

科特迪瓦共和国剧场声学设计与缩尺 声学模型试验

项端祈 王 峥 陈金京 张令名

(北京市建筑设计研究院 北京 100045)

1997 年 6 月 24 日收到

摘要 科特迪瓦共和国剧场包括主演出厅、第二演出厅、排练厅和各种配套用房。此外还有科方自建露天剧场。它构成了共和国首都阿比让市的演出中心。由于三个厅室各有其主要功能、且音质要求较高,故分别进行了声学设计,并对其中的主演出厅作了缩尺声学模拟试验。以弥补声学计算上的不足。本报告简述共和国剧场各厅声学设计指标的确定,以及为达到预期声学效果所采取的各项技术措施。

关键词 多功能厅, 音质设计, 模型试验

Acoustic design and scale model test of the Theater of the Republic of Cote d'Ivoire

Xiang Duanqi Wang Zheng Chen Jinjing Zhang Lingming

(Beijing Institute of Architectural Design and Research, Beijing 100045)

Abstract The theater of the Republic of Cote d'Ivoire aided by China, consists of the main auditorium, a smaller auditorium, a rehearsing hall, and various supplementary rooms. Together with an open-air theater which is built by Cote d'Ivoire. Owing to the different functions and acoustic requirements for the two auditoria and the hall, particular acoustic design were effected. To guarantee the acoustic effects of the main auditorium, scale model test was conducted. In this paper, the authors discuss in detail the expected acoustic effects.

Key words Multi-function auditorium, Acoustical design, Model test

1 引言

科特迪瓦共和国剧场建于首都阿比让市泻湖湖畔。剧场包括主演出厅,第二演出厅和排练厅三个大厅,追加露天剧场,成为首都乃至共和国的一个规模相当的演艺中心。三个厅的总平面配置见图1所示。各厅的用途、规模、容量、形式和有关参数列于表1内。

主演出厅是剧场的主体,它以音乐、歌舞演出为主。故设有镜框式舞台。为适应自然声演出音乐的需要,在舞台上设有升降乐池和活动音乐罩。

第二演出厅以演出非洲地方戏剧为主,兼供会议和其它功能。伸出式舞台适应现代戏剧的演出。沟通演员与观众的联系。

排练厅主要供戏剧排练使用，同时兼作演播室。

表 1 科特迪瓦共和国剧场各厅的用途、规模、容量、形式和有关参数

厅堂名称	用 途	容量 (座)	容积 (m ³)	每座容积 (m ³ / 座)	观众厅 形式	舞台 形式
主演出厅	音乐(交响乐为主) 舞蹈(芭蕾)	1505	11200	7.4	钟形	镜框
第二演出厅	非洲地方戏剧	700	4200	6.0	多边形	伸出式
排练厅	戏剧排练为主 兼供演播(直播)	300	1500	5.0	多边形	伸出式

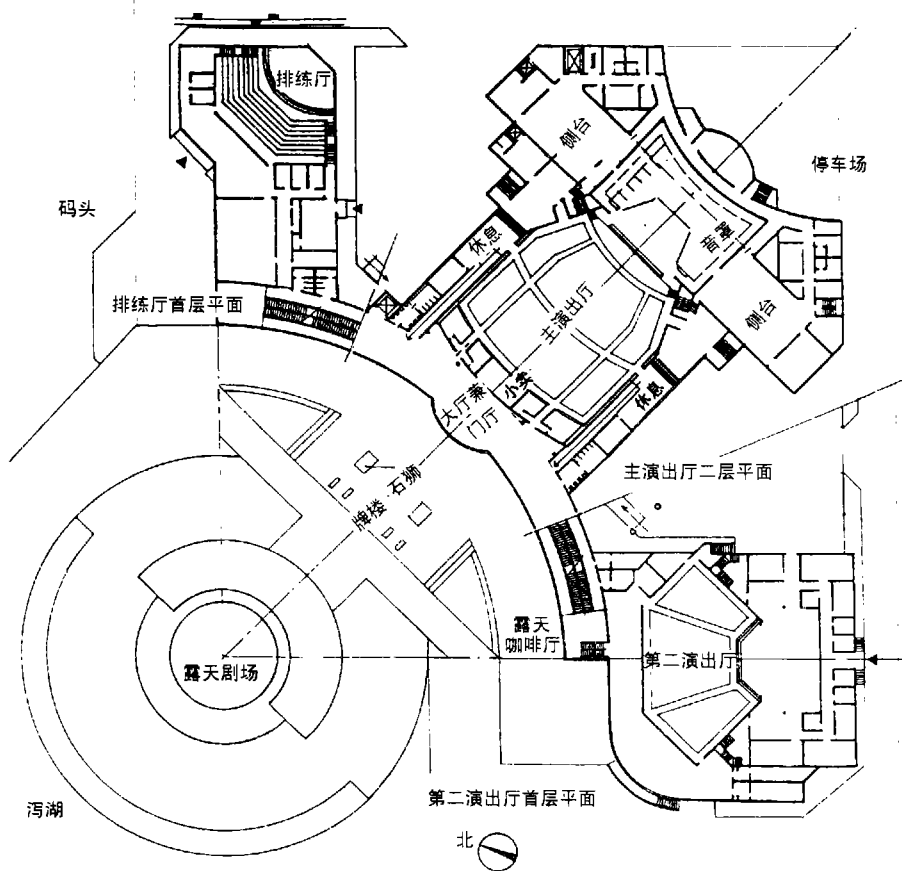


图 1 科特迪瓦共和国剧场总平面配置

2 科特迪瓦共和国剧场各厅声学设计指标的确定

由于剧场各厅的功能不同,因而声学要求也各不相同:主演出厅以音乐歌舞为主,并要求自然声音音乐演奏,故采用接近于音乐厅的音

质指标;第二演出厅以戏剧演出为主,声学指标采用话剧院的最佳值,以确保对白的清晰度;排练厅因兼作播音室,故采用强吸声短混响适用于录音、播音(直播)室的指标。而排练本身并无严格的音质要求。各厅的主要音质指标见

表 2 所示。

表 2 科特迪瓦共和国剧场各厅主要的声学设计指标

厅堂名称	混响时间 (S)			声均不均匀度 (dB) 500-4000Hz	响度 (dBA)	允许噪声级 (dBA)②
	125	500	2000			
主演出厅	1.90	1.50	1.40	< 10	80(70)①	30
第二演出厅	1.2	1.0	1.0	< 10	75(65)	30
排练厅	0.70	0.60	0.60	< 6	≠ 65	35
声控室	0.30	0.30	0.30	< 6	—	35

① 括号内为自然声演出时的要求 ② 允许噪声级是指开空调时的标准。

3 主演出厅的声学设计

主演出厅以自然声音乐演奏和芭蕾舞表演为主。为使大厅具有良好的音质，除了应有最佳的混响时间、足够的声级、均匀的声强分布和低噪声的要求以外，还应使听众在直达声后有较强的早期反射声 (50ms 以内)。对自然声音乐演出来说，还需防止自然声能在舞台上逸散和吸收。为使乐队尽可能伸入观众席，在芭蕾舞和歌舞剧演出时，还应控制舞台过长的混响，因为舞台容积为 12480m³，略大于观众厅。

因此必须做相应的吸声处理。以保证声源处有良好的声学条件。

3.1 混响时间的控制

主演出厅因需兼顾其它用途，有效容积 11200m³，对音乐演奏而言并非最佳值。总表面积为 3548m²。为使大厅达到设计的混响时间值，除后墙采用局部吸声处理外，均为反射较强的材料。经混响计算确定各部位的用材见表 3 所示。

表 3 主演出厅各部位内装修用材和构造简述

部位	面积 (m ²)	用材和构造简述	声学特性
地面	1082	硬木地面	反射
顶棚	1120	轻钢龙骨，石膏板吊顶，粉光喷涂	反射
侧墙	600	抹灰，圆柱形扩散体	声扩散
后墙	240	木条饰面吸声构造	吸声 (中高频)
台口前侧墙	34	抹灰喷涂	反射
挑台底	288	抹灰喷涂	反射
护墙	48	五合板，木筋	低频声吸收
台口	136	开口	宽频带吸收
座椅	1505 个	硬塑料后背，穿孔底面，软垫和椅背	相当于听众的声吸收

根据厅内确定的装修构造，求得的混响时间列于表 4 所示。

表 4 主演出厅空满场的计算混响时间 ①②

设计与计算值	空、满场	下述频率 (Hz) 的混响时间 (s)					
		125	250	500	1000	2000	4000
计算值	空场	2.05	1.92	1.70	1.58	1.46	1.38
	满场	1.88	1.73	1.48	1.42	1.40	1.22
设计值		1.90	1.65	1.50	1.50	1.50	1.40

① 座椅和听众的声吸收根据澳大利亚“西贝”公司提供的数据计算。
② 根据经验对低频和高频作了吸声量修正。

由计算结果可见,厅内装修可基本上满足设计混响时间的要求。

3.2 声场分布的考虑

厅内声场的均匀分布是通过大厅平、剖面形式的设计来实现的:顶部的定向反射面台口前侧墙倾角的确定,地面的升起以此提高直达声的强度,侧墙的圆柱形扩散体等综合设

计,使厅内各座席的声级差小于设计指标,即 $\Delta P = P_{max} - P_{min}(\text{dB})$ 小于设计值。大厅的平、剖面设计示于图 2 和图 3。

声场分布均匀度是否符合设计要求,同样可以通过厅内各座席声压级的计算来验证。但较为可靠的方法是通过缩尺模型试验。(后详)

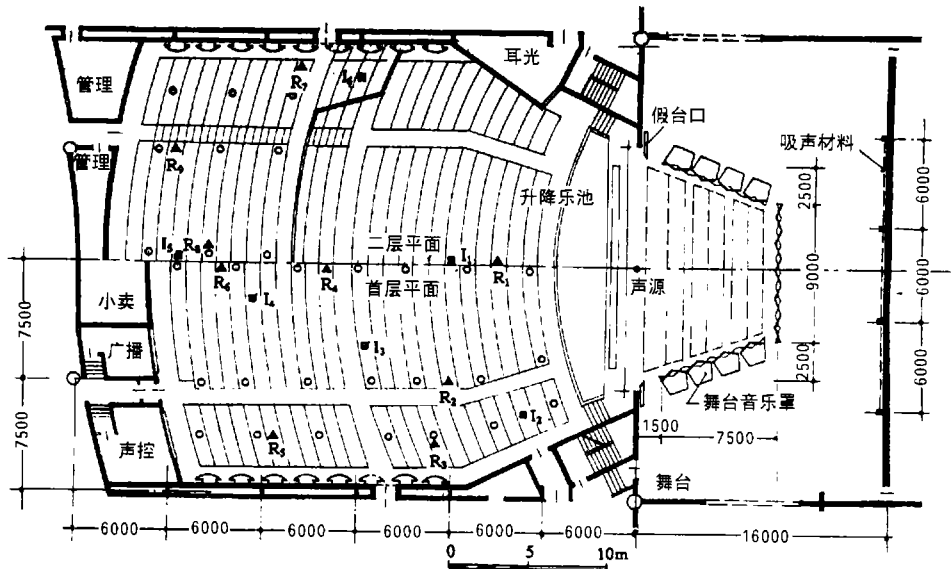


图 2 主演出厅平面

○ — 声场测点 ▲ — 混响时间测点 ■ — 脉冲响应测点 (声源: 电火花)
楼座: 487 座 池座: 1014 座 总计: 1501 座

3.3 噪声控制

厅内的噪声控制包括围护结构的隔声和空调系统的消声和减振两方面。厅的周墙均为重墙,且观众厅的两侧设有休息厅,前面有门厅,后面为舞台,因此,墙体的隔声量足以控制户外噪声的干扰;屋顶下设有石膏板吊顶,因此,也具有足够的隔声量。空调系统均设有消声和减振措施,并控制系统的气流速度,以免气流再生噪声的干扰。

3.4 音质缺陷的控制

为了消除由后墙反射引起的回声,配置了吸声结构;两侧平行墙上设有圆柱形扩散体,以免产生颤动回声。

3.5 辅助设施的配置

主演出厅供音乐演奏和歌舞演出两种主要功能,因此,设有舞台和乐池。为适应自然声音乐演奏的需要,尽可能减少自然声能在舞台上的逸散和吸收,设置了电动舞台音乐罩和升降乐池。前者将舞台与观众厅隔离开来,使音乐罩内的空间成为观众厅的组成部分;后者则使演奏人员伸入观众厅内,缩小音乐罩的深度。为了减少音乐罩的重量、而同时又要求有较大的刚度,以免对低频声能有较大的吸收采用玻璃钢制作,音乐罩的墙体均为三角形柱体构成,以获得良好的声扩散。并加强乐师之间的实时相互听闻。顶板采用折板,其倾角按加强池座前排座席的早期反射声确定其倾角。

升降乐池采用液压传动,减少运动时的噪

声，它设定了三个高度，即乐池、观众席地面和舞台标高。可按实际需要使用自控装置。

4 主演出厅的缩尺声学模型试验

为预测主演出厅建成后的音质状况，纠正声学计算中的误差和潜伏性的音质缺陷，进行了三维缩尺模型试验，缩尺比为 1/10。通过模型试验预测厅堂内的混响时间、声场不均匀度和短延时反射声分布。模型试验按厅堂音质模型试验方法标准* 进行。

4.1 缩尺比的确定和模型制作

根据标准 2.0.1 条的：“厅堂音质模型的缩尺比不宜小于 1/10” 的规定。故确定观众厅采用 1/10 的缩尺比。其中包括局部舞台。为了一一对应厅内各部位材料（或结构）吸声系

数的测定，按本院混响室同样制作了 1/10 缩尺比的模型，观众厅的模型用 20mm 多层木板表面打光，油漆制作。混响室模型采用 10mm 有机玻璃制作。图 4 为观众厅的缩尺声学模型照片。

观众厅内的装修和座椅均按缩尺比在模型内加工制作。并在混响室内测定其吸声系数，（按 GBJ47 标准进行测定），选定与厅内实际吸声效果相同（或很接近）的类比材料（或结构）。这项工作的难度在于：厅内与模型内相对应的材料，通常不可能在各个频率的吸声性能都相同，在这种情况下，采取首先确保中频（500，1000Hz）吸声性能相同，其它频率较为接近的措施。因此模型内的测定值，尤其是混响时间测定值中频较为可靠。

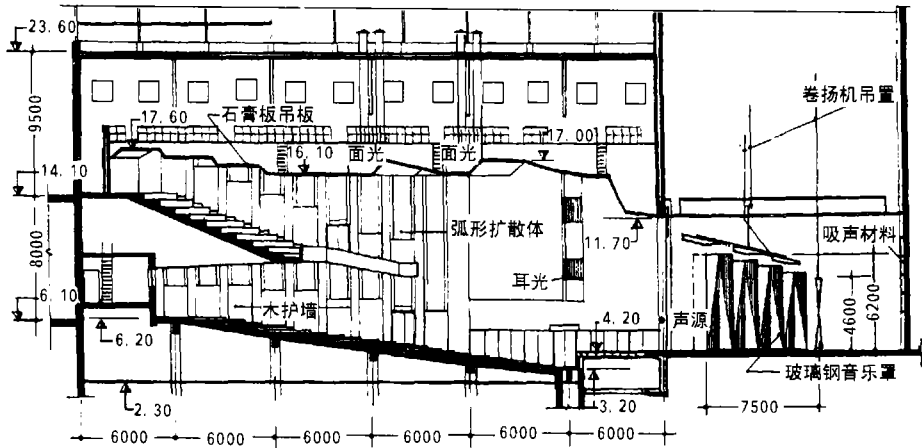


图 3 主演出厅剖面

4.2 混响时间的测定

模型内混响时间的测定方法均按国际 GBJ76 〈厅堂混响时间测量规范〉进行。由于模型的缩尺比为 1/10，因此模型内的测试频率相应地将提高 10 倍。即厅内的测试频率为 125Hz-4000Hz 六个倍频程中心频率，放在模型内相应地为 1250Hz-40000Hz 六个频率。由于高频扬声器在 40000Hz 的声级低，信噪比在

20dB 以下，故根据测试标准 4.1.3 条规定，略去 40000Hz 的测定。测定混响所用的试备均按标准第三章规定的要求选定，并按第四章测量方法进行。混响测点在池座和楼座确定 9 个点（配置见平面图 2 所示），传声器高 130mm。声源配置在舞台中心线中点，发白噪声。测定结果见表 5 和图 5 和图 6 所示。

* 该标准于 1995 年 9 月完成送审稿，1996 年审批，目前尚未正式公布。

表 5 模型内混响时间测定值^①

混中央委员时间测定条件	下述频率 (Hz) 的混响时间 (s)				
	125	250	500	1000	2000
观众厅空场测定值	2.24	1.87	1.72	1.42	1.17
观众厅空场测定值修正后	2.25	1.89	1.75	1.48	1.20
2/3 满场 (1000 名观众) ^②	2.02	1.71	1.54	1.31	1.05
满场 (1500 名听众) ^②	1.93	1.63	1.45	1.24	1.02

① 9 个测点计算平均值

② 满场值是根据澳大利亚西贝公司 (Sebel) 提供的数据计算的

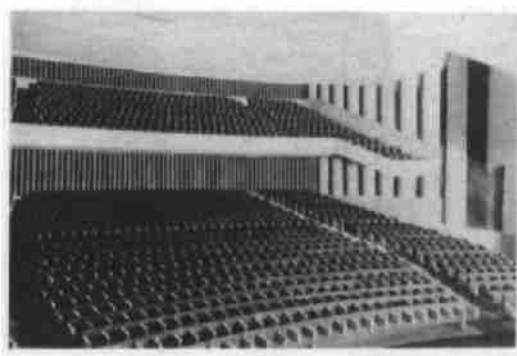


图 4 主演出厅 1/10 木制缩尺模型

由于缩尺模型内的介质仍为空气,而高频在空气中的声衰减很大。因此,测定的混响时间按标准进行了修正,修正公式如下:

$$T = \frac{K}{(K/T_m) - 4(m_m - m)}$$

式中

T: 修正后的厅内混响时间 (s)

K: 常数项, $K = \frac{5.25}{C}$, C 为声速 (m/s)T_m: 模型内测得的混响时间乘以 $\frac{1}{\text{缩尺比}}$ (s)m_m: 模型试验时温、湿度条件下的各中心频率的空气吸收衰减系数乘以缩尺比 (m⁻¹)m: 设计厅堂在正常温、湿度条件下 (一般取温度 20℃, 相对湿度 60%) 的各中心频率的空气吸收衰减系数 (m⁻¹)

表 5 和图 5, 图 6 内的数据都已经过修正。

由测定结果可见,中、低频的测定值接近设计值。高频混响值偏低,其主要原因:虽经高频修正,但还不足以符合实际厅堂内的空气声衰减的情况。此外,厅内装修模拟材料的吸声系数偏高也是原因之一。

4.3 声场分布的测定

模型内声场分布的测定系统和方法及表达形式均参照 GB4959《厅堂扩声特性测量方法》的规定进行。测点配置见平面图 2 所示。池座和楼座计 30 个测点, 17 个频率 (100~4000Hz), 共计 510 个数据。按规范仅须测定 1000~4000Hz (模型内为 10000~40000Hz) 各测点的数据。增加测点是因为该厅要求自然声演出,为更确切地了解演奏台 (音乐罩内) 点声源条件下,厅内各频率声场分布的状况。测定的结果见表 6 和图 7 所示,声场不均匀度 $\Delta P = P_{\max} - P_{\min}$ (dB) 值,即厅内各测点中的最大声级 $P_{\max}$ 与最小声级 $P_{\min}$ 的差值。由测定结果可见,声场不均匀度值达到了设计要求。由于测定是按自然声点声源进行的。当采用扩声系统时,声场不均匀度将会降低 (即比上述测定值好)。

4.4 脉冲声测定

脉冲声测定,即短延时反射声分布测量,目的在于了解听众席内,听众在接收到直达声后的早期反射声 (50ms) 的状况。因为早期反射具有增加直达声强度和提供亲切感的作用,它是厅堂音质的重要指标之一。声源按标准采用电火花,作为脉冲声源。1/4 寸传声器接收,在示波器上显示,通过照像获得测点的反射声序列。时标 10ms (相当于厅内 100ms)。共测定

6 个点，D 网络接收。测点配置见平面图 2 所示。测定结果见图 8 所示(通过示波器上拍摄的照片，缩小绘制而成)。

由测定结果可见，厅内所测定的座席均有较多的早期反射声。由于设置了音乐罩，因此，前排测点 1，2 早期反射声明显增多。

表 6 模型内声场不均匀度测定结果

观众厅部位	下述频率 (Hz) 的声场不均匀度 ΔP (dB)					
	125	250	500	1000	2000	4000
池座	6.2	7.4	7.6	8.4	9.1	4.1
楼座	3.4	1.5	3.2	4.0	2.4	0.5

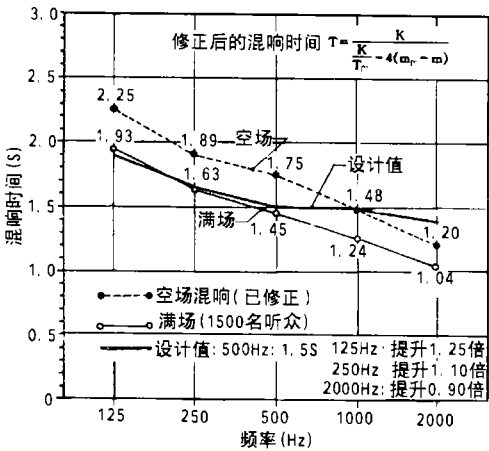


图 5 模型内混响时间的测定结果

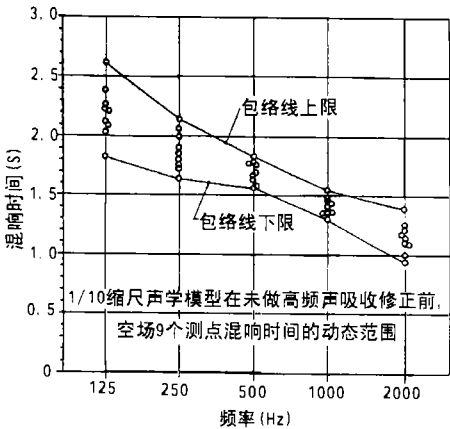


图 6 模型内 9 个测点测得的空场混响动态范围

5 第二演出厅的声学设计

第二演出厅以演出非洲地方戏剧为主，兼供其它功能。有效容积 4200m³，容纳听众 700 名，每座占容积 6.0m³。伸出式舞台，台口宽 18m，高 6.5m。台后设有演员化妆和技术设应用声学

备用房。

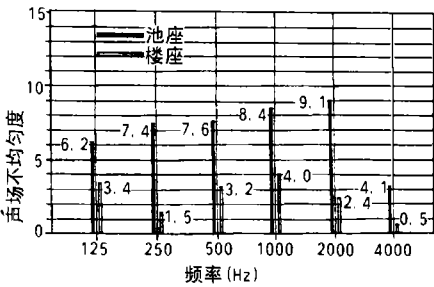


图 7 模型内声场不均匀度的测定结果
 $\Delta P = P_{max} - P_{min}$ (dB)
30 个测点，17 个频率 (100-4000Hz)
(510 个数据) 的测定值得

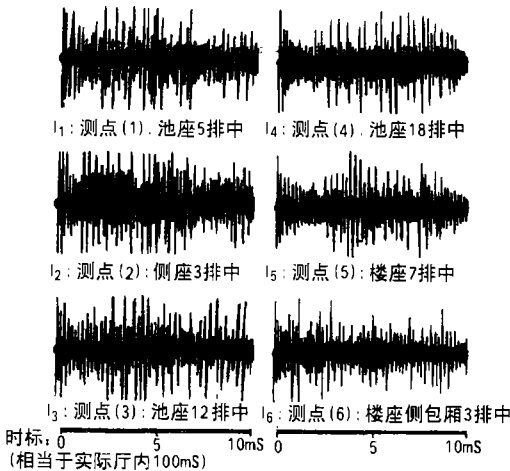


图 8 模型内脉冲声测定结果 (时标长 10ms)

6 个测点的反射声序列 (测点位置见平面图)，声源为电火花 (反射声序列根据示波器拍摄的照片绘制)

地方戏剧通常以对白为主，配乐为辅。并以

自然声演出作为最佳的演出方式。在这种情况下采用扁而宽的多边形平面有如下的优点：

- 后排听众与舞台的距离有可能压缩至最低限度，从而使听众有足够的直达声强，这对于自然声演出是十分重要的；
- 有可能在确保后排听众足够强的直达声和视角（侧墙至舞台中心的展开角小于 120°）的条件下，容纳较多的听众人数；
- 没有平行的侧墙，消除了由此而引起的颤动回声；
- 由于伸出式舞台，加强了听众与演员的联系，乃至听众参予演出的可能性。

但这种形式的缺点：在于台口前侧墙不再具有作为加强听众席早期反射声的功能，相反地如处理不当则容易引起回声（见平面图）。在

这种情况下，早期反射声只能通过台口前吊顶的反射面。经过上述优缺点的分析，确定采用了多边形（扁形六角形）平面。

为了进一步提高直达声强度，除了通过平面形式的设计外，在剖面设计中提高了 C 值，采用 120mm，这样不仅有良好的视觉，同时也减少了前排听众的掠射声吸收。为使听众席具有足够的早期反射声，在台口前的顶棚上设置反射面；为消除前、后侧墙声反射引起的回声，设置了强吸声面。

由于戏剧演出，以对白清晰为主，故采用短混响，大厅除木地板和木护墙以及局部石膏板吊顶外，均采用吸声构造。厅内的设计和计算混响时间见表 7 所示。

表 7 第二演出厅的设计和计算混响时间

计算与设计值	空、满场	下述频率 (Hz) 的混响时间 (s)					
		125	250	500	1000	2000	4000
计算值	空场	1.45	1.38	1.28	1.24	1.05	0.98
	满场 (700 座)	1.26	1.14	1.00	0.95	0.82	0.80
设计值		1.20	1.10	1.00	1.00	0.90	0.90

噪声控制包括围护结构的隔声和空调系统的消声与减振。由于厅堂的墙体不作为外围护结构，而屋顶结构下又设有吊顶，因此有足够的隔声能力防止户外噪声的干扰。空调系统按常规进行了消声和隔振设计。并控制气流速度。故能确保厅内的允许噪声级。

6 排练厅的声学设计

排练厅容纳 300 名听众，有效容积 1500m³，每座占 5m³。多边形平面，伸出式舞台与观众席融为一体。作为剧场排练厅，无论对于音乐排练的指挥或戏剧排演的导演，均要求有较短的混响时间和接近平直的特性，以便及时发现排演中细微的差错。一般取经验值 1.0s 为宜。声场的均匀分布也极为重要。均匀的声场可使审查席内听众有较为一致的响度，录音和播音时也不必选择“最佳”位置。声场不均匀度以小于 6dB 为宜。

由于该厅兼作演播室，特别是要求直播。因此排练厅只能按设有听众席的演播室要求，采用强吸声短混响。故确定混响时间为 0.6s，接近平直的混响特性。由于容积小，后排听众离舞台仅为 10m，地面起坡很大，前、后排高差为 350mm，确保听众席有较强的直达声强。在舞台两侧和顶部设有反射面，使自然声排练时，有一定的早期反射声。为控制混响时间达到设计指标，内装修除木地板和木护墙控制低频混响外，其它界面均采用强吸声构造。

参 考 文 献

1 李海南，张令名等. 建筑创作. 北京市建筑设计研究院，1994.
2 项端祈. 剧场声学设计实践. 北京大学出版社，1990.
3 清华大学主编. 〈厅堂音质模型测定标准〉报批稿. 1996.
4 项端祈. 录音播音建筑声学设计. 北京大学出版社，1994.