

运动声源的声全息识别方法^{*}

杨殿阁 郑四发 罗禹贡 连小珉 蒋孝煜

(清华大学汽车工程系 汽车安全与节能国家重点实验室 北京 100084)

2001 年 1 月 5 日收到

2001 年 9 月 7 日定稿

摘要 利用声全息方法分析运动声源的噪声辐射。从声音的多普勒效应出发, 利用接收到的含有多普勒效应的声音信号构造出全息数据来完成全息重建。并根据该原理设计一套测量装置, 实验表明利用该装置能够快速、准确地识别运动车辆表面的噪声。

PACS 数: 43.60, 43.50

Acoustic holography method for the identification of moving sound source

YANG Diange ZHENG Sifa LUO Yugong LIAN Xiaomin JIANG Xiaoyu

(State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy Engineering Department, Automotive Engineering Department,
Tsinghua University Beijing Beijing 100084)

Received Jan. 5, 2001

Revised Sept. 7, 2001

Abstract This paper presents the acoustical holography method for the identification of moving sound source. The non-stationary signal received by linear vertical microphone array is changed into stationary signal considering the doppler effect, then used to holographic construction. Simulations and vehicle's experiments proved this method effective.

引言

运动型噪声如轮胎噪声、空气动力学噪声, 当运动存在时, 这种噪声就存在; 当运动停止时, 它就消失; 随运动速度的提高, 其大小将呈现量级剧变。由于这种噪声伴随运动存在, 给噪声的测试、分析都带来了很大的困难。使得以往各种传统测量方法在研究这种噪声时难以得到正确的结论。

在一个运动物体高速运动并伴随产生噪声时, 利用传统测量手段就很难确定噪声源的位置, 本文就是要利用一种新的声学研究手段——声全息方法来研究这种运动型的噪声, 在一个运动物体高速运动经过时能准确重建出运动物体表面的声场分布, 并识别出运动物体表面声源的位置, 从而给进一步改善运动物体的噪声特性提供依据。

1 声源假定

图 1 所示为一运动汽车, 以行驶中的汽车为分析对象, 假想一平面 S , 它紧贴汽车外表面, 并随汽车一起运动。运动的汽车上存在很多可能的发声部分, 如发动机、传动系、消声器、轮胎等, 但不知道哪个部位是真正的发声源, 哪个部位是主要的噪声源。但可以认为, 汽车行驶过程中噪声都是从假想面 S 上发出来的。

首先在 S 面上任取一点 Q , 并假定 Q 为一发声的单频点声源, 点源强度为 $q = q_0 e^{j\omega_0 t}$, 向外辐射球面波, 测量传声器接收到的信号是该点声源的声压信号, 对这些信号进行数学处理, 并可以根据声全息方法返回计算 Q 点的声场值。如此完成整个 S 面的分析, 就可以得到 S 面上的声场分布, 从而可以判断

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (59775020)

出 S 面上即汽车外表面哪个部位是主要的噪声辐射源。

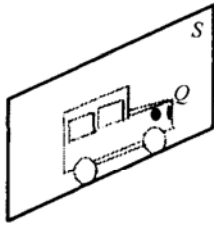


图 1 点声源假定示意图

2 测量面上的声场分布

2.1 测量过程

图2所示为一运动汽车噪声的测量过程示意图, 汽车以匀速 v 从位置①运动到位置③。运动距离为 L , 由 N 个传声器组成的阵列 (传声器的间距为 Δy) 竖立不动, 在汽车运动过程中连续采样 L/v s。

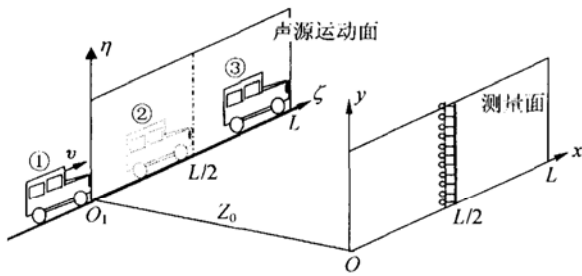


图 2 运动噪声识别测量过程示意图

$$R_i(t) = \frac{M[x(t) - \zeta] + \sqrt{[x(t) - \zeta]^2 + (1 - M^2)[(y_i - \eta)^2 + z_0^2]}}{1 - M^2}$$

$$\cos \theta_i = [x(t) - \zeta]/R_i(t)$$
(3)

$[x(t), y_i]$ 为第 i 个传感器在 t 时刻的位置坐标, $x_i(t) = L - vt$, $y_i = i\Delta y$ 。

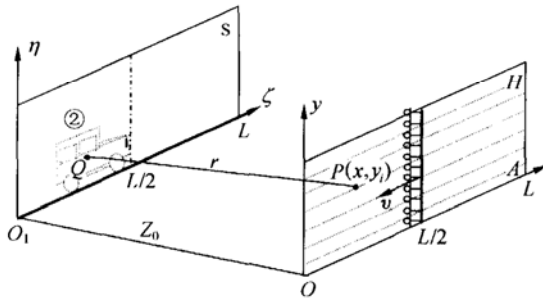


图 3 全息面构造示意图

由 N 个传声器得到的连续采样信号组成的平面 H 就可以称作测量面, 也可以称作全息面。

根据莫尔斯运动声源的理论^[2], 若声波是从 S 面上假定点声源 $Q(\zeta, \eta)$ 发出的, 则传声器阵列中第 i 个传感器测量到的声音信号 $p_i(t)$ 可以表示为:

$$p_i(t) = \frac{1}{4\pi R_i(t)} \frac{q'(t - R_i(t)/c)}{(1 - M \cos \theta_i)^2} + \frac{q}{4\pi R_i(t)^2} \frac{(\cos \theta_i - M)V}{(1 - M \cos \theta_i)^2}$$
(1)

式 (1) 中第一项为按传播距离衰减的声场辐射项, 第二项为近场效应。在满足远场测量条件或当声源移动速度较低, 马赫数低于 0.2 的时候, 与第一项相比, 第二项为小项, 可以忽略。这样接收到的声压可以表示为:

$$p_i(t) = \frac{1}{4\pi R_i(t)} \frac{q'(t - R_i(t)/c)}{(1 - M \cos \theta_i)^2}$$
(2)

式中: $R_i(t)$ 为声波从声源到接收传声器的实际传播距离, $\cos \theta_i$ 为声辐射方向与物体运动方向夹角的余弦, M 为马赫数 $M = v/c$, v 为声源移动的速度, c 为声速。

2.2 测量信号中的多普勒效应消除

利用运动的相对性, 以上测量过程可假定汽车带着行驶中的所有噪声在如图 3 所示位置②不动, 这时, 固结在车外表面的假想平面 S 也随车在位置②固定不动。而传声器则相对汽车以匀速 v 从 $x = L$ 反向运动到 $x = 0$ 处, 这时传声器阵列中第 i 个传声器所接收到的信号仍可用 (2) 式表示。(2) 式中的 $R_i(t)$ 及 $\cos \theta_i$ 此时可以表示为:

按前面点声源假定, 考虑 $p_i(t)$ 接收到的是由假定的点声源 $Q(\zeta, \eta)$ 发出的声波, 则 $p_i(t)$ 可以表示为:

$$p_i(t) = \frac{1}{4\pi R_i(t)} \frac{j\omega_0 q_0 e^{j[\omega_0 t - k_0 R_i(t)]}}{(1 - M \cos \theta_i)^2}$$
(4)

式中, k_0 为波数, $k_0 = \frac{\omega_0}{c} = \frac{2\pi f_0}{c}$ 。

在 $M \neq 0$, 即声源运动速度不为零的情况下, 测量信号 $p_i(t)$ 中就带有多普勒效应。如果假设传声器阵列与声源一起以速度 v 作匀速运动时, 声源与传声器阵列间没有相对运动, 此时传声器阵列的测量结果与静态测量结果一致, 所接收到的信号中不含有多普勒效应。在此状态下, 在 t 时刻第 i 个传声器的位置坐标为 $[x_0(t), y_{i0}]$ 。声波从声源 $Q(\zeta, \eta)$ 传播到接收传声器的实际传播路径 $R_i(t)$ 与声源 $Q(\zeta, \eta)$

与接收传声器之间的实际距离 $r_{i0}(t)$ 相等:

$$r_{i0}(t) = \sqrt{[x_{i0}(t) - \zeta]^2 + (y_{i0} - \eta)^2 + z_0^2}, \quad (5)$$

将 (5) 式代入 (4), 可得:

$$p_{i0}(t) = \frac{1}{4\pi} \frac{q'[t - r_{i0}(t)/c]}{r_{i0}(t)} = \frac{1}{4\pi} \frac{j\omega_0 q_0 e^{j[\omega_0 t - k_0 r_{i0}(t)]}}{r_{i0}(t)}, \quad (6)$$

$p_{i0}(t)$ 为传声器在与声源间没有相对运动情况下测得的声源 $Q(\zeta, \eta)$ 的信号, 不含有多普勒效应。

比较公式 (4) 和 (6) 可以看出: 若已知 $R_i(t)$, $r_{i0}(t)$, M , 则可以由 (4) 换算出式 (6), 对测量信号 $p_i(t)$ 进行幅值相位调整, 就可以得到不含多普勒及运动信息的信号 $p_{i0}(t)$:

$$p_{i0}(t) = p_i(t) R_i(t) (1 - M \cos \theta_i)^2 \frac{e^{-jk_0 r_{i0}(t)}}{r_{i0}(t)}, \quad (7)$$

2.3 复信号构造

在以上推导过程中, 为计算方便, 假定的点声源 $Q(\zeta, \eta)$ 为复声源, 传声器采样得到的信号也为复信号。但在实际测量过程中, 传声器采样无法得到复信号, 只能得到实数信号

$$\tilde{p}_i(t) = \frac{1}{4\pi} \frac{j\omega_0 q_0 \cos[\omega_0 t - k_0 R_i(t)]}{R_i(t) (1 - M \cos \theta_i)^2} \quad (8)$$

为能得到复信号 $p_i(t)$ 并利用式 (7) 来消除多普勒效应, 可以利用 $\tilde{p}_i(t)$ 来构造 $p_i(t)$ 。

$$H(x, y_i, \zeta, \eta, f_0) = \frac{e^{-jk_0 r_Q}}{r_Q} FT \left[p_i(t) R_i(t) (1 - M \cos \phi(t))^2 e^{jk_0 R_i(t)} \right] \Big|_{f=f_0}$$

令:

$$P_{iQ}(\zeta, \eta, f_0) = FT \left[p_i(t) R_i(t) (1 - M \cos \phi(t))^2 e^{jk_0 R_i(t)} \right] \Big|_{f=f_0}$$

则:

$$H(x, y_i, \zeta, \eta, f_0) = \frac{e^{-jk_0 r_Q}}{r_Q} P_{iQ}(\zeta, \eta, f_0). \quad (12)$$

对测量面上所有点进行类似处理就可以获得一个面函数 $H(x, y_i, \zeta, \eta, f_0)$ 。 $H(x, y_i, \zeta, \eta, f_0)$ 就称作 f_0 频率下的全息函数, 获得了全息函数的测量面就可以看作是全息面。

3 声场重建

在获得了全息函数后, 就可以利用全息函数来构造一个虚拟声源的声场, 并进一步利用声的衍射来完成声场的重建。

首先对 (8) 式进行频谱分析, 并取频谱中 $f > 0$ 的半边谱:

$$F'_T[\tilde{p}_i(t)] = F_T[\tilde{p}_i(t)]|_{f>0}. \quad (9)$$

对 $F'_T[\tilde{p}_i(t)]$ 进行傅里叶反变换, 便可以得到复信号 $p_i(t)$

$$p_i(t) = 2F_f^{-1}\{F'_T[\tilde{p}_i(t)]\} = \frac{1}{4\pi} \frac{j\omega_0 q_0 e^{j[\omega_0 t - k_0 R_i(t)]}}{R_i(t) (1 - M \cos \theta_i)^2}. \quad (10)$$

2.4 全息数据构造

在得到复信号 $p_i(t)$ 后, 利用 (7) 式, 针对重建面 S 上一点 $Q(\zeta, \eta)$, 就可以构造出测量面上第 i 行上一点 $P(x, y_i)$ 的不含多普勒效应的时域数据 $h(x, y_i, \zeta, \eta, t)$ 。

$P(x, y_i)$ 点与 $Q(\zeta, \eta)$ 点的距离为:

$$r_Q = \sqrt{(x - \zeta)^2 + (y_i - \eta)^2 + z_0^2}.$$

将 r_Q 代入 (7) 式, 得:

$$h(x, y_i, \zeta, \eta, t) = [p_i(t) R_i(t) (1 - M \cos \phi(t))^2 e^{jk_0 R_i(t)}] \frac{e^{-jk_0 r_Q}}{r_Q}. \quad (11)$$

对 (11) 式进行频谱分析就可以得到 P 点在 f_0 频率下的包含声压幅值及相位信息的数据 $H(x, y_i, \zeta, \eta, f_0)$:

3.1 虚拟声源

图 4 中, $\mathbf{n}$ 为全息面外法线的方向。 θ 为矢径 $\mathbf{r}$ 与全息面外法线方向 $\mathbf{n}$ 的夹角。 Σ 为在测量面位置的一无限大空间平面, 测量面 H 为 Σ 的一部分。 S 为假定的点声源 $Q(\zeta, \eta)$ 所在的平面, 称作声源面, 也可以称作重建面。

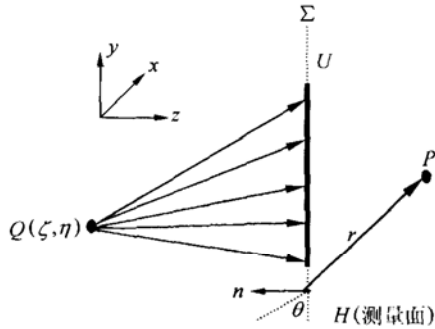
利用全息函数构造声场 U :

$$U = H(x, y_i, \zeta, \eta, f_0) e^{-jk_0 z}. \quad (13)$$

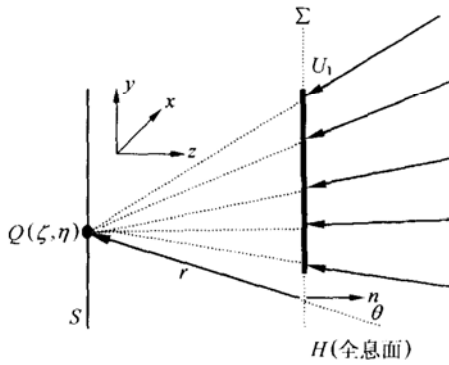
U 就可以看作如图 4(a) 所示, 所假定的点声源 $Q(\zeta, \eta)$ 所发出的球面波在 Σ 处的空间声场分布, $H(x, y_i, \zeta, \eta, f_0)$ 为 U 在 Σ 平面上的分量。 Σ 将空间分成两部分: 有声源的空间和无声源的空间。在已知

的情况下, 利用基尔霍夫衍射积分^[3]就可以计算出在波的传播方向上, 无源的空间中任意一点 P 的声场。

$$U(P) = \frac{1}{4\pi} \iint_H \left[\left(\frac{e^{jkr}}{r} \right) \frac{\partial U}{\partial n} - U \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{jkr}}{r} \right) \right] d\sigma. \quad (14)$$



(a)



(b)

图 4 假定的点声源的声场及虚拟声源的声场

如果将 Σ 处的空间声场分布 U 取共轭, 则其共轭 U_1 为:

$$U_1 = U^* = H^*(x, y_i, \zeta, \eta, f_0) e^{jk_0 z}. \quad (15)$$

U_1 如图 4(b) 所示, 可以看作是一虚拟声源 S_1 在 Σ 处的空间声场分布, S_1 所发出为声波汇聚于 $Q(\zeta, \eta)$, 与 $Q(\zeta, \eta)$ 点所发出的球面波互为共轭波。

根据共轭波的性质可以知道, 虚拟声源 S_1 在 $Q(\zeta, \eta)$ 点产生的波场强度与假定的点源 $Q(\zeta, \eta)$ 的强度大小相等。

3.2 声场重建

利用虚拟声源 S_1 及其在 Σ 处的空间声场分布 U_1 , 可以根据基尔霍夫衍射积分计算出假定的点源 $Q(\zeta, \eta)$ 点的声场值。

在计算过程中考虑到, 法线方向 n 与坐标轴及矢径 r 之间存在如下关系:

$$\frac{\partial}{\partial n} = \frac{\partial}{\partial z}, \quad \frac{\partial}{\partial n} = \frac{\partial}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial n} = \frac{\partial}{\partial r} \cos \theta$$

将 U_1 及以上关系代入基尔霍夫衍射积分公式 (14) 可得:

$$U(\zeta, \eta, f_0) = \frac{1}{2j\lambda} \iint_S \left\{ H^*(x, y, \zeta, \eta, f_0) \right. \quad (16)$$

$$\left. e^{jk_0 z} \left[1 + \left(1 - \frac{1}{jk_0 r} \right) \cos \theta \right] \right\} \left(\frac{e^{jk_0 r}}{r} \right) dx dy$$

为计算方便, 在全息面上积分时可以取 $z = 0$, 则 $e^{jk_0 z} = 1$, 所以 (16) 式又可化为:

$$U(\zeta, \eta, f_0) = \frac{1}{2j\lambda} \iint_S \left\{ H^*(x, y, \zeta, \eta, f_0) \right. \quad (17)$$

$$\left. \left[1 + \left(1 - \frac{1}{jk_0 r} \right) \cos \theta \right] \right\} \left(\frac{e^{jk_0 r}}{r} \right) dx dy$$

在实际实验中, 因为采样不可能在无穷大平面 Σ 上进行, 只能在有限大小的空间平面 H 上进行, 相当于采样进行了空间截断, 这会带来一定的实验误差, 在一定情况下, 需要对这种误差进行修正^[4]。同时考虑在 y 方向上, 因测量手段限制, U_1 在 y 方向上的分布不能连续。对 (17) 式积分离散化, 并修改积分区间, 可得:

$$U(\zeta, \eta, f_0) = \frac{1}{2j\lambda} \sum_{i=1}^N \Delta y \int_0^L H^*(x, y_i, \zeta, \eta, f_0) \frac{e^{jk_0 r_Q}}{r_Q} \left[1 + \left(1 + \frac{1}{jk_0 r_Q} \right) \cos \theta \right] dx = \quad (18)$$

$$\frac{\Delta y}{2j\lambda} \sum_{i=1}^N \int_0^L P_{iQ}(\zeta, \eta, f_0) \frac{e^{2jk_0 r_Q}}{r_Q^2} \left[1 + \left(1 + \frac{1}{jk_0 r_Q} \right) \cos \theta \right] dx$$

(18) 式就是运动声源的声全息重建公式, 重建的为 Q 点在 f_0 频率下的声场。利用 (18) 式对重建面上所有的点做与 Q 点相同操作就可以得到整个重建面上的声场分布。

在利用上式进行全息研究过程中, 还必须注意全息面上的测点分布与选取必须满足声全息对全息测点分布的要求, 即从目标声源面上任何一点到全息面上相邻两个测点之间的波程差小于 $\lambda/2$ 。

4 计算机模拟计算

图 5 所示为利用以上算法的计算机模拟双声源运动的测量重建结果。在 $t = 0$ 时刻, 声源 A 位于 (2.1 m, 2.2 m) 处, 声源 B 位于 (3.0 m, 3.2 m) 处。声源沿 x 轴方向以 0.1 马赫的速度运动, 声源 B 的幅值为 A 幅值大小的 1/2, 声源频率为 1000 Hz。模拟利用 21 个传声器采样, 传声器间隔 0.1 m, 采样频率为 10000 Hz, 在距离声源运动平面 1.5 m 处采样。

重建结果如图所示, 重建面大小为 4 m, 重建频率为 1000 Hz。所重建声源 A 的位置位于 (21, 22), 大小为 96.2 dB, 重建声源 B 位置位于 (30, 32), 大小为 90.7 dB。重建结果表明, 利用该算法能够准确识别运动声源的位置, 并能够比较准确地记录运动声源间的相对大小。

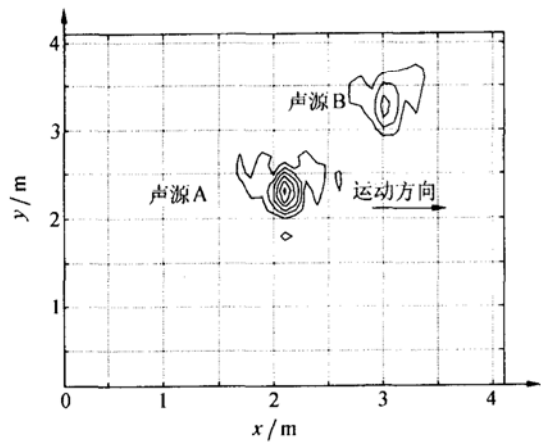


图 5 模拟双声源运动重建结果

5 实验系统描述

整个实验系统是由测量部分、信号预处理部分、高速采样、分析处理以及结果显示部分组成。测量部分是由直列式传声器阵列及激光测速定位设备组成, 将运动物体辐射出的声音信号及相关位置及运动信息转换成电信号, 电信号经过放大滤波后通过高速采样板进行 A/D 转换, 并输入到计算机中, 在计算机中进行保存, 并可以将数据调出进行整理和重建计算。重建的结果可以以图形方式显示出来。

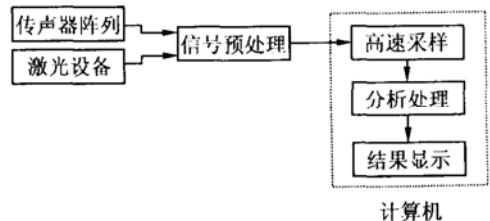


图 6 系统框架结构图

6 实验验证

为对整个理论模型以及实验平台进行检验, 首先在消声室内利用单频声进行验证实验。750 Hz 单频信号利用信号发生器产生, 通过固定在小车上的两个音箱发出声音, 音箱的固定位置如图 7 所示, 小车以 10 ~ 12 km/h 的速度运动。图 7 为一次实验的重建结果。

所重建的小车表面 750 Hz 的声场分布如图 7 所示, 从图中可以识别出有两个主要声源, 声源的位置与音箱的安装位置基本重合, 基本可以确定识别出的这两个主要的声源就是音箱。

在室内实验验证完成后, 在高速实验场进行了高速运动声源的识别实验, 实验中采用 16 路传声器阵列采样, 阵列高 2.25 m, 传声器间距 0.15 m。

实验车上安装两个音箱, 如图 8 所示, 通过信号发生器同时给两个音箱提供信号。发出 920 Hz 左右的单频声。汽车以 90 km 时速从传声器阵列前 2 m 经过。

图 9 所示为所测声源, 从图中可以清楚看出两个声源的位置, 这两个声源的位置与实际音箱所在汽车上位置完全吻合。结果表明算法能识别高速运动的声源。

7 结论

通过实验与分析表明本文介绍的声全息方法能够在声源快速运动过程中完成声源的定位和大小的测量, 是一种有效的识别运动声源的方法。

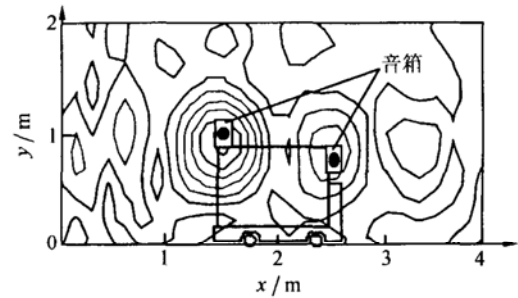


图 7 实际实验结果

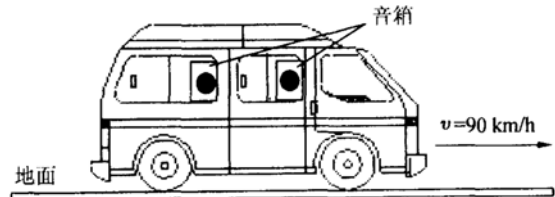


图 8 音箱在汽车上的位置

