

引用格式: 黄志轩, 彭小云, 熊华希. 中、小型厅堂声场均匀度研究[J]. 声学技术, 2022, 41(1): 64-73. [HUANG Zhixuan, PENG Xiaoyun, XIONG Huaxi. Research on sound field uniformity in medium and small Halls[J]. Technical Acoustics, 2022, 41(1): 64-73.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.01.010

# 中、小型厅堂声场均匀度研究

黄志轩, 彭小云, 熊华希

(华东交通大学土木建筑学院, 江西南昌 330013)

**摘要:** 声学参量在声场中的分布情况, 影响厅堂的音质效果。以一个中型会议室为例, 采用 Odeon 软件, 模拟分析了两种声源情况下, 材料的布置与形状对中、小型厅堂声场均匀度的影响。结果表明中、小型厅堂后墙吸声材料的布置对均匀度的影响较小; 材料的布置与形状对早期衰减时间(Early Decay Time, EDT)与混响时间  $T_{30}$  均匀度的影响较大, 而对声压级(Sound Pressure Level, SPL)、明晰度  $C_{80}$ 、清晰度  $D_{50}$  与语言传输指数(Speech Transmission Index, STI)均匀度的影响较小; 声源对 EDT、SPL、 $D_{50}$  与 STI 均匀度的影响较大, 而对  $T_{30}$  与  $C_{80}$  均匀度的影响较小。研究结果可为中小型厅堂的音质设计和研究提供参考。

**关键词:** 声场均匀度; 中小型厅堂; 材料布置; 形状; 声源

中图分类号: TU112

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2022)-01-0064-10

## Research on sound field uniformity in medium and small Halls

HUANG Zhixuan, PENG Xiaoyun, XIONG Huaxi

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

**Abstract:** The distribution of acoustic parameters in sound field affects the sound quality of the hall. By taking a medium sized meeting room as an example and using Odeon software, the effects of material layout and modeling on the sound field uniformity in small and medium-sized halls are simulated and analyzed under two sound sources. The results show that the arrangement of sound-absorbing materials on the back wall of small and medium-sized halls has little effect on the uniformity; the arrangement and shape of materials have a greater effect on the uniformities of early decay time (EDT) and reverberation time ( $T_{30}$ ), while have little effect on the uniformities of sound pressure level (SPL), clarity ( $C_{80}$ ), definition ( $D_{50}$ ) and speech transmission index (STI); the sound source situation has a greater impact on the uniformities of EDT, SPL,  $D_{50}$  and STI, but has a small impact on the uniformities of  $T_{30}$  and  $C_{80}$ . The research results can provide references for the sound quality design and research of small and medium-sized halls.

**Key words:** sound field uniformity; small and medium-sized halls; material layout; shape; sound source

## 0 引言

音质客观评价参量是声学设计的依据, 其中声场不均匀度反映声场中声压级的分布情况, 声扩散度反映声场的声强分布, 而其他客观参量仅反映其位置的音质情况。由于厅堂体型、声源情况、材料的布置与形状等因素的影响, 上述的其他客观参量在不同位置会有差别, 当差别显著时, 会影响到观众的听音感受。为了评价声场中声学参量分布情况, 本文将声场均匀度定义为厅堂中音质客观评价参量最大值、最小值的差值。例如, 进行室内声学参量测量时, 可通过区域的声场均匀度判断混响时

间是否存在显著差异<sup>[1]</sup>。因此在进行声学设计时, 不仅要有合适的声学参量范围, 还要有较好的声场均匀度。本文以一个中型会议室为例, 通过现场测量和 Odeon 软件模拟, 对中、小型厅堂声场均匀度进行研究。

## 1 声场均匀度的影响因素

声场均匀度受房间体型、声源、材料的布置与形状等因素的影响。

### 1.1 房间体型

房间体型影响声场的能量分布, 不合适的体型容易导致回声、声聚焦、声染色现象等声缺陷, 造成声场分布不均匀。通过体型设计, 可以充分利用有效声能, 使反射声在时间和空间上分布合理, 防止出现声缺陷, 提高声场的扩散度, 改善声场均匀度。

收稿日期: 2020-11-05; 修回日期: 2021-01-16

作者简介: 黄志轩(1996—), 男, 江西南昌人, 硕士研究生, 研究方向为建筑声学。

通信作者: 彭小云, E-mail: 383272293@qq.com

### 1.2 声源

声源的位置与指向性不同，会导致整个声场能量分布发生变化，影响到声场均匀度。彭健新<sup>[2]</sup>采用 Odeon 探讨了 5 种不同声源对教室内语言清晰度参量的影响，指出采用不同声源得到的明晰度(Clarity)  $C_{50}$  结果差异较大。饶丹等<sup>[3]</sup>以两个厅堂为对象，通过测量指向性和无指向性声源的双耳房间脉冲响应来研究声源指向性对可听化质量的影响，发现不同指向性声源得到的可听化质量在主观距离感、明晰度、语言清晰度等多方面有明显差异。Wang 等<sup>[4]</sup>用不同指向性声源对一小型厅堂进行模拟，并对声压级(Sound Pressure Level, SPL)、混响时间  $T_{30}$ 、 $C_{80}$  三种音质参量进行分析，结果显示大多数情况下 SPL 的模拟误差可忽略，声源指向性不同时  $T_{30}$  和  $C_{80}$  有所不同。

### 1.3 扩散体、吸声材料的布置与形状

扩散体、吸声材料的布置与形状可以提高房间的扩散度，改善声场均匀度。提高扩散度的方法主要有三种：(1) 不规则的体型；(2) 界面起伏或布置扩散体；(3) 不同吸声材料与扩散体间隔布置。吸声材料间隔布置的方式通常如图 1 所示，其中类型 a、b、d 又分高频或低频材料沿两墙交界处布置的两种情况。已有研究证明圆柱形扩散体效果略优于三角形扩散体，单个扩散体的效果不如连续的<sup>[5]</sup>。为了研究扩散体布置的影响，按照扩散体连续个数、形状、间距将扩散体分为如图 2~4 所示的类型。

研究表明容积小于 300 m<sup>3</sup> 封闭的空间为中、小型厅堂，其平面大多为矩形，而且体型在建设阶段已确定，所以调整代价较高<sup>[1]</sup>。因此本文将以某矩形多功能会议室为例，研究声源、扩散体、吸声材料的布置与形状对声场均匀度的影响。

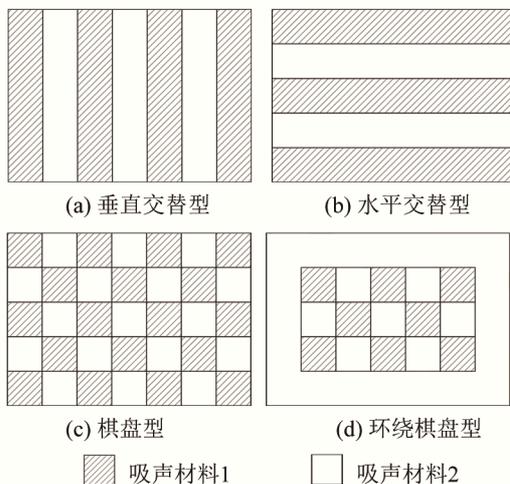


图 1 吸声材料布置类型  
Fig.1 Layout types of sound-absorbing material

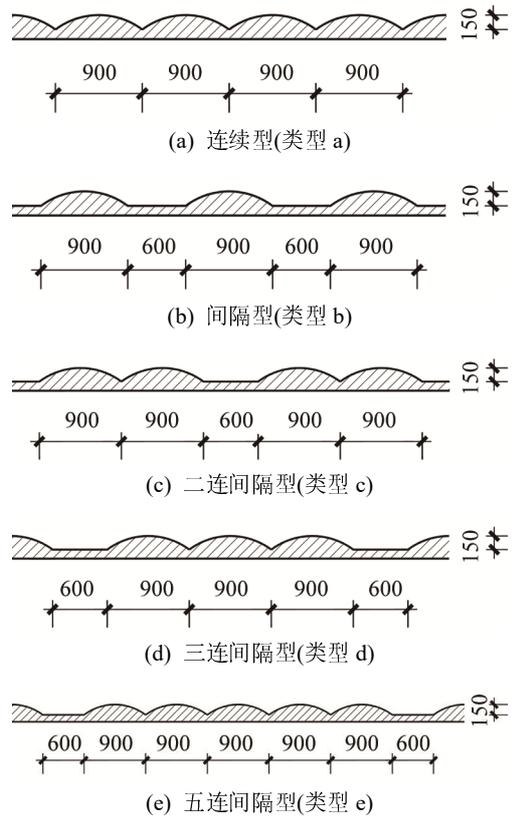


图 2 扩散体布置类型(单位: mm)  
Fig.2 Types of diffuser arrangement (unit: mm)

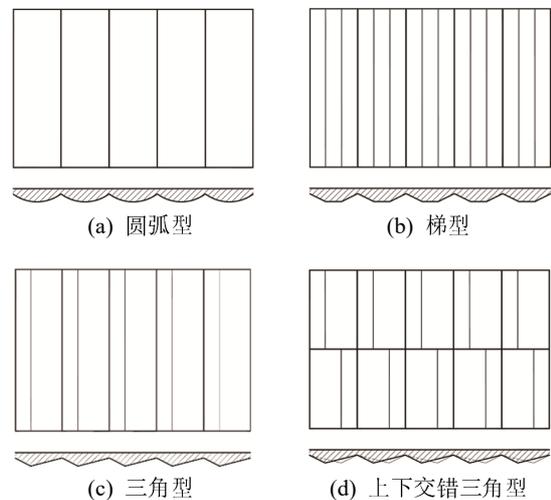


图 3 扩散体形状  
Fig.3 Diffuser shapes

## 2 会议室概况与音质实测

本文研究的会议室(见图 5、图 6)位于某办公楼地下，以会议为主，兼顾 KTV 的功能。会议室平面为矩形，长宽高为 10.2 m×7.2 m×3 m，容积约为 220.3 m<sup>3</sup>。该房间墙面采用聚酯纤维板与木质板，地面实铺木地板，顶棚为纸面石膏板。墙上有 1 扇木门，室内放置了 10 张干软靠背椅，1 张木制办公桌。

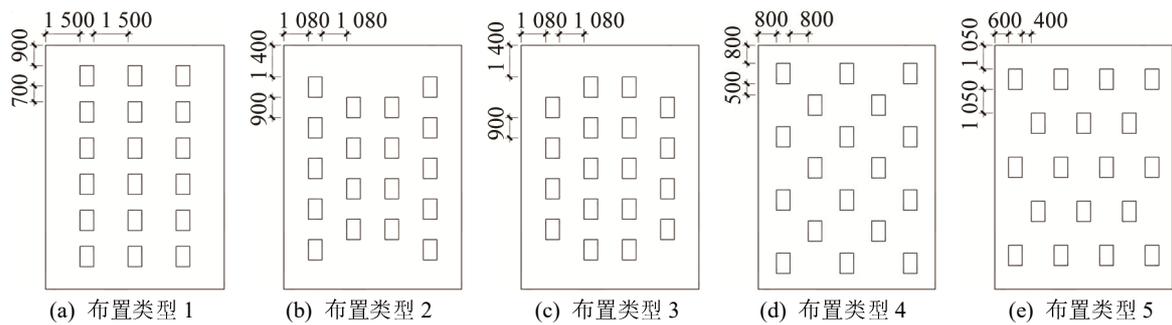


图 4 顶棚扩散体布置类型(单位: mm)  
Fig.4 Layout types of ceiling diffuser (unit: mm)

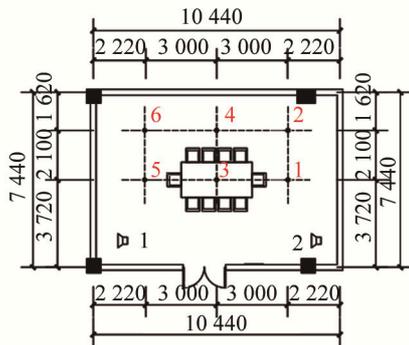


图 5 会议室声源及测点位置图(单位: mm)  
Fig.5 Location map of sound sources and measuring points in meeting room (unit: mm)



(a)



(b)

图 6 会议室照片  
Fig.6 Meeting room photo

依据 ISO 3382-2 的测试方法选取了 2 个声源位置和 6 个测点(如图 5), 对会议室的音质进行了测量。测量在房间空场状况下进行, 房间内有少量设备和测量人员, 测量时门窗密闭, 空调设备处于关闭状态。测量仪器为法国 01dB 公司生产的 Solo, 测量方法为脉冲响应积分法, 测量声源为发令枪。

主要测量内容为: 混响时间  $T_{30}$ 、早期衰减时间 EDT、清晰度  $D_{50}$ 、明晰度  $C_{80}$ 、声压级 SPL、语言可懂度 STI 和背景噪声级(Background Noise Level, BNL)。测量结果如表 1、2 所示。

表 1 会议室不同频率声学参量测量的平均结果  
Table 1 Measurement data of acoustic parameters in the meeting room at different frequencies

频率/Hz	$T_{30}$ /s	EDT/s	$D_{50}$	$C_{80}$ /dB	BNL/dB
125	0.61	0.52	0.82	10.28	39.40
250	0.58	0.54	0.81	10.63	32.10
500	0.56	0.54	0.77	10.58	30.20
1 000	0.58	0.61	0.77	9.78	29.40
2 000	0.58	0.51	0.78	10.58	27.70
4 000	0.57	0.48	0.79	9.78	25.70

表 2 会议室 STI 测量结果  
Table 2 STI measurement data in the meeting room

测点	STI	测点	STI	平均
1	0.69	4	0.70	0.71
2	0.68	5	0.70	
3	0.74	6	0.73	

### 3 会议室音质的模拟与结果分析

#### 3.1 模拟的条件

采用 Odeon 软件对该会议室的音质进行模拟, 模型按照会议室实际尺寸建立。研究表明: 用 Odeon 模拟中、小型空间时, 需忽略微小尺寸的凹槽和凸起, 并对天花和墙面扩散体进行简化<sup>[6]</sup>。因此本模型中仅将圆弧扩散体简化为多段折线扩散体。

选择 Odeon 中无指向性声源(Omni), 普通男声声源(Tlknorm)和 Danley Sound 提供的 Labs-SH-95 扬声器声源作为模拟声源。Omni 无指向性声源不含频谱均衡, 其 125 Hz~4 kHz 各倍频带声压级均为 0 dB, 总声压级为 9 dB。Tlknorm 声源是模拟成年男性正常讲话时的发声情况, 125 Hz~4 kHz 的 6 个倍频带的声压级依次为: 61.9、64.1、67.8、62.0、

54.6 和 49.9 dB，其位置设置在前墙中部前 1 m、高 1.5 m 处，声源朝向正前方。Labs-SH-95 声源是模拟扬声器声源，250 Hz~4 kHz 的 5 个倍频带的声压级依次为：102.1、100.6、96.7、97.0 和 97.7 dB，其位置设置在前墙两端顶部，声源方向与后墙夹角呈 45°，即指向房间中部。两个声源的 1 kHz 指向性如图 7 所示。

为了研究界面吸声材料的最佳布置方式，不改变所选吸声材料的赋值(其他家具等固有吸声条件不变)，仅改变材料的布置方式。进行扩散体选用及布置研究时，扩散体的数量及投影面积保持不变。由于普通男声与扬声器声源在低频指向性弱，综合考虑声源指向性的影响与常用模数，将扩散体设计为宽度 900 mm、凸出高度 150 mm、有效扩散的最低频率定为 250 Hz。因此本文不对 250 Hz 以下低频模拟结果进行对比。

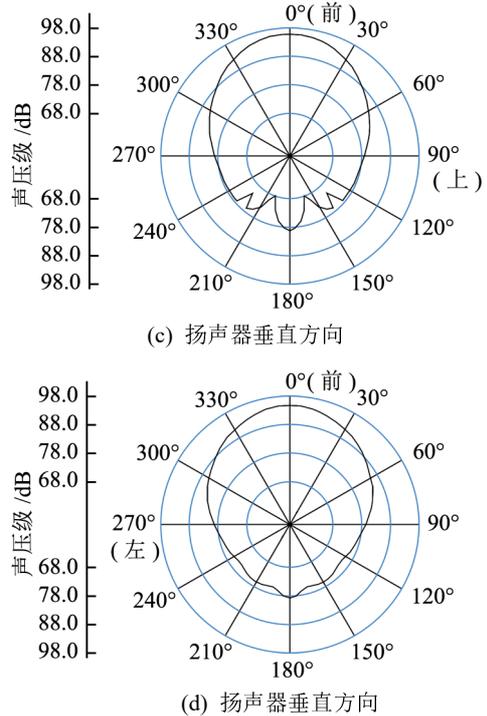
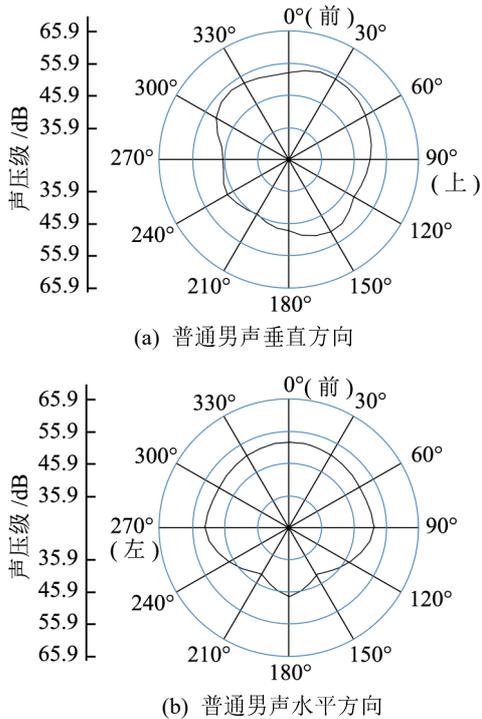


图 7 两种声源在 1 kHz 的指向性图  
Fig.7 Directivity patterns of two sound sources at 1 kHz

由于会议室现有布置的材料吸声系数难以获得准确数据，为便于研究材料的布置与形状对声场均匀度的影响，基于会议室现有声学布置情况，重新选择吸声材料作为模拟数据。重新选择的吸声材料应使厅堂参数模拟结果与实测结果的差值小于 1JND(Just Noticeable Difference)，且不出声缺陷。

模拟时各表面的材料吸声系数按照表 3 进行，将顶棚与扩散体表面设为反射面，其中材料的散射系数按照 Odeon 推荐值进行设置。采用工程计算模式，声线数目按照默认状态设置，TO(Transition Order)值设为 2，IRL(Impulse Response Length)设置为 600 ms，背景噪声与测量值一致。

为验证吸声材料的选择是否合理，选择无指向性声源对房间模型进行多点响应计算模拟，计算

表 3 会议室各表面吸声系数  
Table 3 Sound absorption coefficient of each surface in the meeting room

部位	构造	吸声系数						依据
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	
地面	实铺木地板	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	建筑声学设计原理 <sup>[7]</sup>
顶棚	9 厚纸面石膏板 45 空腔	0.26	0.13	0.08	0.06	0.06	0.06	建筑声学设计原理
	19 厚粗条槽木吸声板 100 空腔	0.16	0.61	0.90	0.78	0.49	0.53	建筑吸声材料与隔声材料 <sup>[8]</sup>
	穿孔五夹板 100 空腔内填玻璃棉	0.33	0.55	0.55	0.42	0.26	0.27	建筑声学设计原理
墙面	七夹板 50 空气层内填玻璃棉	0.48	0.25	0.15	0.07	0.10	0.11	建筑声学设计原理
	25 厚表面喷涂细木丝板	0.08	0.12	0.28	0.44	0.84	0.68	建筑声学材料与结构：设计 and 应用 <sup>[5]</sup>
	九夹板反射板	0.18	0.12	0.10	0.09	0.08	0.07	建筑声学设计原理
桌子	木桌子	0.07	0.03	0.08	0.09	0.08	0.11	实用建筑声学 <sup>[9]</sup>
空椅	人造革面椅(靠背椅)	0.09	0.18	0.22	0.15	0.13	0.17	实用建筑声学

EDT、 $T_{30}$ 、 $C_{80}$ 、 $D_{50}$ 、STI 结果。模拟声源与接收点位置与实测相同，声源与接收点位置见表 4。

表 4 声源与接收点位置坐标  
Table 4 Position coordinates of sound sources and receiving points

声源	位置/m	接收点	位置/m
普通男声声源 1	(1.0, 0, 1.5)	接收点 1	(2.1, -2.1, 1.2)
扬声器声源 1	(0.4, -3.6, 2.6)	接收点 2	(2.1, 0, 1.2)
扬声器声源 2	(0.4, 3.6, 2.6)	接收点 3	(5.1, -2.1, 1.2)
无指向性声源 1	(0.5, 3.5, 1.5)	接收点 4	(5.1, 0, 1.2)
无指向性声源 2	(9.5, 0, 1.5)	接收点 5	(8.1, -2.1, 1.2)
		接收点 6	(8.1, 0, 1.2)

图 8 为接收点 2 处的双耳脉冲响应(Binaural Room Impulse Response, BRIE)分析图，在直达声后 0.05 s 没有明显脉冲声出现。图 9 为 ODEON 软件计算的接收点 2 处的反射声序列图，图中显示直达声后一定时间出现一系列连续反射声，但均在 0.05 s 内。

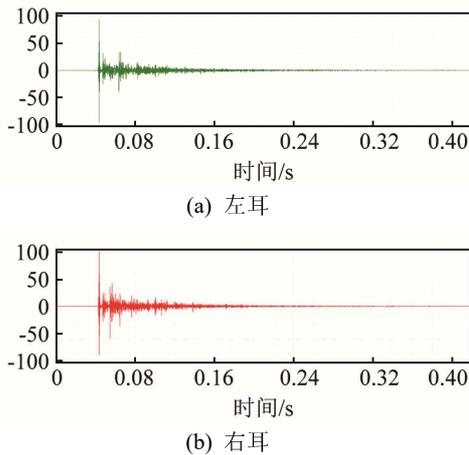


图 8 接收点 2 处双耳脉冲响应曲线  
Fig.8 Binaural impulse response curves at the receiving point 2

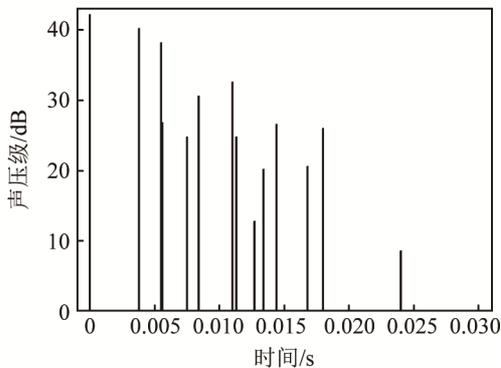


图 9 接收点 2 处反射声序列  
Fig.9 The reflected sound sequence at the receiving point 2

无指向性声源情况下侧墙吸声材料布置模拟多点响应计算结果见表 5、6 所示。模拟结果与实

测结果相差小于 1JND，材料选择合理。

表 5 会议室侧墙吸声材料布置模拟的声学参量各频率平均值  
Table 5 The average value of acoustic parameters in the meeting room with sidewall diffuser arrangement at different frequencies

频率/Hz	$T_{30}$ /s	EDT/s	$D_{50}$	$C_{80}$ /dB
125	0.60	0.48	0.78	10.63
250	0.59	0.53	0.79	10.57
500	0.61	0.55	0.79	10.35
1 000	0.60	0.58	0.80	9.47
2 000	0.59	0.53	0.81	10.19
4 000	0.58	0.51	0.83	10.73

表 6 该会议室不同测点的 STI 模拟结果  
Table 6 STI simulation results at different measuring points in the above meeting room

测点	STI	测点	STI	平均
1	0.69	4	0.68	0.70
2	0.72	5	0.71	
3	0.69	6	0.71	

分别选择普通男声声源与扬声器声源按照模拟步骤进行网格响应计算模拟，网格距离地面 1.2 m，尺寸为 0.6 m×0.6 m，计算参数设置同上，计算 EDT、 $T_{30}$ 、SPL、 $C_{80}$ 、 $D_{50}$ 、STI 结果。

### 3.2 模拟的步骤

在中、小型房间的声学设计中，吸声材料的布置对每个界面的影响不同。侧墙上吸声材料的布置情况对早期侧向反射声的影响较大，吸声量太大或扩散度不足，会导致某些位置没有良好的早期侧向反射声，缺少空间感；后墙布置强吸声材料，其主要作用是避免出现回声、声聚焦等声缺陷，对提高房间声场均匀度作用较小。因此本文在进行吸声材料布置研究时，优先进行侧墙的吸声材料布置模拟，在其基础上再进行后墙的吸声材料布置模拟。由于顶棚上材料的布置一般较为单一，不进行顶棚吸声材料的布置模拟。

在侧墙与顶棚上布置扩散体能使房间中部获得丰富的早期反射声，对增加声音强度与提高清晰度有益。早期侧向反射声能起到加强空间感的作用，来自顶部的早期反射声对空间感作用较小，而来自后方的反射声则会影响清晰度与空间感。因此本文在进行扩散体的布置与形状研究时，先进行侧墙扩散体的布置模拟，在其基础上进行顶棚扩散体的布置模拟。由于后墙反射声已使用强吸声材料处理，因此不进行后墙扩散体的布置模拟。

模拟分为 4 个步骤进行，除步骤(1)外，每个步骤均以此前步骤中声场均匀度模拟结果最佳的模

型为基础，进行吸声材料布置或扩散体形状及布置的模拟。步骤(1)模拟侧墙布置吸声材料对声场均匀度的影响；步骤(2)模拟后墙布置吸声材料对声场均匀度的影响；步骤(3)模拟侧墙布置扩散体对声场均匀度的影响；步骤(4)模拟顶棚布置扩散体对声场均匀度的影响。每个步骤的材料布置情况如表 7~9 所示。在各步骤模拟中，分别选择普通男声与扬声器声源，对每种材料布置的组合方式，进行网格响应模拟。将两种声源模拟结果进行对比，研究声源对声场均匀度的影响。

吸声材料布置方式见图 2，扩散体形状见图 3，布置类型见图 4。

表 7 步骤 1(侧墙)和 2(后墙)模拟吸声材料布置情况  
Table 7 Steps 1 (sidewall) and 2 (back wall) for the simulation of sound-absorbing materials arrangement

组合方式	吸声材料布置类型	两墙交接处吸声材料频率	组合方式	吸声材料布置类型	两墙交接处吸声材料频率
1	a	低频	5	c	—
2	a	高频	6	d	低频
3	b	低频	7	d	高频
4	b	高频			

表 8 步骤 3 模拟侧墙扩散体布置情况  
Table 8 Step 3 for the simulation of the layout of sidewall diffuser

组合方式	扩散体形状	连续数量	组合方式	扩散体形状	连续数量
1	a	1	9	a	3
2	c	1	10	c	3
3	d	1	11	d	3
4	b	1	12	b	3
5	a	2	13	a	5
6	c	2	14	c	5
7	d	2	15	d	5
8	b	2	16	b	5

表 9 步骤 4 模拟顶棚扩散体布置情况  
Table 9 Step 4 for the simulation of the layout of ceiling diffuser

组合方式	扩散体形状	连续数量	组合方式	扩散体形状	连续数量
1	c	1	11	b	3
2	d	1	12	a	3
3	b	1	13	c	4
4	a	1	14	d	4
5	c	2	15	b	4
6	d	2	16	a	4
7	b	2	17	c	5
8	a	2	18	d	5
9	c	3	19	b	5
10	d	3	20	a	5

### 3.3 模拟结果

#### 3.3.1 模拟结果的处理

通过网格响应计算得出整个厅堂声学参量的累积分布结果，由于会议室存在交通等辅助面积，同时为避免离散程度大的结果影响声场均匀度，分别选取结果中第 10 与第 90 百分位数为声学参量的最小值与最大值，进行声场均匀度计算。为评价声场均匀度的优劣，将声场均匀度与最小差别阈限 1JND 进行差值计算，差值越小(甚至小于 0)，表明声场均匀度越好，其中各客观参量的 1JND 的数值是采用 Odeon 软件给出的建议值<sup>[10]</sup>(如表 10 所示)。为了更直观地描述不同因素对声场均匀度的影响，引入参量  $\Delta L_p$  (见式(1))。然后对两种声源情况下不同客观参量的  $\Delta L_p$  大小排序并评分，并将各参量的得分相加，总得分最高的模型为声场均匀度最优的模型。

$$\Delta L_p = \frac{L_p - T_{1JND}}{T_{1JND}} \quad (1)$$

式中： $\Delta L_p$  为声场均匀度受影响的程度； $L_p$  为 250~4 000 Hz 5 个频率声场均匀度的平均值； $T_{1JND}$  为最小差别阈限。

表 10 Odeon 中 1JND 建议值  
Table 10 1JND recommended value in Odeon

参量	1JND	参量	1JND	参量	1JND
EDT	5%	SPL	1 dB	$D_{50}$	5%
$T_{30}$	5%	$C_{80}$	1 dB	STI	0.03

#### 3.3.2 模拟结果分析

步骤(1)模拟中各参量的影响度结果如图 10、11 所示，评分结果如图 12、13 所示；步骤(2)模拟中

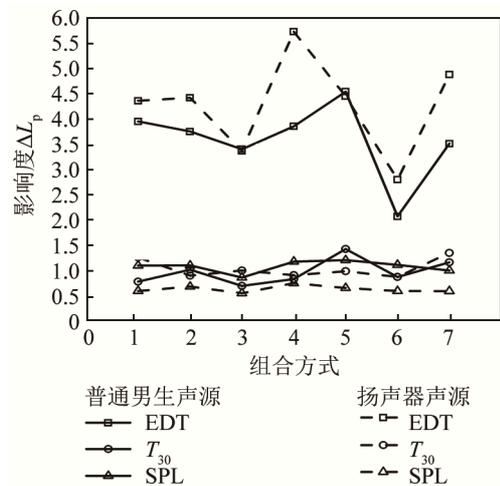


图 10 步骤(1) EDT、 $T_{30}$ 、SPL 影响度  
Fig.10 Effect of step (1) combination on EDT,  $T_{30}$ , SPL

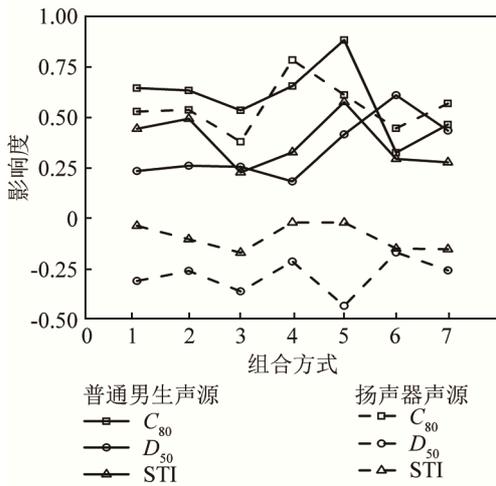


图 11 步骤(1)  $C_{80}$ 、 $D_{50}$ 、STI 影响度  
 Fig.11 Effect of step (1) combination on  $C_{80}$ ,  $D_{50}$ , STI

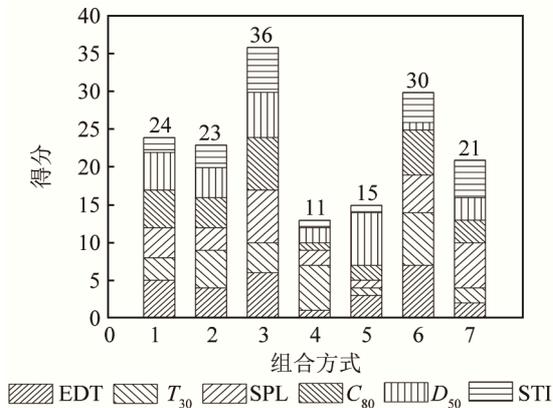


图 12 步骤(1) 普通男声声源总得分  
 Fig.12 The total score of common male sound sources under different step (1) combinations

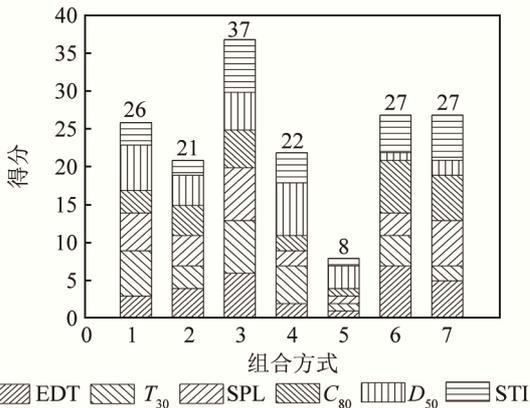


图 13 步骤(1) 扬声器声源总得分  
 Fig.13 The total score of speaker sound source under different step (1) combinations

各参量的影响度结果如图 14、15 所示，评分结果如图 16、17 所示；步骤(3)模拟中各参量影响度结果如图 18、19 所示，评分结果如图 20、21 所示；步骤(4)模拟中各参量的影响度结果如图 22、23 所示，评分结果如图 24、25 所示。

(1) 吸声材料

图 10、11 表明，在侧墙上以相同方式布置相同吸声材料时，声源为扬声器的 SPL、 $D_{50}$ 、STI 均匀度较好，声源为普通男声的 EDT 均匀度较好。侧墙吸声材料的布置情况对 EDT 与  $T_{30}$  均匀度的影响较大，而对 SPL、 $C_{80}$ 、 $D_{50}$  与 STI 均匀度的影响较小；声源对 EDT、SPL、 $D_{50}$  与 STI 均匀度的影响较大，而对  $T_{30}$  与  $C_{80}$  均匀度的影响较小。图 12、13 显示，相同吸声材料布置方式与声源的情况下，沿两墙交接处布置低频吸声材料时，声场均匀度好。无论是扬声器还是普通男声声源，侧墙上水平交替布置吸声材料时，沿两墙交接处布置低频吸声材料的总得分最高。

图 14、15 表明，在后墙上以相同方式布置相同吸声材料时，声源为扬声器的 SPL、 $D_{50}$ 、STI 均匀度较好，声源为普通男声的 EDT 均匀度较好。

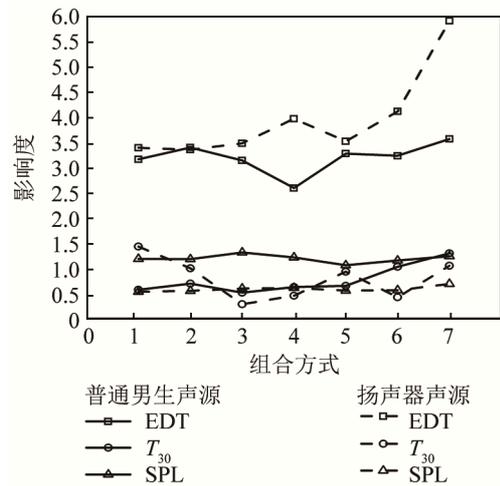


图 14 步骤(2) EDT、 $T_{30}$ 、SPL 影响度  
 Fig.14 Effect of step (2) combination on EDT,  $T_{30}$ , SPL

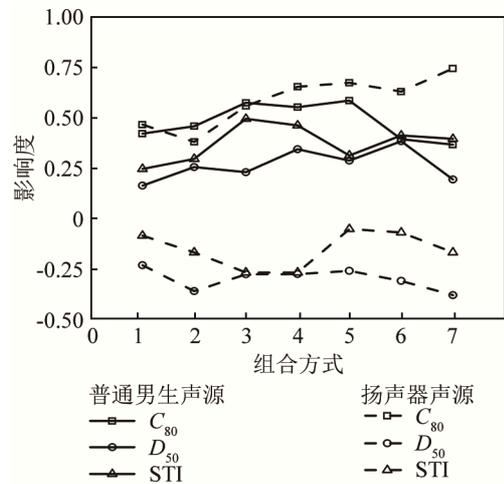


图 15 步骤(2)  $C_{80}$ 、 $D_{50}$ 、STI 影响度  
 Fig.15 Effect of step (2) combination on  $C_{80}$ ,  $D_{50}$ , STI

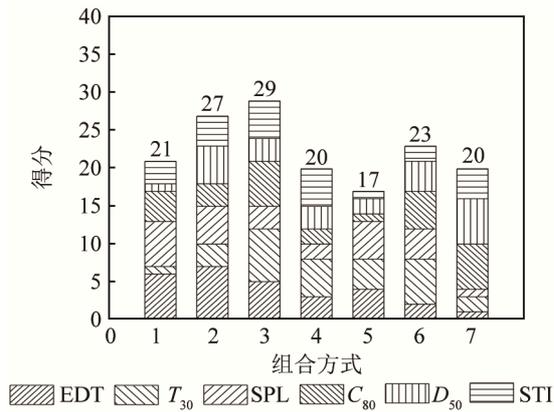


图 16 步骤 2 普通男声声源总得分  
Fig.16 The total score of common male sound sources under different step (2) combinations

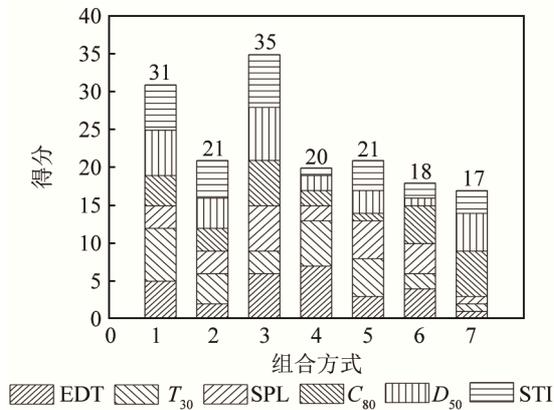


图 17 步骤 2 扬声器声源总得分  
Fig.17 The total score of speaker sound source under different step (2) combinations

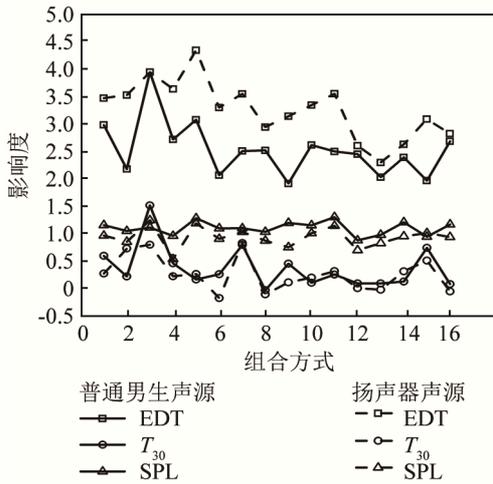


图 18 步骤(3) EDT、 $T_{30}$ 、SPL 影响度  
Fig.18 Effect of step (3) combination on EDT,  $T_{30}$ , SPL

后墙吸声材料的布置情况对 EDT 与  $T_{30}$  均匀度的影响较大，而对 SPL、 $C_{80}$ 、 $D_{50}$  与 STI 均匀度的影响较小；声源对 EDT、SPL、 $D_{50}$  与 STI 均匀度的影响较大，而对  $T_{30}$  与  $C_{80}$  均匀度的影响较小。后墙吸声材料的布置情况对声场均匀度影响较小，而声源对声

场均匀度的影响较大。图 16、17 显示，声源为普通男声，后墙上垂直交替布置吸声材料时，沿两墙交接处布置低频吸声材料的总得分最高；声源为扬声器，后墙上垂直交替布置吸声材料时，沿两墙交接处布置高频吸声材料总得分最高。

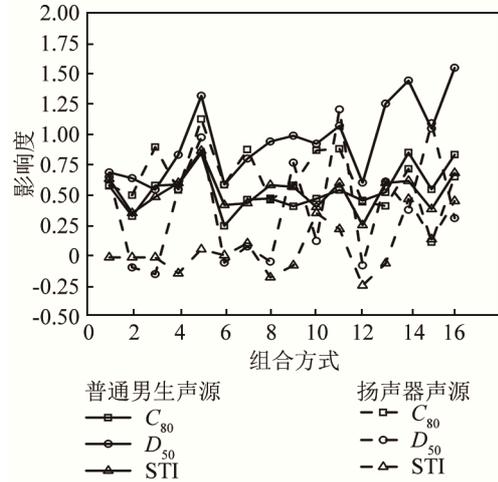


图 19 步骤(3)  $C_{80}$ 、 $D_{50}$ 、STI 影响度  
Fig.19 Effect of step (3) combination on  $C_{80}$ ,  $D_{50}$ , STI

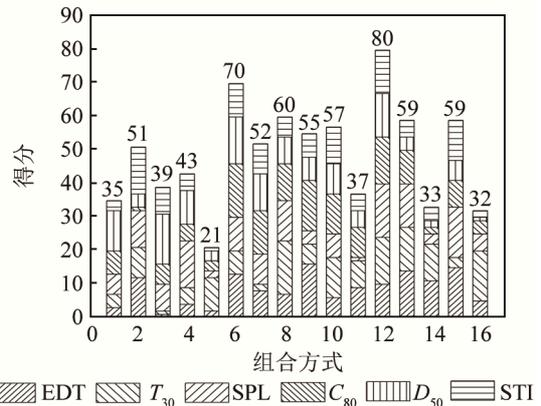


图 20 步骤(3) 普通男声声源总得分  
Fig.20 The total score of common male sound sources under different step (3) combinations

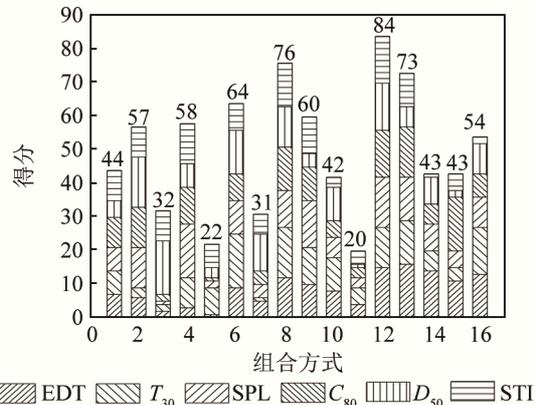


图 21 步骤(3) 扬声器声源总得分  
Fig.21 The total score of speaker sound source under different step (3) combinations

(2) 扩散体

图 18、19 表明, 无论扬声器声源还是普通男声源, 在侧墙上布置扩散体, 扩散体连续数量较少时, 布置三角形扩散体的房间声场均匀度较好。

随着连续数量的增加, 梯形扩散体效果更好, 当连续数量较多时, 布置弧形扩散体的房间声场均匀度最好。侧墙布置相同扩散体时, 声源为扬声器的 SPL、 $D_{50}$ 、STI 均匀度较好, 声源为普通男声的 EDT 均匀度较好。侧墙上布置扩散体对 EDT 与  $T_{30}$  均匀度的影响较大, 而对 SPL、 $C_{80}$ 、 $D_{50}$ 、STI 均匀度的影响较小; 声源对 EDT、SPL、 $D_{50}$  与 STI 均匀度的影响较大, 而对  $T_{30}$  与  $C_{80}$  均匀度的影响较小。图 20、21 显示, 无论扬声器还是普通男声源, 当侧墙上吸声材料与扩散体间隔布置时, 连续布置 3 个梯形扩散体的总得分最高。

图 22、23 表明, 在顶棚上以相同方式布置相同扩散体时, 声源为扬声器的 SPL、 $D_{50}$ 、STI 均匀

度较好, 声源为普通男声的 EDT 均匀度较好。顶棚上布置扩散体对 EDT 与  $T_{30}$  均匀度的影响较大, 而对 SPL、 $C_{80}$ 、 $D_{50}$  与 STI 均匀度的影响较小; 声源对 EDT、SPL、 $D_{50}$  与 STI 均匀度的影响较大, 而对  $T_{30}$  与  $C_{80}$  均匀度的影响较小。图 24、25 显示, 声源为普通男声时, 顶棚按类型 3 布置三角形扩散体总得分最高; 声源为扬声器时, 顶棚按类型 4 布置等腰三角形扩散体总得分最高。最佳声场均匀度模型如图 26 所示。

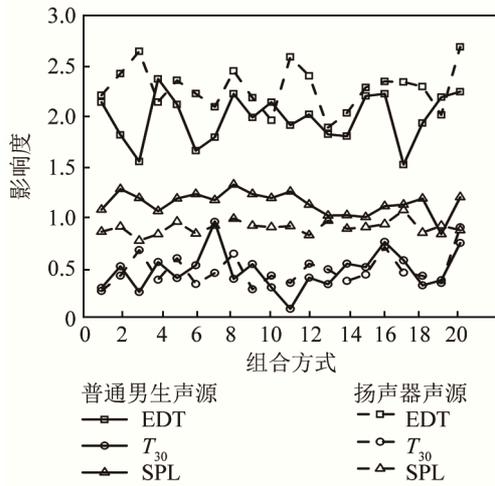


图 22 步骤(4) EDT、 $T_{30}$ 、SPL 影响度  
Fig.22 Effect of step (4) combination on EDT,  $T_{30}$ , SPL

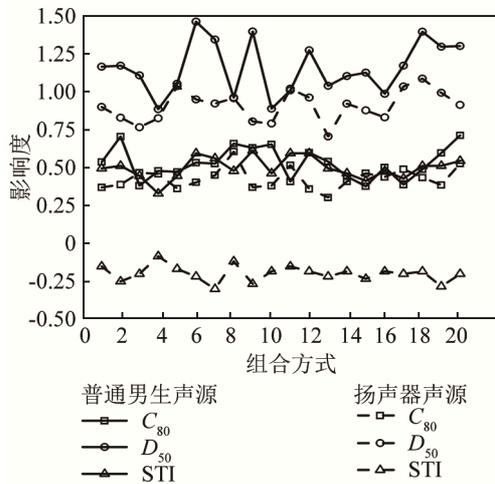


图 23 步骤(4)  $C_{80}$ 、 $D_{50}$ 、STI 影响度  
Fig.23 Effect of step (4) combination on  $C_{80}$ ,  $D_{50}$ , STI

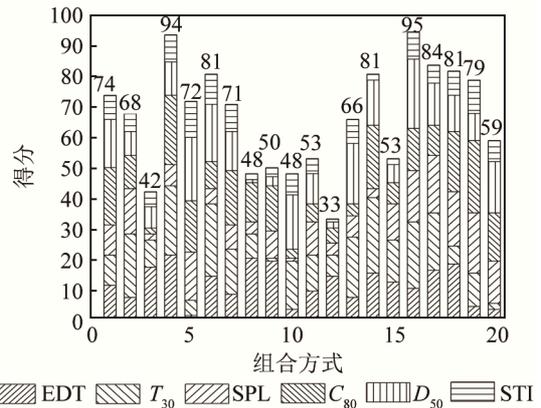


图 24 步骤(4) 普通男声声源总得分  
Fig.24 The total score of common male sound sources under different step (4) combinations

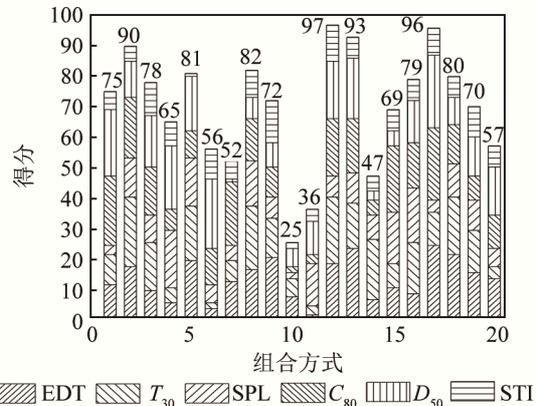
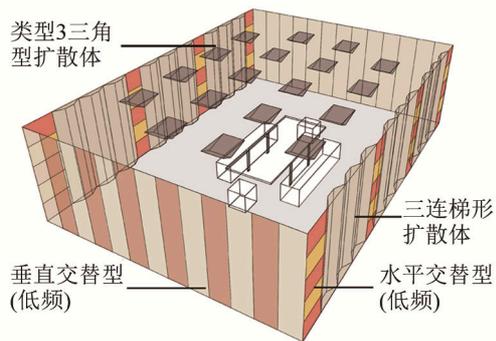
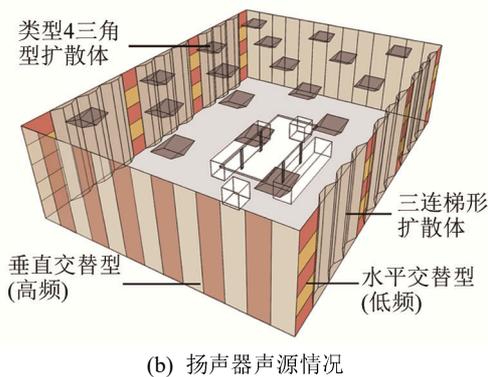


图 25 步骤(4) 扬声器声源总得分  
Fig.25 The total score of speaker sound source under different step (4) combinations



(a) 普通男声声源情况



(b) 扬声器声源情况

图 26 两种声源情况下最佳声场均匀度扩散体布置模型  
Fig.26 Diffuser layout models for optimal sound field uniformity of two sound sources

## 4 结论

材料的布置与形状对声场均匀度的影响与声源指向性及位置有关。通过对两种声源情况下的会议室进行材料的布置与形状的优化模拟，可以得到以下结论：

(1) 侧墙与顶棚材料的布置与形状对 EDT 与  $T_{30}$  均匀度的影响较大，而对 SPL、 $C_{80}$ 、 $D_{50}$  与 STI 均匀度的影响较小。后墙吸声材料的布置情况对声场均匀度的影响较小。声源对 EDT、SPL、 $D_{50}$  与 STI 均匀度的影响较大，而对  $T_{30}$  与  $C_{80}$  均匀度受影响较小；

(2) 相同的吸声材料布置方式与声源的情况下，沿两墙交接处布置的吸声材料为低频时，声场均匀度较好；

(3) 墙面与顶棚材料的布置与形状相同的情况下，声源为扬声器时 SPL、 $D_{50}$ 、STI 均匀度较好，声源为普通男声时 EDT 均匀度较好；

(4) 无论是扬声器还是普通男声声源，在侧墙上布置扩散体，扩散体连续数量较少时，布置三角形扩散体的房间声场均匀度较好。随着连续数量的增加，梯形扩散体效果更好，当连续数量较多时，布置弧形扩散体时房间的声场均匀度最好；

(5) 当房间布置吸声材料与扩散体时，相对于仅布置吸声材料，EDT、 $T_{30}$  均匀度有所提高，而  $D_{50}$  均匀度有所降低。

## 参 考 文 献

- [1] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 声学室内声学参量测量 第2部分: 普通房间混响时间: GB/T 36075.2—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [2] 彭健新. 声源指向性对教室语言清晰度的影响[C]//2008 年全国声学学术会议论文集. 上海, 2008: 342-343.
- [3] 饶丹, 谢菠菘. 声源指向性对双耳可听化质量的影响[J]. 声学技术, 2007, 26(5): 899-903.  
RAO Dan, XIE Bosun. Influence of sound source directivity on binaural auralization quality[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(5): 899-903.
- [4] WANG L M, VIGEANT M C. Evaluations of output from room acoustic computer modeling and auralization due to different sound source directionalities[J]. Applied Acoustics, 2008, 69(12): 1281-1293.
- [5] 王峥, 项端祈, 陈金京. 建筑声学材料与结构: 设计和应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 103-105, 326.
- [6] 陈剑军. 建筑声学软件 ODEON 应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [7] 吴硕贤. 建筑声学设计原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 99-108, 217-219.
- [8] 钟祥瑞. 建筑吸声材料与隔声材料[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2012: 262-264.
- [9] 项端祈. 实用建筑声学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.
- [10] CHRISTENSEN C L. Odeon room acoustics program, Version 10.0, Industrial Auditorium and Combined Editions User Manual[M]. Denmark: Odeon A/S, 2009.