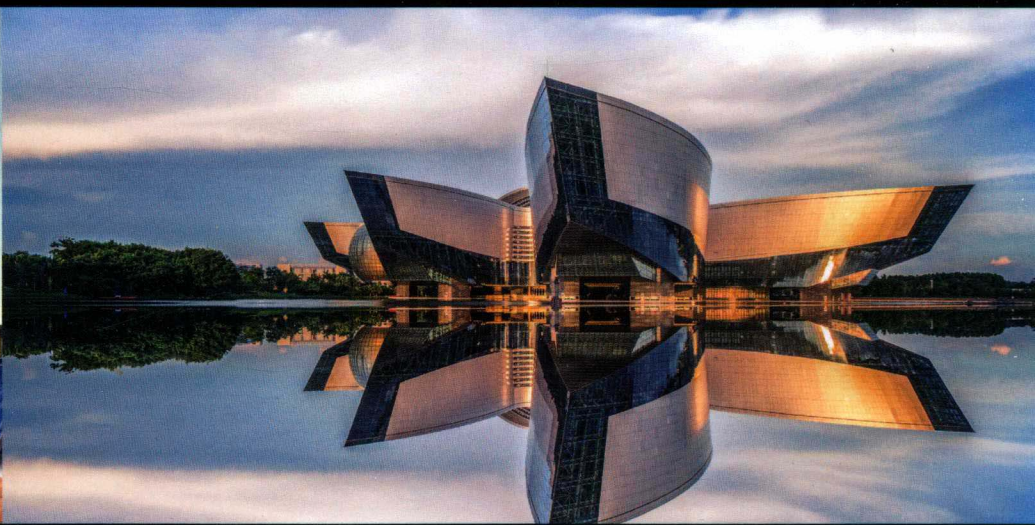


建筑声学

設計

ARCHITECTURAL ACOUSTICS
DESIGN CASE SET

案例集



罗钦平 等著

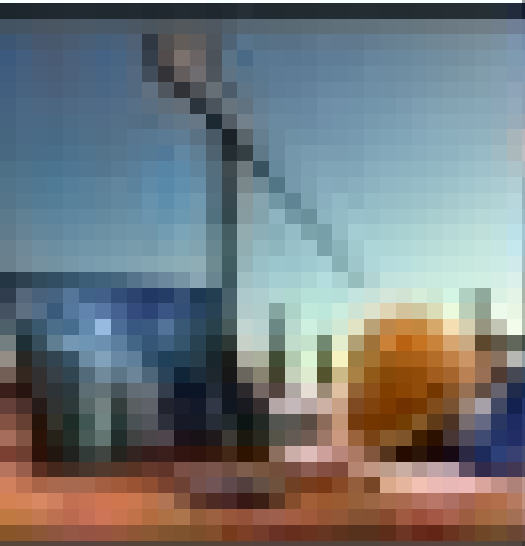


中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

THE UNIVERSITY OF
SOUTH ALABAMA

THE UNIVERSITY OF
SOUTH ALABAMA

THE UNIVERSITY OF
SOUTH ALABAMA



THE UNIVERSITY OF
SOUTH ALABAMA

THE UNIVERSITY OF
SOUTH ALABAMA

建筑声学设计案例集

ARCHITECTURAL ACOUSTICS
DESIGN CASE SET

罗钦平 等著

中国科学技术出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

建筑声学设计案例集/罗钦平等著. —北京:中国科学技术出版社, 2015.7
ISBN 978-7-5046-6958-2

I. ①建… II. ①罗… III. ①建筑声学—声学设计—案例—汇编
IV. ①TU112.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第169657号

责任编辑 王晓义
封面设计 周新河
责任校对 何士如
责任印制 张建农

出 版 中国科学技术出版社
发 行 科学普及出版社发行部
地 址 北京市海淀区中关村南大街16号
邮 编 100081
发行电话 010-62103130
传 真 010-62179148
投稿电话 010-62176522
网 址 <http://www.cspbooks.com.cn>

开 本 889mm×1194mm 1/16
字 数 220千字
印 张 9
印 数 1—2000册
版 次 2015年9月第1版
印 次 2015年9月第1次印刷
印 刷 北京京华虎彩印刷有限公司

书 号 ISBN 978-7-5046-6958-2/TU·108
定 价 80.00元

(凡购买本社图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换)

前言

如何做好项目的建筑声学设计?如何解决项目中出现的各种建筑声学难题?如何减小声学设计计算和工程实际效果之间的偏差?通过建筑声学设计的大量实践后,笔者对这些问题有了较深入的认识,主要心得如下。

(1)怀着诚惶诚恐的心态做方案。

(2)参与建筑初步设计,对重要功能房间提出合理的体型设计方案;对项目房间平面布置、功能配置提出合理建议;在建筑设计阶段就将声学缺陷尽量消除、使噪声控制的难度大大降低,从而大幅度降低室内装修、噪声控制的工程费用,达到事半功倍的效果。

(3)在读懂建筑设计图纸、了解清楚项目工艺的特殊要求和功能定位的基础上,认真找出该项目的特点与难点。

(4)根据项目的功能定位和业主要求,制定合理的设计目标。

(5)针对项目的特点和难点,把握设计目标和预算限值,反复推敲,力求最大限度降低造价的基础上,将声学措施有机融合到装饰效果中,达到视觉效果与听觉效果的和谐统一。

(6)把握好设计、施工过程中的各种计算、施工细节,根据项目实际情况进行声学计算偏差调整,提供详细、准确的施工图,保证项目自始至终的可实施性。

(7)在方案实施过程中,深入工地,及时发现并合理解决实施过程中产生的各种问题,避免施工中的误操作,使项目的最终效果得到保证。

本书内容全部为介绍体育馆、剧院、电影厅、配音室、五星级酒店、办公楼、住宅等项目的建筑声学设计和噪声控制工程设计。笔者将近10年来处理过的典型工程案例汇编在一起,叙述了这些项目的基本概况、特点难点分析、主要处理措施等设计思路及工程效果,供国内建筑声学界的老师、同仁及建筑声学爱好者参考,也希望能为我国建筑声学行业的发展起到一点抛砖引玉的作用。对于书中的不当之处,恳请各位读者不吝指正。

笔者的助手王金滔、毛志新、韦志辉、杨永杰、曲华彬、梁嘉俊、李奇蔚等声学设计师参与了本书的撰写工作,具体在该案例首页做了注明。

在本书的撰写过程中,李茂先生帮我整理文字、数据、图表等,花了较多的精力。在本书出版之际,对他表示衷心的感谢!

罗钦平

2015年3月

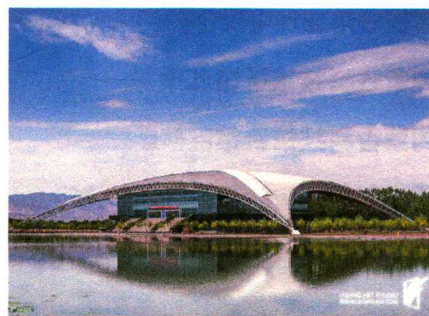


建筑声学
设计案例集

目录 Contents

前言

澳门中葡职业技术学校体育馆	1
中卫体育馆	5
恩施州民族体育馆	9
明光市体育馆	13
新丰县体育馆	17
海军工程大学体育馆	20
桂林市第二体育馆	22
榆林市体育馆	25
华中科技大学武昌分校体育馆	27
中山沙溪体育馆	30
天门市体育馆	33
天津军事交通学院体育馆	37
伊春市综合体育馆	40
宜春文化艺术中心	44
修水文化艺术中心	51
滨州市国际会展中心	57



澳门中葡职业技术学校体育馆

一、项目概况

澳门中葡职业技术学校体育馆位于澳门劳动节街，是中葡职业技术学校的主体育馆。该馆于1998年随中葡职业技术学校建成并投入使用。该馆整体建筑造型如图1所示。

该馆比赛大厅占地面积共计 1925m^2 ，大厅总容积为 27840m^3 ，总表面积为 6640m^2 ，观众席固定座位500座。该馆竣工多年来未进行建筑声学处理，致使厅内回声严重，听音含糊不清。其改造前馆内装修效果见图2。

2005年7月，为举办东亚运动会相关赛事，澳门特区政府欲对该馆进行建筑声学改造，并将该改造设计方案进行了国际招标，提出中频混响时间 2.2s （空场）的竞标要求，详细竞标要求见表1。



图1 体育馆建筑造型



图2 建筑声学改造前体育馆内装修效果

表 1 建筑声学改造工程竞标要求

项 目	倍频程中心频率/Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
改造前馆内空场 T_{60}/s	8.10	8.35	6.19	6.07	5.19	5.23
招标要求 空场 $T_{60}/s \leq$	2.80	2.50	2.20	2.20	2.00	2.00

二、项目分析

笔者认为2.2s的空场中频混响时间指标欠妥。因为该体育馆观众席固定座位仅有500座，每座容积高达 $55.7m^3$ ，远大于规模类似的体育馆，甚至也大于一些大型体育馆（如广州天河体育中心体育馆，容积 $118528m^3$ ，每座容积 $14.8m^3$ ），所以在实际使用过程中，即使考虑体育馆满场状态下观众对声音的吸收作用，2.2s的空场中频混响时间也仅能达到2.0s的水平，混响时间偏长，不能满足举办国际赛事的听音需要。

对此，笔者在对该项目进行了详细分析、仔细计算、反复论证的基础上，在竞标书中大胆提出了中频混响时间1.9s（空场）的设计目标（详细设计目标见表2），并且进行了指标修改的必要性和可实施性的论证分析。这样的设计目标在保证语言清晰的同时，又能兼顾声音的丰满度，满足该体育馆进行国际比赛和多功能化使用的要求。

该项目是完全公开、公正招标。评标时，业主、10个外聘评委、16家投标人全部集中在一个会议室内，将每家投标人的设计目标、措施、工程概算、方案优缺点等全部当场公布；每个评委的意见、评分也当场公布。评标过程中，评委们一致认可本竞标方案中的指标修改理由，认为本方案的工程预算虽然稍高，但预计声学效果最好，方案的性价比最优。本竞标方案有幸在16家投标单位中（其中15家为境外、国外单位）脱颖而出，当场中标。

表 2 混响时间设计目标

项 目	倍频程中心频率/Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
设计目标 $T_{60}/s \leq$	2.47	2.09	1.90	1.90	1.81	1.62

三、设计方案

为达到设计目标，笔者在分析比较多个方案后，决定采取以下建筑声学处理措施：

(1) 顶棚

顶棚设计使用全频空间吸声体 $920m^2$ ，占顶棚面积的47%。平面悬挂，均匀分布在网架下弦管上。大面积布置顶棚吸声材料可有效大幅度降低馆内混响时间，同时消除顶棚与地面之间产生的颤动回声。

(2) 比赛池和大厅墙面

比赛池周围矮墙和观众席后墙面使用全频穿孔吸声板 440m^2 满铺(后留空腔安装),占墙面面积的16%,以消除比赛时运动员所产生的脚步声和击球声以及比赛池内的颤动回声,同时可进一步降低馆内的混响时间。

经计算,上述建筑声学改造方案可使该体育馆空场混响时间达到如表3的水平,并且馆内的颤动回声和回声等声学缺陷都能得到有效控制。

表3 空场混响时间计算结果

项 目	倍频程中心频率/Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
计算值 T_{60}/s	2.32	1.93	1.68	1.73	1.58	1.53

四、工程效果

上述建筑声学改造方案实施后,馆内的装饰效果如图3所示。



图3 建筑声学改造后体育馆内装饰效果

经B & K2260频谱分析仪测试得到如表4所示的改造前后体育馆空场混响时间。从表4中可见,建筑声学改造后体育馆全频混响时间均优于设计目标,125Hz和250Hz的低频混响时间分别为2.12s与1.91s,500Hz和1000Hz的中频混响时间分别为1.76s与1.87s。保证了语言的清晰度,音乐的丰满度也得到了保证。

与改造前体育馆相对比,本建筑声学改造方案显著地改善了体育馆的混响时间,其中125Hz和250Hz的低频混响时间缩短近6s。

实际使用的主观感受也表明,建筑声学改造后馆内听音清晰,声场分布均匀,其声学效果大大超过了业主的预期。本建筑声学改造设计方案获得了澳门特区政府、业主、东亚运动会组委会的一致好评。

表 4 改造前后体育馆空场混响时间

项 目	倍频程中心频率/Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
改造前指标 T_{60}/s	8.10	8.35	6.19	6.07	5.19	5.23
招标要求 $T_{60}/s \leq$	2.80	2.50	2.20	2.20	2.00	2.00
设计目标值 $T_{60}/s \leq$	2.47	2.09	1.90	1.90	1.81	1.62
计算值 $T_{60}/s \leq$	2.32	1.93	1.68	1.73	1.58	1.53
改造后结果 T_{60}/s	2.12	1.91	1.76	1.87	1.70	1.40

从表5可以看出,本项目的计算误差能够控制在 $\pm 10\%$ 以内。

表 5 设计计算误差

项 目	倍频程中心频率/Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
计算值 $T_{60}/s \leq$	2.32	1.93	1.68	1.73	1.58	1.53
改造后结果 T_{60}/s	2.12	1.91	1.76	1.87	1.70	1.40
计算误差/%	+8.6	+1	-4.8	-8	-7.6	+8.5

五、项目回顾

本项目的难点有两个:

一是勇于质疑业主的招标指标,大胆提出新的设计目标,并能够清晰地阐述理由,获得评委和业主的支持。

二是能够进行准确的建筑声学计算,合理选用吸声材料、合理布置馆内顶棚、墙面的吸声材料,以达到设计目标。尤其难能可贵的是,馆内的低频混响时间得到了大幅度的下降。

中卫体育馆

一、项目概况

中卫体育馆，位于宁夏中卫城市新区，是中卫市“五馆一中心”地标性建筑之一。中卫体育馆外观大体上为正六边形，大型拱形屋顶，屋顶四个角一直延续到地面，造型美观、独特。因其独特的建筑造型和完善的配套，中卫体育馆现成为了市民健身娱乐，举办大型集会、体育赛事和文艺演出等活动的首选之地。其建筑造型见图1，屋面平面投影见图2。



图1 中卫体育馆建筑造型

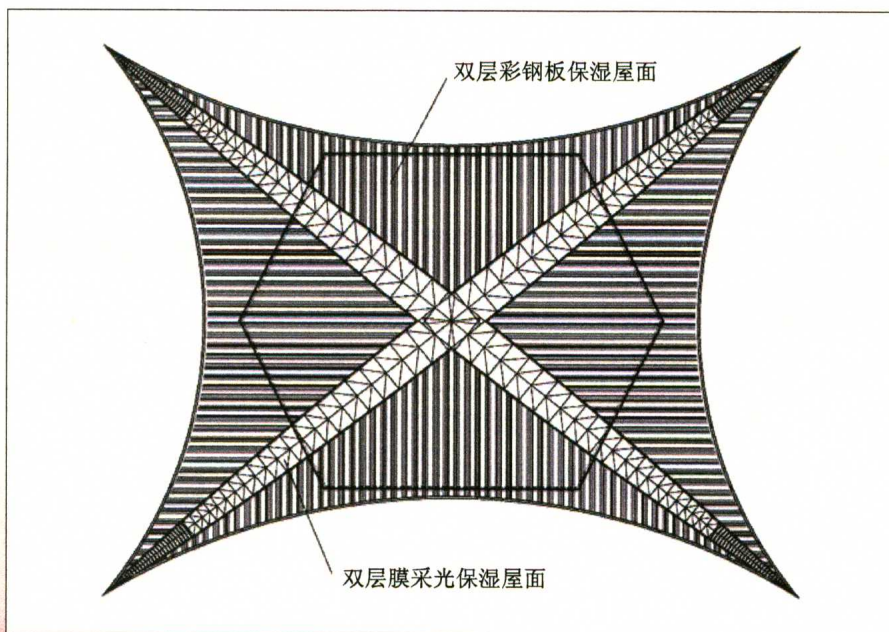


图2 屋面平面投影

中卫体育馆比赛大厅内部大体上为矩形，顶棚为拱形桁架结构，厅内有效容积55650m³，固定座位3800座，属中型体育馆。中卫体育馆比赛大厅平面与剖面分别如图3和图4所示。

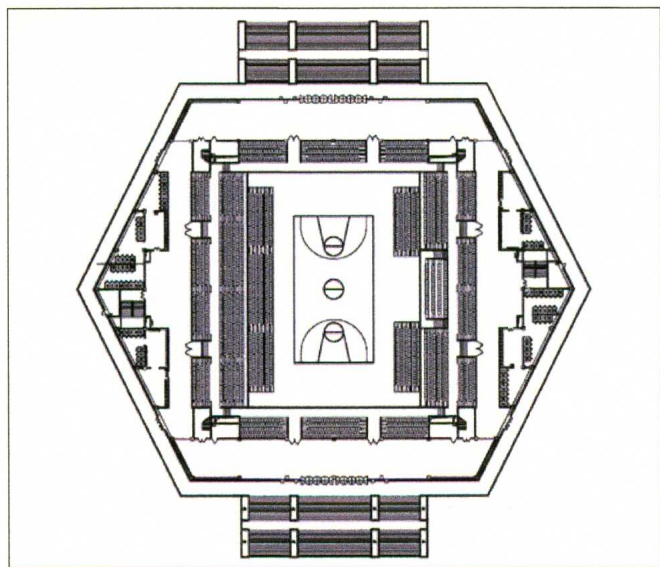


图3 中卫体育馆比赛大厅平面

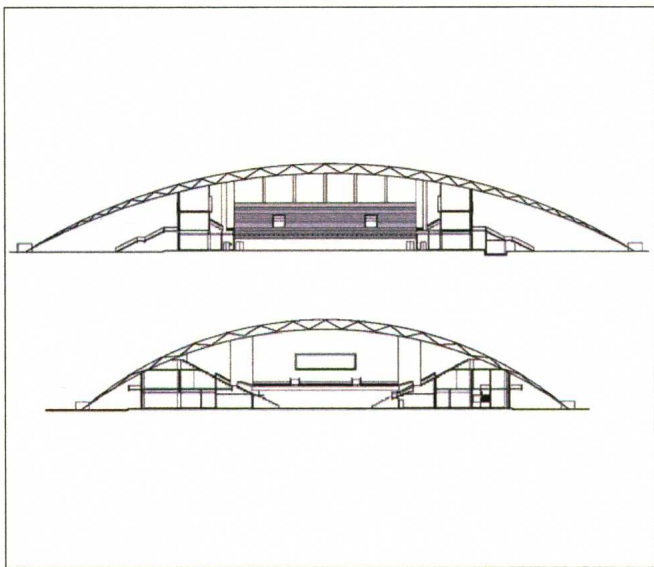


图4 中卫体育馆比赛大厅剖面

二、项目分析

根据用途和规模，该体育馆比赛大厅的满场混响时间应达到国家乙级标准（表1），并且馆内无颤动回声、多重回声和回声等声学缺陷。

表1 满场混响时间设计指标

项 目	倍频程中心频率/Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
设计指标 $T_{60}/s \leq$	1.80	1.65	1.50	1.50	1.43	1.35

该体育馆进行土建时，建筑声学设计得以介入。根据已采用的建筑设计方案，该馆主要存在的声学缺陷有：

1) 该体育馆比赛大厅顶棚为钢结构屋面，墙面为普通粉刷墙，墙面和屋面对声音的吸收较弱，加上该体育馆人均容积较大（为15m³），导致声音在馆内形成严重的颤动回声和回声。

2) 根据该体育馆的建筑设计，比赛大厅内的全

部隔墙只砌到桁架下弦之下，这样的建筑设计会使体育馆与外界相通，构成耦合空间，延长了馆内的混响时间，并且使得馆内容易受到外界噪声的干扰。

3) 如图3所示，山墙（显示屏的墙面）后走廊与比赛大厅在空间上连通，同样构成耦合空间，将延长馆内的混响时间。

4) 如图3所示，该体育馆比赛池是比较规则的矩形，比赛池中的击球声、脚步声和裁判哨声等声音通

过两平行墙面多次反射,形成颤动回声,影响比赛池中的听音效果。

5)如图4所示,该体育馆比赛大厅顶棚为拱形,声音通过拱形顶棚反射于比赛池中,将形成多重回声,造成馆内声场分布不均匀。

三、设计方案

为使该体育馆混响时间达到表1的水平,同时减弱或消除馆内颤动回声、多重回声和回声等声学缺陷,笔者设计了如下建筑声学方案。

(1) 顶棚

顶棚屋面安装铝穿孔全频吸声结构(成品)2200m²,可大幅度减小比赛大厅的混响时间,消减顶棚的多重回声,在维护顶棚桁架建筑设计造型的同时,满足声学效果。顶棚强吸声结构的布置如图5所示。

(2) 比赛池及观众区墙面

使用木质圆孔吸声结构2600m²,安装在比赛池及观众区的墙面上,进一步减小比赛混响时间,消除比赛池颤动回声的干扰。墙面吸声结构的布置如图6所示。

(3) 走廊

山墙后走廊吊顶使用矿棉吸声板,消除走廊的耦合空间效应,如图7所示。

此外,建议比赛大厅内全部观众席后隔墙都要砌到屋面并密封,一是为了消除隔墙外面空间,即耦合空间对大厅内的影响(缩短混响时间),二是为了消除隔墙外面的噪声对大厅的影响。

若严格按照上述方案进行处理,预计比赛大厅内的混响时间可达到如表2的水平,并且馆内的颤动回声、多重回声和回声等声学缺陷能得到有效控制。

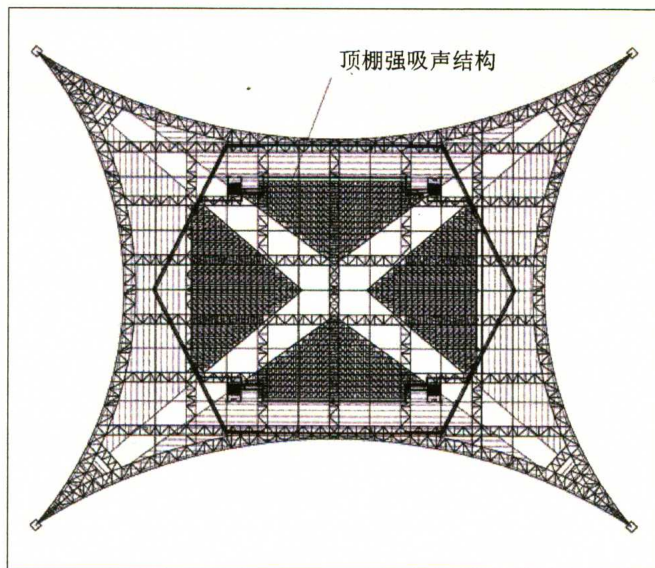


图5 顶棚强吸声结构的布置

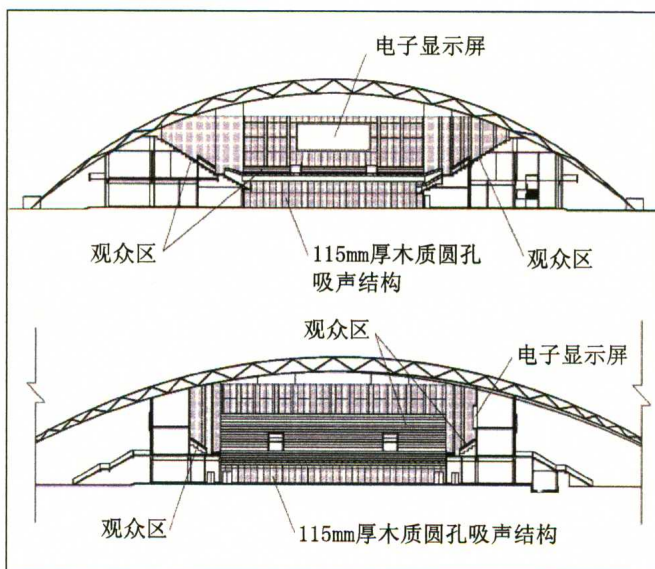


图6 墙面吸声结构的布置

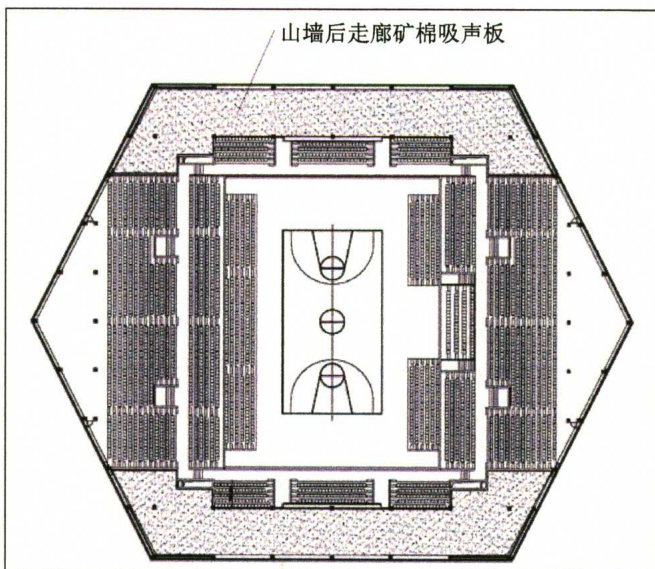


图7 山墙后走廊吊顶矿棉吸声板的布置

表2 满场混响时间计算结果

项目	倍频程中心频率/Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
计算值 T_{60}/s	1.74	1.49	1.39	1.36	1.40	1.33

然而,在该体育馆土建过程中,考虑到比赛大厅的通风、采光和装饰效果,最终比赛大厅内的全部隔墙都只砌到桁架下弦之下。由此比赛大厅的声环境将会受到外部耦合空间的影响,馆内的混响时间会有轻微提升。为减小该耦合空间的负面影响,保证混响时间,在上述方案的基础上增加如下措施:

1) 在主观众区上方的顶棚加装 $316.5m^2$ 强吸声结构,其规格与其他顶棚强吸声体结构保持一致,具体见图8。

2) 将主观众区后方的吸声墙改为隔声/吸声墙。该墙体的构造为 $2mm \times 9mm$ 石膏板+ $75mm$ 轻钢龙骨(间距为 $300mm \times 300mm$)+ $9mm$ 石膏板+ $115mm$ 厚木质圆孔吸声结构。隔声/吸声墙的布置如图9所示。

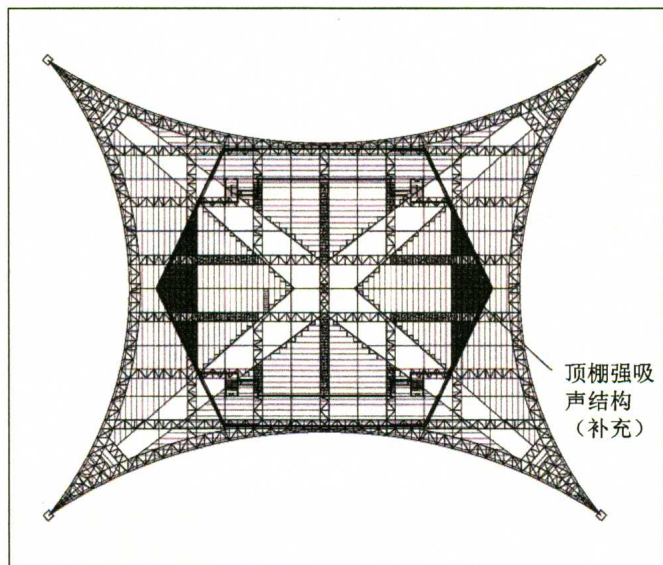


图8 补充的顶棚强吸声结构

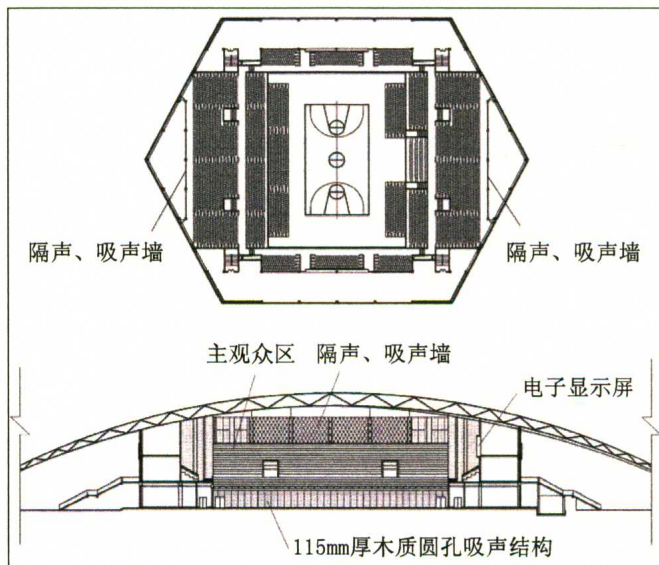


图9 隔声/吸声墙的布置

四、工程效果

2010年12月底,中卫体育的建筑声学工程竣工,业主请中南国家计量检测中心对馆内的混响时间指标进行了测试,测试结果见表3。

表3 建筑声学工程竣工后厅内混响时间测试结果(换算为满场)

项目	倍频程中心频率/Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
测试结果 T_{60}/s	1.71	1.57	1.50	1.48	1.42	1.33
设计值 $T_{60}/s \leq$	1.80	1.65	1.50	1.50	1.43	1.35
计算值 T_{60}/s	1.74	1.49	1.39	1.36	1.40	1.33

项目计算误差控制在±10%以内，详见表4工程竣工后厅内混响时间计算误差。

表 4 工程竣工后厅内混响时间计算误差

项 目	倍频程中心频率/Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
与设计值比较/%	+5	+4.8	0	1.3	+0.7	+1.5
与计算值比较/%	+1.8	-5.4	-7.9	-8.8	-1.4	0

从测试结果可以看到，经上述建筑声学设计方案处理后，中卫体育馆比赛大厅的混响时间得到了控制，达到国家标准的乙级水平；比赛大厅内无明显颤动回声、多重回声和回声等声学缺陷，馆内声场分布均匀，听音清晰，最终的音质效果能够满足该体育馆日后的使用。本建筑声学设计方案也因而获得了业主的肯定。

恩施州民族体育馆

一、项目概况

恩施州民族体育馆位于湖北省恩施土家族苗族自治州（简称恩施州），是恩施州第一座现代化的综合体育场馆。该体育馆比赛大厅容积约50000m³，可容纳3200名观众，人均有效容积为15.6m³，其建筑造型如图1所示。



图1 恩施州民族体育馆建筑造型

作为恩施自治州地标性的建筑，恩施州民族体育馆除举办全民健身活动、地方性体育赛事外，还用于承办大型集会、文艺演出、商贸展销等大型活动，是典型的多功能用途综合体育馆。但由于该馆建设较早，业主不了解建筑声学的重要性，致使该馆在建设过程中未考虑建筑声学，造成竣工后馆内听音含糊不清、回声明显，难以满足该馆承办各种活动所需的音质要求。因此需对该体育馆进行建筑声学改造。

根据该馆的规模和用途以及业主的资金状况，业主提出：为使馆内听音清晰，混响时间应达到丙级体育馆的要求，即中频混响时间不大于1.7s，并且低频混响时间应略微提升，具体满场混响时间指标如表1所示。通过合理布置馆内的全频吸声处理措施，消除馆内的回声、颤动回声、多重回声等声学缺陷。

表 1 满场混响时间设计指标

项 目	倍频程中心频率/Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
设计指标 $T_{60}/s \leq$	2.04	1.87	1.70	1.70	1.62	1.45

二、项目分析

经分析，造成该体育馆声环境不佳的主要原因有：

- 1) 该馆大厅容积较大，达 $50000m^3$ ，自由声程大，因此馆内易形成回声。
- 2) 如该馆剖面图(图2)所示，顶棚为倒“V”字形，声音通过顶棚的反射后在比赛场地形成多重回声。
- 3) 如该馆大厅的平面图(图3)所示，比赛池为规则矩形，两个平行相对的比赛池墙面使比赛场内形成颤动回声，造成运动员听音不清。
- 4) 靠近街道一侧的四扇大门和两扇侧门均没有密封，街道上汽车通过时的交通噪声从这些门洞中传入，影响比赛大厅内的听音清晰度。大厅内未密封的门洞见图4。

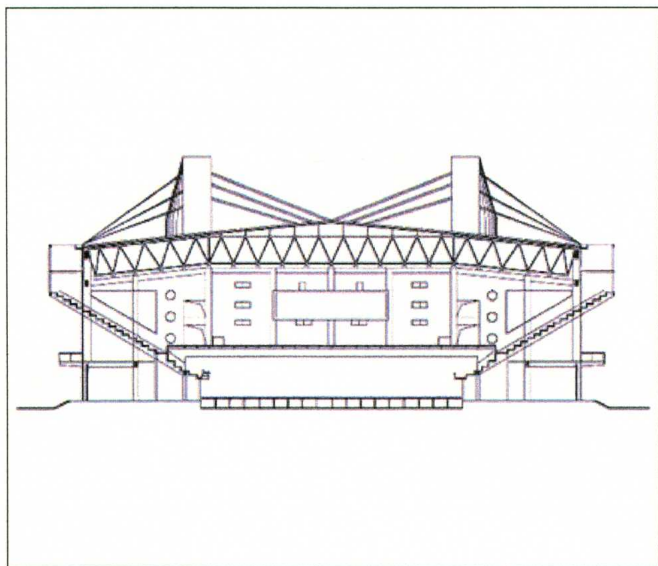


图2 体育馆立剖面图

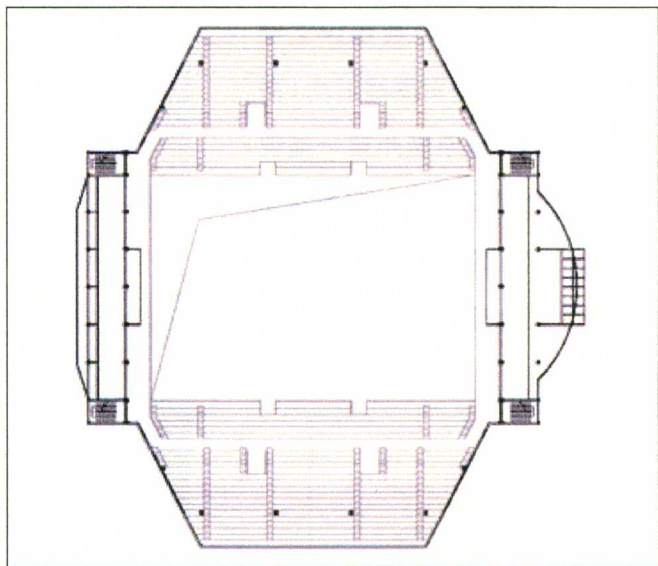


图3 馆内平面图