

凹球面聚焦脉冲声场特征的分析

钱盛友^{1,2}, 邢达¹

(1. 华南师范大学激光生命研究所, 广州 510631; 2. 湖南师范大学电子信息科学系, 长沙 410081)

摘要: 本文利用传递函数的概念导出了凹球面聚焦脉冲声场的简洁表达式, 据此研究了源脉冲持续时间对声场分布的影响。

关键词: 凹球面; 聚焦声场; 脉冲; 传递函数

中图分类号: O4222 文献标识码: A

Characteristic analysis of focused impulse sound field generated by concave spherical surface transducers

QIAN Shengyou^{1,2}, XING Da¹

(1. Institute of Laser Life Science, South China Normal University, Guangzhou 510631, China;

2. Department of Electronic Information Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract: A simple expression to analyze focused impulse sound field generated by concave spherical surface transducers is deduced based on the concept of transfer function, and effects of exciting pulse duration on sound field are studied.

Key words: concave spherical surface; focused sound field; pulse; transfer function

1 引言

将铁电陶瓷磨成凹球面, 然后经极化、镀银制成的聚焦换能器, 在超声治疗、超声诊断及工业检测中有广泛的应用。O'neil 较早地讨论过这种聚焦方式^[1], 此后 B.G. Lucas 等在 Fresnel 近似的条件下将 Helmholtz 方程化成抛物方程, 得到了这种聚焦声场的一重积分解^[2]。O'neil 的解法需作二重积分, 而 Lucas 所得的积分解中包含有贝塞尔函数。Madsen 直接从瑞利公式出发, 成功地将二重积分化成了便于计算的一重积分^[3]。上述研究均是针对连续波方式而言的。实际应用中, 换能器有时需工作在脉冲状态, 因此有必要对脉冲声场的特性进行研究^[4]。本文从信号传输的角度出发, 由单频解得到了凹球面聚焦脉冲声场声轴上任意点声压与源信号的直接关系, 在此基础上分析了声场特征随源脉冲变化的情况。

2 理论

凹球面换能器在空间任意点产生的声压, 是由于凹球面振动传播到该点的结果。假定凹球面表面各点的振速均为 $u(t)$, 空间任意场点的声压为 $p(t)$ 。把 $u(t)$ 当作输入信号、 $p(t)$ 当做响应信号; 把在相同激励 $u(t)$ 下, 影响输出 $p(t)$ 的各种因素: 凹面各点振动产生的声波的迭加、边缘效应、衍射效应以及场点位置, 当作一个系统。由于 $u(t)$ 与 $p(t)$ 之间满足齐次性和线性条件, 因而该系统可视为线性系统。

如图 1, 假定系统冲击响应函数为 $h(t)$, 则有:

$$u(t) * h(t) = p(t) \quad (1)$$

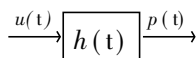


图 1 振动传输系统

对上式两端进行傅氏变换, 可得:

$$U(\omega)H(\omega) = P(\omega) \quad (2)$$

单频情况下, 假设:

$$u(t) = u_0 e^{j\omega_0 t} \quad (3)$$

可得:

收稿日期: 2000-04-03; 修订日期: 2000-07-11

湖南省教委基金资助项目。

作者简介: 钱盛友 (1965), 男, 湖南人, 博士, 副教授, 主要从事超声治疗及光声成像的研究。

$$p(t) = H(\omega_0) u_0 e^{j\omega_0 t} \quad (4)$$

由单频解, 容易求得^[5]:

$$H_o(\omega) = j\omega \rho (R - \sqrt{R^2 - a^2}) e^{-aR} e^{-j\omega R/c} \quad (5)$$

$$H_z(\omega) = \frac{\rho c R}{R - z} (e^{-\alpha} e^{-j\omega z/c} - e^{-\alpha B} e^{-j\omega B/c}) \quad (6)$$

其中: $H_o(\omega)$ 、 $H_z(\omega)$ 分别对应声源到几何焦点和到声轴上除几何焦点以外各点的传递函数, R 、 a 分别为换能器的几何焦距和半径孔, ρ 、 c 、 α 分别为媒质的密度、声速和声衰减系数, $B = [(z - R + \sqrt{R^2 - a^2})^2 + a^2]^{1/2}$, z 为场点到凹球面顶点的距离。当振源以脉冲方式工作时, 有:

$$P_o(\omega) = H_o(\omega) U(\omega) \quad (7)$$

$$P_z(\omega) = H_z(\omega) U(\omega) \quad (8)$$

利用:

$$F[f(t \pm t_0)] = e^{\pm j\omega t_0} F[f(t)] \quad (9)$$

$$F[f'(t)] = j\omega F[f(t)] \quad (10)$$

式中 F 表示傅氏变换, $f'(t)$ 为 $f(t)$ 对时间 t 的导数, 可得:

$$p_o(t) = \rho (R - \sqrt{R^2 - a^2}) e^{-\alpha R} u(t - R/c) \quad (11)$$

$$p_z(t) = \frac{\rho c R}{R - z} [e^{-\alpha} u(t - z/c) - e^{-\alpha B} u(t - B/c)] \quad (12)$$

上述两式具有明确的物理意义。由此可知: 声轴上除几何焦点之外任意点的声压可看做来自凹球面顶点和来自凹球面边缘的两列平面波迭加的结果; 两列波的幅度均为 $\rho a R / (R - z)$, 与场点位置有关; 两列波的重迭情况, 与媒质的声速、场点位置、换能器孔径、凹面曲率半径及源脉冲持续时间有关。由于凹面各点到达几何焦点的距离相同, 因而几何焦点的声压等于各点振动产生的声压之和。利用以上两式, 由源函数可求出声轴上任一点声压。

3 数值计算

假定凹球面以脉冲簇方式辐射时, 源信号可表示为:

$$u(t) = \begin{cases} u_0 \sin(\omega_0 t) & 0 \leq t \leq \tau \\ 0 & t < 0, t > \tau \end{cases} \quad (13)$$

取 $R = 3.0 \text{ cm}$, $a = 1.0 \text{ cm}$, $T_0 = 2\pi/\omega_0 = 1.0 \mu\text{s}$, $u_0 = 1.0 \text{ m/s}$, 脉冲持续时间 τ 不同时, 求得凹球面聚焦声源在水中产生的声场轴向分布情况如图 2 示。

由图可以看出, 短脉冲情况下, 声场分布平滑, 近场起伏小, 近场特性得到改善; 脉冲持续时间足够长时, 声场的分布特性可认为与连续波方式相同。仔细分析 $\tau = 2.5 T_0$ 时的轴向声压分布曲线, 可以发现: 曲线上的几个转折点分别对应凹面顶点和凹

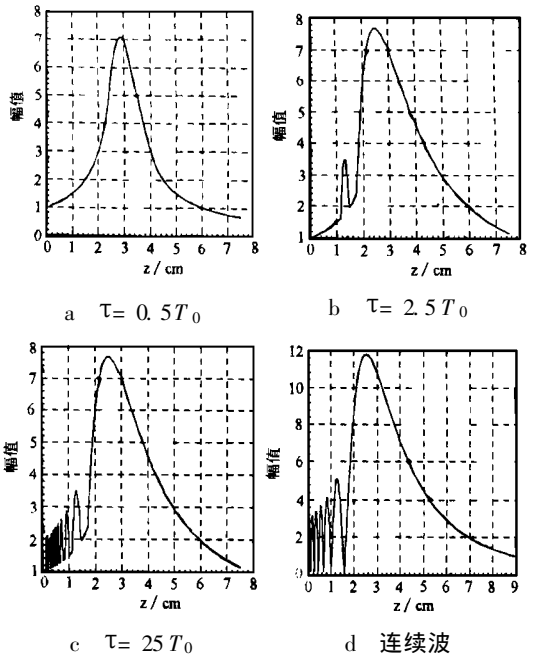


图 2 不同脉冲持续时间对应的轴向声压分布

面边缘发出的两列声波到达时的时延为 $2.0 T_0$ 、 $1.5 T_0$ 、 $1.0 T_0$ 、 $0.5 T_0$ 。靠近振源处, 两列波未迭加, 振动信号的幅值与两列波的波幅相等, 因而声压按 $1/(R - z)$ 规律增大; 当两列波重迭一定程度后, 振动信号的最大幅值增大, 因而声压出现一个峰点; 几何焦点以前, z 增大, $1/(R - z)$ 增大; 而之后, z 增大, $1/(R - z)$ 减小。因而, 两列波在几何焦点之后的一定区域内虽仍有重迭, 但此区域内声压平滑下降。此结果表明: 声场的起伏情况, 取决于凹面顶点和凹面边缘发出的声波到达声场中不同位置处的重迭程度。

4 结论

凹球面聚焦声源以脉冲方式辐射时, 声场分布可从信号传输角度得到解释。由于凹面顶点和凹面边缘发出的声波在空间任意点的重迭情况与声源的几何参数及源脉冲的持续时间有关, 合适地选择这些参数可使声场的特性得到改善。研究表明: 短脉冲方式辐射时, 近场起伏更少; 长脉冲方式辐射时, 声场的分布特性与连续波方式接近。在声场测试仪器中实测了一凹球面聚焦声源在水中产生的声场, 激励源为信号发生器。因信号发生器以脉冲簇发射方式工作时每次输出的完整正弦波数固定为 20 个, 没有测量短脉冲方式辐射时的声场。测得声焦距、声焦点处轴向及侧向 3dB 宽度与连续波方式辐射时的计算值非常接近, 此结果与理论分析相符。

感谢上海交通大学生物医学工程系王鸿樟教授和孙福成教授的指导。

参考文献:

- [1] H. T. O'Neil. Theory of focusing radiator[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1949, 21: 516-526.
- [2] B. G. Lucas, T. G. Muir. The field of a focusing source[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1982, 72(4): 1289-1296.
- [3] E. L. Madsen, M. M. Goodsitt, J. A. Zagzebski. Continuous waves generated by focused radiators[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1981, 70(5): 1508-1517.
- [4] G. R. Harris. Review of transient field theory for a baffled planar piston[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1981, 70(1): 10-20.
- [5] 王鸿樟. 换能器及聚焦系统[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1996.

简 讯

第一届中德声学创新技术研讨会在北京举行

2000年10月21日在北京举行了为期一天的第一届中德声学创新技术研讨会。这是学术、科研以及工业和商业界的新论坛,在科学技术和经济发展之间建立了一座桥梁,促进交流现代知识、新技术和创新产品方面的经验。这次活动由德国弗朗霍夫应用科学研究促进协会(FhG)和中国科学院主办,并得到中国自然科学基金会、中德中心、北京科学技术研究院以及国内著名大学等单位的支持。

会上交流发言了14篇论文,涉及无纤维化新材料(尤其是微穿孔板)之发展及应用,人居声环境的音乐表演场所的研究与设计经验,新型平面式吸声元件的消声器,有源噪声控制技术,环境和小区噪声的CAD设计方法,以及未来“声设计”的先进工具、方法和数据库等等。研讨会内容丰富而安排紧凑,出席者达150余人。

中科院声学所马大猷院士在开幕词中,综述了历史上几位著名科学家之成就及背景,阐明应用科学与基础科学的密切关系。并指出应用科学有很强的目的性,往往是工业与生产中需要解决的问题,因此与工业系统紧密结合,这一经验非常重要。同济大学声学所王季卿教授在闭幕式上,作了题为“声学创新的现状与展望”的报告。期望21世纪是和平与繁荣的时代,人类的生活质量将不断提高,许多方面需要声学创新的服务,预期下一世纪将会有更大的发展和进步。

(本刊讯)

第五届全国光声光热会议在沪召开

由中国声学学会检测声学分会、上海市声学学会和同济大学声学研究所联合举办的第五届全国光声光热会议,于2000年9月12-14日在上海同济大学召开。南京大学、中国科技大学、青岛海洋大学、武汉大学、苏州大学、同济大学和中科院上海硅酸盐所等国内著名学府和研究所共28名学者专家出席了会议。同济大学陈成澍校长和上海市声学学会副理事长陈思忠研究员出席了开幕式并讲了话。中科院院士张淑仪教授和工程院院士李同保教授分别在会上作了“光声光热研究进展近况”和“单泡声致发光现象及实验装置”的特邀报告,并有23篇学术论文作了大会报告。会议代表对会议中呈现的学术气氛非常满意,并一致同意2002年在中国科学技术大学举办第六届全国光声光热学术会议。

同济大学声学研究所 钱梦马录