



国家奥林匹克体育中心 综合体育馆和游泳 馆^①的声学设计

项端祈 王 峰 陈金京

(北京市建筑设计研究院研究所)

1990年8月27日收到

国家奥林匹克体育中心包括综合体育馆、游泳馆、两个练习馆和体育场等五项工程。本文着重介绍体育中心两个主馆的声学设计、竣工后的调试和取得的成果,以及笔者对今后大型体育馆声学设计的建议。

一、概 述

国家奥林匹克体育中心(以下简称体育中心)综合体育馆和游泳馆是我国、也是亚运会体育馆建筑中规模最大、标准要求最高的两个现代化体育馆。两个馆由于规模和功能的不同,因此,声学设计的指标和为达到预期音质要求的措施就各不相同。综合体育馆在亚运会期间将在这里进行多项球类、体操比赛的决赛;会后供多功能使用,因此,该馆按多功能厅堂作声学设

具有必要的音质效果,在初步设计时,就由设计和声学专家组共同商定了两馆的声学指标,并

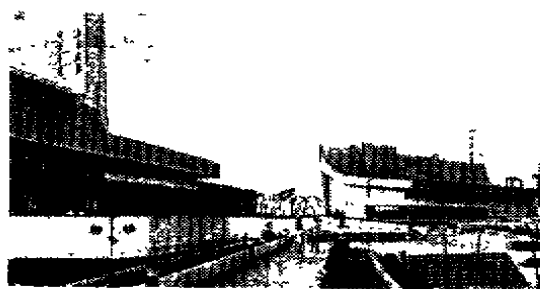


图1 体育中心综合体育馆(左)和游泳馆(右)的外景

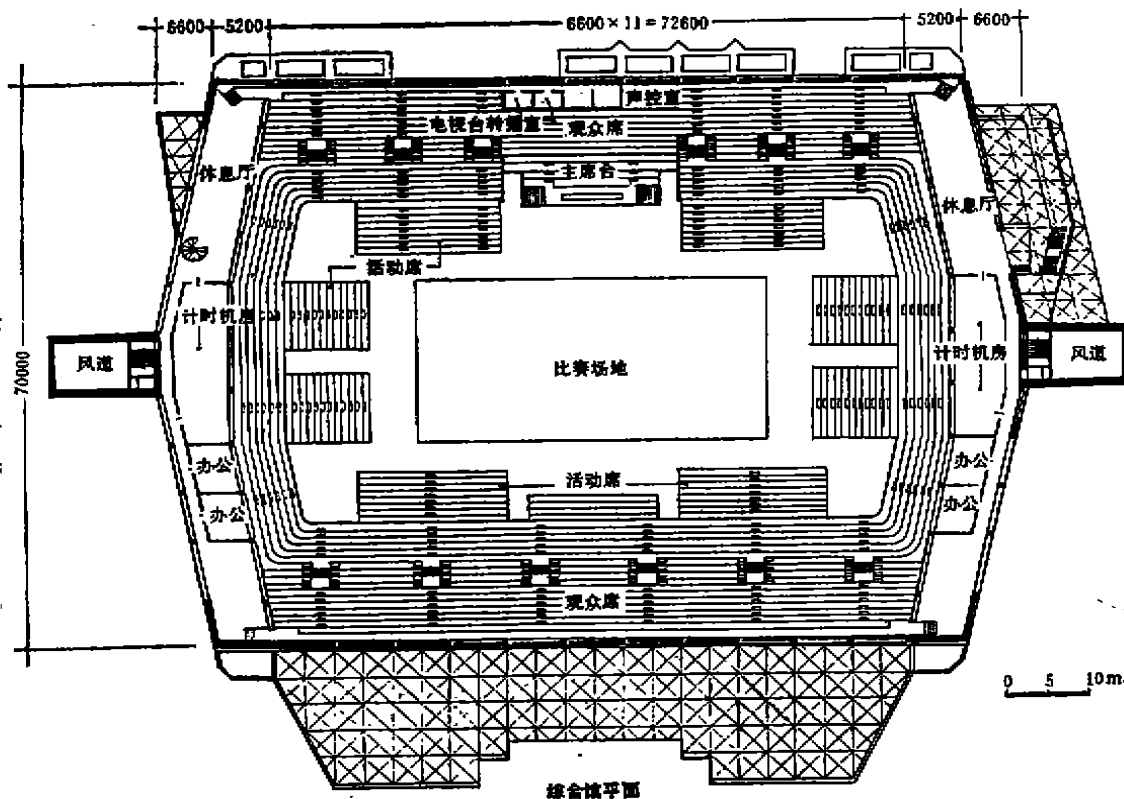
表1 体育中心综合馆和游泳馆的形式、规模和声学设计指标

馆的名称	用 途	平、剖面形式	馆内尺寸 (m)	容量 (座)	容积 (m ³)	每座容积 (m ³ /座)	声学设计指标			
							500Hz		背景噪声 dBA	频率响应 125— 4000Hz
							满场混响 (s)	声场不均 匀度(dB)		
综合馆	体育比赛 和多功能 使用	接近矩形 人字网架 不设吊顶	长: $L = 99.0$ 宽: $B = 70.0$ 顶高: $H = 34.5$	6400	100000	15.6	1.6	$< \pm 3.0$	40	$< 10\text{dB}$
游泳馆	游泳和跳 水比赛	同上	长: $L = 117.0$ 宽: $B = 79.5$ 顶高: $H = 35.0$	5500	162000	29.4	2.5	$< \pm 3.5$	46	$< 10\text{dB}$

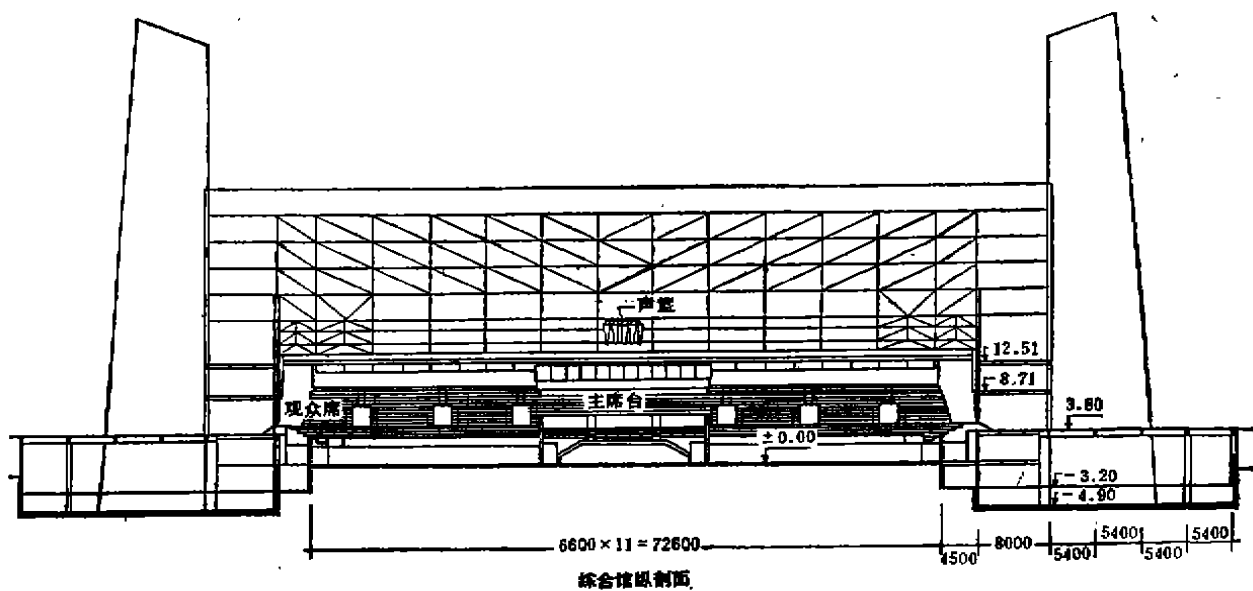
计;而游泳馆仅供游泳和跳水比赛使用。根据两馆的不同功能,为确保馆内在比赛和训练时,

应用声学

① 体育中心综合馆的建筑师为闵华英;游泳馆的建筑师为刘振秀。



(a) 综合馆平面

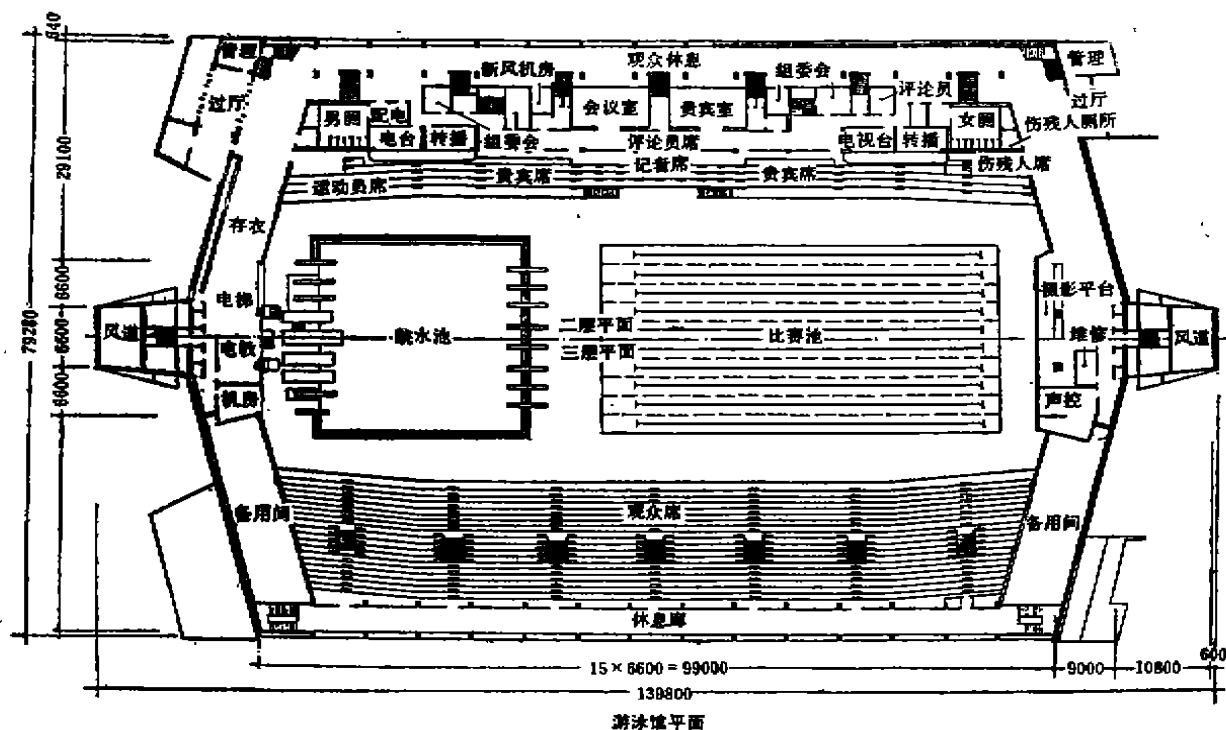


(b) 综合馆纵剖面

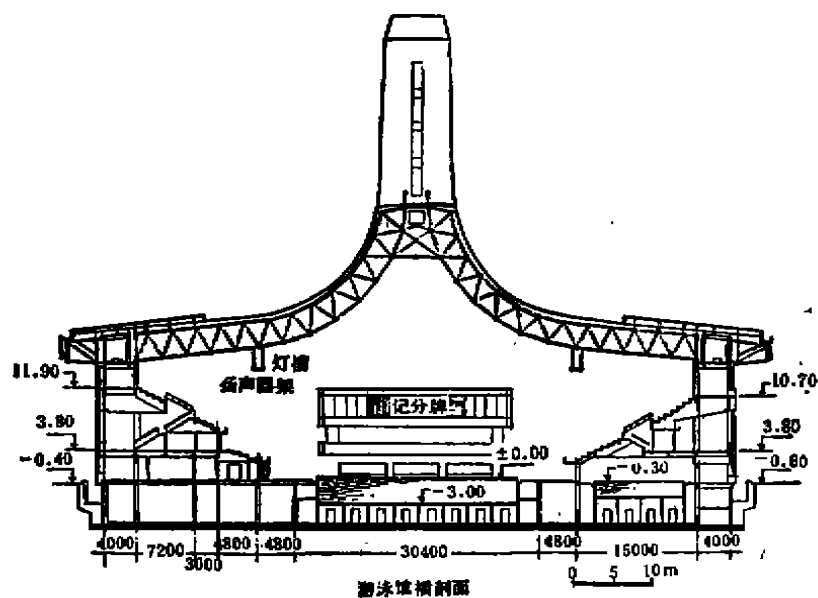
图2 综合体育馆平、剖面图

经亚运会指挥部认可。两馆的形式、规模和确定的声学设计指标见表1所示。

图1 为两个馆的外景。图2(a)、(b), 图3(a)、(b)分别为综合馆和游泳馆的平、剖面。



(a) 游泳馆平面



(b) 游泳馆横剖面

图3 游泳馆平、剖面

根据上述要求的指标,进行了声学设计和
施工进程中的声学调试。两馆于90年7月建
应用声学

成并交付使用。通过声学监测和试用,以及追
加声学处理,达到了预期的指标,获得了好评。

二、声学设计

① 声学设计的难点

综合馆、游泳馆在声学设计中的难点可概括为如下几方面:

表2 国内以往所建综合体育馆与体育中心综合馆容积的比较

体育馆名称	容积 (m^3)	容量 (座)	每座容积 ($\text{m}^3/\text{座}$)	体育馆名称	容积 (m^3)	容量 (座)	每座容积 ($\text{m}^3/\text{座}$)
体育中心综合体育馆	100000	6400	15.6	山东体育馆	58800	8820	6.7
首都体育馆	168000	19200	8.8	五台山体育馆	63240	10000	6.3
上海体育馆	140000	18000	7.8	徐州体育馆	21800	3000	7.3
天津体育馆	43000	5200	8.3	天津河西馆	23520	2760	8.5
辽宁体育馆	79000	11000	7.2	上海黄浦馆	31100	3701	8.4
陕西体育馆	70600	8000	8.8	成都城北馆	39550	6000	6.6
浙江体育馆	37725	5300	7.0	郑州火车头馆	22200	3460	6.4

表3 体育中心游泳馆与国内几个大型游泳馆的容积比较^[1]

游泳馆名称	容积 (m^3)	容量 (座)	每座容积 ($\text{m}^3/\text{座}$)
体育中心游泳馆	162000	5500	29.4
广州天河体育中心游泳馆	75270	3300	22.8
上海游泳馆	87000	4100	21.0

(2) 吸声处理面积小

在馆内可进行吸声处理的部位仅限于屋架和山墙,而山墙(或称端墙)上扣除大块记分牌和声、光控制室的窗面积后,能做吸声处理的面积不多。因此,必须在有限的处理面积内选用强吸声结构;

(3) 音质要求高、投资有限、工期短。

目前国内大型体育馆的满场混响时间均在1.7—2.0s范围内,体育中心综合馆每座容积比国内大型体育馆几乎增加一倍,却要求混响时间为1.6s;体育中心游泳馆每座容积比上海馆、天河馆大35%,混响时间要求接近2.5s;其它几项声学指标也比同类体育馆高,但用于声学处理的投资极为有限,且工期很短;

(4) 在短期内确定防潮、价廉的吸声结构

在游泳馆内选择吸声材料的难度最大,由

(1) 容积大:为了减轻屋架和基础的荷载、节约吊顶的投资,两馆均采用暴露屋架,不设吊顶的形式,从而使容积剧增。远大于国内同类体育馆。分别见表2、表3。由于容积大,为控制混响时间所需的吸声量很大,而平均自由程的提高,容易引起回声和颤动回声;

于馆内相对湿度高达100%,常用玻璃棉、岩棉等多孔吸声材料都不适用,微穿孔板吸声结构最适用于潮湿和卫生要求较高的房间,但它必须在穿孔板后设置空腔,当用于屋架时,就须设置吊顶,上海、广州天河游泳馆都采用吊顶构造。而体育中心游泳馆采用暴露屋架的形式,不设吊顶。因此,必须寻求另一种防潮、价廉的吸声结构,这在短期内难度也很大。

以上是体育中心两个馆声学设计的难点,也是在声学设计中,必须解决的问题。

② 混响时间的控制

在体育馆声学设计中,主要是正确选择合理配置吸声结构,达到控制混响时间、防止音质缺陷的目的。

(1) 体育中心综合馆

为了用最小的声学处理面积、获得尽可能大的吸声量,采用了平板状、锥状和三角形铝板钻孔空间吸声体,分别悬挂在屋架的周边、场中央和马道下;两侧山墙除记分牌和声、光控制室玻璃窗以外的墙面,均配置1.2mm厚钢板钻孔吸声结构。上述各项构造的面积和吸声性能见表4所示。

表4内所列四项吸声构造的总面积为8665 m^2 ,用以控制馆内的混响时间;此外,还有

表4 体育中心综合馆所用吸声构造的面积和吸声性能

配置部位	构造简述	面积 (m^2)	下述频率 (Hz) 的吸声系数 α		
			125	500	2000
悬吊在网架周边	① 平板吸声体, 厚 100mm, 多种规格, 1mm 铝板钻孔, 孔率 28%, 内衬玻璃布, 填超细玻璃棉。	5506	0.31	1.15	1.10
悬吊在网架中央	② 锥形吸声体, 底盘尺寸为: 1200×1200 mm, 高 300mm, 铝板钻孔, 内部构造同上。	69	0.38	1.27	1.05
屋架马道下	③ 三角形柱体, 宽 1000mm, 高 300 mm, 铝板钻孔构造同上。	1150	0.22	0.89	0.97
两侧山墙	④ 1.2mm 厚钢板钻孔, 板后衬玻璃布, 空腔 100mm, 腔内填 100mm 厚玻璃棉毡。	1940	0.29	0.85	0.81

* 注: 空间吸声体,按每个吸声体的吸声量除以展开面积求得。

2300m²的木地板和300m²的玻璃窗,对馆内低频混响的控制也起到相当大的作用。

(2) 体育中心游泳馆.

游泳馆内的吸声结构要解决防潮、卫生、价廉和

表 5 开缝板后衬垫土工布,在不同相对湿度时的吸声特性

测定方法	构造简述	下述频率 (Hz) 的吸声系数		
		125	500	2000
驻波法	双层 6mm 厚土工布, 实贴, 自然状态	0.07	0.12	0.40
	同上, 相对湿度增至 50%	0.09	0.13	0.40
	同上, 相对湿度增至 100%	0.05	0.11	0.40
混响室法	8mm 厚土工布实贴, 相对湿度为 60%	0.05	0.43	0.60
	同上, 离刚性面 50mm, 铝开缝板复面, 开缝率 28%、湿度为 60%	0.18	0.42	0.63
	同上, 离刚性面 200mm, 开缝 FC 板复面, 开缝率 20%	0.35	0.58	0.55

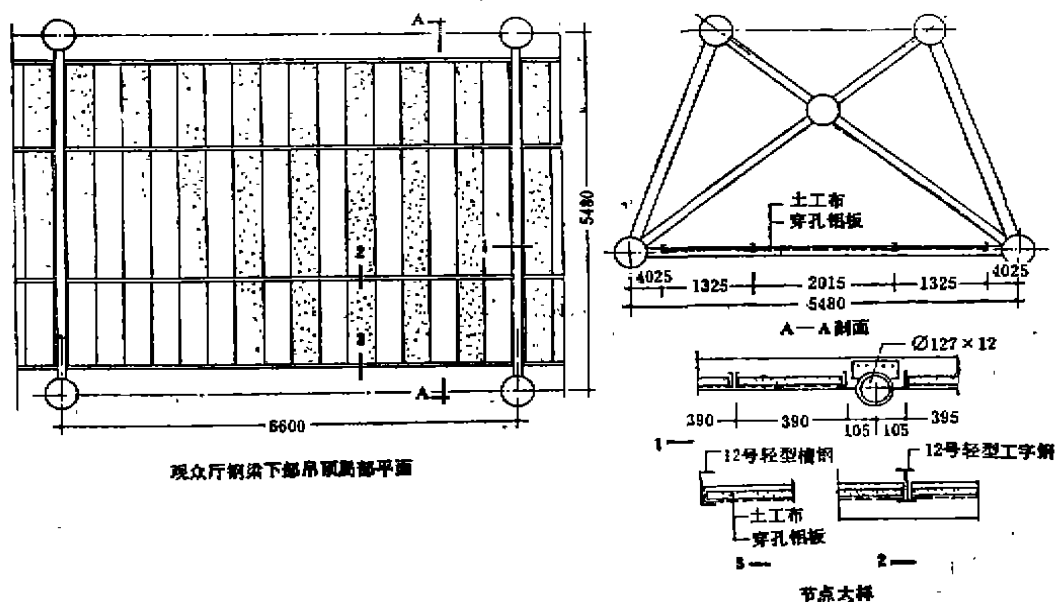


图 4 游泳馆圆架上弦吊置的吸声构造及配置

具有足够吸声性能等多项指标。为此,曾对多种防潮吸声材料,如泡沫玻璃、泡沫陶瓷、穿孔聚苯和无纺织物进行了吸声、造价、施工程序和材料来源等各方面的比较,最后确定用开缝铝板、高强水泥纤维板(简称FC板)、后面配置土工布(一种防水的无纺织物)的吸声结构,分别

配置在屋架上弦和墙面上。这一结构的造价仅为微钻孔板结构的1/3,加工安装简便,且在潮湿条件下,仍能有一定的吸声性能,见表5所示。图4、图5分别为设在顶部和墙面的构造和配置。

在馆的网架(屋架)上配置3400m²,墙面

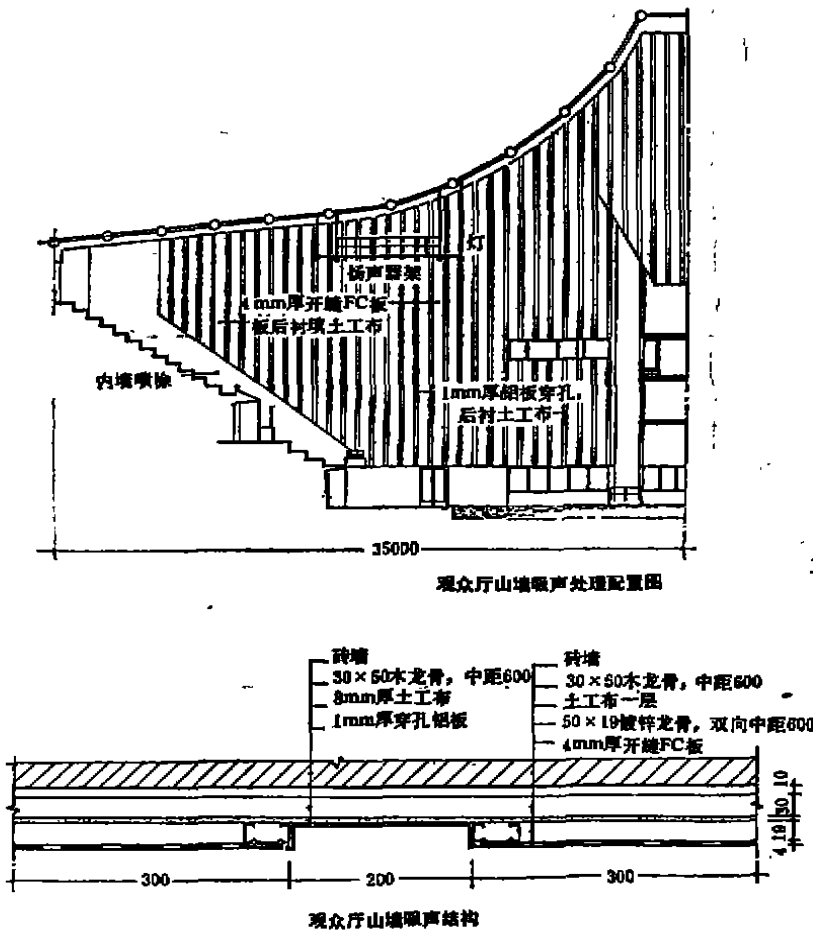


图5 设置在山墙上的开缝吸声构造及配置

表6 体育中心综合馆、游泳馆的计算混响时间(满场)

混响时间计算公式	馆的名称	设计值	下述频率(Hz)的混响时间(s)		
		计算值	125	500	2000
计算式: $T_{60} = \frac{0.161V}{-S \ln(1-\bar{\alpha}) + 4mV}$ 式中: V: 为馆内容积 (m ³); S: 为馆内总表面积 (m ²); m: 为空气中的衰减系数*	综合馆	设计值	1.9	1.6	1.6
		计算值	2.05	1.62	1.48
	游泳馆	设计值	3.0	2.5	2.0
		计算值	3.4	2.1	2.2

* 注: 综合馆的衰减系数,按相对湿度60%计算;游泳馆按80%计算。

2200m²吸声构造。原计划在池边铺设橡胶地毯 1200m²,马道下衬垫 200m²土工布,总计 7000m²作为控制馆内的混响时间。

上述两个馆经吸声处理后的计算混响时间达到了设计要求。见表 6,实测结果将在后面介绍。

(3) 对足够的声强和均匀声场分布的考虑

在体育馆内,要使观众席和场地获得足够的声强和均匀的声场分布,主要依靠扬声系统选择得当。扬声器组的配置要根据观众席的布置方式而定。在大容积的体育馆内,由于混响时间长,通常均采用分散系统,每组扬声器功率小、投射距离短,就可减少馆内长混响的影响而获得均匀的声场分布、防止长距离声反射而引起的回声。同时对提高语言清晰度也有利。

综合馆在场地周围配置观众席,因此在场中央的网架下悬吊“声篮”(由小功率声柱组成);使各向投射距离短而均匀;

游泳馆因设置跳水池,馆长很大,为确保最佳视距而在比赛池两侧配置观众席。对此,在每侧配置 8 组高低音组合声柱,吊置在观众席上部的灯架上(见图 3),这样声柱的投射距离很短、且主轴针对观众席,保证了足够的声强和均匀的声场分布。为使场地的运动员、裁判员和教练员获得良好的听闻,也设置了 8 组声柱,悬吊在屋架上。

(4) 馆内的噪声控制。

馆内噪声源主要是空调、制冷系统。对此,在系统的送、回风机与风管的接口处配置了室式(迷路式)和阻抗复合式消声器,在进入馆内时又追加了 ZK¹²¹型阻性消声器。为了控制系统的低频噪声,在系统的立管内(即馆端部的塔楼内)砌置了共振频率 f_0 为 125—250Hz 的共振吸声砖^[2]。

为了防止气流噪声的干扰。管内流速控制在如下标准范围内:

综合馆:

主风道: <7.5m/s;

支风道: <6.0m/s;

馆内出风口: <4.0m/s。

游泳馆:

主风道: <9.0m/s;

支风道: <7.0m/s;

馆内出风口: <5.0m/s。

此外,馆内所有空调、制冷设备均作了隔振基础,以防止固体声的传递。

三、声学监测和评价

体育中心综合馆和游泳馆在竣工后都进行了声学测定,其结果表明,除游泳馆混响时间偏长外,其它声学指标都达到了设计要求。

游泳馆混响时间未能达到预期的要求,其原因在于:顶部土工布厚度不符合设计要求;池边地面透空橡胶地毯没有铺设。对此,采取了如下追加吸声处理:

- * 观众席两侧窗前设 240m² 窗帘,距玻璃 200mm;

- * 在主席台、贵宾席铺设 230m² 化纤地毯;

- * 在马道下增设 180m² 土工布;

- * 人字形网架顶部追加 500m² 开缝铝板吸声结构。(该项处理在亚运会前未能实施)。

经处理后,馆内中频混响时间,达到了设计要求。各项测定结果见表 7 所示。

对两个馆的评价是通过近期的比赛,对观众和运动员的调查为依据的。对综合馆的评价比较一致:普遍反映、语言清晰度高,即使在空场情况下,清晰度就很高,馆内噪声低,没有音质缺陷;对游泳馆的评价反映不一:有少数观众反映比赛时,背景噪声低、清晰度较高、无音质缺陷;但多数观众和工作人员反映,馆内清晰度不如综合馆、且馆内各部位有明显差异:主席台、记者席和针对扬声器组的观众席清晰度高、两组声柱间稍差,场地较差。分析其原因是空场混响时间长、观众席声柱不够密集,以及水池上面的扬声器组与水面多次声反射所引起的。满场时,定能有明显的改善。实践证明:亚运会正式比赛使用时,当场内约 4000 名听众时,清晰度很高,得到了好评。在如此大容积的体育馆内,能达到预计的声学指标,并获得观众和

表 7 综合馆、游泳馆内各项声学指标测定结果

馆的名称	馆内状况	测定内容	频率 (Hz)		
			125	500	2000
综合馆	全部完工, 满场 按 6400 名听众折算	空场混响时间 (s)	2.40	2.65	2.80
		满场混响时间 (s)	1.85	1.61	1.53
		声场不均匀度 (dB)	±2.0	±2.3	±2.0
		频率响应 (dB)	8.2<10(125—4000Hz)		
		背景噪声 (dBA)	37<40		
游泳馆	全部完工, 少部分坐椅未装 全部座椅装完: 增设 240m ² 天鹅绒窗帘; 230m ² 化纤地毯; 马道下铺 180m ² 土工布; 5500 名听众	空场混响 (s)	4.28	3.55	3.90
		满场混响 (s)	3.20	2.42	2.30
		声场不均匀度 (dB)	±1.1	±2.0	±1.5
		频率响应 (dB)	7.8<10(125—4000Hz)		
		背景噪声 (dBA)	38<46		

运动员的好评是设计、施工和各有关部门通力协作的结果。

四、对大型综合体育馆、游泳馆声学设计的几点建议

通过体育中心综合馆、游泳馆的声学设计, 以及对国内体育馆的声学调查, 对今后体育馆的声学设计提出如下几点建议:

1. 目前大型综合体育馆的混响时间设计指标偏高, 以体育中心综合馆为例, 空场中频(500 Hz)混响时间为 2.65s, 语言清晰度很高, 广州天河中心体育馆、深圳体育馆、首都体育馆和上海体育馆也有同样状况, 可见设计当初确定为 1.6s 标准偏高, 造成投资上的浪费。建议今后大型综合馆的中频混响时间控制在 2.0s 以下, 完全可以满足多功能使用要求;

2. 大型体育馆满场混响时间测量困难很大, 原因在于观众满场的情况极少, 即使有可能, 则测量的组织工作和观众的噪声难以控制。

因此, 建议今后以空场实测混响时间, 用听众吸声增量进行折算^[4];

3. 提高馆内语言清晰度, 主要应立足于扩声系统的设计和合理配置, 降低混响时间处于从属地位。因为完全依靠降低混响达到提高清晰度的目的, 在大型体育馆内投资太大。体育中心体育馆仅馆内吸声处理耗资 140 万;

4. 大型体育馆的声学设计, 建声与扩声设计应独家承包, 有利于协调工作, 节约投资, 获得良好的效果, 同时也减少扯皮;

5. 游泳馆的中频(500Hz)混响时间可控制在 2.5—3.0s 范围内。由于用途单一(游泳和跳水比赛), 语言清晰主要是报成绩和人名, 完全可以通过分散式扩声系统获得满意的效果。

参 考 文 献

- [1] 中国建筑学研究院主编, 建筑声学设计手册, 中国建筑工业出版社 1987, 637—641。
- [2] 项端祈编著, 空调制冷设备的消声与隔振, 中国建筑工业出版社 1990, 23—24, 58—65。
- [3] 项端祈、陈金京, 噪声与振动控制 2(1990), 18—20。
- [4] 项端祈、王铮, 声学技术, 7-2(1988), 44—46。