

波叠加声场重构精度的影响因素分析 *

李加庆[†] 陈 进 杨 超 贾文强

(上海交通大学振动、冲击、噪声研究所, 上海 200240)

(2007 年 10 月 14 日收到 2007 年 11 月 19 日收到修改稿)

波叠加法是利用等效源的思想来求解声辐射问题的一种数值方法。其原理并没有确切地规定如何配置等效源。正由于这些不确切性的存在, 当将它应用到声场重构时, 有必要检验重构的准确性, 分析影响重构精度的各种因素, 目的是通过分析而获得一些提高重构精度的规律。通过理论分析和数值仿真, 分析了各因素对重建准确性的影晌。证明等效源必须配置在辐射体内部, 而且最好能与辐射体表面共形; 但测量面并不需要与辐射体表面共形, 而且也不需要在近场测量。还发现, Tikhonov 和 TSVD 正则化方法很适合与波叠加法结合用于声场重构。依据这些规律能更好地应用波叠加法进行声场重构, 也将拓宽其应用范围。

关键词: 声场重构, 波叠加法, 误差影响因素, 正则化方法

PACC: 4320, 4360, 4363

1. 引言

波叠加法是 Koopmann 等^[1,2]于 1989 年提出的求解声辐射和散射问题的一种方法。它利用了等效源的思想计算声辐射: 任意振动体辐射的声场可以由置于该辐射体内部一系列等效源产生的声场叠加得到, 等效源的源强可以根据辐射体表面给定的法向速度或声压利用配点法或最小二乘法计算得到。此后, Jeans 等^[3]对该方法的稳健性进行了研究, 提出一种基于波叠加法的稳健的声场计算技术。向宇^[4]、于飞^[5]、毕传兴^[6]等人也对该方法进行了研究。文献 4 提出采用复矢径法配置等效源, 克服了解的非惟一性问题。复矢径法的作用与混合势相同, 但比后者减少了计算时间。文献 5 提出采用简单等效资源配置结合正则化滤波, 将波叠加法应用于声场重建。Holste^[7]将该方法应用到航空发动机的声辐射计算, 针对不同的流动状态建立了不同的等效源模型, 从而使该方法走向了实际应用。

事实上, 波叠加法的原理并没有明确地说明如何配置等效源, 仅要求等效源必须配置在辐射体内部。如文献 2 所述, 可以通过迭代使误差最小的办法来合理地配置等效源。正因为这些不确切因素的

存在, 将波叠加法应用到声场重构时, 有必要检验其重构的准确性, 需要分析影响重构精度的各种因素, 如测量面、等效源面、重构面、测量误差等。从而, 找出提高重构精度的规律, 能更好地指导应用波叠加法进行声场重构。

2. 波叠加声场重构原理

考虑一振动体, 置于均质流体中。流体密度为 ρ , 流体中的声速为 c 。振动体的表面记为 S' , 其内部和外部分别为 D 和 E , 如图 1 所示。 n 为表面的外法向矢量, P 为外部 E 中的一点。假设在 D 内有一连续分布的等效声源体 Ω , 其虚拟边界 S 作为等效源面, Q 为 S 上一点。 P 和 Q 间的距离记为 r 。

考虑随时间简谐变化的波动, 边界条件为 Neumann 边界条件。对于外域问题, 还需满足 Sommerfeld 辐射条件(Sommerfeld radiation condition, SRC), 以保证无穷远处只有外行波, 而没有反射波。因此, 外域 Neumann 问题表述如下:

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad \in E, \\ v_n = \bar{v}_n, \quad \in S', \quad (1)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \left[r \left(\frac{\partial p}{\partial r} + ikp \right) \right] = 0, \quad \in E,$$

其中, ∇ 为拉普拉斯算子, k 为波数, v_n 为流体媒质

* 国家自然科学基金(批准号 50675140)和国家高技术研究发展计划(863)项目(批准号 2006AA04Z175)资助的课题。

† E-mail: jqlivsn@163.com

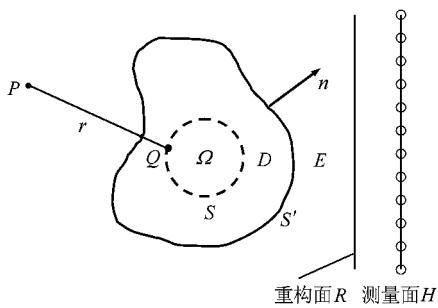


图1 波叠加声场重构原理图

中振速 v_n 为边界上的给定振速. 方程组(1)的解可通过 Helmholtz 积分方程求解, 然后应用质量守恒定律得到一个修正的内域 Helmholtz 积分方程, 两方程联立求解, 得到 P 点的声压和质点振速表达式

$$p(P) = \int_S i\rho\omega\sigma(Q)G(P, Q)dS(Q), \quad (2)$$

$$v_n(P) = \int_S \sigma(Q) \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n_p} dS(Q). \quad (3)$$

其中 i 是虚数单位, ρ 为空气的密度, ω 为声波圆频率, σ 为未知的等效源强度, $G(P, Q)$ 是自由场格林函数

$$G(P, Q) = \frac{e^{-ikr}}{4\pi r}. \quad (4)$$

采用简单等效源配置的方法, 均匀地对等效源面 S 进行离散. 在每一单元配置一个单极子声源, 并假设 Green 函数在每一单元上为一常量. 物体的外部声压和质点振速的离散表达式为

$$\{p\} = [H]\{\sigma\}, \quad (5)$$

$$\{v_n\} = [T]\{\sigma\}. \quad (6)$$

其中, $\{p\}$ 和 $\{v_n\}$ 分别为声压向量和质点振速向量, $[H]$ 和 $[T]$ 为联系(等效)源点和场点的传递函数, 或辐射因子, $\{\sigma\}$ 是未知的源强度向量. 一旦配置好等效源, 传递函数 $[H]$ 和 $[T]$ 可以通过计算格林函数得到.

利用波叠加法进行声场重构包括两个步骤. 第一步是利用已知的声压求未知的等效源强, 属于声学逆问题. 令 P 取在测量面 H 上, 计算出源点和测量点之间的传递函数 $[H_{SH}]$, 利用传声器阵列获得的物体外部声压场 $\{p_H\}$, 代入(5)式, 从而求得未知的等效源的源强度

$$\{\sigma\} = [H_{SH}]^{-1}\{p_H\}, \quad (7)$$

式中 $[H_{SH}]^{-1}$ 为 $[H_{SH}]$ 的广义逆. 第二步是利用已知的等效源强求外部声场, 属于声学正问题. 令 P

取在重构面 R 上, 计算出传递函数 $[H_{SR}]$, 利用已获得的源强度 $\{\sigma\}$ 代入(5)式, 可以对物体外部任意场点实现声压量重构

$$\{p_R\} = [H_{SR}] [H_{SH}]^{-1} \{p_H\}. \quad (8)$$

采用同样的步骤, 可以实现对物体外部质点振速量的重构.

3. 重构精度的影响因素分析

由声场重构的过程可以看出, 等效源的源强度 $\{\sigma\}$ 属于中间变量, 声场重构精度由 $\{p\}$, $\{v_n\}$ 和 $[H]$, $[T]$ 决定. $[H]$, $[T]$ 是联系源点和场点的传递函数, 其特性由源点和场点的分布决定, 误差可能来自于源点和场点. 因此, 若想获得较高的精度, 必须合理地配置等效源; 而如何合理配置, 目前尚缺乏明确的理论依据. 从原理上来说, 等效源的配置不是唯一的, 等效源的配置的好坏会对重构结果的精度产生显著影响. 因为求解源强度属于声学逆问题, 即非适定性问题; 而在测量中, $\{p\}$, $\{v_n\}$ 又可能会代入测量误差, 利用包含误差的测量数据直接进行求解无法获得正确结果; 所以, 还需要采用正则化方法求解. 因此, 可将重构精度的影响因素确定为以下几个方面: 测量面、等效源面、重构面、波数、测量误差与正则化方法.

考虑一半径为 r_0 的球形空腔, 以法向振速幅值 v_0 做呼吸态脉动(脉动球声源). 以球心为坐标原点, 则空间中任一点 r 处的声压为

$$P(r) = \frac{i\rho c k r_0^2 v_0}{|r|(1 + ik r_0)} e^{i(\omega t - ik|r|)}, \quad (9)$$

其中, k 为波数, 声源、等效源、测量面、重构面的布置示意图如图 1 所示. 脉动球半径为 0.1 m, 表面脉动速度为 2.5 m/s, 脉动频率为 500 Hz. 测量面取为一平面, 距离球心 1 m, 在其上等间距(间距 $\Delta_1 = 0.2$ m) 布置一个 11×11 的传声器阵列. $\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$, $c = 340 \text{ m/s}$. 各传声器的测量值在仿真中由(9)式计算得出. 重构面为一与球表面相切的平面, 在其上等间距(间距 $\Delta_2 = 0.2$ m) 选取 11×11 个重构点. 在进行误差研究之前, 有必要先定义相对误差公式

$$\epsilon(n) = \frac{|p_R(n) - p_T(n)|}{|p_T(n)|} \times 100\%, \quad (10)$$

式中, p_R 为重建的各点声压, p_T 为理论计算的各点声压(由(9)式计算得到), n 表示划分的重构点. 为了对比各种方法的总体性能, 还定义了均方根误差

$$e_{\text{rms}} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum |p_R(n) - p_T(n)|^2 / \sum |p_T(n)|^2} \times 100\% \quad (11)$$

3.1. 等效源面的影响

等效源的配置尤为关键,作为首要因素进行考虑,从三方面考查它对重构精度的影响:1)等效源面

的形状;2)等效源面与物体表面的距离;3)离散等效源的数目。

等效源面的形状分别取为与声源同心球面、椭球面,以及平面,分别如图2(a),图3(a),图4(a)所示。三种情况下,都对等效源面进行均匀离散,并在每一单元配置一个单极子等效源。各种情况下,配置的密度相同,分别为42个、42个、41个等效源。按照

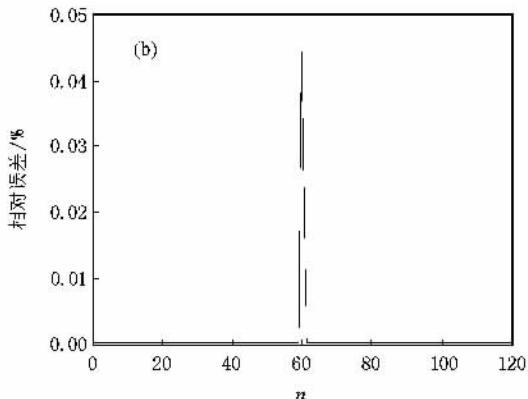
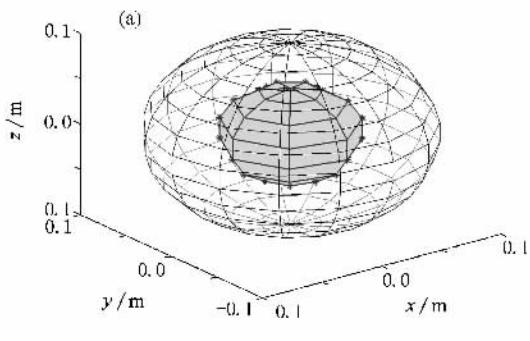


图2 球面等效源重构结果 (a)等效源面配置示意图(42个)(b)重构误差曲线

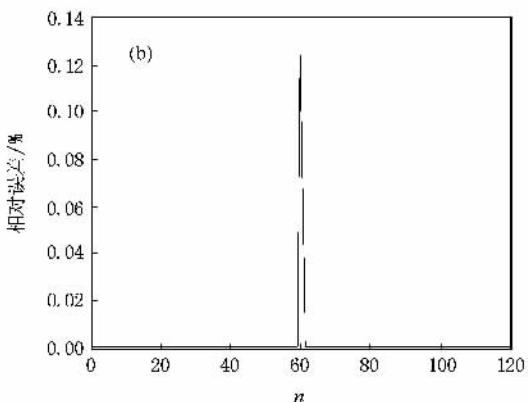
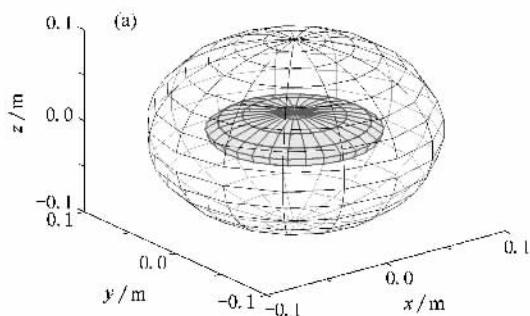


图3 椭球面等效源重构结果 (a)等效源布置示意图(42个)(b)重构误差曲线

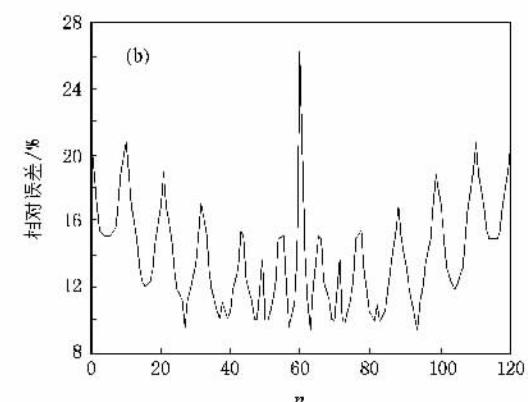
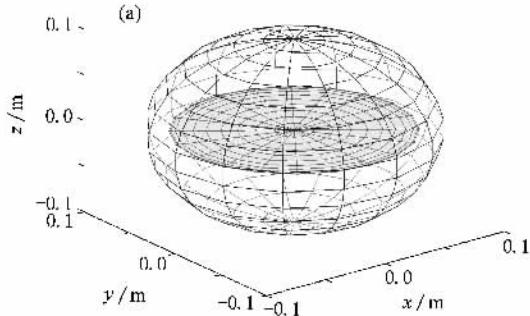


图4 平面等效源重构结果 (a)等效源布置示意图(41个)(b)重构误差曲线

(10)式计算重构误差,三种等效源配置方案的重构结果分别见图2(b)图3(b)图4(b)。

三种情况下,源点都分布在空腔内部,源点数目也非常接近。相比较而言,前两者差别不大,都在0.2%以下;而平面形等效源面配置误差最大,达到了28%。球面的结果好于椭球面,表明等效源配置最好能与振动物体表面共形。各种条件下,在中心点($n=60$)处误差达到最大。同时,这些算例也证明,在没有测量误差干扰的情况下,波叠加法声场重构确实能够获得很高的重建精度。因此,在以下的算例中,都将采用与脉动球同心的球面等效源配置,即图2(a)情况下的配置。

下面,讨论等效源面的位置和等效源的个数对重建精度的影响。仿真条件与上例图2(a)类似。通过变换等效源球面半径,令等效源球面半径 $r'_0 = (0.1\text{--}1.2)r_0$,研究重构误差的变化规律。同时,比较了当等效源点数目 M 不同时,重构误差的变化规律。仿真结果如图5所示。

图5中,横坐标表示等效源面的半径与振动体球面的半径之比,变化范围从0到1.2;纵坐标表示各种等效源配置条件下的重构误差,由(11)式算出;各条曲线的等效源数目分别为14,26,42,62,86,114个。从图5可以看出,在半径比接近于1时,重构误差明显增大,这是因为当等效源面与振动球面重合时,存在着奇异积分;当半径比大于1时,即等效源配置在振动球面的外部,误差也会大大增加,因为这显然违背了波叠加法的原理;半径比在0.8以下时,各曲线对应的相对误差都小于0.1%。还发现,当等效源数目增加时,重构误差会随之减小。这比较容易解释,因为等效源个数增多,可以更细致地描述振动

球面的变化。但是,增加等效源的数目也会增多未知数的个数,测量点数目相应地也必须增多。因此,在保证精度的情况下,可以根据需要采用尽量少的等效源个数以降低测量成本。

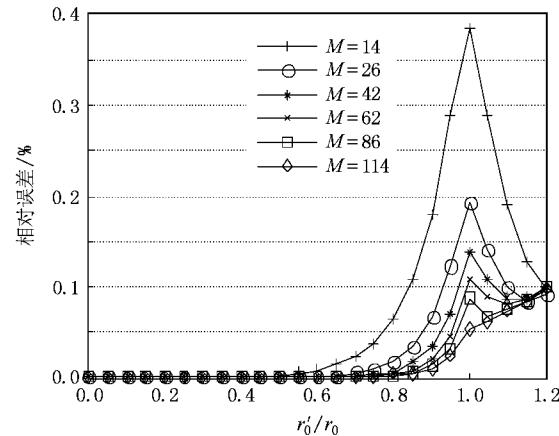


图5 不同等效源面半径和等效源点数目的重构误差曲线

3.2. 测量面的影响

测量面在这里指传声器阵列的布置,如图1所示。从两个方面考查它对重构精度的影响:1)测量面的形状(是否需要与物体面共形);2)测量距离。

算例中振动体的表面为球面,测量面布置成什么形状重构误差最小,是否需要与近场声全息一样布置成与脉动球共形,都有待探讨。为此,对6种典型的阵列布局形式进行了比较。各阵列中阵元的配置密度基本相同。计算参数与图2(a)算例中相似。测量面的中心与脉动球球心的距离为1 m。各测量面的形状与重构结果见表1和表2。

表1 各种阵列的布局图

| 布局形式 | 网格形 | 球冠形 | 圆环形 | 十字形 | 曲线形 | 星形 |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| 阵元个数 | 121 | 120 | 79 | 21 | 61 | 31 |
| 形状图 | | | | | | |

表2 不同阵列布局的重构误差比较(单位: $\times 10^{-4}$)

| 阵列形状 | f/Hz | | | | | |
|------|---------------|------------|------------|------------|------------|-----------|
| | 100 | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 |
| 网格形 | 2.0 | 1.7 | 1.8 | 1.9 | 2.0 | 2.0 |
| 球冠形 | 2.0 | 1.8 | 8.1 | 8.5 | 9.1 | 9.0 |
| 圆环形 | 11 | 1.7 | 7.8 | 4.3 | 9.1 | 10 |
| 十字形 | 2.0 | 1.7 | 1.8 | 2.0 | 2.2 | 3.0 |
| 星形 | 8.0 | 8.0 | 2.9 | 3.1 | 3.5 | 2.0 |
| 曲线形 | 4.0 | 3.9 | 4.5 | 4.7 | 4.8 | 5.0 |

表1给出了各种阵列布局图.其中,球冠形和曲线形是与脉动球面共形的阵列形状.虽然各种阵列形式的阵元个数不等,但阵元间距大致相等.表2是各种阵列形式的仿真结果,仅列出了几个典型频率下的重构误差结果.该结果由(11)式算出,单位是 10^{-4} ,表明各种阵列形状的重构误差都非常小.黑体数字表示在该频率下各种阵列形状中的误差的最大值.比较发现,球冠形阵列在多个频率下的误差都是最大的,表明该阵列形状不适合用来进行声场重构.观察曲线形阵列的结果,在各频率下的结果比较稳定,但都不是最小的.从而,表明利用波叠加法进行声场重构并不要求测量面与测量物体面共形.再看最小误差,网格形和十字形阵列在各频率下误差都是最小的,可以认为这两种阵列形状是最佳的.十字形可以看作从网格形阵列中抽取部分阵元组成的阵列,所以重构误差比网格形稍大.因此,如果在测量阵元有限的情况下,可以作为网格阵列的替代.

为了考察测量距离对重构精度的影响,采用与上述算例相同的模型,以网格阵列在近、中、远不同距离下测量,进行仿真研究,结果见图6.横轴表示测量距离,从0.1 m到5 m,纵轴表示相对误差,由(11)式算出.比较了不含噪声和三组含有测量噪声的情况,分别添加了信噪比为10 dB,20 dB,40 dB的高斯白噪声,并采用了Tikhonov正则化方法求解逆问题(有关正则化方法将在3.4节中论述).结果表明,随着测量距离的增加,声场重构精度并没有显著增大.三组含测量噪声的情况误差都在0.01%左右,即使在含10 dB测量噪声的情况下,误差也不超过0.05%;不含噪声的情况,误差几乎为零,即达到了理想的声场重构.这是根据(11)式算出的均方根误差,再看根据(10)式算出的误差,其在各种测量工况下的最大值也都小于5%.因此,证明重构距离对声场重构精度影响不大,这与测量距离的结果非常相似.

3.3 重构距离的影响

通常地,取一局部平面作为测量面.因此,这里仅讨论重构距离对声场重构精度的影响.将重构面分别布置在近、中、远不同距离下进行了仿真研究,结果见图7.横轴表示重构距离,从0.1 m到5 m,纵轴表示相对误差,由(11)式算出.比较了不含噪声和三组含有测量噪声的情况,并采用了Tikhonov正则化方法求解逆问题.结果表明,随着重构距离的增加,声场重构精度并没有显著增大.三组含测量噪声

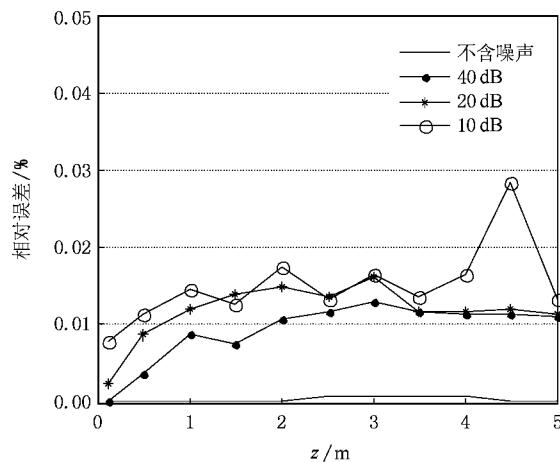


图6 不同测量距离下声场重构误差曲线

的情况误差都在0.01%左右,即使在含10 dB测量噪声的情况下,误差也不超过0.05%;不含噪声的情况,误差几乎为零,即达到了理想的声场重构.这是根据(11)式算出的均方根误差,再看根据(10)式算出的误差,其在各种测量工况下的最大值也都小于5%.因此,证明重构距离对声场重构精度影响不大,这与测量距离的结果非常相似.

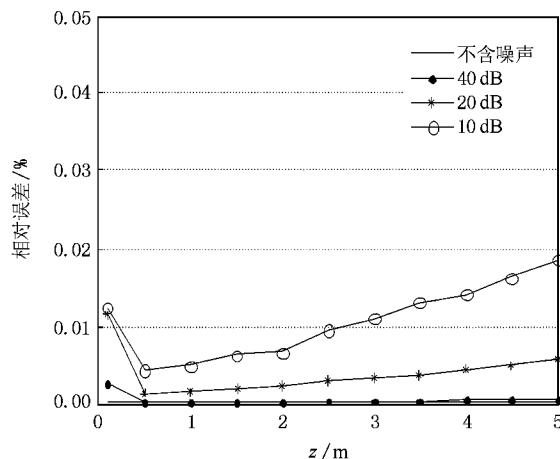


图7 不同重构距离下声场重构误差曲线

3.4. 测量误差及正则化方法的影响

声场重构问题为一反问题,也称为非适定性问题,其解非唯一或不连续依赖于测量数据,小的测量误差将带来解的极大振荡,在数值实现中称为离散非适定性问题.不过,可以通过正则化处理来消除离散非适定性问题的影响^[8].通过奇异值分解,矩阵[H]和[T]可表示为各奇异值分量对解的贡献之和

$$[\mathbf{H}] = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^H = \sum_{i=1}^n u_i \gamma_i v_i. \quad (12)$$

其中, \mathbf{U}, \mathbf{V} 分别为 m 维和 n 维方阵, Σ 为一包含 n 个非负奇异值 γ_i 的对角矩阵。由于小奇异值使解失稳, 正则化的目的就是要滤掉或抑制使解产生激烈振荡的分量(对应着相对较小的奇异值 γ_i)。以 Tikhonov 正则化方法为例, 选择 $f_i = \gamma_i^2 / \gamma_i^2 + \lambda^2$ 为正则化滤波因子, 方程的正则化解可以写成

$$\sigma_{\text{reg}} = \sum_{i=1}^n f_i \frac{u_i^T p}{\gamma_i} v_i, \quad (13)$$

其中, λ 为正则化参数, λ 取值太大或者太小, 将导致过正则化或欠正则化, 所以 λ 取值存在一个最优化问题。选取 λ 的方法有 GCV(generalized cross validation) 和 L 曲线法。它们可以和 Tikhonov 正则化

表3 不同正则化方法的重建误差比较

| SNR/dB | 最小二乘解 | Tikhonov 和 L 曲线 | Tikhonov 和 GCV | TSVD | DSVD | CGLS |
|--------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 不含噪声 | 1.8×10^{-4} | 7.9×10^{-4} |
| 40 | 73.3 | 7.6×10^{-4} | 13×10^{-4} | 4.7×10^{-4} | 0.02 | 0.01 |
| 20 | 159.2 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.04 | 0.01 |
| 10 | 788.7 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.05 | 0.02 |

较发现, 在不加噪声的情况下, 采用正则化方法获得的结果和最小二乘解(通过求矩阵的伪逆)的结果精度一样, 即在无噪声情况下不需要正则化。在加噪声的情况下, 直接求解的结果显然是不正确的, 误差高达 788%。因此, 在含有测量噪声的情况下, 必须采用正则化方法处理才能得出正确解。还发现, 两种正则化参数选择方法具有同样的计算精度, 但各种正则化方法的性能有一定差异。具体而言, Tikhonov 和 TSVD 方法优于另外两种方法, DSVD 方法的结果最差。在三种不同噪声条件下, DSVD 方法的重构误差都大于其他三种方法, 而且随着信噪比减小有增大的趋势。根据(10)式计算各重构点的误差, 进一步比较余下的三种正则化方法, Tikhonov, TSVD 和 CGLS。发现 Tikhonov 和 TSVD 的结果比 CGLS 更准确, 二者所获得的误差最大值不超过 3%, 而且结果很稳定。因此, Tikhonov 正则化方法和 TSVD 正则化方法可以与波叠加法结合用于声场重构。

4. 结 论

通过数值算例, 研究了以下几个方面的影响因

方法相结合, 使得扰动误差和正则化误差之间达到较好的平衡。各正则化方法的区别就在于滤波器因子 f_i 的定义不同。目前广泛应用的算法主要有 Tikhonov 方法、截断奇异值分解法(TSVD), 阻尼奇异值分解法(DSVD), 共轭梯度最小平方法(CGLS)。为了选择一种适合于波叠加法声场重构的正则化方法, 通过仿真算例比较了这四种正则化方法的优异性、准确性。仿真条件与上例相似, 比较了不含噪声和三组含有测量噪声的情况, 分别添加了信噪比为 10 dB, 20 dB, 40 dB 的高斯白噪声, 并分别采用这四种正则化处理方法求解逆问题, 同时还比较了 L 曲线和 GCV 两种正则化参数选择方法。声场重构相对误差由(11)式算出, 比较结果见表 3。

表3中, 黑体数字表示该工况下的最大误差。比

素 测量面、等效源面、重构面、波数、测量误差与正则化方法, 找到一些如何提高重构精度的规律。

1. 等效源面的形状会对重建结果产生显著影响。等效源需要配置在辐射体内部, 最好与辐射体表面共形。为保证高的重构精度, 建议缩小比例在 0.8 以下。等效源的数目对重建精度的影响明显小于等效源面的影响。在保证足够精度的情况下, 可以根据需要采用尽量少的等效源个数以降低测量成本。

2. 测量面并不需要与物体表面共形。这与近场声全息要求共形测量是不同的。测量距离与重构距离对声场重构精度影响不大, 所以不必在近场测量。但可以预见, 随着测量距离的增大, 包含在测量数据中的倏逝波成分将减少, 其分辨率也将随之降低。

3. 在理想的测量情况下, 是不需要正则化的;而在包含测量噪声的情况下, 必须采用正则化方法才能获得准确解。比较了四种正则化方法, 发现 Tikhonov 正则化方法和 TSVD 正则化方法更适合与波叠加法结合用于声场重构。

这些结论的发现能更好地指导应用波叠加法进行声场重构, 同时也将拓宽波叠加法的应用范围。

- [1] Koopmann G H , Song L , Fahlin J B 1989 *J. Acoust. Soc. Am.* **86** 2433
- [2] Song L , Koopmann G H , Fahlin J B 1991 *J. Acoust. Soc. Am.* **90** 2625
- [3] Jeans R , Mathews I C 1992 *J. Acoust. Soc. Am.* **92** 1156
- [4] Xiang Y , Huang Y Y 2004 *Acta Mech. Solida Sin.* **25** 35 (in Chinese) 向 宇、黄玉盈 2004 固体力学学报 **25** 35]
- [5] Yu F , Chen X Z , Li W B , Chen J 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2607 (in Chinese) [于 飞、陈心昭、李卫兵、陈 剑 2004 物理学报]
- [6] Bi C X , Chen J , Chen X Z , Li W B 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1264 (in Chinese) [毕传兴、陈 剑、陈心昭、李卫兵 2006 物理学报 **55** 1264]
- [7] Horse F 1997 *J. Sound Vib.* **203** 667
- [8] Xiao T K , Yu S G , Wang Y F 2003 *Numerical Methods for Inverse Problems* (Beijing : Science Press) (in Chinese) [肖廷凯、于慎根、王彦飞 2003 反问题的数值解法 (北京 科学出版社)]

Analysis of the impact factors on the accuracy of sound field reconstruction based on wave superposition *

Li Jia-Qing[†] Chen Jin Yang Chao Jia Wen-Qiang

(Research Institute of Vibration Shock & Noise , Shanghai Jiaotong University , Shanghai 200240 , China)

(Received 14 October 2007 ; revised manuscript received 19 November 2007)

Abstract

Wave superposition is a numerical method for calculating sound radiation based on the principle of equivalent source. However, the principle does not indicate definitely how to collocate these equivalent sources. So, it is necessary to evaluate its reconstruction accuracy and analyze the impact factors when wave superposition is applied to sound field reconstruction. The purpose of this study is to find some rules for improving the reconstruction accuracy. A number of impact factors on the precision of sound field reconstruction have been analyzed through theoretical analysis and numerical simulation. It has been proved that the equivalent sources have to be collocated inside of a radiator; moreover, it is best for them to conform to the radiator's shape. However, the measurement plane needs not to conform to the radiator's shape, and even does not need to measure in near-field. In addition, it has been shown that Tikhonov and TSVD regularization method can work well with wave superposition when applied to sound field reconstruction. On the basis of these rules, wave superposition can be used to perform better sound field reconstruction; and also its application range can be extended.

Keywords : sound field reconstruction , wave superposition method , impact factors on error , regularization methods

PACC : 4320 , 4360 , 4363

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50675140) and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA04Z175).

† E-mail : jqlivsn@163.com