

界面条件下线型超声相控阵声场特性研究*

孙芳^{1)†} 曾周末¹⁾ 王晓媛¹⁾ 靳世久¹⁾ 詹湘琳²⁾

1) (天津大学精密测试技术与仪器国家重点实验室, 天津 300072)

2) (中国民航大学航空自动化学院, 天津 300300)

(2010年9月19日收到; 2010年11月8日收到修改稿)

开展了界面条件下线型超声相控阵声场特性的研究. 将带有楔块的超声相控阵问题合理简化为液固界面的情况进行讨论. 根据射线声学理论, 计算了单阵元在液固界面存在时的辐射声场, 进而推导了聚焦法则, 得到了超声线型阵在液固界面存在时的声场、位移场表达式. 对安装在楔块上的相控阵换能器的辐射声场进行了仿真, 并讨论了聚焦对换能器轴向和横向声场的影响, 结果表明利用聚焦能提高分辨率和灵敏度, 但聚焦区域之外声束性能更差, 在实际检测中要合理利用聚焦.

关键词: 超声相控阵, 界面, 声场, 聚焦

PACS: 43.20.Bi, 43.38.Hz, 43.35.Zc, 43.20.EI

1. 引言

超声相控阵技术源于雷达相控阵技术, 最初被用于医疗领域^[1], 在上世纪60年代初期才被引用于超声自动探伤领域中^[2]. 在实际检测过程中, 往往需要添加楔块或者采用水浸等方法进行检测, 因此有必要研究存在两种介质分界面这种情况下的声场问题, 以便更好地使用超声相控阵换能器, 提高检测的准确性、精度等.

关于超声相控阵声场特性的研究较多的是线型阵列, 一些学者^[3-6]研究了超声线阵远场声压特性, 根据声压的近似解析形式, 并讨论了换能器参数对于远场指向性影响. 为了进一步研究, Woooh等^[7-10]用数值法求解超声相控阵近场声压, 并结合远场声压的解析解来分析换能器参数对声场的影响. 这些都是针对单一介质而研究声场特性, 对界面情况没有指导意义. 文献[11]针对界面情况做了一定的研究, 对固固界面的声场进行了仿真, 但没有提出计算聚集法则的方法, 对聚焦效果没有更深入地讨论.

为了进一步研究, 本文针对工业中使用超声相控阵斜探头检测的问题, 对其模型进行了合理简化, 开展了存在液固界面时线型超声相控阵稳态声场的研究, 并重点讨论了平面声波通过液固界面的

折射以及聚焦法则的计算等问题, 通过仿真讨论了聚焦对检测的影响.

2. 单阵元辐射声场

工业中常用的带有楔块的超声相控阵换能器如图1所示. 换能器将在楔块中产生纵波, 并且楔块和试块之间是液态耦合剂, 无法传播横波, 因此可以把这种固固界面的情况简化为液固界面的情况进行研究.

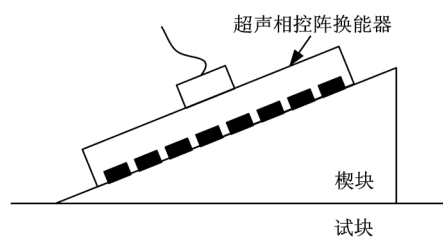


图1 带有楔块的超声相控阵换能器

2.1. 液体中单阵元声压公式

液体中矩形活塞式声源的辐射声场可以使用 Rayleigh-Sommerfeld 积分进行计算, 如图2所示, 液体介质中任意一点 x 的稳态声压^[12]为

* 精密测试技术及仪器国家重点实验室开放基金(批准号:# PIL0903)资助的课题.

† E-mail: sunfang@tju.edu.cn

$$p(\mathbf{x}, \omega) = -\frac{i\omega\rho_1 u_a}{2\pi} \int_s \frac{\exp(ik\mathbf{r})}{r} ds, \quad (1)$$

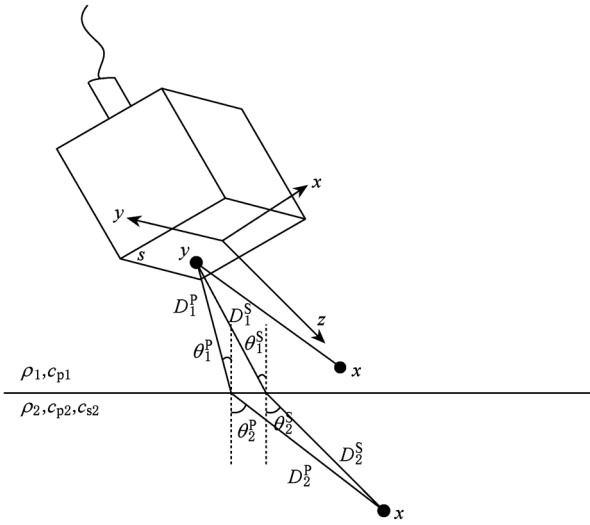


图2 矩形阵元辐射声波示意图

该式为三维方向上的声压表达式,其中 ω 为角频率, ρ_1 为液体的密度, u_a 为换能器的表面振速. \mathbf{r} 为 \mathbf{x} 到阵元表面某点的距离. (1) 式为球面波叠加的形式,为了便于后面折射声压的计算,将其表达为平面波叠加的形式^[13]

$$p(\mathbf{x}, \omega) = \frac{\omega\rho_1 u_a}{4\pi^2} \int_s \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp[\mathbf{i}\mathbf{p}_1 \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{y})]}{p_{1z}} \times dp_x dp_y \right\} ds(\mathbf{y}), \quad (2)$$

其中 $\mathbf{p}_1 = p_x \mathbf{e}_x + p_y \mathbf{e}_y + p_{1z} \mathbf{e}_z$ 为液体介质中的波数向量, $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$ 分别是直角坐标系下 x, y, z 方向的单位向量,并且

$$p_{1z} = \begin{cases} \sqrt{k_{p1}^2 - p_x^2 - p_y^2}, & k_{p1}^2 > p_x^2 + p_y^2, \\ i\sqrt{p_x^2 + p_y^2 - k_{p1}^2}, & k_{p1}^2 < p_x^2 + p_y^2, \end{cases} \quad (3)$$

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega) = \sum_{\alpha=P,S} \frac{\rho_1 u_a}{4\pi^2 i \rho_2 c_{\alpha 2}} \int_s \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{T_{12}^{\alpha;P} \mathbf{d}_\alpha \exp[\mathbf{i}\mathbf{p}_2^\alpha \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{y}) + p_{1z} D - p_{2z}^\alpha D]}{p_{1z}} dp_x dp_y \right\} ds(\mathbf{y}). \quad (7)$$

利用稳相法对上式中的双重积分进行化简得

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega) = \sum_{\alpha=P,S} \frac{-\rho_1 u_a}{2\pi \rho_2 c_{\alpha 2}} \int_s \frac{T_{12}^{\alpha;P} \mathbf{d}_\alpha \exp[i(k_{p1} D_1^\alpha + k_{\alpha 2} D_2^\alpha)]}{\sqrt{D_1^\alpha + c_{\alpha 2} D_2^\alpha / c_{p1}} \sqrt{D_1^\alpha + c_{\alpha 2} D_2^\alpha \cos^2 \theta_1^\alpha / (c_{p1} \cos^2 \theta_2^\alpha)}} ds(\mathbf{y}), \quad (8)$$

其中 D_1^α, D_2^α 是根据射线声学理论,声波由 \mathbf{y} 到 \mathbf{x} 经过液固界面所对应的液体、固体介质中的路径,因为在固体中发生波型转换,所以 $\alpha = P, S$ 分别代表纵、横波两种情况. 对于特定的波型以及介质,路径是唯一的,必定满足 snell 定律. 其他参数与图 2 相

其中, k_{p1} 是液体介质中的波数, $k_{p1} = \omega / c_{p1}$.

2.2. 三维方向上平面波入射到液固界面的折射情况

如图 2 所示,当入射平面波为 $\exp[\mathbf{i}\mathbf{p}_1 \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{y})]$ 时,根据边界条件:在分界面的法向应力连续、法向位移连续且切向应力为零,计算通过液固界面后的位移为

$$\mathbf{u}_\alpha = \frac{T_{12}^{\alpha;P}}{i\omega\rho_2 c_{\alpha 2}} \mathbf{d}_\alpha \exp[\mathbf{i}\mathbf{p}_2^\alpha \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{y}) + p_{1z} D - p_{2z}^\alpha D], \quad (4)$$

其中, \mathbf{d}_α 是位移偏振方向上的单位向量, $\mathbf{p}_2^\alpha = p_x \mathbf{e}_x + p_y \mathbf{e}_y + p_{2z}^\alpha \mathbf{e}_z$ 为固体介质中的波数向量 ($\alpha = P, S$ 分别表示纵波、横波),并且

$$p_{2z}^\alpha = \begin{cases} \sqrt{k_{\alpha 2}^2 - p_x^2 - p_y^2}, & k_{\alpha 2}^2 > p_x^2 + p_y^2, \\ i\sqrt{p_x^2 + p_y^2 - k_{\alpha 2}^2}, & k_{\alpha 2}^2 < p_x^2 + p_y^2, \end{cases} \quad (5)$$

式中 $D = \mathbf{X}_p \cdot \mathbf{n}$, \mathbf{X}_p 为分界面上的点的位置向量, \mathbf{n} 为分界面的法向量, $T_{12}^{\alpha;P}$ 是基于应力/声压比的透射系数

$$T_{12}^{P;P} = \frac{T_p}{P_i} = -\frac{2Z_L \cos 2\theta_2^s}{Z_L \cos^2 2\theta_2^s + Z_s \sin^2 2\theta_2^s + Z_1}, \quad (6a)$$

$$T_{12}^{S;P} = \frac{T_s}{P_i} = \frac{2Z_s \sin 2\theta_2^s}{Z_L \cos^2 2\theta_2^s + Z_s \sin^2 2\theta_2^s + Z_1}, \quad (6b)$$

其中, T_p 是平面波的法向应力幅值, T_s 是平面波的切向应力幅值, $Z_1 = \rho_1 c_{p1} / \cos \theta_1^p$, $Z_L = \rho_2 c_{p2} / \cos \theta_2^p$, $Z_s = \rho_2 c_{s2} / \cos \theta_2^s$.

与(2)式类似,将固体介质中的声位移经平面波叠加得

对应.

3. 液固界面下阵列辐射声场

单个阵元的声场经过特定的延时(即聚焦法

则)进行叠加,可形成偏转、聚焦的声场效果.下面以声束偏转聚焦为例讨论聚焦法则的计算问题.

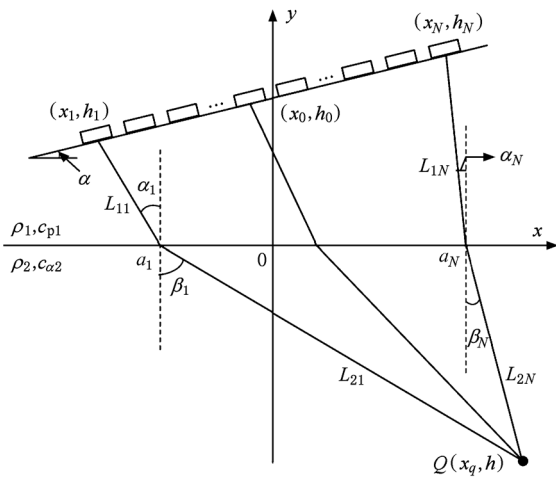


图3 界面条件下相控阵声束偏转聚焦示意图

3.1. 声束偏转聚焦的聚焦法则

聚焦法则的计算同样是基于射线声学理论,建立直角坐标系(图3), x 轴代表分界面, y 轴穿过阵列中心 (x_0, h_0) .由阵列中心坐标、倾角 α 以及阵元

间距 d 可以求得各阵元中心的坐标 (x_n, h_n) ($n = 1, 2, \dots, N$).假设声束聚焦点为 $Q(x_q, h)$,各阵元声束到达分界面时与 x 轴交点的横坐标为 a_1, a_2, \dots, a_N ,各阵元发射声束在两种介质中传播路径为 L_{1n}, L_{2n} ($n = 1, 2, \dots, N$),则根据几何关系及 Snell 定理有

$$\frac{x_q - a_n}{L_{2n}} c_{p1} = \frac{a_n - x_n}{L_{1n}} c_{\alpha 2}, \quad (9)$$

$$L_{1n}^2 = h_n^2 + (a_n - x_n)^2,$$

$$L_{2n}^2 = h^2 + (x_q - a_n)^2,$$

其中, $n = 1, 2, \dots, N, \alpha = P, S$ 分别代表纵波、横波.

则第 n 个阵元的时延为

$$\Delta t_n = \frac{L_{1\max} - L_{1n}}{c_{p1}} + \frac{L_{2\max} - L_{2n}}{c_{\alpha 2}}, \quad (10)$$

其中 $L_{1\max}, L_{2\max}$ 分别是 L_{1n}, L_{2n} ($n = 1, 2, \dots, N$) 的最大值.

3.2. 计算阵列声场

假设每个阵元上的点的振动是均匀且一致的,即每个阵元上各点的延时法则一致,则经过延时叠加的液体中的阵列声场及固体中的位移场为

$$p(\mathbf{r}, \omega) = -\frac{i\omega\rho_1 u_a}{2\pi} \sum_{n=1}^N \int_{s_n} \frac{\exp[i(k\mathbf{r} - \Delta\phi_n)]}{r} ds_n, \quad (11)$$

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega) = \sum_{\alpha=P,S} \frac{-\rho_1 u_a}{2\pi\rho_2 c_{\alpha 2}} \sum_{n=1}^N \int_{s_n} \frac{T_{12}^{\alpha;P} \mathbf{d}_\alpha \exp[i(k_{p1} D_1^\alpha + k_{\alpha 2} D_2^\alpha - \Delta\phi_n)]}{\sqrt{D_1^\alpha + c_{\alpha 2} D_2^\alpha / c_{p1}} \sqrt{D_1^\alpha + c_{\alpha 2} D_2^\alpha \cos^2 \theta_1^\alpha / (c_{p1} \cos^2 \theta_2^\alpha)}} ds_n(\mathbf{y}), \quad (12)$$

其中 $\alpha = P, S$ 分别表示纵波和横波, $\Delta\phi_n = \omega \cdot \Delta t_n$ 为第 n 个阵元的延时相位.

4. 仿真结果及分析

(12)式所计算的位移包括纵波和横波两部分,这里选择固体介质中的纵波作为代表进行仿真分析.比较(11)式和(12)式发现,固体中的位移幅值相对第一介质中的声压幅值太小,不利用分析,下面对固体介质中的位移幅值进行适量放大,使两者处于同一数量级以用于仿真分析.经放大后的位移为

$$\tilde{U} = k_{p2} \rho_2 c_{p2}^2 U_p = \omega \rho_2 c_{p2} U_p, \quad (13)$$

其中, U_p 是(12)式中 $\alpha = P$ 部分的位移幅值.

所选带有楔块的超声相控阵换能器参数如表1

所示.楔块倾斜角为 15° ,纵波声速为 2730 m/s ,密度为 1.18 kg/m^3 ;第二介质为钢,纵波声速为 5900 m/s ,横波声速为 3230 m/s ,密度为 7.8 kg/m^3 ,阵列中心与分界面距离 18 mm .

表1 超声相控阵换能器参数表

参数名称	参数值
中心频率/MHz	5
阵元数目/个	32
阵列孔径/mm	25.5
阵元长度/mm	10
阵元宽度/mm	0.7
相邻阵元中心间距/mm	0.8

使用表1所示的换能器,根据(11),(13)式计算楔块和钢中的声压及位移幅值来反映声波辐射

的情况. 所绘制的图中坐标与图 3 所建立的坐标系一致, 并且为了达到更好的显示效果, 声压和位移幅值均取了对数后显示. 图 4 是声波在钢中偏转 30° 时的辐射情况; 图 5 是声波在钢中偏转聚焦时的辐射情况, 偏转角为 30°, 聚焦深度为 20 mm. 通过图 4、图 5 相比较发现, 聚焦点附近声束集中且能量较大, 离开聚焦点声束发散, 幅值减小.

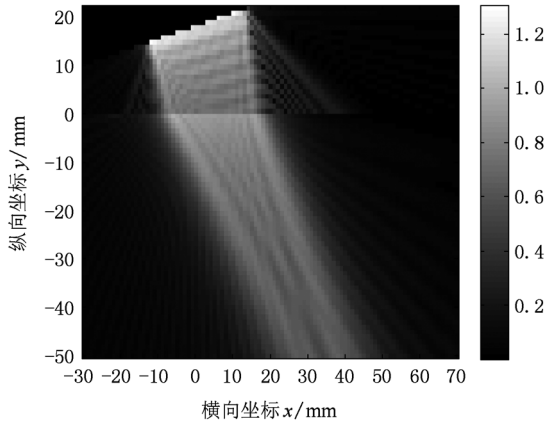


图 4 偏转时的声压及位移幅值分布图

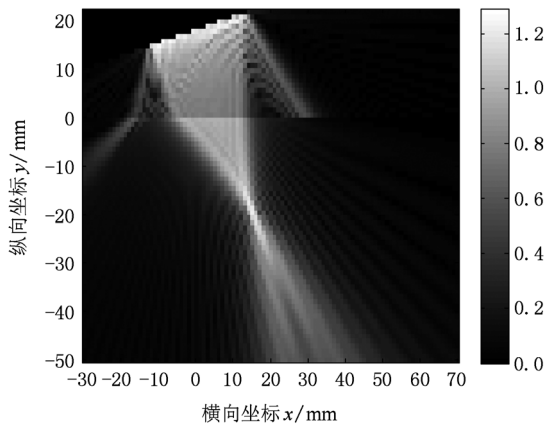


图 5 偏转聚焦时的声压及位移幅值分布图

为了将聚焦与非聚焦效果做更直观地做对比, 图 6 绘制了两种情况下声束垂直入射时钢中纵向与横向归一化位移幅值随坐标的变化(聚焦深度仍为 20 mm), 其中图 6(a) 反映了纵向归一化位移幅值随纵向深度的变化, 图 6(b) 是聚焦深度处横向归一化位移幅值随横向坐标的变化曲线, 图 6(c) 是非聚焦深度处横向归一化位移幅值随横向坐标的变化曲线. 可以看出, 在采用聚焦发射时, 在聚焦点处的归一化位移幅值最大, 从横向分布来看更尖锐, 能提高灵敏度及分辨率; 非聚焦点处, 声束发散且声

波幅值有可能比非聚焦发射时还要低.

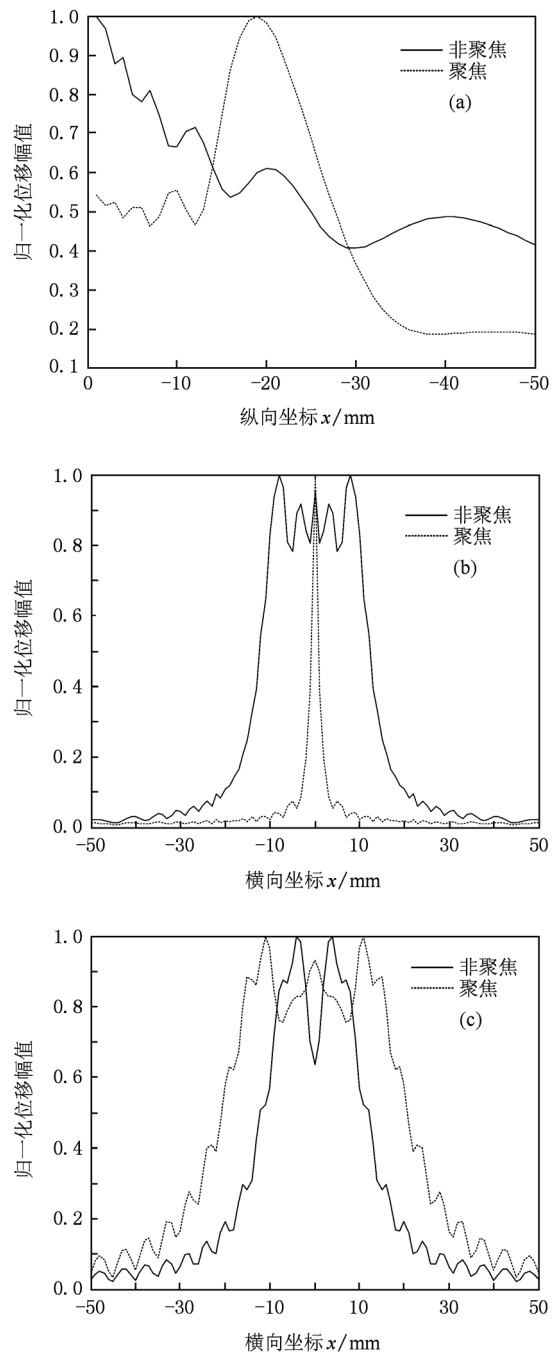


图 6 归一化位移幅值随横向、纵向坐标的变化情况 (a) 归一化位移幅值随纵向坐标的变化情况; (b) 20 mm 深度处归一化位移幅值随横向坐标的变化情况; (c) 70 mm 深度处归一化位移幅值随横向坐标的变化情况

5. 结 论

对于工业中常用的带楔块的超声相控阵换能器, 由于液态耦合剂的存在无法传播横波, 故可简

化为液固界面的情况进行分析. 首先将单阵元的声场表达为平面声波叠加的形式, 根据边界条件, 可以计算平面波通过液固界面后的位移场. 然后对每个阵元施加设定的延时法则, 推导出线型阵列在液体和固体介质中的声场及位移场表达式. 最后对带

有楔块的超声相控阵声场进行了仿真, 结果表明聚焦比非聚焦能提高分辨率和灵敏度, 但聚焦区域之外声束性能比非聚焦更差, 因此在检测时可用非聚焦进行粗扫描, 对关键区域用聚焦方式进行细扫描.

-
- [1] Zhong Z M, Mei D S 2002 *Nondestr. Test.* **24** 69 (in Chinese) [钟志民、梅德松 2002 无损检测 **24** 69]
- [2] R/D Tech 2004 *Introduction to phased array ultrasonic technology applications* (Canada: R/D Tech) p4
- [3] Hang J, Zhang Z G, Que P W, Jin J H 2004 *Piezoel. & Acoustoopt.* **26** 506 (in Chinese) [黄晶、张志钢、阙沛文、金建华 2004 压电与声光 **26** 506]
- [4] Xue X Y, Ge J M, Liu Z Q 2005 *Tech. Acoust.* **24** 61 (in Chinese) [许雪莹、葛剑敏、刘镇清 2005 声学技术 **24** 61]
- [5] Yang T X, Xu C G, Xiao D G, Li X 2009 *Nondestr. Test.* **31** 181 (in Chinese) [杨天雪、徐春广、肖定国、李爽 2009 无损检测 **31** 181]
- [6] Lemon D K, Posakony G J 1980 *Mater. Eval.* **38** 34
- [7] Azar L, Shi Y, Wooh S C 2000 *NDT&E Int.* **33** 189
- [8] Wooh S C, Shi Y 1999 *Wave Mot.* **29** 245
- [9] Wooh S C, Shi Y 1999 *J. Nondestr. Eval.* **18** 39
- [10] Wooh S C, Shi Y 1998 *Ultrasonics* **36** 737
- [11] Song J S, Kim C H 2002 *Ultrasonics* **40** 519
- [12] Huang R, Schmerr L W 2009 *Ultrasonics* **49** 219
- [13] Zhang H L 2007 *Theoretical Acoustics* (Beijing: Higher Education Press) p270 (in Chinese) [张海澜 2007 理论声学 (北京: 高等教育出版社) 第270页]

Acoustic field characteristics of ultrasonic linear phased array for an interface condition *

Sun Fang^{1)†} Zeng Zhou-Mo¹⁾ Wang Xiao-Yuan¹⁾ Jin Shi-Jiu¹⁾ Zhan Xiang-Lin²⁾

1) (State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

2) (College of Aeronautical Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

(Received 19 September 2010; revised manuscript received 8 November 2010)

Abstract

Acoustic field characteristics of an ultrasonic linear phased array are studied under the condition of an interface. The issue about a phased array transducer with a wedge is reasonably simplified into a liquid-solid interface problem. According to ray acoustics theory, the acoustic field produced by a single element on the liquid-solid interface is computed. Then focus laws are derived and the expressions of the sound field and the displacement of the ultrasonic linear array with a liquid-solid interface are obtained. Simulations are carried out for a phased array transducer mounted on a wedge. The focusing-generated effects on axial and horizontal acoustic field of transducer are discussed. It is shown that the focusing can enhance sensitivity and resolution, but degrades the performance of beams beyond the focal region. So focusing should be reasonably used in actual testing.

Keywords: ultrasonic phased array, interface, acoustic field, focusing

PACS: 43.20.Bi, 43.38.Hz, 43.35.Zc, 43.20.El

* Project supported by the Open Fund from State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument (Grand No. # PIL0903).

† E-mail: sunfang@tju.edu.cn