

# 一种三维质点振速传感器灵敏度测量方法<sup>\*</sup>

景文倩<sup>1,2</sup>, 吴华伟<sup>1,2</sup>, 聂金泉<sup>1,2</sup>, 丁华锋<sup>1,2</sup>

(1. 湖北文理学院纯电动汽车动力系统设计与测试湖北省重点实验室 襄阳, 441053)

(2. 湖北文理学院汽车与交通工程学院 襄阳, 441053)

**摘要** 一种基于近场声全息技术的质点振速传感器灵敏度测量方法, 在没有任何特殊声源或声学设备的前提下, 通过测量或重建声场中的声压和法向质点振速来计算声阻抗, 实现质点振速传感器的灵敏度测量。将该方法扩展至三维质点振速传感器的灵敏度测量, 在测量或重建法向质点振速的同时, 也测量或重建切向质点振速, 实现三维声阻抗的估算, 从而同时测量计算 3 个方向质点振速传感器的灵敏度, 并通过实验验证了所提方法的有效性。

**关键词** 三维质点振速传感器; 灵敏度; 近场声全息技术; 声阻抗

**中图分类号** TH73; TB52+8

## 引言

近些年, Microflown 科技公司研发了一种质点振速传感器<sup>[1]</sup>, 使直接测量空气中质点振速成为可能。将该质点振速传感器与一个微型传声器结合, 得到一个可靠实用的声压-质点振速 (pressure-particle velocity, 简称 p-u) 声强探头, 可用于声强测量<sup>[2]</sup>、声吸收和声阻抗测量<sup>[3]</sup>、声能量和声功率分析<sup>[4]</sup>以及近场声全息 (nearfield acoustic holography, 简称 NAH)<sup>[5]</sup>等。为了保证应用顺利实施, 必须首先获取 p-u 声强探头的准确灵敏度, 包括 p 探头和 u 探头的灵敏度。其中, p 探头的灵敏度很容易获得, 只需将其与标准的参考传声器对比测量即可, 而 u 探头的灵敏度很难获取, 因为尚没有标准的质点振速传感器。目前, 获取 u 探头灵敏度的方法一般是创建一个声阻抗 (表征声压与质点振速关系) 已知的声环境<sup>[6]</sup>。

最初, 获取 u 探头灵敏度的方法是驻波管法<sup>[7-8]</sup>, 但由于驻波管长度和直径的限制, 该方法存在截止频率。文献[9]提出一些可用于更宽频带的方法, 比如“活塞-球声源” (piston-on-a-sphere, 简称 POS) 方法, 即采用一个内嵌扬声器且扬声器正前方开一个小孔的刚性塑料球声源产生一个阻抗关系已知的声场, 该方法主要适用于中高频。文献[6]将 POS 方法扩展至低频带, 并与原 POS 方法结合,

从而获得全频带的灵敏度。另外, 灵敏度测量也可采用光学技术<sup>[10-11]</sup>和移动刚性腔体的表面振速测量法<sup>[12]</sup>, 但这些方法仅获取了灵敏度的幅值而未涉及相位。

综上所述, 现有的 u 探头灵敏度测量方法都需要借助一些特别设计的声源、声学设备或光学设备等。为了避免使用这些特殊声源、声学设备或光学设备, 文献[13]采用 NAH 方法, 通过测量或重建声压和质点振速获取声阻抗, 进而获取 u 探头的灵敏度。笔者将该方法扩展至三维 p-u 声强探头 (ultra super probe, 简称 usp 探头), 由一个传声器和 3 个相互正交的质点振速传感器组成, 在测量或重建法向质点振速的同时, 也测量或重建切向质点振速, 从而实现三维声阻抗的同时估算, 同时测量 3 个 u 探头的灵敏度。

## 1 三维声阻抗的计算

给定一个振动体, 将待测的 usp 探头和标准参考传声器置于该振动体辐射的声场中同一位置处。在参考传声器灵敏度已知的条件下, 可直接获取 p 探头的灵敏度

$$S_p = \frac{p}{p_{ref}} \cdot S_{ref} \quad (1)$$

其中:  $p$  和  $p_{ref}$  分别为  $p$  探头和参考传声器的输出;  $S_{ref}$  参考传声器的灵敏度。

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(11704110); 湖北省技术创新专项重大资助项目(2017AAA133); “机电汽车”湖北省优势特色学科群资助项目(XKQ2018002)

收稿日期: 2017-01-20; 修回日期: 2017-03-20

由于没有标准的质点振速传感器,3个u探头的灵敏度需要借助参考传声器和声阻抗获得,笔者采用基于等效源的NAH方法计算三维声阻抗,其计算流程示意图如图1所示。

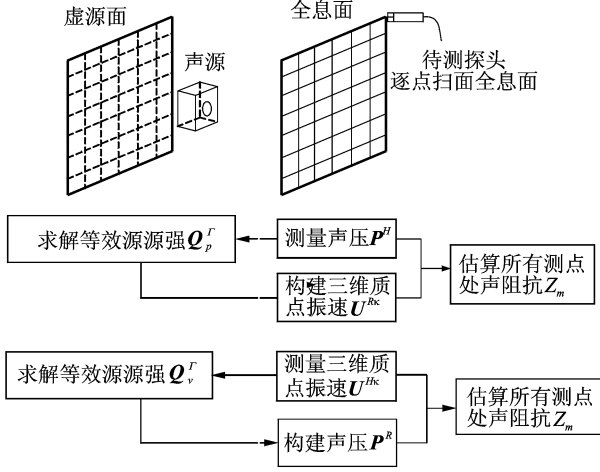


图1 三维声阻抗的计算流程示意图

Fig. 1 The schematic for computing the three-dimensional acoustic impedance

在振动体的近场,采用待测的usp探头逐点扫描测量一个全息面 $H$ 上的声压 $P^H$ 和某方向(用单位向量 $\mathbf{k}$ 表示)上的质点振速 $U^{Hk}$ 。假设全息面 $H$ 上有 $M$ 个测量点,虚源面 $\Gamma$ 上有 $N$ 个等效源,那么这 $M$ 个测量点处的声压和 $\mathbf{k}$ 方向上的质点振速可分别用矩阵的形式表达为

$$\mathbf{P}^H = i\alpha\omega \mathbf{G}_p^{H\Gamma} \mathbf{Q}^\Gamma \quad (2)$$

$$\mathbf{U}^{Hk} = \mathbf{G}_v^{H\Gamma} \mathbf{Q}^\Gamma \quad (3)$$

其中: $i=\sqrt{-1}$ 表示虚数单位; $\rho$ 为空气密度; $\omega$ 为角频率; $\mathbf{G}_p^{H\Gamma}$ 为全息面 $H$ 上的声压与虚源面 $\Gamma$ 上的等效源之间的传递矩阵; $\mathbf{G}_v^{H\Gamma}$ 为全息面 $H$ 上的质点振速与虚源面 $\Gamma$ 上的等效源之间的传递矩阵; $\mathbf{Q}^\Gamma$ 为虚源面 $\Gamma$ 上等效源的源强列向量。

当 $\mathbf{k}=(1,0,0)$ 、 $\mathbf{k}=(0,1,0)$ 或 $\mathbf{k}=(0,0,1)$ , $U^{Hk}$ 刚好分别为 $x$ 、 $y$ 或 $z$ 方向上的质点振速分量。

如果测量点数目不少于等效源数目,即 $M \geq N$ ,则可以通过奇异值分解计算广义逆求得等效源源强列向量 $\mathbf{Q}^\Gamma$ 。若以全息面 $H$ 上的测量声压 $\mathbf{P}^H$ 为输入,可解得源强列向量的正则化解为

$$\mathbf{Q}_p^\Gamma = \frac{1}{i\alpha\omega} [(\mathbf{G}_p^{H\Gamma})^H \mathbf{G}_p^{H\Gamma} + \epsilon \mathbf{E}]^{-1} (\mathbf{G}_p^{H\Gamma})^H \mathbf{P}^H \quad (4)$$

其中:上标“H”表示共轭转置;“-1”表示矩阵的逆运算; $\epsilon$ 为正则化参数; $\mathbf{E}$ 为单位矩阵。

在获得等效源源强的基础上,即可重建全息面 $H$ 上每个测点处 $\mathbf{k}$ 方向上的质点振速 $U^{Rk}$

$$\mathbf{U}^{Rk} = \mathbf{G}_v^{H\Gamma} \mathbf{Q}_p^\Gamma \quad (5)$$

同理,若以全息面 $H$ 上 $\mathbf{k}$ 方向上的质点振速 $U^{Hk}$ 为输入,可解得源强列向量的正则化解为

$$\mathbf{Q}_v^\Gamma = [(\mathbf{G}_v^{H\Gamma})^H \mathbf{G}_v^{H\Gamma} + \epsilon \mathbf{E}]^{-1} (\mathbf{G}_v^{H\Gamma})^H \mathbf{U}^{Hk} \quad (6)$$

利用式(7),可重建全息面 $H$ 上每个测点处的声压 $\mathbf{P}^R$

$$\mathbf{P}^R = i\alpha\omega \mathbf{G}_p^{H\Gamma} \mathbf{Q}_v^\Gamma \quad (7)$$

根据声阻抗与声压和质点振速的关系,计算所有测点处的声阻抗为

$$Z_m = \frac{\mathbf{P}^H_m}{\mathbf{U}^{Rk}_m} \text{ 或 } Z_m = \frac{\mathbf{P}^R_m}{\mathbf{U}^{Hk}_m} \quad (m=1,2,\dots,M) \quad (8)$$

其中: $Z_m$ 为第 $m$ 个测量点处的声阻抗。

当 $\mathbf{k}=(1,0,0)$ 、 $\mathbf{k}=(0,1,0)$ 和 $\mathbf{k}=(0,0,1)$ 时,分别对应 $x$ 、 $y$ 和 $z$ 方向上的声阻抗。

## 2 三维灵敏度的测量

以声阻抗为纽带,u探头的输出可与参考传声器的输出联系起来,即

$$Z = \frac{p_{\text{ref}}/S_{\text{ref}}}{u/S_u} \quad (9)$$

其中: $u$ 和 $S_u$ 分别为u探头的输出和灵敏度。

根据式(9),解得u探头的灵敏度为

$$S_u = \frac{u}{p_{\text{ref}}} Z S_{\text{ref}} \quad (10)$$

将式(8)代入式(10),可得第 $m$ 个测量点处u探头的灵敏度为

$$S_u^m = \frac{\mathbf{U}^{Hk}_m}{p_{\text{ref}}^m} Z_m S_{\text{ref}} = \frac{\mathbf{U}^{Hk}_m}{p_{\text{ref}}^m} \frac{\mathbf{P}^H_m}{\mathbf{U}^{Rk}_m} S_{\text{ref}}$$

或

$$S_u^m = \frac{\mathbf{U}^{Hk}_m}{p_{\text{ref}}^m} Z_m S_{\text{ref}} = \frac{\mathbf{P}^R_m}{p_{\text{ref}}^m} S_{\text{ref}} \quad (11)$$

其中: $p_{\text{ref}}^m$ 为第 $m$ 个测量点处参考传声器的输出。

根据式(1), $p_{\text{ref}}^m$ 可表示为

$$p_{\text{ref}}^m = \frac{\mathbf{P}^H_m}{S_p} S_{\text{ref}} \quad (12)$$

将式(12)代入式(11),可得

$$S_u^m = \frac{\mathbf{U}^{Hk}_m}{\mathbf{U}^{Rk}_m} S_p \text{ 或 } S_u^m = \frac{\mathbf{P}^R_m}{\mathbf{P}^H_m} S_p \quad (13)$$

理论上,采用式(13)估算的所有测点处u探头的灵敏度应该相等,然而事实并非如此,因为测量和重建过程中的不确定性可能会引起计算误差。但是,不同测点处u探头的灵敏度应当趋于一个常数。所以,u探头的灵敏度可以定义为所有测点处灵敏度的平均值

$$S_u = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M S_u^m \quad (14)$$

### 3 实验分析

如图 2 所示,以一个几何尺寸为  $0.26\text{ m} \times 0.15\text{ m} \times 0.14\text{ m}$  的音箱作为研究对象,测量计算一个 Microflown 科技公司的 usp 探头的灵敏度。待测 usp 探头的 p 探头和 u 探头的灵敏度都可以根据厂家提供的标定报告获得。这里直接使用标定报告中 p 探头的灵敏度,并用标定报告中 u 探头的灵敏度作为参考,以对比检验前面所述的灵敏度测量方法的有效性和精确性。



图 2 实验测量场景图  
Fig. 2 The experiment scene

用 Matlab 合成信号激励如图 2 所示的音箱声源,该合成信号的频带为  $200 \sim 3000\text{ Hz}$ ,频率间隔为  $50\text{ Hz}$ 。将音箱前表面(安装扬声器的面)的中心设为坐标原点,在距离音箱前表面  $z = 0.145\text{ m}$  处采用待测 usp 探头逐点扫描测量一个尺寸为  $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$  的全息面  $H$ ,且  $x$  和  $y$  方向的测量间隔均为  $0.05\text{ m}$ 。需要注意的是:采集测量信号时,采集软件中的 p 探头和 u 探头灵敏度分别设置为  $1\text{ mV/Pa}$  和  $1\text{ V}/(\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ ,以便获得未经任何标定的初始信号:声压和  $\mathbf{k}$  方向上的质点振速(这里,  $\mathbf{k}$  分别取值为  $\mathbf{k} = (1, 0, 0)$ ,  $\mathbf{k} = (0, 1, 0)$  和  $\mathbf{k} = (0, 0, 1)$ ,即分别对应  $x, y$  和  $z$  方向上的质点振速分量)。

图 3 为以声压为输入时计算的 u 探头灵敏度幅值相对于参考值的偏差曲线。可以看出,  $x$  通道的灵敏度幅值与参考值偏差很小,仅为  $\pm 1\text{ dB}$ ;  $y$  通道的灵敏度幅值偏差整体也在  $\pm 1\text{ dB}$  范围内,除了在  $400\text{ Hz}$  和  $750\text{ Hz}$  两个频率处偏差稍大;  $z$  通道的灵敏度幅值偏差比前两者稍大,但总体也在  $-1\text{ dB} \sim 3\text{ dB}$  范围内,除了在  $1\ 100\text{ Hz}$  处的突变。上述三点发生突变的原因很可能是测量或重建引起了偶然误差。

图 4 为以声压为输入时计算的 u 探头灵敏度相位相对于参考值的偏差曲线。可以看出,  $x$  和  $y$  通道的灵敏度相位偏差比较小,都在  $\pm 10^\circ$  以内,而  $z$  通道的灵敏度相位偏差在高频带比较大,最大偏差可达  $17^\circ$ 。然而,相对于一个周期的相位幅度  $360^\circ$

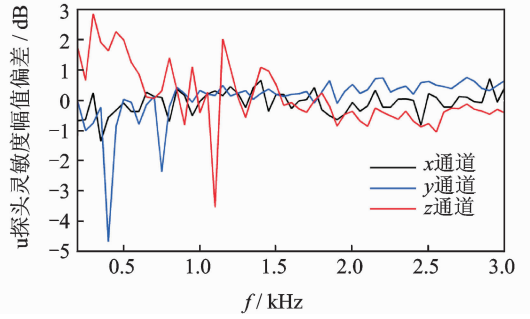


图 3 以声压为输入时, u 探头灵敏度幅值相对于参考值的偏差曲线

Fig. 3 The difference between the amplitude of the obtained u-sensor sensitivity using the pressure as input and its reference

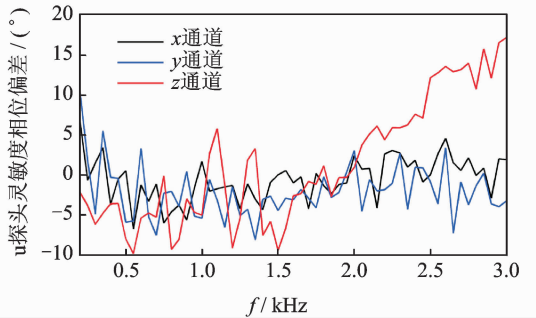


图 4 以声压为输入时, u 探头灵敏度相位相对于参考值的偏差曲线

Fig. 4 The difference between the phase of the obtained u-sensor sensitivity using the pressure as input and its reference

来说,即使是  $17^\circ$  的偏差,其误差也仅为  $4.7\%$ ,依然可获得高精度的灵敏度相位。

此外,以质点振速为全息输入亦可计算 u 探头的灵敏度,图 5 和 6 分别为 u 探头灵敏度相对于参考值的幅值和相位偏差曲线。从图 5 可以看出,灵敏度的幅值偏差非常小,即使对于发生突变的几个

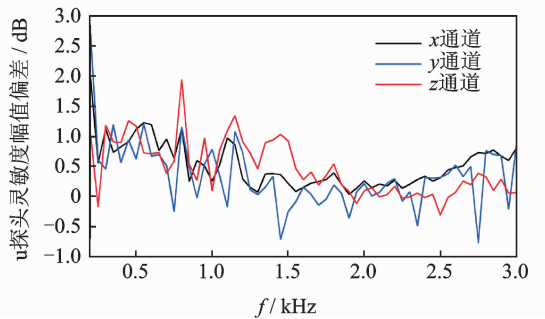


图 5 以质点振速为输入时, u 探头灵敏度幅值相对于参考值的偏差曲线

Fig. 5 The difference between the amplitude of the obtained u-sensor sensitivity using the particle velocity as input and its reference

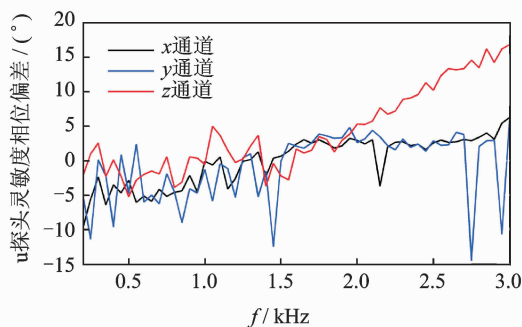


图6 以质点振速为输入时,u探头灵敏度相位相对于参考值的偏差曲线

Fig. 6 The difference between the phase of the obtained u-sensor sensitivity using the particle velocity as input and its reference

频率点,偏差最大也不过 2.5 dB。图 6 所示的灵敏度相位偏差曲线与图 4 类似,依然是  $z$  通道的灵敏度相位偏差在高频带比较大;不同之处在于  $y$  通道的灵敏度相位偏差不是很稳定,有几个突变的频率点,这些频率点处相位偏差也比较大,但与一个周期相位幅度  $360^\circ$  来比较,这些偏差依然很小。

实验分析结果表明,提出的灵敏度测量方法是有效可行的,在一个普通声源产生的声场中,可同时测量计算 usp 探头中  $x$ 、 $y$  和  $z$  3 个方向 u 探头的灵敏度,并取得比较满意的测量计算精度。

## 4 结束语

在没有任何特殊声源、声学设备或光学设备的前提下,采用 NAH 技术实现声压和三维质点振速之间的相互构建,从而计算三维声阻抗,借助标准的声压传感器,利用声阻抗、声压和质点振速三者之间的关系,对 u 探头的灵敏度进行测量。由于采用 NAH 技术可以同时计算三维声阻抗,因此笔者所提出的灵敏度测量方法可以同时测量 usp 探头中  $x$ 、 $y$  和  $z$  3 个方向 u 探头的灵敏度。

### 参 考 文 献

- [1] De Bree H E. The microflow: an acoustic particle velocity sensor [J]. Acoustics Australia, 2003, 31(3): 91-94.
- [2] Jacobsen F, De Bree H E. A comparison of two different sound intensity measurement principles [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2005, 118(3): 1510-1517.
- [3] Tijss E. Study and development of an in situ acoustic absorption measurement method [D]. [S. l.]: University of Twente, 2013.
- [4] Jacobsen F. Measurement of total sound energy density in enclosures at low frequencies [J]. Journal of the

Acoustical Society of America, 2008, 123(5): 3439.

- [5] Fernandez G E, Jacobsen F. Near-field acoustic holography with sound pressure and particle velocity measurements [D]. [S. l.]: Technical University of Denmark, 2012.
- [6] Bastenand T, De Bree H E. Full bandwidth calibration procedure for acoustic probes containing a pressure and particle velocity sensor [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2010, 127(1): 264-270.
- [7] Druyvesteyn W F, De Bree H E, Elwenspoek M. Realization and calibration of a novel half inch p-u sound intensity probe [J]. Journal of the Audio Engineering Society, 1999, 106: 4974-4981.
- [8] Stanzial D, Sancchi G, Schiffrer G. Calibration of pressure-velocity probes using a progressive plane wave reference field and comparison with nominal calibration [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2011, 129(6): 3745-3755.
- [9] Jacobsen F, Jaud V. A note on the calibration of pressure-velocity sound intensity probes [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2006, 120(2): 830-837.
- [10] Raangs R, Schlicke T, Barham R. Calibration of a micromachined particle velocity microphone in a standing wave tube using a LDA photon-correlation technique [J]. Measurement Science and Technology, 2005, 16(5): 1099-1108.
- [11] Fernandez C D, Piper B, Koukoulas T, et al. Calibration of an acoustic particle velocity sensor using a laser based method [C]//The 23<sup>rd</sup> International Congress on Sound and Vibration. Athens, Greece: [s. n.], 2016.
- [12] Fernandez C D, Tijss E, Janszen M, et al. A novel in situ calibration method for acoustic particle velocity sensors based on surface velocity [C]//The 22<sup>nd</sup> International Congress on Sound and Vibration. Florence, Italy: [s. n.], 2015.
- [13] Jing Wenqian, Zhang Yongbin, Bi Chuanxing. A near-field acoustic holography-based method for measuring the sensitivity of a particle velocity sensor [J]. Acta Acustica United with Acustica, 2015, 101: 855-858.



第一作者简介:景文倩,女,1987年9月生,博士、讲师。主要研究方向为噪声源识别和汽车 NVH 测试等。曾发表《A nearfield acoustic holography-based method for measuring the sensitivity of a particle velocity sensor》(《Acta Acustica United with Acustica》2015, Vol. 101)等论文。

E-mail: jwqtkhz@126.com

通信作者简介:吴华伟,男,1979年9月生,博士、副教授。主要研究方向为机电系统测试及健康状态管理。

E-mail: whw\_xy@163.com



