自噪声的预报方法及其控制技术[J]. 船舶力学, 2002, 6(5): 80-94.
YU Mengsa, YE Jianping, WU Yousheng. Prediction and control method of self-noise in ship's sonar domes[J]. Journal of Ship Mechanics, 2002, 6(5): 80-94.
- [2] 莱因斯 C, 皮特尔斯 M. 钛与钛合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 22-26.
- [3] 孟详军. 钛合金在舰船上的应用. 舰船科学技术[J]. 2001, 22-25.
MENG Xiangjun. Application of titanium alloy on warship[J]. Ship Science and Technology, 2001, 22-25.
- [4] 李源源. 舰艇球鼻首金属导流罩的结构声学设计[J]. 中国舰船研究, 2007, (1): 39-55.
LI Yuanyuan. Structure acoustics design of metallic fairwater dome of bulbous bow for naval ships[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2007, (1): 39-55.
- [5] 沈杰罗夫. 水声学波动问题[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983. 264-270.
- [6] 俞孟萨. 声纳罩夹芯式透声窗的声学设计研究[J]. 声学学报, 2005, 30(5): 427-433.
YU Mengsa. Design of sandwich acoustic window for sonar dome[J]. Acta Acustica 2005, 30(5): 427-433.
- [7] 王荣津. 水声材料手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982. 13-47.
- [8] 何琳. 声学理论与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 13-14.