三种可变吸声体的设计与试验*

章奎生　杨志刚
(华东建筑设计研究院　上海 · 200002)

近年来,华东建筑设计研究院结合上海广电大厦及上海大剧院等重点工程的声学设计,开展了可调混响技术的设计研究工作。本文主要介绍圆筒式、箱式及帘幕式三种可变吸声体的设计技术、试验方法、试验内容及结果,总结了通过分析研究所得到的性能特点及设计规律,为可调混响技术的发展和应用提供了有益的资料。

Design and test of three kinds of adjustable absorbers

ZHANG Kuisheng　　YANG Zhigang
(East China Architectural Design and Research Institute, Shanghai · 200002)

In recent years, East China Architectural Design and Research Institute carries out the design and research of the adjustable reverberation technique in connexion with the acoustical design of some major projects such as Shanghai Radio and Television Station building and Shanghai Theatre. This article introduces mainly the design technique for the cylindrical、box and certain adjustable absorbers and the method、content and results of the test. It also sums up the performance characteristics and the design rules obtained through analyse and provides useful data for the development and application of the adjustable reverberation technique.

1　前　言

多功能厅堂是国内外常见的厅堂建设项目,礼堂兼作剧场、剧场兼作影院、歌剧院兼作音乐厅、演播厅兼作剧场等情况十分普遍。虽然提高了使用效率、增加了经济效益,但在不同使用功能下的音质效果并不都令人满意,其主要原因就在于没有在多用途厅堂的建筑声学设计中应用可调混响技术。

可调混响技术是建筑声学技术领域中发展较快且又有显著效果的新的应用技术。其主要原理就是通过改变厅堂内体积或改变厅堂内总吸声量以达到改变厅堂内混响时间的目的。其中改变吸声量的可调混响方法则是多年来应用较广的设计技术。

可调混响技术又是一项综合性的设计技术,首先必须在声学上满足可调混响设计要求,其次应具备良好的建筑装饰效果,同时还要有科学合理的机电传动调节机构。

在国外,厅堂可调混响技术的设计和工程应用已有几十年的历史,先后建成了一批采用不同形式可调混响设计、效果显著的多功能厅堂,其中大部分是采用不同方式改变厅内吸声量的可调混响技术。国内虽起步较晚,可调混响技术的设计与应用工程为数还少,但在近 10 年来也先后在北京、广东和上海的一些音质工程中得到成功的应用,特别是结合工程设计开展了可调混响技术及可变吸声体的设计研究工作,取得了丰富的资料和有益的成果,为促进我国可调混响技术的提高和发展起到了积极的作用[1~3]。本文所介绍的就是华东建筑设计研究院近年来先后结合上海广播电视国际新闻交流中心大厦和上海大剧院两项重点工程的声学设计所进行的圆筒式、箱式及帘幕式三种可变混响吸声体的设计技术及试验研究成果[4,5]。

2　可变混响吸声体的设计特点

可变混响吸声体形式很多,各有特点,效果也不尽相同。在设计选择和确定多功能厅堂所采用的可变混响吸声体形式时,必须结合厅堂的功能特点、建筑风格、室内装修及可变混响的技术要求等条件,并开展必要的试验研究,使可变混响吸声体既有良好的声学效果,又同建筑和装修融成一体。本节将介绍三种可变混响吸声体的设计特点。

2.1　圆筒式可变混响吸声体

圆筒式可变混响吸声体在国外已有多个应用实例,在国内上海广电剧场也已得到成功的应用。

* 收稿日期: 97-3-14; 修回日期: 97-4-24

圆筒式可变吸声体的声学设计，要求其中半圆柱面为全吸声面，应使其在宽频范围内有最大的吸声性能，另半圆柱面为全反射面，即应使其对声波有最小的吸收、最大的反射。该吸声体试件的反射面为1～2mm 厚钢板结构，吸声面为 75mm 厚离心玻璃棉，后留空腔，表面为穿孔钢板面层。采用电机直联传动调节方式，通过减速装置使圆筒式可变吸声体调速为 1r/ min，调节控制较为方便。

广电剧场设计的圆筒式可变吸声体首次采用卧式布置方式，既有利于改善厅内声场扩散效果，获得较多的侧向前次反射声，同时也因横向布置而改善了圆筒式吸声体的支承条件，对传动调节较为有利。其次圆筒式可变吸声体结合广电剧场的体形做成不同直径（ϕ400～ϕ1 000mm）、不同长度（2.5～7.5m）的多种规格，既能改善声场扩散条件和频率范围，也丰富了厅内建筑装饰效果。图 1 为圆筒式电动可调吸声体设计安装示意图。

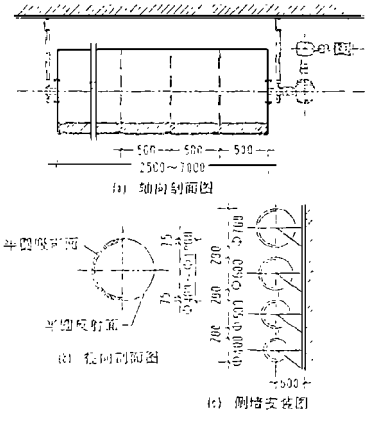


图 1　圆筒式电动可调吸声体安装示意图

2.2　箱式可变混响吸声体

箱式可变混响吸声体是一种新型高效可变吸声体，在国内外还属鲜见。本文介绍的箱式可变吸声体是上海大剧院观众厅可调混响设计研究的方案之一，其最大特点就是其可变吸声量变幅大、可变混响效率高，这是由于箱体开启时，其有效吸声表面积比关闭时有大幅度增加所致。箱式可变吸声体试件分开启和关闭两种状态，开启时箱内表面配置 50mm 厚宽频带强吸声材料，大量吸收声能，而关闭时箱体外表面均为 8mm 厚 FC 板强反射面，对声能的吸收最少，因此其吸声改变量显著大于其它形式的可变吸声体。图 2 为该试件设计示意图。

箱式可变吸声体可设在厅堂天花部位，也可设

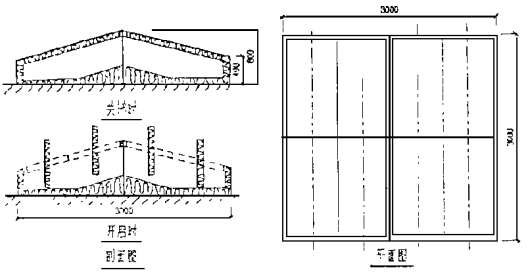


图 2　箱式可变吸声体安装示意图

在墙面上，我们将关闭时的反射面设计成折板状，并呈交叉布置，这样可改善厅内声场扩散，以提高音质效果。箱式可变吸声体同样设计为电动调节控制方式，可以分组调节开关，以达到不同混响时间的控制要求，因此其传动装置也相对复杂一些。

2.3　帘幕式可变混响吸声体

帘幕式可变混响吸声体是上海大剧院观众厅可调混响设计研究的又一方案。此类吸声体在国外已有较多的应用，具有结构简单、装饰性好、投资较少、实用性强等特点，但其可变吸声量幅值则相对偏低，因此要达到同样的可变混响幅度，帘幕的需用面积就相应要大些。其吸声效果主要取决于帘幕的材质、打褶率及后留空腔深度等因素，这些因素又都与装修设计密切相关。其安装调节方式以升降式为好，也可为平移式，视实际工程安装条件而定。其传动方式可以是电动或手动方式，也可视实际情况而定。帘幕可以直接外露在厅堂表面，也可以在帘幕外侧再作装饰格栅处理，并保证格栅有足够的透空面积。图 3 为帘幕式可变混响吸声体的设计示意图。

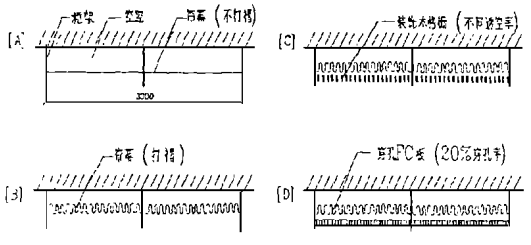


图 3　帘幕式可变混响吸声体示意图

3　混响室试验研究方法

3.1　试验条件及方法

三种可变吸声体的声学性能试验均在同济大学声学所标准混响室内进行，混响室总体积为 268m^3。测量方法按国标 GBJ47-83 混响室吸声系数测量标准。声源为 1/3 倍频程白噪声，测试用 B&K4417 型

建筑声学分析仪进行, 接收取 4 点平均。测试频率为 100Hz～8kHz 间共取 20 个 1/3 倍频程中心频率, 测量需求的吸声系数均由下式求算, 式中: V 为混响室

$$\alpha = \frac{0.161V}{S}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)$$

体积($V = 268\mathrm{m}^3$); S 为试件总表面积; T_0、T 为实测空室混响时间及装入吸声体后的混响时间。

3.2 主要试验项目

由于整体圆筒式可变吸声体的声学性能尚无相应的实验室及安装条件, 也为了简化试验和节省费用, 将圆筒式可变吸声体分解设计成 ϕ800 直径半圆柱吸声体及半圆柱反射体两种试件。图 4 为试件装置示意图。声学性能试验的项目包括: 半圆柱吸声体同反射体的性能比较、不同吸声层密度、不同穿孔率

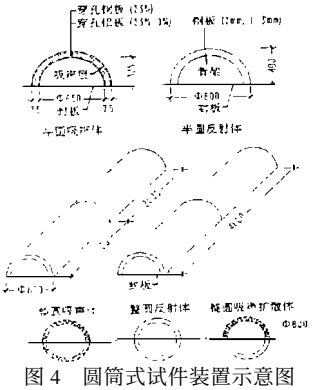


图 4 圆筒式试件装置示意图

内衬穿孔板、有无装饰织物蒙面、不同反射面钢板厚度及不同试件间距等 6 个方面。表 1 为主要试验条件安排表。

表 **1** 试验条件安排表

序号	试件名称	离心棉吸声层		孔板穿孔率(%)		反射面钢板厚度(mm)	试作间距	织物状况
		厚度(cm)	密度(kg/m^3)	外层	内层			
1/2	半圆筒吸声体	7.5	32	25	3		1.0	无/有
3/4/5	半圆筒反射体					2.0	1.0	无/有/封条
6/7/8	半圆筒吸声体	7.5	32	25	25		1.0/0.2/0.2	无/无/有
9/10	半圆筒反射体					1.5	1.0/0.2	无
11/12/13	半圆筒吸声体	7.5	48	25	25		1.0/0.2/0.2	无/无/有
14	整圆反射体					1.5	1.0	无
15/16	半圆筒吸声体	7.5	48	25	3		1.0	无/有
17	整圆吸声体	7.5	48	25	25		1.0	无

箱式可变吸声体试件共有 4 个, 每个尺寸为 1500×1500, 高 400～800, 上部面板可旋转翻动, 试验项目仅为面板开和关两种条件, 即面板关闭时为全反射状态、面板开启时为吸声状态。

表**2** 试验条件安排表

箱式吸声体	帘幕式吸声体				
	材质	打褶率	空腔	护面层	位置
全关闭	丝绒布(0.21kg/m^2)	1.0	100	FC 板 20%	墙中部
全开启	灯芯绒布(0.27kg/m^2)	1.5(1.3)	150	格栅 50%	墙边部
	L109 阻燃布	2.0(1.96)	200	格栅 60%	墙角部
	澳洲 PC16 吸声布	3.0(2.6)		格栅 70% 格栅 80%	

(表注): 木条格栅不同透空率 50%、60%、70%、80% 时的木条净间距分别为: 20、30、47、80mm。

帘幕式可变吸声体试验选择了 4 种不同材质帘幕、4 种不同打褶率、3 种不同空腔及 5 种不同装饰格栅等条件, 从中寻求优化方案。箱式及帘幕式可变吸声体的试验项目见表 2 及表3。图5 为箱式及帘幕式两种可变吸声体的试验安装示意图。

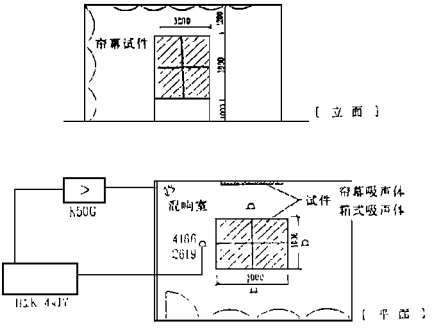


图 5 两种可变吸声体试验安装示意图

4 试验结果及性能分析

通过对试验方案的各种不同条件对照组的实测试验, 分析结果如下:

(**1**) 圆筒式可变混响吸声体(见图 **6**)

表 **3** 试验项目及安装条件汇总表

测次序号	试件名称	安装条件
1	箱式可变吸声体	面板全关闭状(全反射)
2	箱式可变吸声体	面板全开启状(强吸声)
3	丝绒帘幕	打褶 2.0; 无格栅; 空腔 100
4	丝绒帘幕	打褶 2.0; 无格栅; 空腔 150
5	丝绒帘幕	打褶 2.0; 无格栅; 空腔 200
6	丝绒帘幕	不打褶 1.0; 无格栅; 空腔 200
7	丝绒帘幕	打褶 1.5; 无格栅; 空腔 200
8	丝绒帘幕	打褶 3.0; 无格栅; 空腔 200
9	灯芯绒帘幕	打褶 2.6; 无格栅; 空腔 200
10	灯芯绒帘幕	打褶 1.3; 无格栅; 空腔 200
11	灯芯绒帘幕	打褶 1.96; 无格栅; 空腔 200
12	灯芯绒帘幕	打褶 1.96; 无格栅; 空腔 100
13	澳洲 PC16 吸声布	不打褶 1.0; 无格栅; 空腔 100
14	澳洲 PC16 吸声布	不打褶 1.0; 无格栅; 空腔 200
15	灯芯绒帘幕	打褶 1.96; 无格栅; 空腔 200 置墙边
16	灯芯绒帘幕	打褶 1.96; FC 板 20%; 空腔 200 置墙边
17	灯芯绒帘幕	打褶 1.96; 无格栅; 空腔 200 置墙角
18	灯芯绒帘幕	打褶 1.96; 格栅 70%; 空腔 200
19	灯芯绒帘幕	打褶 1.96; 格栅 60%; 空腔 200
20	灯芯绒帘幕	打褶 1.96; 格栅 50%; 空腔 200
21	灯芯绒帘幕	打褶 1.96; 格栅 80%; 空腔 200
22	阻燃织物+ PC16 布	不打褶 1.0; 无格栅; 空腔 200
23	PC16 布+ 阻燃织物	不打褶 1.0; 无格栅; 空腔 200
24	阻燃织物帘幕	不打褶 1.0; 无格栅; 空腔 200
25	阻燃织物帘幕	打褶 2.0; 无格栅; 空腔 200
26	阻燃织物帘幕	打褶 2.0; 无格栅; 空腔 100

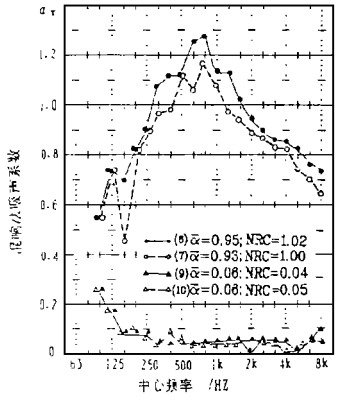


图 6 改变试件间距实测吸声性能

①以穿孔钢板护面、离心玻璃棉作吸声面层的半圆柱吸声体同以钢板作扩散反射面的半圆柱反射体, 两者的吸声系数变幅较大, 如吸声半圆柱的 $\bar{\alpha}$ 为 0.95 左右, 而反射半圆柱的 $\bar{\alpha}$ 仅为 0.06～0.07;

②$32^K$ 和 48^K 两种不同密度离心棉板吸声层的半圆柱吸声体, 其 $\bar{\alpha}$ 无明显变化; 而 2.0mm 和 1.5mm 厚两种不同厚度钢板作反射面的对比试验, 其 $\bar{\alpha}$ 也基本相同;

③吸声体表面覆盖装饰织物后, 对吸声性能无甚影响, 而反射体表面加贴织物后吸声系数明显提高, 不利于可变吸声效果;

④将半圆柱吸声体内层穿孔板的穿孔率由 25% 改为 3% 后, $\bar{\alpha}$ 虽基本相同, 但高频吸声系数却有一定下降;

⑤不同试件间距减小后对反射体影响不甚明显, 而吸声体性能有所减小, 虽幅度不大但中频较为明显。

(**2**) 箱式可变混响吸声体(见图 **7**)

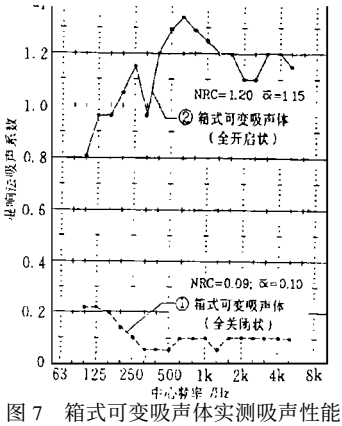


图 7 箱式可变吸声体实测吸声性能

①当箱式可变吸声体全开启时, 其 $\bar{\alpha}$ 高达 1.15, 降噪系数 NRC= 1.20, 几乎在≥200Hz 的全部频段其吸声系数均大于 1.0, 其中大部分 $\alpha_i \geq 1.2$, 可见其在开启状态下吸声效率是很高的;

②当箱式可变吸声体全关闭时, 其 $\bar{\alpha}$ 低至 0.1, 降噪系数 NRC 仅为 0.09, 可见其平均吸声系数变幅 $\overline{\Delta\alpha_i}$ 高达 1.10, 因此对调节混响是十分有利的;

③箱式可变吸声体是 3 种试验可变吸声体中吸声量变幅最大的, 分析其原因主要是有效吸声面积成倍增加所致。

(**3**) 帘幕式可变混响吸声体(见图 **8**、**9**、**10**)

①4 种不同材质帘幕在同样腔深和打褶率条件下, 以宽条灯芯绒帘幕吸声最好, 其 $\bar{\alpha}$= 0.76, NRC = 0.80, 而另 3 种帘幕的 $\bar{\alpha}$ 仅为 0.4～0.6 左右;

②当帘幕的打褶率增大后, 在 1kHz 以上的高频吸声性能有所提高, 试验表明, 打褶率增大 1 倍, 帘幕的 $\bar{\alpha}$ 约可提高 0.05～0.08;

③当增大灯芯绒帘幕后空腔深度, 低频吸声性

能明显改善, 第 1 吸声峰向低频推移, $\bar{\alpha}$ 也约提高 0.1; 而对吸声较差的帘幕增大后腔, 无明显效果;

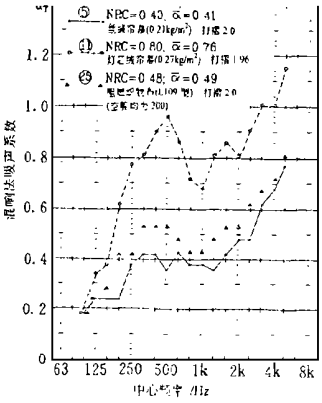


图 8　不同材料帘幕实测吸声性能

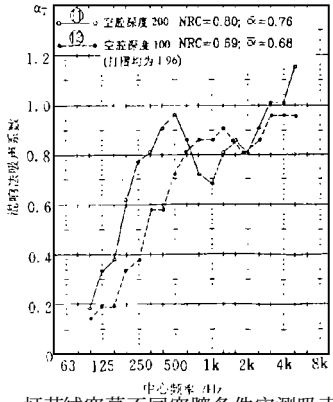


图 9　灯芯绒帘幕不同空腔条件实测吸声性能

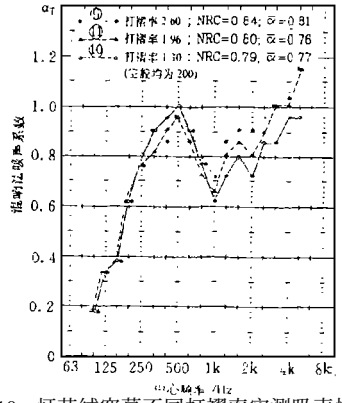


图 10　灯芯绒帘幕不同打褶率实测吸声性能

④当帘幕前加 $P=$ 20% 的穿孔装饰护面板后, 低频吸声性能稍有改善, 而高频 α_f 下降 0.1～0.4, $\bar{\alpha}$ 值也有一定降低; 而当帘幕前增加透空率为 50%～80% 的不同装饰木格栅后, 除 4kHz 的高频段外, 对吸声性能基本上没有影响, 这就为装修设计创造了有利条件。

5　结束语

1993 年以来, 作者结合上海广电大厦和上海大剧院等音质设计工程项目, 根据可变混响的设计工艺要求, 先后对圆筒式、箱式及帘幕式三种可变混响吸声体进行了专题试验研究, 取得了丰富的资料和可喜的成果。其中圆筒式可变吸声体已成功地应用于上海广电大厦内的多功能演播厅中, 满足了综艺、电影、会议及音乐演出等多用途要求, 大大提高了演播厅的使用效率, 获得了显著的经济效益和社会效益。帘幕式可变吸声体装置也已确定在上海大剧院观众厅内设计应用, 以满足歌剧、芭蕾、交响乐多功能使用的音质要求。

目前, 可调混响技术在我国厅堂建筑与声学设计中应用还不多, 对可变吸声体的试验研究工作则更属鲜见。为了使可调混响技术在我国能得到更大提高及更多的发展和应用, 还需建筑师、室内装修设计师同建声设计师的密切配合和协调, 特别是建筑及装修设计师对声学要求的理解与合作。

在我们的设计与试验研究过程中得到了同济大学声学所建声研究室、浙江黄岩东保声学装饰工程有限公司、原广电大厦筹建处及上海大剧院工程指挥部的大力协助与支持, 在此一并表示谢意。

参考文献

1 章奎生. 国内外厅堂可调混响技术的设计与应用. 声学技术, 1994; 13(1): 4～10

2 章奎生. 可调混响技术与大型剧院式多功能演播厅的音质设计. 声学技术, 1995; 14(2): 49～55

3 项端祈. 佛山市娱乐中心剧场的声学设计. 建筑学报, 1995; (5)

4 章奎生. 圆筒式电动可调吸声体的设计与试验. 声学学报, 1996; 21(2): 97～106

5 章奎生. 上海大剧院观众厅的音质设计与研究. 声学技术, 1996; 15(1): 2～3

6 章奎生. 上海大剧院观众厅可调混响技术设计研究试验报告. 华东建筑设计研究院资料, 1996 年 12 月