

# 有限声束在固体板表面的声反射

邓明晰

(后勤工程学院物理教研室 重庆·400042)

采用将有限声束分解为一系列平面波的方法,对有限声束在液体-固体板-液体结构中的声反射问题进行了分析和计算。当有限声束以平面波反射系数相位为 $180^\circ$ 的入射角入射时,在固体板表面反射的声束沿板表面存在显著的移动和展宽现象。本文的有关结果,对进一步研究有限声束在板状结构表面的声反射具有积极意义。

关键词: 有限声束, 固体板, 声反射

## Reflection of acoustic beam on the surface of solid-plate

DENG Mingxi

(Logistical Engineering University, Chongqing · 400042)

Analysis and numerical computation have been performed for the reflection of acoustic beam on the solid-plate surface of layered structure: liquid-solid plate-liquid. The results indicate that the reflected beam will extremely move and expand along the surface of solid-plate, once incident angle of acoustic beam equals the angle in which the phase of reflection coefficient of plane wave is  $180^\circ$ . The analysis method in this paper is of significance for further studying the reflection of acoustic beam on the surface of layered structure.

**Key words:** acoustic beam, solid-plate, acoustic reflection

### 1 引言

人们在实际工作中常遇到声束在固体板表面的声反射问题,如对板材进行声检测时,通常将固体板置于液体介质中,利用声反射技术进行相应测量。一般地,入射声束是有限宽的(因换能器辐射面的有限性),以往在处理板状结构表面的声反射问题时,入射波均认为是无限宽的,这显然与实际不符。尽管文献<sup>[1,2]</sup>给出的理论公式适用于板状结构表面的有限声束声反射问题,但仅由理论公式并不能得到具体的在板状结构表面反射的声束的声场结构及性质,进行有关的数值分析是

必要的。本文拟对有限声束在固体板表面的声反射问题进行全面的分析与计算,此方法适宜于任何板状结构表面的声反射问题。

### 2 理论

为便于问题的分析,本文以液体-固体板-液体结构为例,讨论有限声束在固体板表面的声反射,建立坐标如图1(a)所示。首先讨论无限宽平面入射波的声反射。

入射角为 $\theta$ 的平面入射波位移矢量为 $u_0$ ,在固体板表面 $z=0$ 处将被反射和折射, $z>0$ 区域存在反射波 $u_1$ ;固体板内存在4个体声波,包括横波 $u_{T1}$ 、 $u_{T2}$ 和纵波 $u_{L1}$ 、 $u_{L2}$ ;在

作者: 邓明晰,男,1965年7月生,副教授

收稿日期: 97-5-27; 修回日期: 97-9-18

$z < -d$  区域存在折射波  $u_2$ 。将 7 个声波的位移矢量沿  $x, z$  分解, 得<sup>[3]</sup>:

区域  $0(z > 0)$ :

$$\left. \begin{aligned} u_x^{(0)} &= u_0 \sin R_0 + u_1 \sin R_1 \\ u_z^{(0)} &= -u_0 \cos R_0 + u_1 \cos R_1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

区域  $I(-d < z < 0)$ :

$$\left. \begin{aligned} u_x^{(I)} &= u_{L1} \sin L R_{L1} + u_{T1} \cos T R_{T1} + u_{L2} \sin L R_{L2} + u_{T2} \cos T R_{T2} \\ u_z^{(I)} &= -u_{L1} \cos L R_{L1} + u_{T1} \sin T R_{T1} + u_{L2} \cos L R_{L2} - u_{T2} \sin T R_{T2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

区域  $(z < -d)$ :

$$u_x^{(II)} = u_2 \sin R_2, \quad u_z^{(II)} = -u_2 \cos R_2 \quad (3)$$

其中  $R_n = \exp j[k \sin \theta \cdot x + (-1)^{n+1} K \cos \theta \cdot z]$ ,  $n = 0, 1$

$$R_{Qn} = \exp j[K_Q \sin \theta_Q \cdot x + (-1)^n K_Q \cos \theta_Q \cdot z], \quad n = 1, 2; \quad Q = T, L \quad (4)$$

$$R_2 = \exp j[K_2 \sin \theta_2 \cdot x - K_2 \cos \theta_2 \cdot z]$$

式(4)中的  $K, K_L$  和  $K_2$  分别是区域 0、和 的纵波波数;  $K_T$  是固体板内的横波波数。在固体板的两个表面上存在边界条件:

$$\left. \begin{aligned} z = 0: \quad u_z^{(0)} - u_z^{(I)} &= 0, \quad T_{zz}^{(0)} - T_{zz}^{(I)} = 0, \quad T_{xz}^{(I)} = 0 \\ z = -d: \quad u_z^{(I)} - u_z^{(II)} &= 0, \quad T_{zz}^{(I)} - T_{zz}^{(II)} = 0, \quad T_{xz}^{(I)} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式(1~3)和(5)中上标(0)、( )和( )表示不同区域; 由图 1(a)和式(1~3)可知, 未知数有 7 个, 而固体板两个表面共有 6 个方程。利用式(1~3)和应力计算公式, 结合式(5), 即可解出平面波入射时的反射系数。

在对无限宽平面波的声反射问题进行分析之后, 接下来讨论有限宽声束在固体板表面的声反射。有限声束可视为无限宽平面波穿过图 1(b)所示障板上狭缝所引起, 声束几何边界用实线表示。为简便起见, 设所研究对象是二维问题, 即障板上狭缝无限长, 其他有关尺寸见图 1(b)。当缝宽尺寸  $2a$  远大于波长时, 可假设: (1) 在障板背面的声场等于零; (2) 在狭缝平面上声场就象障板不存在一样。经障板后声束的位移振幅分布函数为:

$$\left. \begin{aligned} u(x) &= 1, \quad -a \leq x \leq a, \quad z = 0 \\ u(x) &= 0, \quad x > a \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

据傅氏变换原理, 可将有限声束分解为一系列平面波。OX 轴向上波数分量为  $\xi$  的平面波幅度为(见图 1(b))<sup>[1,2]</sup>:

$$U(\xi) = \frac{1}{2} \int_{-a}^a u(x) \exp(-j \xi x) dx \quad (7)$$

由式(6)和(7)得  $U(\xi) = \sin(\xi a) / \xi$ 。若不考虑固体板的存在, 图 1(b)中有限声束在  $z > 0$

区域声场为:

$$u(x, z) = \int_{-\infty}^{\infty} U(\xi) \exp[j(\xi x - \sqrt{K^2 - \xi^2} z)] d\xi \quad (8)$$

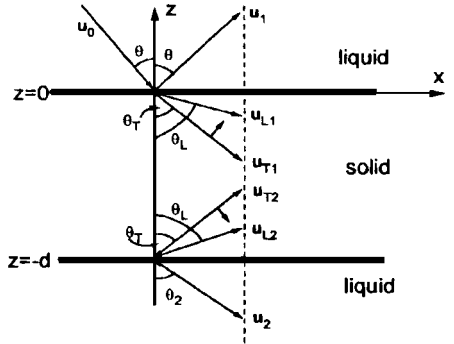


图 1(a) 液体-固体板-液体结构的入射和反射声场

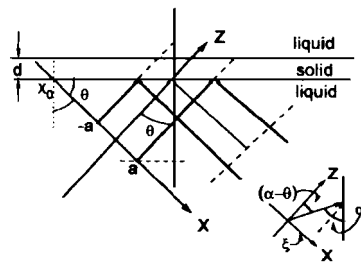


图 1(b) 计算有限声束在固体板表面声反射的坐标系

当  $z > K$  时,  $U(z)$  对应的平面波沿其传播方向具有衰减特性, 在传播一定距离之后, 这一部分衰减波可以不予考虑, 故式(8)变为:

$$u(x, z) = \int_{-K}^{+K} U(\alpha) \exp[j(\alpha x + \sqrt{K^2 - \alpha^2} z)] d\alpha \quad (9)$$

若固体板表面为理想反射面(对任意入射角反射系数幅值为 1, 相位为零), 固体板对有限入射声束各个平面波分量的作用相当于对其作镜面反演, 反射声束可由直接传播的声束(相当于固体板不存在)经固体板表面镜面反演后得到, 图 1(b) 中的  $\alpha_0$  为有限声束之入射角。实际上固体板表面对不同入射角的平面入射波有不同的反射系数。入射声束在点  $(x, z)$  处的声场由式(9)确定。设波数为  $K$  的平面波分量的入射角为  $\alpha$ ,  $\alpha$  和  $\alpha_0$  之间存在关系:  $\alpha = K \sin(\theta - \theta_0)$ 。相应的反射系数设为  $R(\alpha)$ , 经固体板表面反射后  $\alpha$  分量平面波声场为(计算时认为  $\alpha$  分量的平面波仍沿原传播方向, 然后以固体板表面作镜面反演)即得  $\alpha$  分量的反射声场:

$$U(\alpha) R(\alpha) \exp[j(\alpha x + \sqrt{K^2 - \alpha^2} z)] \quad (10)$$

据  $U(\alpha)$  和式(9)(10)得到点  $(x, z)$  处[满足关系  $z > \tan(\theta - \theta_0)(x - x_0)$ ]的声场:

$$u(x, z) = \int_{-K}^{+K} R(\alpha) F(\alpha, \alpha_0, a, x, z) d\alpha + \int_{-K}^{+K} F(\alpha, \alpha_0, a, x, z) d\alpha \quad (11)$$

其中,

$$F(\alpha, \alpha_0, a, x, z) = \frac{\sin[2 \sin(\theta - \theta_0) x]}{\sin(\theta - \theta_0)} \cos(\theta - \theta_0) \times \exp[j(2 \sin(\theta - \theta_0) x + 2 \cos(\theta - \theta_0) z)]$$

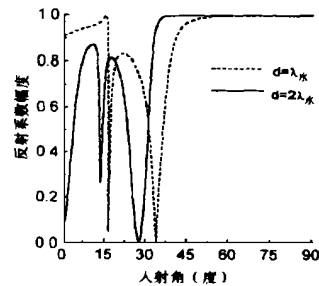
上式中  $\lambda$  为液体介质的声波长。对式(11)计算所得结果以固体板表面(见图 1(b), 即为  $z = \tan(\theta - \theta_0)(x - x_0)$ )作镜面反演, 得到反射声束的声场, 应作说明的是, 有限声束辐射面与固体板反射表面之间的相对位置由  $x_0$  和  $\theta_0$  予以确定。至此, 有限入射声束经固体板表面反射后的声场在形式上就被完全确定。

### 3 数值计算与讨论

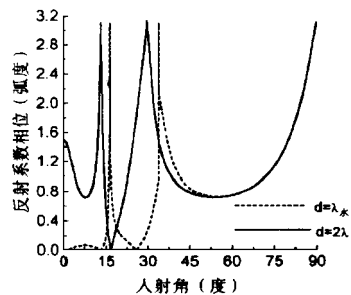
对前述所得反射声场公式进行数值计算, 以说明固体板对有限声束反射的影响。区域 0、 $\lambda$  的液体取为水, 区域  $\lambda$  的材料为铁, 介质的有关参数取自文献 3, 见下表:

介质种类	密度(g/cm <sup>3</sup> )	纵波声速(m/s)	横波声速(m/s)
水	1.00	1480	-
铁	7.83	5948	3236

当固体板厚度为  $\lambda$  水和  $2\lambda$  水时( $\lambda$  为水中声波长), 平面波的反射系数幅值和相位如图 2 所示。



(a) 幅度



(b) 相位

图 2 平面波在固体板表面的声反射系数

图 2 表明, 在固体板厚度确定的条件下, 当入射角取某些值时反射系数的相位为  $180^\circ$  (即存在半波损失)。对有限声束在液体-固体表面反射的情形, 平面波反射系数的相位在以瑞利波激发角入射和掠入射时(注: 瑞利波激发角  $\theta_R = \sin^{-1}(V/V_R)$ ,  $V$ : 液体纵波声速,  $V_R$ : 半无限大固体的瑞利波声速), 反射系数的相位也为  $180^\circ$ ; 理论和实验已证明<sup>[2,4,5]</sup>: 有限声束以瑞利波激发角入射在液

体-固体表面时,反射声束有很明显的平移。对有限声束在固体板表面反射的情形,若平面波反射系数相位为  $180^\circ$  时的入射角以  $\theta_0$  表示,当固体板层厚为  $\lambda_w$  时,  $\theta_0 = 16.4^\circ$  和  $33.9^\circ$ ; 固体板层厚为  $2\lambda_w$  时,  $\theta_0 = 13.5^\circ$  和  $22.5^\circ$ 。预计当有限声束入射角为  $\theta_0$  时,在固体板表面反射的声束也将发生显著的平移。

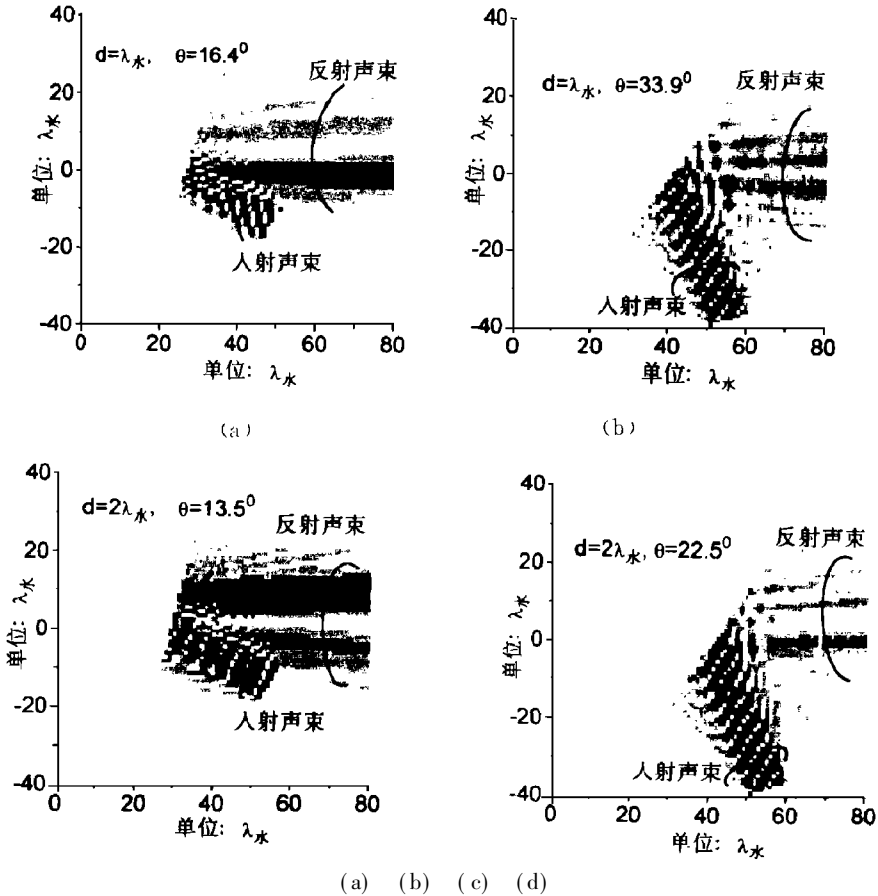


图 3 入射角为  $\theta_0$  时有限声束在固体板表面的入射和反射声场

实验<sup>[1]</sup>和图 3 表明,有限声束的入射角为  $\theta_0$  时,经固体板表面反射的声束存在显著的平移现象。用声学的射线理论对反射声束的平移作如下解释:有限声束由液体介质入射到固体板表面,存在一反射声束 1,同时有透射声束 2(其中包括横、纵波成分)进入固体板内;声束 2 在固体板的另一表面反射,即有声束 3,声束 3 在固体板表面透射后,形成声束 4(见图 4);因此,总的反射声束就包括

图 3 给出了有限声束入射角为  $\theta_0$ 、声束宽度  $2a = 10\lambda_w$ ,在固体板表面的入射及反射声场的灰度图;在图 3 对应的灰度图中,声场取值已归一化,0~1 被量化为 8 级,且级差是线性化的;在一个  $\lambda_w$  范围里只有一个象元(素)。在图 3(a)~3(d)中,图 1(b)中对应的  $x_0$  分别为:  $-100\lambda_w$ ,  $-55\lambda_w$ ,  $-125\lambda_w$  和  $-60\lambda_w$ 。

声束 1 和声束 4,表现出平移和展宽的性质。

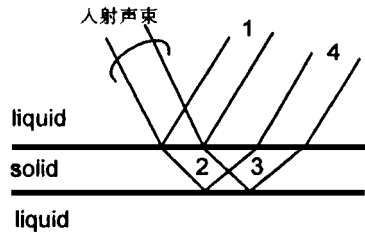


图 4 对固体板表面反射声束平移的解释

## 4 结 语

采用本文方法,可很方便地对有限声束在固体板表面的声反射问题进行计算。数值计算结果清晰地显示了有限声束在液体-固体板-液体结构的入射及反射声场。计算表明,当固体板厚度确定、且有限声束以平面波反射系数相位为  $180^\circ$  时的入射角入射时,反射声束具有显著的平移和展宽性质。借助于本文给出的有关分析方法和计算结果,能更为全面地探讨有限声束在板状结构表面的声反射问题,这在实际应用中具有重要意义。

### 参考文献

- 1 布列霍夫斯基赫. 分层介质中的波,北京:科学出版社,1985:63~69
- 2 邓明晰. 有限入射声束在液固界面的声反射. 电子科技大学学报. 1997;26(增刊):109~113
- 3 B. A. Auld. Acoustic fields and waves in solids. Vol. I. Wiley, New York:1973
- 4 W. G. Neubauer. Ultrasonic reflection of a bounded beam at Rayleigh and critical angles for a plane liquid-solid interface. J. Appl. Phys., 1973; 44(1): 48~55
- 5 W. G. Neubauer, L. R. Dragonette. Measurement of Rayleigh phase velocity and estimates of shear speed by schlieren visualization. J. Appl. Phys., 1974; 45(5): 618~622

---

## 全国六个声学分会联席工作会议在无锡召开

中国环保产业协会噪声与振动控制委员会、中国声学学会环境声学分会、中国环境科学学会环境工程分会、中国劳动保护科学技术学会噪声与振动控制专业委员会、中国建筑学会建筑物理专业委员会、中国振动工程学会振动与噪声控制专业委员会等全国六个声学分会负责人联席工作会议,于1998年5月7日至9日在无锡堰桥噪声控制设备厂召开。会议交流了近两年来噪声与振动控制的新信息、新动态、新进展,商讨了学术交流活动的主题、征文内容、会议安排等事宜。决定于1999年5月召开第八届全国噪声与振动控制工程学术会议,这是本世纪最后一次全国性盛会,希望同行踊跃投稿,参加交流,为使21世纪的环境更宁静而努力。

中国船舶工业总公司第九设计研究院 吕玉恒