

体育馆声学设计探讨

柳孝图

(东南大学建筑系 南京 210018)

1994 年 11 月 8 日收到

摘要 本文分析了我国综合性体育馆共同的体形特征及其所导致的运用建筑声学时出现的若干问题,探讨了有关的声学标准,并以工程实践为例,说明必须依靠建筑声学设计和电声设计的结合,才能作好体育馆的声学设计.

关键词 体育馆, 声学标准, 声学设计

On the acoustic design of gymnasiums

Liu Xiaotu

(Southeast University, Nanjing 210018)

Abstract The gymnasiums in this country are a new kind of multi-purpose halls. From the view point of acoustic design, a gymnasium has its own characteristics: sound source is located at the central large area of the hall, with acoustically highly reflective floor; the mean free path of sound is very long; the shape and the size of the sport hall are decided by sport activities, building structures, etc. and thus vary. Due to these reasons, the role of architectural acoustic design is limited. On the other hand, electroacoustic technology is under rapid development. By the use of good combination of these two means, gymnasiums can be provided with optimum acoustic conditions for both speech and music.

Key words Gymnasium, Acoustic standard, Acoustic design

半个多世纪以来,主要出于经营效益的考虑,世界各国开始发展多用途大厅.体育馆也不例外.我国的体育馆建筑已相当普遍,除了主要在 70 至 80 年代各省、市建造的较大型体育馆和在 90 年代建造的以北京亚运会工程为代表的体育场馆外,现今在经济发展地区的一些县,甚至在大型的住宅区内,也先后建造了相应规模的综合性体育馆.

本文首先简要介绍我国综合性体育馆的使用现状;继而就体育馆共同的体型特征及其所导致的运用建筑声学设计时出现的若干问题,进行分析;最后探讨有关的声学标准,并以工

程实践为例,说明依靠建筑声学设计和电声设计的结合,可以作好体育馆这一类多用途大厅的声学设计.

1 体育馆的使用概况

我国各地的综合性体育馆,除供体育活外,正在作为新的一种多用途大厅,供文艺演出、集会报告等活动之用.根据一个省会的体育馆自 1983 年至 1993 年使用情况的统计,十年间共使用 822 场,计 463.62 万人次,其中体育活动 272 场,72.52 万人次,占 33%(按场次计,下同);集会、报告 69 场,65.2 万人次,

占 8.5%；音乐、文艺演出 481 场，325.9 万人次，占 58.5%。另一些省、市体育馆的使用情况统计是：体育比赛活动占 $\frac{1}{5}$ ，集会、报告占 $\frac{1}{5}$ ，音乐、文艺演出占 $\frac{1}{5}$ 。上述统计表明，体育活动只占综合性体育馆日常使用场次的 $\frac{1}{5}$ 至 $\frac{1}{3}$ 。

2 体育馆的体形特征

从声学设计的观点考察，与传统观念上的多用途大厅相比，体育馆的体形具有如下特征：

2.1 不论比赛大厅容众数目的多少，皆以面积很大的比赛场地为中心分布观众座席。例如广东潮州体育馆的 2860 个固定席位是围绕 44.5 m×23.8 m 的场地（标准的手球场尺度）布置；容众 8000 人至 10000 人的陕西省体育馆和四川省体育馆的座席，分别是围绕 46.5

m×30 m 和 39 m×25 m（可扩大至 45 m×30 m）的比赛场地布置。

由于大量的座席（甚至全部座席）是沿比赛场地长边布置在主席台和裁判席的背后，因此许多观众的水平视线处于其中心视场之外，且距离较远。例如四川省体育馆观众席最远视距（水平）达 48 m，最大俯角为 22.56°，均超出国家有关文艺演出规范所限定的数值很多。

2.2 为了保证体育比赛，中心场地上空的顶棚都相当高。例如潮州市体育馆比赛厅中部顶棚的高度为 17 m。陕西省体育馆比赛厅中部顶棚的高度为 19 m。与声源（舞台）在一端的通常多用途大厅的顶棚相比，这种以体育活动场地为中心的大厅的顶棚，不能随观众席自后向前地逐排下降而降低天棚的高度，因而也导致了比赛大厅的每座容积超过通常所建议的多用途大厅的容积指标。见表 1。

表 1 几座体育馆比赛大厅的有关指标

馆 名	观众席数	容 积 (m ³)	每座容积 (m ³ /人)	总表面积 (m ²)	平均自由程 (m)	房间常数 (m ²)
青岛体育馆	6,800	62,285	9.1	9,600	25.9	6,500
山东体育馆	8,822	58,800	6.7	12,898	18.2	9,074
天津河西体育馆	3,000	22,656	7.6	7,412	12.2	4,541
南京五台山体育馆	10,000	63,240	6.3	17,310	14.6	6,402
上海万体馆	18,000	140,000	7.8	24,000	23.3	26,000

2.3 观众席所围绕的中心场地有两个显著特点。其一是面积很大（例如 45 m×30 m），远远超过供一般交响乐团演奏时所需面积（例如 12.5 m×12.5 m）。从力求保证乐团演奏的融合、平衡等效果考虑，其实无需将乐队分散布置在依体育活动要求所确定的这样大的场地上。其二是中心场地依体育活动要求所铺贴的拼木地板，无疑是高效的声反射面，然而这种界面与观众席的相对位置并不能向听众提供有效的反射声（往往是因掠过前部的听众席而导致相当多的声吸收）。

2.4 容众数量大。一般认为容众 3000 人左右的体育馆是小型体育馆，而对于声源（舞台）在一端的多用途大厅来说，这样的容众数则属大应用声学

型会堂了。在体育馆的比赛大厅里，只有最前排及最后排的席位靠近建筑围蔽结构的界面（中心场地及后部的墙面、天棚），绝大部分的座席均远离侧墙。例如天津河西体育馆和潮州体育馆（均属小型馆）的前排中座听众席与两边侧墙的距离超过 20 m。

3 运用建筑声学设计应当思考的问题

建筑声学设计，系指在建筑物的体形设计（包括容积、平、剖面形状）和建筑围护结构的设计（包括建筑材料与构造等）时，依照声音在围蔽空间传播、反射、吸收、透射等原理，综合考虑解决人们的听音要求，保证听好所需要听的声音，并且避免或减少不需要听的声音的干

扰. 根据上述对体育馆比赛大厅特征的分析, 在运用建筑声学设计时, 应从以下几方面深入思考其有效性.

3.1 平均自由路程方面. 早已证明: 对语言声的评价, 50 ms 是有用声能和有害声能的时间分界点; 早期的较强的侧向反射声(系指在脉冲声发声后 25 ms--80 ms 的延时时到达的侧向反射声)对于给听众以“空间感”有特殊的效用. 然而对于体育馆这类多用途大厅, 一般不可能依听闻的要求去改变声音传播的平均自由路程.

表 2 是有直达声存在时, 单个反射声决定性作用的延时时临界值^[1]. 在比赛大厅里因为绝大部分座席沿比赛场地的长边布置, 远离大厅顶棚尤其是侧墙, 难以得到有效的反射声(包括声音的强度和方向). 此外, 也由于平均自由路程长, 空气对 1000 Hz 以上频率声能的吸收作用显得特别重要.

表 2 单个反射声决定性作用的延时时临界值
(有直达声存在时)

延迟时间 (ms)	相应的声程差 (m)	正面反射声	侧向反射声
0	0	响度	明显的声像尺度 或声像移位
5	1.7	音色	
10~20	3.4~7.0		音色
30~60	10~20		空间印象
>80	>27	回声干扰	回声干扰

3.2 依体育活动的功能要求和反映建筑结构特征而确定的大厅体形、容积, 以及观众席位的分布与围蔽界面的关系, 无法按听音要求来考虑大的改动. 表 3 所示, 为归纳的在实际工程中, 在通常规模的声源(舞台)处于一端的多用途大厅, 为达到若干声学要求, 建筑声学设计可以采取的措施. 而对于这一类多用途大厅其中除用吸声材料可以对混响状况及回声等某些声学缺陷作较为有效的控制外, 表 3 所列的其余各项都不可能办到. 中心场地虽为强的声反射面, 但向听众所提供的多为掠过前面听众头部(经相当的吸收)的反射声.

表 3 声学设计要求及建筑声学设计可以采取的措施

明晰度/清晰度	强而均匀的直达声+来自平面的反射声
声音的平衡的投射	由舞台至听众席反射的选择和控制
演奏的聚合性	舞台上反射的控制
无回声干扰	后墙反射的控制
强的环绕的声音	侧墙反射的控制
混响声级和延时率	大厅内吸声材料的分布

3.3 为了控制比赛大厅混响, 围蔽界面材料的平均吸声系数(频率低于 1000 Hz 的声能全靠界面材料的吸收)一般均超过 0.5. 按照 L. L. Beranek 的分析, 如果 $\bar{\alpha} > 0.3$, 则该围蔽空间里就不可能形成扩散声场, 而且是属于“寂静房间”, 因为传播的声波很快就衰减了^[2]. 以青岛体育馆为例, 其房间常数 $R = 6500 \text{ m}^2$, 如果演唱的声功率级在距声源 3 m 远处为 90 dB, 则至距 24 m 远处已降低至 74 dB 左右, 实际上接近于满场时群情激昂的噪声. 图 1 表示在房间常数较大的条件下, 声音的衰减趋势, 可见几乎没有混响声级能够利用^[3].

3.4 混响时间计算值的误差较难预计. 工程实践中常用的计算大厅混响时间的依林公式, 所给出的混响时间仅取决于房间的容积和总吸收. 然而数十年来学者们的详细研究表明, 混响时间也还取决于围蔽空间的形状和吸声材料的位置. 按照考虑了房间形状和材料位置影响的计算, 对于房间尺度比例相近的房间(例如 1 : 1.2 : 1.5 或 1 : 1.5 : 2), 混响时间的计算值比按依林公式计算的结果分别低 6—15% 和 4—19% (依材料分布在多大面积的墙上而定). 如果房间尺度比例为 1 : 2 : 3, 则依材料分布的不同墙面, 与依林公式计算结果相比, 有 +6%—24%. (即总共可达 30%) 的差别^[4]. 体育馆比赛大厅的尺度比例, 往往是依体育活动的要求、需容纳的观众人数和选用的建筑结构形式来决定, 其长、宽、高的尺度比例相差很大, 因而按照常用的公式计算所得混响时间可能包含难以估计的误差.

3.5 难于考虑为演出人员创造适宜的声学条件. 播音室、录音棚的建筑声学设计一般是为播、录音人员的使用提供最佳的声学条件. 在

厅堂的设计中,既要满足听众的听音条件,又要考虑为表演者提供良好的声学条件(例如表3所列的若干方面).现今有些学者提出两个评价量,一个是 Support(简称为ST),用于表示早期反射声给演唱者的表演努力(演唱者自己听到的直达声)所提供的帮助.另一个是 Early Ensemble Level(简称为EEL),是早期声能与在距离声源1 m 远处的直达声能的比值,较高的 EEL 值反映演奏的各成员之间能较好地相互听闻.上述要求对于声源(舞台)处于大厅一端的情况,可以通过建筑声学设计,精心地研究舞台空间的尺度、体形特征及界面处理来实现^[6].在以比赛场地(当作舞台)为中心的多用途大厅是无法考虑的.

3.6 这一类多用途大厅的大容积(见表1)要求相应增加空调系统的负荷,从而也将增加空调系统的噪声.建筑声学设计就得考虑更有效的隔声、消声、减振措施.

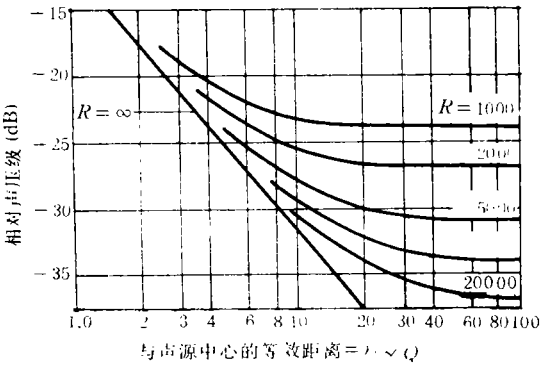


图1 用于确定围蔽空间里与声源不同的等效距离处声压级的图表
(r 为与声源的距离 m ; Q 为声源的指向性因数)

根据以上分析,体形特征受制于体育活动要求的多用途大厅,仅凭建筑声学设计很难解决诸如听众席区域内足够的直达声强度,有效的反射声,较高的直达声与反射声(甚至包括背景噪声)的声能比,大厅的频率响应特性以及各区席声学条件相近等问题,总之难于创造所希望的优良的听音条件和演唱条件.另一方面,设置强指向性的扬声器系统,在听众席区应用声学

域就能得到由较高比率的直达声与反射声组成的混响时间,从而为获得高的语言清晰度提供理想的条件.电声设计还可以运用延时、人工混响等技术对音乐节目的表演、重放效果进行优化,使人们听得逼真、自然,并为整个大厅的各听众区席创造相近的听音条件.

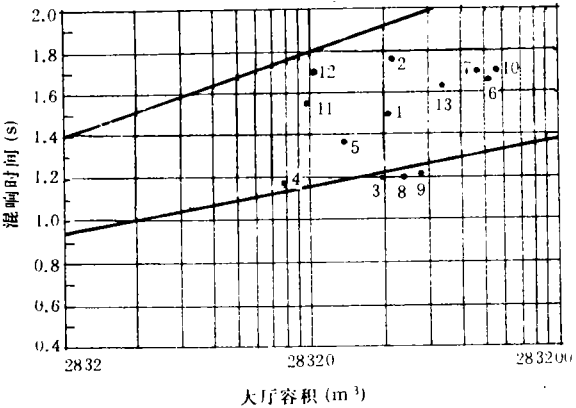


图2 混响时间(500 Hz)与大厅容积的关系
1. 青岛体育馆 2. 南京五台山体育馆^[6] 3. 山东体育馆 4. 天津河西体育馆 5. 北京光彩体育馆^[7] 6. 广州天河体育中心体育馆 7. 上海万体馆 8. 陕西省体育馆 9. 辽宁体育馆 10. 首都体育馆 11. 上海黄浦体育馆 12. 浙江体育馆 13. 国家奥林匹克中心体育馆

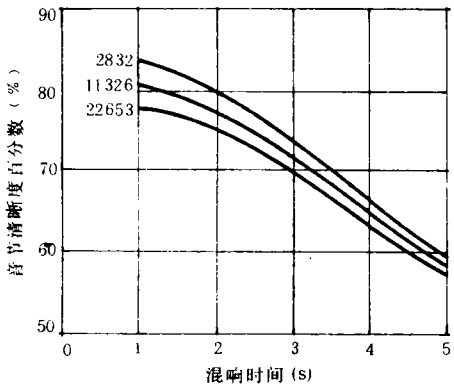


图3 平均的音节清晰度百分数与不同容积(m^3)大厅混响时间的关系

4 体育馆的建筑声学标准及工程实例

4.1 声学标准 为了使听众能听清楚需要听的声音以及减少噪声(包括回声等声学缺陷)的干扰,在体育馆建筑中建筑声学设计可以考虑

从两方面为听音创造条件.

4.1.1 控制混响时间 一座大厅在供文艺演出时实际上是演员噪音和各种乐器的延伸部分;而在供体育活动和集会报告时,则在很大程度上只是传达信息的工具. 因此建议仍以供清晰地传达信息为主,来考虑比赛大厅的混响时间. 图2为我国较为有名的13座不同规模的体育馆比赛大厅500 Hz声音的混响时间与其总容积的关系. 图中的斜线是国外学者推荐的供语言专用和学校多用途礼堂混响时间最佳值所处的范围^[3]. 图3所示的语音音节清晰度与混响时间和大厅容积的关系,亦可供中、小型体育馆选用混响时间指标的参考^[8].

4.1.2 控制噪声水平

(1) 噪声是由很宽的频率范围构成,因此可以预计其对语言的干扰也必然涉及到语言的几乎整个频率范围. 根据 T. J. Schultz 的研究,在背景噪声级为 46 dB 的噪声环境中,当语言声级为 80 dB 时,听闻的清晰度可达 86%^[9].

(2) 体育馆供文艺演出时,在设置扬声器系统的条件下,一些听众席接受的民族歌曲音量范围大致是 80—90 dB,偶尔也出现低于 80 dB 的情况. 女高音可达 105 dB,男、女的语声一般均可超过 85 dB. 对照表 4 列出的在使用中被认为听音条件比较满意的体育馆比赛大厅的有关噪声情况,可以认为,把噪声级的限值确定为噪声评价曲线 NR-35 至 NR-40 是适宜的.

表 4 几座体育馆比赛大厅内的噪声情况

馆 名	倍频带声压级(dB)								相应的 A 声级	符合的 NR 数	备 注
	63 Hz	125	250	500	1 K	2 K	4 K	8 K			
青岛体育馆 (6,800 席)	49	44	40	35	31	27	24	19	40	31	空场
南京五台山体育馆 (10,000 席)	51	42	38	35	32	30	27	24	39	35	空场
成都军区白下路体育馆 (3,000 席)	62	50	44	36	36	29	21	16	44	35	空场
成都市城北体育馆 (6,000 席)	53	45	41	38	36	33	28	27	41	35	空场
天津河西体育馆 (2,760 席)	39	33	32	31	26	22	18		32	27	空场
北京光彩体育馆 (3,096 席)	56	48	37	33	21	19	14		34	30	空场
广州天河体育中心体育馆 (8,626 席)	55	45	37	34	31	35	22		42	37	空场

4.2 工程实例

4.2.1 南京五台山体育馆^[6]

建筑声学设计使比赛大厅的满场混响时间对于 500 Hz 控制在 1.77 s(36 个测点的平均值);空调机房使用迷宫式消声器提供 10—31 dB(对不同频段的噪声)的降噪量. 大厅内的噪

声级最高为 41 dB(A),空场条件下的噪声水平达到 NR-35 曲线.

电声设计使到达观众席的声压级不低于 85 dB,放送音乐时超过 90 dB;所有观众席的声压级差不超过 6 dB,观众听到的声音投射方向与视线方向基本一致. 扬声器系统对于语言

和音乐分别在 200—6000 Hz 和 80—10000 Hz 的频率范围都有良好的频率响应。

4.2.2 青岛体育馆

建筑声学设计使比赛大厅的满场混响时间对于 500 Hz 控制在 1.5 s(依空场测量数据推算);空场条件下大厅内的背景噪声级为 40 dB(A),噪声水平控制在 NR-31 曲线。

电声设计包括了在大厅中部上空吊挂的可以调节高度的扬声器系统。测量结果表明,各项技术指标(包括传输频率特性、传声增益、声场不均匀度等)均达到语言和音乐兼用的扬声器系统一级或二级标准,观众认为听音效果优良。

5 结论

5.1 综合性体育馆已经成为我国建造数量相当大的新的一种多用途大厅。由于体育活动所占的比重不大,因而需要要在依体育活动要求确定的体形、容积等特征条件下,尽可能考虑文艺演出、集会报告的听音要求。

5.2 鉴于以比赛场地为中心(作其它用途时则作为中心舞台)的体形特征和大容积等,使得对声源(舞台)处于尽端的大厅可以有效运用的建筑声学设计,在这一类大厅难于(甚至无法)应用。

5.3 良好的电声设计(包括选用符合设计要求的设备)及其与建筑声学设计的配合,可以使语言的传播和文艺节目的演唱、重放效果得到

优化,从而为人们创造听得清晰、逼真、自然的效果。

致谢 本文引用了中国建筑西南设计院赵培生、黄哲伟高级工程师、中国建筑西北设计院张静宜高级工程师和山东建筑工程学院周兆驹副教授提供的宝贵资料,谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] Barron, M. Marshall. A H. *Journal of sound vibration*, 1981, **77**(2): 211—232.
- [2] Beranek L L. 著, 声学(中译本), 第一版. 北京: 高等教育出版社, 1959. 333.
- [3] John E K. Foreman, *Sound Analysis and Noise Control*, New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. **92**, 139.
- [4] Schroeder, M R. Gerlach. R. *J. Acous. Soc. Am.*, 1974. **56**(4): 1300.
- [5] Gade, A C. *Acustica*, 1989, **69**: 249—262.
- [6] 上海工业建筑设计院声学组编, 建筑声学及噪声控制技术资料选编, 上海: 华东地区建筑设计标准化办公室出版, 1981, 15—26.
- [7] 项端祈编著, 实用建筑声学, 第一版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992, 325.
- [8] Knudsen, V O. Harris, C M. *Acoustical Designing in Architecture*, 2nd edition, U. S. A.; Published by the American Institute of physics for the Acous. Soc. Am., 1978, 158.
- [9] Schultz, T J. *J. Acous. Soc. Am.*, 1966. **14**(2): 100—104.

(上接第 34 页)

5 结束语

本换能器经国防声计量一级站测试检定,湖上和海上实验证明其性能优良,它已成功应用于变深声呐设备,并已在声遥控等其它技术领域推广使用。

参 考 文 献

- [1] McMahon G. W. *J. Acous. Soc. Am*, 1964, **36**, 528—533.
- [2] 周福洪, 水声换能器及基阵, 国防工业出版社, 1984. 99—103.
- [3] 水声换能器测量规程. C13899—79.