

波束在液-液界面上反射和透射的研究

陈 宇 (清华大学物理系, 中科院声场声信息国家重点实验室 北京·100084)

黄 杰 周阳辛 (清华大学物理系 北京·100084)

1 引言

在自然界中,波在界面上的反射是一种常见的现象。很早就有人提出理论来解释这类现象。现在人们已经能够很好地解释时空无限的平面波反射问题。对于时空有限波(即脉冲或波束)的反射问题人们也提出了一些理论解释。但由于描述时空有限波的数学理论比较复杂,在时空有限波的反射问题上仍有许多方面值得深入研究^[1]。本文主要是研究声波束在液-液界面上的反射。一个常见的关于波束反射的理论可以在文献[2]中找到,这个理论成功地描述了当入射波束大于全反射临界角时反射波束发生平移的现象。但这个理论采用了平面波的反射系数来描述理想反射波束,它所给出的结果不能详细描述实际反射波束和透射波束的行为。

在以下的研究中,我们采用球面波来描述波束。一个波源可以看成是许多点源的迭加,波束是这些点源发出的球面波迭加的干涉极大。反射波束和透射波束分别是反射球面波和透射球面波的迭加。采用这个方法得到入射、反射和透射波束的表达式,严格满足波动方程和声压、位移分别连续的边界条件。但是用解析的方法分析这些解是比较困难的,我们直接用数值分析的方法得到各波束的等声压级图。计算结果表明当入射波束以小于全反射临界角入射时,反射波束也会发生平移的现象。特别值得注意的是:在一定条件下透射波也会发生位移。

2 波束的积分表达式

为了得到球面波的反射波和透射波的解析表达式应采用积分表达式。如果一个点源位于 (x, y) ,在 (x, y) 处的声强为

$$P_i = \frac{\exp(ik_1 \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2})}{(x-x')^2 + (y-y')^2} \quad (1)$$

式(1)中我们已经忽略时间的因子, k_1 为波数。设界面在 $y=0$ 处,反射波的声强可表示为^[3]

$$P_r = \frac{\rho_2 \xi - \rho_1 \sqrt{\xi^2 + k_1^2 - k_2^2}}{ik_1 \rho_2 \xi + \rho_1 \sqrt{\xi^2 + k_1^2 - k_2^2}} J_0((x-x') \xi) \cdot \sqrt{\xi^2 + k_1^2} \exp(-(y+y') \xi) d\xi \quad (2)$$

上式中 ρ 表示介质密度,下标表示不同的介质。在第二介质中的透射声波为

$$P_t = \frac{2\rho_1}{\rho_2 \sqrt{\xi^2 - k_1^2} + \rho_1 \sqrt{\xi^2 - k_2^2}} J_0((x-x') \xi) \cdot \exp(-y \sqrt{\xi^2 - k_1^2} + y' \sqrt{\xi^2 - k_2^2}) \xi d\xi \quad (3)$$

研究波束时,我们可以仅考虑一个线源。在过线源并且垂直于反射面的平面上我们可以得到一个等声压图,这个图和由对称面源在垂直于反射面的中轴面上产生的等声压图很相似。若线源位于直线 l' 上,沿 l' 求积分可得到在平面上各波束的表达式

$$P_i(x, y) = \int_l P_i(x, y, x', y') dl \quad (4)$$

$$P_r(x, y) = \int_l P_r(x, y, x', y') dl \quad (5)$$

$$P_t(x, y) = \int_l P_t(x, y, x', y') dl \quad (6)$$

3 数值计算结果

球面波的积分采用自适的方法,根据误差自动分段积分。每一段采用两个不同阶的高斯法积分,误差由两个积分值之差近似确定,如果计算误差大于指定的误差,计算程序就自动细分积分子区间。当所有积分子区间上的积分值都满足误差要求时,所有子区间上的高阶的积分值相加给出最后结果。线源的积分采用了简单的高斯积分。Bessel函数的计算采用了两种方法。如果变量小于20,采用从预先计算的函数表取数,插值的方法;变量大于20时采用一个近似公式。计算精度一般达到 10^{-12} 。声压级的计算是把复数声压的模取对数再加上一个常数。

为了检验计算的精度,我们把界面两边的声压场在边界上的声压值分别计算出来,根据边界条件的要求两边的声压值应该相等,我们考虑了一个简单的情况,两种流体分别是煤油和水,煤油的密度取为 800kg/m^3 ,声速 1300m/s ;水的密度取为 1000kg/m^3 ,声速 1500m/s 。全反射临界角约为 60° 。一个线源在煤油中,声束从煤油中以 55° 角入射到界面上,如图1所示。线源长是波长的5倍,线源中心距界面是线源长的5倍,为 10cm 。结果见表1。

表1 边界两边计算声压值的比较。

x 坐标	5.0000	9.0000	13.0000	17.0000	21.0000	25.0000
介质1 中声压	42.0159	42.6465	56.8101	55.2428	46.8196	39.1158
介质2 中声压	42.0164	42.6448	56.8101	55.2427	46.8191	39.1144

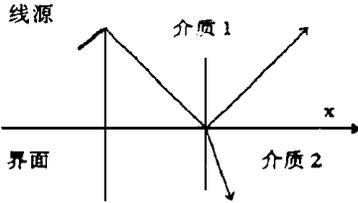


图1 线源辐射场的反射和透射

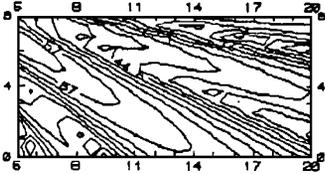


图2 煤油中入射波束的等声压图

介质1的声压是由式(4)与(5)的和得到的,介质2的声压从式(6)得到。表1中计算精度一般有4位有效数字,计算精度还可以提高,但要以增加计算时间为代价。我们取4位有效数字就足够了。

计算的入射、反射和透射声场示于图2、3、4。当声波束从阻抗小的介质——煤油入射,入射角小于全反射临界角55°时,反射波束也出现位移。

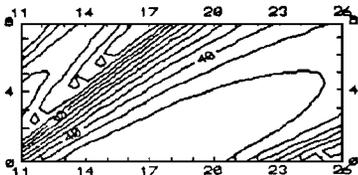


图3 煤油中反射波束的等声压图

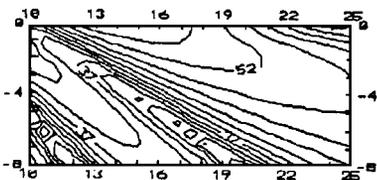


图4 水中透射波束的等声压图

波束的位移可以近似地由反射波束在界面上的最大值位置到入射点的距离来确定。从图2可见入射点约在坐标14处,而图3中反射波束的最大值向右位移,约为16。图4中透射波束的最大值在14附近,没有明显位移。我们计算出反射波束位移随入射

角的变化规律,如图5所示。在小于全反射临界角附近时,位移量随入射角的增加而增大。在全反射临界角附近达到最大值随后位移量逐渐减小。

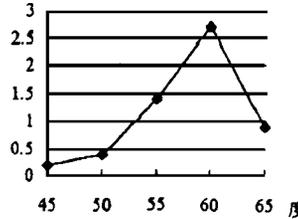


图5 反射波束位移随入射角的变化

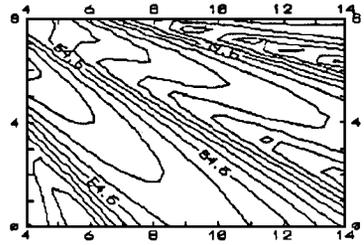


图6 水中入射波束的等声压图

当声波从阻抗大的介质入射时,透射波束也出现相对于入射波束的位移。也给出一个例子,两介质是空气和水。空气的密度取为 1kg/m^3 ,声速 340m/s 。声束从水中入射,入射角为 45° :线源长是波长的4倍,线源中心距界面是线源长的5倍,为 10cm 。入射、透射和反射的声场分别示于图6、7、8。

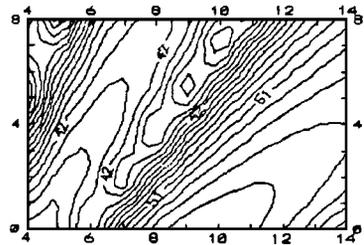


图7 水中反射波束的等声压图

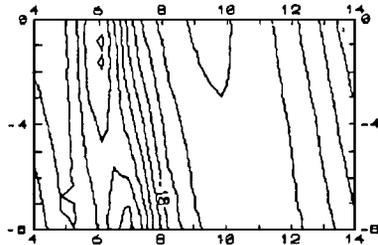


图8 空气中透射波束的等声压图

从图6可见,入射点在坐标10处,而图8中透射波束的最大值显然小于10,即发生向左位移;而图7中反射波束却没有明显位移。

根据上面的结果我们可以看到:除了文献[2]中

理论描述的由于大于全反射临界角时,反射系数变成复数,产生相位移产生的波束位移,还有另一类波束位移,它是因为实际波束并非理想平行射线,波束的宽度在衍射作用散开,入射角不单一造成的。第一类位移是平面波反射的本质特性的结果。第二类位移依赖于波束的宽度。与波长和声源线度的比有关,这个比越小,对应的第二类反射或透射波束的位移

就越小。这些位移在精确测量中都不可以忽略。

参考文献

- 1 诸国桢,付德永.液-固界面上非镜面反射声脉冲的负频移.物理学进展,1996;16(3,4)
- 2 布列霍夫斯基赫.分层介质中的波.科学出版社,1985
- 3 Y. Chen and K. Attenborough. Spherical wave propagation. Proc of 14th ICA, 1992

脑在噪声中感觉信号的能力

朱兵 王嘉赋 胡大炜 王均义 王炜

(南京大学物理系,生物物理研究所,南京·210093)

1 引言

人们在喧闹的茶馆里轻声谈话能互相听见,这是脑从背景噪声中感觉信号的一种能力,如何用实验来模拟和检测这种听觉功能,并从理论上解释噪声在脑识别信号中的作用是令人感兴趣的问题。1995年,美国的Wayne Garver和Frank Moss提出了用阈检测器测量人对混杂噪声的信号的感知能力,并提出这与“随机共振”有关^[1]。听觉与许多因素有关,脑感觉噪声中信号的能力是否有赖于年龄、听力或信号频率尚待研究。本文拟通过实验,观测不同的年龄、听力及信号频率与这种能力的关系,并结合随机共振的物理理论对此进行研究,该实验研究将为脑处理信号的机理研究提供有用的参考。

2 实验方法

感觉噪声中信号的测量原理框图如图1。该装置由三部分构成:信号源产生频率和幅值可调的正弦信号;噪声源产生幅度可调的模拟白噪声;阈检测器包括叠加电路、比较电路、波形变换和音量放大等电路。噪声与音频信号叠加后输出信号 U_1 与设定阈值 V_T 比较后输出全有或全无信号,经波形变换成噪声和信号混杂的输出信号 U_2 ,由音量放大后输出信号 U_3 给示波器或耳机。

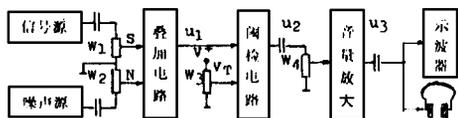


图1 感觉噪声中信号的测量原理框图

阈检测器具有模拟神经元产生动作电位的功能,其输入与输出关系类似于S函数。它提供最简单的操作条件,可设置听阈值下限 V_T ,只有信号幅度超过阈值才有信号输出,能设置不同信噪比的信号

供听觉鉴别。

由电位器改变幅度调节信号和噪声强度。白噪声包含各种频率和幅度的谐波分量,强度测量颇困难,用电位器刻度作噪声级 N 标志其相对强度。信号级 S 由校正曲线定标,可标志幅度。

在无噪声和阈值 $V_T=0$ 时,选定适当音量,可测得不同个体的听力差异。设置阈值 V_T 和信号频率,令噪声级 $N=0$,调节信号勉强能听到。然后逐步增加噪声级,测定可听出信号所需信号级,可获信号级 S 与噪声级 N 的关系 $S-N$ 。分别对不同听力的个体设置不同阈值和信号频率,测得不同的 $S-N$ 关系,然后作比较分析,可获得脑感知噪声中信号的能力与测量条件的关系,看出噪声所起的作用。

3 实验结果与分析

(1) 感知噪声中信号的能力与年龄、听力有关。男性受检者 W ,年龄30岁, Z ,55岁,噪声级 $N=0$,阈值 $V_T=0$ 时,测得感知信号级下限分别为 $S_1=0.5$, $S_2=1$ 。设置 $V_T=2$, $f=900\text{Hz}$,两者的信号级与噪声级的关系 $S-N$ 示于图2。① $S-N$ 关系显示,当无噪声时,能感知的信号级要求较高,随噪声级增高,能感知的信号级降低;当噪声增至 N_M 时,能感觉信号的最小级为 S_m ;当噪声超过该点(S_m, N_M) (或区间)后,噪声会淹没信号,如欲感知,则需提高信号级,可见脑感知微弱信号有赖于噪声。②在 $S-N$ 关系中,能感知的最低信号级 S_m 的最大噪声级为 N_M ,在该点(或区间)的 S_m/N_M 可以反映信噪比(SNR),因而 S_m/N_M 可以标志感觉噪声中信号的能力。图2表明,在相同背景噪声 N_M 下,听力较强的 W 与 Z 相比较,有 $S_{m1}/N_M < S_{m2}/N_M$,可见 W 比 Z 感觉噪声中的信号能力较强。