

北京七色光儿童艺术剧院的声学设计

陈金京 王 嶂 项端祈 葛砚刚

(北京市建筑设计研究院 北京 100045)

2001 年 3 月 22 日收到

摘要 北京七色光儿童艺术剧院是一个以演出儿童话剧为主, 同时还可以进行歌舞, 音乐等其他文艺形式的演出的多功能剧场。该剧院形式活泼, 音质良好。本文从音质和噪声控制的几个方面对其声学设计进行了介绍。

关键词 声学设计, 多功能, 音质

Acoustic design of Beijing Seven-Colour-Light Children Theater

CHEN Jinjing WANG Zheng XIANG Duanqi GE Yangang

(Beijing Institute of Architectural Design and Research)

Abstract Beijing Seven-Colour-Light Children Theater, with a capacity of 556 seats, is a multipurpose theater that is used mainly for children drama. In this paper, the authors discuss the acoustic design and the noise control of the Theater.

Key words Acoustic design, Multipurpose, Acoustics

1 引言

北京七色光儿童艺术剧院是一个以演出儿童话剧为主, 同时还可以进行歌舞, 音乐等其他文艺形式的演出的多功能剧场。设计之初, 就要求不仅能够演出儿童话剧, 还能够演出其他大型文艺节目, 同时满足排练、合成和演出的需要。所以一开始我们就将其作为一个正规的剧院来进行设计, 但同时也照顾到儿童的特点。该工程竣工后经常上演儿童话剧和其他类型的文艺节目, 成为北京市少年儿童的重要活动基地。普遍反映演出效果良好, 受到了广大少年儿童的喜爱和专业人士的好评。下面分别对该工程的声学设计各部分进行介绍, 并

对工程中取得的成绩和出现的问题进行分析和讨论。

2 工程概述

北京七色光儿童艺术剧院位于东城区菊儿胡同, 剧院的观众厅宽 16m, 一层后墙距台口水平距离 15.5m, 面积为 237m², 有固定座位 225 个, 活动座位 110 个, 二层后墙距台口水口水平距离 17.6m, 面积为 122m², 座位 221 个。观众厅体积为 1980m³, 总表面积为 1130m², 每座容积为 3.6m³/座。舞台台口宽 12.5m, 高 7.5m。舞台面积为 363m²。图 1 和图 2 为剧院的平剖面图。

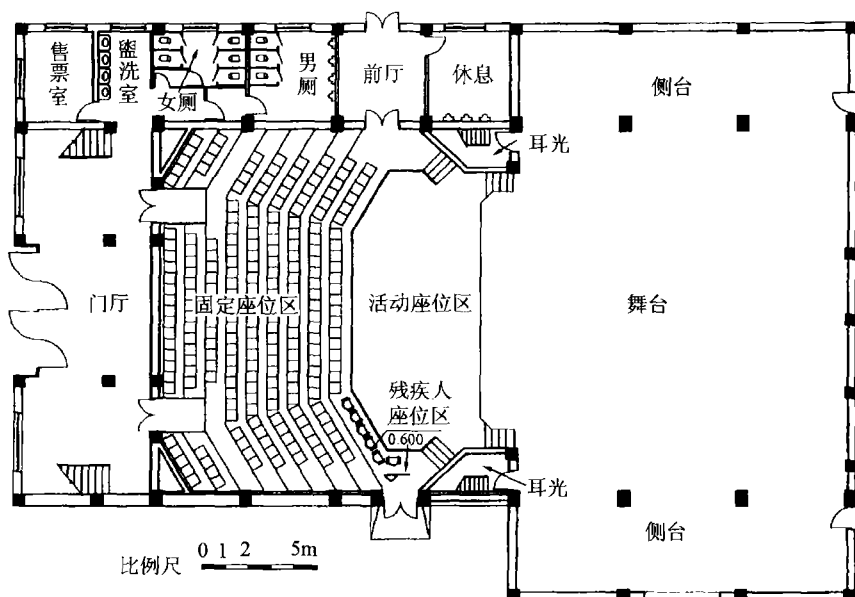


图 1 七色光儿童艺术剧院平面图

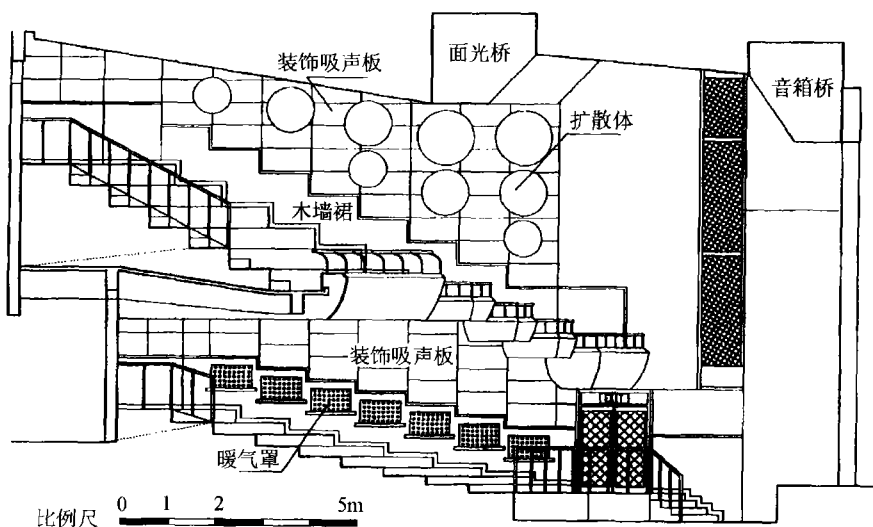


图 2 七色光儿童艺术剧院观众厅剖面图

3 声学指标的确定

根据七色光儿童艺术剧院的用途、体积、规模我们确定了如下声学指标^[1]，见表 1

4 平面布置

为了体现剧场多功能的特性，并提高演出

的灵活性，我们在进行平面设计时没有像一般传统剧院那样将所有面积都布置上固定座椅，而是将观众厅的一层平面分为两个区域，前部为活动座位区，面积为 85m²，根据需要可以容纳 100-120 个活动座椅，如果剧情需要，这部分面积也可以扩展为表演区域，或者让观众参与到剧情中去，与演员一起活动。在观众厅的后部为固定座位区，设置了 225 个固定座位。

表 1 七色光儿童艺术剧院声学设计指标

项目	指标
混响时间 T_{60}	低频 1.1s, 中频 0.9s, 高频 0.8s
明晰度 C_{50}	500,1000,2000 三个倍频段 平均值 >3dB
音节清晰度	自然声: 池座 > 90%, 楼座 > 80%; 扩声 > 95%
声场不均匀度	最大声压级与最小声压级之差 < 6dB
背景噪声	开空调时 < 30dB(A)

首层平面的布置提高了使用的灵活性。同时由于活动座位区与固定座位区相比可以布置较多的座位, 因此提高了观众厅的容量, 同时也拉近了后排观众席与舞台的距离。为了在有限的面积内布置更多的座位, 观众厅内设置二层楼座并在两侧设置了跌落包厢。为了保证二层后排有足够的直达声强度, 二层楼座的平面被设计成切角矩形, 使得二层最后排的每个座位与台口中心的水平距离都保持在 17.6m 左右, 直线距离在 18.5m 左右。在二层两侧设置了跌落包厢, 一方面可以增加座位, 另一方面丰富了观众厅的空间形式, 同时还可以为池座观众席提供早期反射声并增加观众厅的扩散效果。

5 50ms 内早期反射声的设计

加强 50ms 以内的反射声强度可以增强直达声的强度, 提高 C_{50} 值, 有助于语言清晰度的提高^[2,3]。在平面设计时, 我们在台口两侧设置了反射面, 为池座前区提供前次反射声。以声源位置位于台口线后一米中心计算, 该反射面提供的一次反射声与直达声的声程差在 8-10m 之间, 延时间隔在 23-30ms 之间。由于地方过于狭小, 为了保证耳光室的使用, 将这两个反射面做成了垂直于台口线的墙面, 这样做缩小了反射声的覆盖区域; 如果能将该反射面向外倾斜 15° 则可增加反射声的覆盖区域, 效果更为理想。另外耳光下的斜墙与侧墙结合可以为观众席的后区提供二次反射声。在剖面设计中, 我们在面光桥和音箱桥之间设置了反射面, 为池座观众席的中前区和楼座前区提供一次反射

声, 该反射面提供的反射声与直达声的声程差在 6.5-11m 之间, 延时间隔在 19-32ms 之间。另外, 观众厅的吊顶均做成反射面, 可以为楼座后部观众席提供一次反射声。

6 混响时间的设计

根据剧院的体积和用途, 我们将观众厅的混响时间确定为低频 1.1s, 中频 0.9s, 高频 0.8s。由于观众厅每座容积较小, 而且座椅为织物面软椅, 吸声量较大, 所以我们只在观众厅的后墙和侧墙的局部设置了吸声材料。吊顶、耳光侧墙和台口侧墙都设计成反射面。中高频吸声选用了彩色阻燃布包玻璃棉装饰吸声板, 低频吸声主要依靠三夹板木墙裙。表 2 给出了各主要部位的装修构造。

表 2 各主要部位的吸声构造

部位	构造
台口两侧侧墙及耳光墙面	水泥抹灰
一层侧墙	上部为 25mm 厚装饰吸声板 下部为三夹板木墙裙
二层侧墙	上部为 25mm 厚装饰吸声板 部分面积挂玻璃钢扩散体 下部为三夹板木墙裙
一层后墙	上部为 25mm 厚装饰吸声板 后 50mm 空气层 下部为三夹板木墙裙
二层后墙	上部为 25mm 厚装饰吸声板 后 50mm 空气层 下部为三夹板木墙裙
观众厅吊顶	纸面石膏板表面做喷丸处理 并布置 12 个直径为 2m 的 玻璃钢扩散体
挑台及包箱下吊顶	轻钢龙骨铝吊顶板
挑台及包箱栏板	防火板

7 扩散设计

由于场地的限制, 观众厅的两个侧墙相互平行, 这样就有可能出现颤动回声等声学缺陷。如果将两个侧墙都做成强吸声, 会导致混响时间过短。为此我们在面积较大的二层侧墙

上布置了三种不同规格的球切面型扩散体,其直径分别为 1.2m、1.0m 和 0.8m。这些扩散体一方面可以根据设计要求调节混响时间,另一方面也避免了颤动回声,并可为观众席提供良好的扩散声。根据混响时间的设计要求,并考虑到每座容积和空间高度的限制,观众厅吊顶被做成较为平缓的反射面,这也有可能在吊顶和地面之间引起颤动回声,因此我们在吊顶上也设置了 12 个直径为 2m 的球切面型扩散体,以消除上述的不利影响。所有扩散体均采用了球切面的形式,因为通过对比实验,在各种形状的扩散体中,球面的扩散效果最好。制作扩散体的材料为玻璃钢,因为玻璃钢的可塑性好,可以制成各种形状,同时刚度好,颜色鲜艳且不易退色。另外玻璃钢扩散体是在工厂加工成成品的,在现场只须简单的吊挂,施工十分简便。观众厅两侧的跌落包厢及其弧形栏板也可以起到破坏平行墙面,增加扩散的目的。

8 装修设计

在装修设计时我们紧紧围绕儿童剧院这个特点,抓住七色光这个主题,让儿童们一走进剧场就感到欣喜和愉快,如同进入了自己的家园,和到别的剧场有不同的感觉。在声学设计与装修设计的结合方面,我们力求让每一个声学构件同时也成为表现主题思想的装修元素。在墙面装修时我们选用了彩色装饰吸声板,用三种不同的颜色按一定的韵律排列作为背景,在其上面安装了九个大小不同的球切面形玻璃钢声音扩散体,扩散体分别用了七种颜色,标明了七色光这个主题。由各种颜色装饰吸声板构成的背景,代表着少年儿童丰富多彩的生活。由下至上从小到大的排列的扩散体,寓意着少年儿童幸福茁壮的成长。而从后到前扩散体逐渐变大则代表着少年儿童们在前进的道路上不断的前进。装修效果特色鲜明,欢快活泼,受到了广大少年儿童们的喜爱。同时也起到了控制混响时间、消除声学缺陷和增加声音扩散的声学效果。

9 噪声控制

剧院观众厅和舞台的噪声控制分为外部噪声、内部噪声和空调噪声等几部分工作。下面分别予以介绍。

9.1 外部噪声的控制

从平面图中可以看出,观众厅北侧及东侧的外面有门厅和休息厅围绕,对外界噪声有很好的隔离作用,因此在这两侧观众厅的围护墙采用了单层 240 砖墙,而观众厅的西侧直接对外,没有隔离空间,因此选用了双层围护墙结构,两层围护墙的厚度分别为 240mm 和 120mm,中间有 280mm 厚的空气层,这样就保证观众厅的整个围护结构具有足够的隔声量。另外为了保证吊顶内的通风和舞台的排烟,在吊顶内的侧墙上设置了六个通风口,在舞台顶部设置了一个圆形排风口,并在排风口上安装了排风机,为了不让外界环境噪声通过这些开口对观众厅和舞台产生影响,我们对每一个开口都进行了消声处理。

9.2 内部噪声的控制

剧院内部噪声主要问题来自于空调机房,由于场地的限制,在规划设计时将空调机房和水泵房等设备用房都放置在舞台的下面,而且由于高度和结构的限制,在舞台和机房之间只隔了一层 10mm 厚水泥楼板,中间没有夹层。在机房内有直燃机组、空调机组和各种水泵。机房内声功率级在 80dB 以上。因此一层楼板的隔声量是远远不够的,必须进行隔声处理。然而更大的困难在于由于结构承载力的限制和机房内管道布置的影响,不能使用重型隔声结构。为了解决这个问题我们进行了反复实验和研究,决定采用四层石膏板轻质隔声构造,通过撞击声隔声测试,其标准化计权声压级为 47dB,隔声性能良好。

9.3 通风空调系统噪声的控制

剧院的通风空调系统中送风系统采用了铁皮风道,为了防止机组的噪声通过管道传到观众厅中,我们在管道系统中安装了折板式阻式

消音器^[4]，并设置了专门的消音器间，将消音器与机组隔开，以防噪声短路，低频噪声依靠铁皮管道的自然衰减。空调系统中的回风系统采用了砖砌风道，为了消音我们在风道中设置了迷宫式消音片，因为砖砌风道对低频噪声没有自然衰减，所以风道内壁砌筑了多功能共振吸声砖，以控制低频噪声的衰减。在振动噪声控制方面，我们对机房内所有可能产生振动噪声的设备都进行了隔振处理，方法是在设备的基础下安装由三层 SD 橡胶隔振垫制作的串联隔振器。

10 声学指标的测试

在七色光儿童艺术剧院竣工后我们对剧院的各项客观声学指标和主观清晰度进行了测量。

10.1 主观音节清晰度测试

因为是七色光儿童艺术剧院的主要观众是广大的少年儿童，所以在进行主观音节清晰度测试时我们聘请了 80 名小学五年级的学生作为受试人，这样比较符合该剧院的特点。80 名小学生均匀地分布在半场的范围内，每排 5~6 名。测试分自然声和扩声两种情况进行。根据受试人为小学生的特点，清晰度测试采用了打圈法^[5]。为了保证测试的准确性，两次测试分别使用了不同的字表，每个字表有 25 个互不相干的独立音节。发音人为小学语文教师，口齿清楚，发音人位于舞台大幕线中心后 1m 的位置。表 3 给出了测试结果。

10.2 明晰度指标 C_{50} 的测试

明晰度指标 C_{50} 值标志在观众厅内某一点的早期声能，其定义为：

表 3 音节清晰度测试结果

排	楼下		楼上	
	自然声	扩声	自然声	扩声
1	95.2	97.3	92.0	96.0
2	96.8	99.3	96.0	98.0
3	93.6	99.3	91.0	100.0
4	91.6	97.6	87.)	99.2
5	90.8	99.2	88.0	95.4
6	90.4	99.2	86.5	96.8
7	89.6	96.8	86.5	97.4
8	88.9	97.6	85.4	94.7
9			84.9	95.6
10			84.2	94.9
平均	92.1	98.3	88.2	96.8

$$C_{50} = \frac{\int_0^{0.05} p^2(t) dt}{\int_{0.05}^{\infty} p^2(t) dt}$$

表示直达声到达后最初 50ms 的声能在所有声能中所占的比例，它对语言清晰度有直接的影响，一般来说， C_{50} 值越大，清晰度越好，而 C_{50} 值越小，丰满度越好。 C_{50} 值是在空场条件下测量的，测量时声源为电火花脉冲发生器，放在舞台上大幕线后 1m 处的中央位置。接收装置为 ASAW 计算机声学测试系统，记录声场的脉冲响应信号，并通过对能量的积分计算出明晰度指标 C_{50} 值。由于语言的能量主要在 500~2000Hz 频率范围之内，在这个频率范围内的 C_{50} 值对语言清晰度的影响最大，所以我们测量这三个频率的 C_{50} 值。每隔二排测一排，每排测四个位置，表 4 为 C_{50} 值的测量数据。

10.3 混响时间、声场不均匀度及背景噪声的测试

混响时间是在空场条件下测试，测试数据以及根据观众的平均吸声增量^[6]折算的满场

表 4 明晰度指标 C_{50} 值测量数据

排	楼下倍频程 C_{50} 值			楼上倍频程 C_{50} 值			平均
	500	1000	2000	500	1000	2000	
1	0.9	3.0	3.3	0.8	4.0	6.0	3.0
4	3.4	5.1	6.7	4.4	4.4	6.5	5.1
7	4.6	5.3	6.7	3.4	3.9	7.2	5.2
平均	3.0	4.5	5.6	2.9	4.1	6.6	4.4

(下转第 28 页)

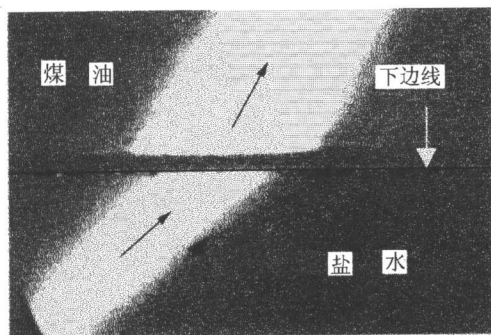


图6 声束从盐水中入射,煤油中折射的
Schlieren 实验成像图(入射角 50°)

地看到: 相对于入射声束的两个边界, 折射声束的左边界比右边界有较大的偏移, 和图2中数值结果一致。

上面的结果表明, 当声束从声阻抗大的液体中入射到液液界面上时, 折射声束会存在反向位移现象。随着入射角度的增加, 折射声束的位移也越大。这种位移是由于声束的有限宽度造成的。波束可以看成是平面波的叠加。由

于衍射效应, 声束是发散的。入射声束中各分量对于界面的入射角度不单一。当平面波从盐水入射到煤油中, 折射系数是实数其幅值是随入射角增加而单调减小。同样在声束中, 入射角度大的分量, 折射分量的幅值较小, 因此使折射波束的中心发生偏移, 即产生了波束位移。

在应用中, 如果用波束在成层介质中进行检测时, 要考虑到折射波束的位移。

参 考 文 献

- 1 Goos F, Hanchen H. *Ann. Phys.*, 1947, I: 333.
- 2 Schoch A. *Acustica*, 1952, (2): 17-19.
- 3 布列霍夫斯基赫. 分层介质中的波. 第二版. 北京: 科学出版社, 1985.
- 4 诸国桢, 刘亮, 傅德永. 中国科学 (A 辑), 2000, **307**: 653.
- 5 Briers R, Leroy O, Shkerdin G. *J.Acoust.Soc.Am.*, 2000, **108**(4): 1622.
- 6 陈宇, 黄杰, 周阳辛. 声学技术, 1997, **16**(3): 125.
- 7 [美] 安艺敬一, P.G. 理查兹. 定量地震学 — 理论和方法. 北京: 地震出版社, 1986.

(上接第 39 页)

混响时间数据见表5。表5中同时还给出了声场不均匀度和背景噪声的测量数据。从表中看出, 测试指标基本满足设计要求, 但中高频混响偏低, 这是因为甲方选购的座椅中高频吸声

系数偏大。

剧场通过两年多的使用, 各方面反映良好, 受到了使用单位的好评, 并得到了广大少年儿童的喜爱。

表5 声学测试数据

项目	条件	倍频程中心频率 (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
混响时间 (s)	空场	1.30	1.22	1.10	1.04	0.97	0.95
	满场	1.12	1.03	0.91	0.85	0.76	0.74
声场分布 (dB)	楼上	4.7	4.3	3.4	3.9	4.1	4.5
	楼下	6.4	5.7	4.6	4.1	4.9	4.5
背景噪声 (dB)	不开空调	38.9	35.0	29.7	23.1	20.9	19.0
	开空调	42.5	34.8	26.3	24.1	21.0	18.0

参 考 文 献

- 1 项端祈. 剧场建筑声学设计实践. 北京: 北京大学出版社, 1990. 92-102.
- 2 项端祈. 音乐建筑 - 音乐. 声学. 建筑. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. 138.
- 3 Bradley J S. *Applied Acoustics*, 1999, **55**: 99-108.
- 4 项端祈. 空调制冷设备消声与隔振. 北京: 中国建筑工程出版社, 1990. 49-90.
- 5 厅堂扩声特性测量方法. 《中华人民共和国国家标准》GB 4959-85.
- 6 项端祈, 王峥. 声学技术, 1988, (2).