

水下目标壳体的镜反射亮点回波结构

范军¹, 刘涛, 汤渭霖

(上海交通大学振动、冲击、噪声国家重点实验室, 上海 200030)

摘要:文章从工程应用角度讨论水下目标壳体镜反射亮点回波结构。在声呐频率范围内把水下目标壳体作为多层平板处理。应用声线方法和递推关系导出任意多层平板的反射系数。忽略耦合水层两边的多次反射后,得到一组适合于瞬态和亮点分析的反射系数近似公式。利用这组公式依次讨论了:(1)未敷设吸声覆盖层的单层壳体;(2)未敷设吸声覆盖层的双层壳体;(3)敷设吸声覆盖层的单层壳体;(4)敷设吸声覆盖层的双层壳体等4种情况的镜反射亮点回波结构。并给出了数值计算的算例。

关键词:水下目标;镜反射;亮点;回波结构

中图分类号:O422 **文献标识码:**A

The structure of highlight echoes due to specular reflection from shells of immersed target

FAN Jun, LIU Tao, TANG Wei-lin

(State Key Laboratory of Vibration, Shock & Noise, Shanghai Jiaotong university, Shanghai 200030, China)

Abstract: The structure of specular reflection highlight echoes from shells of immersed target is discussed in the field of engineering application. In range of sonar frequency, shells of immersed target can be treated as multi-layer plates. In use of ray acoustics and recursion relation, the sound reflection coefficients of arbitrarily many plates have been derived. When multi-reflection is neglected, a series of approximate formulas that are fit for analyzing transient case and the structure of highlight echoes are obtained. In use of the approximate formulas, the structure of specular reflection highlight echoes from four kinds of shell structures are discussed, (1) single shell no-covered with sound-absorbing layer, (2) double shells no-covered with sound-absorbing layer, (3) single shell covered with sound-absorbing layer, (4) double shells covered with sound-absorbing layer. The numerical examples are shown.

Key words: immersed target; specular reflection; highlight; the structure of echoes

1 引言

根据声呐目标回波的亮点模型,任何一个复杂目标都可以等效成若干个散射亮点的组合,每个散射亮点产生一个亮点回波,总的回波是这些亮点回波相干叠加的结果^[1]。而水下目标通常是复杂的壳体结构,如潜艇目标,这些壳体结构主要分为单层壳体和双层壳体两种。单层壳体结构,即只有耐压壳体一层。双层壳体结构,即里面是耐压壳体,厚度一般在20mm左右,外面是非耐压壳体,厚度只有5mm~6mm。两层壳体之间有几10cm的水层,同时有助板连接。另外,为了隐身的需要,现代水下目标大多数敷设吸声覆盖层。它既能降低回波又能减小辐射噪声。分析水下目标壳体的回波结构对研究水下目标的回波特性和重要意义。

而中间含有耦合水层的双层壳体的声反射计算和分析具有一定的难度。因为一个封闭壳体(球壳

或圆柱壳)受到入射声波激励时不仅有镜反射回波而且还有一系列沿壳体表面绕行的各种环绕波。双层壳体通过中间水层的耦合两层壳体各自的环绕波都对回波有贡献^[2]。文献[2]以双层弹性球壳为模型对此进行了理论研究。从双层弹性球壳的窄脉冲回波图可以看到总的回波是由内、外壳的两组回波共同作用形成的。敷设吸声覆盖层的双层球壳的回波特性也可以从理论上进行研究。但是,这些研究成果不能直接用于水下目标回波的工程预报模型中。本文从工程应用的角度来讨论水下目标壳体镜反射回波亮点结构。为此对壳体作以下近似:

第1,忽略曲率的作用,把壳体作为多层平板处理。若壳体半径以5m计算,当声呐频率为1kHz~10kHz时, ka 为20.9~209,可以足够好地假设 $ka \gg 1$ 。

第2,只考虑垂直入射和反射,因为发生镜反射时入射波矢量与壳体表面垂直,这样弹性平板内只有纵波。对于非镜反射的情况,将另文讨论。

在这些近似下壳体的回波简化为多层弹性平板的声反射问题,这是一个经典声学问题。不仅垂直

收稿日期:2000-06-19;修回日期 2000-10-20

作者简介:范军(1973-),男,江西人,博士,讲师,主要从事水下目标声散射、回声特性研究。

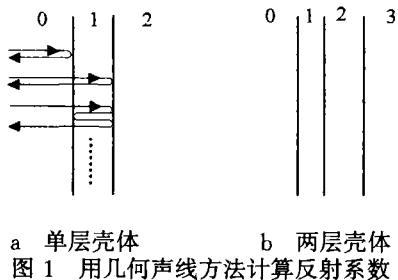
入射而且斜入射时的解也已给出^[3]。当层数较多时则可以用文献[4,5]中的传递矩阵方法。但是,这些给出的是单频情况下的稳态解,形式上不便于用来分析瞬态情况,因此难以导出亮点参数。特别是双层壳体的情况,反射系数的表示式相当复杂。无法作进一步分析。从物理上考虑,在瞬态情况下,只要脉冲足够窄从各层壳体上的镜反射回波总可以分开。由此可以想到,双层壳体的镜反射亮点可能在两个以上。缩比模型实验证实了这一点。

本文采用几何声线叠加的方法分析双层壳体、包括敷设吸声覆盖层的双层壳体的镜反射亮点。对于多层平板结构,关键是计算层内多次反射的混响声线。可以证明,几何声线叠加方法与传统的波动方法是等价的。但是用这种方法可以较方便地分离出各个亮点,并导出亮点参数,且具有清晰的物理概念,计算简便。

2 多层壳体(平板)的镜反射系数及几何声线方法和波动方法的一致性

作为讨论水下目标壳体镜反射亮点结构的基础,用递推方法导出任意多层平板的镜反射系数并证明其与波动方法的一致性。

先从单层的情况出发。设编号为0,1,2的3种介质构成一个单层壳体,见图1(a)。单位振幅的平面声波(略去时间因子 $e^{i\omega t}$)从介质0垂直入射到壳体。按照几何声线的观点,反射声波由两部分组成,一部分是从0-1界面直接反射的波,另一部分是透入介质1并在层内建立起混响声场的那些声线不断透射回介质0的声波。令介质 $i \rightarrow$ 介质 j 的反射系数为 r_{ij} ,透射系数为 t_{ij} , i 层的厚度为 h_i 波数为 k_i 。



a 单层壳体 b 两层壳体
图1 用几何声线方法计算反射系数

参照图1(a)将这些声线叠加在一起得到反射系数:

$$\begin{aligned} R_{012} &= r_{01} + t_{01}r_{12}t_{10}e^{i2k_1h_1} + \dots \\ &= r_{01} + t_{01}t_{10} \sum_{n=1}^{\infty} r_{12}^n r_{10}^{n-1} e^{i2nk_1h_1} \quad (1) \\ &= r_{01} + t_{01}t_{10} \frac{r_{12}e^{i2k_1h_1}}{1 - r_{12}r_{10}e^{i2k_1h_1}} \end{aligned}$$

注意到公式中只用到后界面的反射系数 r_{12} 。

推广到由0,1,2,3,4种介质组成的两层壳体(见图1(b)),可以将它等效成单层壳体,只要知道1-2界面的反射系数(包含有2-3界面的作用)。而这时1-2界面的反射系数就是1-2-3介质构成的单层壳体的反射系数 R_{123} 。这样就得到两层壳体的反射系数

$$\begin{aligned} R_{0123} &= r_{01} + t_{01}t_{10} \sum_{n_1=1}^{\infty} R_{123}^{n_1} r_{10}^{n_1-1} e^{i2n_1k_1h_1} \quad (2) \\ &= r_{01} + t_{01}t_{10} \frac{R_{123}e^{i2n_1k_1h_1}}{1 - R_{123}r_{10}e^{i2n_1k_1h_1}} \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} R_{123} &= r_{12} + t_{12}t_{21} \sum_{n_2=1}^{\infty} R_{23}^{n_2} r_{21}^{n_2-1} e^{i2n_2k_2h_2} \quad (3) \\ &= r_{12} + t_{12}t_{21} \frac{r_{23}e^{i2k_2h_2}}{1 - r_{23}r_{21}e^{i2k_2h_2}} \end{aligned}$$

用递推方法不难导出由0,1,2,3,4,5种介质组成的3层壳体的反射系数

$$R_{01234} = r_{01} + t_{01}t_{10} \sum_{n_1=1}^{\infty} R_{1234}^{n_1} r_{10}^{n_1-1} e^{i2n_1k_1h_1} \quad (4)$$

$$R_{1234} = r_{12} + t_{12}t_{21} \sum_{n_2=1}^{\infty} R_{234}^{n_2} r_{21}^{n_2-1} e^{i2n_2k_2h_2} \quad (5)$$

$$R_{234} = r_{23} + t_{23}t_{32} \sum_{n_3=1}^{\infty} r_{34}^{n_3} r_{32}^{n_3-1} e^{i2n_3k_3h_3} \quad (6)$$

依次类推可以导出任意多层壳体的镜反射系数。

以单层壳体为例证明几何声线方法与波动方法的一致性,因为这种情况是整个方法的基础。设构成单层壳体的3种介质都是均匀介质,因此有

$$\begin{aligned} r_{01} &= r, \quad t_{01} = 1 + r, \quad t_{10} = 1 - r, \\ r &= \frac{z_1 - z_0}{z_1 + z_0}, \quad r_{12} = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \quad (7) \end{aligned}$$

$$z_0 = \rho_0 c_0, \quad z_1 = \rho_1 c_1, \quad z_2 = \rho_2 c_2$$

利用这些关系式得到

$$\begin{aligned} R_{012} &= \frac{r + r_{12}e^{i2k_1h_1}}{1 + rr_{12}e^{i2k_1h_1}} = \\ &= \frac{z_1(z_2 - z_0)\cos k_1h_1 + (z_2z_0 - z_1^2)isink_1h_1}{z_1(z_2 + z_0)\cos k_1h_1 - (z_2z_0 + z_1^2)isink_1h_1} \quad (8) \end{aligned}$$

此结果与波动理论的结果一致。例如,用传递矩阵方法一个层系前界面的声压 p_1 和振速 v_1 与后界面的声压 p_2 和振速 v_2 可以用传递矩阵(T)联系

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ v_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_2 \\ v_2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

对于单层壳体,波动理论导出

$$\begin{aligned} T_{11} &= T_{22} = \cos k_1 h_1, \\ T_{12} &= -iz_1 \sin k_1 h_1, \end{aligned} \quad (10)$$

$$T_{21} = \frac{-i \sin k_1 h_1}{z_1}$$

单层壳体的反射系数

$$R = \frac{z_{in} - z_0}{z_{in} + z_0} \quad (11)$$

其中 z_{in} 是层的输入阻抗

$$z_{in} = \frac{z_2 T_{11} + T_{12}}{z_2 T_{21} + T_{22}} \quad (12)$$

将(12)及(10)式代入(11)式也得到(8)式的结果。

可见应用几何声线方法导出的反射系数公式可以分析亮点结构。

3 未敷设吸声覆盖层的单层壳体

单壳体是水-钢板-空气结构,取 $r_{01} = r, r_{10} = -r, r_{12} = -1, t_{01} = (1+r), t_{10} = (1-r)$ 由(1)式得到

$$R = r - \frac{(1-r^2)e^{i2kh}}{1-re^{i2kh}} = \frac{r-e^{i2kh}}{1-re^{i2kh}} \quad (13)$$

为了后面应用的需要这里也给出水-钢板-水结构(双层壳体中的非耐压壳体)的反射系数。将水-钢板-空气结构中的后界面的反射系数改为 $-r$ 得到

$$\begin{aligned} R &= r + (1-r^2) \sum_{n=1}^{\infty} (-r)^n (-r)^{n-1} e^{i2nkh} \\ &= \frac{r(1-e^{i2kh})}{1-r^2 e^{i2kh}} \end{aligned} \quad (14)$$

取钢板的 $\rho_1 = 7.7\text{g/cm}^3, c_1 = 5900\text{m/s}$, 水的 $\rho_0 = 1\text{g/cm}^3, c_0 = 1500\text{m/s}$, 得到 $r \approx 0.936$ 。潜艇的非耐压壳体通常很薄, 设为 6mm 。在 $1\text{kHz} \sim 10\text{kHz}$ 的声呐频率范围内 kh 值是 $0.006 \sim 0.06$, 因此可以令 $kh \gg 1$, 在 0 级近似下总的反射系数趋于 0, 在 1 级近似下则为:

$$R \approx -i \frac{r}{1-r^2} 2kh = \frac{r}{1-r^2} 2kh e^{i3\pi/2} \quad (15)$$

这是不难理解的, 因为当钢板的厚度远小于波长且两面的介质相同时声波基本上都透射过去。但是, 这样的近似对于耐压壳体一般不满足。因为耐压壳体厚约 20mm , 在 10kHz 频率 kh 值已达 0.2 。

4 未敷设吸声覆盖层的双层壳体

双层壳体包括外层的非耐压壳体, 中间水层以及里层的耐压壳体, 是水-钢板-水-钢板-空气结构。应用式(4)~式(6)的递推关系能够导出反射系数的

严格表示式。正象传递矩阵方法一样, 这样的关系式相当复杂, 不便于做机理分析。这里采取一种近似方法。

将水-钢板-水-钢板-空气结构的所有量列出如下:

$$\begin{aligned} r_{01} &= r, r_{10} = -r, t_{01} = 1+r, t_{10} = 1-r \\ r_{12} &= -r, r_{21} = r, t_{12} = 1-r, t_{21} = 1+r \\ r_{23} &= r, r_{32} = -r, t_{23} = 1+r, t_{32} = 1-r \\ r_{34} &= -1, t_{34} = 0 \\ k_1 &= k_3 = k, k_2 = k_0 \end{aligned} \quad (16)$$

代入(4)式得到总的反射系数

$$R_{01234} = \frac{r + R_{1234} e^{i2kh_1}}{1 + r R_{1234} e^{i2kh_2}} \quad (17)$$

由(5)式得到

$$R_{1234} = \frac{-r + R_{234} e^{i2k_0 h_2}}{1 - R_{234} e^{i2k_0 h_2}} \quad (18)$$

其中:

$$R_{234} = \frac{r - e^{i2kh_3}}{1 - r e^{i2kh_3}} \quad (19)$$

是由水-耐压壳体钢板-空气组成的单层壳体的反射系数, 因此与(13)式类似。暂时不写出 R_{234} 的具体形式, 直接将(19)式代入(18)式, 得到

$$R_{01234} = \frac{R_{012} - R_{234} e^{i2k_0 h_2} \cdot \varphi}{1 - r R_{234} e^{i2k_0 h_2} \cdot \psi} \quad (20)$$

其中

$$R_{012} = \frac{r(1 - e^{i2kh_1})}{1 - r^2 e^{i2kh_1}} \quad (21)$$

是前面提到过的水-钢板-水的反射系数。

$$\varphi = \frac{r^2 - e^{i2kh_1}}{1 - r^2 e^{i2kh_1}}, \quad \psi = \frac{1 - e^{i2kh_1}}{1 - r^2 e^{i2kh_1}} \quad (22)$$

是只与外层壳体有关的量。

当 $kh_1 \ll 1$ 时, 在 0 级近似下, $\varphi \approx -1, \psi \approx 0$, 得到

$$R_{01234} \approx R_{012} + R_{234} e^{i2k_0 h_2} \quad (23)$$

因此, 在低频条件下双层壳体的反射系数近似由两部分叠加而成, 一部分是水-钢板-水结构的外层壳体(非耐压壳体)的反射系数, 另一部分是水-钢板-空气结构的内层壳体(耐压壳体)的反射系数。当然, 若以外壳表面为参考点内层壳体的反射系数中要计及波在中间耦合水层中传播的相位移。与此对应, 双层壳体的镜反射亮点近似有两个。第 1 个亮点是外层壳体的反射亮点, 由于外壳很薄且后面是水, 能量大部分透射过去, 因此这个亮点的幅度较小。第 2 个亮点是内层壳体的反射亮点。

当 $kh_1 \ll 1$ 的条件满足得不太好时, 要计及外层

壳体的透射损失。于是双层壳体的反射系数可以近似为:

$$R_{01234} \approx R_{012} + T^2 R_{234} e^{i2k_0 h_2} \quad (24)$$

其中,透射系数也可以用声线方法导出为

$$T = \frac{t_{01} t_{12} e^{ikh_1}}{1 - r_{12} r_{10} e^{i2kh_1}} = \frac{(1 - r^2) e^{ikh_1}}{1 - r^2 e^{i2kh_1}} \quad (25)$$

从物理上考虑,在(25)式的近似中,外层壳体除了本身的反射作用以外对于内层壳体来说仅仅是一个透声层,忽略了耦合水层引起的两层钢板之间的多次反射。这从后面的计算例子可以看出。在实际潜艇中,内外壳体不可能是严格同轴的,近似为平板后,平板之间不可能保持严格的平行,因此忽略多次反射是合理的。

图2给出水-钢板-水-钢板-空气结构的双层壳体回波波形的计算结果,图2中的粗实线是按近似公式(24)计算的结果,细实线是按精确公式(20)计算的结果。计算中非耐压壳体厚度 $h_1 = 6\text{mm}$, 中间水层厚 $h_2 = 60\text{mm}$, 耐压壳体厚 $h_3 = 20\text{mm}$, 图2.a 中入射波频率为 $f = 5\text{kHz}$, 脉冲宽度 $\tau = 0.4\text{ms}$, 图2.b 中入射波频率为 $f = 10\text{kHz}$, 脉冲宽度 $\tau = 0.2\text{ms}$ 。图中第1个脉冲为非耐压壳镜反射亮点的回波,第2个脉冲是耐压壳镜反射亮点的回波。可以看出,近似公式很好地描述了前面两个亮点的特性,忽略了耦合水层引起的多次反射。

以上的讨论证实了[2]的两个主要结论:(1)相对于入射波波长外壳很薄内壳较厚的双层球壳的回波主要由内壳决定。(2)双层球壳的回波可以用两个独立的球壳的回波近似合成,一个是假定内壳不存在,外壳半径不变、厚度不变,但是内部充水的外壳的亮点回波;另一个是假定外壳不存在,内壳半径不变、厚度不变内部真空内壳的亮点回波。这些结论在外壳很薄的条件下成立。根据上面的讨论,第2条结论应该稍作修正。内壳回波要计及声波两次穿过外壳的透射损失。

应当指出,实际水下目标的非耐压壳体与耐压壳体的间距约几10cm,总是远小于声呐脉冲的空间占宽。因此一般情况下难以区分两个亮点的回波。只有在缩比模型试验时人为地采用十分窄的脉冲才能区分两个亮点。

5 敷设吸声覆盖层的单层壳体

在外壳敷设吸声覆盖层(消声瓦)是目前降低回声的主要手段。吸声覆盖层通常是内部具有孔隙结构的粘弹性层。严格说来它是不均匀层。但是为了

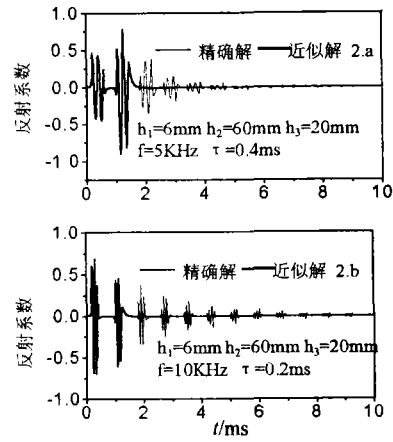


图2 水-钢板-水-钢板-空气结构的双层壳体回波波形

方便用等效参数来表征它的声学特性。这就是将非均匀材料的外在声学特性用具有等效参数的均匀材料来代替。

在下面的分析中我们假定吸声覆盖层具有对称性,前、后向波传播的等效参数相同。设覆盖层的厚度为 H , 等效参数是 ρ_F, \tilde{c}_F , 其中 \tilde{c}_F 是纵波复声速

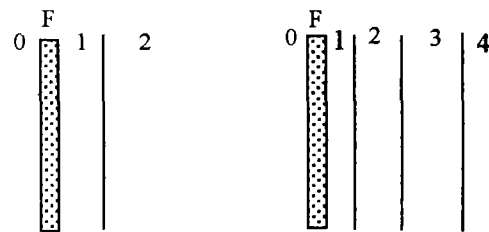
$$\tilde{c}_F = \sqrt{\frac{\tilde{E}}{\rho_F}} = \sqrt{\frac{E(1 - i\eta)}{\rho_F}} \quad (26)$$

$$\approx c_F(1 - i\eta/2), \quad c_F = \sqrt{\frac{E}{\rho_F}}$$

其中, $\tilde{E} = E(1 - i\eta)$ 是覆盖层的等效杨氏模量, η 是损耗因子。相应的复波数

$$\tilde{k}_F = \frac{\omega}{\tilde{c}_F} \left(1 - i\frac{\eta}{2}\right) \quad (27)$$

与裸露的单层壳体相比现在增加了一个覆盖层,见图3(a)。



3(a) 敷设吸声覆盖层单层壳体

3(b) 敷设吸声覆盖层双层壳体

除了水-钢界面的反射系数 r 与透射系数 $1 + r$ 以外,再定义与覆盖层有关的反射和透射系数:

- 水→覆盖层垂直反射系数 \tilde{g} ,
- 水→覆盖层垂直透射系数 $1 + \tilde{g}$
- 覆盖层→水垂直反射系数 $-\tilde{g}$,
- 覆盖层→水垂直透射系数 $1 - \tilde{g}$
- 覆盖层→钢垂直反射系数 \tilde{s} ,
- 覆盖层→钢垂直透射系数 $1 + \tilde{s}$

钢→覆盖层垂直反射系数 $-\bar{s}$,

钢→覆盖层垂直透射系数 $1-\bar{s}$

$$\bar{g} = \frac{\tilde{\rho}_F \tilde{c}_F - \rho_0 c_0}{\tilde{\rho}_F \tilde{c}_F + \rho_0 c_0}, \bar{s} = \frac{\rho_e c_e - \tilde{\rho}_F \tilde{c}_F}{\rho_e c_e + \tilde{\rho}_F \tilde{c}_F} \quad (28)$$

它们均为复数量。用递推方法得到敷设吸声覆盖层的单层壳体的反射系数

$$R_{0F12} = \bar{g} + (1 - \bar{g}^2)R_{F12}e^{i2\bar{k}_r H} - (1 - \bar{g}^2)\bar{g}R_{F12}e^{i4\bar{k}_r H} + \dots \quad (29)$$

其中,

$$R_{F12} = \frac{\bar{s} - e^{i2kh_1}}{1 - \bar{s}e^{i2kh_1}} \quad (30)$$

是覆盖层-钢板-空气结构的反射系数。

如果消声覆盖层的损耗系数 η 很大,声波在层内很快衰减,层内建立不起混响声场。在(28)式中可以只保留前两项

$$R_{0F12} \approx \bar{g} + (1 - \bar{g}^2)R_{F12}e^{i2\bar{k}_r H} \quad (31)$$

在这种近似下,敷设吸声覆盖层的单层壳体的回波可以看作有两个亮点,一个亮点位于覆盖层的前界面,另一个亮点位于覆盖层的后界面。如果覆盖层的损耗系数 η 较小,则可能还有第3、4...个亮点。

从(31)式可以看出,为了降低反射系数应当合理选择 \bar{g} 和 η 两个量,即覆盖层的阻抗和损耗因子。

6 敷设吸声覆盖层的双层壳体

这时变成由6种介质组成的层系,见图3(b)。用递推方法,第一步得到

$$R_{0F1234} = \frac{\bar{g} + R_{F1234}e^{i2\bar{k}_r H}}{1 + \bar{g}R_{F1234}e^{i2\bar{k}_r H}} \quad (32)$$

这里的 R_{F1234} 是将双层壳体的前介质由水变成覆盖层后的反射系数。继续递推得到

$$R_{F1234} = \frac{\bar{s} + R_{1234}e^{i2kh_1}}{1 + \bar{s}R_{1234}e^{i2kh_1}} \quad (33)$$

其中的 R_{1234} 与(18)式相同,将它们代入后得到

$$R_{F1234} = \frac{(\bar{s} - re^{i2kh_1}) - R_{234}e^{i2k_0 h_2}(\bar{s}r - e^{i2kh_1})}{(1 - \bar{s}re^{i2kh_1} - R_{234}e^{i2k_0 h_2}(r - \bar{s}e^{i2kh_1}))} = \frac{R_{F12} - R_{234}e^{i2k_0 h_2}\psi'}{1 - R_{234}e^{i2k_0 h_2}\varphi'} \quad (34)$$

其中 R_{F12} 是覆盖层-钢板-水结构的反射参数

$$R_{F12} = \frac{\bar{s} - re^{i2kh_1}}{1 - \bar{s}re^{i2kh_1}} \quad (35)$$

当 $kh_1 \ll 1$ 时得到

$$R_{F12} \approx \frac{\bar{s} - r}{1 - \bar{s}r} - i \frac{r(1 - \bar{s}^2)}{(1 - \bar{s}r)^2} 2kh_1 \quad (36)$$

通常覆盖层的阻抗接近于水的阻抗,因此 R_{F12} 接近

声学技术

于(16)式表示的水-钢-水结构的反射系数,也是一个小量:

$$\psi' = \frac{\bar{s}r - e^{i2kh_1}}{1 - \bar{s}re^{i2kh_1}}, \quad \varphi' = \frac{r - \bar{s}e^{i2kh_1}}{1 - \bar{s}re^{i2kh_1}} \quad (37)$$

当 $kh_1 \ll 1$ 时取零级近似

$$\psi' \approx 0, \quad \varphi' \approx \frac{r - \bar{s}}{1 - \bar{s}r} \quad (38)$$

考虑到 R_{F12} 也是一个量,将(34)式展开后得到

$$R_{F1234} \approx R_{F12} + R_{234}e^{i2k_0 h_2} \quad (39)$$

代入(32)式并保留前两项得到敷设吸声覆盖层的双层壳体的反射系数

$$R_{0F1234} \approx \bar{g} + (1 - \bar{g}^2)(R_{F12} + R_{234}e^{i2k_0 h_2})e^{i2\bar{k}_r H} \quad (40)$$

在这种情况下,双层壳体敷设吸声覆盖层后的回波可以看作有3个亮点,第1个亮点位于覆盖层的前界面,第2个亮点位于覆盖层与非耐压壳体界面上。第3个亮点位于耐压壳体的前界面上。其中后两个亮点与裸露的双层壳体的亮点相似,但是有两个变化,一是要加上覆盖层透射引起的修正因子 $(1 - \bar{g}^2)e^{i\bar{k}_r H}$,二是非耐压壳体的前介质由水变成覆盖层,因此幅度发生很大变化。

与未敷设吸声覆盖层的双层壳体一样,当 $kh_1 \ll 1$ 的条件满足得不太好时,要计及外层钢壳体的透射损失。于是(40)式要修改为

$$R_{0F1234} \approx \bar{g} + (1 - \bar{g}^2)R_{F12}e^{i2\bar{k}_r H} + (1 - \bar{g}^2)T_1 T_2 R_{234}e^{i2k_0 h_2} e^{i2\bar{k}_r H} \quad (41)$$

其中, T_1 是声波正向传播时经历的覆盖层-钢板-水的透射参数, T_2 是反向传播时经历的水-钢板-覆盖层的透射系数

$$T_1 = \frac{(1 + \bar{s})(1 - r)e^{ik_1 h_1}}{1 - r\bar{s}e^{i2k_1 h_1}}$$

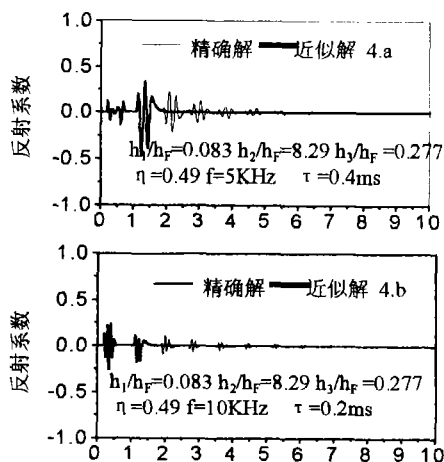


图4 水-吸声覆盖层-钢板-水-钢板-空气结构的双层壳体回波波形 (下转第170页)

在水中的传播速度 c 为常数。设此时凹锥面靶的顶角为 Ψ , 即 $\Psi = 2\pi - \beta$, 代入式(10)可得:

$$P = \frac{4Fc \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2}\right)}{[(1 - \cos \alpha)(\cos \psi - 1) - \sin \alpha \sin \psi]} \quad (15)$$

式(15)是用凹锥面靶测量声功率计算的理论基础。

5 结 论

本文对利用锥面靶测量大功率聚焦探头的辐射力与功率的换算进行了分析,并用两个特例验证了分析结果的合理性。文中以球壳聚焦换能器和锥面反射靶为例得到结果,事实上,聚焦换能器可能不是一个理想的球面,也可能根本不是球面(如阵列换能器等),这些并不重要,因为本文的讨论主要集中在换能器发出的超声束上,而非聚焦换能器本身。所以无论是何种聚焦曲面,只能换能器和其振动方式是轴对称的,只要是聚焦形式的超声束,本文的分析方法依然适用。最后导出的凹锥面全反射靶和大口径聚焦探头的功率与压力的换算关系为用凹锥面反射靶进行

大口径聚焦换能器功率测量提供了理论分析依据。

参考文献:

- [1] Cheng SQ, Zhou XD, Tang ZY, etc. High-intensity focused ultrasound in the treatment of experimental liver tumor [J]. J. Cancer Res. Clin. Oncol., 1997, 123(7): 219-223.
- [2] Chen L, Rivens I, ter Haar GR, etc. Histological changes in rat liver tumors treated with HIFU [J]. Ultrasound Med. Biol., 1993, 19(1): 67-74.
- [3] 邹建中, 王芷龙, 刘川等. 高强度聚焦超声定位损伤小型香猪肝脏组织的影像学检查 [J]. 中国超声医学杂志, 1999, 15(12): 401-403.
- [4] S. D. Pye, N. J. Parr, E. G. Munro, etc. Robust electromagnetic probe for the monitoring of lithotripter output [J]. Ultrasound in Med. And Biol., 1991, 17(6): 931-939.
- [5] Yan-ming Huo, Zhao-xiong Ye, Zhi-biao Wang, etc. Reflector design in ultrasonic power measurement by radiation pressure methods [A]. First International Workshop on the Application of High Intensity Focused Ultrasound (HIFU) in Medicine [C]. ChongQing, China: 重庆海扶技术有限公司, 2001. 11-13.
- [6] K. Besser. Radiation force calculation [J]. Acoustica, 1987, 62(3): 255-263.

(上接第 157 页)

$$T_2 = \frac{(1 - \tilde{s})(1 + r)e^{ik_1 h_1}}{1 - r\tilde{s}e^{i2k_1 h_1}} \quad (42)$$

与未敷设吸声覆盖层的双层壳体一样, (41)式忽略了内、外壳体通过耦合水层引起的水层共振。

图 4 给出水-覆盖层-钢板-水-钢板-空气结构壳体回波的计算结果。图 3 中的粗实线是按近似公式(41)计算的结果, 细实线是按精确公式(32)计算的结果。计算中非耐压壳体厚度 h_1 , 中间水层厚 h_2 , 耐压壳体厚 h_3 , 消声覆盖层厚 h_F , $h_1/h_F = 0.083$, $h_2/h_F = 8.2$, $h_3/h_F = 0.277$ 图 4. a 中入射波频率为 $f = 5\text{kHz}$, 脉冲宽度 $\tau = 0.4\text{ms}$, 图 4. b 中入射波频率为 $f = 10\text{kHz}$, 脉冲宽度 $\tau = 0.2\text{ms}$ 。图中第 1 个和第 2 个脉冲为消声覆盖层和非耐压壳镜反射亮点的回波, 因为消声覆盖层的厚度较小很难分出两个亮点, 第 3 个脉冲是耐压壳镜反射亮点的回波。可以看出, 近似公式很好地描述了前面 3 个亮点的特性, 忽略了耦合水层引起的多次反射。

7 小 结

本文用几何声线方法研究多层(平板)壳体的反射系数。导出了多层情况下的递推公式。可以证明, 这种方法与基于波动理论的传递矩阵方法是等价的。由于几何声线方法直接用各界面上的反射波叠加, 可以较方便地分析亮点结构, 导出亮点参数。

给出了裸露的和敷设吸声覆盖层的单层和双层壳体的镜反射系数, 并将它表示成亮点叠加的形式。其中对于双层壳体, 由于外层的非耐压壳体较薄, 总的反射系数可以近似等于外层壳体的反射系数和内层壳体的反射系数的叠加, 其中外层壳体是水-钢板-水结构, 反射系数是一阶小量; 内层壳体是水-钢板-空气结构的反射系数, 同时要计及外壳的透射系数。与此相应, 裸露的双层壳体可以看作有两个亮点。

敷设吸声覆盖层以后, 无论是单层还是双层壳体都增加了覆盖层前界面引起的反射亮点。并且, 由于覆盖层的存在, 前、后界面的反射和透射系数都发生变化, 因此各亮点的幅度有很大变化。

参考文献:

- [1] 汤渭霖. 声呐目标回波的亮点模型 [J]. 声学学报, 1994, 19(2): 92-99.
- [2] 汤渭霖, 范军. 双层弹性球壳的声散射 [J]. 声学学报, 1999, 24(2): 174-182.
- [3] 布列霍夫斯基赫著, 杨训仁译. 分层介质中的波. 第二版. [M]. 北京: 科学出版社, 1985. 48-53.
- [4] Thomson W T. Transmission of elastic wave through a stratified solid medium [J]. Journal of Applied Physics, 1950, 21(1): 89-93.
- [5] 何祚镛, 王曼. 水下均匀材料复合层吸声特性研究 [A]. 第六届船舶水下噪声学术讨论会论文集 [C]. 无锡: 中船重工集团第 702 研究所, 1995. 240-245.