

混响室扩散体声学设计及数值仿真

吕 义 高 阳 樊 康

(中车长春轨道客车股份有限公司科技管理部, 130062, 长春//第一作者, 教授级高级工程师)

摘 要 针对高速铁路动车组车内噪声测量要求, 分析了吸声测量和隔声测量中对混响室的功能要求。选择扩散板作为混响室基本扩散体, 对扩散体的大小及数量要求进行分析与设计, 给出了混响室扩散体设计方案及其基本指标。

关键词 车辆噪声测量; 混响室; 扩散体; 隔声量

中图分类号 U270.7; TB52⁺7

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2019.02.023

Acoustic Design of the Diffuser in Reverberation Chamber and Numerical Simulation

LYU Yi, GAO Yang, FAN Kang

Abstract According to the requirements of EMU vehicle noise measurement, the performance of reverberation chamber corresponding to sound absorption and sound reduction measurements is analyzed. The diffusing plate is selected as the basic diffuser in reverberation chamber, in order to analyze and design the proper size and number of the diffusing plate, obtain the acoustic design of the diffuser in EMU reverberation chamber and the basic index.

Key words vehicle noise measurement; reverberation chamber; diffuser; sound reduction index

Author's address CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

中国高速铁路经过 10 年来的迅猛发展, 取得了举世瞩目的成就^[1-2]。随着人民生活水平的日益提高, 人们对于出行的需求已不单是要求方便快捷, 对出行途中的舒适性也提出了越来越高的要求^[3-4]。相对于普通铁路, 高速铁路因高速、高架、电气化等特点, 其噪声传播的空间和时间也较普通铁路要大, 噪声的产生和构造也较普通铁路要复杂。

高速铁路噪声是由各种不同类型的噪声组合而成, 按发生部位的不同, 可分为牵引系统噪声、轮轨噪声、气动噪声、集电系统噪声及桥梁构造物噪声^[5]。在高速列车低噪声设计过程中, 往往希望在车辆设计初期能采用有效的仿真或试验手段对于高速列车不同区域的噪声源进行模拟, 评估其对车

辆内部和外部噪声的影响^[6-9]。

混响室是声学测量研究领域的一种专业实验室, 它能测量一些几何形状比较复杂的诸如座椅、空间吸声体等物体的吸声量。两个通过开窗连接的消声室可用于门窗等结构的隔声量的测量。本文主要研究混响室墙面形状及附加扩散体需满足的基本指标。

1 混响室设计要求

1.1 散射面设计要求

混响室外形设计中, 墙面的起伏形状、附加扩散体布置这两个方面主要涉及散射面的形状和大小。常见的散射面如图 1 所示, 其中: 凹面形状的散射效果最差, 平面形状的其次; 除了图 1i)、图 1j)、图 1k) 中所示的这 3 种商业产品形状外, 其余形状的都有一定的散射效果, 尤其是 0.55 m 直径的半圆柱面有较好的散射效果。

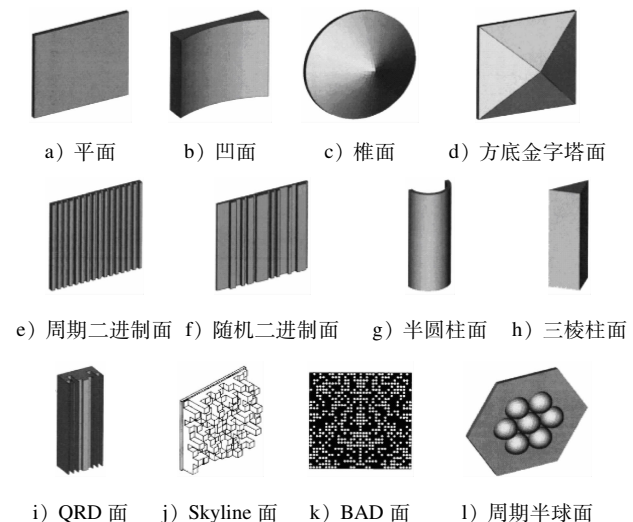


图 1 常见散射面的外形结构

混响室墙面的起伏设计, 可选择多个半圆柱体的简单组合作为混响室的墙面起伏形状。半圆柱及半球形墙面的设计和建造都很方便, 且能保证较

好的散射效果。半圆柱形表面的截面半径不应小于要求的最低频率。

1.2 扩散体设计要求

1.2.1 吸声测试设计要求

通过悬挂扩散板的方法可以增大声波的散射。扩散板面质量需大于 5 kg/m^2 ,微凸形状最佳,凸起朝向随机。为了保证不同混响室吸声系数尽可能接近,GBJ 47—1983 标准中规定了混响室中扩散体的吸声系数要求,并要求通过逐渐增加扩散板的方式确定扩散板的个数。

体积为 200 m^3 以下的混响室,最低频率 f 可采用式(1)计算。

$$f=125\left(\frac{200^{\frac{1}{3}}}{V}\right)$$

(1)

式中:

V ——混响室体积, m^3 。

1.2.2 隔声测量设计要求

在进行隔声测量时,需要用到两个相连的混响室。GB/T 19889 系列标准中要求这两个混响室的容积或线度相差 10% 以上,两个混响室的容积应大于 50 m^2 。对于满足 GBT 19889 系列标准要求的两个混响室,安装扩散板时可将扩散板的面积范围按 GBJ 47—1983 标准要求定为 $0.8\sim3.0\text{ m}^2$ 。

进行隔声测量时,扩散体条件是:安装足够多的扩散体时,不应影响隔声量的测试条件,且混响时间 T 需满足式(2)的限制条件。

$$1\leq T\leq 2\left(\frac{V}{50}\right)^{\frac{2}{3}}$$

(2)

若不满足式(2)的限制条件,则需继续调整扩散体的安装数量和方向,直到各频带的隔声量与混响时间不存在依赖性为止。

2 混响室设计指标

混响室的形状以及附加的扩散体需满足混响室的基本指标见表 1,混响室形状设计所依照的标准见表 2。

3 扩散体设计

已有的实验证明,混响室形状规则对测量效果影响不大,混响室墙面的不平行设计实际上并不能对扩散场带来明显的改变。结合扩散体设计思路可知,墙面起伏及附加扩散板这两种扩散体布置各有优缺点:墙面起伏对低频声的反射容易实现且效果

表 1 混响室设计主要技术指标

混响室	指标
混响室 I	体积不小于 100 m^3 ;隔声量 65 dB
混响室 II	体积不小于 110 m^3 ;隔声量 65 dB
混响室 III	体积不小于 200 m^3 ;隔声量 65 dB;能测量 100 Hz 以上频带的吸声系数
混响室 IV	体积不小于 100 m^3 ;隔声量 65 dB

表 2 混响室形状设计所涉及的相关标准

标准	名称
GB/T 6881.1—2002	声学声压法测定噪声源声功率级混响室精密法
GB/T 19889.1—2005	声学建筑和建筑构件隔声测量 第 1 部分:侧向传声受抑制的实验室测试设施要求
GB/T 20247—2006	声学 混响室吸声量测量
GBJ 47—1983	混响室法吸声系数测量规范

较好,但布置成形后难以进行改进优化;扩散板安装不便,但便于调试。从实用和操作简便性的角度出发,本文主要选择可灵活拆装的扩散板作为基本扩散体单元,扩散板以随机的角度安装在混响室四周及顶部的墙上,以尽可能地增大散射效果。所选取的扩散板材料为具有较小吸声系数的镀锌钢板。

3.1 混响室 I 的扩散体设计

由于混响室 I 容积较小,难以满足 100 Hz 的低频扩散条件,因此,需增加扩散板用于改善低频扩散效果。

由式(1)可知,在现有设计方案下,混响室 I 的最低扩散场频率为 156 Hz,扩散板可对 100 ~ 156 Hz 的声场起到良好的扩散作用,因此扩散板边长应在 2.1 ~ 2.4 m 之间。2.1 m 对应的是 156 Hz 声波的波长,2.4 m 对应的是 100 Hz 声波的波长。(下限频率对应着扩散板的对角线的尺度,而上限频率只需边长的长度满足条件即可)

混响室 I 的内表面总面积为 132 m^2 。GB/T 20247—2006 标准要求,扩散板总面积(双面)为混响室总表面的 15% ~ 25%,因此,混响室 I 可设置 4 块扩散板,边长分别为 1.8 m、2.0 m、2.2 m、2.4 m,单面面积合计为 17.84 m^2 。

由于混响室 I 的顶部及侧面 1 和侧面上需设置隔声窗,故此扩散板安装在侧面 3 上,如图 2 所示。安装扩散板时,在满足扩散板之间不相互重叠及角度随机的条件下,可根据实际墙面尺寸进行适当调整和布置。扩散板采用吊杆方式将 4 个顶点悬挂。

4 根吊杆的长度随机分布,扩散板与墙壁夹角在 30°~60°之间。

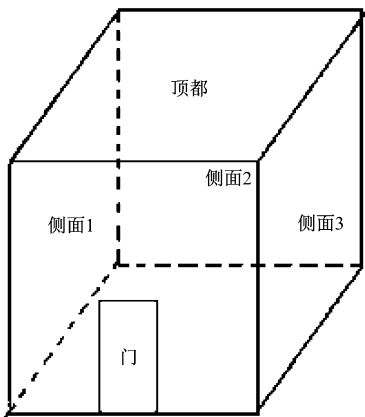


图2 混响室 I 扩散板安装位置示意图

3.2 混响室 II 的扩散体设计

由于混响室 II 的容积较小,难以满足 100 Hz 的低频扩散条件,因此,需增加扩散板用于改善低频扩散效果。

由式(1)可知,在现有设计方案下,混响室 II 的最低扩散场频率为 156 Hz,扩散板可对 100 ~ 156 Hz 的声场起到良好的扩散效果,因此扩散板尺寸应在 2.1 ~ 2.4 m 之间。2.1 m 对应的是 156 Hz 声波的波长,2.4 m 对应的是 100 Hz 声波的波长。(下限频率对应着扩散板的对角线的尺度,而上限频率只需边长的长度满足条件即可)。

混响室 II 的内表面总面积为 147 m²。GB/T 20247—2006 标准要求,扩散板总面积(双面)为混响室总表面的 15% ~ 25%,因此,混响室 II 可设置 3

块扩散板,边长分别为 2.10 m、2.25 m、2.40 m,单面面积合计为 15.20 m²。

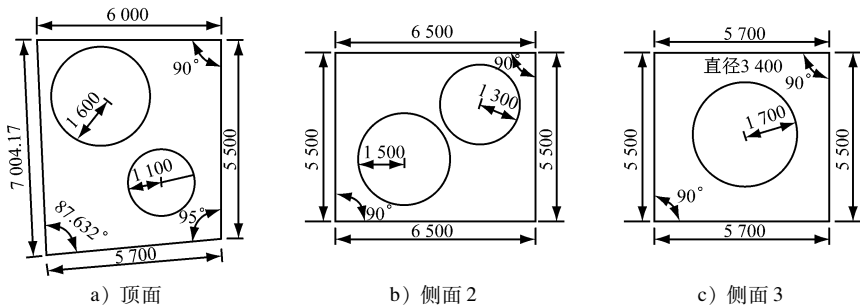
混响室 II 中,扩散板安装于屋顶面,安装扩散板时,在满足扩散板之间不相互重叠及角度随机的条件下,可根据实际墙面尺寸进行适当调整和布置。扩散板采用吊线方式将 4 个顶点悬挂。4 根吊线的长度随机分布,扩散板与屋顶面夹角在 30° ~ 60°之间。

3.3 混响室 III 的扩散体设计

根据设计要求,将混响室 III 的扩散体设计成半球面墙体(由于所占体积过大,实际采用的是半椭圆扩散体)。该设计能够满足吸声系数测量的要求,但要注意在进行隔声测量时,需在地面铺设吸声材料以满足隔声测试要求。

由式(1)可知,在现有设计方案下,混响室 III 的最低扩散场频率为 123 Hz,扩散板可对 100 ~ 123 Hz 的声场起到良好的扩散作用,因此半椭圆最大直径应在 2.1 ~ 3.4 m 之间。2.1 m 对应的是 123 Hz 声波的波长,2.4 m 对应的是 100 Hz 声波的波长。

混响室 III 的基本框架和混响室 I 相同。考虑到混响室 III 的侧面 1 需要开窗,不能在该墙面上设计半椭圆扩散体,因此,5 个半椭圆扩散体设置为顶面两个、侧面 2 两个、侧面 3 一个,如图 3 所示。半椭圆体类似于将半球体的厚度压缩后的形状,安置在墙面上,所占据的范围成圆形。表 3 给出了 5 个半椭圆体半轴长的设计尺寸,其中 a、b、c 分别为其 3 个方向的几何半轴尺寸。



单位:mm

图3 半椭圆扩散体在墙面上的位置

表3 混响室 III 半椭圆扩散体半轴设计尺寸 m					
半轴尺寸	椭球 1	椭球 2	椭球 3	椭球 4	椭球 5
a	1.70	1.60	1.50	1.30	1.10
b	1.70	1.60	1.50	1.30	1.10
c	0.85	0.80	0.70	0.70	0.55

3.4 混响室 IV 的扩散体设计

混响室 IV 与混响室 I 的尺寸相同,均作为混响室 II(发声室)的受声室,因此,混响室 IV 的扩散体设计应与混响室 I 保持一致(具体见混响室 I 的扩散体设计)。

3.5 混响室扩散体材料

本设计方案中所有扩散体材料采用镀锌钢板材料,厚度为 20 mm。该材料吸声系数小,在各个频段内基本均为 0.04。

4 声场扩散性数值仿真

为了对上述扩散体设计的扩散性能进行验证,采用建筑声学设计软件(Odeon)对 4 个混响室的声场进行仿真分析。鉴于篇幅原因,本文仅介绍混响室 III 的声场仿真结果。

混响室 III 设有 1 个隔声窗,在隔声窗处布置 9 个测点,如图 4 所示。

经计算仿真,图4中9个测点的模态分布如图

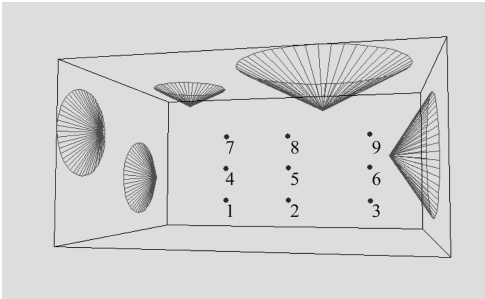


图 4 混响室 III 隔声窗处测点布置示意图

5 所示。由图 5 显示的计算结果可见,所有测点的模态密度分布较密且均匀,说明混响室 III 声场具有良好的扩散性。混响室 III 的隔声窗处所有测点的平均模态密度见表 4。由表 4 可见,每个 1/3 倍频程频段内的模态密度可满足声场扩散的要求。

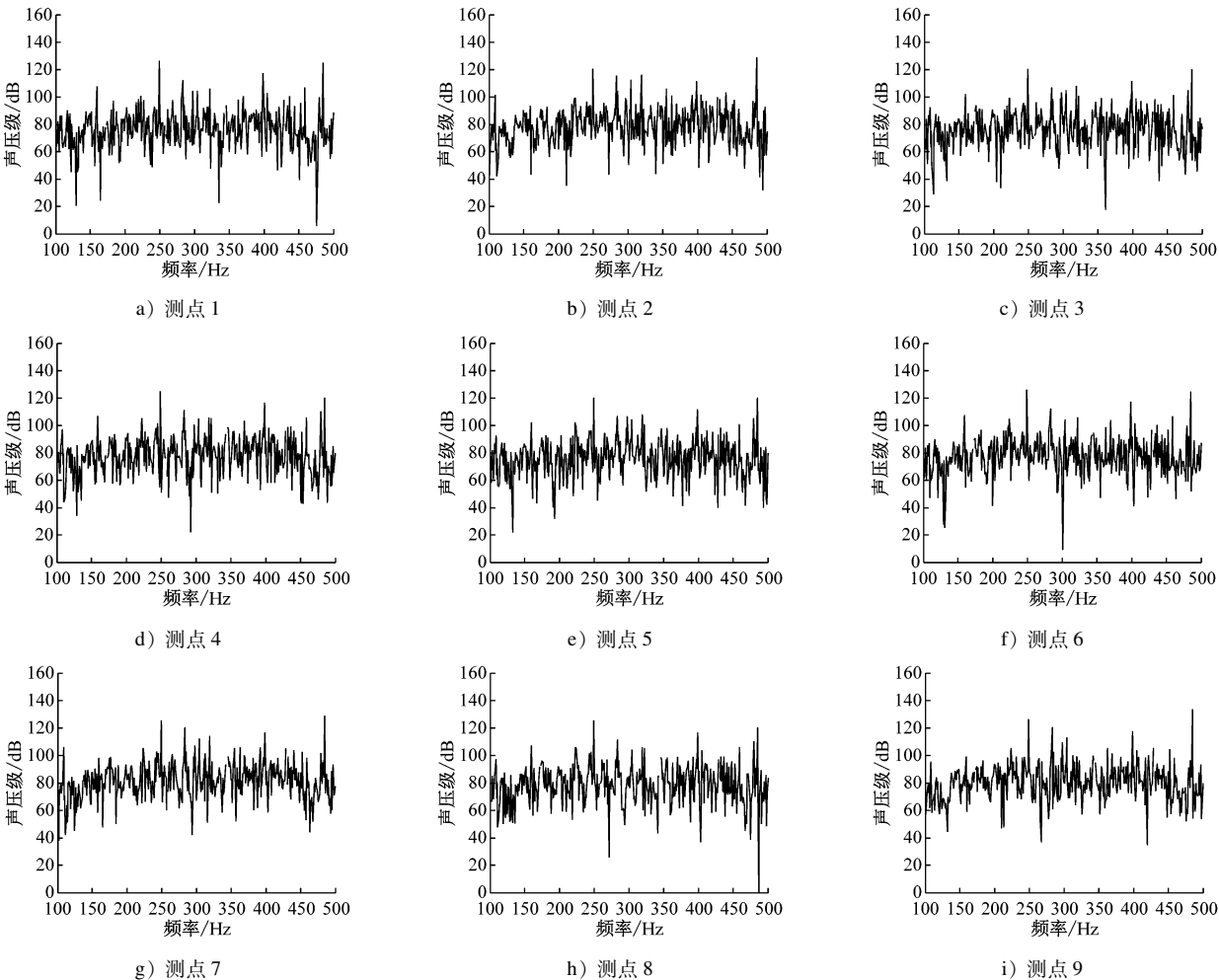


图 5 混响室 III 9 个测点的模态分布

为了分析频率 100 Hz 时的声场扩散性,将 100 Hz 时混响室 III 隔声窗处各测点声压分布制图,如

图 6 所示。由图 6 可见,在 100 Hz 时各个测点的声压分布均匀,证明其扩散性良好。

表 4 混响室 III 9 个测点的平均模态密度

1/3 倍频程频段的 中心频率/Hz	模态密度 /个	1/3 倍频程频段的 中心频率/Hz	模态密度 /个
100	8	800	60
125	10	1 000	74
160	13	1 250	101
200	15	1 600	122
250	18	2 000	143
315	23	2 500	191
400	28	3 150	210
500	37	4 000	221
630	47	5 000	207

表 5 混响室扩散体设计方案

混响室编号	扩散体指标	安装方式
I	方形微凸光滑铁板, 共 4 块	吊杆悬挂, 与墙壁夹角在 30° ~ 60° 之间, 朝向随机
II	方形微凸光滑铁板, 共 3 块	吊线悬挂, 与屋顶面夹角在 30° ~ 60° 之间, 朝向随机
III	半椭球形墙面扩散体, 共 5 个	土建时直接安装
IV	方形微凸光滑铁板, 共 4 块	吊线悬挂, 与屋顶面夹角在 30° ~ 60° 之间, 朝向随机

参考文献

[1] 王伯铭. 高速动车组总体及转向架[M]. 成都:西南交通大学出版社, 2008.

[2] 尹昊,沈勇,刘紫赞,等. 混响室吸声测量中旋转扩散体角度状态及顶角测点位置的影响[J]. 声学学报, 2016, 41(5): 694.

[3] 杨小军,沈勇,乐意. 混响室中混响时间测量偏差的研究[J]. 声学技术, 2011, 30(1): 93.

[4] PETERS B. Integrating acoustic simulation in architectural design workflows: the FabPod meeting room prototype[J]. Simulation, 2015,91(9): 26.

[5] 孙广荣,吴启学. 混响室中低频测量的改进[J]. 电声技术, 2006(10): 19.

[6] 杨志华. 混响室的声学设计[J]. 电声技术,2007(6):7.

[7] 杨德庆,石嘉欣,郁扬. 基于有限元—统计能量数值混响室法的声学包设计与优化[J]. 中国舰船研究, 2017, 12(4): 26.

[8] 张林昌. 混响室及其进展[J]. 电子质量, 2003(1): 39.

[9] 贺岩松,李景,卢会超. 组合式穿孔管消声器声学仿真[J]. 噪声与振动控制, 2012, 32(2): 151.

(收稿日期:2018-10-11)

5 结论

本文分析了吸声测量和隔声测量中对混响室的功能要求,选择扩散板作为基本扩散体,对扩散体的大小以及数量要求进行分析及设计,得到的混响室扩散体设计方案如表 5 所示。



上海轨道交通新增 3 处 P + R 停车场 每天每车次 5 至 10 元不等

记者从上海市交通委获悉,2月15日起,上海将在轨道交通11号线嘉定新城站、金山铁路亭林站、金山铁路金山园区站附近新增3处P+R停车场(库),共计778个停车换乘(P+R)泊位向社会车辆开放。至此,上海轨道交通已有17处P+R停车场(库),拥有逾5100个停车换乘(P+R)泊位。记者了解到,新增的3处P+R停车场(库)中,嘉定新城站P+R停车库位于嘉定区中信泰富万达广场地下停车库地下三层内,靠近11号线嘉定新城站1号出入口,在车库内部有人行通道方便就近到达轨道交通站点大厅;金山铁路亭林站、金山园区站2处P+R停车场均位于站内停车场。据上海市交通委介绍,2009年以来,上海已陆续在轨道交通1号线(锦江乐园站、汶水路站、富锦路站)、2号线(淞虹路站)、3号线(江杨北路站)、7号线(大场镇站、美兰湖站)、8号线(沈杜公路站、芦恒路站)、9号线(松江大学城站)、11号线(南翔站、安亭站、嘉定西站)、金山铁路(金山卫站)等14处轨道交通站点附近推出了公共换乘(P+R)停车场(库)经营服务。根据市物价部门核定,市民持公共交通卡在上述17处P+R停车场(库)按规定停车并换乘轨道交通时,可享受每天、每车次5至10元不等的停车换乘(P+R)优惠价。

(摘自2019年2月14日东方网,记者 王佳妮报道)