单全息面的直接声场分离方法*

毛 锦^{1,2} 徐中明^{1,2} 黎 术^{1,2} 贺岩松^{1,2} 张志飞^{1,2} (1 重庆大学 机械传动国家重点实验室 重庆 400030)

重八八子 机佩尼切吕豕重瓜头超主 重八 4000

(2 重庆大学 汽车工程学院 重庆 400030)

2015年6月30日收到

2015 年 11 月 3 日定稿

摘要为了简化分离全息面两侧相干声源的过程,提出仅依据单全息面上的数据直接进行声场分离的方法。该方法通过将等效源配置在球面上,并根据等效源法近场声全息的重构原理,建立全息面上有误差的测量值和计算值之间的数据关系,理论推导出单面声场分离方法。仿真分析干扰声源为脉动球源和受迫振动的简支薄钢板的分离结果,并对双扬声器的声场分离进行了实验验证。结果表明:该方法对两种干扰源都具有较好的分离精度,且有较高的可容忍误差。 PACS 数:43.60

Direct sound field separation method on holography surface

MAO Jin^{1,2} XU Zhongming^{1,2} LI Shu^{1,2} HE Yansong^{1,2} ZHANG Zhifei^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University Chongqing 400030)

(2 College of Automotive Engineering, Chongqing University Chongqing 400030)

Received Jun. 30, 2015

Revised Nov. 3, 2015

Abstract In order to simplify the process which is to separate the coherent sources existed in different directions of holography surface, the method of direction sound field separation only depending the data on holography surface is proposed. Assume that the reconstruction surface is holography surface, according to the equivalent sources located at the spherical surface, there exists a relationship based on equivalent source method between the measured sound pressure and calculated value. Then, the coherent sources will be separated. Numerical simulation analyzed the separation result when the interference sources are pulsating ball source and simply supported steel sheet with forced oscillation, respectively. The separation method is validated in experiment with two loudspeakers. The results show that this method has high accuracy to the two kinds of interference sources and has high tolerate deviation.

引言

在近场声全息 (Near-field Acoustical Holography, NAH) 中, 声场分离技术由于可以去除全息面背向声 源的干扰, 解决了常规 NAH 要求测量面必须位于声 源一侧的要求, 从而得到快速发展^[1-2]。

近年来的研究中,基于二维傅里叶变换^[3-5]、统 计最优^[6-7]、边界元法^[8]和等效源法^[9-11]的声场 分离方法,主要集中在双面声压声场分离、双面质点 振速声场分离和单面声压-质点振速声场分离^[12]。

* 国家自然科学基金项目 (51275540) 资助

其中,双面声场分离是根据在双全息面上测得的声 压或质点振速之间的传递关系进行分离;单面声压-质点振速声场分离是在单全息面上分别测得声压和 质点振速,根据两者之间的物理关系进行分离。此 外,Jia等^[13-14]提出了先使用等效源法对单全息面 上的数据进行计算得到一个重构面,再根据计算而 得的重构面和单全息面上的数据采用统计最优方法 进行声场分离的方法;宋玉来等^[15]提出用信号空间 重采样的方法将单层传声器阵列的信号分为两组, 用基于球面谐波叠加原理实现声波分离。上述分离 方法中,无论单全息面还是双全息面,都是将方程建 立在两组数据上,运用声压或质点振速在声场中的 相互传递关系,得出分离结果。

为了简化计算步骤,以分离声压为例,在等效源 法近场声全息的基础上提出了单全息面的直接声场 分离技术。该方法主要依据目标声源和干扰声源分 别在全息面上有误差的测量值和计算值之间的数学 关系,将干扰声源剔除。同时,需要将等效源配置在 球面上,以保证不同声源的等效源点到全息面测点 间的传递函数不同,从而进行有效分离。

1 基本理论

1.1 等效源法近场声全息

等效源法近场声全息的基本思想是用布置在振动体内部的一系列简单源(等效源)叠加所辐射的声 场来代替振动体本身的辐射声场。其中,各等效源的 源强通过全息面上的复声压和等效源点与全息面测 点之间的传递矩阵计算而得。

假设全息面 H 上有 M 个测量点,等效源面上 S 有 N 个等效源点,则全息面 H 上的声压可表示为^[16]:

$$\boldsymbol{P}_H = \boldsymbol{G}_H \boldsymbol{Q},\tag{1}$$

其中, P_H 是全息面上的复声压列向量; $Q = [q_1, q_2, \cdots, q_N]^T$ 是等效源强列向量; G_H 是等效源面到全息面间的传递矩阵。

对式 (1) 进行矩阵逆运算, 可得到等效源强:

$$\boldsymbol{Q} = \boldsymbol{G}_{H}^{+} \boldsymbol{P}_{H}, \qquad (2)$$

其中, 上标 "+" 表示矩阵的广义逆。当 *M* ≥ *N* 时, 式 (3) 可由最小二乘法求得最优解^[17-18], 为:

$$\boldsymbol{Q} = \left(\boldsymbol{G}_{H}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{G}_{H} + \lambda^{2}\boldsymbol{I}\right)^{-1}\boldsymbol{G}_{H}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{P}_{H}, \qquad (3)$$

其中,上标"H"为矩阵的共轭转置; λ为正则化参数,实际计算中可选取不同的方法确定。当 *M* < *N* 时,式 (2)可由最小二范数求得最优解,为:

$$\boldsymbol{Q} = \boldsymbol{G}_{H}^{\mathrm{H}} \left(\boldsymbol{G}_{H} \boldsymbol{G}_{H}^{\mathrm{H}} + \lambda^{2} \boldsymbol{I} \right)^{-1} \boldsymbol{P}_{H}.$$
(4)

通过求得的等效源强列向量可计算出任意重构 面上的复声压:

$$\boldsymbol{P}_R = \boldsymbol{G}_R \boldsymbol{Q}. \tag{5}$$

1.2 单全息面声压分离

当测量面的另一侧存在干扰声源时,为了消除 干扰源对目标声源的影响,使用单测量面对其进行 声场分离。使用单全息面声压分离,为了使相干声源 分别与测量面之间的传递函数不同,以保证有效分 离,故需要将等效源配置在球面上。

$$P = P_{1t} + \varepsilon_1 + P_{2t} + \varepsilon_2, \tag{6}$$

式中, P_{1t} 和 P_{2t} 分别为 S_1 和 S_2 在测量面上的理 论辐射声压, ε_1 为目标声源 S_1 相关的误差, ε_2 为 干扰声源 S_2 相关的误差。



图 1 声场位置图

在等效源法近场声全息中,声源在全息面上辐射的理论值可由其包含有误差的数值进行声场重 构得到,所以目标声源和干扰声源分别存在如下关 系式:

$$P_{1t} = G_{H1}G_{H1}^{+} (P_{1t} + \varepsilon_1), \qquad (7)$$

$$P_{2t} = G_{H2}G^{+}_{H2}(P_{2t} + \varepsilon_2).$$
(8)

在式 (7) 和式 (8) 中, 矩阵的广义逆按照式 (3) 或式 (4) 求解, 正则化参数按照统计最优近场声全息 中的方法选取^[19], 即:

$$\lambda^2 = \left(1 + \frac{1}{2(kd)^2}\right) \times 10^{-\text{SNR}/10},$$
 (9)

其中, *k* 为波数, *d* 为测量面与声源面之间的距离, SNR 为信噪比。

由于 ε_1 和 ε_2 相对于信号都比较小,而且在计 算理论值的过程中有加入正则化方法以减少噪声的 影响,所以式 (7)中的 $G_{H1}G_{H1}^+(P_{1t} + \varepsilon_1)$ 可近似由 $G_{H1}G_{H1}^+(P_{1t} + \varepsilon_1 + \varepsilon_2)$ 代替,即:

$$P_{1t} \approx G_{H1}G_{H1}^+ \left(P_{1t} + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \right). \tag{10}$$

同样的,式(8)中的 $G_{H2}G_{H2}^+(P_{2t}+\varepsilon_2)$ 可由 $G_{H2}G_{H2}^+(P_{2t}+\varepsilon_1+\varepsilon_2)$ 近似代替,即:

$$P_{2t} \approx G_{H2}G_{H2}^+ \left(P_{2t} + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \right). \tag{11}$$

根据式 (6), 有:

$$P_{1t} + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = P - P_{2t}.$$
 (12)

将式 (12) 中的 P_{2t} 用式 (11) 近似代替, 可得:

 $P_{1t} + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \approx P - G_{H2}G_{H2}^+ \left(P_{2t} + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \right).$ (13)

式 (13) 右边第 2 项中的 $(P_{2t}+\varepsilon_1+\varepsilon_2)$ 根据式 (6) 等于 $P - P_{1t}$, 所以式 (3) 可变为:

$$P_{1t} + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \approx P - G_{H2}G^+_{H2}\left(P - P_{1t}\right).$$
(14)

将式 (10) 中 *P*_{1t} 的近似求解公式代入式 (14), 则有:

$$P_{1t} + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \approx P - G_{H2}G_{H2}^+P +$$

$$G_{H2}G_{H2}^+G_{H1}G_{H1}^+ (P_{1t} + \varepsilon_1 + \varepsilon_2).$$
(15)

设式 (15) 中的 $P_{1t} + \varepsilon_1 + \varepsilon_2$ 为 P_1 , 可将其表示 如下:

$$P_1 \approx \frac{P - G_{H2}G_{H2}^+P}{I - G_{H2}G_{H2}^+G_{H1}G_{H1}^+},$$
 (16)

式中,右边的分母项在最后的计算中也是求广义逆, 所以式 (16) 可表达为:

$$P_{1} = \left(I - G_{H2}G_{H2}^{+}G_{H1}G_{H1}^{+}\right)^{+} \left(P - G_{H2}G_{H2}^{+}P\right).$$
(17)

式 (17) 为声场分离后的公式。在式 (17) 中, 仅需 知道全息面的测量值 P, 即可求出目标声源 S₁ 在全 息面上包含有误差的值 P₁。但由于在计算过程中, 相应地加入了正则化, 所以求出的 P₁ 值也进行了适 当优化。得到了目标声源分离后的声压, 便可进行声 场重构。

2 数值仿真

2.1 仿真 1

为了验证基于等效源法的单面声场分离方法的 有效性,对其进行数值仿真分析。按照图 1 的布置方 式,将两个脉动球源分别放在测量面两侧,为目标声 源 $S_1(-0.15,0,0)$ m 和干扰声源 $S_2(0.15,0,0.2)$ m。 两个脉动球源的半径同为 0.01 m,表面振速同为 0.25 m/s。测量面位于 $z_H = 0.08$ m 处,大小为 0.4 m * 0.4 m,在 x, y 方向上的网格间距均为 0.08 m, 即共有 6 * 6 个测点。112 个等效源布置在经纬度等 网格划分的球面上,位于声源内部,与声源共中心。 仿真中加入 30 dB 信噪比的高斯白噪声。另外,定义 分离误差^[20] 为:

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^{M} \left(\left| p_i^t - p_i \right| \right)^2} / \sqrt{\sum_{i=1}^{M} \left(\left| p_i^t \right| \right)^2} \times 100\%, \ (18)$$

式中, M 为测量点数, $p_i^t \approx p_i$ 分别为目标声源在 第 i 个测点的理论声压和分离声压。

图 2 给出了声源频率均为 1000 Hz 时,按照上述仿真条件下的全息面声压幅值。图 2(a) 是相干声 源声压幅值图,图 2(b) 和图 2(c) 是目标声源的理论



声压和分离声压,图 2(d) 是图 2(b) 和图 2(c) 在 xOz 平面的剖面图。根据计算结果,相干声源的分离误差 仅为 2.20%。从图中可看出目标声源在全息面上的 分离值和理论值误差很小,表明单全息面直接声场分 离方法可以得到较好的分离结果。等效源法近场声全 息技术的核心在于等效源的配置,下面将讨论在等效 源配置与理想位置有偏差时,对分离结果的影响。

在实际测量中,声源在声源面上的横向定位相 对准确,而声源的深度定位由于需要两次测量会存 在一定的误差,故等效源近场声全息算法不一定能 完全把等效源球面的中心配置在声源中心。因此,当 等效源球面中心的放置位置与声源中心存在一定的 距离时,根据式(18),计算单面声场分离的分离误差 *E*。表1为声源频率为1000 Hz,信噪比为30 dB 情 况下的计算结果。

表 1 中, δ_1 和 δ_2 分别表示, 在远离测量面方向, 目标声源 S_1 和干扰声源 S_2 的等效源球面中心配置 位置与 S_1 和 S_2 中心之间的距离, 表中所示距离为 随机选取。从表 1 可看出, 当 δ_1 固定不动时, 随着 δ_2 的增加,分离误差会相应增大;同样,当 δ_2 固定 不动时,随着 δ_1 的增加,分离误差也会相应增大。当 δ_1 和 δ_2 都在最远的分析距离 0.15 m 时,具有分析 范围最大的误差 12.99%,在可接受的误差范围内。而 对于实际定位,如果中心偏差 0.15 m,则属于较大的 定位误差,故可将该方法用于实际实验中。

为了更具体的分析等效源位置有偏移时对分离 精度的影响,对频率在 200~2000 Hz 范围内按照上 述偏差方式分别选取 0.01 m, 0.05 m, 0.1 m, 0.15 m 的偏差距离进行仿真分析。

从图 3 可以看出,在同一频率下,分离误差随 着等效源偏移增加而增大。声源频率在 500 Hz 以下 时,由于衰减比较慢,干扰声源对目标声源的影响相 对较大,故在上述分离条件下,等效源位置偏移时, 分离误差明显增大;适当增加相干声源在 x 轴方向 的距离即可使分离误差受等效源偏移的影响显著减 小。声源频率在 500~1200 Hz 范围内时,等效源偏 离 0.1 m 之内时,分离误差都保持在 10% 以内;即使 在等效源最远偏离 0.15 m时,分离误差都保持在 15%

表 1 等效源位置改变时的分离误差(%)

δ_2 (m) δ_1 (m)	0	0.01	0.02	0.05	0.08	0.1	0.12	0.15
0	2.42	2.52	2.36	3.48	3.98	5.25	6.09	8.23
0.01	1.88	2.33	2.3	3.27	4.44	4.16	6.26	8.06
0.02	2.39	2.57	2.72	2.56	4	4.78	5.22	7.55
0.05	2.8	3.14	2.63	3.35	3.67	4.3	6.33	8.09
0.08	3.23	3.25	4.22	4.24	4.83	5.14	7.1	8.41
0.1	4.7	4.44	4.76	5.11	6.02	6.35	7.64	9.16
0.12	6.26	6.39	5.9	6.72	7.12	7.7	8.47	10.18
0.15	7.95	8.06	8.52	8.72	9.12	9.98	11.09	12.99





以下;说明在这个频段内,单全息面声场分离方法具 有较高的可容忍偏差。声源频率在 1200 Hz 以上, 等效源偏离 0.05 m 以下时,分离误差基本在 5% 以 下,具有较高的分离精度;等效源偏离 0.05 m~0.1 m 时,分离误差在 5%~15% 之间,具有一定的分离精 度;等效源偏离 0.1 m 以上时,分离误差较大。

2.2 仿真 2

为了进一步验证单全息面分离方法的有效性, 将仿真 1 中的干扰声源替换为单点激励的受迫振动 简支薄钢板,目标声源和全息面的位置大小均不变, 如图 4 所示。在计算时,薄钢板平行于全息面,激 振频率为 1000 Hz,中心坐标为 (0.025,0,0.15) m, 尺寸为 0.2 m*0.15 m, 泊松比为 0.3,弹性模量为 2.06*10¹¹ Pa,板厚 0.001 m,钢板密度为 7850 kg/m³, 激励点坐标 (0.175,0,0.15) m,激励力为 85 N。钢 板在全息面上的声压由有限元计算而得,用于表达 钢板辐射声场的球波函数几何中心经有限元计算为 (0.025,0,0.255) m。

图 5显示相干声压测量值、目标声源理论值以 及分离值在全息面上的声压幅值和相位。图 5(a)中 目标声源各点处声压幅值的分离值与理论值大小近 似,远小于相干声源的测量值,分离误差为 5.04%; 图 5(b)中目标声源的相位波动较大,其分离值在第 28 个测点处与理论值有差别,但是仔细观察后发现 两者的相位差接近 2π,所以目标声源在整个测点上 的相位的分离值和理论值基本一致。

3 实验验证

为了进一步验证单面声场分离的有效性,将该 方法用于实际实验并对其进行验证。实验在空旷的 房间进行,本底噪声为 20 dB。采用两个相同的扬 声器作为声源,摆设位置和仿真中的单面测量布置 一致。而测量阵列则采用 Brüel&Kjær4957 的 18 通 道轮型阵列,直径为 45 cm。图 6 为 18 个传感器在 轮型阵列上的位置图。

测量过程中的声源频率为 1000 Hz, 采样频率为 16.384 kHz, 采样时间为 2 s。由传感器测量得到的时 域声压信号经过傅里叶变换得到声压幅值和相位, 从而可以表示除传感器上测得的复声压。实验过程 分两次测量, 第 1 次是在两个声源同时发声时测量,



图 5 全息面上的声压结果比较

可得到相干声源的测量值,第2次在仅打开目标声 源时测量,可得到目标声源的测量值。将第1次测量 数据的目标声源分离值与第2次的目标声源测量值 进行对比,用以验证单全息面声场分离在实际测量 中的正确性。



图 6 传感器在轮型阵列上的分布图

由于在不同时刻测量,所以声压的相位会发生 变化。为了更直观地比较相位,两次实验数据均以 第1个传感器的相位为基准,将所有传感器的相位 与第1个传感器的相位做差值之后进行比较,故相 位的起始值均为0rad。

图 7 所示为相干声源测量的、目标声源测量的 和分离后的声压和相位。其中图 7(a) 为三者的声压 幅值对比,图 7(b) 为三者的声压相位对比。从图中 可以看出,相干声源的声压幅值和相位均与单个声 压的幅值和相位有较大区别。而目标声源的分离值 和测量值除了在第 9 个和第 11 个测点处有相对较大 的误差,其它位置的两个值都比较接近。由于测量值 本身存在噪声干扰,出现计算值和测量值有些许误 差也符合实际情况。相对来讲,目标声源相位的分离 值和测量值比较一致,没有较大的波动。目标声源幅 值和相位的一致性,说明单全息面声场分离的正确 性。根据式 (18) 计算分离值和测量值的误差,得到 幅值的误差为 8.62%,进一步说明了单面声场分离的 正确性。

根据分离后的复声压数据,利用式(4)和式(5) 进行声场重构,可以得到重构面上的声压分布图和声 源位置。重构面的网格间距在 *x*, *y* 方向均为 0.05 m, 数据点个数为 13 * 13, 重构距离为 0.05 m。

图 8 所示为重构面的声压幅值三维图和等高线 图。从三维图可以看出有很好的重构效果,而且从等 高线图中可知声源被准确地定位在 (-0.15,0) m 处。



5 结论

通过将等效源配置在球面上,提出基于等效源法 的单面声场分离方法。根据全息面上包含有误差的实 际测量值和计算值的数据关系,对单面声场方法进行 了理论推导。并对该方法进行数值仿真分析:当相干 声源均为脉动球源时,重构误差几乎可以忽略,且 在等效源位置与理想配置位置存在 0.1 m 以内偏差 时,频率在 500~1200 Hz 范围内可保持 10% 以内的 分离误差,具有较高的可容忍偏差;当目标声源为脉 动球源,干扰声源为单点激励的受迫振动简支薄钢 板时,分离误差虽然较高于相干声源均为脉动球源 时的结果,但仍然有较高的重构精度。进一步用 18 通道轮型阵列进行实际实验,结果表明单全息面直 接声场分离方法不仅可有效分离相干声源,还可大 幅减少阵列的测量点数,并可保持较高的重建精度。

参考文献

- Maynard J D, Williams E G, Lee Y. Nearfield acoustic holography: I. Theory of generalized holography and the development of NAH. J. Acoust. Soc. Am., 1985; 78(4): 1395—1413
- 2 于飞,陈剑,陈心昭.双全息面分离声场技术及其在声全息中的 应用.声学学报,2003;28(5):385—389
- 3 于飞,陈剑,李卫兵,陈心昭. 声场分离技术及其在近场声全息 中的应用. 物理学报, 2005; 54(2): 789—197
- 4 毕传兴,张永斌,徐亮,陈心昭.基于双面质点振速测量的声场 分离技术.声学学报,2010;35(6):653—658
- Totaro N, Vigoureux D, Leclere Q, Lagneaux J, Guyader J L. Sound fields separation and reconstruction of irregularly shaped sources. *Journal of sound and vibration*, 2015;
 336: 62-81
- 6 Jacobsen F, Jaud V. Statistically optimized near field acoustic holography using an array of pressure-velocity probes. J. Acoust. Soc. Am., 2007; **121**(3): 1550—1558
- 7 Zhang Y B, Chen X Z, Jacobsen F. A sound field separation

technique based on measurements with pressure-velocity probes. J. Acoust. Soc. Am., 2009; **125**(6): 3518-3521

- 8 Christophe L, Manuel M, Alexandre G. Boundary element method for the acoustic characterization of a machine in bounded noisy environment. J. Acoust. Soc. Am., 2007; 121(5): 2750—2757
- 9 Bi C X, Chen X Z, Chen J. Sound field separation technique based on equivalent source method and its application in nearfield acoustic holography. J. Acoust. Soc. Am., 2008; 123(3): 1472—1478
- Efren F G, Finn J. Sound field separation with a double layer velocity transducer array. J. Acoust. Soc. Am., 130(1): 5-8
- Efren F G, Finn J, Quentin L. Sound field separation with sound pressure and particle velocity measurements. J. Acoust. Soc. Am., 2012; 132(6): 3818–3825
- 12 于飞,陈心昭,陈剑.单全息面分离声场技术及其在声全息中的应用.机械工程学报,2004;40(2):112—116
- 13 Jia W Q, Chen J, Yang C, Wang Z Y. Study of a sound field separation technique based on a single holographic surface and wave superposition method. Proc. IMechE, 2009; 223: 1827—1837
- 14 王冉, 陈进, 贾文强, 赵发刚. 基于波叠加与统计最优近场声全息 的单面声场分离技术.振动与冲击, 2012; **31**(22): 112—117
- 15 宋玉来, 卢奂采, 金江明. 单层传声器阵列信号空间重采样的声 波分离方法. 物理学报, 2014; **63**(19): 194305-1-194305-10
- 16 Pinho M E V, Arruda J R F. On the use of the equivalent source method for nearfield acoustic holography. Symposium Series in Mechatronics, 2004; 1: 590—599
- 17 Boyd S, Vandenberghe L. Convex optimization. 7th, Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2004: 302
- 18 Hald J. Basic theory and properties of statistically optimized near-field acoustical holography. J. Acoust. Soc. Am., 2009; 125(4): 2105—2120
- 19 Hald J. Patch near-field acoustical holography using a new statistically optimal method. The 32nd International congress an Exposition on Noise Control Engineering, Seogwipo KOREA, 2003: 2203—2210
- 20 Sarkissian A. Method of superposition applied to patch near-field acoustic holography. J. Acoust. Soc. Am., 2005; 118(2): 671-678