

上海虹口体育馆的音质设计

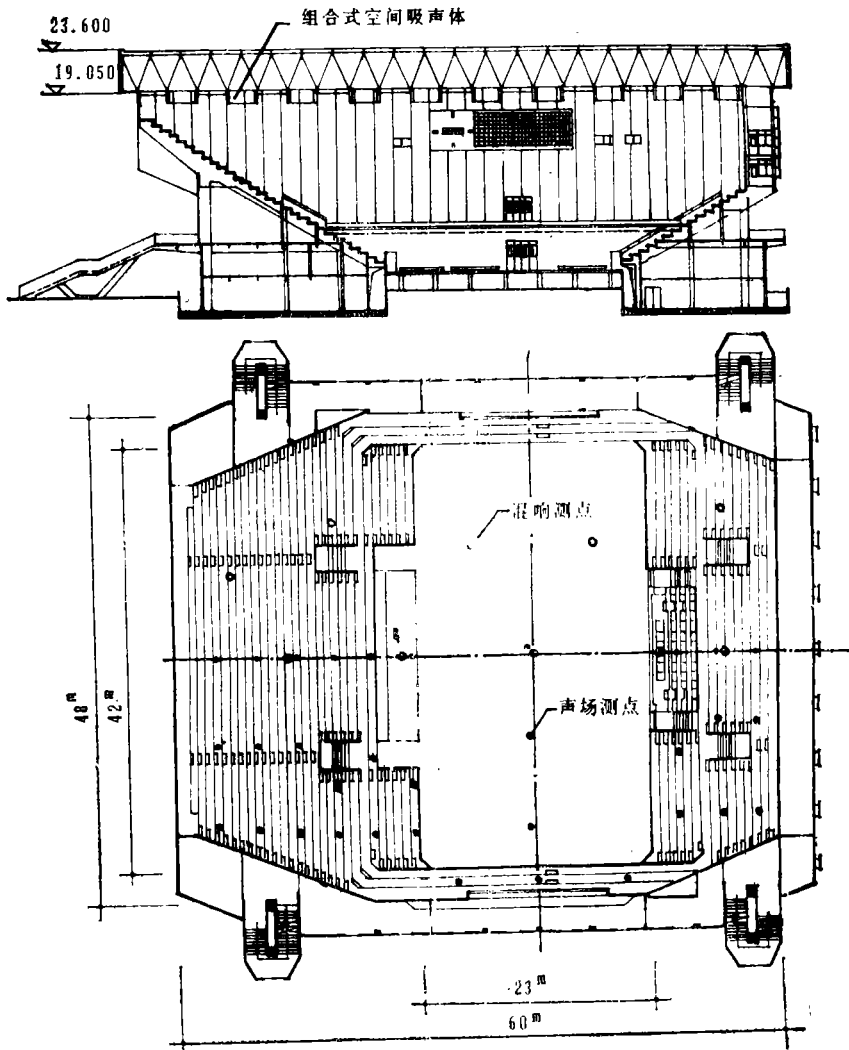
章奎生 林 平

(华东建筑设计院, 上海, 200001)

1 概述

虹口体育馆地处上海著名的曲阳小区北侧, 是一座具有现代化气势的新颖体育馆,

客座3000人, 比赛馆平面为不等边八边形, 钢管球节点网架底标高为19m。可适用手球、篮排球、乒乓、体操、击剑等各类国际国内体育比赛及大型综合性文艺演出等多功能使用要求。图1为平剖面简图。



收稿日期: 92-12-15

图1 虹口区体育馆平剖面图

由于虹口体育馆空间体积高达 5000m^3 ，而要求混响时间又较短，声学设计难度较大，为了达到高质量的音质要求，在音质设计中首次设计了由新颖方筒式空间吸声体及浮云式吸声板组合而成的组合式空间吸声体吊顶，并且通过混响室实验研究，求得最佳空间组合，同时又应用了几种新型吸声材料组成不同吸声结构，不仅取得优良的音质效果，而且也获得了满意的建筑装饰效果，达到了建筑、声学、装饰、照明、扩声及防火等诸多功能较完美的统一。本文即为虹口体育馆音质设计的技术总结。

2 混响时间控制设计

2.1 每座容积及混响时间的确定

混响时间是体育馆音质设计中的一项重要指标，混响时间的长短既同馆内顶部及墙面吸声量有关，也同体育馆的每座容积指标（即总的空间体积与容座的比值）密切相关。虹口体育馆的土建设计要求暴露网架结构，因而建声设计中不做封闭式吸声吊顶，而采取悬挂空间吸声体的方法，从而使馆内空间体积增大25%，每座容积也显著提高。一般做封闭顶的体育馆，其每座容积指标多为 $6 \sim 9\text{m}^3/\text{人}$ ，而网架暴露式体育馆的每座容积常为 $8 \sim 13\text{m}^3/\text{人}$ （见表1），虹口体育馆的每座容积竟高达 $16.7\text{m}^3/\text{人}$ ，为表1中所列12座国内外体育馆之冠。^[1]

表1 国内外几所体育馆之每座容积、混响时间比较

名 称	容 座 (人)	容 积 (m^3)	每座容积 ($\text{m}^3/\text{人}$)	混响时间 (s)	
				空场	满场
南京五台山体育馆	10000	63240	6.3	2.2	1.7
上海黄浦体育馆	3800	24000	6.3	2.3	1.8
成都城北体育馆	6000	39550	6.7	2.1	1.1
上海体育馆	18000	140000	7.8	2.5	1.8
贝宁体育馆	5000	39500	7.9	1.9	1.5
北京首都体育馆	19200	168000	8.8	2.4	1.7
深圳体育馆	6500	78000	12.0	2.7	1.8
北京地坛体育馆	3000	40200	13.4	—	1.7
北京大学生体育馆	4153	57740	13.9	2.1	1.5
广州天河体育馆	8000	118400	14.8	1.9	—
北京奥运中心体育馆	6400	100000	15.6	2.7	1.6
上海虹口体育馆	3000	50070	16.7	1.9	1.6

现代体育馆使用功能多,对音质要求随之提高,其混响时间指标更要合理确定。一般中小型体育馆(容座3000~5000人)的最佳混响时间以1.4~1.6秒为宜,而5000座以上的大型体育馆则可为1.6~1.8秒。根据虹口体育馆的特点,我们设计选定的最佳混响时间为 1.6 ± 0.1 秒。

2.2 吸声材料选择与吸声结构设计

在虹口体育馆的音质设计中,主要选择以下三种基本材料,并分别用它们设计组成多种不同吸声特性的吸声结构及空间吸声体。

首先是离心玻璃棉毡(板),其密度均匀,

稳定性好,比往常的超细棉有明显改善,设计中采用棉毡密度为 24kg/m^3 (水平填放条件);而棉板密度则取 32kg/m^3 (垂直填放条件);其次是穿孔FC板,其强度高、防火抗潮性能好,设计采用厚度为4mm,穿孔率分别有4.5%、8%(圆孔)及10.2%(条孔)三种不同规格;第三是新颖阻燃装饰织物,其阻燃氧指数达38,透声性能好、不霉、不蛀、色泽柔和、质感也好,作为吸声结构及空间吸声体的护面材料不仅可替代玻璃纤维布及穿孔护面板,而且还能使中频(500~1000Hz)吸声系数有0.15~0.20的增值效果(见表2),因此就更具实用价值。

表2 阻燃装饰织物的吸声效果

测试条件	驻波法吸声系数(α_0)					
	125	250	500	1000	2000	4000
单阻燃织物 贴实	0.07	0.05	0.04	0.05	0.08	0.08
单5cm棉毡 贴实	0.20	0.25	0.55	0.77	0.92	0.95
5cm棉毡+织物护面	0.20	0.33	0.73	0.95	0.91	0.91
织物护面改善值	± 0.00	+0.08	+0.18	+0.18	-0.01	-0.04

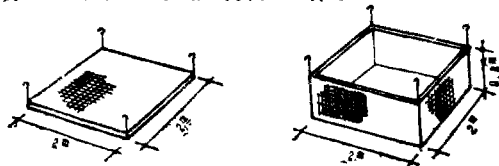
虹口体育馆墙面吸声结构分设在南、西、北三侧墙面,而顶部网架下弦则设计悬挂了新型组合式空间吸声体(见图2),表3为馆内各种吸声结构配置及用料情况。

2.3 混响时间设计计算

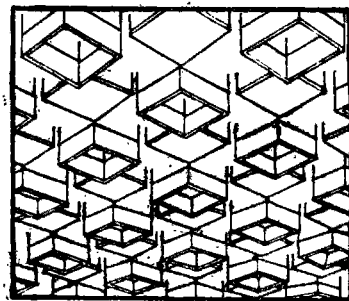
虹口体育馆空间高、体积大,按最佳混响时间1.6秒计算,其馆内平均吸声系数应高达0.45以上,而总吸声量应为 3600m^2 吸声单位左右。

建声设计中将悬挂于网架下弦的新颖组合式空间吸声体作为主要吸声部位,其吸声量控制为占总吸声量的 $2/3$ 左右,而使墙面吸声量占 $1/3$ 左右,再加上观众席的吸声量即可达到控制混响所需的总吸声量要求。表4即为不同条件下计算所得的平均吸声系

数、总吸声量及混响特性结果。



A. 板式空间吸声体 B. 筒式空间吸声体



组合式空间吸声体吊顶透视

图2 组合式空间吸声体基本规格及组合形式图

表 3 各种吸声结构配置及用料

吸声结构型式	数量(m ²)	配用位置	主要用料及构成
方形筒式空间吸声体	775 (121个)	悬挂网架下弦	80厚离心棉板(32K)、双面阻燃装饰织物蒙面 (每个2m×2m,高0.8m)
浮云式板状吸声体	700 (175个)	悬挂网架下弦	75厚离心棉毡(24k),双面阻燃装饰织物蒙面 (每块2m×2m)
折板形吸声结构	700	南北二侧墙面 (50%面积)	空腔50~300、钢板网、50厚离心棉板、玻璃布、 穿孔FC板(10.2%条孔)
同上	700	同上	空腔50~300、钢板网、25厚离心棉板、玻璃布、 穿孔FC板(4.5%)
平板状吸声结构	350	栏板墙面	50厚离心棉板(32K)、玻璃纤维布、穿孔FC板 (8%)
凸形方块吸声结构	270	东侧墙面	空腔100、钢板网、50厚离心棉板、玻璃纤维布、 穿孔FC板(8%)
同上	100	东侧墙面	空腔100、钢板网、25厚离心棉板、玻璃纤维布、 穿孔FC板(4.5%)

表 4 不同条件下平均吸声系数、总吸声量及混响时间的计算值

计算条件		中心频率(Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
空 场	平均吸声系数 $\bar{\alpha}_1$	0.31	0.38	0.41	0.41	0.38	0.34
	总吸声量 $A_1(m^2)$	2430	2938	3204	3156	2935	2609
	混响时间 $T_1(s)$	2.80	2.20	1.95	1.92	1.99	1.92
满 场	平均吸声系数 $\bar{\alpha}_2$	0.36	0.44	0.47	0.48	0.45	0.41
	总吸声量 $A_2(m^2)$	2790	3388	3654	3696	3475	3209
	混响时间 $T_2(s)$	2.35	1.82	1.64	1.57	1.62	1.57
空 场 (顶无吸声)	平均吸声系数 $\bar{\alpha}_3$	0.15	0.17	0.18	0.17	0.16	0.14
	总吸声量 $A_3(m^2)$	1134	1354	1404	1356	1279	1097
	混响时间 $T_3(s)$	6.60	5.42	5.23	5.21	4.48	3.69

3 组合式空间吸声体的设计与试验

3.1 组合式空间吸声体的设计

多年来,空间吸声体已在国内外得到十分广泛的应用^[2],在虹口体育馆的音质设计中首次设计应用了由新颖方筒式吸声体及浮云式吸声板组合而成的组合式空间吸声体,并采用了离心玻璃棉及永久性阻燃装饰织物等新型吸声及护面材料,不但为控制混响时间起到了关键作用,而且还取得了十分满意的建筑装饰效果,使虹口体育馆的吸声顶棚既暴网架结构,又兼具色调柔和、立体感强、透视效果好、吸声效率高等综合特点。

虹口体育馆组合式空间吸声体中的方筒

式吸声体尺寸为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 高 0.8 m ,展开面积 6.4 m^2 ,而浮云式吸声板尺寸为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$,面积 4 m^2 。在网架下弦共悬挂121个筒式吸声体和175块浮云式吸声板,总计吸声面积为 1474.4 m^2 ,占整个网架平顶面积的比例为51%,其费用仅为11万元,网架荷载仅增加 1.7 kg/m^2 ,因此在减轻荷重、节省材料和降低造价方面也显示出甚好的经济效益。

3.2 组合式空间吸声体的性能试验

为了深入了解组合式空间吸声体的吸声特性,以便合理控制并达到设计所需的吸声量,设计中对组合式空间吸声体进行了多种条件的性能测试和分析比较^[3],表5及图3为主要试验结果,图4为组合式空间吸声体同其它多种吸声体吸声特性的比较^[4]。

表5 组合式空间吸声体与其它吸声体的比较

试验序号及条件	吸 声 系 数 (α_T)						平均值 $\bar{\alpha}_T$
	125	250	500	1000	2000	4000	
二块板式贴顶 $h=0$	0.38	0.81	1.13	1.02	0.97	1.02	0.89
二块板式悬空 $h=0.46\text{m}$	0.59	1.13	1.51	1.62	1.56	1.56	1.33
二块板式悬空 $h=0.98$	0.65	1.13	1.56	1.67	1.51	1.67	1.37
二个筒式贴顶 $h=0$	0.78	0.98	1.25	1.31	1.31	1.31	1.16
二个筒式悬空 $h=0.46$	0.51	0.94	1.38	1.45	1.35	1.45	1.18
二个筒式悬空 $h=0.88$	0.34	1.04	1.55	1.48	1.48	1.52	1.24
二筒二板悬空 $h=0.46$	0.52	0.95	1.55	1.43	1.30	1.55	1.22
二筒二板悬空 $h=0.88$	0.50	0.97	1.55	1.57	1.47	1.57	1.27
一筒一板悬空 $h=0.46$	0.66	0.95	1.41	1.45	1.45	1.49	1.24
一筒一板悬空 $h=0.88$	0.54	0.95	1.62	1.62	1.58	1.58	1.32

分析试验结果,可得以下主要结论:

(1)在悬空吊挂条件下,组合式空间吸声体

的吸声特性介于浮云式板状吸声体和方筒式空间吸声体之间。如板式平均吸声系数

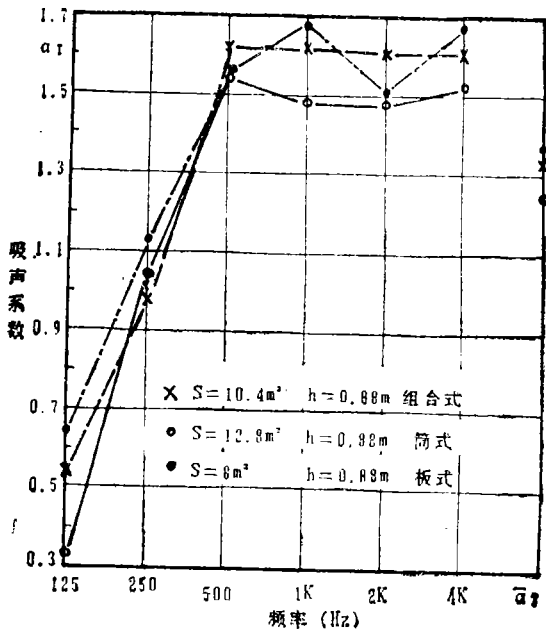


图3 组合式空间吸声体吸声特性

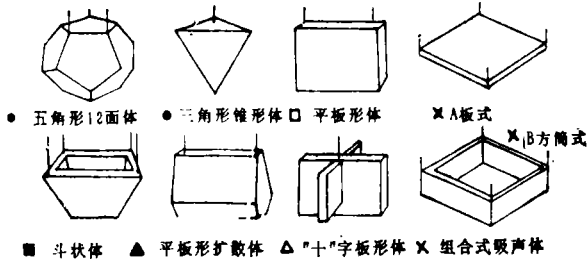
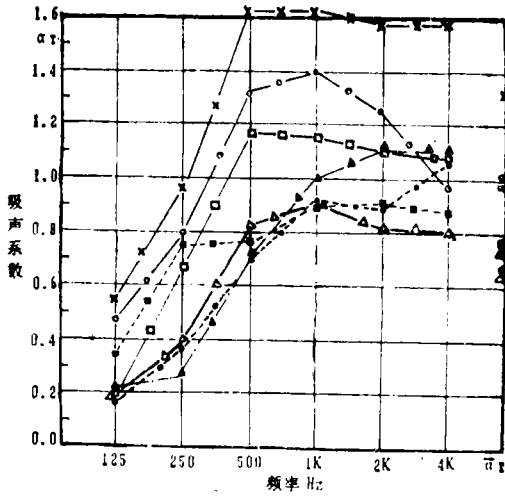


图4 组合式空间吸声体同其它各种吸声体吸声特性比较图

为1.33~1.37、方筒式为1.17~1.24、而组合式则为1.22~1.32, 由于组合式空间吸声体可以变化出多种不同组合形式, 因此更适合于体育馆等大型厅堂音质工程中应用;

(2) 贴顶及悬空不同安装条件, 对板式吸声体在很宽频率范围内均有显著影响。如悬空悬挂后, 高频吸声系数可提高60%左右, 而平均吸声系数也可增大40%左右。这同作者以前对吸声体所作专题研究结论也相吻合^[5], 对提高吸声工程的经济效益将起到甚为显著的作用;

(3) 不同悬挂高度对筒式吸声体的平均吸声系数影响虽不明显, 但对其吸声频率特性则有一定影响, 如贴顶安装时低频性能相对较好, 而悬空吊挂时, 则可改善高频性能。

(4) 相同悬挂高度不同组合方式的组合式吸声体的吸声特性基本相同, 这就使设计和应用更具灵活性, 更利于达到建筑、吸声、照明及扩声等多功能要求的统一。

4 音质测试与效果评价

4.1 音质测试主要结果

虹口体育馆建成后, 对馆内空场混响特性、声场均匀度、本底噪声作了现场测试(测点见图1), 表6、表7及图5为主要实测结果。

虹口体育馆空场本底噪声的实测结果为: 不开空调时为 ≤ 38 dBA, 开空调时为40 dBA, 效果也是十分满意的。

4.2 音质效果的综合评价

(1) 混响时间实测与设计计算值相当接近, 尽管每座容积高居众多体育馆之首, 控制混响难度很大, 但由于建声设计中混响控制设计得当, 特别是首次设计应用具有高效宽带吸声性能的组合式空间吸声体, 成功地控制了混响, 达到了设计预期的效果;

(2) 馆内混响分布均匀, 声场扩散良好,

表 6 混响特性测量结果*

条 件	混 响 时 间 (秒)					
	125	250	500	1000	2000	4000
空场混响实测值	2.75	2.19	1.89	1.88	1.96	1.89
空场混响设计值	2.80	2.20	1.95	1.92	1.99	1.92
空场顶无吸声推算值	6.48	5.45	4.93	4.69	4.48	3.59
满场混响推算值	2.32	1.81	1.58	1.54	1.61	1.55
满场混响设计值	2.20	1.80	1.60	1.60	1.60	1.60
组合吸声体降低混响值	3.73	3.26	3.04	2.81	2.52	1.70

*混响时间测量方法参照国标GBJ76—84厅堂混响时间测量规范

表 7 声场测量结果**

条 件 Hz	125	250	500	1000	2000	全 通 带
最大最小声压级差 dB	6	8	8	8.5	10	6
声场均匀度 dB	± 3	± 4	± 4	± 4.3	± 5	± 3

**声源为倍频带粉红噪声及全通带粉红噪声、顶部24条扩声声柱发声,33个测点分布在整个体育馆的半场。

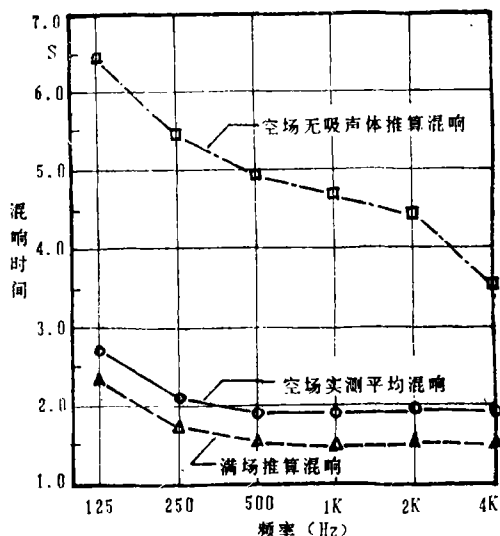


图 5 空场混响时间特性曲线

这同不等边平面体型设计,折线形墙面扩散处理及顶部悬挂高低错落有致、立体感较强的组合式空间吸声体均有密切关系;

(3)根据实测空场混响,应用统计的观众吸声增量^[6]推算的满场混响与设计值符合良好,且混响频率特性也达到高频基本平直、低频适当提升的理想特性,为获得最佳音质效果提供了重要条件;

(4)组合式空间吸声体在混响控制中发挥了关键作用,使馆内混响时间平均降低约3秒,而其实际吸声面积仅为平顶面积之半,达到了用料少、投资省、吸声效率高、装饰效果好的满意效果,受到多方好评;

(5)虹口体育馆建成后,不仅成为虹口

(下转20页)

表 4 蔗糖溶液三种结晶成核方法有关指标的比较

项目	实绩		成核方法		
			空气刺激	球磨糖粉	声波
糖液过饱和度	成核器内				1.08~1.10
	结晶罐内底料		1.30~1.32	1.18~1.20	1.10~1.12
晶 种 状 况	入结晶罐前晶核密度 (颗/cm ³)		—	8.1×10 ⁸	1.5×10 ⁶
	初始晶核形状		多种形态	原晶棱失去	晶形美观
	结晶罐内底料晶核密度 (颗/cm ³)		2.67×10 ⁵	3.47×10 ⁵	1.62×10 ⁵
	结晶罐	MA(μm)	63.5	67.3	94
	中晶核	CV(%)	48.71	51.18	38.27
成 品	砂粒大小(mm)		0.25~0.55	0.2~0.5	0.4~0.7
	砂粒形状		大小不均	粘晶、大小悬殊	粘晶少晶体整齐
质 量	砂粒MA(mm)		0.46	0.42	0.65
	CV(%)		39.13	40.48	36.46
说 明	1. 采用显微拍摄法计算结晶罐中晶核平均大小MA和变异系数CV, 采用筛选法计算成品砂粒平均大小MA和变异系数CV 2. 声波成核法采用输出功率200W, 频率6.4kHz左右, 所得晶核MA值较大, 是因为声波作用10分钟后方采样所致, 成品砂粒MA值较大是因为作为种子的晶核密度不够所致。				

(上接7页)

区体育及综合文艺活动中心, 也是上海举办国际国内重大体育比赛的重要场馆。去年以来已先后举办过全国击剑冠军赛、首届东亚手球锦标赛、国际武术比赛、全国女子手球锦标赛、汉堡上海女排赛以及上影厂、上海电视台、上海东方电台、深圳及新疆歌舞团等大型文艺演出活动。使用表明, 虹口体育馆混响适中、音质优良, 体育比赛时有满意的听音清晰度, 文艺演出时也有理想的丰满度, 受到馆方、区、市体委及有关方面的赞赏和好评。并获上海市优秀设计奖。

参考文献

- 1 编写组 建筑声学设计手册, 中国建筑工业出版社, 1987
- 2 章奎生 国内外空间吸声体发展与应用综述, 环境工程, 1983; 3
- 3 章奎生 组合式空间吸声体的设计与试验, 噪声与振动控制, 1993; 1
- 4 项端祈 等亚运会体育馆声学设计的新进展, 北京市建筑设计院资料, 1990
- 5 章奎生 浮云式空间吸声板声学性能的实验研究, 建筑声学及噪声控制论文集, 华东建筑标办出版, 1981
- 6 项端祈、王峥 用听众吸声增量计算观众厅满场混响时间的建议, 声学技术, 1988; 7(2)