

文章编号 1004-924X(2015)11-3077-06

声场的直接测量

潘孙强, 陈哲敏*, 张建锋

(浙江省计量科学研究院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 为准确测量声场分布, 研究了基于激光测振仪的声场直接测量技术。基于声音在空气中传播时会引起空气折射率周期性变化的原理, 利用激光测振仪测量了激光通过声场时激光光程受空气折射率的调制发生周期性变化产生的振动速度。由于声场在激光方向上的投影即为激光测振仪测得的振动速度, 测量了声场在不同投影方向上的振动速度, 再由 Radon 逆变换重构声场复振幅分布, 从而实现了声场的直接测量。文中实验测量了 2 kHz 声场引起的振动速度振幅分布和相位分布, 进而重构得到声压振幅分布和瞬时声压分布。测量得到空间分辨率为 2 cm, 声压振幅最大为 0.026 Pa, 对应的声压级为 62.3 dB。实验结果表明, 基于激光测振仪的声场分布直接测量方法是可行的, 该方法解决了现有麦克风阵列接触式测量声场存在的问题。

关键词: 激光测振仪; 声场分布; 声场测量; 投影; Radon 变换

中图分类号: TN247; O422.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152311.3077

Direct measurement of sound field

PAN Sun-qiang, CHEN Zhe-min*, ZHANG Jian-feng

(Zhejiang Province Institute of Metrology, Hangzhou 310018, China)

* Corresponding author, E-mail: czmasm@hotmail.com

Abstract: To measure the sound field distribution accurately, a direct sound field measurement method based on a laser vibrometer is researched. Based on the fact that the air refractive index is changed periodically when the sound wave propagates in the air, the vibration velocity caused by the periodically changed refractive index occurred in laser passed through a sound field can be measured by the laser vibrometer. As the projection of the sound field in the direction of the laser is the vibration velocity, the direct measurement of sound field can be completed by measuring the projection of the sound field in different directions and reconstructing the complex amplitude distribution of the sound field using inverse Radon transform. The amplitude distribution and phase distribution of the vibration velocity caused by a 2 kHz sound field are measured experimentally, and the sound pressure amplitude distribution and the instantaneous sound pressure distribution are reconstructed. The measurement shows that the spatial resolution is 2 cm, the measured maximum sound pressure amplitude is 0.026 Pa, and corresponding sound pressure level is 62.3 dB. Experimental results indicate that the direct sound field measurement based on the laser vibrometer is feasible, and it solves the problem existing in the sound field measurement by using microphone arrays.

收稿日期: 2015-08-11; **修订日期:** 2015-09-06.

基金项目: 浙江省省属科研院所专项资助项目 (No. 2013F10058, No. 2015F10024); 浙江省科技厅公益项目 (No. 2015C31127); 杭州市重大科技创新专项 (No. 20142013A25); 浙江省质监系统重大科研项目 (No. 20130110)

Key words: laser vibrometer; sound field distribution; sound field measurement; projection; Radon transform

1 引言

声场的准确测量是开展声学研究的必要前提。声场测量可分为单点测量和场测量。通常单点测量采用单个麦克风,而场测量则需要采用麦克风阵列。由于麦克风数量有限,麦克风阵列声场测量的空间分辨率较低,要提高空间分辨率必须增加麦克风的数量,而麦克风属于接触式测量,数量过多则会影响声场分布,导致测量误差。

近年来,随着光学方法在振动速度测量等领域的普及^[1-3],基于光学的声场测量技术也得到了快速发展^[4-5]。该方法属于非接触式测量,测量精度较高。Pitts 等人采用 CCD 探测脉冲激光通过水下超声声场时的激光光强分布,计算出激光通过声场后的相位变化,进而计算出声场分布^[6]。Richoux 等人利用粒子图像测速仪(PIV)测量声场中颗粒物的运动速度,进而计算出声场强度^[7],但是该方法需要示踪颗粒物。

激光测振仪可以直接测量物体的振动速度,所以可通过测量随声场运动的物体的振动速度来得到声场强度。贺岩等人将激光会聚到水表面,水面反射光的相位随水面的振动而产生周期性变化,采用零差相干探测法实现了声场的单点测量,用于水下声光通信^[8]。张晓琳等人同样采用激光干涉法实现了对水下声信号的单点测量^[9]。王月兵等人在水下声场中放置膜片,膜片与水介质做等幅同相运动,利用激光测振仪测量膜片的振动速度从而实现了对水下声场的测量^[10]。但上述方法均需要随声场等幅同相运动的介质,依然属于接触式测量。

声音在空气中传播时会引起空气折射率的周期性变化;当激光通过声场时,激光光程受空气折射率调制也会产生周期性变化,所以可用激光测振仪测量声场导致的振动速度。本文采用激光测振仪扫描整个声场,测量激光光路上声场引起的振动速度,由 Radon 逆变换重构整个声场的复振幅分布,从而实现了对声压振幅分布和瞬时声压分布的测量。

2 声场测量原理

2.1 声光效应

声场分布可以用声压表示:

$$p(r, t) = A(r) \cos(2\pi ft - \varphi(r)), \quad (1)$$

式中: $p(r, t)$ 为瞬时声压分布, r 为矢径, t 为时间, $A(r)$ 为声压振幅, f 为声音频率。

声压同样可以用复振幅表示:

$$p(r, t) = A(r) e^{j(2\pi ft - \varphi(r))}. \quad (2)$$

空气压强与空气密度的关系可表示为^[11]:

$$\frac{p_t}{p_0} = \left[\frac{\rho}{\rho_0} \right]^\gamma, \quad (3)$$

式中: p_0, ρ_0 为静态条件下的空气压强和密度; γ 为比热比; p_t 为静态压强和声压之和, $p_t = p_0 + p$ 。

空气折射率与密度的关系可表示为^[12]:

$$n - 1 = \chi \rho, \quad (4)$$

式中 χ 为常数。结合式(3)和式(4)可得空气折射率与声压的关系为:

$$n = (n_0 - 1) \left[1 + \frac{p}{p_0} \right]^{1/\gamma} + 1, \quad (5)$$

式中 n_0 为静态条件下的空气折射率。将式(5)用泰勒级数展开,同时考虑到 $p \ll p_0$, 因此可得到:

$$n \cong n_0 + \frac{n_0 - 1}{\gamma p_0} p. \quad (6)$$

当激光测振仪的激光通过声场时,其光程可表示为:

$$D = \int_L n dl = n_0 L + \frac{n_0 - 1}{\gamma p_0} \int_L p(r, t) dl. \quad (7)$$

令 D/n_0 为等效长度,距离随时间的变化即为振动速度,因此激光测振仪测得的声场引起的振动速度为:

$$v(t) = \frac{dD}{n_0 dt} = \frac{n_0 - 1}{\gamma n_0 p_0} \frac{d}{dt} \left(\int_L p(r, t) dl \right). \quad (8)$$

将振动速度和声压都用复振幅表示,可得:

$$\begin{aligned} V(t) &= \frac{n_0 - 1}{\gamma n_0 p_0} \frac{d}{dt} \int_L P(r, t) dl = \\ &= \frac{n_0 - 1}{\gamma n_0 p_0} \int_L \frac{d}{dt} P(r, t) dl = \\ &= j2\pi f \frac{n_0 - 1}{\gamma n_0 p_0} \int_L P(r, t) dl. \end{aligned} \quad (9)$$

上述公式表明,激光测振仪测得的振动速度与声压沿激光传播方向上的线性积分直接相关。

2.2 声场的重构

对于一个已知分布的场,可以由 Radon 变换计算该场分布在某一方向上的投影,即沿该方向的线性积分为:

$$R_p(x', \theta, t) = \int P(x, y, t) dy' \quad (10)$$

坐标轴 x', y' 和 x, y 如图 1 所示, $R_p(x', \theta, t)$ 为场 $P(x, y, t)$ 在 y' 方向上的投影。已知场在各个方向上的投影,就可以由 Radon 逆变换计算出场分布, Radon 逆变换通常用于场的重构^[13]。

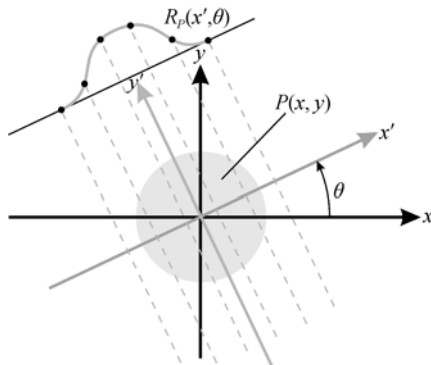


图 1 声场投影示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sound field projection

对比式(9)和式(10)可知,声场的 Radon 变换为激光测振仪测得的振动速度;已知振动速度 $v(t)$, 可由 Radon 逆变换计算得到声场的声压分布。

$$P(x, y, t) = R^{-1} R_p(x', \theta, t) = R^{-1} \left[\frac{\gamma n_0 p_0}{j 2 \pi f (n_0 - 1)} V(t) \right] \quad (11)$$

式中 R^{-1} 为 Radon 逆变换算符。当声场旋转对称时,只需测量单一方向不同位置处的 $R_p(x', t)$, 就可由 Radon 逆变换计算得到声场的复振幅分布 $P(x, y, t)$, 再由声压复振幅 $P(x, y, t)$ 即可求得瞬时声压分布 $p(x, y, t)$ 和声压振幅分布 $A(x, y)$ 。

3 实验装置与测量结果

3.1 实验装置

基于激光测振仪的声场测量装置结构如图 1

所示。信号发生器(SRS, DS360)发生单频正弦信号,加载到扬声器上产生声场。激光测振仪(Polytec, PDV-100)发出激光穿过声场,激光经声场调制,经反射面漫反射后由激光测振仪测得声场在该方向上投影对应的振动速度。由于声场引起的振动速度较小,为提高信噪比,将激光测振仪和信号发生器的输出信号输入至锁相放大器(SRS, SR830),测量振动速度的振幅和相位。声场旋转对称,因此只需沿垂直激光方向移动扬声器,测得声场不同位置处的振动速度,再由 Radon 逆变换计算即可得到声压的复振幅分布。声压复振幅的实部即为声场的瞬时声压分布,幅值即为声压振幅分布。

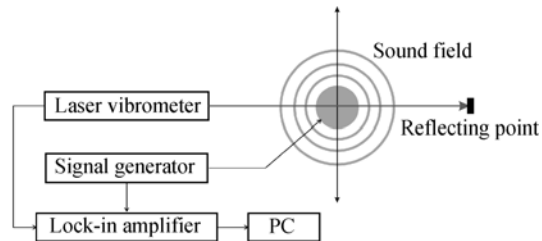


图 2 声场测量装置结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sound field measuring system

声场测量装置如图 2 所示,整套测量装置置于半消音室内,激光测振仪置于三脚架上,在一支杆上喷涂反射漆作为激光反射点,手动移动扬声器进行声场测量。



图 3 声场测量装置实物图

Fig. 3 Photo of sound field measuring system

3.2 测量结果

将 2 kHz, 20 V 正弦信号加载到扬声器上,测量平面至扬声器的垂直距离为 25 cm,扬声器移动间隔为 2 cm,由激光测振仪测得声场引起的

振动速度分布如图 3 所示。图 3(a)为振动速度的振幅分布,振幅呈对称分布,在 $x' = 0$ 处,振动速度最大为 $6.9 \mu\text{m/s}$;在 $x' = 20 \text{ cm}$ 处,瞬时声压在这一方向上呈正弦分布,瞬时声压在这一方向上的投影为 0,因此声场引起的光程变化相互抵消,振动速度降为 0。锁相放大器测得的相位在 $-180 \sim 180^\circ$,通过相位展开法得到振动速度的相位分布,如图 3(b)所示。

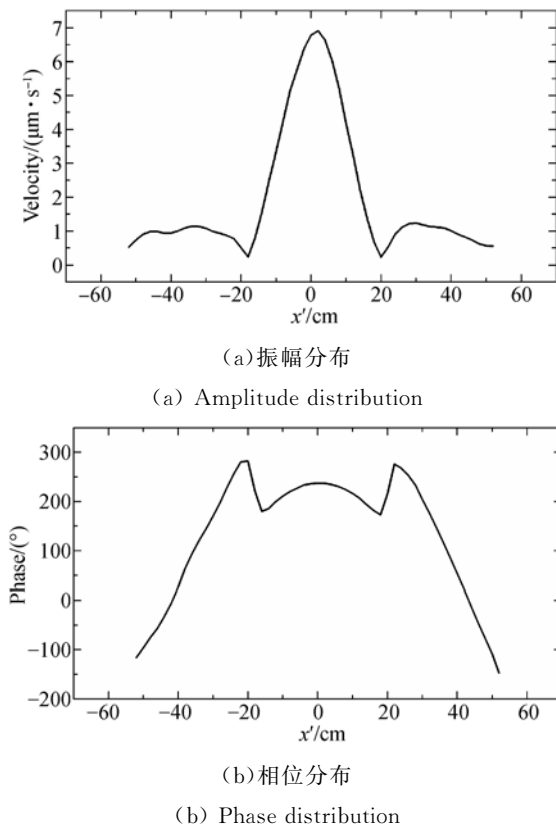


图 3 声场引起的振动速度分布

Fig. 3 Distribution of vibration velocity caused by sound field

由振动速度的振幅分布和相位分布可以得到振动速度的复振幅分布。将它们代入式(11),由 Radon 逆变换计算可得到声压的复振幅分布。求声压复振幅分布的绝对值,计算得到声压的振幅分布,如图 4 所示。2 kHz 时,声压振幅呈同心圆分布,中心位置的声压振幅最大,声场具有较强的指向性。声压振幅最大为 0.026 Pa,对应的声压级为 62.3 dB。计算声压复振幅分布的实部得到瞬时声压分布,如图 5 所示。

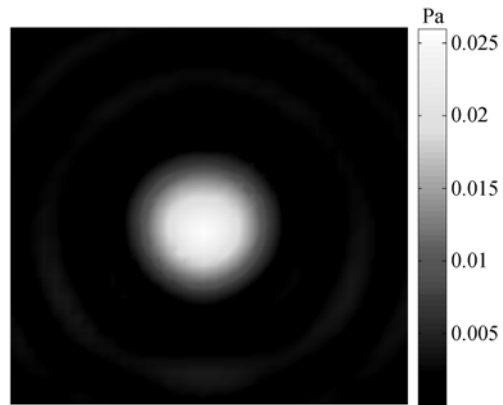


图 4 声压振幅分布

Fig. 4 Distribution of sound pressure amplitude

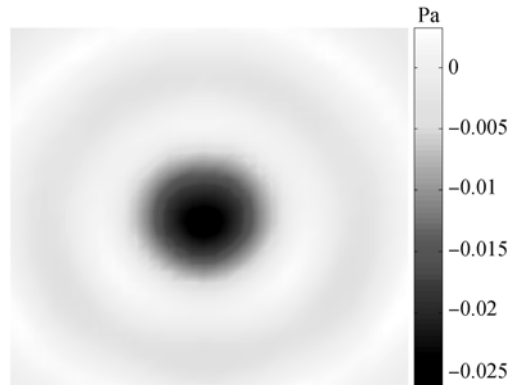


图 5 瞬时声压分布

Fig. 5 Distribution of instantaneous sound pressure

激光穿过声场,由反射面漫反射后再次经过声场,由激光测振仪测得振动速度。激光测振仪测得的振动速度为声场引起光程差变化导致的振动速度和反射面受声场影响而产生的振动速度之和。其中,前者为重构声场分布需要测量的信号,而反射面的振动为干扰信号。在扬声器上加载不同的电压,测得声场引起的振动速度,如图 6 所示。为测量反射面受声场影响产生的振动速度,将激光测振仪移至反射面一侧,激光不通过声场直接测量反射面的振动速度,测得的反射面振动速度如图 6 所示。由图 6 可知,电压为 20 V 时,声场引起的振动速度为 $6.9 \mu\text{m/s}$,反射面的振动速度为 $0.18 \mu\text{m/s}$,反射面的振动速度远小于声场引起的振动速度,因此可以忽略反射面振动对声场测量的影响。

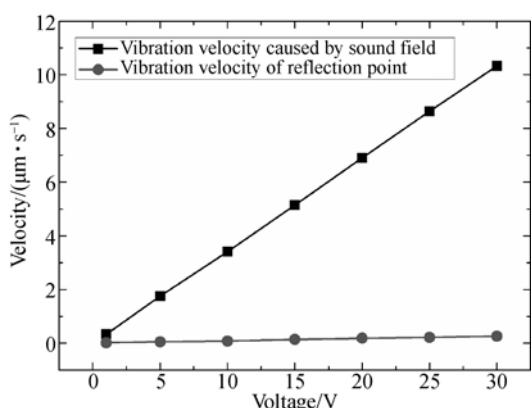


图 6 声场振动速度和反射面振动速度的对比

Fig. 6 Comparison of vibration velocity between sound field and reflection point

参考文献:

- [1] 李醒飞,王驰,向红标,等. 光学外差干涉法检测微弱超声振动[J]. 光学精密工程, 2008, 16(7): 1158-1162.
LI X F, WANG CH, XIANG H B, *et al.*. Detection of weak ultrasonic signal using optical heterodyne interferometry [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7): 1158-1162. (in Chinese)
- [2] 姚峰林,高世桥. 基于高速摄影动态测试微陀螺振动[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 165-170.
YAO F L, GAO SH Q. Dynamic test of vibration for micro machined gyroscope based on high speed photography[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 165-170. (in Chinese)
- [3] 张斌,韩旭光,冯其波,等. 基于BSO晶体反射式全息光栅的振动测量系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(7): 1781-1786.
ZHANG B, HAN X G, FENG Q B, *et al.*. Vibration measurement system based on reflection holographic grating of crystal BSO[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(7): 1781-1786. (in Chinese)
- [4] 刘伟,张骏. 水下声场激光相干探测的实验研究[J]. 光电子技术, 2013, 33(2): 141-144.
LIU W, ZHANG J. Experimental study on laser interferometry of underwater acoustic signals [J]. *Optoelectronic Technology*, 2013, 33(2): 141-144. (in Chinese)
- [5] 曹增辉,郑田甜,孙腾飞,等. 激光探测水下声信号的

4 结 论

本文研究了基于激光测振仪的声场直接测量技术。声场在某一方向的投影即为激光测振仪测得的振动速度。测量声场不同投影方向上的振动速度,再由 Radon 逆变换重构声场的复振幅分布,从而实现了声场的直接测量。实验测量了 2 kHz 声场引起的振动速度的振幅分布和相位分布,并重构得到了声压振幅分布和瞬时声压分布。实验结果显示,该测量方法的空间分辨率为 2 cm,测得的声压振幅最大为 0.026 Pa,对应的声压级为 62.3 dB。由此表明,基于激光测振仪的声场分布直接测量是可行的。

实验研究[J]. 光电技术应用, 2014, 29(2): 17-21.

CAO Z H, ZHENG T T, SUN T F, *et al.*. Experiment research on underwater acoustic signal for laser detection[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2014, 29(2): 17-21. (in Chinese)

[6] PITTS T A, GREENLEAF J F. Three-dimensional optical measurement of instantaneous pressure[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2001, 108(6):2873-2883.

[7] RICHOUX O, DEGROOT A, GAZENGEL B, *et al.*. Modeling the pressure field in the vicinity of a microphone membrane using PIV[J]. *Applied Acoustics*, 2009, 71(2):157-163.

[8] 贺岩,王文奎,夏文兵,等. 激光多普勒振动计用于水下声光通信[J]. 中国激光, 2007, 34(5): 703-706.

HE Y, WANG W K, XIA W B, *et al.*. Laser Doppler vibrometer for acousto-optic communication [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(5): 703-706. (in Chinese)

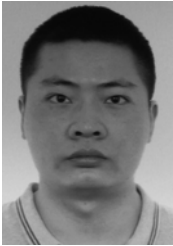
[9] 张晓琳,唐文彦,孙和义. 水下声信号的激光干涉测量[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 809-815.

ZHANG X L, TANG W Y, SUN H Y. Laser interferometry of underwater acoustic signals [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 809-815. (in Chinese)

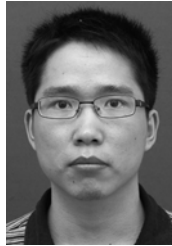
[10] 王月兵,平自红. 高频聚焦换能器声场的激光测量法[J]. 应用声学, 2003, 22(1):12-15.

WANG Y B, PING Z H. Test of sound-field for high frequency focused transducers using laser interferometry[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2003, 22(1):12-15. (in Chinese)

- [11] PIERCE A D. *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications*[M]. New York: Melville, 1989.
- [12] ALLISON J M, BIRCH K P, CROWDER J G. Precise determination of refractometric parameters for anesthetic agent vapors[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(13):2459-2464.
- [13] 黄杰贤, 杨冬涛, 龚昌来. 基于 Radon 方向场检测指纹奇异点[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(9): 2041-2059.
- HUANG J X, YANG D T, GONG CH L. Inspection for fingerprint singular points based on Radon directional field characteristics[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9):2041-2059. (in Chinese)

作者简介:

潘孙强(1986—),男,浙江永嘉人,博士后,2008年、2013年于浙江大学分别获得学士、博士学位,主要从事光学计量技术的研究。E-mail: pansunqiang@gmail.com

通讯作者:

陈哲敏(1982—),男,浙江瑞安人,高级工程师,2003年、2008年于浙江大学分别获得学士、博士学位,主要从事面向计量的光学技术研究。E-mail: czmasm@hotmail.com

(本栏目编辑:曹 金)

(版权所有 未经许可 不得转载)