

# 小房间内低频衰减

沈小祥, 顾善勇, 沈 勇, 赵其昌

(南京大学声学研究所 近代声学国家重点实验室, 南京 210093)

**摘要:** 文章结合混响时间公式的建立过程, 讨论了小房间内低频驻波的衰减问题, 解释了低频驻波影响下, 混响时间的频率响应曲线在低频区发生的起伏现象。文中以南京华艺音像有限公司录音室的声学设计过程为例, 介绍了避免这种低频区起伏的设计方案。测量结果表明我们的设计实现了平坦的混响时间曲线和安静的声学环境。

**关键词:** 混响时间; 衰减; 模式

中图分类号: TU 112 文献标识码: A 文章编号: 1000-3630(2004)02-0098-04

## Acoustic decay at low frequencies in a small room

SHEN Xiaoxiang, GU Shanyong, SHEN Yong, ZHAO Qichang

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

**Abstract:** This paper discusses decay of standing waves in a small room based on the formation of reverberation time equation. Fluctuations in the reverberation time curve at low frequencies are interpreted as a consequence of standing waves. Methods for avoiding such fluctuations are introduced with the acoustic design of the studio of Huayi Audio-Video Co. Ltd. of Nanjing as an example. The measurement results show that a flat reverberation time curve and quiet circumstance have been achieved in the design.

**Key words:** reverberation time; decay; mode

## 1 简介

小房间内的声学设计主要集中在混响时间的控制和噪声控制两方面。受小房间的声学特性影响, 要控制混响时间的低频区的平坦度有一定的困难。房间内低频段简正振动模式的分布和衰减特性很大程度上决定了房间的音质。常见的声学缺陷表现为声染色, 不同听音点的声衰减快慢差异很大。

本文从传统的混响时间的概念出发, 以波动声学的相关观点探讨低频特征模式的衰减问题。根据我们的分析, 结合华艺录音室内设计实例, 可以认为恰当的表面吸声和扩散处理可以减轻低频区声衰减曲线的不平坦问题。

## 2 低频简正模式的衰减

室内声学设计中, 混响时间迄今为止仍然被认为评价房间品质的最有效的参数。在小房间内, 不计空气吸收时, 常用赛宾公式或艾润公式计算混响时间  $T_{60}$ , 公式如下:

$$T_{60} = 0.161 V / S \quad (1)$$

$$T_{60} = 0.161 V / [-S \ln(1 - \alpha)] \quad (2)$$

其中  $V$  为房间体积,  $S$  为房间内表面面积,  $\alpha$  为平均吸声系数。

实际设计中, 在声学小房间内, 低频振动模式常常对低频衰减过程有较大影响, 使得公式(1)和公式(2)的适用性受到影响。

### 2.1 混响公式的适用性

回顾混响时间公式(1)、(2)的前提可以发现: 仅在充分扩散的声场内, 在整个衰减过程中, 室内平均声能密度处处相等时, 式(1)和式(2)才是合适的。下面简单回顾混响公式的建立过程。

首先假设声场初始时刻总能量为  $E_0$ , 根据充分扩散的声场假设, 对所有声线进行统计平均, 可发现在壁面上两次反射之间的统计平均距离<sup>[1]</sup>:

$$\text{平均自由程 } L = 4V/S \quad (3)$$

$t$  时刻之后, 平均每条声线碰撞壁面的次数为:

$$n = ct/L \quad (4)$$

其中  $c$  为空气中声速, 声能衰减为:

$$E(t) = E_0(1 - \alpha)^n \quad (5)$$

令  $10\lg(E(t)/E_0) = -60$ , 得:

$$10n \lg(1 - \alpha) = -60 \quad (6)$$

将式(4)代入式(6)可得:

$$T_{60} = \frac{-13.82}{c \ln(1 - \alpha)} L \quad (7)$$

将声速  $c = 340\text{m/s}$  和平均自由程式(3)代入式(7)中可得常用的艾润公式(2), 在  $\alpha$  不太大时, 可得赛宾公式(1)。在研究混响时间的频率特性时, 一般总是认为平均吸声系数  $\alpha$  的频率响应带来了混响时间曲线的起伏; 根据式(7)可以发现, 平均自由程的频率特性也将影响混响时间曲线。

### 2.2 低频简正模式的衰减

上述 2.1 中混响公式的建立过程必须满足严格的扩散场条件, 式(3)中平均自由程的形式才能够成立。实际设计中, 小房间中的低频范围的声场不符合这个要求, 应该将低频区简正模式的衰减规律和混响加以区别<sup>[2]</sup>。在修正前文平均自由程的基础上, 下文将以波动声学的观点讨论低频简正模式的衰减时间问题, 为了形式的简单, 这里以矩形房间为例。

矩形房间内的简正频率为:

$$f_{pqr} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{p}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{q}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{r}{l_z}\right)^2} \quad (8)$$

其中  $p, q, r$  为非负整数;  $l_x, l_y, l_z$  分别为  $x, y, z$  方向的房间尺度。将模式分 3 类的同时, 可以将其自由程定义为 3 类:

(1) 轴向模式:

声波每沿轴向往返一次, 经过两次吸收, 其自由程  $L_1$  分别为:  $l_x, l_y, l_z$ 。

(2) 切向模式:

声波每沿切向往返一次, 经过 4 次吸收, 其自由程  $L$  分别为:

$$\sqrt{(l_x)^2 + (l_y)^2}/2, \sqrt{(l_x)^2 + (l_z)^2}/2, \sqrt{(l_y)^2 + (l_z)^2}/2。$$

(3) 斜向模式:

声波每沿斜向往返一次, 经过 6 次吸收, 其自由

程  $L$  为:  $\sqrt{(l_x)^2 + (l_y)^2 + (l_z)^2}/3$

依据上述分析和式(7), 不同频率的驻波, 自由程不同, 对应的混响时间也不同。低频范围内模式密度较低, 且上述 3 类 7 种自由程彼此差别较大, 这必然带来了混响曲线的起伏。上述 3 种模式中轴向模式衰减最慢, 对于空间小而混响时间短的录音室, 轴向波的控制极为重要。

## 3 录音室设计实例

南京华艺音像有限公司的录音室场址选在刚建成不久的一栋五层楼的五楼, 并且和交通主干线相邻。矩形房间尺度为: 长 7.8m、宽 6.82m、高 3.68m。

### 3.1 录音室内声场和混响时间控制

小房间内希望获得比较均匀的声场, 首先应考虑其三边长度之比, 以避免简正模式的简并化, 但是华艺录音室是在基建完成后进行声学设计的, 无法选择其三边比例。高: 宽: 长为 1: 1.85: 2.12, 已超出常用的 Bolt 区域, 这说明该录音室的低频在某些频率容易出现简并化, 导致低频简正模式的减少, 声场起伏增大。

我们以室内的混响时间不大于 0.3s 为设计目的, 根据

$$f_c = 2000 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \quad (9)$$

式中,  $f_c$  为房间的临界频率,  $V$  为房间体积。可以计算得房间的临界频率  $f_c = 78.3\text{Hz}$ ,  $4f_c = 313.2\text{Hz}$ 。说明在 78.3Hz~313.2Hz 范围内应该是声场处理的重点频段, 对声场的均匀起主要作用。

根据上述房间尺度和 2.2 节中不同类别模式的自由程分析, 根据式(7)可以计算得到低频时不同模式的衰减规律(如图 1 所示), 其中非特征频率处

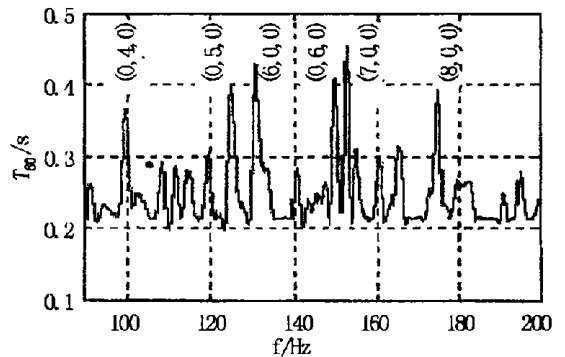


图 1 低频模式衰减时间

的衰减时间利用二次样条插值获得。这里为了简化问题的分析,暂不考虑吸声材料的频率特性。

如图 1 所示,低频区模式较少,不同模式其衰减快慢不同,图中相应的几个轴向模式表现出较慢的衰减规律。

由房间尺寸和公式(8),可以计算出中心频率为 100Hz 的一个倍频程带宽内的各种简正模式数

$$N_{轴} = \frac{l}{2c} f = 7.7 \quad (10)$$

$$N_{切} = \left(\frac{fS}{c^2} - \frac{l}{2c}\right) f = 33.5 \quad (11)$$

$$N_{斜} = \left(\frac{4f^2V}{c^3} - \frac{fS}{2c^2} + \frac{l}{8c}\right) f = 25.5 \quad (12)$$

其中  $l = 4(l_x + l_y + l_z)$ ,  $S$  为房间内表面积,  $V$  为房间体积。

图 1 及式(10)~式(12)说明:轴向波应该是重点处理的频率点。录音室设计过程中,充分考虑了上述低频范围内低频简正模式衰减的不均匀性,作如下处理:对少数低频模式作重点吸声处理;加大低频散射(散射体结构线度大于该波长的一半),使室内产生更多的简正模式改善声场的均匀度。

为了有效地控制轴向模式,对后墙采用了两个较大的弧形散射体以抑制  $x$  方向的模式,如图 2 所示,散射体表面是厚为 5mm 的五夹板,内填满玻璃棉。一面侧墙上进行了墙面展斜处理,在抑制  $y$  方向模式的同时展宽了吸声频带,如图 3 所示,穿孔率为 12.6% 的穿孔铝板背衬厚为 5cm、容重为  $32\text{kg}/\text{m}^3$  的离心玻璃棉。天花板上设置了不规则状扩散体,以避免天花板和地板之间形成驻波模式,如图 4 所示,其表面是厚为 5mm 的五夹板,内填满玻璃棉。图 2、3、4 中数据单位为 mm。

根据图 1,在 100Hz、125Hz、150Hz 和 175Hz 左右应该加以重点吸声处理,针对这个要求,室内采用

了穿孔板共振结构使其共振峰区主要落在图中峰密集的区域。以 125Hz 处为例,要求  $T_{60}$  不超过 0.3s,根据式(1)可以计算得其吸声量  $A$  至少为 105,6 个面的吸声量分别约为:20、30、15、30、5、5。根据这个要求,对相应的吸声材料和吸声结构进行了设计。

### 3.2 噪声控制

为了使得录音室在周围正常工作条件下保持室内的安静,噪声控制措施必不可少。一般而言,噪声源通过空气声传播和固体振动两种方式影响室内环境。其中空气声传播对于实际房间的影响往往取决于门和窗的隔声性能。为了隔绝空气声,录音室没有直接通向户外的窗口,其观察窗采用了三层不平行安装的玻璃窗,玻璃板厚为 5mm。实测隔声量平均达 43.5dB。隔声门的隔声性能由两方面决定:

- (1) 单位面积的质量;
  - (2) 气密性。
- 针对这两方面的要求,华艺录音室的门采用了声闸结构,单层门采用重质材料制作。门框和门边缘贴橡胶以对门缝加以密封。将声源置于声闸内,实测单层隔声门的隔声量平均达 34dB。

### 3.3 测量结果

施工结束后对混响时间进行了测试,测试结果见 3.3.1~3.3.2。

#### 3.3.1 噪声

测量条件:隔声门关闭。

测量仪器:丹麦 B&K2230 声级计。

测量结果:最低声压级 21.0dBA,常规声压级 24.4dBA。

通常在噪声控制设计时,允许噪声级降低 5dB,获得 NR 曲线数<sup>[3]</sup>。因此,最终设计结果达到了 NR-20 标准,远低于原定设计的 NR-30 的要求。

#### 3.3.2 混响时间

测量条件:隔声门关闭。

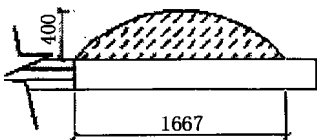


图 2 弧形散射体

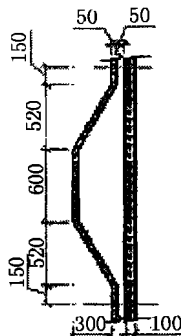


图 3 作展斜处理的空腔

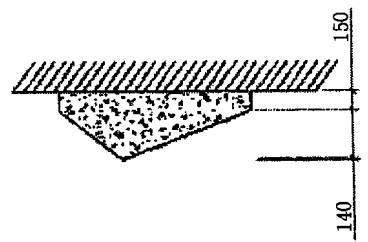


图 4 不规则状扩散体

表 1 不同位置混响时间  $T_{60}$  测试结果

(ms)

测试位置 / m	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
(3.03, 3.09, 1.54)	184	266	252	225	242	250	250
(3.03, 3.09, 2.03)	252	244	277	234	227	244	225
(5.16, 4.56, 2.03)	170	195	252	240	262	240	227
(5.16, 4.56, 1.54)	170	232	250	230	244	260	236
(5.22, 1.58, 1.54)	176	313	275	213	248	244	232
(5.22, 1.58, 2.03)	172	227	232	238	254	258	236

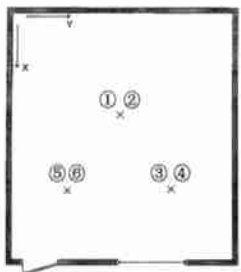


图 5 测试位置示意图

测量仪器: 音频分析仪 HP3569A。

测试方法和结果: 在房间内如图 5 所示的 3 个位置, 每个位置的两个不同高度处进行混响时间的测量, 实测混响时间如表 1 和图 6 所示。

6 个位置的混响时间随频率变化的规律如图 6 所示, 频率值为: 125Hz、250Hz、500Hz、1kHz、2kHz、4kHz、8kHz。图中低频区的衰减时间得到了有效控制, 而且不同位置的混响时间表现出相似的特性, 这表明房间中声场分布较均匀。

## 4 结束语

本文探讨了小房间内低频区特征模式衰减和混响时间的关系, 考察了不同模式的自由程不同引起

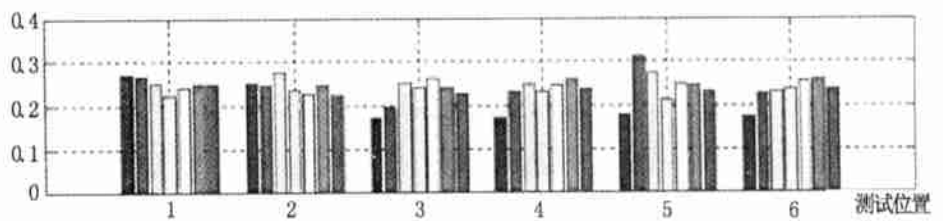


图 6 6 个位置实测混响时间曲线

的混响时间起伏问题。结合华艺录音室的设计, 首先计算了需要重点处理的频段范围和特定的频率点, 并有针对性地设计了散射和吸声结构, 有效抑制了低频特征模式。测量结果表明我们的设计实现了平坦的混响时间曲线和安静的声学环境。

## 参 考 文 献

- [1] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础(第二版)[M]. 南京: 南京大学出版社, 2001. 418-428.
- [2] Angus J A S. The effect of diffusers on frequency dependent room mode decay[R]. Presented at the 107<sup>th</sup> AES Convention. 1999. 9.
- [3] 孙广荣, 吴启学. 环境声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 1995. 66-69.

(上接第 97 页)

北京: 海洋出版社, 1988. 176-197.

- [2] 张宇文主编. 鱼雷外形设计[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998. 371-321.
- [3] 朱继懋主编. 潜水器设计[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992. 114-116.
- [4] 七二研究所编制. 北京: CB/Z 237-87 标准[S], 1987.

- [5] Granville P S. Geometrical characteristics of streamlined shapes[J]. Journal of Ship Research, 1969, 13(4): 12-20.
- [6] 宋保维, 李福新. 回转体最小阻力外形优化设计[J]. 水动力学研究与进展, 1994, 9(5): 23-28.
- [7] 刘钰. 回转体外形的一个数学表示法[J]. 中国造船, 1982, 76(1): 1-10.