



奥运体育建筑中特大型 综合体育馆建筑声学设计实践

陈金京, 王 峥, 薛长健

(北京市建筑设计研究院 声学工作室, 北京 100045)

【摘要】 国家体育馆和北京奥林匹克篮球馆均为北京奥运会新建的两个综合性体育馆, 体积巨大, 属特大型体育馆。本文从特大型体育馆自身特点出发, 对两个奥运场馆的建筑声学设计作了简单介绍, 并结合竣工验收结果, 总结出特大型体育馆建筑声学设计过程中应注意的几个关键点, 希望对类似场馆的声学设计提供参考。

【关键词】 特大型体育馆; 声学设计; 混响时间

Acoustic Design of Largest Gymnasiums Built for Beijing Olympic Games

CHEN Jin-jing, WANG Zheng, XUE Chang-jian

(Acoustical Atelier, Beijing Institute of Architectural Design, Beijing 100045, China)

【Abstract】 National Gymnasium and Olympic Basketball Hall are two largest gymnasiums that were built for Beijing Olympic Games. There are outsize gymnasiums. Acoustic design of them is introduced in this paper.

【Key Words】 outsize gymnasium; acoustic design; reverberation time

1 绪论

随着北京奥运会和残奥会的圆满结束, 在我国体育健儿取得优异成绩同时, 各项奥运体育建筑的优良性

能, 也得到世人的认可。

位于北京奥林匹克国家公园的国家体育馆和位于五棵松文化体育中心的北京奥林匹克篮球馆, 均可

容纳1.8万名观众, 属于特大型综合体育馆。综合体育馆不但要满足体育比赛的使用要求, 还要满足大型文艺演出和大型群众集会的使用要求, 进一

步加大了声学设计的难度。本文简单介绍这两个特大型综合体育馆的声学设计,并对特大型综合体育馆中的一些建筑声学设计问题进行探讨。

1.1 主要建筑设计特点

奥运体育建筑中特大型综合体育馆在建筑上主要有以下几个特点:

(1) 容纳观众数量多

根据JGJ31-2003《体育建筑设计规范》,特大型体育馆的界定为容量大于1万座,而本文介绍的两个体育馆的容量均在1.8万座。

(2) 体积巨大

在JGJ31-2003中,混响时间指标根据体育馆的体积分为三档,大于 $80\,000\text{ m}^3$, $40\,000\text{ m}^3 \sim 80\,000\text{ m}^3$,小于 $40\,000\text{ m}^3$,而国家体育馆的容积为 $510\,900\text{ m}^3$,北京奥林匹克篮球馆的容积 $347\,400\text{ m}^3$ 。

(3) 采用桁架结构形式

在我国,北京亚运会前的早期体育馆,如首都体育馆等,多在屋顶结构下设置装修吊顶;在北京亚运会以后建造的体育馆基本上取消了装修吊顶的做法,屋顶的结构形式多采用钢网架;而此次为北京奥运会建造的体育馆屋顶的结构形式采用了桁架结构,跨度很大,同时屋顶桁架结构系统的承载力有限。

(4) 轻质屋面

体育馆屋面均采用轻质金属材料屋面。

(5) 连通的空间形式

以往的体育馆比赛大厅多为单独的封闭空间,与周围的休息厅等空间分隔,而近期建造的体育馆建筑为满足消防要求,多采用与周围空间连通的建筑形式,即:将比赛大厅与其周围的休息大厅连通成一个空间。

(6) 多用途使用

奥运会的体育馆不仅要考虑奥运会期间的体育比赛,还要考虑赛后的使用,包括文艺演出和大型集会等功能。

1.2 建筑声学设计要点

由于特大型综合体育馆的上述建筑特点,使得在建筑声学设计中产生如下要点。

(1) 混响时间指标的确定

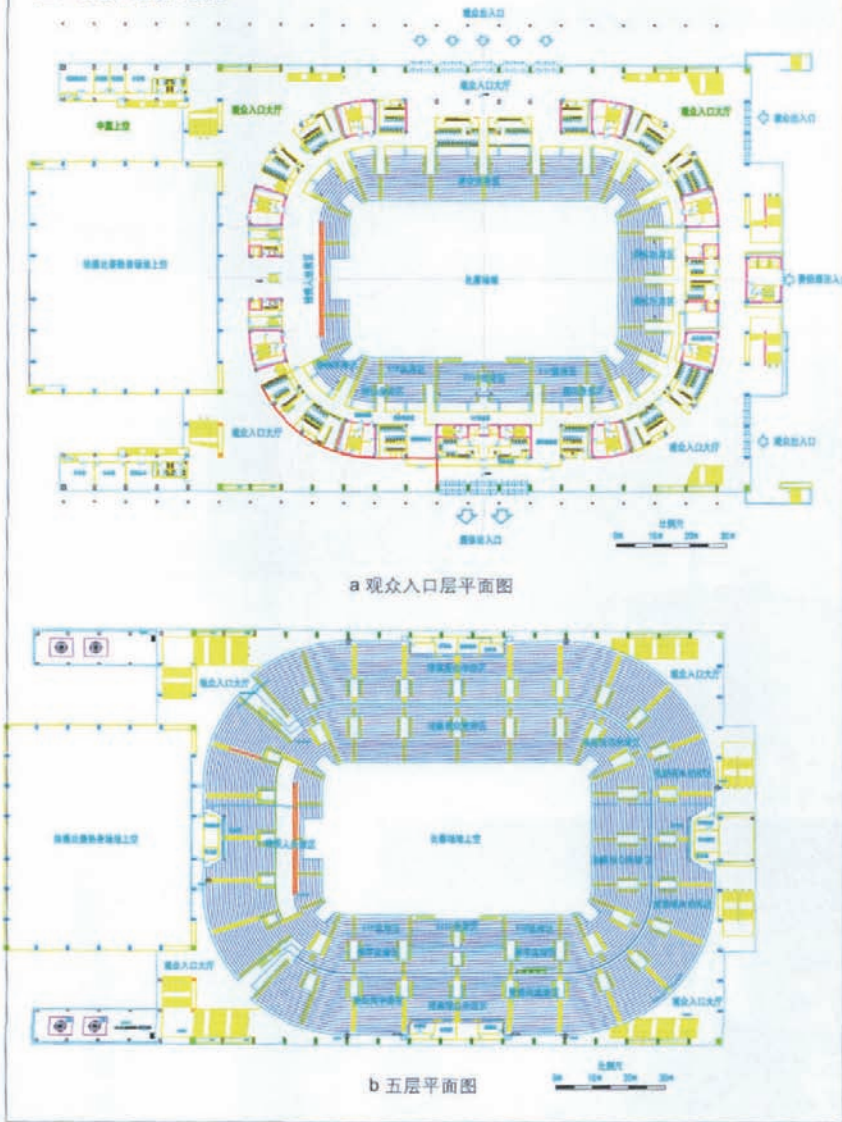
根据JGJ31-2003,体积大于

$80\,000\text{ m}^3$ 的特级和甲级体育馆混响时间为 1.7 s ,而本文介绍的特大型体育馆生搬硬套规范中的混响时间指标并不科学,因此,如何确定特大型体育馆的混响时间设计指标,是一个值得探讨的问题。

图1 国家体育馆的外形及与“鸟巢”、“水立方”的关系



图2 国家体育馆平面图



(2) 混响时间的控制

由于体育馆体积巨大, 比赛大厅与休息大厅又连通成一体, 这给比赛大厅的混响时间控制造成了困难。

(3) 吸声材料的布置

体育馆屋顶采用了桁架结构, 对天花吸声体的布置形式有较大的限制。另外, 比赛大厅与休息大厅连通, 这就要求两个大厅内均应控制混响时间, 而比赛大厅内能布置吸声材料的墙面较少, 休息厅的墙面则多为玻璃幕墙, 能供布置吸声材料的界面也很少。

(4) 轻型金属屋面的隔声

屋面材料以轻质金属板为主, 金属板自身隔声能力较差, 必须找到增强其隔声性能特殊构造, 以解决其空气声隔声和雨噪声隔声性能较弱的问题。

(5) 声学缺陷的防治

比赛大厅体积巨大, 可布置吸声材料的界面相对较少, 造成空间的平均自由程很大, 容易出现回声; 另

一方面, 这两个体育馆都采用了比赛大厅与休息厅连通的建筑形式, 如果处理不当, 比赛大厅和休息大厅将会形成声耦合效应。这两个问题中的任何一个问题如不能圆满的解决, 都将给比赛大厅留下较大的声学缺陷, 所以, 必须进行预防和治理。

2 国家体育馆声学设计

2.1 概况及特点

国家体育馆位于奥林匹克公园中心区的南部, 与国家体育场“鸟巢”、国家游泳馆“水立方”毗邻而居, 是奥林匹克中心区标志性建筑之一。体育馆屋顶曲面近似扇形, 如行云流水般飘逸又富于动感, 四周竖立的钢骨架与大面积晶莹剔透的玻璃幕墙相映衬, 犹如一把张开的中国扇, 彰显出中国文化的内涵, 这是奥林匹克中心区三大体育建筑中惟一的完全由我国技术人员自主设计的体育建筑。图1为国家体育馆的外形及与“鸟

巢”、“水立方”的关系。

国家体育馆平面呈矩形, 比赛大厅长约140 m, 宽约110 m, 比赛场地约长约74 m, 宽约43 m, 屋顶为单向波浪弧形, 比赛场地地面距屋顶最高处的高度约为40 m。比赛大厅与观众休息大厅连为一体, 有效容积(包括观众休息大厅)为510 900 m³, 容纳约1.8万名观众(赛时), 每座容积为28.4 m³。图2为国家体育馆平面图, 图3为剖面图, 图4为内景图。

2.2 声学设计指标的确定

对于体积大于80 000 m³的特级和甲级体育馆, 根据JGJ31-2003, 混响时间设计指标(满场, 中频)为1.7 s, 并允许有0.15 s的变动范围, 即小于1.85 s, 而根据JGJ/T 131-2000, 混响时间设计指标(满场, 中频)为1.5 s~1.9 s。由于本体育馆的体积远大于80 000 m³, 要使该体育馆达到较低的混响时间指标是极其困难的, 也是不现实的。对于体育馆比赛大厅而

图3 国家体育馆剖面图

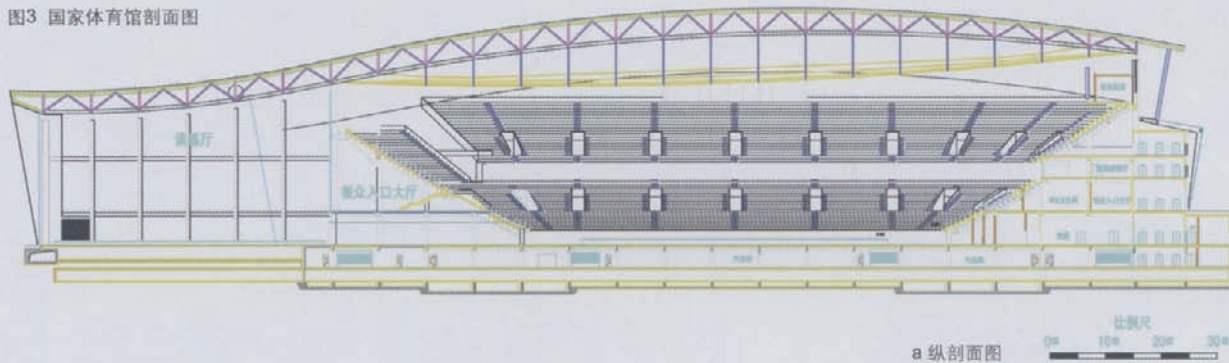
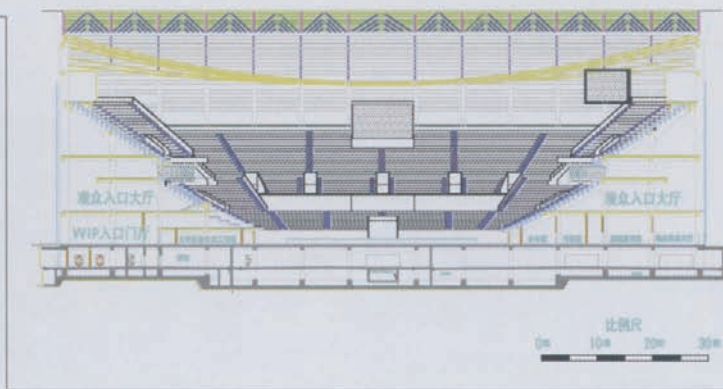
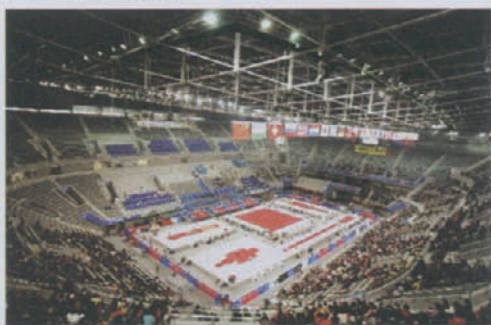


图4 国家体育馆内景



言,不存在使用自然声的可能性,建筑声学设计的主要目的就是保证比赛大厅内电声系统能够达到良好的语言清晰度。随着电声技术的发展和电声设备的更新,在这种大型体育馆的比赛大厅中电声系统对建声条件的要求也有所降低。因此,经过认真分析与讨论,确定比赛大厅混响时间指标主要根据要求相对较低的JGJ/T 131-2000进行制定。

2.2.1 混响时间

混响时间(满场, s)设计指标见表1。

2.2.2 噪声限值

背景噪声应低于35 dB(A),噪声评价曲线NR-30;空调运行并达到使用工况时,低于40 dB(A),噪声评价曲线NR-35。

2.2.3 无音质缺陷

大厅内不得出现明显的音质缺陷(回声、颤动回声和声聚焦等)。

2.3 声学设计措施

2.3.1 建声设计的主要问题

从声学角度,国家体育馆主要存在以下问题:

(1) 比赛大厅内的屋顶呈凹弧形,容易产生声聚焦和回声等声学缺陷。

(2) 比赛大厅和休息大厅连为一体,一方面增大了容积,另一方面易产生耦合效应。

(3) 比赛大厅四周无墙面,与之连通的休息厅的外围护结构是大面积的玻璃,可以用来布置吸声材料的面积十分有限。

2.3.2 屋面系统的声学设计

该体育馆可以进行吸声处理的重要部位就是屋顶天花。屋顶呈凹弧形,在进行吸声处理时除了要考虑增加吸声量,控制混响时间外,还必须考虑消除可能出现的声聚焦和颤动回声等声学缺陷。为此我们采取了如下措施:

(1) 在屋架内悬吊垂片式吸声体
本体育馆体积巨大,体积超过500 000 m³,每座容积高达28 m³,而可供布置吸声材料的界面又相对较少,总内表面积约96 000 m²,仅靠在体育馆本身的界面的投影面上平面布置吸声材料已不能满足控制混响时间的要求,必须增加相当大数量的吸声量,而最有效的方法就是悬挂空间吸声体。

空间吸声体由于各表面都暴露在声场中,所以吸声效率最高。吸声体的形式和材料除了必须满足声学要求外,还必须满足建筑装饰风格和结构承载的要求。

a. 形式的选择

国家体育馆建筑外形象一把展开的折扇,显示了浓郁的中国特色,在内部声学装饰设计时,神似折扇关闭时扇骨形式的垂片,就成为一个个不断重复的主题,如休息厅的吊顶,墙面的百叶等。为了与体育馆的整体风格相协调,经过与建筑师协商,在比赛大厅中也采用了垂片式空间吸声体。吸声体呈矩形,高度为500 mm,厚度为80 mm,片间距为420 mm,悬吊在桁架下弦上面的位置。

b. 材料的选择

国家体育馆跨度很大,屋顶结构系统的承载能力有限,空间吸声体采用了无骨架空间吸声体,其芯材为用阻燃环保纤维织物毡进行封闭处理的80 K离心玻璃板,面材为阻燃吸声布,板的边框是通过固化工艺将玻璃棉板的周边固化形成的,板和框为一体。该吸声体没有金属或木制的龙骨,重量很轻,并且,其吸声性能良

好,饰面材料与芯材复合良好,不易脱离。另外,该产品的芯材用环保阻燃织物毡进行了封闭处理,不会出现玻璃棉纤维逸散的情况,环保性能良好,安装比较简便。

(2) 屋面板下进行纤维喷涂处理
体育馆比赛大厅的屋面为凹弧形,容易产生颤动回声和声聚焦,根据以往的经验,垂片式空间吸声体由于在两片之间有一定的距离,有时可能遮挡不住来自屋顶的反射声,所以不能完全消除声缺陷。为了解决这个问题,在屋面板下层做了25 mm厚纤维喷涂。纤维喷涂技术是将经过预先特殊工艺处理的无机超细纤维、纤维素、抗火化合物以及粘接剂等原料,通过专用配套的喷涂设备混合,在施工现场喷涂于混凝土、钢板、石膏板等各种基体表面上,形成具有一定厚度喷涂层。纤维喷涂材料除具有一定的吸声能力外,还具有保温、绝热等功能,在以钢板作为基体时,还具有较好的阻尼作用,可以较明显的提高其隔声性能。

因此,采用此措施除了可以改变屋面的吸声性能,消除声聚焦和回声等声学缺陷,还可以提高轻屋面的防雨噪声性能,提高轻屋面的空气声隔声性能,并具有一定保温作用。

2.3.3 其他部位声学设计措施

(1) 由于顶部的空间吸声体和纤维喷涂的吸声频率主要在中高频,而低频的吸声能力稍弱,为了控制体育馆的低频混响时间,在体育馆比赛大厅外围护墙上部内侧百叶内设置了穿孔FC板低频共振吸声构造,具体构造是在金属百叶后安装6 mm厚穿孔FC

表1 国家体育馆混响时间设计指标

项目	中频满场混响时间 (s) (500 Hz和1 kHz平均值)	各频率混响时间相对于中频混响时间的比值			
		125 Hz	250 Hz	2 kHz	4 kHz
设计指标	1.9	1.0 ~ 1.3	1.0 ~ 1.15	0.9 ~ 1.0	0.8 ~ 1.0

板, 孔径5 mm, 孔距25 mm, 板后贴一层无纺吸声纸, 板后空腔400, 共振频率为125 Hz。

(2) 在观众席三层赞助商包厢外墙面, 除玻璃窗外其他部分采用木质吸声板吸声构造, 具体构造为: 18 mm厚木质吸声板, 28/4 M, 穿孔率

7.5%, 板后贴无纺吸声纸, 板后空腔150 mm, 空腔内填50 mm厚40 K离心玻璃棉板。

(3) 比赛场地周围有固定墙面的部分, 采用木质吸声板吸声构造, 具体构造同上。

(4) 主席台和贵宾包厢采用吸声

量较大的全软包座椅, 普通观众席采用硬椅。

2.3.4 休息厅的声学处理

为避免休息厅与比赛大厅之间产生声耦合效应, 影响语言的清晰度, 必须在休息厅内进行一定的吸声处理, 控制休息厅的混响时间。结合休息厅的装修设计, 在休息厅能采取了以下声学处理措施:

(1) 观众休息厅内坐席下斜板吊顶内采用玻璃棉吸声构造, 具体构造为: 50 mm厚40 K玻璃棉板外包玻璃丝布, 放于斜板吊顶上。

表2 国家体育馆混响时间测量数据

项目	倍频程混响时间 (s)					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
空场	3.70	3.43	3.18	3.40	3.32	2.71
满场	2.75	2.20	1.92	2.00	1.76	1.51

表3 国家体育馆满场混响时间计算表

项目	内容	公式或符号	频率(Hz)					
			125	250	500	1 k	2 k	4 k
体育馆参数	体育馆体积	$V(m^3)$	445 000	445 000	445 000	445 000	445 000	445 000
	体育馆总内表面积	$S_T(m^2)$	41 481	41 481	41 481	41 481	41 481	41 481
	观众数量	$S_G(m^2)$	18 000	18 000	18 000	18 000	18 000	18 000
空场计算	空场混响时间(实测)	$T_{空场}(s)$	3.70	3.43	3.18	3.40	3.32	2.71
	$\ln(1 - \alpha_1)$	$K = 0.016V / -S_T T$	-0.467	-0.504	-0.543	-0.508	-0.520	-0.637
	$(1 - \alpha_1)$	$D = \exp(K)$	0.627	0.604	0.581	0.602	0.594	0.529
	空场平均吸声系数	$\alpha_1 = 1 - D$	0.37	0.40	0.42	0.40	0.41	0.47
	空场总吸声量	$A_1 = S_T \alpha_1 (m^2)$	15 472	16 411	17 384	16 522	16 825	19 550
满场计算	玻璃钢硬椅吸声量*	α_s	0.014	0.018	0.02	0.036	0.035	0.028
	人坐在硬椅上的吸声量*	α_p	0.23	0.36	0.42	0.45	0.54	0.51
	每个座椅吸声增量	$\alpha_z = \alpha_p - \alpha_s$	0.22	0.34	0.40	0.41	0.51	0.48
	增加吸声量	$A_z = \alpha_z S_G (m^2)$	3 888	6 156	7 200	7 452	9 090	8 676
	满场总吸声量	$A_2 = A_1 + A_z (m^2)$	19 360	22 567	24 584	23 974	25 915	28 226
	满场平均吸声系数	$\alpha_2 = A_2 / S_T$	0.47	0.54	0.59	0.58	0.62	0.68
	满场混响时间(计算值)	$T_{满场} = 0.161V / -S_T(1 - \alpha_2) (s)$	2.75	2.20	1.92	2.00	1.76	1.51

* 玻璃钢硬椅和人坐在硬椅上的吸声量测量依据为《建筑声学设计手册》中第四章第6节吸声系数表中第(7)项“听众和座椅的吸收量”

(2) 观众休息厅内16 m板下垂片吊顶内采用玻璃棉吸声构造, 具体构造为: 双层轻钢龙骨, 50 mm厚40 K离心玻璃棉板外包黑色玻璃丝布, 与楼板之间留50 mm的空腔, 下罩钢板网刷防锈漆。

2.4 声学测试结果

在体育馆竣工后对比赛大厅的混响时间进行了测量, 测量方法按照 JGJ/T 131-2000。

2.4.1 测量条件

测量时比赛大厅内普通观众席已经安装了座椅, 但主席台和记者席未安装座椅, 墙面和顶部装修基本完毕, 空间吸声体吊挂完成, 比赛场地内未装修完毕, 表面为水泥地面。

2.4.2 空场测量数据

测量观众席内进行, 共测量了15个点, 由于比赛场地内正在施工, 所以, 未在比赛场地内进行测量。测量数据见表2。

2.4.3 满场混响时间计算过程

表2中的满场混响时间是根据实测的空场混响时间, 用伊林公式计算得出的, 计算过程见表3。

图5 北京奥林匹克篮球馆外景



图6 北京奥林匹克篮球馆内景



图7 北京奥林匹克篮球馆平面图

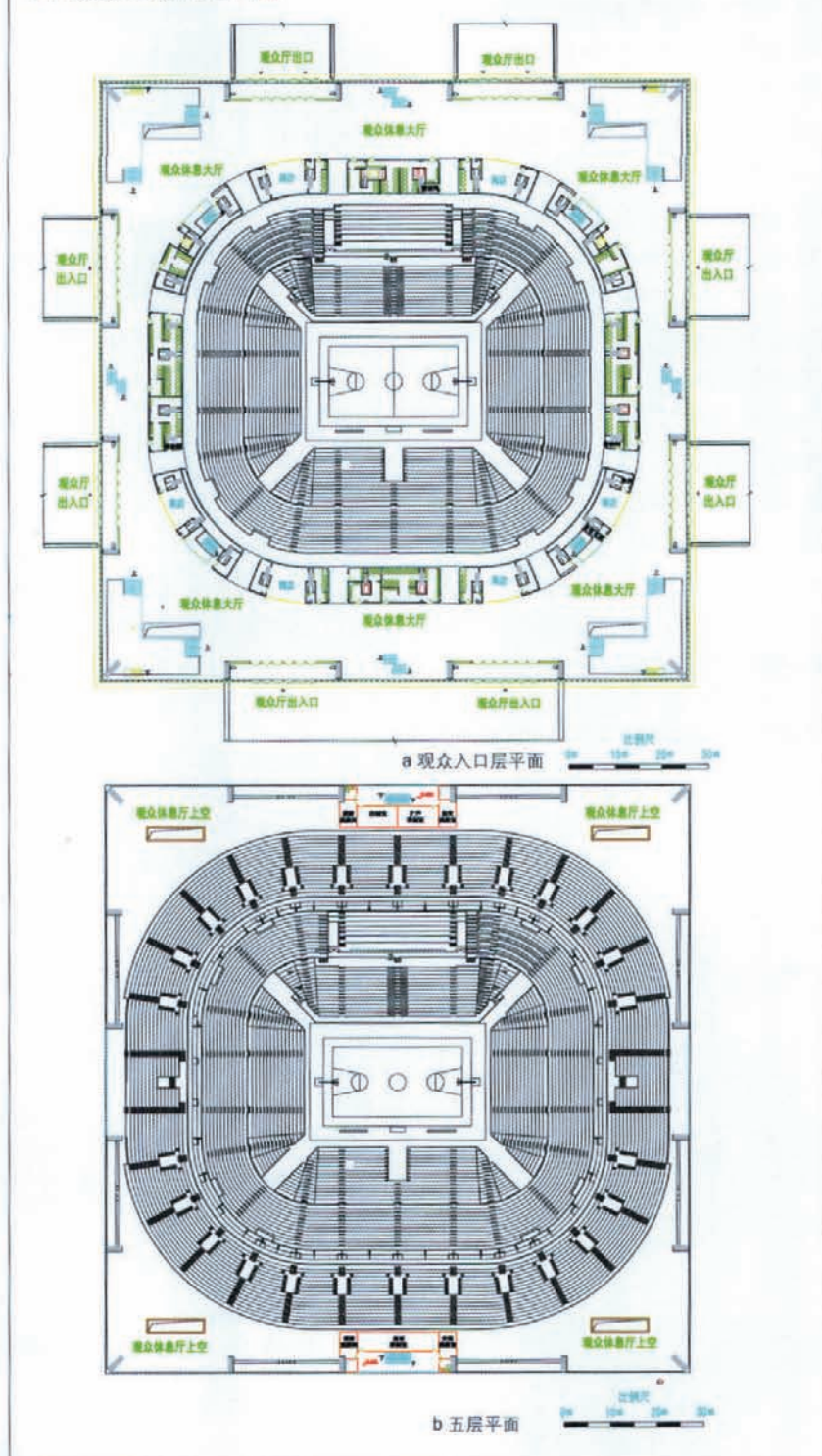


表4 国家体育馆混响时间设计指标与测量和计算结果的比较

项目	中频满场混响时间 (s) (500 Hz和1 kHz平均值)	各频率混响时间相对于中频混响时间的比值			
		125 Hz	250 Hz	2 kHz	4 kHz
设计指标	1.9	1.0 ~ 1.3	1.0 ~ 1.15	0.9 ~ 1.0	0.8 ~ 1.0
实测和计算结果	1.96	1.4	1.1	0.9	0.8

2.4.4 测试结果分析

参考JGJ31-2003所规定的特级、甲级体育馆（体积大于80 000 m³）的声学要求，本体育馆的混响时间设计指标与测量和计算结果的比较见表4。

由于测量时体育馆的比赛场地内未铺设地板和其他运动设施，而比赛场地的运动设施对于中低频有较强的声吸收，所以，在正常使用的条件下，比赛场铺设了运动设施后，对混响时间还会有一定的改善。

在北京奥运会期间，国家体育馆的使用效果很好，是奥运会所有体育场馆中我国体育健儿获得金牌最多的体育场馆，共获得体操和蹦床项目的11块金牌，并在这两个项目上都有重大突破，这也从另一个方面说明，国家体育馆各方面的设计是成功的。

表5 北京奥林匹克篮球馆体育馆混响时间设计指标

项目	中频满场混响时间 (s) (500 Hz和1 kHz平均值)	各频率混响时间相对于中频混响时间的比值			
		125 Hz	250 Hz	2 kHz	4 kHz
设计指标	<1.9	1.0 ~ 1.3	1.0 ~ 1.15	0.9 ~ 1.0	0.8 ~ 1.0

3 北京奥林匹克篮球馆体育馆声学设计

3.1 概况及特点

北京奥林匹克篮球馆是五棵松文化体育中心重要的组成部分，比邻北京奥运会棒球比赛的场地。作为2008年奥运会篮球预赛和决赛用馆，该场馆是一座设计先进、功能齐全的现代综合体育馆，总占地面积168 000 m²，总建筑面积63 000 m²，地下三层，地上四层，可以容纳观众1.8万人。外景见图5。

北京奥林匹克篮球馆平面呈方形，比赛大厅边长为110 m，比赛场地活动座椅收起时长约65 m，宽约52 m，篮球比赛时长约38 m，宽约25 m，屋顶为平面，比赛场地地面距屋顶最高处的高度约为35 m。比赛大厅与观众休息大

厅连为一体，有效容积（包括观众休息大厅）为347 400 m³，容纳约1.8万名观众（赛时），每座容积为19.2 m³。图6为北京奥林匹克篮球馆内景图。图7为平面图，图8为剖面图。

3.2 声学设计指标的确定

该体育馆除在奥运会期间进行篮球比赛外，在赛后将举行其他各种大型比赛，并且要求可以进行大型文艺节目和群众集会，属于综合体育馆，对建筑声学条件有较高的要求，为此，制定如下声学设计指标。

3.2.1 混响时间

混响时间（满场，s）设计指标见表5。

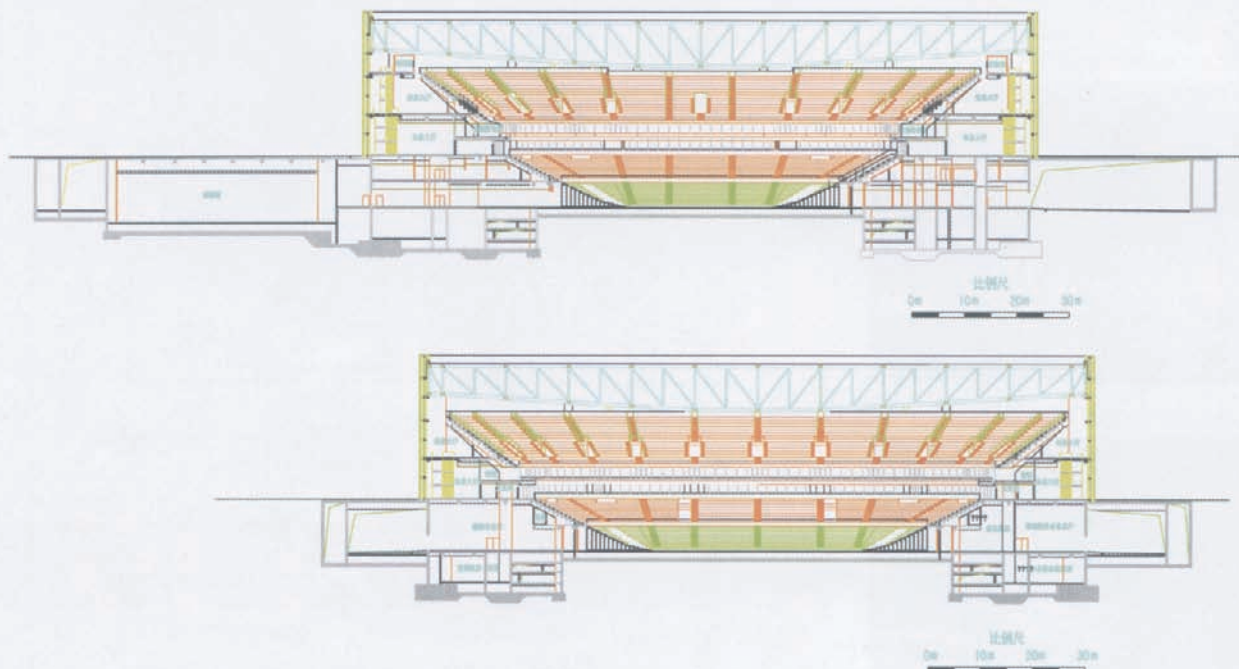
3.2.2 噪声限值

背景噪声应低于35 dB (A)，噪声评价曲线NR-30；空调运行并达到使用工况时，低于40 dB (A)，噪声评价曲线NR-35。

3.2.3 无音质缺陷

大厅内不得出现明显的音质缺陷（回声、颤动回声和声聚焦等）。

图8 北京奥林匹克篮球馆剖面图



3.3 声学设计措施

3.3.1 建声设计的主要问题

北京奥林匹克体育馆可以容纳1.8万名观众，属于特大型体育馆，从声学角度，与国家体育馆相比有如下的优势：

(1) 比赛大厅的体积比国家体育馆小，每座容积为 19.2 m^3 ，混响时间的控制相对较容易。

(2) 体育馆的屋顶形式为平顶，不易产生声聚焦等声学缺陷。

(3) 体育馆的座椅为软椅（国家

体育馆的座椅为硬椅），为大厅提供了较大的吸声量。

但与国家体育馆相同，本体育馆也存在这样的问题：比赛大厅四周无墙面，与之连通的休息厅的外围护结构是大面积的玻璃，可以用来布置吸声材料的面积十分有限。

3.3.2 屋面系统的声学的设计

由于该体育馆建筑设计师为了保证整体的风格，不希望比赛大厅采用空间吸声体的吸声做法，而其他可以布置吸声材料的界面又十分有限，所以体育馆顶部就成为最重要的吸声部位。考虑到每座容积相对较小，通

表6 北京奥林匹克篮球馆混响时间检测结果

测量状态	倍频程混响时间 (s)					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
空场（实测）	2.20	2.19	2.32	2.28	2.06	1.43
满场（计算）	1.90	1.70	1.86	1.78	1.59	1.32

表7 北京奥林匹克篮球馆满场混响时间计算表

项目	内容	公式或符号	频率(Hz)					
			125	250	500	1 k	2 k	4 k
体育馆参数	体育馆体积	$V(\text{m}^3)$	347 400	347 400	347 400	347 400	347 400	347 400
	体育馆总内表面积	$S_T(\text{m}^2)$	58 813	58 813	58 813	58 813	58 813	58 813
	观众数量	$S_G(\text{m}^2)$	18 000	18 000	18 000	18 000	18 000	18 000
空场计算	空场混响时间（实测）	$T_{\text{空场}}(\text{s})$	2.20	2.19	2.32	2.28	2.06	1.43
	$\ln(1-\alpha_i)$	$K = 0.016V/-S_T T$	-0.432	-0.434	-0.410	-0.416	-0.463	-0.663
	$(1-\alpha_i)$	$D = \exp(K)$	0.649	0.648	0.664	0.659	0.630	0.515
	空场平均吸声系数	$\alpha_i = 1 - D$	0.35	0.35	0.34	0.34	0.37	0.48
	空场总吸声量	$A_1 = S_T \alpha_i (\text{m}^2)$	20 642	20 692	19 767	20 035	21 788	28 521
满场计算	玻璃钢硬椅吸声量*	α_s	0.09	0.11	0.21	0.21	0.28	0.42
	人坐在硬椅上的吸声量*	α_p	0.23	0.36	0.42	0.45	0.54	0.51
	每个座椅吸声增量	$\alpha_z = \alpha_p - \alpha_s$	0.14	0.25	0.21	0.24	0.26	0.09
	增加吸声量	$A_z = \alpha_z S_G (\text{m}^2)$	2 520	4 500	3 780	4 320	4 680	1 620
	满场总吸声量	$A_2 = A_1 + A_z (\text{m}^2)$	23 162	25 192	23 547	24 355	26 468	30 141
	满场平均吸声系数	$\alpha_2 = A_2 / S_T$	0.39	0.43	0.40	0.41	0.45	0.51
	满场混响时间（计算值）	$T_{\text{满场}} = 0.161V / -S_T (1 - \alpha_2) (\text{s})$	1.90	1.70	1.86	1.78	1.59	1.32

* 玻璃钢硬椅和人坐在硬椅上的吸声量测量依据为《建筑声学设计手册》中第四章第6节吸声系数表中第（7）项“听众和座椅的吸声量”

过计算,在不增加空间吸声体的条件下,可以满足声学设计指标,但必须将整个顶部都设计成宽频强吸声构造。由于屋面为轻质金属屋面,其隔声性能较弱的情况也需要改变。为此,在桁架上弦与屋面之间设置隔声和吸声双重功能的构造;一方面提高轻屋面的隔声性能,另一方面起到保温和吸声作用,因此,它是集吸声、保温、隔声三项功能的复合结构,其中,紧贴轻质屋面板下的50厚80 K玻璃棉板和9厚FC板(高强纤维水泥板)组成隔声层,可以有效的提高屋面的隔声量,同时,也具有有良好的保温性能,对建筑的节能也具有重要的作用;在下面的空腔、100厚40 K玻璃棉板、无纺吸声纸和穿孔铝板组成了高效宽频吸声层,除控制混响时间外,还可以有效的消除可能产生的回声等声学缺陷。总面积约15 100 m²。

3.3.3 其他部位的吸声处理

在其他部位,还进行了如下吸声处理:

(1)在观众席三层贵宾包厢以下墙面,采用木制吸声板吸声构造,该构造表面为有一定透空率的木饰面复合板材,具有良好的装饰性,同时便于清洁,而且,具有较高的防火等级,对低频有较好的吸声效果。

(2)观众席采用有一定吸声量的局部软包座椅。

(3)玻璃幕墙在与比赛大厅相通的部位(从比赛大厅可以看到的部位)采用吸声遮光百叶。

3.3.4 休息厅的声学处理

(1)吊顶:在楼板下粘贴一层吸声材料(如100 mm厚玻璃棉板),

然后在下层结合装修设计设置透声的吊顶。

(2)观众休息厅内部分墙面采用了木丝吸声板吸声构造。

3.4 声学测量结果

在体育馆竣工后,对比赛大厅的混响时间进行了测量,测量方法按照JGJ/T 131-2000。

3.4.1 测量条件:

测量时比赛大厅已装修完毕,观众席座椅为局部软包的座椅,有一定的吸声量。

3.4.2 空场测量数据

测量观众席内进行,共测量了15个点,测量数据见表6。

3.4.3 满场混响时间计算过程

表6中的满场混响时间是根据实测的空场混响时间,用伊林公式计算得出的,计算过程见表7。

3.4.4 测试结果分析

参考JGJ31-2003所规定的特级、甲级体育馆(体积大于80 000 m³)的声学要求,本体育馆的混响时间设计指标与测量和计算结果的比较见表8。

北京奥林匹克篮球馆按美国NBA的规格要求进行了装修,并安装了世界最先进的全彩高清LED显示系统,包括吊挂在比赛大厅中间的一个净高9.042 m,最大直径约为11 m的“漏斗屏”,以及位于观众席拦板处的两圈条形LED屏,营造了非常热烈的气氛。竣工后举行了多次大型文艺演出,如周杰伦、周华健演唱会等,各方面反映效果很好。在奥运会期间主要用于篮球比赛,使用效果得到各方面的好评。

4 小结

通过国家体育馆和北京奥林匹克篮球馆的建筑声学设计实践,得出如下心得体会。

4.1 混响时间指标的确定

体育馆建筑声学设计的目的主要是为电声系统提供良好的建声环境,随着现代电声技术和器材的进步,对混响时间的要求亦有所放宽;且现代特大型体育馆可以布置吸声材料的界面又十分有限,若将混响时间指标确定得过短,也是不必要的,对于体积大于300 000 m³的体育馆,中频满场混响时间在1.9 s~2.0 s之间,就基本可以满足扩声系统的各种要求。从这两个体育馆的实际测量数据和举行文艺演出的实际效果均可证明上述结论。

4.2 空间吸声体的使用

空间吸声体是体育馆中控制混响时间的常用措施,但是,是否使用时也应根据实际需要来确定。另外,空间吸声体的选择必须考虑体育馆的总体风格、结构的承载等因素,应在与建筑设计师和结构设计师充分协商后确定。

4.3 综合屋面系统的声学设计

对于特大型综合体育馆,屋面系统是可以进行吸声处理的最大的界面,是建筑声学设计的关键,在进行屋面系统设计时,除了控制混响时间外,还必须考虑声学缺陷的消除和隔声性能的增强。

4.4 休息厅的声学处理

对于采用比赛大厅与休息大厅连通形式的体育馆,必须在休息厅内进行相应的吸声处理,避免在两个空间之间产生声耦合作用,产生声学缺陷,影响比赛大厅内的清晰度。

表8 北京奥林匹克篮球馆混响时间设计指标与测量和计算结果的比较

项目	中频满场混响时间 (s) (500 Hz和1 kHz平均值)	各频率混响时间相对于中频混响时间的比值			
		125 Hz	250 Hz	2 kHz	4 kHz
设计指标	1.9	1.0 ~ 1.3	1.0 ~ 1.15	0.9 ~ 1.0	0.8 ~ 1.0
实测和计算结果	1.82	1.0	0.9	0.9	0.7

(编辑 潘 浪)