

提高近场声全息重建精度方法*

杜向华, 朱海潮, 毛荣富

(海军工程大学振动与噪声研究所 武汉, 430033)

摘要 在近场声全息中利用扫描法进行全息面测量时,全息面上的测点信号与参考信号会不可避免地受到一些噪声的影响,降低重建精度,影响重建的实现。在噪声与声源信号以及噪声相互之间非相关的假设下,首先引入两种传递函数估计方法求解全息面复声压,然后再进行近场声全息重建。仿真和实验结果表明,该方法可以有效抑制非相关噪声对全息面复声压计算的影响。近场声全息重建结果表明,该方法减少了测量噪声带来的误差,提高了扫描法近场声全息的重建精度。

关键词 近场声全息; 传递函数估计; 重建精度; 非相关噪声

中图分类号 TB532

引言

近场声全息(near-field acoustic holography, 简称 NAH)是一种噪声源分析工具,广泛应用于声源或振动体辐射场的测量与分析、噪声源定位及结构强度评价等方面^[1-8]。其测量方法分为两种^[9]: a. 快照法,无需参考信号,数据采集速度快,对平稳和非平稳的声场都适用,但需要传声器数目较多,测量系统成本高,在实际中不易推广; b. 扫描法,通过采用单个或多个传声器阵列依次对全息面上各个测量点进行测量。利用扫描法进行 NAH 测量时,全息面上的测点信号与参考信号会不可避免受到噪声的影响,导致测量数据产生误差,这些误差将在 NAH 逆向重建中被放大,对 NAH 重建精度产生严重影响^[1]。由于产生机理不同,一般认为噪声与声源信号之间以及噪声相互之间是非相关的。在此前提下,笔者通过建立 NAH 测量系统的数学模型,研究如何减小非相关噪声的影响,提高重建精度的方法。

1 基本原理

1.1 扫描法 NAH 的原理

扫描法 NAH 的原理如图 1 所示,全息面上的信号由参考信号乘以它们之间的传递函数计算得到,即

$$p_i(f) = H_i(f)r(f) \quad (1)$$

其中: $p_i(f)$ 为全息面上各测点的信号; $r(f)$ 为参考

信号; $H_i(f)$ 为 $p_i(f)$ 与 $r(f)$ 之间的传递函数; $i=1, 2, \dots, K$; K 为全息面测量点数。

由式(1)计算得到全息面复声压后,就可以进行各个声学量的 NAH 重建。参考信号与全息面信号之间的传递函数的传统计算方法为

$$H_i(f) = C_{rp_i}(f)/C_{rr}(f) \quad (2)$$

其中: $C_{rp_i}(f) = E[r^*(f)p_i(f)]$, 为 $p_i(f)$ 与 $r(f)$ 之间的互谱; $C_{rr}(f) = E[r^*(f)r(f)]$, 为 $r(f)$ 的自谱; $E[\cdot]$ 为数学期望。

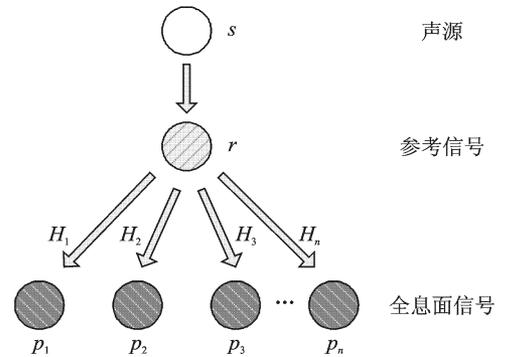


图1 扫描法示意图

1.2 新的传递函数估计方法

在 NAH 测量过程中不可避免地存在一些噪声的影响,此时测量得到的全息面信号和参考信号的模型如图 2 所示。

$$r'(f) = r(f) + m(f) \quad (3)$$

$$p_i'(f) = p_i(f) + n_i(f) = H_i(f)r(f) + n_i(f) \quad (4)$$

* 收稿日期:2011-04-25;修改稿收到日期:2011-05-25

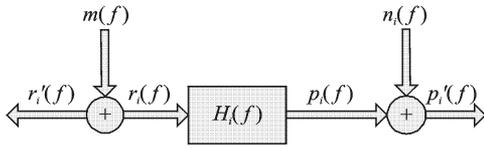


图2 存在噪声干扰时的模型图

其中： $r(f)$ 和 $p_i(f)$ 分别为研究的声源在参考传感器和全息面上第 i 个测量点产生的真实信号； $m(f)$ 和 $n_i(f)$ 分别为参考传感器和第 i 个测量点上的噪声干扰，它们与声源信号以及噪声相互之间是非相关的； $r'(f)$ 和 $p_i'(f)$ 分别为参考传感器和第 i 个测量点上实际测量得到的信号； $H_i(f)$ 为参考传感器与第 i 个测量点之间的传递函数。

当没有噪声 $m(f)$ 和 $n_i(f)$ 存在时，传统方法给出的传递函数是真实的传递函数 $H_i(f)$ 。当 $m(f)$ 和 $n_i(f)$ 存在时，式(2)给的计算方法将是真实传递函数的有偏估计。将式(3)和式(4)代入式(2)，得到测量噪声存在时的实际传递函数估计表达式 $\hat{H}_i(f)$ 为

$$\hat{H}_i(f) = \frac{C_{r'p_i'}(f)}{C_{r'r'}(f)} = \frac{E[(r'(f))^* p_i'(f)]}{E[(r'(f))^* r'(f)]} = \frac{E[r^*(f) p_i(f)]}{E[r^*(f) r(f) + m^*(f) m(f)]} = \frac{C_{rp_i}(f)}{C_{rr}(f) + C_{mm}(f)} = \frac{H_i(f)}{1 + C_{mm}(f)/C_{rr}(f)} \quad (5)$$

式(5)利用了噪声与声源信号以及噪声之间互不相关的性质。可以看出，参考传感器中的噪声信号影响到传递函数的估计，使得传递函数估计为欠估计，这个传递函数估计式又称为 H_1 估计^[10]。

由信号处理知识可知，传递函数估计 $H_i(f)$ 可以由另外一个公式求得，即 H_2 估计

$$H_i(f) = C_{p_i p_i}(f) / C_{p_i r}(f) \quad (6)$$

同样，将式(3)和式(4)代入式(6)，得到传递函数 $H_i(f)$ 的另一个估计式 $\hat{H}_i'(f)$

$$\hat{H}_i'(f) = (C_{p_i p_i}(f) + C_{n_i n_i}(f)) / C_{p_i r}(f) = H_i(f) [1 + C_{n_i n_i}(f) / C_{p_i p_i}(f)] \quad (7)$$

显然， H_2 估计会受到全息面测点上噪声的影响，且为真实传递函数 $H_i(f)$ 的过估计。

由于 H_1 估计为欠估计， H_2 估计为过估计，因此笔者在扫描法NAH中引入两种传递函数估计方法，即 H_3 估计和 H_4 估计，它们分别为前两个估计的算术平均值和几何平均值，如式(8)和(9)所示。从 H_3 估计和 H_4 估计的定义式可以知道，它们是真实传递函数欠估计与过估计的平均值，更趋近于真实

的传递函数，因而可以更有效抑制非相关噪声对全息面复声压计算的影响，减少测量噪声带来的误差，提高扫描法NAH的重建精度。

$$H_3 = \frac{1}{2} (H_1 + H_2) =$$

$$H_i(f) \left[\left(1 + \frac{C_{mm}(f)}{C_{rr}(f)} \right)^{-1} + \left(1 + \frac{C_{n_i n_i}(f)}{C_{p_i p_i}(f)} \right) \right] \quad (8)$$

$$H_4 = \sqrt{H_1 \cdot H_2} =$$

$$H_i(f) \sqrt{\left(1 + \frac{C_{n_i n_i}(f)}{C_{p_i p_i}(f)} \right) / \left(1 + \frac{C_{mm}(f)}{C_{rr}(f)} \right)} \quad (9)$$

2 数值仿真

在利用传递函数进行扫描法NAH重建之前，先验证传递函数对不相关噪声的抑制作用。

设源信号 $s(t) = \cos(400\pi t)$ ，两个测量信号分别为 $x_1(t) = s(t) + n_1(t)$ 和 $x_2(t) = s(t) + n_2(t)$ ，其中： $n_1(t)$ ， $n_2(t)$ 是标准差为 σ 的随机噪声，它们与 $s(t)$ 及它们相互之间都不相关。分别利用 H_1 ， H_2 ， H_3 和 H_4 估计计算 $x_1(t)$ 与 $x_2(t)$ 之间的传递函数，为了准确反应结果的统计特性，各进行500次计算。按式(10)计算传递函数与真实值之间的误差 A_k 与噪声标准差 σ 的关系如表1所示。

$$A_k = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \| H_k - 1 \| \times 100\% \quad (10)$$

其中： N 为计算次数； $k=1, 2, 3, 4$ 。

表1 各传递函数的估计误差

	%			
σ	H_1	H_2	H_3	H_4
1	0.13	0.13	0.03	0.03
2	0.53	0.51	0.14	0.14
4	2.02	2.03	0.52	0.52
8	7.76	8.24	1.93	1.94

由表1可知，随着信噪比的减小， H_1 和 H_2 估计的误差迅速增大， H_3 和 H_4 估计的误差明显小于前者，这样可以更好地抑制不相关噪声的影响，这与理论分析一致。利用传递函数获取SONAH全息面复声压并进行SONAH重建。设有一镶嵌在无限大障板上的活塞声源，尺寸为 $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ ，活塞表面振速均匀分布，其振速信号为 $v(t) = \cos(200\pi t)$ 。以活塞中心为坐标原点，其法向与 z 轴方向一致建立坐标系，全息面位于 $z_h = 0.05 \text{ m}$ ，重建面位于 $z_r = 0.02 \text{ m}$ 处，全息面大小为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ，均匀设置 11×11 个测量点。全息面上的理论声压是通过将活塞进行离散后，按分布点源模型计算在相应位置上的声

压,最后对各离散点进行积分的方法得到。为了模拟测量时的噪声,在每个全息面测点信号和参考信号中均加入互不相关、标准差为 σ 的随机噪声。由于在仿真分析中NAH结果会不可避免地受到其他误差影响,如离散误差和有限孔径影响等^[11],为了研究互不相关的测量噪声的影响而屏蔽其他误差的影响,重建面上的声压基准值为基于全息面上理论声压重建的结果。图3为 $\sigma=12$ 时各传递函数方法在重建面 $y=0$ 直线上的重建结果。由图3可见, H_1 估计得到的结果小于实际值, H_2 估计得到的结果大于实际值, H_3 和 H_4 估计的重建结果更接近于实际值。可见, H_3 和 H_4 估计可以更好地抑制非相关噪声的影响,提高NAH的重建精度。

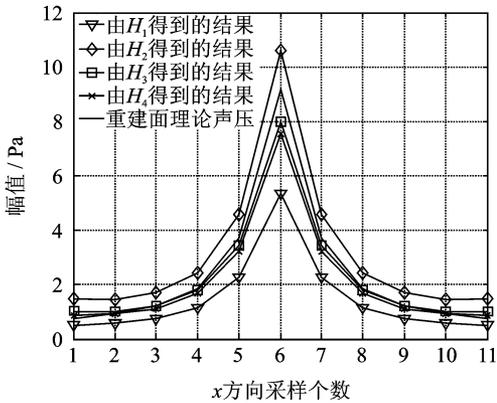


图3 重建面声压幅值比较($y=0, \sigma=12$)

为了进一步量化地给出各个方法的重建精度,定义重建误差指标为

$$\text{Error} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I |P_s - P_{jz}|^2}{\sum_{i=1}^I |P_{jz}|^2}} \times 100\% \quad (11)$$

其中: P_s 为由包含测量噪声的全息面声压得到的重建结果; P_{jz} 为由理论全息面声压得到的重建结果; I 为参与计算的测量点数。

在不同 σ 值条件下各传递函数方法的重建精度如表2所示。可见,随着信噪比的降低, H_1 和 H_2 估计的重建误差随之增大,这会对后续的噪声源分析产生严重干扰, H_3 和 H_4 估计能有效提高重建精度,特别是 H_4 估计在小信噪比的情况下,对噪声的抑制作用更加明显。

表2 各传递函数方法的重建误差 %

σ	H_1	H_2	H_3	H_4
4	9.46	2.99	3.70	3.84
8	25.67	16.63	6.29	7.39
12	40.52	37.07	11.75	9.74
16	50.94	55.36	27.76	12.32

3 实验验证

为了验证本研究方法可以有效抑制噪声对重建精度的影响,利用多个音箱进行实验研究。实验是在空间较大的普通厂房中完成的,实验设计示意图如图4所示,整个实验系统由音箱声源、信号发生器和信号采集装置等部分组成。其中:高斯白噪声由信号发生器(NI PXI-4461)产生;单频信号由电脑产生;信号采集装置由参考传声器(声望MPA416)、扫描传声器线阵和信号采集器(NI PXI-4498)以及平面声学扫描装置组成;音箱1为待分析声源;音箱2干扰声源;布置两个参考传声器,在待分析的音箱1附近布置一个参考传声器1,另外在适当位置布置一个参考传声器2(可以同时采集到两个音箱的声音)。

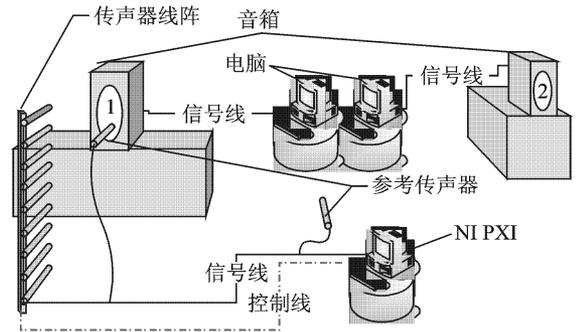
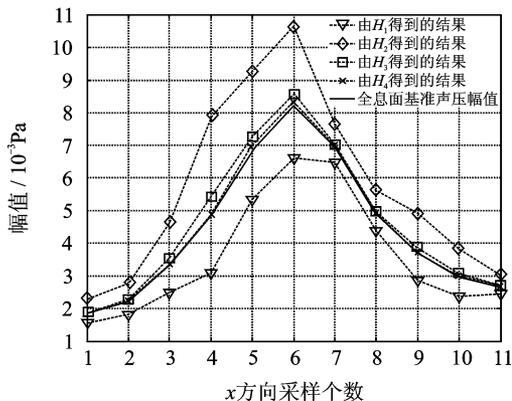
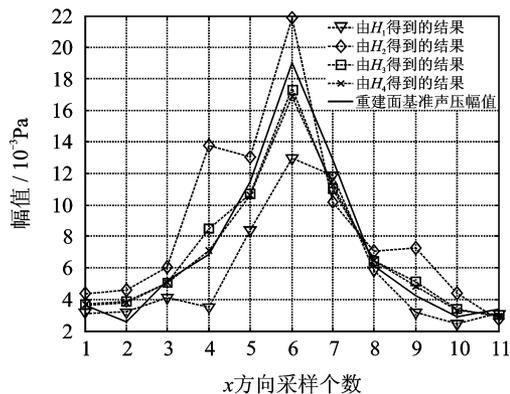


图4 音箱实验示意图

通过电脑产生一路单频(500 Hz)正弦信号输入音箱1,通过信号发生器产生一路白噪声信号输入音箱2。在距离音箱0.09 m处进行测量,形成 11×11 扫描网格,孔径为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$,即空间采样间隔为0.05 m,采样频率为2 048 Hz,采样时间为5 s。以参考传声器1采集到的信号作为参考信号进行全息面复声压的求取,并以此为基准全息面进行SONAH重建,以该重建值作为重建声压的比较基准。基于参考传声器2,利用4种传递函数求全息面复声压,在直线 $y=0$ 上求得的全息面声压幅值结果比较如图5所示,然后进行SONAH重建,重建面距离音箱为0.04 m,在直线 $y=0$ 求得重建面声压幅值结果比较如图6所示。从图5,6可以看出,不论是全息面还是重建面,由 H_3 和 H_4 得到的结果更加接近基准值。利用式(11)得到声压幅值的重建误差分别为26.68%, 46.64%, 19.43%和16.94%。可见,基于 H_3, H_4 估计可以提高SONAH重建精度,且 H_4 估计计算得到的结果优于 H_3 估计计算得到的结果。

图5 全息面声压幅值比较($y=0$)图6 重建面声压幅值比较($y=0$)

4 结束语

通过建立 NAH 测量系统的数学模型,在扫描法 NAH 中引入两种传递函数估计方法,即 H_3 估计和 H_4 估计,可以有效抑制非相关噪声对全息面复声压计算的影响,减少测量噪声带来的误差,提高扫描法 NAH 的重建精度。活塞声源的数值仿真和音箱实验研究的结果表明,笔者提出的两种传递函数估计法可以抑制非相关噪声的影响。该研究内容可以降低 NAH 对测量条件的要求,对 NAH 在工程应用中推广具有积极意义。

参 考 文 献

[1] Maynard J D, Williams E G, Lee Y. Nearfield acoustic holography: I. theory of generalized holography and the development of NAH [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1985, 78(4): 1395-1413.

[2] Veronesi W A, Maynard J D. Nearfield acoustic holography (NAH): II. holographic reconstruction algorithms and computer implementation [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1987, 81(5): 1307-1322.

[3] 张德俊,朱念秋,程建政,等. 振动体及其辐射场的近场声全息实验研究[J]. 声学学报,1995,20(4):250-255.

Zhang Dejun, Zhu Nianqiu, Cheng Jianzheng, et al. Experimental research on vibrating objects and its radiation field using near-field acoustic holography [J]. Acta Acustica, 1995,20(4):250-255. (in Chinese)

[4] 何元安,何祚镛,商德江,等. 基于平面声全息的全空间场变换:II 水下大面积平面发射声基阵的近场声全息实验[J]. 声学学报,2003,28(1):45-51.

He Yuanan, He Zuoyong, Shang Dejiang, et al. Full spatial transformation of sound field based on planar acoustic holography:II. experiment of NAH for submerged large area planar transmitting array [J]. Acta Acustica, 2003,28(1):45-51. (in Chinese)

[5] Williams E G, Henry D H, Washburn K B. Generalized nearfield acoustical holography for cylindrical geometry: theory and experiment [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1987, 81(2): 389-407.

[6] Mann J A, Pascal J C. Locating noise sources on an industrial air compressor using broadband acoustical holography from intensity measurements (BAHIM) [J]. Noise Control Engineering Journal, 1992, 39(1): 3-12.

[7] Kim B, Ih J. On the reconstruction of the vibro-acoustic field over the surface enclosing an interior space using the boundary element method [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1996, 100(5):3003-3016.

[8] Williams E G, Houston B H, Herdic P C, et al. Interior near-field acoustical holography in flight [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2000, 108(4): 1451-1463.

[9] 蒋伟康,万泉. 近场声全息理论与应用的研究现状与展望[J]. 机械强度,2005,27(3):288-295.

Jiang Weikang, Wan Quan. Review and outlook of researches on near field acoustical holography theories with application [J]. Journal of Mechanical Strength, 2005,27(3):288-295. (in Chinese)

[10] 李德葆,陆秋海. 工程振动试验分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004:266-271.

[11] Nam K U, Kim Y H. Errors due to sensor and position mismatch in planar acoustic holography [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1999, 116(4): 1655-1665.



第一作者简介:杜向华,男,1980年12月生,博士研究生。主要研究方向为振动与噪声控制。曾发表《主机对中姿态参数的近似算法》(《振动与冲击》2007年第26卷第5期)等论文。
E-mail: xhdu1981@yahoo.com.cn