

· 2013 年度全国检测声学会优秀论文专栏(二) ·

光弹法测量超声换能器声场^{*}

金士杰 安志武[†] 廉国选 毛捷 王小民

(中国科学院声学研究所 北京 100190)

摘要 超声换能器声场的测试对于超声检测具有基础性作用,而传统的超声换能器声场测试方法具有一些局限性。本文介绍了搭建的动态激光光弹实验平台,并利用动态光弹法测量了纵波换能器和横波换能器辐射声场的特征,由瞬态声场图像获得了传声介质的声波速度及超声换能器的中心频率;由稳态声场图像获得了声场的近场长度、指向性和扩散角等参数;分析了光弹实验系统和测量方法可能引起测量误差。本文结果表明动态光弹法是一种有效的定量测量超声换能器声场的方法。

关键词 动态光弹法,超声换能器,超声场特征

中图分类号: O426

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2014)02-0107-05

DOI:10. 11684/j. issn. 1000-310X. 2014. 02. 003

Photoelastic quantification of ultrasonic beams radiated by transducers

JIN Shijie AN Zhiwu LIAN Guoxuan MAO Jie WANG Xiaomin

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract It plays a fundamental role to quantify the ultrasonic beams radiated by transducers for ultrasonic testing. However, traditional methods have some limitations. A photoelastic visualization system was established and utilized to quantify some parameters of ultrasonic beams radiated by a longitudinal transducer as well as a shear one. Wave velocities and central frequencies of the transducers were obtained by transient ultrasonic fields. The near-field distances, directivities and divergence angles were calculated from time-harmonic ultrasonic field. The measurement errors caused by the photoelastic visualization system and experimental method were analyzed. It shows that the photoelastic technique is an effective method to quantify ultrasonic beams radiated by transducers.

Key words Dynamic photoelastic technique, Ultrasonic transducer, Ultrasonic field characteristics

2013-12-02 收稿;2013-12-16 定稿

^{*} 国家自然科学基金项目(11374325)

作者简介:金士杰(1984-),男,辽宁大连人,博士研究生,研究方向:超声检测。

安志武(1981-),男,助理研究员。

廉国选(1969-),男,副研究员。

毛捷(1969-),女,研究员,硕士生导师。

王小民(1960-),男,研究员,博士生导师。

[†] 通讯作者:安志武, E-mail: anzhiwu@mail.ioa.ac.cn

1 引言

光弹法通过光学方法来解决弹性力学问题,其物理基础是暂时双折射现象。上世纪 20 年代初,光弹法开始发展。30 年代应力冻结现象被发现,这为解决三维光弹问题奠定了基础。40 年代仪器设备的改进和新型材料的使用,解决了一系列弹性力学的难题,使光弹法成为比较完善的技术。随后激光的出现,计算机及图像处理技术的发展,以及 CCD 相机的发展,极大的推动了光弹法的进步。光弹法正向自动化、智能化方向发展,同时在航空航天、机械制造、土木工程、汽车制造等诸多领域都得到了广泛的应用。

动态光弹法能够直接观察超声的传播和散射并揭示相关规律,对固体超声波散射问题的研究起到了积极的推动作用。上世纪 80 年代,中科院声学所应崇福院士带领的研究小组在国际上率先搭建了一套动态激光光弹成像设备,用来研究固体中超声波的传播和散射特征,实现了超声场的可视化,并取得了一系列的研究成果^[1-6],受到国际同行的广泛关注。动态光弹实验研究不仅验证了理论分析结果,也显示出理论所没有估计到的声场细节,有力地弥补了解析理论、数值计算及电子信号

测量等方法的局限。如首次观察到了超声波沿横穿孔孔壁的爬行^[2]、研究了体波在棱边和裂缝处的散射^[5],以及兰姆波、瑞利波的散射问题^[4,7]。

清华大学物理系在国内最早研究开发了 LED 光源动态光弹系统^[8],中北大学^[9]、南昌航空大学^[10-11]等都使用类似的系统进行教学和研究工作,加拿大也有同类产品出售^[12-13]。

经过了 80 年代的迅速发展,近 20 年来,利用动态光弹法研究超声波的进展较为缓慢,作者分析有如下原因:1. 动态光弹法灵敏度偏低;2. 相比于静态光弹研究中施加的外力,超声波的应力较小,因此受系统不稳定性及噪声影响较大,导致定量困难;3. 动态光弹超声成像的硬件设备未及时更新。近来,我们搭建了一套动态激光光弹超声成像设备,并在激光器、同步系统、图像采集与处理系统三个方面做了较大的改进,系统的稳定性也得到大幅提高。利用该设备,我们定量测量了超声换能器辐射声场的部分特征,并对可能引起定量测量结果误差的各种因素进行了分析。

2 实验平台

动态激光光弹实验平台如图 1 所示,系统完全

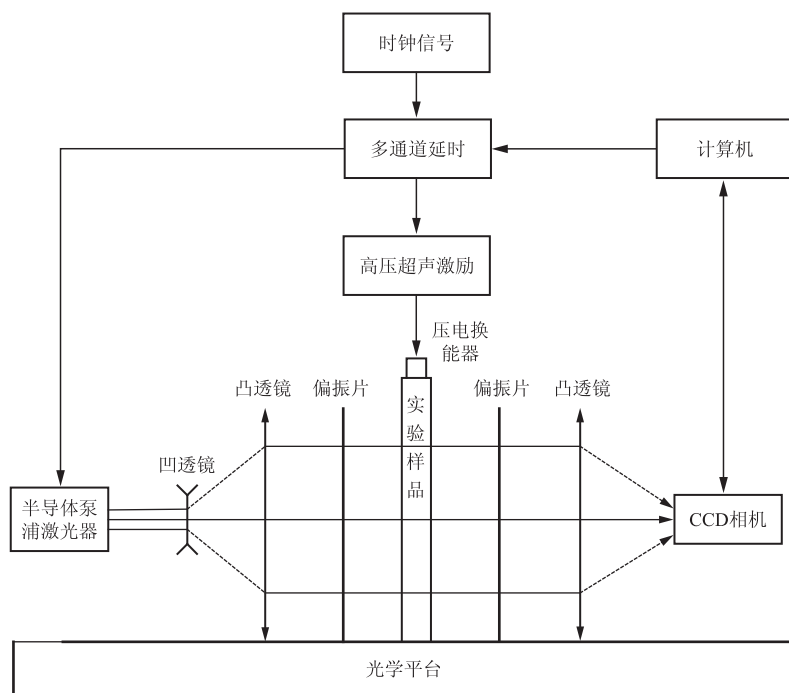


图 1 动态光弹实验平台

Fig. 1 The dynamic photoelastic system

搭建在光学平台之上,增加了抗振动干扰能力。其中,工作在基横模(TEM₀₀模)的半导体泵浦激光器发射的单色绿光具有发散角小,平行度高的特点,脉冲宽度小于5 ns,可清晰记录频率达200 MHz的超声波瞬态图像。实验平台左端的凹透镜和凸透镜焦点重合,将激光扩束为直径100 mm的平行光;右端的凸透镜将平行光束汇集,并由数字CCD相机接收。实验样品两侧的偏振片偏振方向相互垂直,在暗室的实验环境中,换能器不工作时,CCD相机拍摄到的照片几乎完全是黑色背景;当高电压信号激励换能器向下辐射超声波时,通过样品的平行光的偏振方向会因固体的暂时双折射现象而发生改变,相机将拍摄到明亮的超声波波前。

传统的同步系统有两路同步信号,一路触发超声发射电路,一路触发激光器,通过调整二者相对延时来拍摄不同时刻的“冻结”超声场。照片的清晰度受到触发和延时精度影响。尤其是激光器被触发后的激光发射时间不够稳定,将极大影响照片的清晰度。这里我们设计了两路相对延时触发信号来精确控制激光器,使得激光发射时间误差小于2 ns。调节多通道延时,可以改变激光源的发射时间,观察超声波在固体中的传播、散射过程,且有较好的实验效果。

CCD相机可以将拍摄的照片数字化并传送给计算机进行后续处理。由于发射激光的能量和空间分布变得更加稳定,同步系统精度提高,因此取无声场时的参考图像与光弹实验照片进行解卷积处理,可以提升图像质量,并观察到微弱声场。

实验样品材料选用经过精退火处理的K9光学玻璃,样品长、宽均为120 mm,厚度为20 mm。

3 换能器声场观察和测量

3.1 纵波换能器

实验采用本课题组自制的PZT材料圆盘型纵波换能器,换能器辐射面直径为16 mm。换能器在窄脉冲激励下产生超声波,在样品中形成瞬态声场。利用旋转重复曝光法观测到的声场图像经灰度化处理后如图2所示。各类超声波波前中直达纵波最亮,能量最高,直达纵波两侧有边缘纵波,后面跟随着边缘横波。直达纵波相邻两条亮条纹中心距离 d 是波峰与波谷的距离,据此可估计换能器中心频率 f_L 对应的等效波长 $\lambda_L = 2d$ 。拍摄两张不

同时刻的瞬态声场图像,可根据条纹移动距离计算出样品中的声速 c_L 。由式 $f_L = c_L/\lambda_L$ 可得纵波换能器的中心频率。



图2 纵波换能器瞬态声场

Fig. 2 The transient ultrasonic field radiated by the longitudinal wave transducer

利用连续波激励换能器,可以拍摄得到稳态声场图像(图3)。读取超声换能器轴线上的灰度值曲线,近场长度即为曲线中最远处的开始快速下降的极大值到换能器表面的距离。以换能器中心为圆心,任意远场距离 r 为半径的圆上的灰度值,可以得到换能器的远场指向性。图4给出 $kr = 188$ 时,经过归一化处理后的远场指向性图,其中 k 为波数。以远场指向性图中轴线上的灰度值为标准,轴线两侧灰度值下降到该灰度值的一半时,对应的角度为超声换能器的扩散角。需要指出的是,为突出超声波波前,本文给出的所有光弹照片均做反色处理,以上计算时读取的灰度值均是反色处理前的灰度值。



图3 纵波换能器稳态声场

Fig. 3 The time-harmonic ultrasonic field radiated by the longitudinal wave transducer

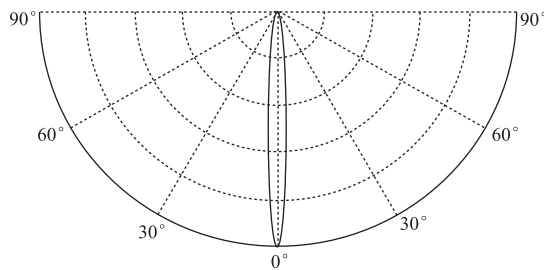
图 4 纵波换能器远场指向性($kr = 188$)Fig. 4 The far-field directivity of the longitudinal wave transducer($kr = 188$)

表 1 给出了光弹法测量值与参考值的对比。参考值中,声速、中心频率由脉冲回波法测得,近场长度和半扩散角由经验公式得到。其中,近场长度 N 的表达式为: $N = D^2/4\lambda$, D 为换能器直径;扩散角 α 为: $\sin(\alpha/2) = 0.514c/f/D$ 。对比可见,动态光弹法测量结果具有很高的精度,尤其对于空间参量,电测法一般要通过扫描来实现,动态光弹法更为简便。

表 1 纵波换能器参数

Table 1 The parameters of the longitudinal wave transducer

测量参数	测量值	参考值
纵波速度 (m/s)	5890	5950
中心频率 (MHz)	3.53	3.48
近场长度 (cm)	3.23	3.25
半扩散角 (°)	3.72	3.65

3.2 横波换能器

横波换能器由厚度切变模振动的 2/2 型压电复合材料制作而成,换能器辐射面直径为 9 mm。实验中使用熔点较低的水杨酸苯酯作为耦合剂,将横波换能器粘接到样品表面,换能器工作时向样品中垂直辐射出横波。

重复纵波测量的步骤,同样可测得横波换能器的辐射声场,进而计算出声场的各个参数。横波换能器瞬态辐射声场和稳态辐射声场分别如图 5、6 所示,图 7 给出 $kr = 182$ 时的远场指向性图。对比可见,该换能器具有类似于纵波换能器的特征。光弹法测量值和参考值的对比如表 2 所示。需要指出的是,动态光弹法测量超声场参数具有普遍适用性,而非仅针对以上两类换能器,如光弹法在相控阵换能器的聚焦声场测量方面也有一定的应用。



图 5 横波换能器瞬态声场

Fig. 5 The transient ultrasonic field radiated by the shear wave transducer



图 6 横波换能器稳态声场

Fig. 6 The time-harmonic ultrasonic field radiated by the shear wave transducer

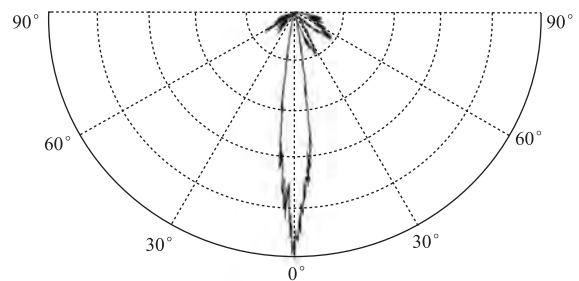
图 7 横波换能器远场指向性($kr = 182$)Fig. 7 The far-field directivity of the shear wave transducer($kr = 182$)

表 2 横波换能器参数

Table 2 The parameters of the shear wave transducer

测量参数	测量值	参考值
横波速度 (m/s)	3623	3600
中心频率 (MHz)	2.33	2.51
近场长度 (mm)	10.87	11.25
半扩散角 (°)	6.30	5.90

4 误差分析

误差来源可能是实验系统、测量方法和数据读取等多方面的。对于本文的实验结果,引起误差的因素主要包括实验系统和测量方法。

(1)实验系统:测量结果依赖于相机拍摄的光弹照片,图片中各点的灰度值分布是直接的数据来源。对于搭建的动态光弹实验系统来说,一方面,样品前后的偏振片有一定消光比,不可能做到完全消光,实验样品中也会存在残余应力,均会影响灰度值的大小;另一方面,CCD相机的动态范围是有限的,在不饱和的前提下,灰度值大小仅存在有限个数值,会降低测量精度,并使得指向性图中的曲线变得不光滑对称。

(2)测量方法:由于拍摄的稳态声场光弹照片均是瞬时声场,因此近场长度处的超声波并不一定处于波峰或波谷,即光弹照片中的灰度值不一定是极大值。设测量值为 N ,声波波长为 λ ,则真实的近场长度应在 $(N - \lambda/2, N + \lambda/2)$ 范围内。更为准确的方法是多次调节延时并拍摄稳态声场照片,将换能器轴线上的灰度分布曲线叠加,并取叠加后的包络曲线,此时曲线上最远处的极大值点到换能器表面的距离即为近场长度。

最后需要指出的是,换能器参数会受到加工工艺的影响。表1和表2给出的参考值是电法测量和经验公式计算得到的,并不是换能器声场特征的真实值,是可能存在一定误差的。

5 结论

本文基于实验室搭建升级的动态激光光弹实验系统,定量测量了超声换能器的辐射声场特征参数。拍摄不同时刻的瞬态声场,测量固体中的传播声速和声波波长,计算得到换能器中心频率;拍摄稳态声场,由辐射声场中各点的灰度值分布,测量给出近场长度、指向性和扩散角等参数。并对动态光弹系统和测量方法可能引起的测量误差进行了分析讨论。实验结果显示,无论是纵波换能器,还是横波换能器,动态光弹法的测量值与参考值均有较好的一致性。研究结果表明光弹法可以有效地定量测量换能器声场,进一步地,可以推广应于聚焦换能器、相控阵换能器以及复合振动模式换能器

等复杂换能器的声场特征测量。

致谢 感谢中科院声学所的沈建中、邓京军、张守玉等的指导和帮助。

参 考 文 献

- [1] YING CH F, ZHANG SH Y, WANG L SH. Study on the creeping waves around cylindrical cavities in solid medium by the photoelastic technique[J]. Sci. China, 1981, 24(11): 1509-1520.
- [2] YING CH F, ZHANG SH Y. Reflection of an acoustic wave in a solid and its relation to the creeping phenomena [J]. Sci. China, Ser. A, 1984, 27(1): 55-69.
- [3] YING CH F, ZHANG SH Y, SHEN J ZH. Scattering of ultrasound in solids as visualized by the photoelastic technique [J]. J. Nondestr. Eval., 1984, 4(2): 65-73.
- [4] ZHANG SH Y, SHEN J ZH, YING CH F. The reflection of the Lamb wave by a free plate edge: visualization and theory [J]. Mater. Eval., 1988, 46(5): 638-641.
- [5] SHEN J ZH, YING CH F. Scattering of a grazing longitudinal wave pulse by a ribbon-type crack—experimental verification by the photoelastic method [J]. Chin. J. Acoust., 1989, 8(1): 15-19.
- [6] ZHANG SH Y, ZHANG P ZH, SHEN J ZH, et al. Photoelastic Visualization of Ultrasound Generated by Pulsed Laser [J]. Chin. Phys. Lett., 1993, 10(12): 734-736.
- [7] 应崇福, 张守玉, 沈建中. 超声在固体中的散射[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994: 162-170.
- [8] 诸国桢, 孙耀, 傅德永. 用动态光弹法记录的超声脉冲沿固-固界面的传播过程[J]. 应用声学, 2004, 23(2): 7-10. ZHU Guozhen, SUN Yao, FU Deyong. Propagation of ultrasonic pulse along solid-solid interface recorded by the dynamic photoelastic method [J]. J. Appl. Acoust., 2004, 23(2): 7-10.
- [9] 肖开丰. 超声波在弹性固体传播的数值模拟及动态光弹的实验研究[D]. 中北大学硕士学位论文. 2008.
- [10] 刘力博, 陆铭慧, 刘勋丰, 等. 多通道动态光弹成像系统的研制[J]. 无损检测, 2010, 32(8): 634-636. LIU Libo, LU Minghui, LIU Xunfeng, et al. Development of multi-channel dynamic photoelasticity imaging system [J]. NDT, 2010, 32(8): 634-636.
- [11] 卢超, 陆铭慧. 超声波在固体中传播与散射的动态演示及教学应用[C]. Proceedings of 2010 Third International Conference on Education Technology and Training (Volume 7), 武汉, 中国, 2010.
- [12] GINZEL E, STEWART D. Photo-elastic visualisation of phased array ultrasonic pulses in solids [C]. The 16th World Conference on Nondestructive Testing, Montreal, Canada, 2004.
- [13] GINZEL E, HONARVAR F, YAGHOOTIAN A. A Study of Time-of-Flight Diffraction Technique Using Photoelastic Visualisation [C]. The 2nd International Conference on Technical Inspection and NDT, Tehran, Iran, 2008.