

# 信号处理方法对室内声学参量计算结果的影响

赵跃英, 盛胜我

(同济大学声学研究所, 上海 200092)

**摘要:** 在室内声学参量的测量中, 不同的信号处理方法将会使计算结果产生偏差。在数字化测量的基础上, 根据 ISO3382 的测量标准, 针对混响时间以及其它声学参量, 比较了在信号处理过程中不同的滤波器、信号初始时间的判断方法以及噪声修正方法对声学参量的计算结果的影响程度。结果表明, 不同的数据处理方法在低频段、信噪比较小以及混响时间较短的情况下对声学参量的影响较大; 与一般的噪声修正法相比, 当信号信噪比不足时, 对中后期的脉冲响应进行非线性拟合的方法更具优势。

**关键词:** 室内声学参量; 脉冲响应; 噪声修正; 非线性拟合

中图分类号: TB559 文献标识码: A 文章编号: 1000-3630(2004)03-0154-05

## Effect of signal processing methods on room acoustical parameter estimation

ZHAO Yue-ying, SHENG Sheng-wo

(Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In measuring parameters of room acoustics, different signal processing methods will lead to different results. Based on the international standard ISO3382 and using digital measurements, acoustical parameters including reverberation times ( $T_{20}$ ,  $T_{30}$ ) and other quantities such as  $EDT$ ,  $T_s$ , and  $D_{50}$  are used to study and compare the influences of different filters, initial time judgment and noise correction methods on the obtained results. It is concluded that at low frequencies there is more deviation if signal-to-noise ratio is low or the reverberation time is short. Compared to ordinary noise correction methods, non-linear fitting with a middle and later impulse response function is more advantageous when SNR is relatively low.

**Key words:** room acoustical parameters; impulse response function; noise correction; non-linear fitting

## 1 引 言

随着计算机技术的发展, 室内声学测量进入了数字信号测量时代, 传统的以噪声中断法测量混响时间的方法逐渐被脉冲积分法 (schroeder 积分法) 所替代<sup>[1]</sup>, 测量的关键就成为对房间脉冲响应函数的获取。只要得到房间的脉冲响应函数, 就可以应用脉冲积分法得到反映房间声能衰变的积分曲线, 得到混响时间 ( $T_{20}$ 、 $T_{30}$ )、早期衰减时间 ( $EDT$ )、时间中心 ( $T_s$ ) 以及声能比 ( $C$ 、 $D$ ) 等各室内声学参量, 从而更为准确、方便地描述房间声场的变化规律。

数字测量系统由发射、接收以及数据处理等部

分组成。在室内, 将数字的电信号通过 D/A 转换后输入扬声器以激发声场, 在接收点接收信号后, 再转换为数字信号输入计算机进行相应的数据处理。许多研究表明, 室内声学参量的测量精度受到测试系统中各种因素的影响。例如, 对发射、接收系统来说, 不同的激发信号、不同的扬声器响应和指向特性等会造成声学参量的测量偏差<sup>[2,3]</sup>。

另一方面, 当获取房间脉冲响应函数后, 必须通过一系列的信号处理方法, 包括数据截取、滤波、噪声修正、零点选取等过程, 最终经过积分, 计算出各室内声学参量。在此过程中, 不同的信号处理方法将会使声学参量的计算结果产生偏差。ISO3382 标准(房间混响时间及其它声学参量的测量)对应用脉冲积分法测量房间混响时间做了详细的规定, 但对其它声学参量的测量与计算并未作仔细的讨论。

选择了一个体积较小 (3.2m × 5.7m × 2.8m) 的

小房间和一个体积较大(5000m<sup>3</sup>)的大厅作为两个典型的测量对象,首先按传统的噪声中断法进行测量,可以得到它们的平均混响时间分别为0.5s和1.2s,然后再用线性调频信号激发一个12面体无指向性扬声器作为测试声源进行数字化测量,在房间的测点处用无指向性测试传声器接收到的信号经放大、A/D转换后输入计算机,如果暂不考虑扬声器以及测量系统的其他部分响应的影响,只要将得到的信号与激发电信号直接进行相关,即可得到房间的脉冲响应函数。

本文根据ISO3382的测量和计算标准,针对混响时间( $T_{20}$ 、 $T_{30}$ )以及其它声学参量( $EDT$ 、 $T_s$ 、 $D_{50}$ 等),通过使用数据处理过程中不同的滤波器、信号到达时间的判断方法以及噪声修正方法,比较其效果,阐明了这些过程对声学参量的计算结果的影响程度,对今后的室内声学参量的测量具有实际的参考价值。

## 2 滤波器的窗函数对参量计算结果的影响

因为窗函数设计法设计的FIR(有限冲积响应)数字滤波器的特点是具有严格的线性相位,很适用于声学参量的分析<sup>[4]</sup>,所以我们选用这种滤波器对得到的脉冲响应进行滤波处理。

滤波器的通带与阻带之间的衰减量称为阻带衰减;通带与阻带不是理想的突然变化的两个区域,而是存在一个连续变化的区域,称为过渡带。滤波器的性能就主要取决于它的阻带最小衰减和过渡带宽度。一般来说,过渡带越窄、阻带衰减越大,则滤波误差越小,滤波结果越理想,但是,这两方面是不能同时满足的,往往为了得到足够大的阻带衰减而不得不增大过渡带的宽度。窗函数设计法设计的滤波器有两个主要的选项:窗函数类型和窗函数宽度。不同的窗函数类型决定了滤波器的阻带最小衰减,不同的窗函数宽度决定了滤波器过渡带的宽度。

### 2.1 不同窗函数类型的影响

分别用以矩形窗、汉宁窗和海明窗设计的滤波器对脉冲响应进行滤波处理。不同窗函数的滤波器主要表现为它们的通带与阻带之间的衰减量的不同,在其它条件相同的情况下,这一量值越大,滤波器的性能越理想。三种窗函数的阻带最小衰减分别为:-21dB、-44dB、-53dB。

从应用结果可以看出,对中心频率为125Hz的倍频程来说,不同的窗函数类型对 $EDT$ 的影响大于其他参量,且小房间的 $EDT$ 受到的影响明显大于大厅受到的影响;图1为小房间各倍频程 $EDT$ 的计算结果,其中在中心频率为125Hz倍频程使用矩形窗所得到的 $EDT$ 与使用其它两个窗所得到的 $EDT$ 之间的偏差大于10%;中心频率为500Hz及以上倍频程的声学参量受到的影响较小,可以忽略。由于矩形窗的阻带衰减太小,不符合声学参量的测量要求,相比之下,海明窗的各项性能优于汉宁窗。因此,在它们之中,选择海明窗更为合理。

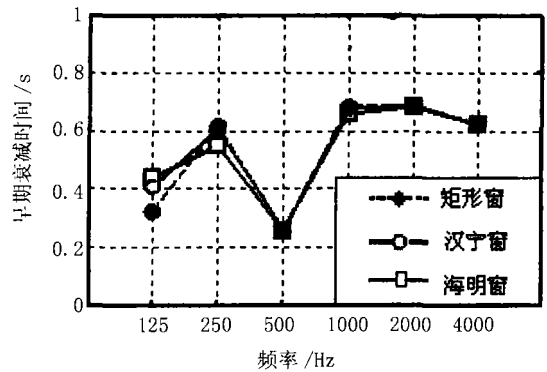


图1 (小房间)  $EDT$  与窗函数类型之间的关系

### 2.2 不同窗函数宽度的影响

我们选择以海明窗设计的滤波器分别对脉冲响应进行倍频程滤波处理,适当改变滤波器窗函数的宽度,比较其对声学参量的影响程度。

根据滤波器理论,窗函数的宽度 $N$ 决定了滤波器过渡带的宽度,海明窗的过渡带宽度为 $8\pi/N$ ,过渡带的宽度原则上是越窄越好,即 $N$ 值越大越好,但 $N$ 值受到FFT运算中序列的长度限制,不是可以无限加大的。

由于频率越高、倍频程的频带宽度越宽,相对来说过渡带所产生的影响就越小,因而同样宽的过渡带对低频产生的影响远大于其对高频产生的影响。其通带宽度记为 $B$ ,过渡带宽度为 $\Delta\omega$ ,对中心频率为125Hz的倍频程,改变过渡带宽度,使通带宽度 $B$ 与过渡带宽度的比值由1增加至4。计算结果表明,各声学参量均有所改变,其中小房间的 $T_s$ 与 $EDT$ 偏差可达5%以上,其它参量的偏差均在2~3%之间,而大厅受到的影响较小,各参量的偏差均在2%以内。

由于太宽的窗函数 $N$ 并不能完全消除滤波器产生的误差,却同时由于滤波后的数据存在 $N/2$ 的

群延时,造成了数据有效长度的减小以及脉冲响应后期数据的损失,因此,窗函数的宽度也不宜过大。

图2、图3分别为以125Hz倍频程滤波后小房间和大厅的早期衰减时间EDT与过渡带宽度的关系。可见,只要 $B/\Delta\omega$ 大于2,即过渡带宽度小于1/2通带宽度,就可基本满足滤波要求。

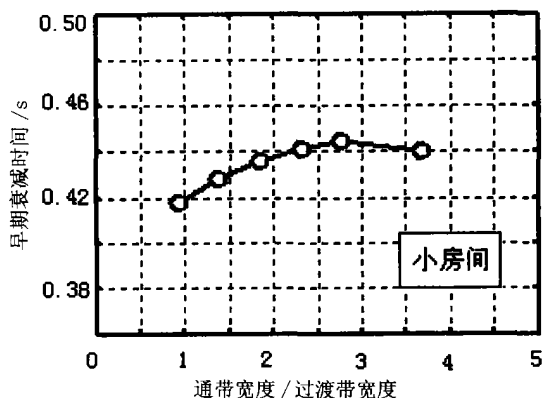


图2 小房间中 EDT 与过渡带宽度的关系(125Hz 倍频程)

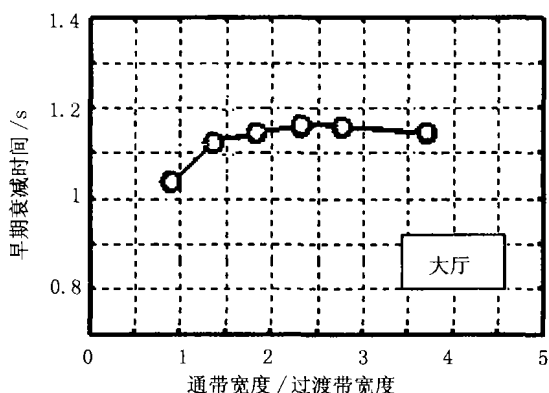


图3 大厅中 EDT 与过渡带宽度的关系(125Hz 倍频程)

### 3 不同时间判断方法对声学参量的影响

直达声到达时刻就是时间的起点 $t=0$ 的时刻。由各声学参量的定义可知,时间零点位置的判断和选取会直接影响计算结果,特别是 $C_{50}$ 、 $D_{50}$ 这些声能比参量对时间的起始点尤为敏感。将脉冲响应信号先滤波再进行时间零点的判断的方法称为先滤波后开窗;反之,先判断时间零点,再选取数据进行滤波的方法称为先开窗后滤波。

由于在频域进行滤波就是在频域截短数据,会造成时域上的脉冲向两边延展,这样对先滤波后开

窗的方法来说,滤波后低频信号的直达声的到达时间无法准确判定,因此一般都采用先判断宽频带信号的时间零点,再将其应用于各倍频程的计算。根据ISO3382标准,在计算声能比时(如 $C_{50}$ 或 $D_{50}$ ),前50ms的声能为 $t=0\sim 50\text{ms}$ 内的声能,再加上 $t=0$ 以前由频域滤波造成时域延展而产生的附加声能。但这种方法对 $t=50\text{ms}$ 附近的能量误差无法进行修正,这对低频且混响时间较短的脉冲响应的影响较大。

先开窗后滤波的方法是在滤波前先进行时间的选取和截断,例如在计算 $C_{50}$ 或 $D_{50}$ 时,首先确定直达声的到达时间,再分别对50ms前和50ms后的信号进行滤波,从而避免了由滤波造成时域延展而产生的能量误差。但是对数据进行时间的选取就是在时域开窗,截断数据,这同样会造成信号频域的变化,最终影响声能比参量的计算结果。

使用两种不同的时间判断方法进行 $D_{50}$ 的计算,并得到其相对误差。结果表明:对中心频率为125Hz的倍频程段,对小房间和大厅计算得到的误差均为7%左右,即误差大小与房间混响时间长短无关;对中心频率为250Hz及以上的倍频程段,误差可以忽略。虽然两种方法都存在固有的计算误差,但由于先滤波后开窗的方法可以直接应用脉冲积分的结果得到能量比和其它声学参量,因此比先开窗后滤波的方法更为简便。

### 4 不同的噪声修正方法对参量计算结果的影响

在时域对无限长、无噪声干扰的房间的脉冲响应 $p(t)$ 进行schroeder积分,相应不同的时刻 $t$ ,可得到的随时间变化的积分衰减曲线

$$E(t) = \int_t^{\infty} p^2(\tau) d\tau \quad (1)$$

其结果与传统的使用噪声中断法得到的房间声能衰减曲线等价。但在实际测量中,由于存在本底噪声,而不同长短的信号数据中,噪声能量所占的比例不同,若直接截取并应用积分法进行参量计算,其结果会因此受到不同程度的噪声的影响,从而产生误差。因此,进行噪声修正以消除其影响,提高信噪比,是提高测试精度的主要手段之一。ISO3382建议的噪声修正方法有两种:使用滑动的时间窗进行曲线平滑化法和截断后进行反射声补偿的脉冲截断法。

#### 4.1 曲线平滑化法

曲线平滑化法是一种传统的平均法。将一长度为  $T_0$  的时间窗(依照 ISO3382 的标准, 时间窗的长度  $T_0$  大约为混响时间的  $1/5$ ), 在时间轴上连续滑动, 并对窗内的房间脉冲响应的平方进行积分, 积分后得到的声能衰减曲线为:

$$E(t) = \int_t^{t+T_0} p^2(\tau) d\tau \quad (2)$$

这种积分方法相当于将  $T_0$  时间内的信号能量进行平均, 以此使上下起伏的曲线平滑, 得到平滑的声能衰减曲线后再对其进行线性拟合。

只要测得的脉冲响应的信噪比足够大, 就可以应用这种方法得到准确的混响时间。但是, 由于这种方法没有进行噪声修正, 因此当信号信噪比较小以及进行其它声学参量的计算时, 需要考虑噪声产生的影响。

#### 4.2 改进的脉冲截断法

一般的脉冲截断法是根据测得的房间脉冲响应的下降趋势, 在混响时间  $RT$  的  $3/4$  附近, 选择适当的位置  $t_1$ , 截取前面的有用信号, 忽略后面的噪声信号, 以降低噪声能量在总能量中所占的比例。截取后, schroeder 积分衰减曲线可写为:

$$E(t) = \int_t^t p^2(\tau) d\tau \quad (3)$$

截断法的关键是截断时间  $t_1$  的选取。  $t_1$  过大, 信号中噪声比过大, 积分后衰减曲线向上弯曲, 混响时间计算结果偏大, 后期反射声能也偏大;  $t_1$  过小, 信号的后期反射声不足, 积分后衰减曲线向下弯曲, 混响时间计算结果偏小, 后期反射声能也偏小<sup>[5]</sup>。

在对数坐标的脉冲响应的平方与时间的关系曲线中, 截断点一般取在声能衰减过程中曲线斜向下至水平的拐点附近, 即反射声恰好被背景噪声淹没处。由于这种截断法对截断点没有严格的规定, 而且忽略了截断点以前的噪声能量的影响, 也忽略了截断点以后的反射声能量, 因此, 各声学参量的计算结果会随截断点位置的变化而变化, 增加了各声学参量的计算误差<sup>[6]</sup>。

ISO3382 建议使用使用的是改进的截断法。在选取截断点  $t_1$  进行积分后, 再对被忽略的后期反射声能进行补偿, 补偿后的积分衰减曲线为:

$$E(t) = \int_t^t p^2(\tau) d\tau + C \quad (4)$$

其中截断点  $t_1$  仍然是反射声能恰被背景噪声淹没处,  $C$  为对被忽略的后期反射声能的补偿。由于房间内中后期的反射声可以认为是以相同衰减率指数衰减的, 因此在脉冲衰减曲线上从时刻  $t_1$  向前选取时刻  $t_0$ , 使  $p^2(t_0)$  比  $p^2(t_1)$  高 10dB 左右, 对  $t_0$  至  $t_1$  的脉冲响应  $p(t)$  的平方(对数坐标)进行线性拟合并向后延长, 延长部分即可作为对被忽略的后期反射声的补偿, 即式(4)中的  $C$ 。补偿后, 积分曲线的信噪比增大, 相应的声学参量计算结果也更为准确, 且适用于混响时间以及其它各声学参量的计算。

但是, 这种方法虽然补偿了截断点以后的反射声能量的损失, 却没有考虑对截断点以前的噪声的影响。另外, 当信号的信噪比不是很大时, 计算结果对截断点  $t_1$  的取值较为敏感, 太小会丢失有用的测量信号, 太大则计算结果会受到噪声的影响, 使补偿值  $C$  以及混响时间的计算结果偏大, 造成误差。

#### 4.3 拟合法消除本底噪声的影响

在测试环境不佳的情况下, 为了消除本底噪声的影响, 可以采用对脉冲响应进行非线性拟合的方法。假设房间的脉冲响应  $p(t)$  由反射声序列  $h(t)$  和与反射声不相关噪声  $n(t)$  组成<sup>[7]</sup>, 由于房间的中后期的反射声场可以认为是一扩散声场, 其能量可看作是按指数规律衰减的, 而噪声能量被认为是稳定的, 即

$$p^2(t) = Ae^{-Bt} + \bar{n}^2 \quad (5)$$

其中,  $A$ 、 $B$  为常数,  $\bar{n}^2$  为噪声能量的平均值。

避开早期反射部分, 在脉冲响应平方  $p^2(t)$  的中部选定足够长的测量数据  $t_0 \sim t_1$  对式(5)进行非线性拟合, 从而得到其纯粹的反射声能量项以及平均噪声能量, 然后再进一步消除噪声的影响, 得到整个时域的无噪声影响的反射声能量及各声学参量。

从计算过程看, 非线性拟合修正噪声的方法不需要精确判断截断点的位置, 只要估计一下使进行拟合的  $t_0 \sim t_1$  段的数据在脉冲响应的中后期, 满足反射声为指数衰减而噪声为稳态的条件即可, 因此减小了由操作引起的偶然误差。

用计算机模拟的方法, 在小房间的脉冲响应中加入  $-35\text{dB} \sim -40\text{dB}$  不等的噪声信号, 图4图5分别为在小房间使用改进的脉冲截断法与使用上面所述的非线性拟合法修正噪声后得到的 125Hz 频段的  $T_{20}$ 、 $T_{30}$  的结果。从图中可以看出, 用非线性拟合法修正噪声所得到的结果较为平稳, 受信噪比的影响

小,特别对  $T_{30}$  尤为明显,也就是说,这种方法更适用于信噪比较低的情况。

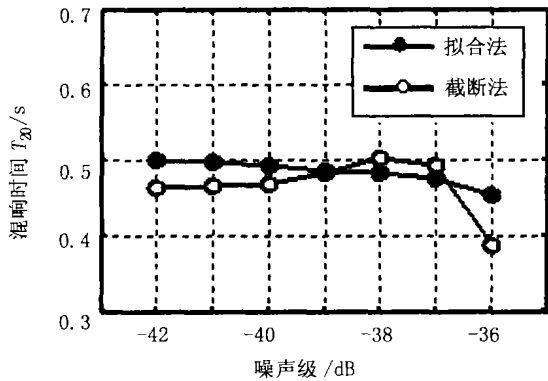


图4 不同信噪比, (小房间 125Hz)  $T_{20}$  与噪声修正方法的关系

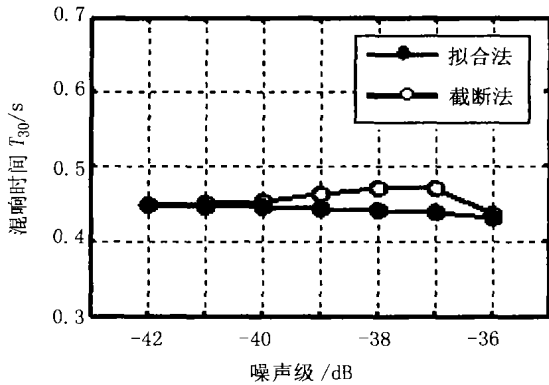


图5 不同信噪比, (小房间 125Hz)  $T_{30}$  与噪声修正方法的关系

这种非线性拟合法的优点为: 第一,普通的截断法其计算结果随信号截断点  $t_1$  的变化而变化,改进的截断法需要在计算过程中根据具体情况对截断点  $t_1$  进行调节,较为繁琐。非线性拟合法直接对中后期的脉冲响应的平方进行拟合,只要求拟合的数据避开非完全扩散的早期反射部分,而不要求精确判断截断点  $t_1$  的位置,最终修正后的反射声衰减曲线并不受其影响。第二,从理论上说,在对数坐标中,由于噪声的影响,即使是完全扩散的反射声部分,其能量也不是线性衰减的,而非线性拟合法可以消除噪声在反射声衰减曲线中的所产生的非线性误差。噪声消除后,信噪比明显加大,参量计算的结果更为合理、精确。

## 5 结 论

从上述比较结果来看,不同的数据处理方法主要对低频段或信噪比较小的情况下对声学参量有影响,混响时间短的房间受到的影响较大。具体结论如下:

不同的滤波器对脉冲响应低频段的处理结果有影响,最终导致对声学参量的影响。对用窗函数设计法设计的 FIR 数字滤波器,窗函数的类型可选海明窗或具有更大阻带衰减的窗口,窗函数的长度不需过长,只要满足低频段的滤波要求即可。

对脉冲响应起始点的判断会影响声能比参量的计算结果。由于在信号的频域滤波会造成其时域的不确定性,而在时域开窗又会造成信号频域的变化,因此不论是先滤波还是先开窗都存在固有的计算误差,选取较为简便的先滤波后开窗的方法是合理的。

不同的声能衰减曲线或积分衰减曲线的噪声的修正方法,主要影响混响时间  $T_{20}$  以及  $T_{30}$  的结果。改进的截断法对截断后被忽略的反射声进行了补偿,效果良好,计算精度较高,但并没有考虑截断点前噪声所带入的误差。而当测试条件不佳,信噪比较小时,考虑截断点前噪声的影响是必要的。

当测试条件不佳,信噪比较小时,对中后期的脉冲响应的平方进行非线性拟合可以得到消除噪声影响后的反射声的能量衰减曲线。这种拟合方法的优势为: 第一,拟合时不要求精确判断截断点的位置,最终修正后的反射声衰减曲线并不受截断点的影响; 第二,这种噪声拟合修正法既消除了噪声的影响又保留了早期反射声的复杂特征,同时对后期被噪声淹没的反射声进行了补偿; 第三,噪声消除后,信噪比较大,各参量计算的结果更为合理、精确。

## 参 考 文 献

- [1] Schroeder M R. New method of measuring reverberation time [J]. J Acoust. Soc Am, 1965, 37(1): 409-412.
- [2] 赵跃英, 盛胜我. 室内声学测量中常用声源性能的比较 [J]. 声学技术, 2003, 22(2): 76-79.
- [3] 赵跃英, 盛胜我. 室内声学测量中数字化声源性能的分析 [J]. 声学技术, 2003, 23(3): 143-147.
- [4] 程佩青. 数字信号处理教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997. 185-215.
- [5] Morgan D R. A parametric error analysis of the backward integration method for reverberation time estimation [J]. J Acoust Soc Am, 1997, 101(5): 2686-2693.
- [6] Bietz H. Uncertainties of measurements in room acoustics [J]. Acustica, 1995, 81(1): 344-355.
- [7] XING Ning. Evaluation of reverberation time using a nonlinear regression approach [J]. J Acoust Soc Am, 1995, 98(4): 2112-2121.
- [8] Vorlander M, Bietz H. Comparison of methods for measuring reverberation time. Acustica, 1994, 81(1): 206-220.