

# 用计算机测量混响时间

胡春年 冯荣 朱纯

(南京大学声学研究所)

利用计算机代替电平记录仪测量混响时间,使得混响时间的测量和测试结果的分析能实时进行,这样可以节省测试后处理数据的时间。本文介绍了测量用的程序和测试结果,并与采用传统方法的测量结果进行了比较。

## 一、引言

利用混响室测量吸声材料的吸声系数和声源(例如机器)的声功率时,都必须测量混响时间。在衡量厅堂的音质时,也要测量混响时间。在迄今进行常规测量中,往往需要利用一台频谱分析仪和电平记录仪,并且测试所得的混响衰减曲线还必须通过人工逐条分析和计算,这些都需要耗费大量的人力和时间。若用计算机来测量和分析,只需要对计算机配上一块A/D模数转换器(A/D的采样速率为每秒 $10^4$ 次),就能实时的测量混响时间,并把测试结果和多条曲线的平均值打印出来。计算机可以自动地删去不合要求的混响衰减曲线(例如信噪比太低,或测量时操作不当等),不进行平均。倘若待测的房间扩散不好,由此所得的混响衰减曲线是弯曲的,从打印结果中也可得到反映。表1是南京大学混响室在测试频率 $f=250$ 赫时,用计算机测试所打印的结果。当然在进行规模较大的测量时,不一定必须采用表1的格式,而可以修改程序,按照需要的格式,把测试结果打印出来,例如只打印平均的混响时间值,或将不同频率的平均值打印在同一行上。

## 二、测量原理和程序的分析

在扩散很好的房间中,声强按指数规律

表1 混响时间打印结果

F=0250 Hz				
T <sub>60</sub> (15):				
07.92	07.28	07.39	07.70	06.34
T <sub>AV</sub>				
07.32				
T <sub>60</sub> (30):				
07.89	07.99	07.99	08.19	06.76
T <sub>AV</sub>				
07.76				

衰减,混响时间定义为声级衰减60分贝所需的时间。在实际测试中,信噪比很少能达到60分贝,若用磁带录音机进行现场记录,然后再进行分析测量的话,信噪比将更低。因此,测试时一般都是根据声级下降15~35分贝的曲线,求出声级下降的斜率,然后再求出混响时间 $T_{60}$ 。用计算机测量也类似地先测量出声级下降15分贝和30分贝所需的时间,然后分别乘上4倍或2倍,由此得到所需的

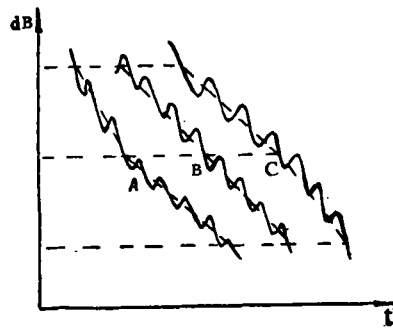


图1 混响衰减曲线

- A:  $T_{60}(15) < T_{60}(30)$     B:  $T_{60}(15) = T_{60}(30)$   
C:  $T_{60}(15) > T_{60}(30)$

$T_{60}$ 值。若混响衰减曲线是直的，则从衰减15分贝和30分贝分别所测得的两个  $T_{60}$  数值应该相等；反之，若两个  $T_{60}$  值不相等，则可定性地推知混响曲线是弯曲的，如图 1 所示。

用计算机测量混响时间的程序方框图如图 2 所示。下面对程序中各部分进行分析。

### 1. A/D取样和平均

在测试时，必须首先把输入的混响衰减信号进行A/D模数转换。由于声压是有正有负的交变量，用频谱仪和电平记录仪进行声压测量时，仪器内部都装有整流、平均线路，求出其均方值，再按一定的时间常数，用表头或用记录仪指示出来。用计算机进行测试时，也应当有相应的处理，对采样值进行平

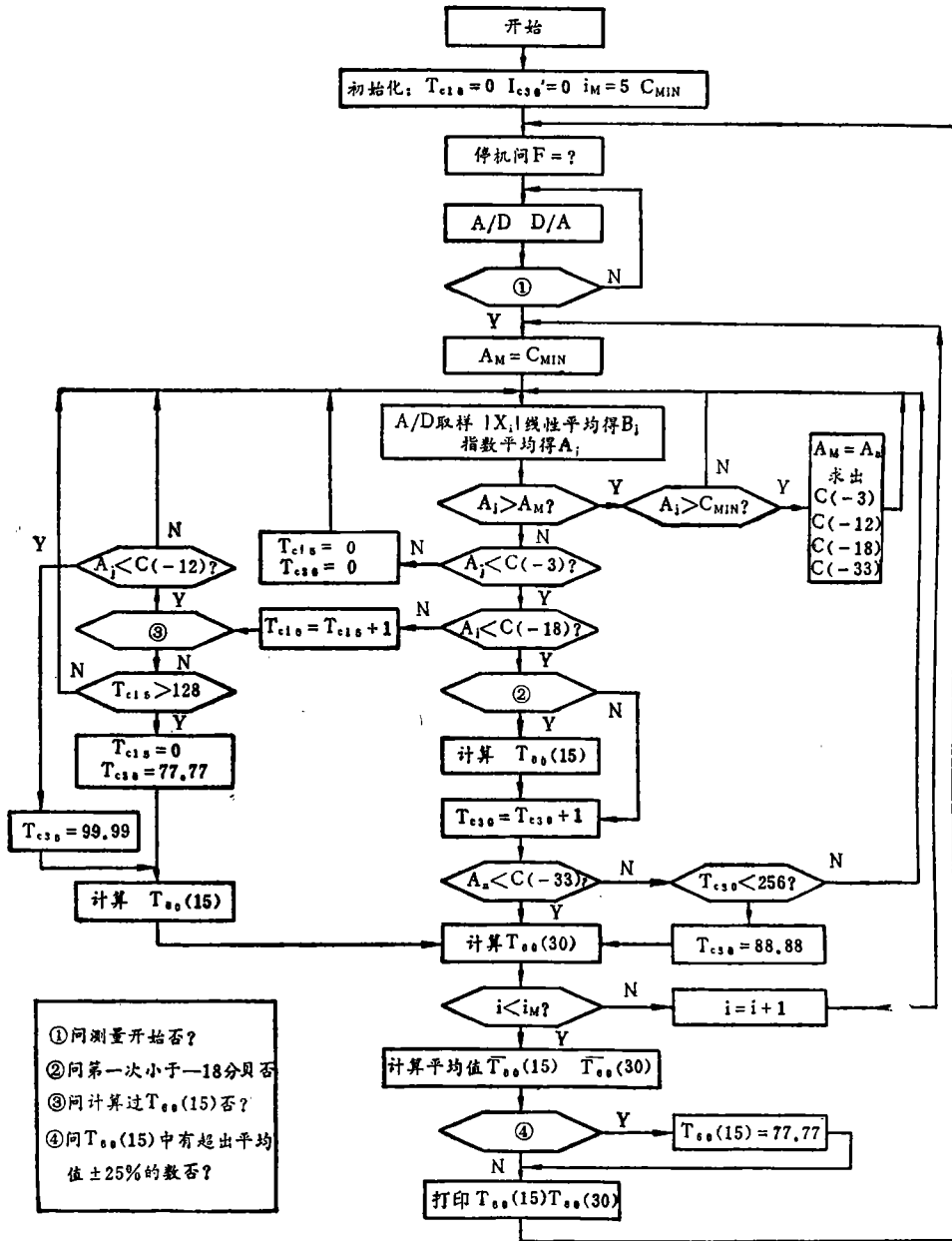


图 2 计算机测量混响时间的程序流程图

方和。为了运算简单，以采样值的绝对值之和来代替平方和。设输入序列为  $x_i$ ，则先求出相继的256个  $x_i$  值绝对值之和  $B_j$ ：

$$B_j = \frac{1}{256} \sum_{i=256j}^{256(j+1)} |x_i| \quad (1)$$

在混响时间测量中，普遍使用白噪声作为声源信号，它的振幅在时间上按高斯无规分布。虽经256点的采样平均，在衰减过程中总的趋势是按指数下降，但上下起伏还很大，会影响计算机的测试。当然，加大平均的个数，如对相继的512个  $x_i$  值求平均，可以减少起伏，但这样会影响测量精度，尤其当被测混响时间很短时，会引入颇大的相对误差。因此，我们在求出256个点的线性平均值  $B_j$  后，对相继的  $B_j$  值又进行了按(2)式运算的指数平均处理：

$$A_{j+1} = A_j + \frac{V_{j+1} - A_j}{K} \quad (2)$$

式中  $A_j$ 、 $A_{j+1}$  分别为指数平均处理后在  $j$  和  $j+1$  时刻的值； $B_{j+1}$  为即时的采样值经线性平均处理后的值； $K$  为时间常数，与记录仪的笔速相对应，减少  $K$  值相当于加快笔速，增大  $K$  值相当于降低笔速。因此， $K$  值应当根据被测的混响时间长短加以调节。为了简化运算，取  $K$  为正整数(见附录)。在程序中，对各频率所取的  $K$  值已按表2置值，若有必要，程序允许随意更改  $K$  值。

通过指数平均后，曲线的起伏大大减少，如图3所示。曲线A是125赫信号只经过256点线性平均( $K=1$ )后输出，而曲线B是线性平均后又经过  $K=7$  的指数平均后的输出。可见两条曲线的衰减趋势相近。但曲线B的起伏大大减小，可以适用于计算机测试。

表2 程序中对各频率所取的  $K$  值

f(赫)	100	125	250	500	1K	2K	4K
K	7	6	5	5	2	2	2

## 2. 混响衰减曲线起始点和结束点的确定

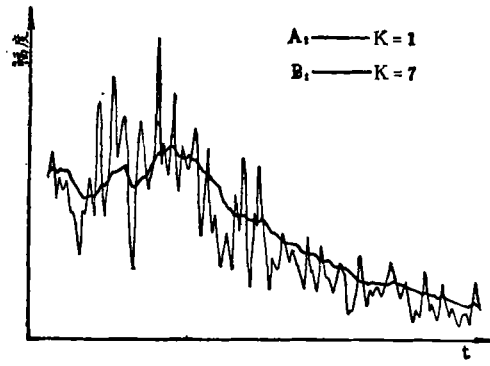


图3 混响幅度的采样平均曲线

在测试过程中如何根据输入的信号正确地确定混响衰减曲线的起始点，对测量是极为重要的。在测量时，程序先根据衰减所需的动态范围置定  $C_{min}$  值。然后，在现有的输入信号中求出极大值  $|A_m|$ 。当  $|A_m| > C_{min}$  时，就根据这个极大值定出相应的下降3分贝、12分贝、18分贝和33分贝的阈值  $C(-3)$ 、 $C(-12)$ 、 $C(-18)$ 、 $C(-33)$ 。若后继的采样平均值有大于  $|A_m|$  者，则以前的极大值和阈值作废，以后继的极大值定出新的阈值  $C(-3)$ 、 $C(-12)$ ……。这样，直到以后取来的其一采样平均值  $A_{t_s}$  小于  $C(-3)$  时，就把这  $t_s$  作为衰减的起始点。倘若在  $t_s$  以后，又有采样平均值大于  $C(-3)$  的，则以前的衰减起始点作废，以新的小于  $C(-3)$  阈值的时间作为新的衰减起始点。然后测量从  $t_s$  到输入的采样平均值小于  $C(-18)$  和  $C(-33)$  的时间  $T_{15}$  和  $T_{30}$ ，则混响时间就按

$$T_{60}(15) = T_{15} \times 4$$

$$T_{60}(30) = T_{30} \times 2$$

求出，其过程如图4所示。

## 3. 出错标志

当输入 A/D 的混响衰减信号信噪比太低，不足18分贝时，使计数器  $T_{c15} > 128$ ，则程序打印  $T_{60}(15)$  为0，而  $T_{60}(30)$  为77.77。当信噪比大于18分贝，而小于33分贝时，则打印  $T_{60}(30)$  为88.88，作为出错标志。程序不对这些数据进行平均。

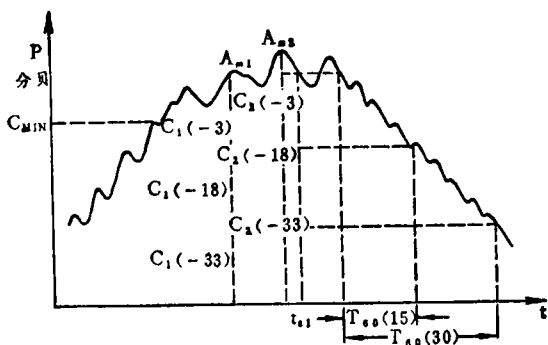


图4 混响衰减曲线起始点和结束点的确定过程

当前一条衰减信号还未下降到-33分贝，后一次测量又开始；或当输入信号中混有开关信号噪声(用磁带录音机测量时，会经常发生这类情况)时，则程序打印出的混响时间为99.99秒，也不对此数据进行平均。

在某个频率所测得的几个混响时间  $T_{60}(15)$  数据中，若有超出平均混响时间  $\overline{T_{60}(15)} \pm 25\%$  的数据，则程序将删去这个数，不作平均，并打印77.77，作为出错标志。

### 三、测试结果分析和误差讨论

#### 1. 测试结果

我们对本校的混响室、普通实验室和播音室三种类型房间分别进行混响衰减录音测试，把记录得的混响衰减信号分别用记录仪和计算机进行测试和比较，所得结果列在表3中。从表可看出，除了对于短的混响时间存在某些偏离外，两者的结果还是很接近的。

表3 用不同方法所测得的混响衰减数据

房间	计算结果 (秒)	频率 (赫)					
		125	250	500	1000	2000	4000
南大 混响室	传统方法	7.2	7.5	6.9	6.0	5.4	5.0
	计算机计算	6.50	7.32	6.73	5.51	5.45	4.72
南大 播音室	传统方法	0.4	0.6	0.8	0.9	0.9	0.7
	计算机计算	0.39	0.71	0.84	0.90	0.88	0.71
普通房间	传统方法	1.0	1.1	1.2	1.1	1.1	1.1
	计算机计算	0.96	0.91	1.19	1.13	1.28	0.98

### 2. 误差讨论

1) 确定衰减曲线起始点和结束点引起的偶然误差 由于一个采样平均值不可能正好落在我们所设定的阈值，而会引入一定的误差，由于这两个阈值的偏差是一个方向的，因而引起的最大误差  $\Delta T_{60}(15) = 0.056 \times 4 = 0.1$ 秒，而  $\Delta T_{60}(30) = 0.05$ 秒。在混响时间特别短的情况下，所取到的点数较少，所以由此项引起的相对误差就较大。此时应取  $T_{60}(30)$  的数据较好。当然也可减少线性平均的样点数，如以128点平均代替256点平均，相对误差可减少一半，但所得的数据起伏会变大，要适当的改变指数平均常数  $K$  值，才能得到较好的结果。

2) 计算机运算速度带入的误差 计算机的采样间隔时间为100微秒，而计算机指令平均时间为4微秒，因此在A/D采样256点绝对值线性平均和指数平均时不会带入误差。在作阈值判断和出错处理时，会漏掉些采样点，但这是系统误差，可以乘上适当常数加以消除。

### 四、结束语

用计算机取代电平记录仪测量混响时间，从技术角度看是完全可行的。丹麦B&K公司最近生产的4417、4418型建筑声学分析仪，其中测量混响时间部分的工作原理也与本文所介绍的方法相类似，只是阈值的选取和数据的显示方法不同而已。采用计算机测量，还具有节省数据处理时间，能把数据按自己需要的格式打印出来的优点。

由于这种方法需要一台计算机，因此直接用于现场测量就不够方便，而是需要利用磁带录音机先把信号记录下来，再上机分析，或用长线(例如电话线)把信号从测试现场送到计算机，这样带来诸多不便。因此目前还不易推广。但根据现有程序，完全可以在Z-80单板机上进行，只要对单板机配上一块

A/D转换器、小型打印机和一块测量混响时间专用的 EPROM 只读存储器即可很方便地在现场进行测量而加以推广。或者在有数字显示的声级计等仪器上，配以A/D块和微处理芯片，使混响时间用数字显示出来，也可以做到一机多用。

## 五、附录：指数平均和RC电路

由于采用白噪声作为混响测试信号，虽经 256 点线性平均，但起伏仍很大，会影响计算机的测试，因此，须按(2)式进行指数平均，它的功能与RC串联电路相类似。

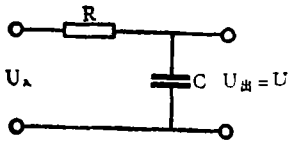


图 5 指数平均电路

在图 5 中：

$$U_{\lambda} = V_R + U_c = RC \frac{dU_c}{dt} + U_c \quad (3)$$

设在  $j-1$  时刻

$$U_{\lambda}(j-1) = B_{j-1}, \quad U_c(j) = A_{j-1}$$

在  $j$  时刻(与  $j-1$  时刻相差 256 个采样点)，

$$U_{\lambda}(j) = B_j \quad \Delta U_c = A_j - A_{j-1}$$

则(3)式可改写为

$$B_j = RC \frac{A_j - A_{j-1}}{0.0256} + A_{j-1}$$

令  $K = \frac{RC}{0.0256}$ ，则可化简得

$$A_j = A_{j-1} + \frac{B_j - A_{j-1}}{K} \quad \text{即为(2)式}$$

由(2)式可知

$$K = \frac{RC}{0.0256} \quad \text{是与时间常数 } RC \text{ 相应的}$$

常数。当  $K=1$ ，指数平均不起作用。 $K$  越大，指数平均后起伏越小。但  $K$  也不能太大，类似于电平记录仪的笔速不能太慢一样，当指数平均后下降速率小于信号衰减的速率时，就会引起测量误差，使所得的混响时间偏长。

$$\text{对 RC 电路，当 } U_{\lambda} = \begin{cases} 1 & t < 0 \\ 0 & t \geq 0 \text{ 时，} \end{cases}$$

$$\text{则 } U_c = e^{-t/RC}$$

$$\text{当 } U_c \text{ 下降到原值的 } \frac{1}{1000} \text{ (-60 分贝)}$$

时，所需时间为  $t_0 = 2RC = 7 \times K \times 0.0256 \approx 0.2K$ 。

$t_0$  必须小于混响时间  $T_{60}$ ，因此

$$T_{60} > 0.2K \quad K < 5T_{60}$$