

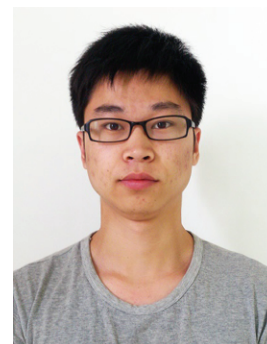
超声波换能器中轴线上振幅分布

冯雨, 周超, 吕景林
(复旦大学物理学系, 上海 200433)

摘要: 利用无限分割后积分的方法, 对圆形发射面发射的波在中轴线上的分布做了理论计算和分析, 定量得到中轴线上振幅分布, 根据整体趋势, 分析得到远近场判据。在此基础上, 使用不同尺寸的圆形超声波换能器, 通过数值模拟及实测的方法得到中轴线附近超声波波场振幅分布, 此结果与理论推导非常吻合。进而又使用换能器阵实测, 得到了与单个换能器相近的结果, 至此波场轴线上振幅分布规律以及对波源远近场的判据得到了验证, 为以后的实验提供理论基础。

关键词: 点波源; 超声波; 换能器

中图分类号: O 426.2 文献标志码: A 文章编号: 1006 - 7167(2013) 12 - 0035 - 04



Research on Amplitude Distribution of Ultrasonic Transducer Central Axis

FENG Yu, ZHOU Chao, LV Jing-lin

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: The concept of point wave source is frequently used in the research both theoretically and experimentally. However, there is no absolute point wave source in the real world, how to delimit the near-field and far-field is very important both experimentally and practically for the definition of the point wave source. In this article, the amplitude distribution of round emission surface was recalculated by unlimited dividing and integration. A more accurate criterion was obtained and verified with ultrasonic transducers of multiple sizes by numerical simulation and experiment. And transducer array is also used to get the similar result. It will become the base of the further experiments.

Key words: point wave source; ultrasonic wave; ultrasonic transducer

0 引言

一直以来, 作为超声波发射器的换能器在研究中都是当作点波源处理, 但实际上波源有一定面积, 其波的分布与理论上的点波源还是有区别的。对于换能器轴线上波的振幅分布的研究, 可以更好地了解波场中能量的分布及远近场的判据, 即对于一个具体的换能器而言, 何时能将换能器看作点波源。本文通过理论推导、计算机模拟以及实验测量得到了发射面中轴线

上波场振幅的定量分布公式, 并确定较为精确的判据。

1 理论计算

将发射面看成同步振动的无数多、面积无限小的点波源, 如图 1 所示。图中: r 为发射点到发射面中心的距离; R 为整个发射面的半径; d 为发射面中心到接收点的距离; x 为发射点到接收点的距离。

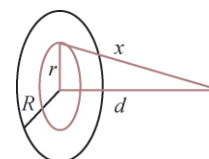


图 1 发射面示意图

每个点发射波的方程为

收稿日期: 2013 - 04 - 08

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划项目(201210246001)

作者简介: 冯雨(1990 -), 男, 江苏徐州人, 本科生。

Tel.: 15201926640; E-mail: 09300190034@fudan.edu.cn

通信作者: 吕景林(1959 -), 女, 湖南永州人, 副教授, 研究方向为

物理实验教学。Tel.: 021-65643756; E-mail: lvjinglin@fudan.edu.cn

$$E(x, t) = \frac{E_0}{x} \cos(kx - \omega t + \varphi_0) \quad (1)$$

式中 $x = \sqrt{d^2 + r^2}$ 。

每个圆环上的波迭加为

$$E(r, t) = \frac{2\pi r E_0}{\sqrt{d^2 + r^2}} \cos(k\sqrt{d^2 + r^2} - \omega t + \varphi_0) dr \quad (3)$$

对于整个圆面 根据图1中的几何关系,有:

$$E(r, t) = \int_0^R \frac{2\pi r E_0}{\sqrt{d^2 + r^2}} \cos(k\sqrt{d^2 + r^2} - \omega t + \varphi_0) dr \quad (4)$$

式中:

$$r = \sqrt{x^2 + d^2}, \quad dr = \frac{x}{\sqrt{x^2 + d^2}} dx \quad (5)$$

得到:

$$\begin{aligned} E &= 2\pi E_0 \int_d^{\sqrt{d^2 + R^2}} \cos(kx - \omega t + \varphi_0) dx = \\ &= \frac{2\pi E_0}{k} \sin(kx - \omega t + \varphi_0) \Big|_d^{\sqrt{d^2 + R^2}} \\ &= \frac{2\pi E_0}{k} [\sin(k\sqrt{d^2 + R^2} - \omega t + \varphi_0) - \\ &\quad \sin(kd - \omega t + \varphi_0)] \quad (7) \end{aligned}$$

$k = 2\pi/\lambda$, 为波数; φ_0 为波源的初相位; R 为发射面的半径。经过三角变换, 最终结果为

$$E = \frac{2\pi E_0}{k} \left[\sqrt{2 - 2\cos k(\sqrt{R^2 + d^2} - d)} \right] \times \cos(\omega t - \varphi) \quad (8)$$

式(8)是一个余弦波的形式 φ 是 d 点的初相位, 影响振幅的因子是

$$\sqrt{2 - 2\cos k(\sqrt{R^2 + d^2} - d)} \quad (9)$$

极值点对应:

$$\left. \begin{aligned} k(\sqrt{R^2 + d^2} - d) &= (2n + 1)\pi \\ d &= \frac{R^2}{(2n + 1)\lambda} - \frac{(2n + 1)\lambda}{4} \\ n &= 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

即满足式(10)的 d 值, 波的振幅取得极大值。其中 $n = 0$ 对应的 d 值, 其前后振幅有着本质的变化, 周期性振荡变为连续衰减, 见图2。故可以将此时的 d 当作远近场判断条件, 也即对于一个波源, 其远近场的判据为

$$d = \frac{R^2 - (0.5\lambda)^2}{\lambda} \quad (11)$$

当满足 $R \gg \lambda$ 时, 式(11)可简化为

$$d = R^2/\lambda$$

2 计算机模拟

根据式(9)作振幅分布图, 见图2。图中: k 值均

取为1; R 从上至下分别为3.00、6.30和12.45。横轴为点到发射面中心的距离 d , 纵轴为振幅强度 E 。

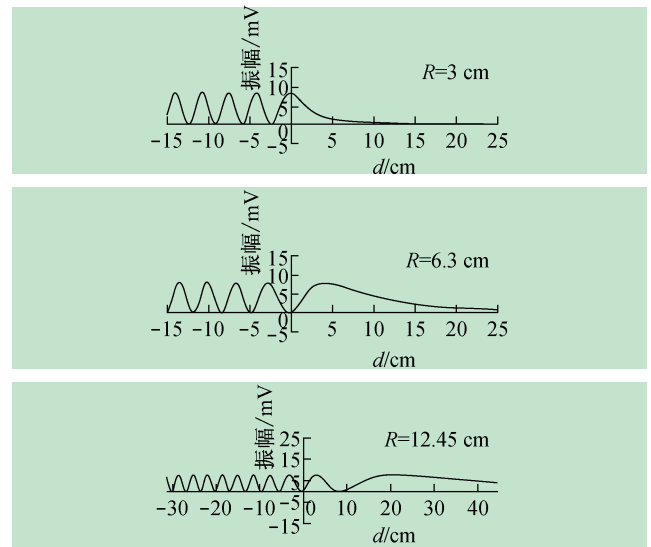


图2 振幅模拟图

从图2可见, 振幅由周期性振荡变为逐渐减小, 且当 k 一定条件下(也即 λ 一定), R 值越大, 振幅衰减得越慢。实际测量中 d 的负半轴并不存在, 真正出现的周期数和转变点由 R 与 λ 的取值共同决定, 图2显示的结果与式(10)相吻合。

3 实验验证

3.1 单一换能器验证结果

实验装置如图3所示, 主要由发射面和接收器组成: 发射面可以由不同尺寸的换能器替换, 接收器是一个小尺寸的接收用换能器, 将接收到的声波信号转化为电信号, 此电信号输入到示波器中, 电压信号的大小即可反映波的振幅, 实测中发射面和接收器的工作频率均为40 kHz。

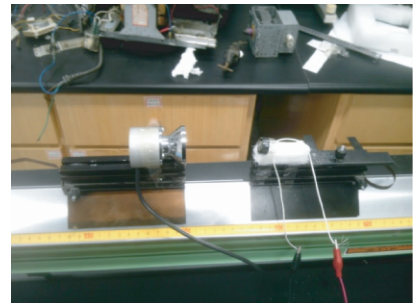


图3 实验装置

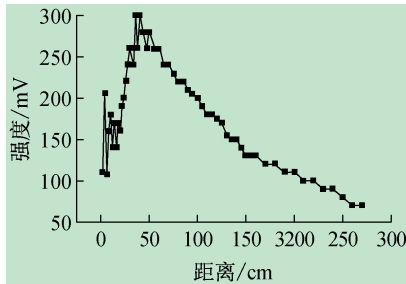
测量中, 选择了3种尺寸的换能器作为发射面, 半径分别为1.96、2.26和3 cm, 结果如图4所示。

由图可见, 3条曲线整体趋势均和模拟图接近, 但是有一些波动, 尤其是靠近发射面, 这是由于接收器会反射一些声波, 与发射波叠加的结果。

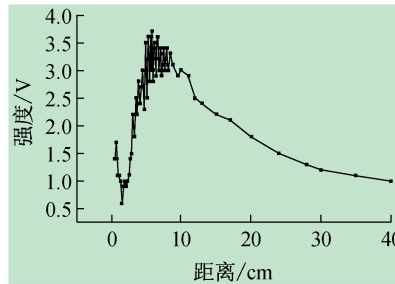
半径为1.96 cm的发射面理论上应有2个峰值: 分别在0.87和4.31 cm处, 而我们实际观测得到的峰

值在 1.6 和 5 cm 附近,由于接收器距离发射面太近,反射波对被测波的影响较大,造成第 1 个峰位置与 0.87 cm 相差较大;同样地,半径为 2.26 cm 的发射面理论上的峰值在 0.14、1.37 和 5.80 cm 处,实验测得的第 1 个峰位于 0.4 cm,在 0.14 ~ 1.37 cm 之间,这是由于反射波影响较大的结果,但可以比较精确观察到

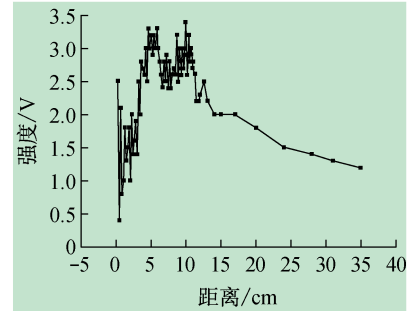
6 cm 附近的 1 个峰,和理论很接近;半径为 3 cm 的换能器理论上的峰值在 0.03、1.06、2.89 和 10.38 cm 处,实验是得到了 3 个峰,第 1 个在 0.6 cm,处于 0.03 ~ 1.06 cm 之间,也是反射波影响的结果;另外 2 个峰 1 个在 4.8 cm 左右,一个在 10 cm 左右,与理论值接近,由于仪器的精度,存在一些误差。



(a) 1.96 cm



(b) 2.26 cm



(c) 3 cm

图4 换能器的振幅分布

3.2 换能器阵验证结果

从单一换能器的测试结果来看,结果和理论是吻合的。我们改用换能器阵来验证计算结果,实测中分别采用由 7 个和 19 个换能器组成的换能器阵,见图 5。每个换能器的尺寸都和接收器是一样的,半径 0.8 cm,由于反射波对于换能器组成的矩阵波影响较小,可以较为精确地测得距离发射面较近的峰值。

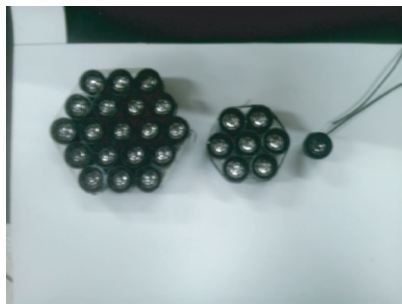


图5 换能器阵

计算中取六边形换能器阵的对边为发射面的直径,7 个换能器组成的矩阵的发射半径为 2.19 cm,理论上可得的峰值应处于 0.07、1.24 以及 5.43 cm,实测结果如图 6 所示。图中 2 个峰值分别对应 0.9 cm 和 5.4 cm,与理论计算结果吻合较好。

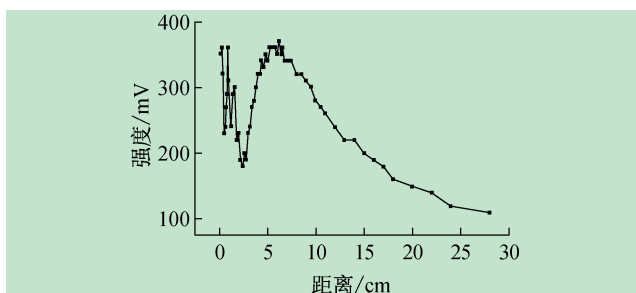


图6 7 个换能器阵振幅分布

同理,由 19 个换能器组成的矩阵的发射面半径为 3.6 cm,计算得振幅峰值处于 0.69、1.99、4.44 和 15.03 cm,实测结果见图 7,图中峰值位置分别位于 1.8、4.6 以及 12 cm。总体来说和理论值较为吻合,最后 1 个峰值出现位置与理论值有较大偏差,可能是由于矩阵发射面的形状并不是一个真正的圆形所致。此时积分结果与实际情况本已不完全相符,但振幅总的变化规律与理论计算趋势依然是一致的。

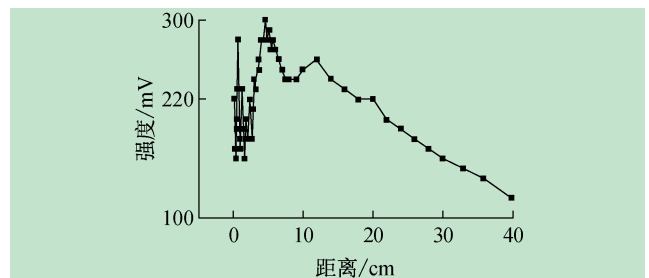


图9 19 个换能器阵振幅分布

4 结 语

通过理论计算得到了精确的中轴线上的振幅分布,同时也得到了近远场的判据。此结论得到了实验上的支持。由于实验条件的受限,实验论证并不是非常精确,但已足以证明计算在方向上是正确的。本文得出的波动振幅分布规律以及远近场的判据,可提供有价值的参考。

参考文献(References):

- [1] 栾桂冬,张金铎,王仁乾. 压电换能器和换能器阵[M]. 北京:北京大学出版社,2005:129-215.
- [2] 陈敏,徐利梅,黄大贵,等. 声束扬声器的换能器方形阵列设计[J]. 电声技术,2006(1):26-29.

(下转第 53 页)

筋;10 版规范,明确“梁、柱纵向受力普通钢筋应采用 HRB400、HRB500、HRBF400、HRBF500 钢筋”。

2 结 论

采用有限元软件 ANSYS ,对超筋梁和适筋梁,提出分别以混凝土的极限压应变达到 ε_{cu} 和受拉钢筋的极限拉应变达到 0.01 ,作为达到极限承载力的判别标准,对钢筋混凝土简支梁在单调竖向荷载作用下进行弹塑性受力全过程计算,得出如下结论:

(1) 与理论解对比分析表明,在一定误差范围内,建立 ANSYS 分离式钢筋混凝土模型,估计钢筋混凝土试件的受力性能指标是可行的。

(2) 数值分析验证了在受压区配置钢筋,可以改善截面的延性。

(3) 一般地,截面延性随受拉钢筋配筋率的增大而减小,随受压钢筋配筋率的增大而增大。但以纵向受拉钢筋的极限拉应变达到 0.01 为适筋梁破坏标志,对较低配筋率的梁,随受拉钢筋配筋率增大,截面延性并未降低;对受压钢筋未达到屈服、强度未充分利用的梁,随受压钢筋配筋率增大,截面延性并未提高。

(4) 数值分析验证了提倡应用高强、高性能钢筋的合理性,即优先使用 400 MPa 级钢筋;积极推广新列入的高强度 500 MPa 级的热轧带肋钢筋;高强、高性能钢筋的应用能提高资源利用效率,即截面承载力提高显著的同时,并不会降低钢筋混凝土构件的延性。

参考文献(References):

[1] 王亚宁,齐辉,王道远. 钢筋混凝土梁的数值模拟分析在

ANSYS 中的实现[J]. 四川建筑,2008,28(3):86-88.

- [2] 吴 颢. Ansys 模拟钢筋混凝土结构的探讨[J]. 福建建材,2008(6):13-16.
- [3] 段敬民,冯波涛,李伟. ANSYS 对简支梁的数值模拟[J]. 低温建筑技术,2009(12):53-55.
- [4] 刘 黎. 钢筋混凝土梁仿真分析[J]. 企业技术开发,2010,29(21):25-26.
- [5] 尚晓江,邱峰,赵海峰. 结构有限元高级分析方法与范例应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- [6] 叶裕明,刘春山. ANSYS 土木工程应用实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.
- [7] 尤小明. 非线性有限元法在混凝土结构分析中的应用[J]. 工程质量,2010,28(6):72-74.
- [8] 中华人民共和国国家标准. GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [9] Hognestad E. A study of combined bending and axial load in reinforced concrete members [D]. University of Illinois Engineering Experiment Station, Urbana, 1951.
- [10] 罗如登. Ansys 中砼单元 Solid65 的裂缝间剪力传递系数取值[J]. 江苏大学学报(自然科学版) 2008,29(2):169-172.
- [11] 江见鲸,陆新征,叶列平. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005:72.
- [12] 吕西林,金国芳,吴晓涵. 钢筋混凝土结构非线性有限元理论分析与应用[M]. 上海:同济大学出版社,2002:109-110.
- [13] 曾 鹏,刘清,叶建荣. 利用 ANSYS 模拟钢筋混凝土中的收敛问题的对策[J]. 四川建筑,2008,28(3):113-117.
- [14] 高 丽,曾晓云,王 勇. 基于 ANSYS 的钢筋混凝土梁非线性分析若干问题研究[J]. 水利与建筑工程学报,2011,9(2):92-95.
- [15] 张新培. 钢筋混凝土抗震结构非线性[M]. 北京:科学出版社,2003.

(上接第 37 页)

- [3] 周荣冠. 参量阵扬声器系统的超声发射阵指向性研究[J]. 电声技术,2009,33(4):33-36.
- [4] 孙 健,吴亚锋,薛惠君. 超声调制声频定向传播性能研究[J]. 压电与声光,2010,32(2):184-190.
- [5] 陈 敏,徐利梅,黄大贵,等. 基于 MATLAB 的换能器阵列指向性分析方法研究[J]. 电声技术,2006(5):25-28.
- [6] 陈 敏,徐利梅,黄大贵,等. 声频定向扬声器的研究进展[J]. 电声技术,2006(11):17-22.
- [7] 杜功焕,朱哲民,龚秀芳. 声学基础[M]. 南京:南京大学出版社,2001.
- [8] 林 建. 声频定向扬声器差频声场指向性研究 [D]. 上海:复旦大学,2010.
- [9] 王 莹. 声频定向扬声器信号处理系统设计与测试 [D]. 成都,电子科技大学,2008.
- [10] 梁 懋. 充分利用超声波扬声器的指向性[J]. 科技新时代,2002(12):44.
- [11] 董丽杰,熊传溪,陈娟,等. 聚偏氟乙烯-钛酸钡复合材料[J]. 复合材料学报,2003,20(3):122-126.
- [12] 解文军,曹崇德,魏炳波. 声悬浮的实验研究和数值模拟分析[J]. 物理学报,1999,48(2):250-256.
- [13] Trinh E H. Acoustics 1993: Acoustics and the study of the microphysics of drops and bubbles on the Earth and in space [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1994, 95(1): 567-568.
- [14] Herlach D M, Cochrane R F, Egly I, et al. Containerless processing in the study of metallic melts and their solidification [J]. International Materials Reviews, 1993, 38(6): 273-347.
- [15] Trinh E H, Ohsaka K. Measurement of density, sound velocity, surface tension, and viscosity of freely suspended supercooled liquids [J]. International Journal of Thermophysics, 1995, 16(2): 545-555.