◇ 研究报告 ◇

利用激光多普勒测振仪的空气耦合超声声场测量*

吴 樵^{1,2} 周雨轩^{1,2} 廉国选¹ 王小民^{1†}

(1 中国科学院声学研究所 声场声信息国家重点实验室 北京 100190)(2 中国科学院大学 北京 100049)

摘要:针对空气耦合超声信号微弱、难以直接测量的问题,进行了空气耦合超声声场测量的实验研究。使用激光多普勒测振仪测量由声波引起的激光路径上的介质折射率变化,进而得到空气和固体材料内部的时域瞬态声压。通过直接测量空耦换能器的辐射声功率,给出对单个空耦换能器灵敏度的直接评价方法。用空耦换能器激励K9玻璃板的漏兰姆波,观测到空气中的直达波和反射波、固体板内和空气中的漏兰姆波,实现了空气和固体中微弱声波的非侵入式实验测量,为空耦换能器的特性评估和空耦检测系统的声场测量提供了实验方法。

关键词:激光多普勒测振仪;空耦换能器;声压测量
中图法分类号:TB551 文献标识码:A 文章编号:1000-310X(2020)04-0563-07
DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2020.04.010

Air-coupled ultrasound acoustic field measurements using laser Doppler vibrometers

WU Qiao^{1,2} ZHOU Yuxuan^{1,2} LIAN Guoxuan¹ WANG Xiaomin¹

State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)
 (2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: An experimental research of acoustic field measurement is carried out aiming at the weakness aircoupled signal. Using the laser Doppler vibrometer, the variation of refractive index of the media along the laser path can be measured, which is caused by acoustic waves. The temporal acoustic pressure signals in air or solid media can thus be obtained. By measuring the radiated acoustic power, a direct assessment method of the sensitivity of single air-coupled transducer is given. Leaky Lamb wave of K9 glass plate in the air excited by air-couple transducers is given. The temporal acoustic pressure signals of the direct and reflective waves in the air, the leaky Lamb wave both in solid and air are observed. The experimental measurement of low amplitude acoustic waves in air or solid media is achieved, providing a direct procedure for the characterization and assessment of air-coupled transducers and the measurement of the acoustic field of air-coupled testing systems.

Keywords: : Laser Doppler vibrometers; Air-coupled transducers; Acoustic pressure measurement

²⁰¹⁹⁻⁰⁹⁻²⁰ 收稿; 2019-11-28 定稿

^{*}国家自然科学基金项目 (11504407)

作者简介:吴樵(1990-),男,湖北武汉人,博士研究生,研究方向:超声检测与换能器。

[†]通信作者 E-mail: wangxiaomin@mail.ioa.ac.cn

0 引言

空气耦合超声检测技术是一种非接触的无损 检测技术,由于使用了空气代替水或其他传统耦 合剂,在一次完整的空耦检测过程中涉及到多次 声波在气-固界面的透射,导致声波信号较弱,给 空耦换能器的特性评价和空耦检测系统声场的 实验观测带来了一定难度^[1-2]。与接触式或水浸 超声检测不同,目前针对空耦超声检测声场的直 接实验测量方法的相关研究还有所欠缺,具体体 现为:

(1) 空耦换能器灵敏度的常规检测手段是对系 统插入损耗的测量^[3],即使用同轴正对的两个空耦 换能器,间隔一定距离,按照一发另一收的方式获得 接收信号,计算整个系统的插入损耗,以此作为空耦 换能器的灵敏度评价指标。测得的灵敏度曲线受到 接收换能器性能和换能器间距的影响,没有完全直 接反映出单个空耦换能器的性能。但受限于空耦换 能器的灵敏度,类似水听器式的直接测量方法难度 较大。

(2) 在空耦超声检测系统中,主要关注接收换 能器最终接收的电信号,而对于空耦检测系统内的 中间过程,如发射换能器产生的声波、进入待测固 体后的声波、从待测固体中出射的声波等,由于空 耦换能器的低灵敏度,常规的观测方法,如施利仑 法^[4]或动态光弹法^[5-6]难以实现以上中间过程的 声场观测。

使用激光多普勒测振仪,可以实现高灵敏度、大动态范围、宽频带的非侵入式声压测量,文献[7-10] 将其应用于流体介质体波声场的可视化和材料特 性分析,是一种值得关注的测量方法。

本文使用激光多普勒测振仪搭建实验测试系统,实现了空气和固体中微弱声波的时域瞬态声压的非侵入式实验观测。应用于空耦超声检测,设计出一种直接测量单个空耦换能器灵敏度的方法,并对空耦检测系统中间过程难以直接实验观测的问题给出解决方案。具体内容包括:(1)通过空耦换能器声压和指向性的测量,计算电声效率,进而实现单个空耦换能器的灵敏度评价,不受接收换能器性能和不同的声波传播距离的影响,可以直接反映出单个空耦换能器的灵敏度性能。(2)提供一种对空耦检测系统内部微弱声场的实验观测手

段,有助于空耦检测系统中声波传播和散射现象的 研究。

1 基于激光多普勒测振仪的声压测量方法

1.1 测量原理

激光多普勒测振仪可以检测出反射体表面的 振动速度。其原理是多普勒效应:运动的物体反射 的激光信号频率会发生多普勒频移。反射的激光信 号的多普勒频移和反射体的振动速度之间的关系 如公式(1)所示^[11]:

$$\Delta f = \frac{2v\cos\theta}{\lambda},\tag{1}$$

其中, Δf 是激光的多普勒频移,v 是反射体表面的 振动速度, $v\cos\theta$ 表示垂直于激光入射方向的表面 振速分量, λ 是激光的波长。激光测振仪检测反射光 与入射光之间的频移,通过拍频的方式转化为电压 信号输出,输出的信号幅值与反射体相对于激光源 的表面振速成正比。

使用激光测振仪测得的物体表面振速与光程 和折射率都相关,如公式(2)所示^[12]:

$$v = z \frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}t} + n \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t},\tag{2}$$

其中, z 是光程, n 是折射率。公式(2)表明, 当反射体静止时, 激光的光程不变, 测得的多普勒频移来源于介质折射率的变化。

参考文献[13] 给出介质中压强与折射率的关系 如公式(3) 所示:

$$n = 1 + \frac{7.86 \times 10^{-1} P}{273 + T} - (1.50 \times 10^{-11}) \text{RH}(T^2 + 160), \quad (3)$$

其中,P是压强,T是温度,RH是相对湿度。公式(3) 表明,介质内折射率的变化量和压强的变化量成正 比。当介质中存在时变的超声信号时,压强的变化 量由超声信号的声压提供。

根据上述原理,可以搭建如图1所示的声压测 量系统。激光穿过介质,被垂直放置的静止反射体 反射后沿原路径返回并接收。当介质中有声波经过 激光路径时,变化的声压引起折射率的变化,使激光 测振仪测量到一个虚拟的表面振速信号。将激光测 振仪的输出信号积分后代入公式(4),即可计算出介 质中超声信号的声压^[7]。

$$P_u = \frac{n}{z\beta}u,\tag{4}$$

其中,常数 $\beta = 2.68 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}, u$ 是反射体的表面位移, P_u 是超声信号的声压。公式(4)表明,测得的声压是激光路径上声压分布的累积。与动态光弹法类似,该方法是对三维声场的二维测量。



图1 激光测振仪实验测试系统



1.2 实验系统

实验系统如图1所示,该实验系统的测试对象 为透明介质中的声场,包括空气或透明固体(如K9 玻璃)。

实验系统包括自研空耦换能器、超声发射设备、 激光测振仪、示波器、反射体等。超声发射设备为 Panametrics 5800PR超声分析仪(单脉冲激励)或 自研设备(脉冲串激励)。自研空耦换能器两对,中 心频率分别为350 kHz和510 kHz,换能器特性可参 考文献[14]。激光测振仪为Polytec PSV400,激光 穿过超声信号区域后,被设置在待测区域后方、垂 直于激光路径的反射体反射,沿原路径返回激光头, 输出信号通过Tektronix 3012B示波器接收。

实验系统中存在一些可能影响到测量结果的 外部因素:根据公式(2),不为零的反射体表面法向 振速会被错误地视为折射率变化,从而使超声波声 压的测量值大于真实值;根据公式(3),不稳定的温 度和相对湿度会导致介质折射率的变化,这种变化 会被错误地当作由超声波引起的声压变化。

实验室环境下,空气的温度和相对湿度通常 能够保持稳定,反射体放置在稳定的支持平台上 以保持静止。为了进一步减小可能的随机误差对 测量结果的影响,保证微弱信号的测量效果,使用 示波器对采集的接收信号进行512次平均处理。经 过平均处理后的接收信号,随机噪声得到有效抑 制。为了保证平均处理的准确进行,实验中使用 Panametrics5800PR超声分析仪输出外同步触发信 号,同时提供给超声发射设备、激光测振仪和示波 器,保证测量系统获得稳定的延时信息。此外,在反 射体表面粘贴一层增透膜,用于提高接收激光信号 的质量。

2 空气耦合超声声场实验测试

2.1 空耦换能器灵敏度评价

空耦换能器灵敏度的常规评价方法是将一对 空耦换能器间隔一定距离同轴正对放置,以一发另 一收系统的插入损耗作为空耦换能器的灵敏度评 价指标。分别测量发射和接收换能器两端的激励信 号和接收信号,按照公式(5)计算插入损耗:

$$IL = 20 \lg \left(\frac{V_r}{V_t}\right),\tag{5}$$

其中,IL插入损耗,V_r是接收信号幅值,V_t是激励信 号幅值的二分之一,分别由时域接收信号和激励信 号经傅里叶变换得到。

上述方法测得的插入损耗,同时受到发射和接 收空耦换能器的性能影响。此外,测量结果还与两 个空耦换能器的间距有关。在不同文献给出的实验 测试条件中,换能器间距往往不统一,由此得到的系 统插入损耗曲线虽然也可以反映出空耦换能器的 性能,但还不够直接准确。

借助本文搭建的实验系统,使用激光测振仪测 量单个空耦换能器在空气中的时域瞬态声压,计 算单个空耦换能器的电声效率,可以设计出一种 空耦换能器灵敏度的直接评价方法:(1)在空耦换 能器远场某距离d处,测量声轴上的时域瞬态声压 p_d ;(2)垂直于声轴方向移动测量点,得到换能器主 瓣的指向性图案,计算指向性因数 R_{θ} ;(3)测量空 耦换能器的阻抗和激励电压,得到输入电功率 W_e ; (4)根据声压和指向性因数计算空耦换能器的辐射 声功率 W_a ,从而得到电声效率 η_o

该方法通过直接测量空耦换能器的电声效率 来评价单个空耦换能器的灵敏度性能,规避了常规 方法中接收换能器性能和不同声波传播距离对插 入损耗的影响,可以直接反映出单个空耦换能器的 特性。

实验结果如下。使用的空耦换能器直径为 30 mm,在空气中的近场区长度是330 mm。测量 与换能器表面距离为350 mm 处的时域瞬态声压信 号如图2所示。图3给出空耦换能器水平方向声压 分布的测量结果,与空耦换能器表面的垂直距离 为350 mm,水平方向上每间隔1 mm 设置一个测 量点。实验测量时,每个测量点的信号采集均独立 地重复10次,记录最大、最小、平均测量值和标准 差,在图3中给出误差分析。图例中"计算值"是使 用CIVA软件在相同条件下的仿真计算结果。

根据图2和图3,按照参考文献[15]给出的测量 方法,由圆形活塞型换能器的等效面积计算得到指 向性因数,进一步计算出辐射声功率。辐射声功率 按照公式(6)计算^[15]:

$$W_a = 4\pi d^2 P(\omega)^2 / \left(\rho c R_\theta\right),\tag{6}$$

其中, W_a 是辐射声功率,π是圆周率,d是测量点与换能器表面的距离, $P(\omega)$ 是距离d处声轴方向上的声压的傅里叶变换, ρ 是密度,c是声速, R_{θ} 是指向性因数。



图2 时域瞬态声压





Fig. 3 The horizontal acoustic pressure distribution

使用图2的时域接收信号进行快速傅里叶变换,计算电声效率作为灵敏度指标,求得空耦换能器的灵敏度如图4所示,图例中"LDV法"表示激光测振仪直接测量电声效率的方法,"电测法"表示常规方法,数据引自参考文献[14]。图4中对灵敏度进行了归一化处理,以便在同一张图中对照显示。当频率为450 kHz时,该空耦换能器的灵敏度最高。因为排除了接收换能器的影响,与常规方法的测试结果有所不同,该结果直接反映出单个空耦换能器的特性。



图 4 空耦换能器灵敏度测试

Fig. 4 The sensitivity test of the air-coupled transducer

2.2 空耦检测系统声场观测

进一步将该系统用于空耦检测系统的声场观 测实验。空耦检测系统通常包括空气和待测固体, 与传统的水浸或接触式换能器的辐射声场相比,由 于空气和固体之间巨大的声阻抗差异,空耦换能器 在空气中的声场较弱。基于同样原因,空耦检测系 统在待测固体内部的声场更加微弱。依靠高灵敏度 的激光多普勒实验系统,可以同时实现对空耦检测 系统空气和固体内部微弱声场的观测。

对空耦换能器激励固体板中漏兰姆波实验进 行观测。固体板的材料为K9玻璃,厚度为3mm, 上下界面为空气时,计算漏兰姆波群速度频散曲线 如图5所示,当频率为350kHz时,板内A0模式兰 姆波的群速度为5315m/s。激光测量区域大小为 80mm×15mm,覆盖K9玻璃板的上方、板内和下 方。使用峰峰值为400V、中心频率为350kHz的 超声激励信号,激励中心频率为350kHz的空耦换 能器。在空耦换能器频带范围内,K9玻璃板内只 存在A0或S0模式的漏兰姆波。调整空耦换能器角 度为7.7°,使空耦换能器激励的漏兰姆波主要为A0 模式。

使用激光测振仪测量板内的漏兰姆波。板上方 空气中的声波能量主要来源于空耦换能器辐射的 直达纵波和反射波,漏兰姆波相对比较微弱。为了 尽可能排除空气中直达波和反射波的干扰,选择在 板下方观测空气中的漏兰姆波,测量时在板的侧面 布置障碍物遮挡,避免空耦换能器的直达波的干扰。 另外,使用另一个空耦换能器在一发另一收(TR) 模式下接收,以接收电压信号作为对照(以下简称 电测法)。



图5 漏兰姆波群速度频散曲线

Fig. 5 The group velocity dispersion curve of the leaky Lamb wave

漏兰姆波的电测法测量结果如图6所示,接收 信号经过60 dB低噪声前置放大器放大后由示波器 接收,中心频率为347.5 kHz。保持发射换能器位 置不变,将接收换能器沿K9玻璃板平行方向移动 20 mm,比较两次测得的漏兰姆波群速度可以确定 接收信号为A0模式的漏兰姆波。

激光多普勒测振仪的时域瞬态声压测量结果 如图7所示。图7(a)是K9玻璃板上方空气中的声 压,测量点与K9玻璃板的距离为7.5 mm,与空耦 换能器辐射面中心的距离为75 mm。根据时延可 以判断出空气中的直达波和经过K9玻璃板表面 的反射波。由于空气中的直达波和反射波声压较 大,漏兰姆波难以直接观测到。图7(b)和图7(c)是 板内和板下方空气中漏兰姆波的时域瞬态声压和 频谱,中心频率为345 kHz,实验观测到A0模式的 漏兰姆波。

对比电测法和激光多普勒测振仪法的测量结果,二者中心频率分别为347.5 kHz和345 kHz,结

合模态计算和到时信息,可以确定时域信号中第一 个波包为A0模式的漏兰姆波,实现了对空气和固 体板中的漏兰姆波的实验观测。电测法中,接收信 号的时域和频谱有所不同,表现出拖尾更长、带宽 更窄的特点,这是因为受到了接收换能器传递函数 的影响。激光多普勒测振仪具有宽频带的特点,对 待测信号的影响较小。



图6 TR模式接收信号

Fig. 6 Received signal of transmitting-receiving mode

图7(b)中,使用激光多普勒测振仪测量到K9 玻璃板内和空气中的漏兰姆波,空气中漏兰姆波 的声压峰峰值为1.2 Pa,对应激光测振仪输出信号 原始信号的峰峰值为55 mV,信噪比为33 dB,没 有经过放大。相同实验条件下的电测法,要得到 图6(a)的峰峰值为235 mV的接收信号,接收换能 器的输出信号需要经过60 dB低噪声前置放大器 放大。

实验表明,本文搭建的实验系统可以同时测量 空气和固体中的声场,并且具有高灵敏度,可以测量 到声场内微弱的时域瞬态声压信号,为常见的空耦 检测系统的声场提供了一种直接的实验观测手段。 在今后的工作中,准备为激光测振仪开发高增益、低 噪声的前置放大器,使该测量方法的灵敏度和信噪 比得到进一步提升。



图7 漏兰姆波实验测试

Fig. 7 Leaky Lamb wave experimental result

3 结论

根据激光测振仪原理,实现了空气和固体中微 弱声波的时域瞬态声压的实验测量,应用于空耦换 能器的特性评估和空耦检测系统的声场测量。具体 包括:

(1)给出一种空耦换能器灵敏度评价的方法。 使用激光多普勒测振仪测量空耦换能器轴线上远 场某距离处的声压和指向性因数,从而直接测量单 个空耦换能器的电声效率。与常规的使用双路插入 损耗评价空耦换能器性能的方法相比,该方法不受 接收换能器性能和发射、接收换能器之间相对距离 的影响。

(2) 实验观测了空耦检测系统各部分的时域瞬态声压,使用空耦换能器激励空气中的K9玻璃板产生漏兰姆波,实验测得了板上方空气中空耦换能器辐射的直达波和反射波,板内和板下方空气中的漏兰姆波的时域瞬态声压曲线。该实验提供了一种对空气和固体中微弱声场的实验观测手段,有助于空耦检测系统中声波传播和散射现象的研究。

参考文献

- 孔涛,徐春广,张运涛,等. 空气耦合超声换能器声场计算与 测量研究 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(22): 19-24.
 Kong Tao, Xu Chunguang, Zhang Yuntao, et al. Investigation of acoustic field calculation and measurement
- method for air-coupled ultrasonic transducer[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(22): 19–24.
 [2] 周正干,魏东. 空气耦合式超声波无损检测技术的发展 [J]. 机
- MLLT, %AAL L (HALLAGE) (KALLAGE) (KALLAGE) (J. HL 械工程学报, 2008, 44(6): 10–14. Zhou Zhenggan, Wei Dong. Progress of air-coupled ultrasonic non-destructive testing technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(6): 10–14.
- [3] Alvarez-Arenas T E G. Acoustic impedance matching of piezoelectric transducers to the air[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2004, 51(5): 624–633.
- [4] Chinnery P A, Humphrey V F, Beckett C. The schlieren image of two-dimensional ultrasonic fields and cavity resonances[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1997, 101(1): 250–256.
- [5] 金士杰,安志武,廉国选,等.光弹法测量超声换能器声场 [J].应用声学,2014,33(2):107-111.
 Jin Shijie, An Zhiwu, Lian Guoxuan, et al. Photoelastic quantification of ultrasonic beams radiated by transducers[J]. Journal of Applied Acoustics, 2014, 33(2):107-111.
- [6] 安志武, 胡中韬, 廉国选, 等. 固体介质中超声应力场的定量 测量 [J]. 应用声学, 2018, 37(1): 83-87.
 An Zhiwu, Hu Zhongtao, Lian Guoxuan, et al. Quantitative measurement of ultrasonic stress field in solid media[J]. Journal of Applied Acoustics, 2018, 37(1): 83-87.
- [7] Malkin R, Todd T, Robert D. A simple method for quantitative imaging of 2D acoustic fields using refracto-

vibrometry[J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(19): 4473–4482.

- [8] Harland A R, Petzing J N, Tyrer J R. Visualising scattering underwater acoustic fields using laser Doppler vibrometry[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 305(4/5): 659–671.
- [9] Longo R, Vanlanduit S, Guillaume P. Material properties identification using ultrasonic waves and laser Doppler vibrometer measurements: a multi-input multi-output approach[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(10): 105206.
- [10] Longo R, Vanlanduit S, Arroud G, et al. Underwater acoustic wavefront visualization by scanning laser Doppler vibrometer for the characterization of focused ultrasonic transducers[J]. Sensors, 2015, 15(8): 19925–19936.
- [11] Drain L E. The laser Doppler techniques[M]. Chichester, Sussex, England and New York: Wiley-Interscience, 1980: 250.

- [12] Vanherzeele J, Brouns M, Castellini P, et al. Flow characterization using a laser Doppler vibrometer[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 45(1): 19–26.
- [13] Castellini P, Martarelli M. Aeroacoustic characterization of turbulent free jets using scanning laser Doppler vibrometry[C]//Sixth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications. International Society for Optics and Photonics, 2004, 5503: 215–224.
- [14] 吴樵,陈秋颖,王小民,等. 空心聚合物微珠/环氧树脂复合 材料匹配层空耦式压电换能器 [J]. 声学学报, 2019, 44(4): 735-742.

Wu Qiao, Chen Qiuying, Wang Xiaomin, et al. Aircoupled piezoelectric transducer with a hollow polymer microsphere filled epoxy resin matching layer[J]. Acta Acustica, 2019, 44(4): 735–742.

[15] 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.