超声换能器表面振动和声场测量及其与经典超声 换能器的仿真比较

孙彦招,张涛 (天津大学电气自动化与信息工程学院,天津 300072)

摘要: 超声换能器广泛应用于声学测量,其工作性能主要取决于它的振动与声特征。然而,多数研究中的换能器被 认为是经典的活塞或高斯型,经典与常用的真实换能器之间的差异容易被忽视。基于此,首先用激光测振和传声器 测声方法测量了某厂家换能器产品的表面振动与声场特征。然后设计有限元方案,分别仿真经典与真实换能器的声 场。最后从辐射面振速分布、声场声压和相关系数等方面,综合比较经典与真实超声换能器之间振动与声场的异同。 结果表明,换能器间的辐射面振速分布差别明显,所研究的真实换能器的声场特征接近于活塞,而与高斯型差别较 大。

关键词: 超声换能器; 振动测量; 声测量; 有限元方法; 声场 中图分类号: TH212 TH213.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-3630(2018)-04-0501-06 DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2018.05.016

Surface vibration and acoustic field measurements of real ultrasonic transducer and its comparison with classic one

SUN Yan-zhao, ZHANG Tao

(School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The ultrasonic transducers are widely used in acoustic measurements, and their working performance mainly depends on their vibration and acoustic characteristics. In most researches, the transducer is considered as the classic Piston or Gaussian one, but the difference between the real transducer and the classic one is usually ignored. In this paper, the surface vibration and acoustic field of a real made transducer are measured firstly by using laser vibration meter and microphone, and then a finite element scheme is designed to simulate the acoustic fields of the classic and the real transducers. Finally, the differences and similarities between classic and real transducers are analyzed in the three aspects: velocity distribution on radiation surface, pressure along acoustic axis and correlation coefficients. The results show that the velocity distributions on radiation surface are different between these transducers, the acoustic field characteristics of the real transducer are close to the Piston one, but greatly different from the Gaussian one. Key words: ultrasonic transducer; vibration measurement; acoustic measurement; finite element method; acoustic

0 引 言

field

超声换能器广泛应用于测量领域。换能器表面 的振动形态及辐射出的声场分布直接影响其工作 的准确度和可靠性,因此研究这两方面具有重要意 义。学者从实验和仿真两方面进行了研究。

对于实验, Sapozhnikov 等^[1]用激光测振仪测 量了方形压电片表面的振动特征,并用声全息法构 造了近场区的声场特征。Jimenez 等^[2]用 Labview 软 件编写了压电换能器振动测量的数据处理和实验 结果可视化程序,展示了换能器表面不规则的振动 形态。Kluk 等^[3]搭建了用于超声换能器参数估计和 状态诊断的测量系统。金士杰等[4]用光弹法测量了 超声换能器的瞬态和稳态的辐射声场特征。

对于仿真, 2009年, Clayton 研究了虚拟的复 合式压电换能器的电、声和力耦合场,得到了发射 电压峰值处换能器的辐射声压等值线图^[5]。2011 年,Rahani 等^[6]对有限尺寸的平面圆形换能器发射 的超声波声场进行了分析。2012 年, Martins 等^[7] 对活塞型超声换能器的单层和多层厚度模态进行 了优化,讨论了厚度、共振频率和结构对换能器输

收稿日期: 2017-10-15; 修回日期: 2017-12-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61671317)

作者简介:孙彦招(1984一),男,河南平顶山人,博士研究生,研究方向 为超声换能器和超声流量计。

通讯作者: 张涛, E-mail: zt50@tju.edu.cn

通过文献分析发现,近些年学者在超声换能器 实验和仿真研究方面做了很多工作,取得了许多成 果。但在仿真时,研究者将重点放在内部力电声耦 合^[5,7,9-10]或经典换能器(以下指活塞型或高斯型换能 器^[11])上^[5-8]。对于设计、制造、材料、使用环境和使 用时间等因素^[1-3,11-12]导致的真实换能器表面振动形 态和辐射声场特征,还需继续研究。而在实验测量 真实换能器时,与仿真的结合、定量比较等方面也 需进一步研究。

基于此,为了比较某厂家的超声测距换能器产品(以下简称真实换能器)与经典换能器的异同,进行了如下的工作。首先设计含激光测振和传声器测声的实验方案,实测换能器的表面振动和声辐射特征。然后借助 COMSOL 软件设计仿真方案,分别仿真经典与真实换能器的声场。最后分别验证经典和真实换能器的声场仿真准确度。同时从换能器表面振速分布、声轴线声压和相关系数等3方面,综合比较真实与经典超声换能器振动与场的异同。

1 换能器的振动与辐射声场的测量

1.1 实验方案

使用某厂家生产的超声测距换能器时,为判断 其是否属于经典的活塞型或高斯型换能器^[11],设计 了表面振动和辐射声测量的实验方案。

换能器辐射表面振动测量系统见图 1, 它主要 由 1*和 2*两个圆柱形 PZT5 压电陶瓷复合换能器(同 型号、同批次产品)、换能器激励电路和 Polytec PSV-400-3D 型非接触式激光振动测量仪等组成。换能器激励信号为任意常用的峰峰值为 336 V 和 434 V、频率为 36.18 kHz 的正弦波。测振仪用来检测换能器辐射表面的振速,频率测量范围 0~1 MHz。 对换能器表面 L1 至 L8 线上的 81 个点进行逐点扫描, 见图 2。

声测量装置见图 3, 它除了用振动测量系统中的超声换能器、换能器激励电路外, 还用了三维移动定位系统、传声器及前置放大器、示波器。三维







Fig.2 Distribution of measurement points and their projections on transducer surface

移动定位系统的最小分辨率为 0.05 mm。传声器为 预极化驻极体测试电容式,频率范围为 0.02~70 kHz。示波器带宽为 100 MHz、采样率为 1.0 GHz。 为了避免高频率声源辐射时,声场测量布点多、任 务量大的特点,测量只在过换能器辐射表面中心的 轴上进行。在此中心轴上,0~300 mm 距离内以每 5 mm 的间隔来测量声压值。对于振动和声场测量, 每个点均测量 5 次。



图 3 换能器的辐射声场测量系统 Fig.3 Sound field measurement system for transducers

1.2 实验结果分析方法

首先分析振速数据。振速信号的波形见图 4, 横、纵坐标分别是时间和速度。



用式(1)和(2)并借助 Matlab 计算各测量点振速 波形的速度幅值 *u*_a 和重复性 *s*_N:

$$u_a = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^T u_i^2(t) \mathrm{d}t} \tag{1}$$

孙彦招等: 超声换能器表面振动和声场测量及其与经典超声换能器的仿真比较

$$s_N = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} (u_i - \overline{u})^2}$$
 (2)

式(1)、(2)中,T、 u_i 、N和 \overline{u} 分别是信号持续时间、 每次测量的振速值、测量次数和N次测量的平均值, 取N=5。重复性低于 1%。

再分析声场的实验数据。传声器测得的电压信号波形与图4相似,用电压 V 替代式(1)和(2)中的u, 计算各测量点电压的幅值 V_a 和 s_N ,再用式(3)可得声压幅值 p_a :

$$p_a = M_f V_a \tag{3}$$

式中: M_f 是传声器的声场灵敏度, M_f =5.5 mV/Pa; s_N 均小于 1%。

2 换能器辐射声场的仿真

2.1 经典换能器的仿真方法

在经典换能器仿真时,使用与真实换能器相同 的几何尺寸、共振频率和表面振速幅值等参数,以 便与真实换能器进行比较。用有限元法求解换能器 声场,方案如下。

根据圆形辐射面的振速呈对称分布的特点^[11], 几何维数选二维轴对称,辐射面直径为0.03 m,待 求解的域是半径为0.35 m的半圆,辐射面中心位于 点(0 m, 0.025 m)处,见图5。为满足求解精度并降 低网格数量,将求解域分割为半径0.04、0.1、0.31 和0.38 m的4个区域,区域1至4的网格尺寸分别 为波长λ的1/7~1/6、1/8~1/7、1/9~1/8和1/10~ 1/9。网格类型为自由三角形,在角落处精炼网格。 求解自由度数1.5×10⁵,平均网格质量和最小网格质 量分别是0.987、0.7332。

物理场用到了压力声学-频域模块。声源处的边 界条件是法向速度,域1设为完美匹配层以吸收边 界处的反射,见图 5。用的参数值有空气密度 $\rho_0 = 1.204 \text{ kg·m}^3、空气中声速 <math>c_0 = 343.4 \text{ m·s}^{-1},$ $u_a = 0.5 \text{ m·s}^{-1}, f = 36.18 \text{ kHz}$ 和系数 B = 3.5。用关于频 域的稳态求解器,求解方式是直接耦合。

2.2 真实换能器的仿真方法

真实换能器的表面法向振速分布不一定呈二 维轴对称,同时,为克服高频率声源时三维有限元 的求解困难,这里采用二维模型。用投影方法将换 能器辐射面上的振速分布转变为某条直径线上的 振速。对辐射面上 81 个点的振速分布数据 $(x_i, y_i) - u_i$ 进行垂直投影,例如线 L2 的点 a 和 L8 的点 b 投影到点 c(见图 2),得到 y = 0 直径线(即 L1')上 41 个点的振速分布 $(x_i, 0) - u_i, x_i, y_i \pi u_i$ 分





别是辐射面上第 *i* 个点的横坐标、纵坐标和振速, *i*=1,2...81, *x_i*、0 和 *u_i*分别是线 Ll'上第 *j* 个点的横 坐标、纵坐标和振速, *j*=1,2...41。投影后,用式(4) 计算投影点的 *u_i*:

$$u_{j} = \frac{1}{k} \sum_{k} (w_{i} \times u_{i}) = \frac{1}{k} \sum_{k} (\frac{u_{i}}{\sum_{k} u_{i}} \times 100\% \times u_{i})$$
(4)

式(4)中,w_i是第i个点振速的权重系数,k是线Ll' 上某点处坐标x_i的重合数量,根据图2的测量点分 布,此处k=2或11。然后对得到的直径线y=0上 各点的x_i(自变量)-u_i(因变量)数据进行5次多项式 拟合,最后得到声源处的法向振速。其它仿真方法 与经典换能器相同。

3 真实与经典换能器的结果比较

3.1 换能器声场仿真的验证

首先,比较仿真值与理论值^[11],验证经典换能器的仿真正确度。在换能器轴线上选择距振动面 0.05、0.1、0.2 和 0.3 m 处的 4 个位置提取声压级 (Sound Pressure Level, SPL)仿真值 L_{p1} ,再计算这些 位置的 SPL 理论值 L_{p2} ,最后用式(5)计算两者之间 的相对误差 δ :

$$\delta = \frac{L_{p1} - L_{p2}}{L_{p2}} \tag{5}$$

计算结果如表 1 所示。由表 1 可知,两类经典 声源 SPL 的解析解与有限元解的最大和最小误差 分别为 0.09%和-0.10%。

然后,将仿真值与实验值进行比较,验证真实 换能器的仿真正确度。图6显示了声源轴线上不同 位置处仿真和实验结果的比较。对于3组仿真-实 验情形,在0~0.025 m范围的换能器附近,相对误 差范围为-2.75%~-0.15%。在0.05~0.29 m的范 围,因声能分布随距离的增大而发散,仿真和实验

第5期

值都随距离的增加而迅速减小。最大相对误差 1.16%出现在"1[#]换能器 434 V"的情形。当距离大 于 0.29 m 时, 仿真值突然下降, 这是因为仿真时此 区域处于声波吸收作用强的完美匹配层(Perfect Matched Layer, PML)中。

表 1 经典换能器轴线上声压级的仿真值与计算值比较 Table 1 Comparison between the simulated and calculated SPL values on the axis of the classic transducers

मान को र	÷.,	活塞型			高斯型		
距离	J/m	L_{p1}/dB	L_{p2}/dB	δ /%	L_{p1}/dB	L_{p2}/dB	δ /%
0.0)5	139.57	139.47	0.07	128.73	128.67	0.05
0.	1	133.91	133.99	-0.06	123.23	123.12	0.09
0.2	2	128.16	128.11	0.04	117.11	117.23	-0.10
0.2	5	126.28	126.18	0.07	115.25	115.30	-0.05



图 6 真实换能器中心轴线上声压级的仿真值与实测值比较 Fig.6 The comparison between the simulated and measured SPL values on the central axis of the real transducer

通过换能器的仿真和对比可知,有限元解、解 析解以及实验值具有良好的一致性,说明了仿真方 案是可行的。

3.2 换能器表面振动形态的比较

由式(1)可求得各测量点振速波形的速度幅值 u_a 。对各测量点的坐标(x,y)(自变量)和 u_a (因变量), 选择插值和函数逼近方法中的二元四次多项式进 行拟合,结果如图7所示。图7中,x,y表示换能 器表面的位置(单位:mm),z表示所在位置的速度 幅值 u_a (单位:m·s⁻¹)。

由图 7 可知,辐射面振速分布并非是理想化 的,彼此间的变化规律和数值大小存在差异。根据 文献[1-3,12]所述,这可能是由设计、制造工艺、材 料、使用环境和使用时间等造成的。再用相关系数 *ρ_{xx}*定量分析振速分布的异同,其表达式为

$$\rho_{XY} = \frac{\operatorname{cov}(X, Y)}{\sqrt{D(X)}\sqrt{D(Y)}} \tag{6}$$

式(6)中,X、Y分别为两组的振速(或下文的声压级) 数据,cov(X,Y)为X、Y的协方差,D(X)、D(Y)则 分别为X、Y的方差。各振速分布间的相关系数见



表 2。由表 2 可知,1*换能器在不同激励电压下的 振速分布相关度高;1*与2*换能器在相同激励电压 下的相关度低。还可知,各换能器之间的相关系数, 随换能器类型、激励电压的变化而存在显著差异。 此外,因活塞表面振速是常数,所以计算显示为非 数据(Not A Number, NAN)。

表 2 换能器表面振速分布的相关系数 Table 2 The correlation coefficients of vibration velocity distributions on the transducer surfaces

换能器	1#336V	1#434V	2#336V	活塞型	高斯型
1#336V	1				
1#434V	0.9306	1			
2#336V	0.4528	0.6084	1		
活塞型	NAN	NAN	NAN	NAN	
高斯型	0.7735	0.8775	0.6913	NAN	1

3.3 换能器振动辐射声场的比较

由式(3)得到声压幅值 p_a 后,比较经典和真实换 能器轴线上声压幅值 p_a 的变化,如图 8 所示。由图 8 可知,轴线上声压的数值大小和变化规律与理想 换能器存在差异。 p_a 随距离的增大而减小,在相同 距离处,不同类型换能器的 p_a 差异较大。

图 9 显示了经典和真实两类换能器辐射声场的 声压级分布。由图 9(a)、9(b)可知,活塞声源的声 场在近场具有空间的不均匀性,而在远场具有旁瓣 辐射;高斯声源的声场中无旁瓣,声场分布呈高斯 规律。









图 9(c)~9(e)显示了 1*和 2*换能器的模拟声特 征。由图 9 可知,声场中有 1 个主瓣和 4 个旁瓣, 主瓣集中了声场的大部分能量。对于 1*换能器,在 2 种电压下,主瓣宽度和形状相似,但与 2*换能器 有小的差别。对于 1*换能器,激励电压越大,声场 声压越大。而对于不同的换能器 1*和 2*,在相同的 激励电压下,1*换能器的声场大于 2*换能器声场的 最大值和最小值。

图 9(c)~9(c)与图 9(a)~9(b)相比较,可以发现, 声场中主瓣和旁瓣的形状和数量,随换能器类型、 激励电压的变化而存在差异。以上的定性结论也可 从各声场的相关系数(见表 3)中得到定量证实。

	表 3	换能器声场分布的相关系数		
Table 3	3 The correlation coefficients of acoustic fie			
distributions for transducers				

换能器	1#336V	1#434V	2#336V	活塞型	高斯型
1#336V	1				
1#434V	0.9981	1			
2#336V	0.9848	0.9834	1		
活塞型	0.9675	0.9737	0.9648	1	
高斯型	0.9175	0.9164	0.9264	0.8700	1

4 结论

用经过验证的仿真和实验方案,分析了某厂家 换能器产品的振动和声辐射特征,并与经典换能器 进行比较,结论如下。

(1)表面振速分布。通过激光测振和换能器测 声实验发现,真实换能器的表面振速分布呈不均匀 和非对称性,可以用高次多项式来拟合振速分布, 不同于经典换能器的常数或高斯函数。通过相关系 数分析发现,各换能器之间表面振速分布的相似 度,随换能器类型、激励电压的变化而存在显著的 差异。对于同一个真实换能器,在不同的激励电压 下,振速分布的相关度较高。

(2) 声场分布。对于换能器中心轴线的声压变 化,通过实验测量和仿真发现,在换能器的近场和 远场,相同距离处、不同类型换能器的声压差异较 大,近场区声压值变化趋势和数值的差异更大。对 于声场分布,根据相关系数分析发现,换能器之间 声场分布的相关度,也随换能器类型、激励电压的 变化而存在差异。相同换能器在不同的激励电压 下,声场分布的相关度高。

总之,由于设计、制造、材料、使用环境和使 用时间等因素,会使真实换能器与经典换能器之间 的振动与辐射声特征存在差异。此外,所述的仿真、 测量和分析方法,可以为研究者进一步精确分析 工程和科研应用中换能器的振动及声辐射特征提 供参考。

参考文献

- SAPOZHNIKOV O A, MOROZOV A V, CATHIGNOL D. Piezoelectric transducer surface vibration characterization using acoustic holography and laser vibrometry[C]//Montreal: IEEE Ultrason Ferroelect & Frequency Control Soc, 2004, 161-164.
- [2] JIMENEZ F J, FRUTOS J D. Virtual instrument for measurement, processing data, and visualization of vibration patterns of piezoelectric devices[J]. Computer Standards& Interfaces, 2005, 27(6): 653-663.
- [3] KLUK P, MILEWSKI A, KARDYS W, et al. Measurement system for parameter estimation and diagnostic of ultrasonic transducers[J]. Acta Physica Polonica A, 2013, 124(3): 468-470.

- [4] 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]. Applied Acoustics, 2014, 33(2): 107-111.
- [5] CLAYTON L. Fishing with Multiphysics[EB/OL]. www. ansys. com. 2009.
- [6] RAHANI E K, KUNDU T. Modeling of transient ultrasonic wave propagation using the distributed point source method[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2011, 58(10): 2213-2221.
- [7] MARTINS M, CORREIA V, CABRAL J M, et al. Optimization of piezoelectric ultrasound emitter transducers for underwater communications[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2012, 184(9): 141-148.
- [8] 刘雪林, 史湘伟, 黄兴洲, 等. 超声波测距声场的仿真研究[J]. 现 代电子技术, 2014, 37(5): 101-104.
 LIU Xuelin, SHI Xiangwei, HUANG Xingzhou, et al. Simulation

research on the sound field of ultrasonic distance measurement[J]. Modern Electronics Technique, 2014, **37**(5): 101-104.

- [9] LIONETTO F, MONTAGNA F, MAFFEZZOLI A. Ultrasonic transducers for cure monitoring: design, modelling and validation[J]. Measement Science and Technology, 2011, 22(1): 124002.
- [10] 张永刚. 声表面波换能器激励的有限元仿真[J]. 声学技术, 2009, 28(5): 678-681.

ZHANG Yonggang. FEM simulation of SAW transducer excitation[J]. Technical Acoustics, 2009, **28**(5): 678-681.

- [11] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 3 版. 南京: 南京大学出版社, 2012.
 DU Gonghuan, ZHU Zhemin, GONG Xiufen. Acoustics foundation[M]. 3rd edition. Nanjing: Nanjing University Press, 2012.
- [12] ZHENG Dandan, FU Xingyi, YANG Zhibin. Research and realisation of reciprocal electronic circuits for gas ultrasonic flow meter[J]. IET Science Measurement & Technology, 2017, 11(5): 666-672.

2018年全国物理声学学术会议在保定召开

2018 年全国物理声学学术会议于9月14~16 日在河北省保定市召开。本次会议由中国声学学会物理声学分会和江苏省声学学会主办,由华北电力大学和南京大学声学研究所承办。华北电力大学副校长律方成,中国声学学会副理事长张春华,原国家自然科学基金委数理学部学科主任张守著,江苏省声学学会理事长刘晓峻,中国声学学会物理声学分会主任刘晓宙、副主任张碧星和朴胜春等出席了开幕式。

来自全国各高等院校、科研院所、公司企业等 32 家单位的 110 余名代表参加了会议,会议以"物理声学迈入新时 代"为主题,围绕物理声学相关的基础、应用基础及其前沿问题等热点展开了学术交流。

大会开幕式由中国声学学会物理声学分会副主任张碧星主持。中国声学学会物理声学分会主任刘晓宙、江苏省声学 学会理事长刘晓峻、华北电力大学副校长律方成、中国声学学会副理事长张春华先后致辞。

刘晓宙主任希望通过物理声学会议构建一个物理声学的交流平台,让新老朋友在这一平台之上进行广泛的学术交流,从而奠定物理声学更好的发展基础,让老一代人为我们开辟的中国物理声学的事业进一步发扬光大。

律方成副校长表示本次会议为华北电力大学提供了一次难得的学习机会,作为华北电力大学 60 周年校庆系列重点 活动之一,华北电力大学全力支持本次会议并祝会议圆满成功。

中国声学学会副理事长张春华和江苏省声学学会理事长刘晓峻分别代表中国声学学会和江苏省声学学会对不远千 里来参加本次会议的专家和代表以及本次会议筹备组表示感谢。张春华在致词中指出,虽然经典声学的基本问题已经解 决,但是复杂介质、复杂结构、微结构、生命体以及极端环境等的声学问题极富挑战性,相关问题取得突破,必定会推 动声学技术和应用的进步,前沿基础研究是创新的源泉,所以物理声学非常重要,值得我们深耕细作。他还希望物理声 学分会和总会一起,联系各地方学会,做好四个服务:服务科技工作者、服务公众科学素质提升、服务国家经济发展、 服务政府决策,进一步扩大服务对象,创新服务方式,拓展服务渠道,充实服务内容。

会议邀请了八位专家为与会代表献上了一场精彩的学术盛宴。南京大学王新龙教授介绍了孤子的局域共振激发;中 国石油大学乔文孝教授介绍了声波测井中的井旁散射波及模拟测量效果分析;华北电力大学姜根山教授介绍了炉管泄漏 声检测技术中的声学问题研究;中国科学院声学研究所张碧星研究员介绍了超声多波聚焦及声偏振方向控制;中国科学 院声学研究所杨亦春研究员介绍了次声波技术发展及产业化展望;哈尔滨工程大学陶智勇教授介绍了声学异构结构波导 的接触效应研究;武汉大学邱春印教授介绍了谷声学和拓扑声学;中国科学院声学研究所王文研究员介绍了声表面波在 线监测技术及应用。一整天的大会报告交流给代表们提供了充分的学术讨论和交流时间。

会议共有近 60 篇论文进行了专题交流,分为物理声学、非线性声学、检测声学、水声、生物医学超声和声学超材 料等 6 个专题。广州多浦乐电子科技有限公司也派出负责人和核心技术人员积极参会。会后,代表们参观了华北电力大 学新能源电力系统国家重点实验室和动模实验室。

此次物理声学学术会议在自由的学术交流氛围中落下帷幕。

本次会议的精彩报告和精心安排获得了与会代表们的一致好评。代表们认为会议展示了物理声学领域理论及应用研究的 最新成果,促进了各科研单位与企业间的学术交流和了解合作,是全国物理声学的又一次盛会!