

单座容积超大型厅堂顶部材料吸声效率的研究

宋拥民, 章奎生

(上海现代建筑设计(集团)有限公司章奎生声学设计研究所, 上海 200041)

摘要: 单座容积超过国家标准推荐上限值两倍及以上的厅堂定义为超大型厅堂, 这类厅堂在观演建筑中越来越多。在超大型厅堂的音质设计中, 为了控制厅堂内的混响时间, 顶部往往需要布置吸声材料。借助厅堂音质计算机模拟分析软件, 以三个超大型厅堂模型的混响时间为例, 探讨了吸声材料布置在顶部时的吸声效率。研究表明, 顶部材料的吸声效率与声源到顶面的距离和声源的频率均呈负相关, 而材料自身的吸声系数对顶部吸声效率的影响较小。

关键词: 单座容积; 吸声效率; 混响时间; 吸声材料; 计算机模拟

中图分类号: TU112

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2010)-04-0406-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2010.04.012

Research on absorbing efficiency of ceiling material in hall with huge value of volume per seat

SONG Yong-min, ZHANG Kui-sheng

(Zhang kui-sheng Acoustical Design and Research Studio, Shanghai Xian Dai Architectural Design (Group) Co. Ltd., Shanghai 200041, China)

Abstract: More and more art performing buildings with huge value of volume per seat which values of volume per seat are at less twice higher than standard value are building. During the process of acoustics design of hall with huge value of volume per seat, absorbing materials are always installed on ceiling for the purpose of reverberation time control. In this paper, absorbing efficiency of ceiling material is studied based on computer simulation results of reverberation time in three models of halls with huge value of volume per seat. It shows that the absorbing efficiency of ceiling material is negative correlation both with the distance from sound source to the ceiling and the frequency. But it is little affected by sound absorption coefficient of ceiling material.

Key words: value of volume per seat; absorbing efficiency; reverberation time; absorbent; computer simulation

1 引言

随着国家对文化演艺建筑和体育建筑建设的高度重视, 提出了提高国家文化软实力, 丰富全民素质和精神文化建设的号召, 全国各地正兴起观演及体育建筑的建设高潮。而新建的观演或体育建筑正体现出大体量高净空的特征, 会议厅堂及体育场馆尤为明显。广州白云国际会议中心世纪大会堂和博鳌亚洲论坛大会议厅的单座容积分别达到 $10.9\text{m}^3/\text{座}$ 和 $13.4\text{m}^3/\text{座}$ ^[1], 2008 年底竣工的无锡灵山梵宫 1200 座圣坛^[2], 厅内空间高达 37.5m, 单座容积高达 $39\text{m}^3/\text{座}$ 。新落成的上海世博中心 2600 座大会堂单座容积高达 $21.9\text{m}^3/\text{座}$, 而世博中心内 600 座的政务厅单座容积更是达到 $57.5\text{m}^3/\text{座}$, 约为国家标准^[3]推荐上限值的 10 倍。而综合体育场馆的单座容积

往往更高, 像世博文化中心 18000 座主场馆单座容积约 $15.1\text{m}^3/\text{座}$ 。这些单座容积超过国家标准推荐上限值两倍及以上的厅堂在本文中定义为超大型厅堂。

在超大型厅堂的音质设计中, 为确保室内具有合适的混响时间和较高的语言清晰度, 往往需要在顶部配置吸声材料。在工程建声设计中, 墙面材料的吸声系数可以依据混响室测试结果结合工程经验确定。而当材料布置在顶面时, 由于材料所处声场位置不同, 且离声源距离相对较远, 其吸声效率究竟如何难以判断。本文利用室内音质计算机模拟软件对顶部材料的吸声效率进行了模拟分析, 并对影响材料吸声效率的主要因素进行了初步探讨和分析, 得到的研究结果可用于超大型厅堂混响控制的工程设计实践。

2 厅堂模型简介

室内音质计算机模拟技术主要包括两类: 基于波动方程的数字计算方法和基于几何声学的数字模拟方法。基于波动方程的数字计算方法受限于房

收稿日期: 2010-01-10; 修回日期: 2010-04-30

作者简介: 宋拥民(1976-), 男, 湖北蕲春人, 博士, 研究方向为厅堂音质、噪声与振动控制的工程设计及研究。

通讯作者: 宋拥民, E-mail: asong1102@163.com

间边界条件简化的精度和计算机运算的速度，因此直接利用波动方程求解室内声场的特性在实践中并未得到广泛应用。而基于几何声学的数字模拟方法主要包括声线追踪法和虚声源法(也称声像法)这两类模拟方法。声线追踪法是将室内声源发出的球面波假想为由许多条声线组成，每一条声线携带一定的能量，以直线形式遵循几何声学规律传播，遇到界面时反射，同时也损耗部分能量。计算机在对所有声线传播追踪的基础上合成接收点处的声场。虚声源法则用声源对该界面所形成的虚声源(声像)等效声波在界面处的反射效应，室内所有的反射声都假定由相应的虚声源发出。声源与所有虚声源发出的声波在接收点合成总的声场。声线追踪法和虚声源法都是基于几何声学中声波以直线形式传播这一基本假设。

本文采用 Odeon9.0 室内声学模拟软件对三个不同类型的超大型虚拟厅堂进行混响时间模拟，Odeon9.0 兼有声像法和声线法的功能，也是目前得到公认的模拟软件之一。所模拟的三个厅堂体形参数如表 1 所示，其中厅堂 1 类似条形布置的不超过 32 人的超高会议厅，厅堂 2 用以模拟环幕影院类 500 人的圆形厅堂，厅堂 3 类似条形布置的不超过 60 人的扁平会议室。三个厅堂的单座容积分别不低于 13.5m³/座，43m³/座和 12.5m³/座。

表 1 三个厅堂的体形参数
Table 1 Basic parameters of three halls

厅堂编号	尺寸/m	与顶面等面积的墙面净高/m
厅堂 1	9*6*8(长*宽*高)	1.8
厅堂 2	Φ38*19(直径*高)	9.5
厅堂 3	10*10*7.5(长*宽*高)	2.5

在三个超大型厅堂中，为研究顶部材料的吸声效率，在室内墙面或顶面布置与顶面面积相等的吸声材料，同时，为避免厅堂内混响时间过长导致的模拟精度降低，在地面模拟厅堂坐席区布置吸声材料，而厅堂内其他表面均为反射面。为避免厅堂产生共振、回声或颤动回声等声缺陷，在室内反射面作强散射处理。在 Odeon9.0 进行室内音质计算机模拟中，通过输入表面散射系数来提高低频混响时间的模拟精度。有研究表明，当吸声面的散射系数取 0.2 时，混响时间的模拟值与实测值相符合^[4]。而对于坐席区散射系数则采用 Odeon9.0 的推荐值。三个厅堂的声学参数汇总如表 2 所示。

3 混响时间模拟

同一种吸声材料布置在不同的部位，其对室内

表 2 厅堂声学参数
Table 2 Acoustical parameters in three halls

材料特性	吸声系数						散射系数
	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	
座椅	0.23	0.55	0.70	0.72	0.75	0.78	0.70
走道材料	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.15
反射材料	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.70
吸声材料	0.35	0.50	0.60	0.65	0.70	0.75	0.20

混响的贡献显然并不相同，为了比较吸声材料布置在顶部或墙面不同位置时室内混响时间的差异，对三个厅堂模型分别进行了全场混响时间的模拟。在厅堂 1 内依次将吸声材料布置在顶面(case1)、自地面起 1.8m 高的墙面(case2)、离地 1.8m 到 3.6m 高的墙面(case3)及离地 6.2m 到 8m 高的墙面(case4)；在厅堂 2 内依次将吸声材料布置在顶面(case1)、自地面起 9.5m 高的墙面(case2)及离地 9.5m 到 19m 高的墙面 (case3)；而在厅堂 3 内依次将吸声材料布置在顶面(case1)、自地面起 2.5m 高的墙面(case2)、离地 2.5m 到 5m 高的墙面(case3)及离地 5m 到 7.5m 高的墙面(case4)。模拟中声源均采用无指向性球面声源，声源位置如图 1~3 所示，高度离地 1.5m。对应三个厅堂，声源与顶面的距离分别为 6.5m、

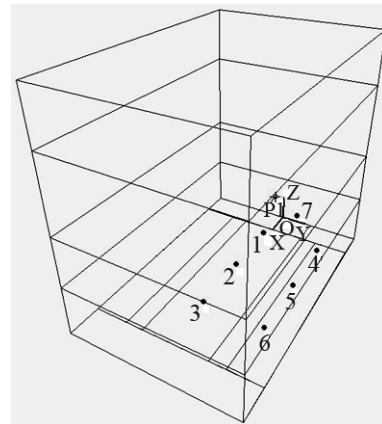


图 1 厅堂 1 三维视图及声源位置
Fig.1 3D view and position of sound source in Hall 1

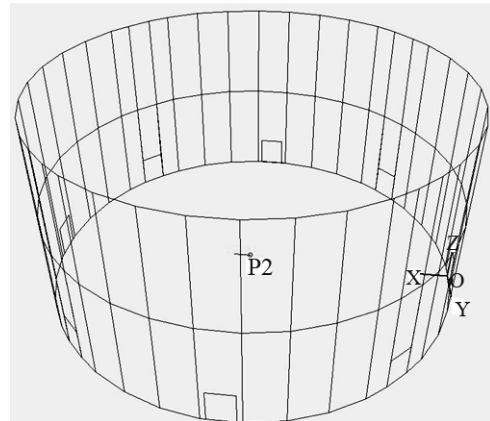


图 2 厅堂 2 三维视图及声源位置
Fig.2 3D view and position of sound source in Hall 2

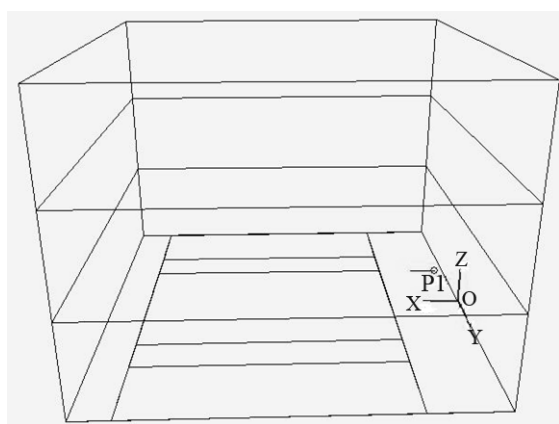


图3 厅堂3 三维视图及声源位置
Fig.3 3D view and position of sound source in Hall 3

17.5m 和 6m。

为比较吸声材料布置在不同部位时混响时间的差异,在同一厅堂内进行的模拟中,总吸声面积及总吸声量均保持不变。基于上述条件,三个厅堂内混响时间的模拟结果如表3所示。

表3 三个厅堂内混响时间的模拟结果
Table 3 Simulation results of RT in three halls

厅堂 编号	材料布 置部位	混响时间/s					
		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
厅堂 1	case 1	3.38	1.87	1.64	1.48	1.39	1.15
	case 2	2.79	1.69	1.46	1.31	1.21	1.03
	case 3	2.41	1.39	1.17	1.06	0.99	0.85
	case 4	2.68	1.53	1.31	1.19	1.13	0.95
厅堂 2	case 1	6.25	3.47	2.72	2.43	2.16	1.66
	case 2	5.24	2.63	1.87	1.66	1.49	1.21
	case 3	5.35	2.68	1.94	1.73	1.53	1.24
厅堂 3	case 1	2.70	1.44	1.13	1.03	0.92	0.77
	case 2	2.57	1.37	1.04	0.88	0.79	0.67
	case 3	2.32	1.22	0.90	0.79	0.68	0.59
	case 4	2.50	1.31	0.99	0.88	0.79	0.67

由表3可见,同种材料布置在顶面时,室内混响时间最长,这说明将同种材料布置于顶面时吸声效率将降低。因此,在工程设计中,当墙面或顶面需要布置吸声材料时,应尽可能将吸声材料优先布置在墙面上。

3 顶部材料的吸声效率

在厅堂墙面上布置不同的吸声材料,分别利用计算机模拟软件模拟室内混响时间。当模拟混响时间与表3中材料布置在顶部时的混响时间相同时,墙面材料的吸声系数与顶部材料的吸声系数的比值定义为顶部材料的吸声效率,其意义相当于墙面材料布置在顶部时实际所能发挥的吸声作用。

为此,在厅堂1的case3对应墙面、厅堂2的

case2对应墙面以及厅堂3的case3对应墙面分别布置并调整吸声材料的吸声系数,使室内混响时间与表3中材料布置在顶部时的混响时间相等。表4所示为满足上述要求的墙面材料的吸声系数及对应的混响时间。

表4 所选墙面材料的吸声系数及对应的混响时间
Table 4 RT in hall and sound absorption coefficient of absorbent on wall

频率 /Hz	吸声系	混响时	吸声系	混响时	吸声系	混响时
	数 α	间 RT/s	数 α	间 RT/s	数 α	间 RT/s
	(厅堂 1)	(厅堂 1)	(厅堂 2)	(厅堂 2)	(厅堂 3)	(厅堂 3)
125	0.21	3.40	0.25	6.23	0.26	2.66
250	0.28	1.87	0.29	3.47	0.35	1.44
500	0.30	1.60	0.29	2.72	0.37	1.13
1k	0.30	1.48	0.29	2.44	0.35	1.03
2k	0.31	1.39	0.30	2.15	0.38	0.92
4k	0.32	1.17	0.29	1.66	0.38	0.77

对比表3和表4可知,当墙面材料的吸声系数如表4所示时,三个厅堂内的混响时间与表3中case1的混响时间基本一致。按照前述吸声效率的定义,可以计算出三个厅堂中顶部材料的吸声效率,结果如表5所示。

表5 三个厅堂中顶部材料的吸声效率
Table 5 Absorbing efficiency of ceiling materials in three halls

厅堂编号	吸声效率					
	125Hz	250Hz	500kHz	1kHz	2kHz	4kHz
厅堂 1	0.60	0.56	0.50	0.46	0.44	0.43
厅堂 2	0.71	0.58	0.48	0.45	0.43	0.39
厅堂 3	0.74	0.70	0.62	0.54	0.54	0.51

由表5结果并结合三个厅堂内声源与顶面的距离可知,顶部材料的吸声效率与声源到顶面的距离负相关。声源与顶面的距离越远,吸声效率越低。三个厅堂中,声源与顶面的距离最短的是厅堂3,厅堂1次之,厅堂2内声源与顶面的距离最长,而三个厅堂内顶部材料的吸声效率刚好相反,厅堂3内顶部材料的吸声效率最高,而厅堂2内顶部材料的吸声效率最低。

同时由表5还可以看出,顶部吸声效率与频率也呈负相关。这也佐证了顶部材料的吸声效率与声源到顶面的距离负相关这一结论。因为低频段声波较长,高频段声波较短,即使声源与顶面的绝对距离相等,但在不同频段,其相对波长而言的相对距离却不一样。声源到顶面的距离相比低频波长较短,而相比高频波长却很长。因此,在低频段顶部吸声效率最高,中频次之,高频吸声效率最低。

为研究材料吸声系数对吸声效率的影响,以厅堂1为模型,重新选取两种不同的吸声材料,其中一种降噪系数高于表2所示的顶部吸声材料的降噪

系数，另一种材料降噪系数低于现在顶部所布材料，三种材料的吸声系数及降噪系数如表 6 所示。同样，采用计算机模拟软件分析顶部布置这三种吸声材料时吸声效率的变化，结果如图 4 所示。可见，顶部材料吸声系数的变化对吸声效率的影响较小。

表 6 三种顶部材料的吸声系数及降噪系数
Table 6 Sound absorption coefficient and NRC of ceiling materials in three halls

材料 编号	吸声系数						NRC
	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	
材料 1	0.35	0.50	0.60	0.65	0.70	0.75	0.60
材料 2	0.32	0.72	0.88	0.79	0.91	0.91	0.85
材料 3	0.92	0.43	0.43	0.54	0.67	0.75	0.50

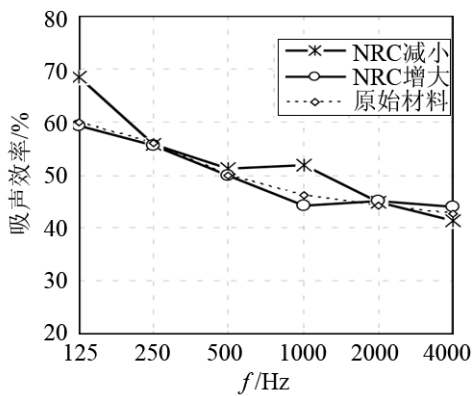


图 4 材料吸声系数对吸声效率的影响
Fig.4 The influence of sound absorption coefficient on absorbing efficiency of roof material

4 结语

在超大型厅堂的音质设计工程实践中，混响时间依然是很重要的一个评价参量。这些厅堂为确保

室内具有合适的混响时间往往需要在墙面、地面及顶面布置吸声材料。但顶部材料相比墙面材料而言究竟具有多高的吸声效率尚难掌握。本文利用室内音质计算机模拟软件，对该问题进行了研究，并对影响顶部吸声效率的一些因素进行了分析。研究结果表明，安装于墙面的吸声材料其吸声效率优于顶部吸声材料，而顶部吸声材料的吸声效率与声源到顶面的距离呈负相关，且材料本身的吸声系数大小对吸声效率的影响不大。但顶部吸声材料的吸声效率与频率也呈负相关。因此，在超大型厅堂内，当顶面和墙面均需要进行吸声处理时，吸声性能优良的材料应优先布置在墙面上，而顶部则应多安装以低频吸声为主的材料或构造。

参 考 文 献

- [1] 章奎生, 宋拥民. 会议厅的声环境设计[J]. 噪声与振动控制, 2007, 27(S1): 192-197.
ZHANG Kuisheng, SONG Yongmin. Acoustic design of halls for conference[J]. Noise and Vibration Control, 2007, 27(S1): 192-197.
- [2] 杨志刚, 章奎生, 张晓岚. 无锡灵山梵宫建筑——圣坛的建声设计[J]. 噪声与振动控制, 2009, 29(S): 284-286.
YANG Zhigang, ZHANG Kuisheng, ZHANG Xiaolan. Acoustic design for Shengtan of Lingshan Fangong in Wuxi[J]. Noise and Vibration Control, 2009, 29(S): 284-286.
- [3] GB/T 50356-2005. 剧场、电影院和多功能厅堂建筑声学设计规范[S].
GB/T 50356-2005. Code for architectural acoustical design of theater, cinema and multi-use auditorium[S].
- [4] 蒋国荣. 室内声场模拟中的界面声散射[J]. 声学技术, 2009, 28(6): 697-700.
JIANG Guorong. Sound scattering in room acoustic modeling[J]. Technical Acoustics, 2009, 28(6): 697-700.