

混响场中用相关传声器识别声源 直达声的近似工程法

张 强 胡章伟

(南京航空航天大学空气动力学系 南京 210016)

1994年3月10日收到, 修改稿1995年4月5日收到

摘要 本文研究了在混响场中用相关传声器识别主声源直达声的近似工程法, 包括理论及实验技术. 采用该方法对一个置于混响声污染下的恒定声源进行了直达声测量, 并将测量结果与该恒定声源的消声室测量结果进行了比较. 结果表明: 相关传声器近似工程法在很大程度上能减少混响声对主声源声压测量的干扰, 从而能在混响声场中获取一定精度的主声源声压级.

关键词 互相关函数, 声学测量, 主声源, 混响声

On a correlation-microphone method in the identification of a primary source

Zhang Qiang, Hu Zhangwei

(Aerodynamic department, Nanjing university of aeronautics and astronautics, Nanjing 210016)

Abstract In this paper, theoretical and experimental investigations are presented for a correlation-microphone measurement method which can be used to identify a primary source in a field polluted by reverberant noise. The method been experimentally tested and the result was compared with that obtained in an anechoic room. It is found that the correlation-microphone method can to some extent reject the reverberant noise affecting the primary source. Therefore the method can be used to measure the acoustic data of a primary source in a reverberant noise polluted field.

Key words Correlation function, Acoustic measurement, Primary source, Reverberant noise

1 引言

在风洞中进行声学实验, 首先遇到的问题是, 风洞中的混响声和气流引起的传声器的自噪声对气动声学试件噪声数据的干扰. 另外, 在外场对一噪声源的噪声级进行实际评价时, 其结果也常受到背景噪声的影响而出现误差. 鉴于这些背景噪声污染干扰主声源直达声识别的普遍性, 本文提出了一种能减少混响声或某些背景噪声影响的测量方法——相关传声器

近似工程法, 并对本方法用于识别一个混响声污染下主声源直达声的理论及其实验技术进行了实践验证.

2 降低混响声干扰的相关传声器法原理

采用本法时, 可将相关传声器的近(A)、远(B)两个传声器置于主声源的同一立体角方向, 并将它们分别距主声源的距离定为 r 和 $r+d$ (d 为相关传声器的间距), 参见图1. 若混响场中被测的主声源是一个具有指向性的

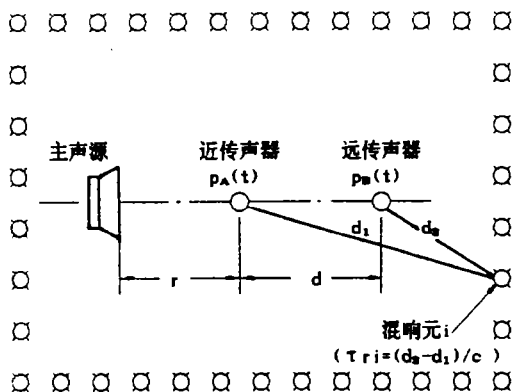


图1 相关传声器置于主声源被混响声污染的声场图

点源,此时可令该源的声波到达近传声器的声压幅值为 p_d , 而对于混响场中无数个来自传声器周围各个立体角方向的混响元声波, 则令它们到达近传声器的声压幅值分别为 $p_{r_1}, p_{r_2}, p_{r_3}, \dots$. 这样近 (A)、远 (B) 两个传声器所接收到的声压可分别描述为

$$p_A(t) = p_d(t) + \sum_i p_{r_i}(t - \Delta t_i) \quad (1)$$

$$p_B(t) = \frac{r}{r+d} p_d(t - \tau_d) + \sum_i \alpha_{r_i} p_{r_i}(t - \Delta t_i - \tau_{r_i})$$

式中 Δt_i 为第 i 立体角方向来的混响元声波在近传声器上引起的声压相对于点源声波在该处引起的声压之间的滞后时间, $r/(r+d)$ 和 τ_d 分别为点源声波从近传声器传播到远传声器时的发散衰减因子和滞后时间^[7]; α_{r_i} 和 τ_{r_i} 分别为第 i 立体角方向的混响元声波由于近、远两个传声器的间距而在远传声器上引起的相对发散衰减因子和滞后时间. 式中传声器周围各个立体角方向来的混响元声波声压幅值 p_{r_i} 和相位是各不相同的.

两个传声器上声压信号的互相关函数为

$$R_{AB}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T p_A(t) p_B(t + \tau) dt \quad (2)$$

因为点源以及组成混响声场的无数个混响元可看成是相互独立且不相关的, 因此上式可以写为

$$R_{AB}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{r}{r+d} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T p_d(t) p_d(t - \tau_d + \tau) dt + \lim_{T \rightarrow \infty} \sum_i \alpha_{r_i} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T p_{r_i}(t - \Delta t_i) \cdot p_{r_i}(t - \Delta t_i - \tau_{r_i} + \tau) dt \quad (3)$$

式中第一项为主声源 (点源) 引起的互相关函数, 其相关峰值产生在 $\tau = \tau_d$ 处, 显然 $\tau_d = \frac{d}{c}$ (d 为相关传声器的间距, c 为当地声速); 第二项为传声器周围各个立体角方向的混响元引起的互相关函数, 对于第 i 立体角方向的混响元引起的互相关函数, 其相关峰值将产生在 $\tau = \tau_{r_i}$ 处. 对于一个理想的混响 (扩散) 声场来说, 声能流在所有方向上是均匀的, 且声能密度是均匀的, 这样各个立体角方向的混响元所引起的互相关函数值将沿着 $\tau = \left(-\frac{d}{c} \sim \frac{d}{c}\right)$ 间均匀分布 (参见图 1), 而不是落在一个特定的 τ 值上, 因此, 它们此时不可能产生一个明显的相关峰值.

为了测量主声源的直达声, 有必要把注意力集中在主声源方向来的声压信号的相关峰值上, 即求取式 (3) 互相关函数在 $\tau = \tau_d = \frac{d}{c}$ 处的相关峰值

$$R_{AB}\left(\frac{d}{c}\right) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{r}{r+d} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T p_d^2(t) dt + \lim_{T \rightarrow \infty} \alpha_{r_j} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T p_{r_j}^2(t) dt = \frac{r}{r+d} \overline{p_d^2} + \alpha_{r_j} \overline{p_{r_j}^2} \quad (4)$$

式中 j 为沿主声源的立体角方向. 由式 (1) 可知: p_d^2 为主声源 (点源) 直达声在近传声器上引起的声压均方值; $\overline{p_{r_j}^2}$ 仅为沿主声源方向的混响元在近传声器上引起的声压均方值. 值得注意的是: 传声器所接收到的混响声 $\overline{p_r^2}$ 是由无数多个来自周围各个立体角方向的混响元

声波在其上所产生的声压均方值的叠加而成的，即 $\overline{p_r} = \sum_i \overline{p_{ri}} (i=1, 2, 3, \dots j \dots)$ ，从而可以看出，即使当混响声 $\overline{p_r}$ 略大于主声源的直达声 $\overline{p_d}$ 时，一般也会有 $\overline{p_d} \gg \overline{p_{ri}}$ 。另外，因为相关传声器的间距远小于混响声场的空间尺寸，所以来自主声源方向的混响声波在两个传声器的相对发散衰减因子 α_{ri} 不会很大。这样式 (4) 便可简化为

$$R_{AB} \left(\frac{d}{c} \right) \approx \frac{r}{r+d} \overline{p_d} \tag{5}$$

由此可见，在混响声场中，可以通过测量两个传声器声压信号的互相关函数在主声源方向的相关峰值 $R_{AB} \left(\frac{d}{c} \right)$ ，来达到减少混响声干扰以获取一定精度的主声源直达声的目的。

通常，信号分析仪只给出互相关函数 $R_{AB}(\tau)$ 所对应的相关系数 $\rho_{AB}(\tau)$ 。对于均值为零的声压信号，其相关系数可表示为^[2]

$$\rho_{AB}(\tau) = \frac{R_{AB}(\tau)}{\sqrt{R_{AA}(0) \cdot R_{BB}(0)}} \tag{6}$$

对于式中近、远传声器自相关函数值 $R_{AA}(0)$ 、 $R_{BB}(0)$ 来说，它们就是各自所在处声场的声压均方值，即

$$R_{AA}(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \hat{p}_A^2(t) dt = \overline{p_A^2}$$

$$R_{BB}(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \hat{p}_B^2(t) dt = \overline{p_B^2}$$

$$\tag{7}$$

由式 (5)、(6)、(7) 可导出距主声源 r 和 $r+d$ 距离处该主声源直达声的声压级分别为

$$SPL_{dA} = 10 \log \left[\frac{r+d}{r} 10^{(SPL_A + SPL_B)/20} \rho_{AB} \left(\frac{d}{c} \right) \right]$$

$$\tag{8}$$

$$SPL_{dB} = 10 \log \left[\frac{r}{r+d} 10^{(SPL_A + SPL_B)/20} \rho_{AB} \left(\frac{d}{c} \right) \right]$$

式中 SPL_A 、 SPL_B 为近、远传声器所在处的声场的声压级 ($SPL_A = 10 \log (\overline{p_A^2} / \overline{p_{ref}^2})$ ， $SPL_B =$

$10 \log (\overline{p_B^2} / \overline{p_{ref}^2})$ ， p_{ref} 取 $20 \mu Pa$)。

3 用相关传声器测量主声源直达声的实验验证

实验采用了一个恒定声功率的源作为主声源，且将它放在具有混响声污染的混响室内，并借助于式 (8) 和图 2 所示的相关传声器系统测量混响声污染下该主声源直达声的声压级。测量前应作如下考虑：(1) 对主声源的近、远场特性加以分析，对于不同声源（如点源、线源、面源），其自由场发散衰减因子应取不同的参数^[1]；(2) 对背景噪声情况作应有的分析，调查一下在相关传声器的正前方（即主声源方向）是否存在一个声功率较大的次声源，若是如此，应调整相关传声器位置，使相关传声器的正前方所出现的一系列声源中满足主声源的声功率远大于次声源的声功率；(3) 适当调整相关传声器的间距 d 和它距主声源的距离 r ，使对应于主声源方向的相关系数 $\rho_{AB} \left(\frac{d}{c} \right)$ 具

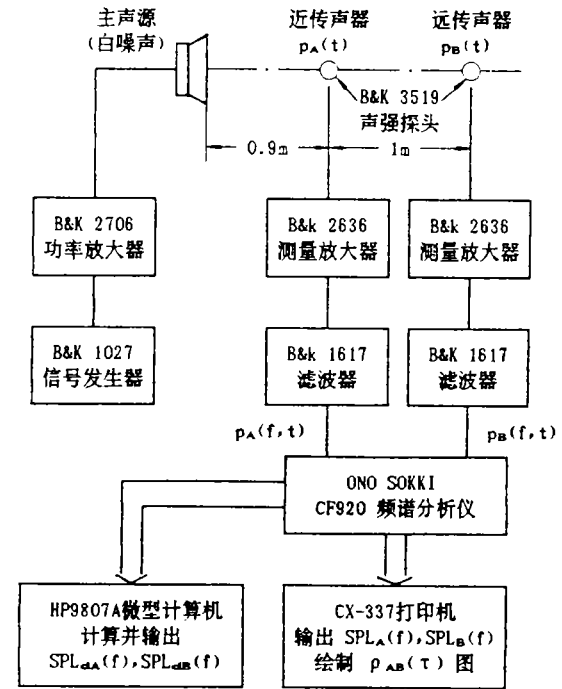


图 2 相关传声器主声源声压级谱测量系统

有明显的相关峰值.

在实验过程中, 先后将主声源置于消声室和具有较强混响声污染的混响室内, 分别采用单传声器及相关传声器系统 (给定相关传声器的间距 $d=1\text{m}$, 它与主声源的距离 $r=0.9\text{m}$), 测量出近、远传声器所在处声场的声压级倍频程谱数据单传声器时称 $SPL_A(f)$ 、 $SPL_B(f)$, 相关传声器时称 $SPL_{dA}(f)$ 、 $SPL_{dB}(f)$, 以及相关系数函数的峰值 $\rho_{AB}\left(\frac{d}{c}\right)$. 主声源直达声的

表 1 主声源直达声声压级倍频程谱的消声室测量结果

中心频率 $f(\text{Hz})$	单传声器测量结果		相关传声器法测量结果		
	$SPL_A(f)$ (dB)	$SPL_B(f)$ (dB)	$\rho_{AB}\left(\frac{d}{c}\right)$	$SPL_{dA}(f)$ (dB)	$SPL_{dB}(f)$ (dB)
200	79.9	73.7	0.8959	79.5	73.1
400	86.7	80.5	0.9953	86.8	80.3
800	84.9	78.4	0.9985	84.9	78.4
1.6K	86.5	79.7	0.9537	86.2	79.7
3.15K	91.6	85.9	0.9191	91.6	85.1

表 2 混响声污染下主声源直达声声压级倍频程谱的测量结果

中心频率 $f(\text{Hz})$	单传声器测量结果		相关传声器法测量结果		
	$SPL_A(f)$ (dB)	$SPL_B(f)$ (dB)	$\rho_{AB}\left(\frac{d}{c}\right)$	$SPL_{dA}(f)$ (dB)	$SPL_{dB}(f)$ (dB)
200	87.9	88.3	无峰值		
400	90.5	89.1	0.2843	87.6	81.1
800	89.7	88.1	0.2415	86.0	79.5
1.6K	89.6	87.1	0.4008	87.6	81.1
3.15K	93.4	89.5	0.4799	91.5	85.0

中心频率 $f(\text{Hz})$	近传声器处所 避开的混响声	远传声器处所 避开的混响声
	$SPL_A(f) - SPL_{dA}(f)$	$SPL_B(f) - SPL_{dB}(f)$
200		
400	2.9	8.0
800	3.7	8.6
1.6K	2.0	6.0
3.15K	1.9	4.5

消声室测量结果参见表 1 所示, 混响声污染下的主声源直达声的混响室测量结果参见表 2 所示.

测量结果表明: 采用相关传声器法在具有混响声污染的声场中 (混响室) 获取的主声源直达声的声压级倍频程谱数据 (表 2 中 $SPL_{dA}(f)$ 、 $SPL_{dB}(f)$ 数据) 与在近似于自由场 (消声室) 中获取的主声源直达声的声压级倍频程谱数据 (表 1 中 $SPL_A(f)$ 、 $SPL_B(f)$ 数据) 是很接近的, 其误差 $\leq 1.4\text{dB}$, 这可以满足工程应用的要求. 而采用单传声器法测得的声场声压级倍频程谱数据 (表 2 中 $SPL_A(f)$ 、 $SPL_B(f)$ 数据) 远大于采用相关传声器法所获取的 (表 2 中 $SPL_{dA}(f)$ 、 $SPL_{dB}(f)$ 数据); 表 2 中 $SPL_A(f) - SPL_{dA}(f)$ 和 $SPL_B(f) - SPL_{dB}(f)$ 反映了采用相关传声器法所减少混响声干扰的效果. 由表 2 看出, 采用相关传声器法在近、远两传声器处减少混响声干扰的效果在 800Hz 可高达 3.7dB 和 8.6dB .

4 结论和展望

通过本文的研究与实践得出以下结论和展望:

- (1) 采用相关传声器法在很大程度上可以减少混响声对主声源直达声谱数据的干扰, 从而能达到在较强混响声场中获取一定精度的主声源直达声的声压级倍频程谱数据的目的;
- (2) 要在风洞中获取气动声学试件的噪声数据, 我们估计, 相关传声器测量系统较传声器阵定向测量系统^[1]容易实现, 因此相关传声器法对风洞声学实验可能具有实用价值.

参 考 文 献

[1] 马大猷主编. 噪声控制学, 科学出版社, 1987. 41—45
[2] 贝达特 J S, 皮尔索 A G. 相关分析和谱分析的工程应用, 国防工业出版社, 1983.5: 45—47
[3] Paul T. Soderman, Stephen C. Noble. *Journal of Aircraft*, 1975, 12(3): 168—173