

宁波市体育中心雅戈尔体育馆音质改建设计

章奎生, 杨志刚

(上海现代建筑设计集团科技发展中心声学所, 上海 200041)

摘要: 宁波体育馆建成 5 年来音质一直不佳, 文章指出了音质不良的原因, 介绍了音质改建指标、设计计算方法、空间吸声体和吸声墙面用料、结构的配置设计等技术, 改建后经现场测试与主观评价, 取得了满意的音质效果, 达到了设计要求。

关键词: 音质; 混响; 空间吸声体

中图分类号: TU112.4⁺32 文献标识码: A

Acoustical design of younger gymnasium ningbo sports center

ZHANG Kui-sheng, YANG Zhi-gang

(Shanghai Modern Architectural Design Group Science & Technology Development Center, Shanghai 200041, China)

Abstract: Younger Gymnasium has acoustical problem since it was constructed five years ago. In this paper, the cause of acoustical problem, acoustical parameters and the method of design and calculation have been analysed. The paper also gives the arrangement and structure of absorbent. The results of field testing and subjective evaluation showed that the acoustical design reach a desired effect.

Key words: acoustics; reverberation; spatial absorbent

1 体育馆概况

宁波市体育中心雅戈尔体育馆(以下简称宁波体育馆)建成于 1995 年, 由浙江省建筑设计院负责设计, 是宁波市一座重要的体育馆, 看台可容纳 4500 名观众, 另有 500 座活动观众席位, 主要用于市内重要体育比赛, 也经常举办重大的会议、音乐及综艺演出等活动。

宁波体育馆平面尺寸为 65m × 65m, 馆内平面形状呈八角形。比赛场地尺寸为长 46m(东西向)、宽 25m(南北向), 主看台、主席台及裁判席均设在南北两侧, 大看台各有座位 22 排; 东西两侧看台各有座位 12 排, 其中前 7 排为活动看台, 固定看台均为塑料座椅, 而活动看台为简易软垫椅, 此体育馆采用晓宝板屋面及空间网架结构, 网架空间高度为 5.5m, 网架下弦离地高度为 16m。图 1 为内景图。



图 1 宁波体育馆的内景图

2 改建前的音质问题

在宁波体育馆的原建筑设计中, 虽然也在局部墙面及网架天花上考虑了一定的吸声处理, 如整个网架下弦共有 238 个网格, 而设计仅在比赛场上空 48 个网格内悬挂了八角形筒式空间吸声体, 其筒壁

为双面铝合金穿孔板, 内填吸声棉, 厚度仅为 5cm, 筒高为 0.8m, 筒体尺寸为 2.8m × 2.8m, 共有 430m² 有效吸声面积; 同时, 在四角斜形墙面上均做 3cm 厚穿孔铝合金板吸声墙面, 其面积共约 380m², 估计其馆内原有建筑总吸声量 ≤ 800m², 而南北大片侧墙面上则未考虑做吸声处理, 显然该体育馆内的原设计吸声量是远远不够的。据作者估算, 若要求满场混响时间为 1.4s, 则馆内总需吸声量应为 4500m² 左右, 除去观众席约 1400m² 吸声单位及原

收稿日期: 2000-05-17; 修回日期: 2000-06-19

作者简介: 章奎生(1937), 男, 浙江上虞人, 教授级高工, 从事厅堂音质与噪声控制工程设计和研究工作。

设计吸声量 800m^2 之外, 还缺少约 2300m^2 吸声单位, 也即表明此体育馆原建筑设计所做吸声体及吸声墙面的总吸声量仅约为馆内所需吸声量的 $1/4$ 。这就是造成宁波体育馆建成以来一直反映音质很差的原因所在, 具体表现在馆内混响时间很长、声音很混、听音清晰度很差、扩声系统易回输啸叫、传声增益低等问题。无论是比赛还是会议及演出, 业主对音质效果都十分不满, 希望能通过改建予以解决。

我们于 1999 年 6 月现场测试表明, 馆内空场 500Hz 混响时间长达 4s, 经推算其满场 500Hz 混响时间也长达 2.8s(见表 1), 因此决定进行音质改建。

表 1 改建前的混响特性

条 件	125	250	500	1k	2k	4k
实测原空场 T_{60}/s	3.70	4.11	4.02	4.19	4.06	3.14
推算原满场 T_{60}/s	2.92	3.03	2.81	2.63	2.59	2.37
改建前空满场 T_{60} 差/s	0.78	1.08	1.21	1.56	1.47	0.77

[注]推算原满场混响时间即为根据实测混响时间考虑满场观众吸声增量后推算所得改建前满场混响时间值。

3 建声改建设计要求

1999 年 5 月作者接受宁波市体育中心的委托, 对宁波体育馆进行了建声改建设计工作, 在现场调研和实测的基础上, 首先确定了如下音质改建设计的主要目标要求:

(1) 中频最佳混响时间

根据我国编制的“体育馆声学设计及测量规范”标准(送审稿)的规定, 当体育馆比赛大厅体积为 $40000\text{m}^3 \sim 80000\text{m}^3$ 时, 合适的混响时间为 $1.3\text{s} \sim 1.6\text{s}$ 。考虑到多功能用途的宁波体育馆的具体条件, 设计确定其中频最佳混响时间为:

(满场) $T_{60} = 1.4 \pm 0.1\text{s}$ ($f = 500\text{Hz} \sim 1\text{kHz}$)

(空场) $T_{60} = 1.8 \pm 0.1\text{s}$

(2) 混响时间频率特性

根据体育馆多功能用途的要求, 设计建议的宁波体育馆混响特性如表 2 所示:

表 2 建议的混响特性指标

频 率	125	250	500	1k	2k	4k
建议混响比值	1.3	1.2	1.0	1.0	0.9	0.8
设计满场混响 T_{60}/s	1.9	1.65	1.4	1.4	1.35	1.25
设计空场混响 T_{60}/s	2.4	2.1	1.8	1.8	1.65	1.5

(3) 馆内声场分布及传声增益

馆内声场分布应满足广电部制定的 GYJ25-86 “厅堂扩声系统声学特性指标”中规定应为 $\leq \pm 4\text{dB}$, 传声增益应 $\geq -12\text{dB}$;

(4) 馆内无回声及颤动回声等声学缺陷。

4 音质改建的设计计算

宁波体育馆音质改建的设计计算主要包括以下几方面内容:

(1) 比赛大厅总体积及总表面积的计算

主要计算结果如下:

馆内总表面积为: $S_{\text{总}} = 10396\text{m}^2$ (其中网架天花面积为 3952m^2);

馆内总体积为: $V_{\text{总}} = 53600\text{m}^3$ (其中包括 $1/2$ 网架空间内体积 11620m^3);

单人容积值为: $V_{\text{总}}/n = 10.7\text{m}^3/\text{人}$ 。

(2) 看台吸声量估算

看台面积为: 2166m^2 , 空、满场馆内看台吸声量计算结果如表 3 所示:

表 3 看台吸声量计算结果

条 件		125	250	500	1k	2k	4k
空 座 椅	吸声系数 α	0.25	0.35	0.40	0.45	0.45	0.40
	吸声量 A/m^2	542	785	866	975	975	866
满 座 椅	吸声系数 α	0.45	0.55	0.65	0.75	0.75	0.70
	吸声量 A/m^2	975	1191	1408	1625	1625	1516

[注]表中吸声系数及吸声量均以每平方米观众席面积计。

(3) 馆内建筑总需吸声量的计算

表 4 总需吸声量计算结果

项 目	125	250	500	1k	2k	4k
设计满场混响时间	1.9	1.65	1.4	1.4	1.35	1.25
平均吸声系数 α	0.36	0.39	0.44	0.43	0.43	0.42
总需吸声量 $S\alpha/\text{m}^2$	3722	4055	4575	4471	4471	4367
满场看台吸声量 $S\alpha/\text{m}^2$	975	1191	1408	1625	1625	1516
建筑所需总吸声量/ m^2	2747	2864	3167	2846	2846	2851
原有建筑吸声量/ m^2	388	556	766	804	761	723
改建应增总吸声量/ m^2	2359	2308	2401	2042	2085	2128

宁波体育馆建筑总需吸声量计算如表 4 所示。可见, 体育馆内建筑所需总吸声量约为 $2750\text{m}^2 \sim 3150\text{m}^2$ 吸声单位, 其中改建前原有不同频率吸声量约为 $400\text{m}^2 \sim 800\text{m}^2$ 吸声单位, 则建声改建设计中馆内应增加的总吸声量为 $2100\text{m}^2 \sim 2400\text{m}^2$ 吸声单位。

(4) 馆内空满场混响时间的计算

根据建声设计方案, 决定在网架天花部位共增加 4 种不同形式空间吸声板, 共计面积为 1274m^2 , 而在墙面新增 520m^2 吸声面积, 并改建原四角吸声墙面共 380m^2 。

表 5 为音质改建时馆内空满场混响时间的计算结果:

表5 设计计算的混响特性

条 件	125	250	500	1k	2k	4k
馆内满场总吸声量/ m^2	3173	3838	4525	4540	4419	4291
馆内空场总吸声量/ m^2	2740	3405	3983	3891	3770	3641
满场计算混响时间/s	2.30	1.80	1.48	1.43	1.38	1.30
空场计算混响时间/s	2.71	2.10	1.72	1.70	1.67	1.53

由表5设计计算结果可见,在250Hz~4kHz的中高频范围内,设计计算所得的空、满场体育馆内混响特性同设计要求值基本相符,而仅在125Hz的低频设计计算混响时间(空、满场分别为2.71s和2.3s),则比设计要求值长0.3s~0.4s,这是由于受改建投资的限制,设计中不可能采用很多大空腔或厚吸声层等吸声结构,以用于加强低频吸声效果。如125Hz时,馆内要求总吸声量为3722 m^2 ,而实际改建设计中的总吸声量为3173 m^2 ,也即离设计要求约差550 m^2 吸声单位,但这将有助于音乐演出时增加丰满度。

5 吸声结构的设计与配置

在宁波体育馆的建声改建设计中,我们先后共做了5个改建方案,由业主比较选择并专门召开音质改建设计方案论证会,最后选定了实施方案,经优化调整后的建声改建具体包括以下7个方面设计措施:

(1) 保留原比赛场上空网架中部共48个筒状空间吸声体(可使改建费用节省约15万元),但为了进一步提高筒体的吸声效率,在每个筒状吸声体的顶部增做两块 $700 \times 2800 \times 75mm^3$ 厚水平空间吸声板,共96块,单块面积为 $1.96m^2$ /块,合计吸声面积为 $188m^2$,并与筒体顶部拼装连接,安装也十分方便(见图2中①)。

(2) 在筒状吸声体四周的网架下弦共96个网格内增挂水平悬挂吸声板,共168块,每块尺寸为 $900 \times 2700 \times 75mm^3$,单块面积为 $2.43m^2$ /块,合计吸声面积为 $408m^2$ (见图2中②)。

(3) 在网架天花四周三角形下弦网格内增挂水平悬挂三角形吸声板共100块,单块尺寸为 2700×2700 (直角边长) $\times 75mm^3$,单块面积为 $3.78m^2$ /块(见图2中③),合计面积为 $378m^2$ 。以上3种吸声板均用铝合金龙骨,铝合金穿孔板($p \geq 20\%$),100mm厚 $32kg/m^3$ 离心玻璃棉吸声层构成。

(4) 在网架内四边近墙面处增做垂直悬挂的吸声软帘共40块,单块尺寸为 $3000 \times 2500 \times 100mm^3$,单块面积为 $7.5m^2$ /块,合计面积为 $300m^2$,用阻燃布、 $24kg/m^3$ 离心棉毡及帆布加固带缝制而成(见图2中④)。

(5) 东西记分牌侧墙面原为大片实墙面,使馆内产生颤动回声。改建设计时要求在东西两侧墙面原记分牌两侧墙裙以上各做3个突出呈棱形状吸声墙面,每个宽度为3m,3种高度分为5.5m、6.5m和7.5m。表面均为穿孔FC板($p = 20\%$)内填离心棉吸声层,以吸收中高频为主,其面积约 $210m^2$;而另一半墙面则做平面型穿孔FC板($p = 5.5\%$)内填吸声棉以吸收低中频为主的吸声墙面。

(6) 将原四角斜面吸声效率较低的平面吸声墙面拆除后,改建设计为呈横线条状凹凸形的吸声面,分别用20%(250 m^2)及11%(126 m^2)不同孔率的穿孔FC板做面层,内填离心棉吸声层。

(7) 在南北大看台后墙面增做吸声处理,用料为穿孔FC板($p = 5.5\%$)内填50mm厚离心棉吸声层,面积共约160 m^2 。既增加馆内吸声量,也可避免南北后墙间的颤动回声。

以上4种形式空间吸声板合计面积共为1704 m^2 (其中新增面积为1274 m^2 ,网架增加荷重仅约 $3.5kg/m^2$),占平顶总面积的面积比为43%;因此其经济性应该是很好的,图2为改建后的天花吸声体配置图。

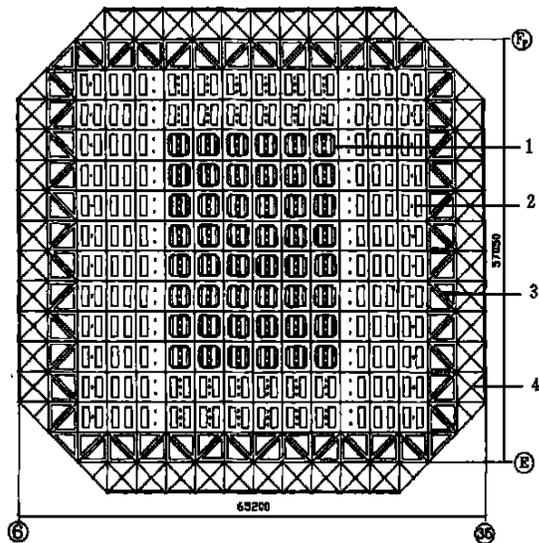


图2 改建后的天花吸声体配置图

3个不同部位墙面的吸声处理总计面积为 $962m^2$,其中新增吸声面积约 $582m^2$ 。总改建费用为60万元。

这次宁波体育馆内建声改建设计归纳起来,具有以下效果和特点:

(1) 可显著降低馆内混响时间,提高清晰度,改善丰满度,从而取得优良的音质效果,满足多功能使用要求;

(2) 扩声系统的扩声声级和传声增益将明显提高,能有效克服声回输和声啸叫现象,改善扩声系统的使用效果;

(3) 吸声材料配置科学合理、节省投资、技术经济性较好;

(4) 在改善音质效果的同时,也能获得良好的室内装修效果,给人耳目一新之感;

(5) 设计方案便于工厂化加工和现场施工,且对原有的音箱、灯光及通风都无影响,同时也符合防火要求。

6 改建后的音质效果

宁波体育馆的建声改建施工历时不到一个月就安全高效地完成,并于2000年4月28日进行了现场验收测试。实测内容包括混响时间、声场分布、传声增益及频率响应特性等方面,测试方法均同改建前的测试。测试仪器主要是SCT-1型厅堂声学特性综合测试仪器及声级计等。测试结果如下:

(1) 混响时间特性(见表6及图3)

表6 改建后实测的混响特性

条件	125	250	500	1k	2k	4k
空场实测平均 T_{60}/s	2.66	2.18	1.73	1.92	1.95	1.63
满场推算平均 T_{60}/s	2.18	1.76	1.38	1.43	1.47	1.35
改建后空满场混响差值	0.48	0.42	0.35	0.49	0.48	0.28
改建前后空场混响差值	1.04	1.93	2.29	2.27	2.11	1.51
改建前后满场混响差值	0.74	1.27	1.43	1.20	1.12	1.02

[注]表中满场混响均由空场实测混响推算而得。

由表6可见,建声改建后,宁波体育馆内混响时间比改建前有了大幅度的降低,如空场500Hz~1kHz平均混响由原来4.1s降至现1.82s,降幅达2.28s;而推算满场混响也由原2.72s降至现1.4s,降幅达1.32s,与设计所预期改建后的空满场混响时间均非常相符。

(2) 声场分布

声场分布测试方法及测点也同改建前一样,在1/4场地内共选测15个测点做相对比较,从表7结果可见,改建后混响减短了,声场不均匀度值则比改建前有所增加,但仍符合厅堂扩声系统规定的标准。

表7 改建后实测的声场分布

测量条件	测量项目	最大最小声级差 /dB	声场不均匀度 /dB
改建前	A声级	≤3	≤±1.5
	1kHz	≤6	≤±3
改建后	A声级	≤4.5	≤±2.25
	1kHz	≤6	≤±3

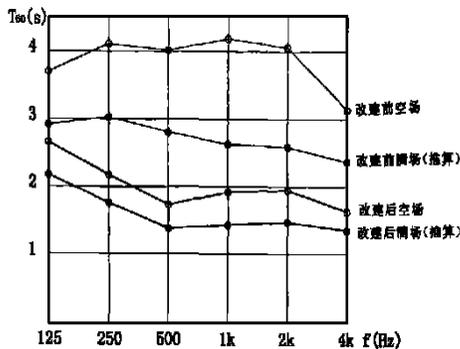


图3 改建前后实测混响特性

(3) 传声增益

改建前后传声增益的对比测试均取6点,改建前各点传声增益值在-12~-15之间,平均约-14dB;而改建后则降为-6~-12之间,平均约-9.5dB,提高了4.5dB,也取得了明显的改善效果。

从以上现场客观实测音质结果可见,这次宁波体育馆的建声改建取得了完满的效果,达到了设计计算所预期的效果,特别是混响时间降到了合适的标准;从现场主观试听音质评价也可知,馆内用于扩声时,无论是在比赛场内或看台各区域,其语言清晰度感觉都很好;当用于音乐扩声时,音乐的丰满度也觉满意。表明这次建声改建设计是十分成功的,施工质量也达到了设计要求。相信宁波体育中心雅戈尔体育馆将以优良的音质效果迎来更多的球赛、音乐及综艺演出活动,为宁波人民提供更优美、丰富的文体生活。

本次宁波体育馆改建工程由上海申华声学装备有限公司配合承担施工任务,上海通乐实业公司的曹益群先生、袁耀忠先生,原飞乐音响公司技术部的沈树德先生和宁波体育中心的俞汝红先生等承担了现场测试工作,在此一并表示谢意。

参考文献:

- [1] 王炳令. 多功能体育馆的声学问题[J]. 世界建筑, 1988, 4(2): 67-71.
- [2] 章奎生等. 上海虹口体育馆的音质设计[J]. 声学技术, 1993, 12(1): 1-7.
- [3] 章奎生. 组合式空间吸声体的设计与试验[J]. 噪声与振动控制, 1993, 13(1): 18-22.
- [4] 项端祈等. 亚运会体育馆声学设计的新进展[C]. 北京: 第六届建筑物理理论文集. 中国科技出版社, 1993: 52-64.
- [5] 中国建筑科学研究院主编. 建筑声学设计手册[Z]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987: 625-637.