

# 会堂建筑声学设计及应用案例

◆ 北京清华同衡规划设计研究院建筑声学与室内设计研究所 石慧斌 秦毅 金迪峰 郭静

会议、报告、讲座作为人们工作和学习的重要组成部分,已经成为各类建筑空间的基本使用功能之一,如政府机关、学术院校的会堂、讲堂等,甚至一些展览建筑的展厅、过厅,演艺建筑的多功能剧场等也要求兼顾大型会议的使用功能。

会堂的声学功能一般通过扩声系统来实现,而建筑声学作为建筑和室内设计的一部分,为电声系统提供了必要的使用条件和基础。换句话说,会堂空间并不仅仅是扩声系统形成的声场,而是建筑声学环境和扩声系统共同作用的结果。会堂在使用的过程中出现的一些音响的问题,或许不单是扩声系统的配置或调试引起,很可能是它的建声环境出了问题。

会堂的建筑声学有其自身的特点,住建部的相关规范对会堂、报告厅的建筑声学有着明确的设计要求:室内要求短混响,语言清晰度良好,各处有合适的声强和均匀度等。在具体的建筑声学设计中,还需要我们根据这些规范要求合理地配置指标,采取正确的措施来满足会堂的声学使用要求,避免出现相应的实际问题。

## 1 影响会议功能的室内音质指标

### 1.1 混响时间与频率特性

混响时间是一项重要的建筑声学指标,是指声音在室内发声稳定后衰减60dB所需要的时间。对于会堂空

间来说,如果混响时间过长,会造成语言不清晰,过短则显得语言干涩。过长的混响时间容易引起扩声系统反馈啸叫,而且还会影响语言清晰度和可懂度,使得传声增益指标降低而音质变差。

不同容积的会议厅堂都有一个合适的混响时间的容许范围,《剧场、电影院和多功能厅堂建筑声学设计规范》(GB/T 50356-2005)给出了建议的会堂中频500~1000Hz混响值(见图1)。

会堂混响时间的频率特性要求不同频率的混响时间值或比例不能相差太大,过大的频率特性比值会使声音产生“失真和染色”。混响时间频率特性曲线一般呈前高后低的形态,低频相对于中频可以有所提升,高频略有降低,但频率特性比值一般需要控制在15~20%以内。

### 1.2 语言传输指数

语言传输指数STI(Speech Transmission Index)是反映语言清

晰程度的一次客观评价参量。2011年6月,国际电工委员会IEC发布60268-16(4.0版)规范,对不同使用形式下房间的STI值与语言传输质量(主观评价)的对应关系给出了相关的划分和界定(表1)。会议、报告类厅堂的STI值大于0.62,可以达到较好的语言清晰度。

STI主要与混响时间有关,根据语言清晰度和辅音清晰度损失率的理论,如果不考虑声源的距离和指向性,会堂的清晰度和混响时间的平方成反比,提高会堂功能的语言清晰度,混响时间宜取容许范围的下限。

### 1.3 早后期声能比

早期声能比也是用来预测建筑和厅堂的语言清晰度的指标,有很多不同的时间分割点。最常用的测量方法为D50,是前50ms声能和整个脉冲响应声能的比;也有用C80测量的,就是用前80ms的声能,多用于音乐类厅堂。在分割比例上并没有明确的说法,但是通常认为,要达到好的语

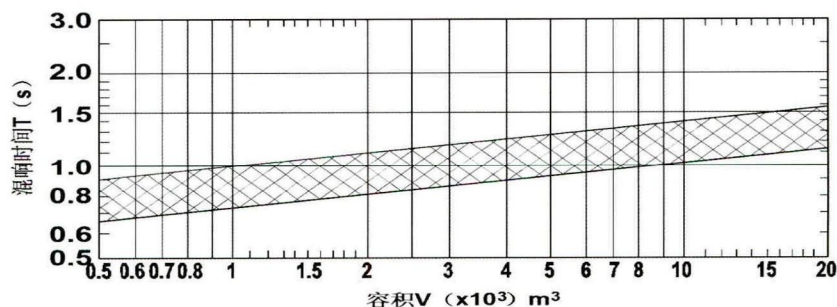


图1 对不同容积的会堂在中频500~1000Hz时满场混响时间建议值

表1 语言传输质量分类及适用范围

分类	STI值	适用信息类型	典型应用案例	备注
A*	>0.76		录音室	极高的语言清晰度, 大部分环境很难达到
A	0.74	复杂信息, 不熟悉的词	大剧院、话剧院、法庭、议会、听音辅助系统	高质量的语言清晰度
B	0.70	复杂信息, 不熟悉的词		
C	0.66	复杂信息, 不熟悉的词	大剧院、话剧院、法庭、议会、电话会议系统	高质量的语言清晰度
D	0.62	复杂信息, 熟悉的词	报告厅、教室、音乐厅	较好的语言清晰度
E	0.58	复杂信息, 熟悉的语境	音乐厅、现代教堂	高质量的PA系统
F	0.54	复杂信息, 熟悉的语境	购物中心的PA系统、开放办公空间、VA系统、大教堂	VA系统的目标值
G	0.50	复杂信息, 熟悉的语境	购物中心、开放办公空间、VA系统	VA系统的下限
H	0.46	简单信息, 熟悉的语境	建声较差条件下的VA和PA系统	
I	0.42	简单信息, 熟悉的语境	建声非常差条件下的VA和PA系统	
J	0.38		不适用于PA系统	
U	<0.36		不适用于PA系统	

注: 表中PA为Public Address System, VA为Voice Alarm System。

言清晰度(在厅堂或类似的大空间里面), D50达到0.5以上是比较有利的。

#### 1.4 背景噪声

会议室内本底噪声,即通风、空调等设备开启时的静态噪声,是建声设计中一项不可忽略的指标,背景噪声的大小直接关系到语言可懂度和清晰度。《建筑声学设计规范》(GB/T 50356-2005)规定采用扩声系统的会堂、报告厅的允许噪声不超过NR35。

## 2 建筑声学设计的技术要点

### 2.1 控制每座容积

容积是影响混响时间的主要因素之一。《建筑声学设计规范》(GB/T 50356-2005)给出每座容积的建议值为 $3.5 \sim 5.0 \text{ m}^3$ ,在这样的每座容积下,会议厅的吸声主要依靠观众自身的吸收就可以满足。但在一般的情况下,超过 $400 \text{ m}^2$ 以上的会堂或报告厅,一般会有兼顾艺术演出的需要,厅堂的净高会适当加大,座

椅布置得比较宽松、灵活,每座容积因此会做到 $6.0 \text{ m}^3$ 或以上,这时仅靠观众席的吸声量不能满足短混响的要求,就需要在适当的位置布置吸声材料。

### 2.2 吸声材料的选择

主席台是主要的发声位置,话筒比较集中,周围的墙面和天花必须布置强吸声材料;观众席后墙是直达声结束的位置,也应布置强吸声材料,尽量避免声音的反射;另外,观众席地面和天花一般可以选择其一布置吸声材料,地面如果是地毯,天花可以选择石膏板或金属板等不吸声的材

料;如果地面为木质或塑胶等面层,则天花需要适当选择吸声材料或做穿孔吸声等处理。

从吸声材料的选择上,织物软包和穿孔板材料都是很好的强吸声材料。穿孔板后需要配合多孔吸声棉(见图2,②),而软包装饰板需要保证一定厚度的织物纤维(厚度大于 $15 \text{ mm}$ ) (见图2,①),这样平均吸声系数都可以达到0.8以上,但其吸声主要集中在中高频。对于低频的吸收,可以在非吸声材料的位置,适当降低装饰材料的厚度,并留出一定厚度的空腔,做成薄板共振吸声结构(见图3),比如 $12 \text{ mm}$ 厚胶合板或石膏板,板后空腔 $50 \sim 200 \text{ mm}$ 。在穿孔吸声构造后留出空腔时,也可以增加吸声材料对低频吸收,改善吸收的频率特性。

### 2.3 控制观众厅的体型尺寸

会议厅堂是以电声使用为主的场所,观众所在位置听到的声音也是以电声直达声为主。因此,观众听到的声音的清晰度,在很大程度上与厅堂的长宽、坐席距离声源的远近有关,越靠近声源,听音也就越清楚,反之则清晰度降低。对于清晰度最差的后排观众来说,尽量减小他们到舞台主扬声器的距离,可以大大提高语言传输指数STI。对于一个 $600 \text{ m}^2$ 左右、容积约 $5000 \text{ m}^3$ 的会堂,在无指向声



① 国务院会议室软包装饰墙面



② 人民大会堂金色大厅穿孔金属板彩绘吊顶

图2 构造吸声频率特性



教育部报告厅木穿孔吸声饰面



教育部礼堂木装饰墙面、石膏板顶棚

图3 吸声装饰构造的应用

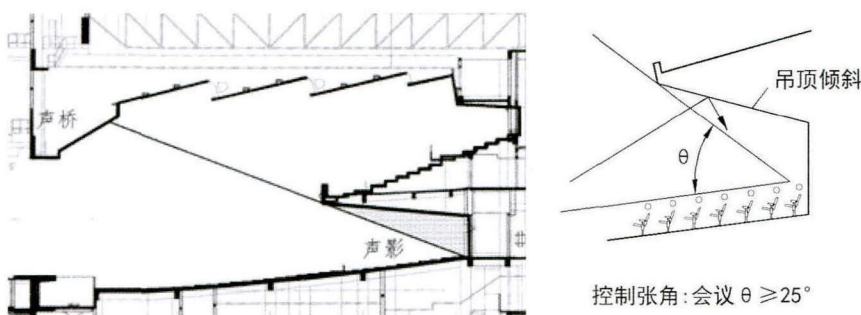


图4 挑台声影区(北大百年讲堂)和挑台的设计

源的条件下,观众席后排的距离减小5m, STI可提高约0.08。

### 2.4 挑台的设计与声影区

观众席较多的大厅一般要设挑台。如果挑台过深或过低,则容易遮挡来自声桥主音箱的扩声和来自顶棚的反射声,在池座后排区域形成声影区。一旦形成声影,会造成会议主扩音箱无法到这些“死角”,即使在楼座下进行补声,也很难做到声像、延

时与主扩声一致。

为避免声影区的产生,对多数会议厅堂,挑台下空间的进深不应大于其开口高度的2倍,张角 $\theta$ 应大于 $25^\circ$ (见图4)。同时,挑台下的顶棚应尽可能前高后低,使挑台下成喇叭口形状,有利于声桥的扬声器的声音或顶棚的反射声覆盖挑台下的观众席。

### 2.5 避免形成平行墙面的颤动回声

声音在平行界面之间往复反射,容易形成颤动回声。由于会堂的发声位置一般在主席台上或主席台附近,且观众席吸声量较大,坐席又带有升起,因此观众厅内的平行侧墙不易发

生这种现象。但如果观众厅内靠近观众席的位置有布置音箱,观众较少的情况下,平行的墙面还是会引发颤动回声。有效的解决办法是将侧墙旋转一定角度或向下倾斜,在避免颤动回声的同时,还可以增加侧向反射声的有效利用(见图5)。在空间吸声不足时,可以利用向上倾斜的墙面将声音向上反射,充分利用天花的吸声材料进行吸收,控制混响时间,同时避免了颤动回声的形成(见图6)。

相比之下,主席台的平行侧墙、地面和天花之间是最容易形成多重反射的位置。在墙面和天花布置强吸收材料,比如织物软包或穿孔板加玻璃棉的吸声构造,是一种解决的措施。而更加有效的方法是将主席台墙面和顶棚设计成斜面,呈朝向观众厅的喇叭口形状,同时布置强吸收材料,这样使声音向观众席反射,减少主席台上的颤动回声(见图7)。

### 2.6 声聚焦与扩散体

圆弧形的平面或凹曲面的顶棚会产生声聚焦的现象,使反射声不容易分布均匀(见图8),应当避免采用。对于已有或必须采用曲面造型的会议厅堂,一般应用强吸声或扩散体的方法来避免声聚焦,如在弧形后墙布置强吸声材料,在圆弧形的墙面采用反圆弧形的扩散体等。扩散体的宽 $a$ 、高 $b$ 应与声波的波长 $\lambda$ 满足如下关系,可以取得良好的扩散效果(图9)。

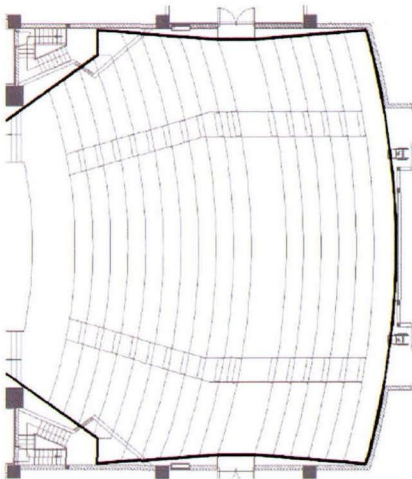


图5 观众厅侧墙平面做斜(东北大学报告厅)

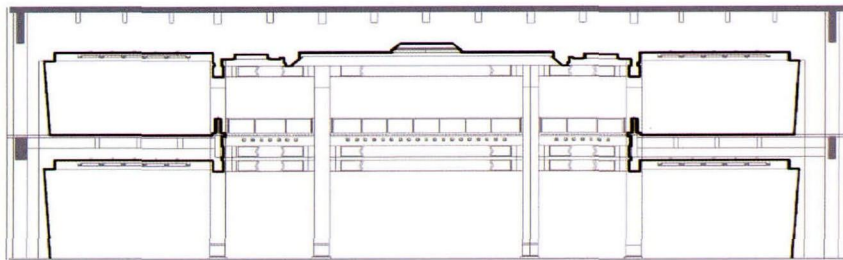
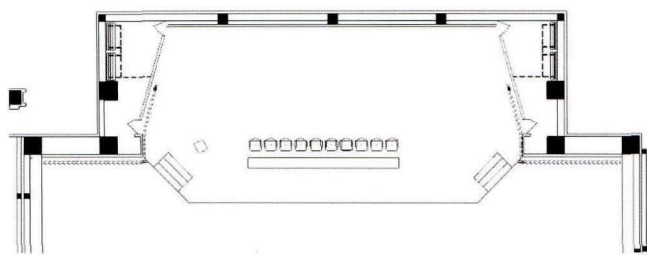
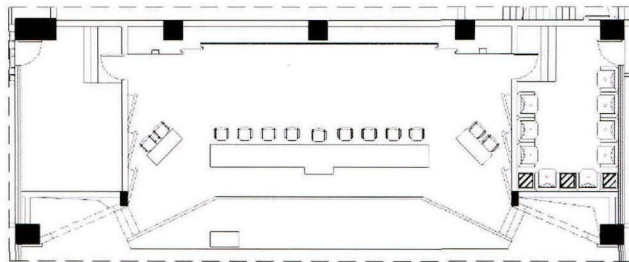


图6 侧墙立面作斜(人民大会堂金色大厅)

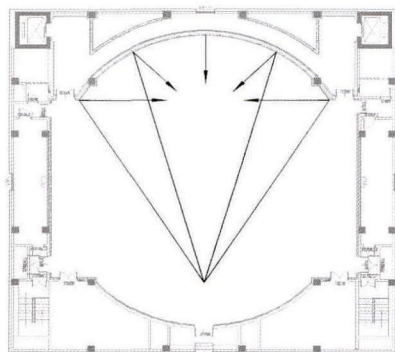


整体倾斜 (清华科技园报告厅)

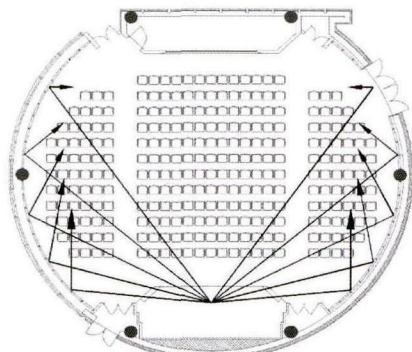


倾斜折板 (长沙老干办)

图7 主席台平行墙面的倾斜



后墙声聚焦 (中科院科管所报告厅)



侧墙声聚焦 (新华社综合楼报告厅)

图8 圆形平面声聚焦案例

$$a \geq \frac{2}{\pi} \cdot \lambda$$

$$b \geq 0.15 \cdot a$$

式中, a——扩散体宽度, m;

b——扩散体突出高度, m;

$\lambda$ ——能有效扩散的最低频率声波波长, m。

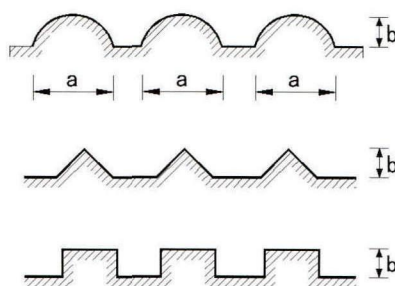


图9 扩散体造型示意

### 2.7 背景噪声

提到建筑声学设计, 建筑师往往只把注意力集中在观众厅体型、混响时间计算及吸声处理的布置等方面而忽视背景噪声控制, 这将造成非常严重和普遍的后果。

空调系统的噪声是会堂室内的主

要噪声之一。除了必要的管道消声隔振措施以外, 控制送、回风风口的风速, 防止在风口处的再生噪声也非常重要。控制每一个风口的风速限值, 才能保证会堂内的安静要求。从噪声来说, 座椅下送风的风速较低, 一般风量控制在 $50 \sim 90 \text{ m}^3/\text{h}$ , 至人脚踝处风速只有不到 $0.2 \text{ m/s}$ , 噪声指标较低。上送风时, 支管风速需控制在 $3.0 \text{ m/s}$ 以下, 噪声才不致超过规范允许的NR35。

靠近会堂的设备机房容易形成噪声和振动干扰, 因此也需要做隔声和隔振处理。中央空调机组在没有特殊处理或无隔声装置的情况下, 风口处 $1 \text{ m}$ 左右的噪声一般会在 $90 \text{ dB (A)}$ 左右, 因此机房与会堂的隔墙的空气

声隔声量不能低于 $55 \text{ dB}$ , 采用双层的混凝土砌块墙、双面抹水泥砂浆可以达到这一指标。机房一般需设置独立的走道, 机房门的隔声量不小于 $40 \text{ dB}$ 。为防止设备的振动沿墙、楼板等建筑结构进行固体传播, 振动设备需设置隔振基座, 重量为设备重量的 $2 \sim 3$ 倍, 同时机房地面也建议做浮筑减振处理 (见图10)。

### 3 会堂建声设计及应用案例

#### 3.1 全国人大常委会会议厅

全国人大常委会会议厅位于人民大会堂西南内院南侧, 是全国人大常委会商讨国家重要事务的会议场所。新的全国人大常委会会议厅改扩建工程从2011年8月25日开工到2012年7月全面竣工, 历时11个月有余。

会议厅平面近似为圆形, 曲率半径为 $21 \text{ m}$ 左右 (见图11)。大厅设池座和楼座。池座建筑面积为 $1256 \text{ m}^2$ , 坐席529人; 楼座建筑面积为 $182 \text{ m}^2$ , 坐席224人。常委会



图10 设备机房浮筑地面做法

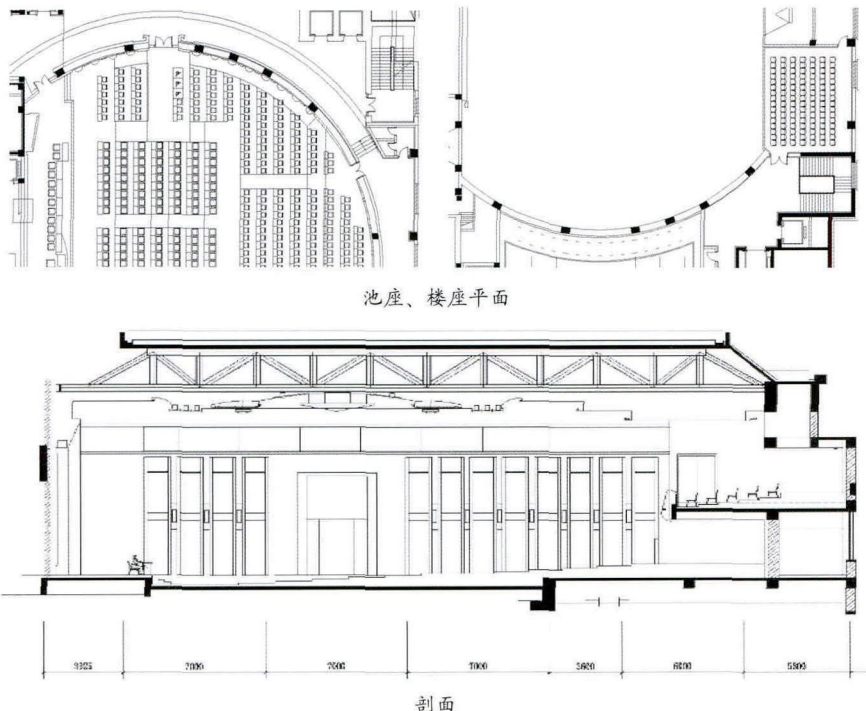


图11 人民大会堂常委厅建筑图

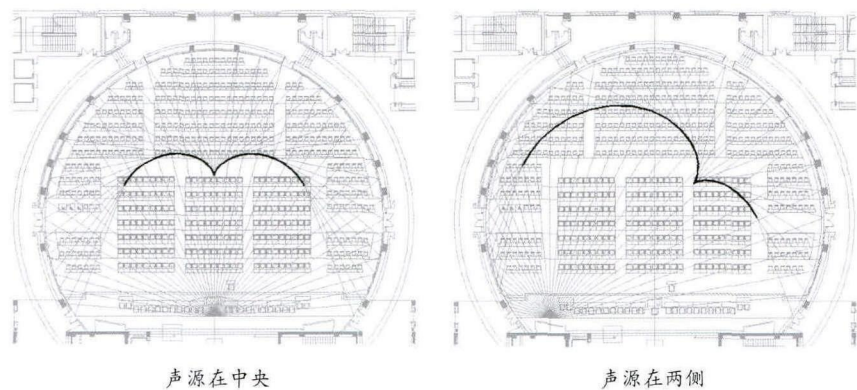


图12 常委厅平面声聚焦分析

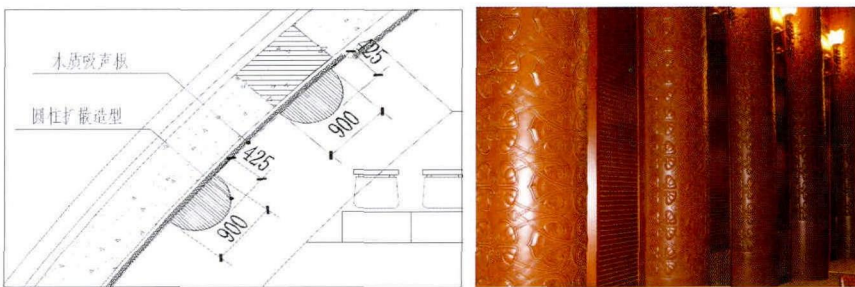


图13 常委厅墙面扩散造型与吸声示意

议厅，大厅建筑面积约为1400m<sup>2</sup>，室内净高在10.5m左右，容积约为13000m<sup>3</sup>，每座容积为17.3m<sup>3</sup>。根据大厅容积和会议使用要求，建声混响

时间设计为中频1.3±0.1s，频率特性要求控制在±20%。室内背景噪声不高于NR30噪声曲线。

常委会议厅为圆形平面，容易形

成声音聚焦和声场分布不均匀的现象（见图12）。在声学处理上，将直径为1m的圆柱连续地布置在弧形墙面上，打破声反射和聚焦的规律性，有效地对250Hz以上的中高频进行扩散（见图13）。另外，在圆柱形扩散构造以外的墙面和观众席的后墙上布置木质吸声板，吸收声场多余的声能，缩短混响时间。

主席台后墙为硬包装饰，硬包背板采用木条缝吸声板加玻璃棉吸声构造，以提高对各个频带的吸声效率，外包织物面料（见图14）。观众厅墙面采用木质条缝吸声构造和扩散造型相间的装饰效果（见图15）。大厅的吊顶采用穿孔铝蜂窝板加吸声毡的吸声构造，局部彩绘（见图16）。为了不影响彩绘效果，同时保证吸声效率，穿孔率控制在16%以下。地面采用防静电地毯（见图17）。

大厅最终的实测空场混响时间为1.52s，满场计算约1.31s左右，与设计对比来看基本一致，低频的频率特性控制在了10%以内。由于会堂使用的是皮座椅，高频混响频率特性基本没有下降。其他一些竣工测试和设计指标见表2、图18。

### 3.2 清华大礼堂

清华大礼堂由美国建筑师亨利·墨菲设计，该建筑于1917年9月开工，1920年3月落成。大礼堂融合希腊式与罗马式建筑风格，平面呈正十字形，南端为门厅，北端为舞台（见图19），建筑面积为1840m<sup>2</sup>，体积为12350m<sup>3</sup>，坐席1400个，是当时中国大学中最大的礼堂兼讲堂，由于没有进行建筑声学设计，演说时听闻不清晰的声学问题从建成伊始就存在了。

2009年，清华大礼堂修缮工程经清华大学批准正式立项，在保留原



图14 主席台硬包装饰墙面



图15 会堂木质吸声板装饰墙面



图16 彩绘穿孔金属吊顶

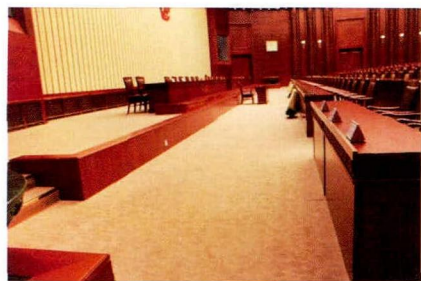


图17 会堂防静电地毯

大礼堂建筑风貌的基础上,大礼堂建筑将进行全面修缮,完善功能、加固结构、改善建筑声学效果。清华大学对修缮后的功能定位为学生活的场所,要求能满足大中型会议,兼顾小型文艺表演和电影播放。在新功能下,同时基于学校要求的“修旧如

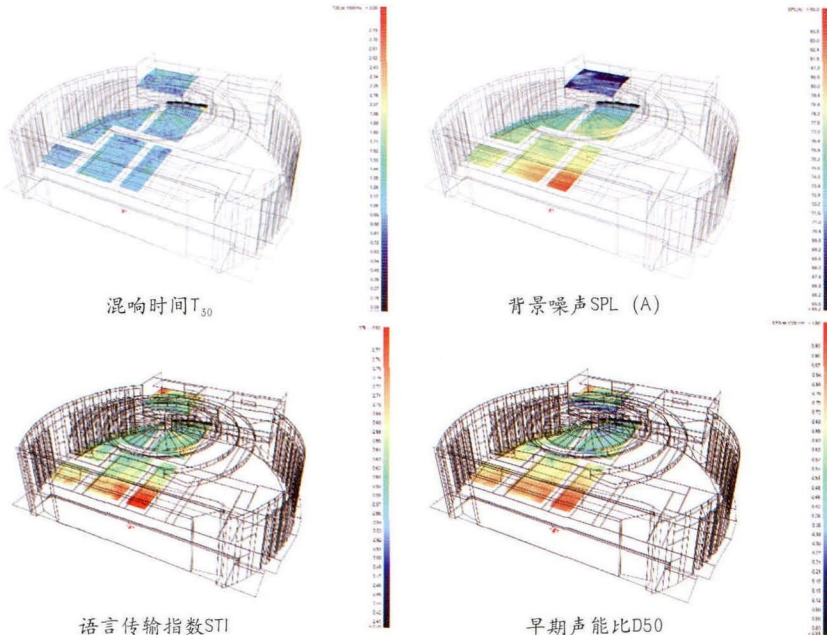


图18 常委厅建筑声学设计模拟图

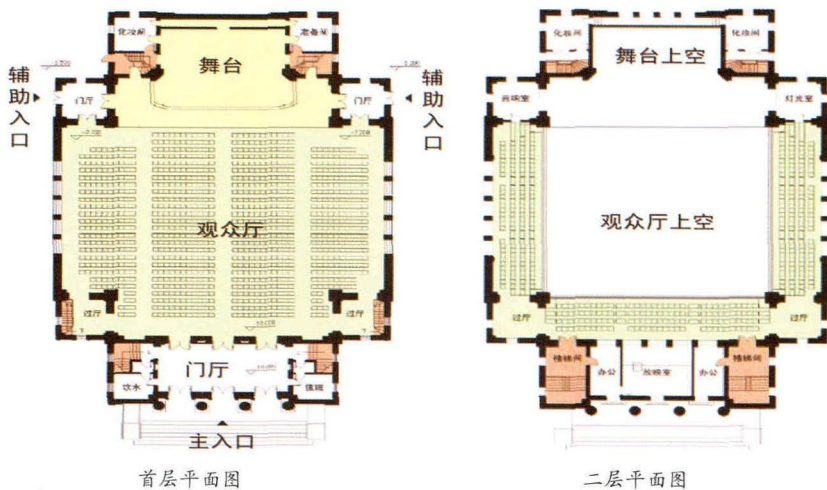


图19 清华大礼堂平面图

旧”的修缮原则,我们提出了大礼堂声学问题的解决方案。

### 3.2.1 克服天花声聚焦问题

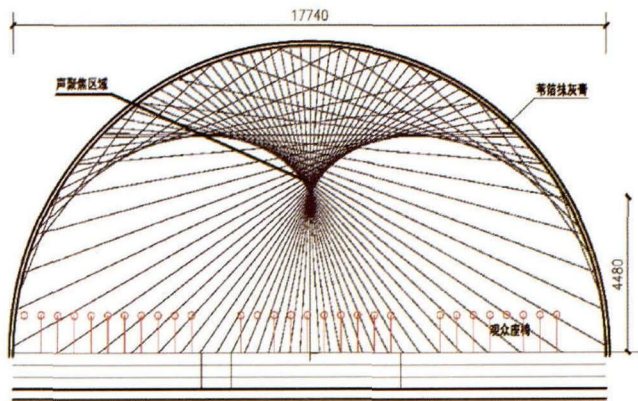
清华大礼堂室内天花由一个直径为23m的大穹顶和四个直径为19m的圆柱弧顶组成,大穹顶居中,四个圆柱弧顶环绕四周。大穹顶和四个圆柱顶的构造为苇箔抹灰膏(灰膏由石灰、

水泥和麻刀组成),厅内存在声聚焦。尤其在圆柱顶下,声聚焦区域与楼座观众席重合,在楼座观众席声聚焦区讲话,能听到圆柱顶形成的聚焦声。

在建筑声学改造中,将四个圆柱弧顶上布置为强吸声材料,为保持原貌要求,采用玻璃纤维吸声装饰板做

表2 竣工建筑声学测试指标

指标(空格)	混响时间(中频, s)	早期声能比D50 (1000Hz)	语言传输指数STI (male)	背景噪声SPL, dB (A)
测量值	1.52	0.26	0.51	34.8



改造前的声聚焦情况

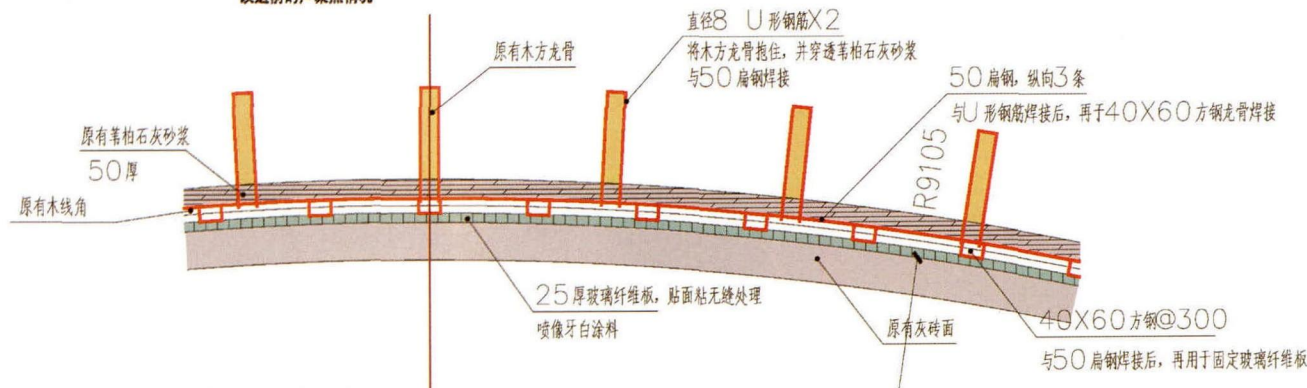


图20 清华大礼堂的声聚焦与吸声材料示意

无缝处理, 并喷象牙白涂料, 玻璃纤维吸声板无缝处理做法(见图20); 中间的大穹顶由于结构强度条件限制, 虽不能进行吸声处理, 但要求扩声系统扬声器直达声尽量避开该区域, 使声聚焦不被激发; 另一方面, 采用软质座椅, 加强地面的吸声量。

### 3.2.2 消除平行侧墙的颤动回声

在东西侧墙面开窗位置, 通过悬挂强吸声中空帘幕, 来消除平行墙面的颤动回声(见图21)。吸声帘幕由

内外两层高面密度织物组成, 两层织物均横向打褶, 形成倒V字形, 并且两层织物每褶均缝合在一起, 吸声帘的最下端与最上端内包木板, 这样内外两层吸声帘就形成菱形空腔。

### 3.2.3 缩短过长的混响时间

在清华大礼堂修缮工程之前, 清华大礼堂的中频混响时间约为3.86s (500Hz)。除了在四个圆柱弧顶上

布置了玻璃纤维吸声装饰板和开窗位置吊挂吸声中空帘幕, 我们还在楼座下天花设置玻璃纤维强吸声装饰材料, 在舞台背墙上设置木质条缝吸声板, 在地面设置1000多个软包座椅, 为礼堂提供了大量的吸声量(见图22)。改造后的混响时间达到了中频1.3s左右(见表3), 作为会议和多

下转第42页

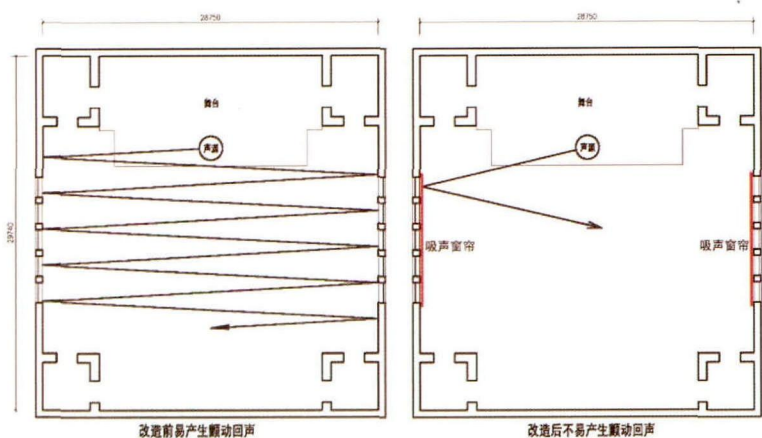
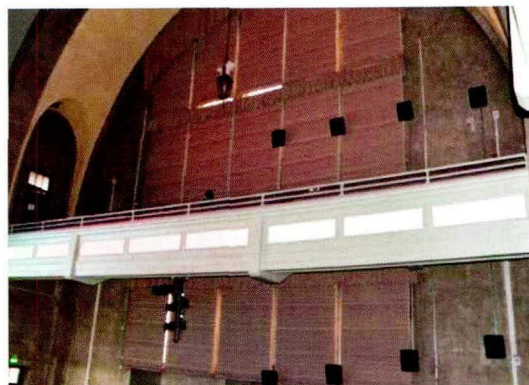


图21 清华大礼堂的颤动回声与中空吸声帘幕



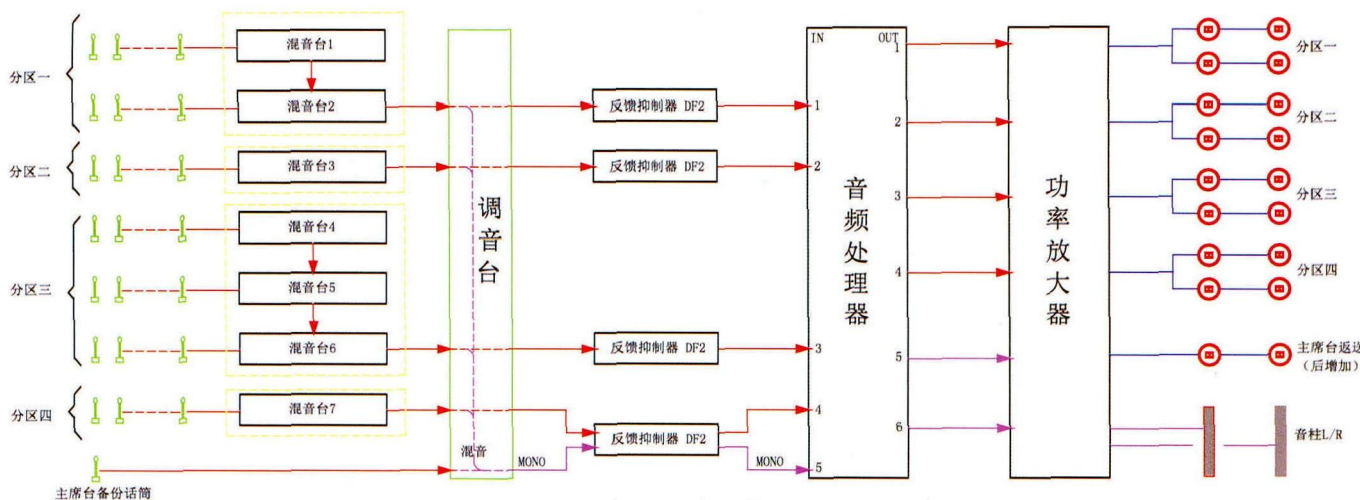


图6 扩声系统工作原理图

成两种处理信号：一是对4组信号进行混音，通过（MONO）输出至数字反馈抑制器，再进入音频处理器，通过功放驱动音柱扩声；二是对4组信号不进行混音处理，单路直接输出至反馈抑制器，再进音频处理器，通过功放驱动吸顶音箱扩声。

3) 为实现“N+1”功能，配置专用会议处理器DCP1808，处理器里核心模块“KMG分量矩阵”能够更加精确地处理每一路输入通道到不同输出通道的参数，灵活控制时间、空间等相关因素，从而实现听讲话时

感觉声音从发言人方位传递过来，增加了声像定位的空间感，使人听起来更加真实、自然。

4) 在调试过程中，还进行了大量现场测量，根据不同分区位置的混响时间曲线分析声场，通过音频处理器对不同组传声器及音箱进行参数的精确调整，实现抑制啸叫，既提高音量，又感觉讲话音量足够而不失真。

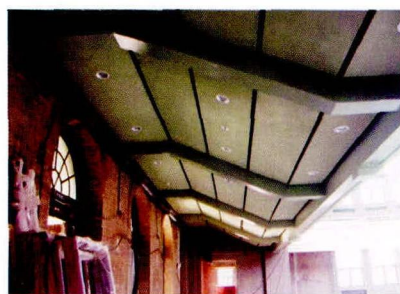
5) 主传声器备份功能：主席位设有2只传声器，1只接入混音台系统正常扩声，另1只直接进调音台，但推子不推，一旦混音器线路信号出现

故障，将调音台的推子推起，即可正常扩声，起到首长位传声器备份的功能，确保会议的顺利进行。

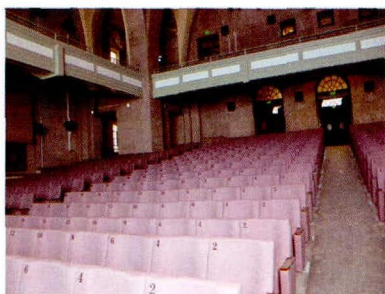
#### 4 工程总结

综上所述，经过对建声及电声方面的调整，并加以精准的调试，系统现已满足56只传声器同时打开拾音的需求，主观评价业主及监理方比较满意，具备良好的会场听音环境；客观上，语言清晰度、传声增益、声压级及声场均匀度均达到国家相关指标，符合设计要求。

上接第39页



玻璃纤维强吸声装饰天花



软包座椅

图22 清华大礼堂吸声装饰面

表3 清华大礼堂修缮前后空场混响时间对比

频率 (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
修缮前混响时间 (s)	3.98	3.82	3.86	3.48	3.11	2.74
修缮后混响时间 (s)	1.60	1.37	1.29	1.26	1.14	0.83

功能使用的清华大礼堂，可以很好地满足其功能要求。

#### 【参考文献】

[1] 吴硕贤. 建筑声学设计原理. 中国建筑工业出版社, 2000年12月  
 [2] 章奎生. 会议厅的声环境设计. 噪声与振动控制, 2007年11月  
 [3] 石慧斌. 文物建筑的声学改造——清华大礼堂声学问题解决方案. 电声技术, 2013年第4期  
 [4] GB/T 50356-2005 《剧场、电影院和多功能厅堂建筑声学设计规范》