

强背景下混响时间的非线性滤波 M 序列 相关测量

俞悟周

王佐民

(同济大学声学研究所 上海 200092)

1997 年 5 月 19 日收到

摘要 本文提出采用非线性滤波抑制在强背景噪声环境中用 M-序列相关法得到的房间脉冲响应中的残余噪声影响,以扩大混响衰减曲线的动态范围,从而达到能够在强背景噪声环境下准确测量混响时间的目的。首先讨论了影响 M-序列相关法测量混响时间的几个因素。其次,采用非线性滤波进一步抑制背景噪声的影响。结果表明,非线性滤波的效果相当显著。本文还在非白噪声背景条件下用该法进行强背景下的混响时间测量,结果与传统测量结果符合得很好。

关键词 M-序列,非线性滤波,声学测量

Method of measuring reverberation time in strong noise environment using nonlinear filtering of the M-sequence correlation

Yu Wuzou

Wang Zuomin

(Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract To enhance the dynamic range of decay curves and obtain accurate reverberation time under the condition of strong background noise, nonlinear filtering of impulse response obtained by M-sequence correlation technique is presented in the paper. First, several factors affecting the measurement by M-sequence are discussed. Second, nonlinear filtering is applied to improve immunity of M-sequence to background noise. Research shows that nonlinear filters work very efficiently without the need to cut off impulse response data. We also make similar measurements under the condition of non-white noise background. Results are in good agreement with those of conventional measurement when S/N is above 40dB.

Key words M-sequence, Nonlinear filtering, Acoustical measurement

1 引言

在混响时间的传统测量中,声源采用经过 1/3 倍频程滤波后的白噪声,当混响室内声场应用声学

达到稳定状态后关闭声源,用电平记录仪记录衰减曲线。由于声源信号的随机性引起衰减曲线的随机起伏,故需对大量的测量加以平均。

此外, 常规测量要求信噪比至少为 40dB, 以获得足够的动态范围。

由 Schroeder 提出的积分脉冲响应法是对常规测量方法的巨大改进^[1]。假设滤波器、放大器、房间等组成线性时不变系统, 则房间内衰减声压 $\langle S^2(t) \rangle$ 正比于系统的平方脉冲响应 $h^2(t)$ 的积分:

$$\langle S^2(t) \rangle \propto \int_t^\infty h^2(\tau) d\tau \quad (1)$$

由该法获得的衰减曲线无规性大大减小, 相当于多次常规测量的平均。

若采用具有随机特性、自相关近似为 δ 函数、长度为 N 的周期 M 序列信号做声源, 可以很简便地求出系统脉冲响应, 并可抑制背景的影响, 提高信噪比。此时, 系统脉冲响应等于输入输出互相关:

$$h(t) = \frac{1}{T} \int_0^T S_i(\tau - t) S_o(\tau) d\tau \quad (2)$$

若输出信号的采样率等于输入信号的时钟频率, 上式可写成矩阵形式^[2]:

$$[h] = [M][S_o]/N \quad (3)$$

其中, $[M]$ 为包含 N 个右循环延时的 M 序列矩阵。通过构造置换矩阵可将 M 序列矩阵转化为 Hadamard 矩阵, 然后利用 Hadamard 变换快速计算脉冲响应^[2]。

M 序列相关法测量具有抑制背景噪声的能力。但对于背景噪声很强的情况, 比如现场测试厅堂, 得到的脉冲响应仍不可避免地被背景噪声所干扰, 尤其对脉冲响应衰减尾部的影响更为显著。这种干扰称为“残余噪声”。残余噪声的存在使得混响衰减曲线的动态范围随信噪比的降低而明显减小。因此在强背景噪声条件下有必要进一步改进 M 序列相关法以精确测量混响时间。

2 强背景下混响时间 M 序列相关测量中几个影响因素的实验分析

实验在同济大学声学所标准混响室中进行。在混响室内均匀地铺设一定的吸声材料使

得混响时间控制在 M 序列的周期之内。首先在无外加背景噪声情况下 ($S/N > 40\text{dB}$) 采用 M 序列相关法测量, 混响衰减曲线如图 1 所示。混响时间 T_{60} 为 0.68s。(限于篇幅, 本文只给出中心频率为 1kHz 的 1/3 倍频程测量结果)

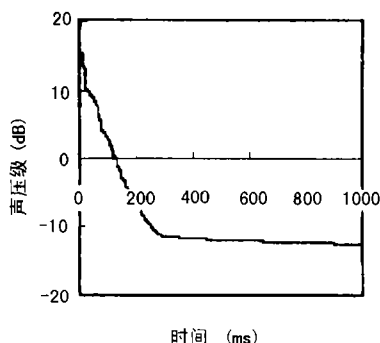


图 1 无外加背景时的混响衰减曲线

2.1 采样平均数

根据随机理论, 当背景噪声是随机信号时, 多次测量的平均结果可以抑制部分噪声, 提高信噪比^[3]。当外加噪声不是很强时, 提高采样平均数可得到良好的结果。但在背景噪声很强的情况下, 采样平均数将变得很大, 造成测量时间大大增加。而且, 采样平均数达到一定数目后, 继续增加采样平均数效果并不显著。因此, 在背景噪声很强的情况下, 不能一味提高采样平均数以扩大衰减动态范围。

2.2 M 序列长度的选取

理论上序列长度越长, M 序列自相关越接近于 δ 函数, 抑制背景噪声的能力就越强。但实际中 M 序列长度的增加并不一定能够更好地消除背景噪声的影响, 相反地, 还有可能减小混响衰减曲线的动态范围。用时钟频率一致、长度分别为 32k、64k、128k、256k 的 M 序列在无外加背景噪声情况下进行测量, 采用 16 位精度 A/D 采样板 (M 序列的长度应为 $2^n - 1$, 为方便起见, 此处记为 2^n)。将脉冲响应数据进行截断, 积分上限取为 32k 长度 M 序列周期 T_{32k} 。采用不同长度的 M 序列得到的混响衰减曲线如图 2 所示:

图 2 中结果表明, 对于我们所采用的测试系统, 64k M 序列得到的混响曲线动态范围最大, 32k、128k M 序列得到的动态范围相仿, 而 256k M 序列得到的曲线动态范围最小。因此, 在实际测量中并不是 M 序列长度越大, 抑制背景的能力就相应增强。这是因为, 在

互相关及积分运算过程中会不可避免地引入计算累计误差。 M 序列长度增加时, 这两部分的累计误差也增加。在累计误差影响不大的情况下, 序列长度增加引起的随机特性增强超过了累计误差的影响; 当 M 序列长度继续增加时, 累计误差的影响将抵消随机特性的增强。

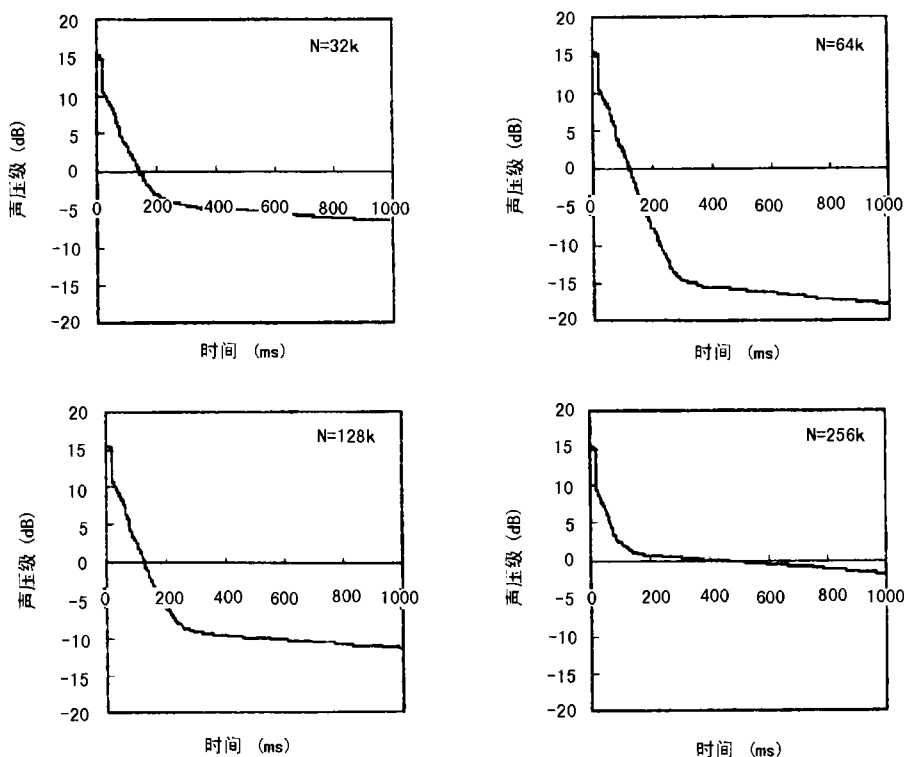


图 2 无外加背景, 同一积分限下不同长度 M 序列测得的混响曲线

2.3 M 序列时钟频率的影响

理论上, 时钟频率越高, M 序列的自相关越接近 δ 函数, 抑制背景噪声的能力就越强, 测量动态范围应相应增大。实测表明, 较低时钟频率的 M 序列反而能得到更好的测量结果。

在信噪比为 -5dB、序列长度为 64k 的条件下, 对中心频率为 1kHz 的 1/3 倍频程滤波输出信号, 在采样率 (等于钟频) 满足采样定律的情况下, 时钟频率分别取 15.35k, 19.72k, 23.83k, 24.8k。实验结果如图 3 所示:

从图 3 可看出, 采样率的提高并不意味着曲线动态范围的扩大。这是因为提高采样率有

可能导致扬声器和功率放大器的频响畸变, 反而减小动态范围。另一方面, 时钟频率的提高使一个测量周期内输入信号的总能量减小, 在采样平均数一定的情况下, 整个测量过程内信号能量减小, 从而降低信噪比。因此在实际测量中, 应在满足采样定律及序列周期大于混响时间的前提下, 尽可能降低 M 序列的时钟频率。

3 脉冲响应的非线性滤波

中值滤波和均值滤波是两种能有效抑制噪声的非线性滤波技术。中值滤波定义为: 设置

一个长度为 n 的窗口, 将其遍移序列上的点, 且用窗内原始值的中值 $Median\{x_i\}$ 代替窗口中心点的值 y_i ,

$$y_i = Median\{x_i\} \\ = Median(x_{i-v}, \dots, x_i, \dots, x_{i+v}) \quad (5)$$

n 为奇数时 $v = (n - 1)/2$; n 为偶数时 $v = n/2$ 。

均值滤波定义为: 将一个长度为 n 的窗口遍移序列上的点, 且用窗内原始值的均值代替窗口中心点的值,

$$y_i = (x_{i-v} + \dots + x_i + \dots + x_{i+v})/n \quad (6)$$

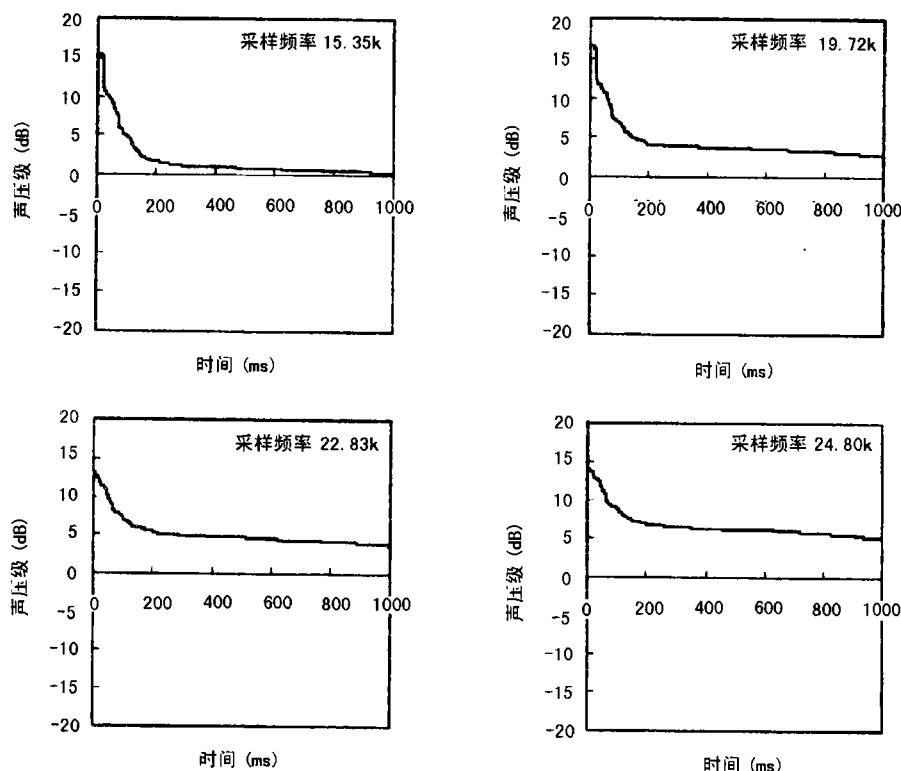


图3 信噪比 S/N 为 -5dB 时不同采样率下的混响曲线

3.1 背景噪声下的脉冲响应

当存在背景噪声 $n(t)$ 时, 脉冲响应为:

$$h(t) = \frac{1}{T} \int_0^T S_i(\tau - t)[S_o(\tau) + n(\tau)]d\tau \\ = h_i(t) + N(t) \quad (7)$$

$h_i(t)$ 为真正的脉冲响应。因为 $n(t)$ 和 $S_i(t)$ 实际上不可能完全不相关, 当 $n(t)$ 较强时, $N(t)$ 为背景噪声的贡献, 即“残余噪声”。残余噪声是造成混响衰减曲线动态范围下降的原因。背景噪声很强时, 从图4可看出, 背景噪声对脉冲响应尾部部分影响很大。

图4表明, 背景噪声很强时, M 序列不

能完全抑制噪声的影响, 得到的脉冲响应尾部并不随时间衰减至零, 而是随机分布的噪声, 且随着背景噪声的增强而增强。

3.2 滤波起始点

为了能够在低信噪比条件下得到接近真实的脉冲响应, 我们将脉冲响应进行非线性中值或均值滤波, 以进一步抑制背景噪声的影响。

从图4可看出, 峰值附近背景噪声的影响相对很小。背景噪声对脉冲响应的干扰主要在脉冲响应的衰减部分。故可从实际测得的脉冲响应曲线衰减趋于平坦时的尾部区域进行非线性滤波。

图5为 $S/N = -15\text{dB}$ 时, 由经过中值和均

值滤波后的系统脉冲响应得到的混响衰减曲线。

图 5 中曲线 a、b 得到的混响时间分别为 0.72s、0.73s，计算结果与无外加背景时得到的混响时间 0.68s 吻合良好。

起始点应选取在脉冲响应峰值部分和尾部

部分的转折区域内。混响衰减曲线对不同的起始点的选取不敏感。但起始点若太过靠近峰值区域，则得到的混响衰减曲线有比较锐的下降区，如图 6(a) 所示；另一方面，若起始点太靠近尾端，则影响到所得的混响曲线的动态范围，如图 6(b) 所示。

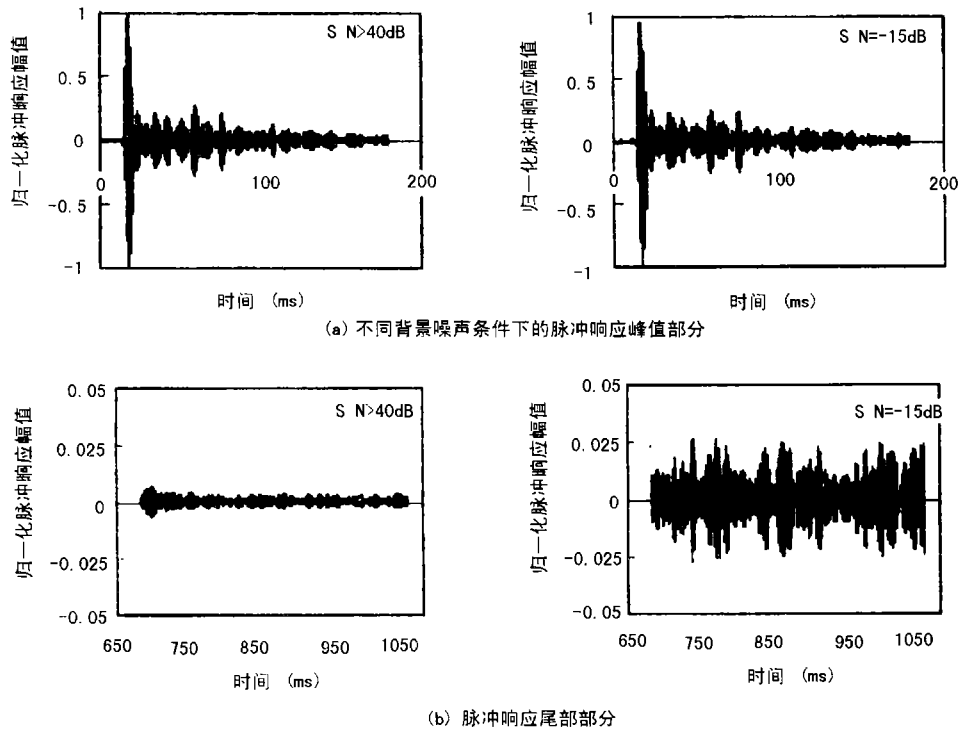


图 4 不同信噪比条件下的脉冲响应曲线

3.3 滤波窗口宽度的选择

不同滤波窗口宽度的滤波器抑制背景噪声的效果是不一样的。窗口小的滤波器抑制背景能力较低，窗口宽度大的抑制能力较强，但若窗口宽度过大，则一是引起信号的丢失，二是大幅度增加计算量，运算时间增大。因此需将滤波结果同计算时间结合考虑，选取最佳宽度。对于我们所采用的测试系统，中值滤波、均值滤波在不同信噪比条件下的最佳滤波窗口宽度 N_w 的经验拟合公式为 (ΔL_{sn} 为信噪比)：

中值滤波：多项式拟合

$$N_w = 0.1608(\Delta L_{sn})^2 + 2.7419(\Delta L_{sn}) + 12.451 \quad (8)$$

均值滤波：指数拟合

$$N_w = 9.1065e^{0.114\Delta L_{sn}} \quad (9)$$

3.4 非白噪声背景

上述测试是在混响室中用白噪声作背景的，由于现场中的噪声不一定为白噪声，因此有必要模拟实际情况进行测试。我们在混响室内用多个电台的混合声音模拟厅堂现场，取代白噪声信号发生器。虽然测试环境中的背景噪声并不是白噪声，但经过多次采样平均后得到的噪声趋于正态白噪声分布，因此所得的脉冲响应残余噪声也趋向于正态白噪声。采用中值滤波和均值滤波分别处理，得混响曲线如图 7 所示。图中两条曲线得到的混响时间分别为

0.65s、0.6s，结果与白噪声背景情况相仿。可见，非线性滤波法对非白噪声背景也适用。

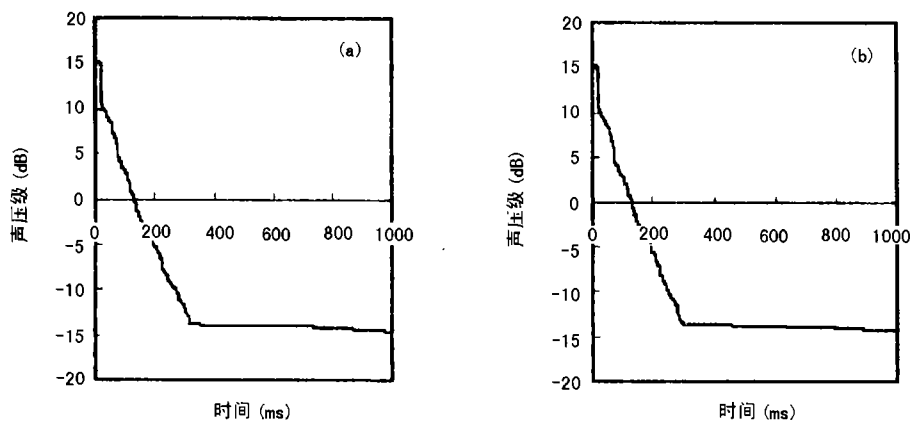


图 5 不同滤波起始点下的混响曲线
(a) 中值滤波结果 (b) 均值滤波结果

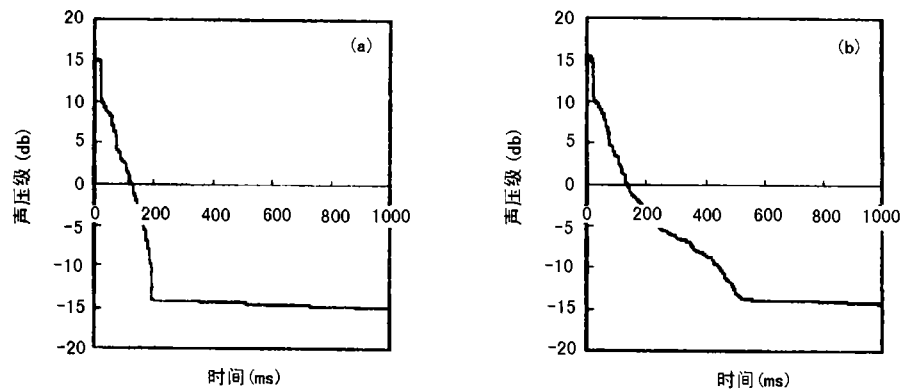


图 6 不同起始点下的混响曲线
(a) 起始点太靠近峰值区域时的混响曲线 (b) 起始点太靠近尾端区域时的混响曲线

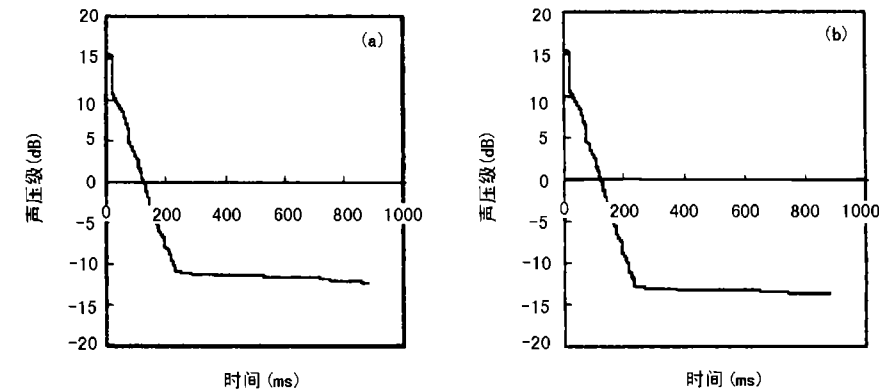


图 7 非白噪声背景下非线性滤波后得到的混响曲线
(a) 中值滤波结果 (b) 均值滤波结果

(下转第 48 页)

表面脉动压力对突体水动力噪声的作用小。

表 1 给出的 M2-M4 与 M1 的总声级差值, 2# 水听器的差值大于 1# 水听器的差值, 其原因应该是 2# 水听器接近尾缘, M1 的边界层发展比较充分, 相应的噪声对 2# 水听器的贡献也大。M2-M4 的压力分布比较平缓, 边界层的发展得到一定的抑制, 1# 和 2# 水听器接收到的噪声差别也就小。

前面提到, 湍流脉动压力的直接声辐射和它的二次声辐射, 分别与摩擦系数的三次方和二次方成正比。因为摩擦系数与表面摩擦应力成正比, 表面摩擦应力越小, 摩擦系数也越小, 相应的水动力噪声就越小。所以可以推测, 低阻力剖面突体, 它的水动力噪声也低。

4 结束语

突体的剖面线型, 会改变马蹄涡和表面脉动压力的特性, 因而影响其水动力噪声特性, 从其机理分析和本文的模型试验, 可以得到以下结果:

(1) 模型试验测量的噪声强度与速度的 5.2-6.2 次成正比, 近似地符合前人分析的水动力噪声的辐射规律, 即噪声强度与速度的 5.4-6.6 次成正比。结果还表明, 四只模型噪声的主要差别在较低频段, 这与脉动压力受压力分布的影响也主要在低频的机理一致。

(2) 不同的剖面线型, 表面静压分布不同, 产生不同的表面脉动压力和马蹄涡, 从而确定了它们不同的噪声特性; 试验结果表明, 马蹄

涡比表面脉动压力对突体水动力噪声的作用小。

(3) 剖面线型的声学设计, 应选取表面静压力分布平坦、顺压区域大的线型。采用前缘半径较小, 头部较尖锐, 最大厚度在 45% 弦长左右的翼型, 有利于降低突体水动力噪声; 从试验结果可以推测, 阻力较低的剖面, 水动力噪声也较低。

(4) 模型试验表明, M1 噪声最大, M2 的噪声其次, M3 和 M4 比 M1 的噪声谱级小 3-5dB。低噪声突体剖面宜选用这两种翼型面。

参 考 文 献

1 俞孟萨, 康红文, 张志强. 舰船性能研究, 1994, 4: 7-15.
2 Richards E J, Willis J L. Underwater Acoustics. chapter15, Ed.by Albers V M, Plenum Press, 1961.
3 Burcher K K. Submarine hull shaping by fluid singularity Method. Warship'91 Inter.Sym. on Naral Submarines ,London, 1991.
4 Eppler R, Shen Y T. J.of Ship Research, 23(3): 209-217.
5 Blake W K. Mechanics of flow-induced sound and vibration. Academic Press, INC, 1986, 595-620.
6 Ross D. Mechanics of Underwater Noise, Pergumon Press Inc, 1976, 184-196.
7 Mehta R O. Aeronautical Journal, 1984, 77: 456-460.
8 Panton R L. J.Fluid Mech, 1974, 65(2): 261-287.
9 穆 宁. 航空声学. 曹传钧译, 北京航空航天大学出版社, 1993, 278-296.
10 Schloemer H H. J.Acous.Soc.Am., 1967, 42(1): 93-102.
11 Abbott I H. Theory of wing sections. Dover Publications, 1959, 311-381.

(上接第 16 页)

4 结论

本文讨论了影响 M 序列相关法测量混响时间的几个因素: 采样平均数、M 序列长度、采样率等。非线性滤波(中值滤波、均值滤波)对抑制脉冲响应的残余噪声很有效, 在强背景噪声下, 无需对脉冲响应进行数据截断, 通过一

定宽度的非线性滤波, 可以得到满意的混响衰减曲线动态范围, 进行混响时间的准确测量。

参 考 文 献

1 Schroeder M R. J.Acoust.Soc.Am., 1965, 37(3): 409-412.
2 Chu W T. Applied Acoustics, 1990, 29(3): 193-205.
3 Wang Zuomin, Chu W T. J.Acoust.Soc.Am., 1993, 94(3): 1409-1414.