

虚拟声屏障代价函数的比较

邹海山, 邱小军

(南京大学声学研究所近代声学重点实验室, 南京 210093)

摘要: 研究虚拟声屏障(Virtual Sound Barrier, VSB)系统在采用不同代价函数时的性能表现。在三维声场分别以声势能密度和、声动能密度和、声能量密度和为代价函数进行数值模拟。结果表明, 以声势能密度和为代价函数, 降噪效果好, 但声压降低量不均匀; 以声动能密度和为代价函数, 声压降低量最为均匀, 但降噪效果不好; 以声能量密度和为代价函数, 降噪效果最好, 声压降低量均匀程度在上述两者之间, 是一个比较好的折衷。此外, 将声动能密度和与声势能密度和按权重相加构成代价函数 $J_e(w)$, 针对不同的控制目标, 可调整声动能密度和与声势能密度和的权重, 得到适合控制目标的最优选择。

关键词: 虚拟声屏障; 代价函数; 声能量密度

中图法分类号: O42

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2008)-06-0789-07

A comparison of cost functions for the virtual sound barrier system

ZOU Hai-shan, QIU Xiao-jun

(Key Laboratory of Modern Acoustics, Institute of Acoustics, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: A theoretical comparison of three cost functions is made for Virtual Sound Barrier (VSB) system. Cost functions to be minimized include the sum of acoustic potential energy density, the sum of acoustic kinetic energy density and the sum of the total acoustic energy density at the error sensors. Numerical simulations in three-dimensional sound fields show that minimizing the sum of acoustic potential energy density achieves good control performance but the noise reduction distribution is not uniform in the quiet zone, that minimizing the sum of acoustic kinetic energy density makes noise reduction distribution uniform but the control performance is poor, and that minimizing the sum of total energy density is the best strategy since the control performance is the best and the degree of the uniformity of the noise reduction distribution is between the other two. A new cost function is formed by adding up the sum of acoustic potential energy density and the sum of acoustic kinetic energy density with different weight coefficients. According to different control objective, the best strategy can be attained by adjusting the weight coefficients.

Key words: virtual sound barrier, cost function, acoustic energy density

1 引言

虚拟声屏障 (Virtual Sound Barrier, VSB) 采用立体结构的声源阵列和传感器阵列, 在传感器阵列围成的封闭空间内部产生静区^[1-3]。它可阻挡来自

不同方向的噪声, 并通过使用多通道扩大了静区, 即扩大了人头的活动范围。作者从频域出发, 建立 VSB 系统的数值模型, 从数值模拟和实验两方面论证了该系统的可行性, 并讨论了系统物理配置对系统性能的影响^[2,3]。使用一种实用的圆柱状分布的 16 通道的 VSB 系统在普通房间进行实验, 当传感器阵列所在柱面半径为 0.2m、高 0.2m 时, 产生有效静区的频率上限约为 550Hz。

Ise 和 Friot 分别进行过类似的研究。Ise 等将 BSC 原理 (Boundary Surface Control principle) 用于声场控制^[4], 在二维平面上布置一圈误差传感

收稿日期: 2007-12-18; 修回日期: 2008-03-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10674068), 新世纪优秀人才支持计划资助。

作者简介: 邹海山 (1975-), 男, 广东揭阳人, 博士研究生, 研究方向为有源噪声控制。

通讯作者: 邹海山, E-mail: hszou@nju.edu.cn

器,通过控制外圈的控制声源阵列的输出,使误差传感器处的声压和质点速度为 0,达到控制误差传感器圈内的声场的目的。他们的研究只限于理论分析和数值模拟。Friot 等将 BPC 方法(Boundary Pressure Control)用于声场控制^[5],30 个误差传感器分布于半径为 0.3m 的球壳上,将 30 个控制声源分布于半径为 0.6m 的球壳上,实验在消声室进行。结果表明,在低频,不管是单频信号还是宽频信号,传感器包围空间都能够全局降噪。

以上研究既有通过控制边界声压,也有通过控制边界声压和质点速度达到控制声场的目的,控制不同的物理量反映在选取不同的代价函数。在有源控制系统中,选取不同的代价函数会有不同的控制效果。

Qiu 等研究自由场中单极子和偶极子声辐射的有源控制^[6],采用一个或多个近场误差传感器,比较了声势能密度、声动能密度、声能量密度、平均声强共四种代价函数的控制结果,指出没有一种代价函数在所有情况下都是最优的。当误差传感器非常靠近控制声源时,以误差传感器的平均法向声强为代价函数是最优选择。Berry 等研究板辐射的有源控制^[7],采用多个近场误差传感器,指出当误差传感器非常靠近初级声源时,以法向声强为代价函数优于以声势能密度为代价函数,其它大多数情况下二者没有明显差别。Han 等的研究使用误差传感器的平均声强绝对值为有源声屏障系统的代价函数^[8],指出较使用声势能密度为代价函数而言,可获得更多的插入损失。

本文首先通过数值模拟,研究虚拟声屏障使用误差传感器的声势能密度和、声动能密度和、声能量密度和三种不同的代价函数时,系统降噪效果的异同,并分析此时声压降低量分布的变化。此外,通过赋予声势能密度和、声动能密度和不同权重构造不同的代价函数,比较采用这些代价函数时,系统性能的异同,寻找最优的代价函数。

2 数值模型

假设噪声是单频简谐波,初级源噪声是确定信号,从频域出发进行数值计算,不考虑系统的因果性。

2.1 初级声场

初级声场可认为是许多来自不同方向、随机相位的平面波的叠加,在点 $\mathbf{r}$ 处的初级声压、质点速度分别表示为:

$$p_p(\mathbf{r}) = \frac{1}{\sqrt{N_p}} \sum_{i=1}^{N_p} P_{pi}(\mathbf{r}) = \frac{1}{\sqrt{N_p}} \sum_{i=1}^{N_p} P_{Ai} e^{-jk(\phi_i + \mathbf{n}_i \cdot \mathbf{r})} \quad (1)$$

$$\mathbf{v}_p(\mathbf{r}) = \frac{1}{\sqrt{N_p}} \sum_{i=1}^{N_p} \mathbf{V}_{pi}(\mathbf{r}) = \frac{1}{\sqrt{N_p}} \sum_{i=1}^{N_p} \frac{1}{\rho_0 c_0} P_{pi}(\mathbf{r}) \mathbf{n}_i \quad (2)$$

其中 $k = \omega/c_0$ 为波数, c_0 为空气中的声速, $\omega = 2\pi f_0$ 为角频率, f_0 为声信号频率, ρ_0 为空气密度。每个平面波由 3 个参数描述:声压幅度 P_{Ai} 、入射方向 $\mathbf{n}_i$ 和相位 ϕ_i , P_{Ai} 在 $[0, 1]$ 区间取随机值, $\mathbf{n}_i$ 是随机单位矢量, ϕ_i 在 $[-\pi, \pi]$ 区间取随机值。当 N_p 足够大时(本文取 $N_p = 100$),上述初级声场可近似为一个扩散声场^[9],公式(1)描述的仅仅是扩散声场的无限种可能中的一个样本,本文取 20 个样本来模拟初级声场,每个样本用公式(1)来计算。

2.2 控制声场

控制声源在中低频可看作单极子,此外为简化模型,只考虑控制声源的直达声。因此,点 $\mathbf{r}$ 处由 N_c 个控制源产生的声压、质点速度分别表示为:

$$p_c(\mathbf{r}) = Z_c(\mathbf{r}) \mathbf{q}_c = \sum_{m=1}^{N_c} Z_m(\mathbf{r}) q_m = \sum_{m=1}^{N_c} \frac{j\omega\rho_0 q_m}{4\pi |\mathbf{r} - \mathbf{r}_m^c|} e^{-jk|\mathbf{r} - \mathbf{r}_m^c|} \quad (3)$$

$$\mathbf{v}_c(\mathbf{r}) = Y_c(\mathbf{r}) \mathbf{q}_c = \sum_{m=1}^{N_c} Y_m(\mathbf{r}) q_m = \sum_{m=1}^{N_c} \frac{Z_m(\mathbf{r})}{\rho_0 c_0} \left(1 - \frac{j\lambda}{2\pi |\mathbf{r} - \mathbf{r}_m^c|}\right) \frac{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_m^c)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_m^c|} q_m \quad (4)$$

其中 $\mathbf{q}_c = [q_1, q_2, \dots, q_{N_c}]^T$ 为控制源的体积速度, $Z_c(\mathbf{r}) = [Z_1(\mathbf{r}), Z_2(\mathbf{r}), \dots, Z_{N_c}(\mathbf{r})]$ 为控制源在点 $\mathbf{r}$ 产生的声压和控制源体积速度间的传递函数, $Y_c(\mathbf{r}) = [Y_1(\mathbf{r}), Y_2(\mathbf{r}), \dots, Y_{N_c}(\mathbf{r})]$ 为控制源在点 $\mathbf{r}$ 产生的质点速度和控制源体积速度间的传递函数。点 $\mathbf{r}$ 处的总声压和总质点速度即为:

$$p_t(\mathbf{r}) = p_p(\mathbf{r}) + p_c(\mathbf{r}) \quad (5)$$

$$\mathbf{v}_t(\mathbf{r}) = \mathbf{v}_p(\mathbf{r}) + \mathbf{v}_c(\mathbf{r}) \quad (6)$$

2.3 代价函数

设 VSB 系统有 N_e 个误差传感器,初级源噪声为已知信号。本文选取下列三种代价函数进行比较:

$$J_p = E_p + \beta \mathbf{q}_c^H \mathbf{q}_c = \frac{1}{2\rho_0 c_0^2} \sum_{n=1}^{N_e} |p_t(\mathbf{r}_n^e)|^2 + \beta \mathbf{q}_c^H \mathbf{q}_c \quad (7)$$

$$J_k = E_k + \beta \mathbf{q}_c^H \mathbf{q}_c = \frac{1}{2} \rho_0 \sum_{n=1}^{N_e} |\mathbf{v}_t(\mathbf{r}_n^e)|^2 + \beta \mathbf{q}_c^H \mathbf{q}_c \quad (8)$$

$$J_e = E_p + E_k + \beta \mathbf{q}_c^H \mathbf{q}_c \quad (9)$$

其中, E_p 为误差传感器处的声势能密度和, E_k 为声动能密度和, $(E_p + E_k)$ 即为声能量密度和。 $\mathbf{r}_n^e$ 为第 n

个传感器的位置。参数 β 的分析见后。

代价函数写成矩阵形式

$$J = \mathbf{q}_c^H (\mathbf{A} + \beta \mathbf{I}) \mathbf{q}_c + \mathbf{q}_c^H \mathbf{b} + \mathbf{b}^H \mathbf{q}_c + c \quad (10)$$

其中, J 取 J_p 时,

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \frac{1}{2\rho_0 c_0^2} \mathbf{Z}_{ce}^H \mathbf{Z}_{ce} \\ \mathbf{b} &= \frac{1}{2\rho_0 c_0^2} \mathbf{Z}_{ce}^H \mathbf{p}_{pe} \\ \mathbf{c} &= \frac{1}{2\rho_0 c_0^2} \mathbf{p}_{pe}^H \mathbf{p}_{pe} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\mathbf{p}_{pe} = [p_p(\mathbf{r}_1^e), p_p(\mathbf{r}_2^e), \dots, p_p(\mathbf{r}_N^e)]^T \quad (12)$$

$$\mathbf{Z}_{ce} = [\mathbf{Z}_c(\mathbf{r}_1^e)^T, \mathbf{Z}_c(\mathbf{r}_2^e)^T, \dots, \mathbf{Z}_c(\mathbf{r}_N^e)^T]^T \quad (13)$$

J 取 J_k 时,

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \frac{1}{2} \rho_0 \mathbf{Y}_{ce}^H \mathbf{Y}_{ce} \\ \mathbf{b} &= \frac{1}{2} \rho_0 \mathbf{Y}_{ce}^H \mathbf{v}_{pe} \\ \mathbf{c} &= \frac{1}{2} \rho_0 \mathbf{v}_{pe}^H \mathbf{v}_{pe} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\mathbf{v}_{pe} = [v_p(\mathbf{r}_1^e), v_p(\mathbf{r}_2^e), \dots, v_p(\mathbf{r}_N^e)]^T \quad (15)$$

$$\mathbf{Y}_{ce} = [\mathbf{Y}_c(\mathbf{r}_1^e)^T, \mathbf{Y}_c(\mathbf{r}_2^e)^T, \dots, \mathbf{Y}_c(\mathbf{r}_N^e)^T]^T \quad (16)$$

J 取 J_e 时,

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \frac{1}{2\rho_0 c_0^2} \mathbf{Z}_{ce}^H \mathbf{Z}_{ce} + \frac{1}{2} \rho_0 \mathbf{Y}_{ce}^H \mathbf{Y}_{ce} \\ \mathbf{b} &= \frac{1}{2\rho_0 c_0^2} \mathbf{Z}_{ce}^H \mathbf{p}_{pe} + \frac{1}{2} \rho_0 \mathbf{Y}_{ce}^H \mathbf{v}_{pe} \\ \mathbf{c} &= \frac{1}{2\rho_0 c_0^2} \mathbf{p}_{pe}^H \mathbf{p}_{pe} + \frac{1}{2} \rho_0 \mathbf{v}_{pe}^H \mathbf{v}_{pe} \end{aligned} \quad (17)$$

令 J 最小化, 解得优化后的控制源体积速度向量为^[9-10]:

$$\mathbf{q}_c = -(\mathbf{A} + \beta \mathbf{I})^{-1} \mathbf{b} \quad (18)$$

当没有参数 β 时, 可能出现矩阵 $\mathbf{A}$ 是奇异的, 或者计算得到的控制源强过大以至不符合实际等情况。取大于零的参数 β 可确保矩阵 $(\mathbf{A} + \beta \mathbf{I})$ 是非奇异的, 使模拟结果有一致性, 合适的 β 值也约束了控制源强, 使其符合实际。此外, 在时域研究中, 参数 β 为泄漏因子, 能增加时域系统的稳定性。本文的参数 β 取值为 0.0005, 此时误差传感器处的声压降低量最大在 40dB 左右。

2.4 系统控制性能

VSB 系统的控制性能定义为评价点控制前后声压平方和的比值, 即

$$NR = 10 \lg \left[\sum_{i=1}^{N_i} |p_p(\mathbf{r}_i)|^2 / \sum_{i=1}^{N_i} |p_t(\mathbf{r}_i)|^2 \right] \quad (19)$$

评价点选择在误差传感器包围的整个区间内。评价点的数目 N_i 和噪声频率有关, 通常每波长至少取 6 个评价点。

3 数值模拟

采用与文献[2]相同的圆柱状分布的 16 通道的 VSB 系统进行分析。该系统如图 1 所示, 16 个误差传感器分为两层, 每层各为圆内接正八边形, 两层的距离 h_e 等于圆半径 r_e 。16 个控制声源采用同样的结构, 层间距 h_c 等于圆半径 r_c 。评价点则在半径为 r_e 、高为 h_e 的圆柱体内。

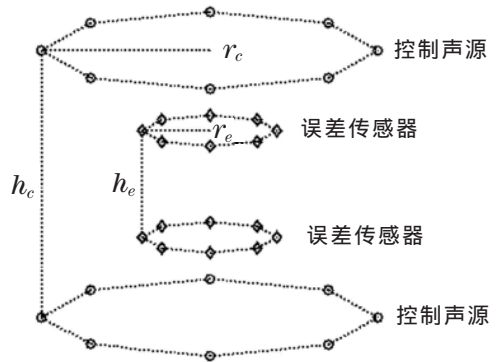


图 1 圆柱状分布的 16 通道 VSB 系统

Fig.1 A 16-channel cylindrical VSB system

3.1 系统性能 NR 的比较

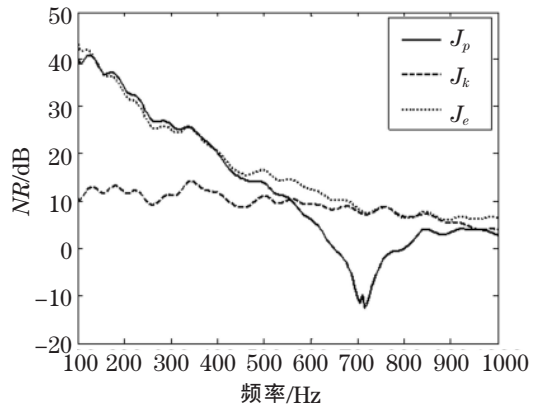


图 2 NR 随频率变化的曲线, $r_c=1.2\text{m}$, $r_e=0.2\text{m}$, 代价函数分别为 J_p, J_k, J_e

Fig.2 NR with respect to the frequency of the noise signal with different cost functions: J_p, J_k, J_e , $r_c=1.2\text{m}$, $r_e=0.2\text{m}$

设 $r_e=0.2\text{m}$, $r_c=1.2\text{m}$, 经三种不同代价函数计算, NR 随频率变化的曲线见图 2。观察到三种情况下曲线变化趋势有较大的差异。其中, 代价函数为 J_e 时, NR 随频率的增大而单调变小, 获得 10dB 有效降噪的上限频率为 680Hz。代价函数为 J_p 时, NR 随频率的增大也有变小的趋势, 在 450Hz 以下频段与代价函数为 J_e 时相差无几, 但是在 700Hz 附近有一个深谷, 使得上限频率约为 550Hz。在球形虚拟声屏障系统也有同样现象^[5], 该现象是 Dirichlet 问题引

起的^[11],即在某些特征频率,即使控制了边界上的声压,也无法控制边界包围的区间内的声压,显然Dirichlet问题对虚拟声屏障的性能有负面影响。代价函数为 J_k 时,虽然 NR 随频率的增大也呈下降的趋势,但曲线斜率非常小,上限频率约为570Hz,注意到在低频,降噪效果远远不如其余两种情况,甚至在几个频率点降噪量不足10dB。

虚拟声屏障的物理本质是通过控制误差传感器处的声压最小化,进而控制目标区域边界的声压,达到控制目标区域的声压的目的。因此进一步考察目标区域边界,即误差传感器所在圆环的声压降低量。参考 NR 定义式(19),定义 NR_e 为该圆环上所有评价点控制前后声压平方和的比值。经三种不同代价函数计算, NR_e 随频率变化的曲线见图3。当代价函数为 J_p 时,系统控制误差传感器处声压降低,在低频也同时令边界处的声压降低;随着频率增大,误差传感器处声压降低并不能有效保证边界处的声压降低,因此 NR_e 呈现下降的趋势, NR 也随着下降^[2]。当代价函数为 J_k 时,系统控制误差传感器处的质点速度最小化,由于公式(4)中 $1-j\lambda/(2\pi|\mathbf{r}-\mathbf{r}_m^c|)$ 项的存在,此时误差传感器处的声压并未最小化,边界处的声压也相对较高,因此 NR_e 较代价函数为 J_p 时为低。随着频率增大, $1-j\lambda/(2\pi|\mathbf{r}-\mathbf{r}_m^c|)$ 项的影响越小直到约等于1,此时 $J_k \rightarrow J_p$,二者的 NR_e 接近,同时 NR 也接近了。当代价函数为 J_e 时,是上述二者的折衷,因此, NR_e 曲线在二者之间。然而代价函数为 J_e 时, NR 曲线并不像代价函数为 J_p 时的 NR_e 一样,而是处在其下方,这是因为此时边界声压与质点速度都得到了控制,即同时控制了声压与声压梯度,在目标区域声压变化较慢^[3],声压降低量趋于均匀;而代

价函数为 J_p 时,虽然边界上声压降低更多,但是目标区域中间较差;总的结果是代价函数为 J_e 时的 NR 较代价函数为 J_p 时高。

如图2所示,代价函数为 J_e 时获得有效静区的上限频率最高,代价函数为 J_k 与代价函数为 J_p 相比,上限频率差不多,但低频降噪效果太低。因此,当仅考虑 NR 时,选取 J_e 作为代价函数较好,代价函数为 J_k 是最差选择。

3.2 声压降低量分布的比较

考察取三种不同代价函数时,目标区域内的声压降低量分布。在实际应用中,人头将在目标区域内活动,当人头移动,人耳处的声压将随位置不同而变化。由于声压变化快的噪声比声压变化慢的噪声更令人不适,因此考察声压降低量分布是有意义的。

此处以通过目标区域中心的水平剖面的声压降低量分布为例,设 r_e 为0.2m, r_c 为1.2m,频率为250Hz,经三种不同代价函数计算,该水平剖面的声压降低量分布如图4。代价函数为 J_p 时,声压降低量分布表现为边界最好,中间最差的情况,最大最小值差距约18dB;代价函数为 J_k 时,声压降低量在目标区域分布十分平均,最大最小值相差仅2dB;代价函数为 J_e 时,声压降低量分布表现为中间比边界好的情况,最大最小值差距约16dB。

令频率=550Hz,其余参数同图4,模拟结果见图5。同样可以看到,代价函数为 J_p 时,边界的声压降低量比中间高,最大最小值差距约15dB;代价函数为 J_k 时,声压降低量分布均匀,最大最小值相差约3dB;代价函数为 J_e 时,中间的声压降低量比边界高,最大最小值差距约9dB。

从图4和图5可以看出,代价函数为 J_k 时声压降低量分布最为均匀,代价函数为 J_p 时最不均匀,代价函数为 J_e 时在二者之间。为量化这一评价指标,定义目标区域内所有评价点控制后声压降低量的均方差为声压降低量均匀度,即

$$ER = \left[\sum_{i=1}^{N_i} (NR_i - NR)^2 / N_i \right]^{1/2} \quad (20)$$

$$NR_i = 10 \lg \left[|p_p(\mathbf{r}_i)|^2 / |p_i(\mathbf{r}_i)|^2 \right]$$

ER 值越小,目标区域声压降低量分布越平均。其中 NR, N_i 的定义见式(19)。

设 $r_e=0.2\text{m}, r_c=1.2\text{m}$,经三种不同代价函数计算, ER 随频率变化的曲线如图6所示。研究频段为小于有效降噪上限频率的频段,代价函数为 J_p 时 ER 随频率增大而增大,即频率越高越不均匀, ER

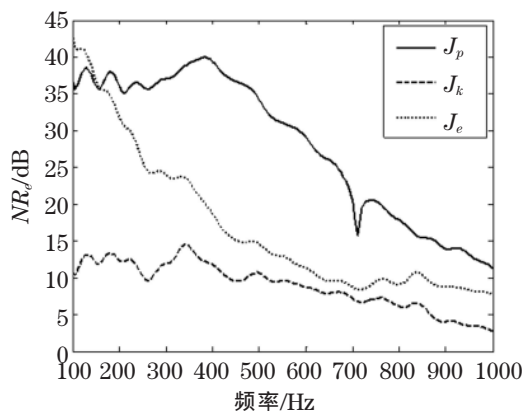


图3 NR_e 随频率变化的曲线, $r_c=1.2\text{m}, r_e=0.2\text{m}$,
代价函数分别为 J_p, J_k, J_e

Fig.3 NR_e with respect to the frequency of the noise signal with different cost functions: $J_p, J_k, J_e, r_c=1.2\text{m}, r_e=0.2\text{m}$

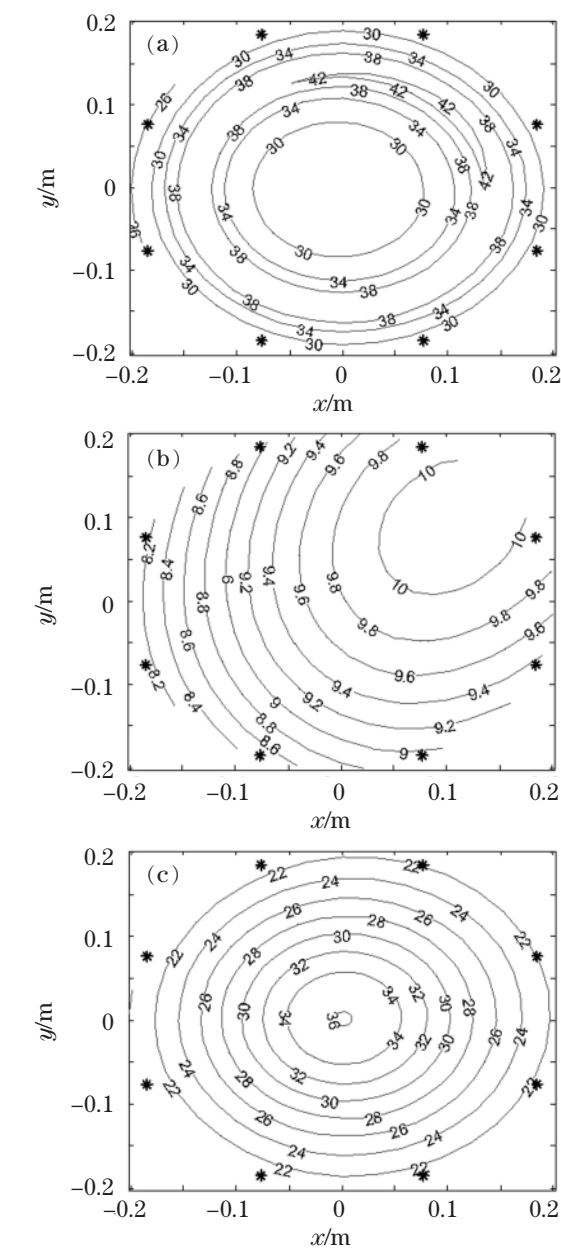


图 4 声压降低量分布图, $r_c=1.2\text{m}$, $r_e=0.2\text{m}$, 频率=250Hz, 代价函数分别为(a) J_p , (b) J_k , (c) J_e , 星形标记为误差传感器投影

Fig.4 The distribution of the pressure attenuation with different cost functions: (a) J_p , (b) J_k , (c) J_e , $r_c=1.2\text{m}$, $r_e=0.2\text{m}$, $f=250\text{Hz}$. The projections of the error sensors are shown by the point *.

在整个研究频段是三种代价函数中最大的。代价函数为 J_k 时 ER 随频率增大也增大, 但增幅较小, ER 在整个研究频段是三种代价函数中最小的。代价函数为 J_e 时 ER 则在二者之间。

当代价函数为 J_p 时, 系统控制误差传感器处的声压最小化, 但离开边界, 声压变化较为迅速, 声压降低量分布不均匀。当代价函数为 J_k 时, 系统控制误差传感器处的质点速度最小化, 整个边界的质点速度也相应降低, 离开边界, 声压变化较为缓慢, 因此声压降低量分布较为均匀, ER 较小。当代价函数

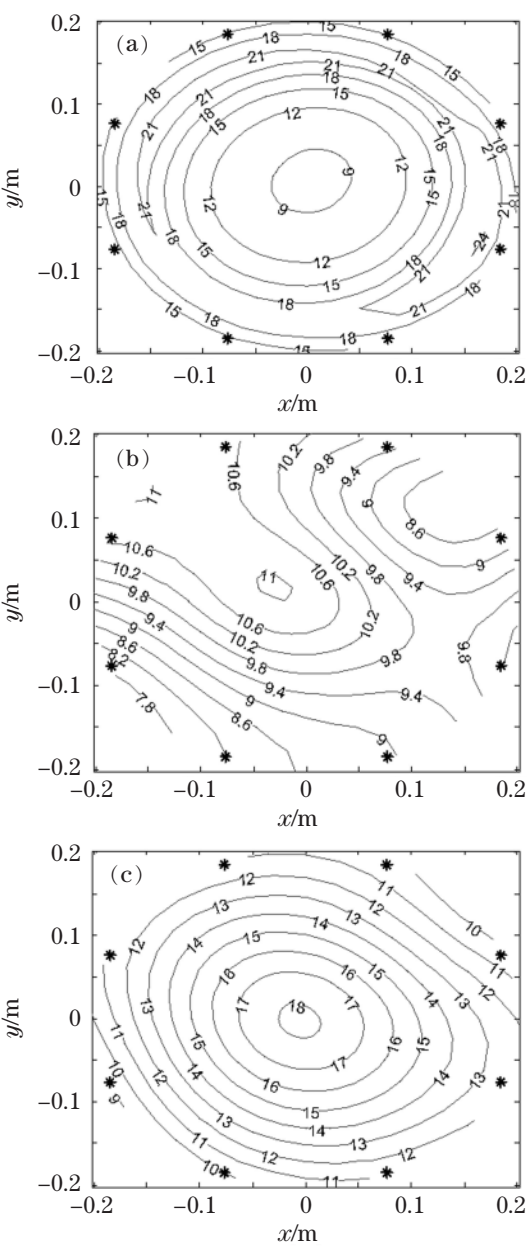


图 5 声压降低量分布图, $r_c=1.2\text{m}$, $r_e=0.2\text{m}$, 频率=550Hz, 代价函数分别为(a) J_p , (b) J_k , (c) J_e , 星形标记为误差传感器投影

Fig.5 The distribution of the pressure attenuation with different cost functions: (a) J_p , (b) J_k , (c) J_e , $r_c=1.2\text{m}$, $r_e=0.2\text{m}$, $f=550\text{Hz}$. The projections of the error sensors are shown by the point *.

为 J_e 时, 也包含了控制误差传感器质点速度的部分, 因此声压降低量分布均匀程度在二者之间。从图 2 和图 3 可见, 当代价函数为 J_e 时, 由于声压降低量较代价函数为 J_p 更为平均, 虽然边界处的声压降低量 NR_e 不如后者高, 但系统性能 NR 较后者高。

总结图 2 和图 6, 代价函数为 J_p 时, 在低频有较好的降噪效果, 但声压降低量分布不均匀, 还由于 Dirichlet 问题降低了有效控制的上限频率; 代价函数为 J_k 时, 在低频声压降低量分布均匀, 但降噪效果与其余二者差距较大; 代价函数为 J_e 时, 有最好

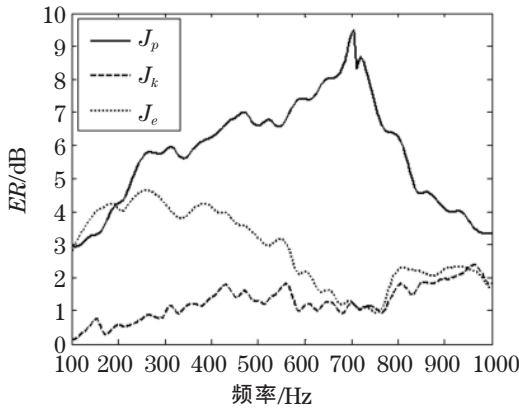


图6 ER 随频率变化的曲线, $r_c=1.2\text{m}$, $r_e=0.2\text{m}$, 代价函数分别为 J_p 、 J_k 、 J_e

Fig.6 ER with respect to the frequency of the noise signal with different cost functions: J_p , J_k , J_e , $r_c=1.2\text{m}$, $r_e=0.2\text{m}$

的降噪效果,声压降低量分布较代价函数为 J_p 时均匀,是较好的选择。

3.3 代价函数 $J_e(w)$

在代价函数 J_e 定义式(9)中,声动能密度和与声势能密度和权重一样。由前述可知,在低频,代价函数为 J_p 时有较好的降噪效果,代价函数为 J_k 时声压降低量分布均匀,因此,可以通过调节式(9)中声动能密度和声势能密度和的权重,获得不同的控制效果。定义代价函数 $J_e(w)$ 为:

$$J_e(w) = E_p + wE_k + \beta q_c^H q_c \quad (21)$$

其中 w 为权重系数,当 $w=1$ 时, $J_e(w)=J_e$ 。

设 $r_e=0.2\text{m}$, $r_c=1.2\text{m}$, $w=\{1/8, 1/4, 1/2, 1, 2, 4, 8\}$, 经这7种不同代价函数计算, NR 和 ER 随频率变化的曲线分别见图7和图8。图7显示,系数 w 从 $1/8$ 增大到 1 (即声势能密度和的权重大于 1),对应的曲线之间相差不大。当系数 w 大于 1 时,随声动能密度和的权重增大,在低频 NR 值降低明显。随着频率增大,各曲线差距减小,频率增大到约 700Hz ,所有 NR 曲线基本重合。2.1节已经分析在低频降低声动能密度和不能有效降低声压,因此其权重加大时, NR 值降低;当频率增大,降低声动能密度和与降低声势能密度和是一致的,因此各曲线趋向重合。图8显示随系数 w 的增大, ER 值将降低,在有效降噪频段尤其明显。这是因为此时声动能密度和的权重加大,不仅控制了声压还控制了声压梯度,因此控制区间声压降低量更均匀, ER 值小。考虑降噪量和声压降低量均匀程度两个方面, $w=1/2, 1/4, 1/8$ 的 NR 值最大,但 $w=1/2$ 的 ER 值更小,是最佳选择。

从图7和图8可知,降噪量与声压降低量均匀

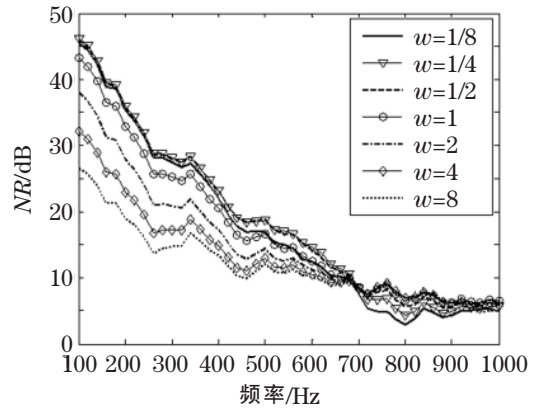


图7 NR 随频率变化的曲线, $r_c=1.2\text{m}$, $r_e=0.2\text{m}$, 代价函数为 $J_e(w)$

Fig.7 NR with respect to the frequency of the noise signal with cost function $J_e(w)$, $r_c=1.2\text{m}$, $r_e=0.2\text{m}$

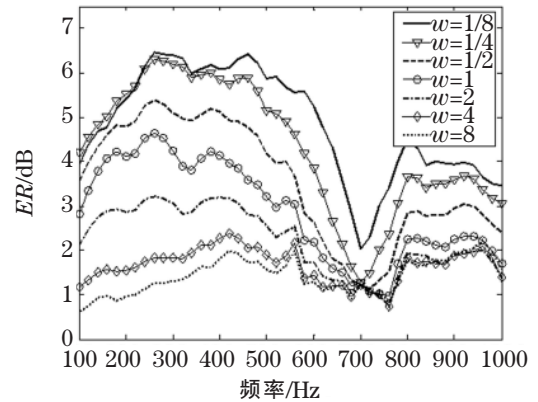


图8 ER 随频率变化的曲线, $r_c=1.2\text{m}$, $r_e=0.2\text{m}$, 代价函数为 $J_e(w)$

Fig.8 ER with respect to the frequency of the noise signal with cost function $J_e(w)$, $r_c=1.2\text{m}$, $r_e=0.2\text{m}$

程度是矛盾的,当声势能密度和权重较大时,降噪量高,但声压降低量不均匀;随着 w 的增大,声动能密度和增大,降噪量减少,但声压降低量趋向均匀。对于不同的降噪要求,可以根据这两幅图选择不同的权重参数 w 。需要说明的是,现在的麦克流探头可同时获取空间某点的声压和质点速度^[12],因此以上讨论的各种代价函数都是可实现的。由于实验条件的限制,暂时没有进行相关实验。

以声势能密度和为代价函数仅需要普通传声器作为传感器,价格便宜;其余二者需要麦克流探头作为传感器,价格相对较贵。以声势能密度和为代价函数,控制器的每个输入通道仅含一个数据(声压),因此系统运算量最小;以声动能密度和、声能量密度和为代价函数,控制器的每个输入通道分别含三个(质点速度的三个分量)、四个数据(质点速度的三个分量与声压),因此系统运算量较大。当输入数据传递给控制器后,控制器的算法难度是没有差别的,仅有运算量的差别,运算量的大小决定了系统所用数字信号处理芯片的规格。综上所述,从系统实现的

角度,三者区别不大,从系统成本考虑,以声势能密度和最为经济,但是随着处理器技术、传感器技术进一步发展,这一差别也将随之减小。

4 结 论

本文通过在三维扩散声场的数值模拟,比较了虚拟声屏障系统在采用三种不同代价函数时的性能表现,得出以下结论:

(1)以声势能密度和 J_p 为代价函数,在低频取得较好的降噪效果,但存在 Dirichlet 现象,影响了有效降噪的上限频率,并且声压降低量不均匀。以声动能密度和 J_k 为代价函数,声压降低量最为均匀,但低频的降噪效果不好。以声能量密度和 J_e 为代价函数,降噪效果最好,声压降低量均匀程度在上述二者之间,因此,是一个较好的折衷。

(2)将声动能密度和与声势能密度和按权重相加构成代价函数 $J_e(w)$,当声势能密度和权重大时,降噪量高,但声压降低量不均匀;当声动能密度和增大,降噪量减少,但声压降低量趋向均匀。针对不同的控制目标,可调整声动能密度和与声势能密度和的权重,得到最优选择。

参 考 文 献

[1] QIU X J, LI N R, CHEN G Y. Feasibility study of developing practical virtual sound barrier system[A]. Proceedings of 12th International Congress on Sound and Vibration[C]. Lisbon, Portugal, 2005.

- [2] 邹海山, 邱小军, 牛锋, 等. 虚拟声屏障的数值及实验分析[J]. 声学学报, 2007, **32**(1): 26-33.
ZOU Haishan, QIU Xiaojun, NIU Feng, et al. A numerical and experimental study on virtual sound barrier[J]. ACTA Acustica, 2007, **32**(1): 26-33.
- [3] 邹海山, 邱小军. 人头散射对虚拟声屏障的性能影响分析[J]. 声学学报, 2007, **32**(6): 481-488.
ZOU Haishan, QIU Xiaojun. Performance analysis of the virtual sound barrier system with a diffracting head [J]. ACTA Acustica, 2007, **32**(6): 481-488.
- [4] Ise S. A principle of sound field control based on the Kirchhoff-Helmholtz integral equation and the theory of inverse systems[J]. Acustica, 1999, **85**: 78-87.
- [5] Epain N, Friot E. Active control of sound inside a sphere via control of the acoustic pressure at the boundary surface[J]. Sound Vib., 2007, **299**: 587-604.
- [6] QIU X, Hansen C H, Li X. A comparison of near-field acoustic error sensing strategies for the active control of harmonic free field sound radiation[J]. Sound Vib., 1998; **215**: 81-103.
- [7] Berry A, QIU X, Hansen C H. Near-field sensing strategies for the active control of the sound radiated from a plate[J]. Acoust. Soc. Am, 1999, **106**: 3394-3406.
- [8] Han N, QIU X. A study of sound intensity control for active noise barriers[J]. Applied Acoustics, 2007, **68**: 1297-1306.
- [9] Nelson P A, Elliott S J. Active control of sound[M]. Academic Press, 1992.
- [10] 陈克安. 有源噪声控制[M]. 国防工业出版社, 2003.
CHEN Ke'an. Active noise control[M]. National Defense Industry Press, 2003.
- [11] Kleinman, Roach G F. Boundary integral equations for the three-dimensional Helmholtz equation[J]. SIAM Review, 1974, **16**: 214-236.
- [12] Jacobsen F, LIU Y. Near field acoustic holograph with particle velocity transducers[J]. Acoust. Soc. Am, 2005, **118**: 3139-3144.