

图 2 空调掩蔽声和 babble 掩蔽声句子可懂度对比

图 2 的结果表明，在两种掩蔽声条件下，句子可懂度随信噪比的降低呈非线性下降。babble 噪声的掩蔽能力要高于空调噪声，随着信噪比的降低，两种掩蔽声下的语言可懂度差异加大，在信噪比为-12dB 时，对男声信号而言，空调掩蔽声的语言可懂度比 babble 掩蔽声高出 50%。在信噪比小于-8dB 后，空调掩蔽声对女声句子的掩蔽能力较好，babble 掩蔽声在可懂度趋于 0%之前对男声句子的掩蔽能力高于女声句子。

3. 不同噪声掩蔽特征

根据实验所得结果，用origin8.0 进行函数拟合，得到空调噪声和babble噪声对词语和句子掩蔽能力的函数。根据Akaike^[4]的AIC标准，设定函数模型(1)如下形式：

$$SI = \frac{k - c}{1 + a * e^{-bN}} + c \quad (1)$$

式中，SI — 语音可懂度，%

N — 语音信号相对于掩蔽噪声的信噪比，dB

3.1 词语的掩蔽特征

空调噪声条件下，男女声语音可懂度与信噪比的函数关系如下式(2)和式(3)所示。

$$\text{女声: } SI = \frac{100}{1 + 0.1 * e^{-0.18N}} + 11.50 \quad (2)$$

$$\text{男声: } SI = \frac{100}{1 + 0.1 * e^{-0.21N}} + 10.55 \quad (3)$$

图 3 中给出了实验结果与拟合曲线结果的对比，两条曲线拟合的R²都是 0.88 以上。

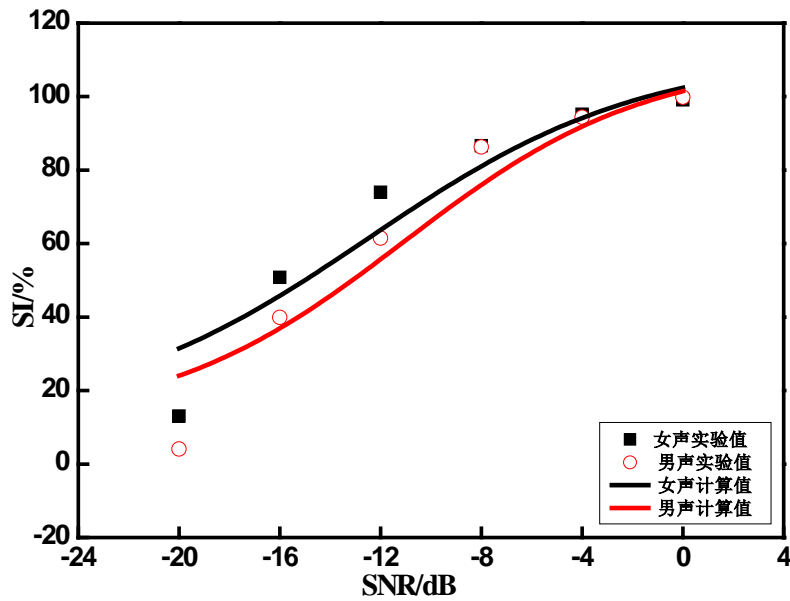


图 3 空调掩蔽声下男女声词语可懂度对比

babble 噪声条件下，男女声词语语音可懂度与信噪比的函数关系如下式(4)和式(5)所示。

$$\text{女声: } SI = \frac{100}{1 + 0.1 * e^{-0.35N}} - 6.63 \quad (4)$$

$$\text{男声: } SI = \frac{100}{1 + 0.1 * e^{-0.29N}} - 7.87 \quad (5)$$

图 4 给出了实验结果与拟合曲线结果的对比，两条曲线拟合的R²都是 0.97 以上。

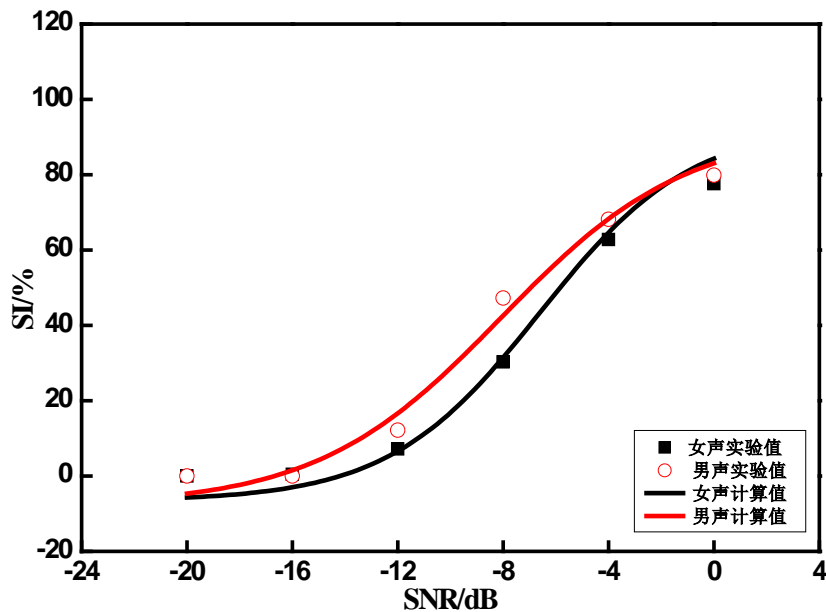


图 4 babble 掩蔽声下男女声词语可懂度对比

在信噪比为 0dB 时，babble 噪声下的句子信号可懂度比空调噪声下低 20%，空调声在 0 到-8dB 信噪比间下降缓慢，-10dB 之后加速下降，而 babble 声的曲线下降迅速，且信噪比到-12dB 时，语言可懂度已经非常低。若要求语言可懂度在 35% 以下，根据所得函数计算，采用 babble 噪声掩蔽的话，女声信噪比只需要达到-7dB，男声-9dB；而空调噪声女声信噪比要达到-17 dB，男声-16dB。babble 噪声对词语的掩蔽能力比空调噪声高约 7~10dB。

3.2 句子的掩蔽特征

空调噪声条件下，男女声句子语音可懂度与信噪比的函数关系如下式(6)和式(7)所示。

$$\text{女声: } SI = \frac{100}{1 + 0.1 * e^{-0.21N}} + 11.09 \quad (6)$$

$$\text{男声: } SI = \frac{100}{1 + 0.1 * e^{-0.17N}} + 5.84 \quad (7)$$

图 5 给出了实验结果与拟合曲线结果的对比，两条曲线拟合的R²都是 0.88 以上。

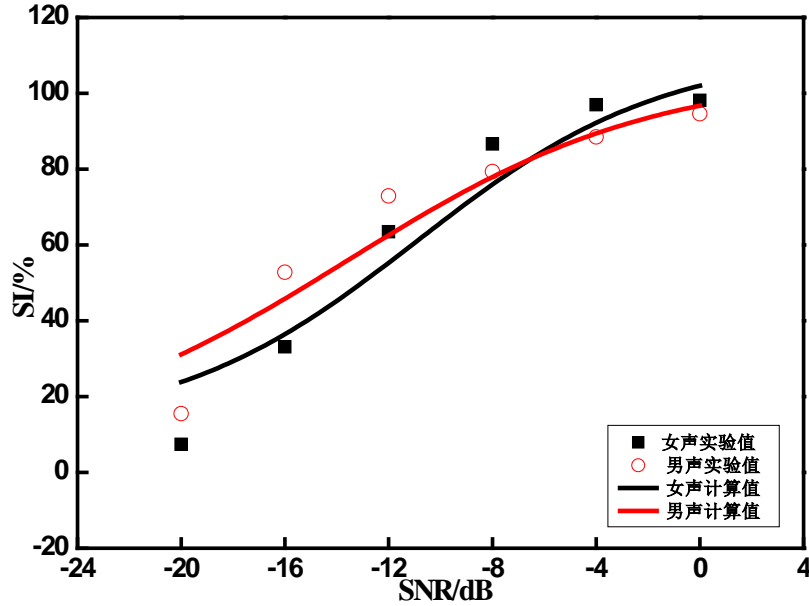


图 5 空调掩蔽声下男女声句子可懂度对比

babble 噪声条件下，男女声语音可懂度与信噪比的函数关系如下式(8)和式(9)所示。

$$\text{女声: } SI = \frac{100}{1 + 0.1 * e^{-0.28N}} + 3.92 \quad (8)$$

$$\text{男声: } SI = \frac{100}{1 + 0.1 * e^{-0.27N}} - 5.45 \quad (9)$$

图 6 给出了实验结果与拟合曲线结果的对比，两条曲线拟合的R²都是 0.97 以上。

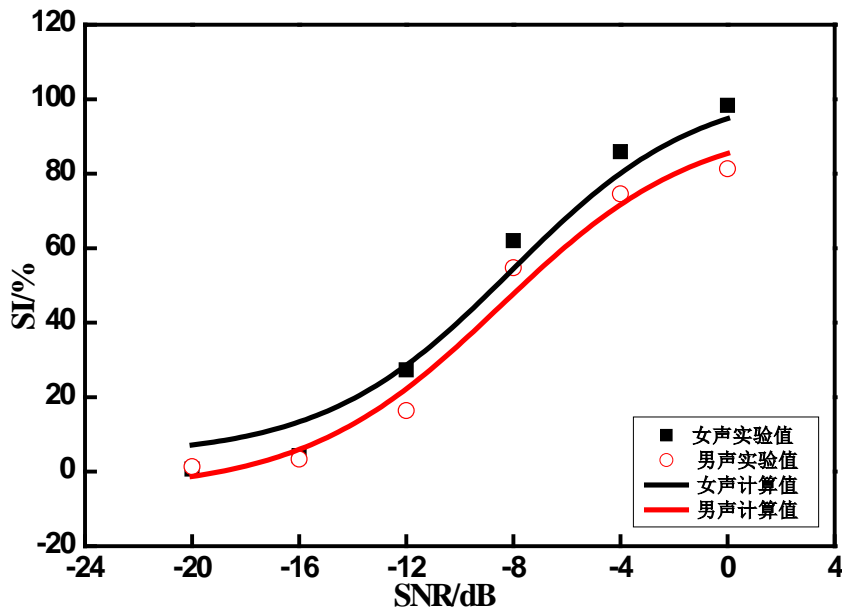


图 6 babble 掩蔽声下男女声句子可懂度对比

在信噪比为-12dB时, babble 噪声隐蔽下的男声句子信号可懂度比空调噪声下低了 54%, 女声句子信号可懂度低了 36%。空调声在 0 到-8dB 信噪比间下降缓慢, -10dB 之后加速下降, 而 babble 声曲线下降迅速, 且信噪比到-12dB 时, 语言可懂度已经非常低。根据所得函数得到的语言可懂度结果更能反应出 babble 噪声对语音的掩蔽能力的优越性。若要求语言可懂度在 35% 以下, 采用 babble 噪声掩蔽的话, 女声信噪比只需要达到-11dB, 男声信噪比达到-10dB, 而空调噪声女声信噪比要达到-16dB, 男声信噪比达到-17dB。babble 噪声对句子的掩蔽能力比空调噪声高约 5~7dB。

4. 总结

本文分析了两种掩蔽噪声在不同信噪比条件下对男女声语音信号的掩蔽能力及其差异, 获得了空调噪声和 babble 噪声对男女声语音信号掩蔽时语言可懂度随信噪比的变化趋势特征。比较两种不同噪声对语音信号的掩蔽能力, 相对于空调噪声而言, babble 噪声对语音的掩蔽能力更优越。若要求语言可懂度在 35% 以下, babble 噪声对词语的掩蔽能力比空调噪声高约 7~10dB, 对句子的掩蔽能力高约 5~7dB。

两种噪声对男女声语音信号的掩蔽能力不同, babble 噪声对女声词语的掩蔽好于男声, 而对女声句子的掩蔽却弱于男声, 与此相反, 空调噪声对男声词语的掩蔽好于女声句子, 而在信噪比低于 -10dB 时, 对男声句子的掩蔽弱于女声句子。

参考文献

- [1]. W. J. Cavanaugh, W. R. Farrel, P. W. Hirtle, and B. G. Watters, Speech Privacy in Buildings [J], J.Acoust.Soc.Am ,1962,**23**,475-492
- [2]. T. Tamesue, S. Yamaguchi, and T. Saeki, Study on achieving speech privacy using masking noise [J].Journal of Sound and Vibration ,2006,**297**,1088-1096.
- [3]. T. Komiyama, "An efficient speech privacy system using speaker-dependent babble noise as maskers" [C] , Internoise 2011, Osaka Japan, 2011
- [4]. M. Fujiwara, "Experimental Study of Speech Privacy with a Sound-masking System in Pharmacies" [C] , Internoise 2011, Osaka Japan, 2011
- [5]. B.N. Gover, and J.S. Bradley, "Measures for assessing architectural speech security (privacy) of closed offices and meeting rooms"[J], J.Acoust.Soc.Am ,2004,**116**(6), 3480-349
- [6]. T. Tamesue, "The Effect of Direction of Masking Sound on Speech Privacy Evaluation" [C] ,Internoise 2011, Osaka Japan, 2011
- [7]. H. Lee, "Experimental study on evaluation method of speech privacy" [C] , Internoise 2011, Osaka Japan, 2011
- [8]. R. Farrell, "Masking noise systems in open and closed spaces"[J], Journal of the Audio Engineering Society ,1971,**19**(3),197-201
- [9]. K. D. Kryter, B. Beranek, N.Inc, Methods for the Calculation and Use of the Articulation Index [J] J.Acoust.Soc.Am,1962,**34**,1689-1697
- [10]. 蒋斌, 杨军. 语音的掩蔽声实验研究[J].声学技术, 2011,vol**30**,No6,Pt.2

浅析声学装饰设计及工程施工在剧场建设中的重要作用

A Brief Analysis on The Importance of Acoustics Decorative Design and Construction for Theater Building

罗泽红、刘芳、谭泽斌、刘伟平

LUO Zehong, LIU Fang, TAN Zebin, LIU Weiping

深圳市中孚泰文化建筑建设股份有限公司 深圳 518029

SHENZHEN Z&F CULTURE CONSTRUCTION CO.,LTD SHENZHEN 518029

Abstract: As a cultural interpretation building with the audio-visual function, the visual and sound effect of theater building play an important role on whether the theater construction will be success or not. Acoustics decorative design and good construction are strong guarantee for theater construction visual and sound functions. This text takes Guangzhou Theater and Gansu Theater as examples to explain the importance of building acoustic decorative of detailed design and construction on theater building.

Key words: acoustic decorative design; theater building; construction

摘要: 剧场建筑作为以视听为主要功能的文化演绎建筑,其视觉效果及音质效果至关重要,关乎剧场建设的成败。声学装饰设计及良好的工程施工是剧场建筑视听功能的有力保障。本文以广州大剧院、甘肃大剧院工程为例,阐述了声学装饰设计及工程施工在剧场建设中的重要作用。

关键词: 声学装饰设计; 剧场建筑; 工程施工

剧场建筑作为以视听为主要功能的文化演绎建筑,其视觉效果及音质效果是非常重要的。为达到良好的厅堂视听效果,尤其是音质效果,声学装饰设计及工程施工是剧场建设成功的必要条件和有力保障,具体体现在以下几个方面。

1. 声学装饰设计及工程施工是建筑各个设计专业的集中体现

室内装饰设计偏重于艺术,建筑声学偏重于技术,声学装饰设计是以声学设计为前提的装饰设计。由此可见,声学装饰设计及工程施工是建筑设计、室内装饰设计、建筑声学设计等各个设计专业的集中体现,达到艺术与技术的统一。

在广州大剧院项目建设过程中,澳大利亚的声学家马歇尔博士针对广州大剧院做的创造性“双手环抱”式看台设计,延续了扎哈·哈迪德女士完全不对称的流线型设计的视觉美感,并使得所有的观众席获得声学上的亲近感,最终通过声学装饰设计及科学、合理的工程施工,完美地展现出奢华的视觉与听觉效果,达到艺术与技术的和谐统一。广州大剧院室内效果如图 1、2 所示。

2. 声学装饰设计及科学、合理的工程施工是剧场建筑良好视听功能的有力保障

在深刻理解建筑声学原理的基础上,严格按照设计及规范要求组织施工,在室内各个界面的声学材料构造、安装等方面进行深化设计和节点完善,是剧场建筑良好视听功能的基本要求及有力保障。



图1 广州大剧院观众席



图2 广州大剧院舞台

2.1 建筑声学材料（或声学构造）及相应施工技术的甄选

声学构造设计通常包括各界面声学材料的选型和绘制构造图，同时还需详细说明材料的面密度、厚度、穿孔率、孔径、孔距、后空腔以及龙骨的选型、间距等技术参数并对施工人员做相应的技术交底，这需要在声学装饰设计及工程施工阶段具体执行。

甘肃大剧院观众厅声闸墙面和吊顶根据声学设计报告选取了具体声学材料构造。墙面吸声材料构造为：50 系列轻钢龙骨（内填 50 厚 48 kg/m³ 离心玻璃棉）+18 厚木纹穿孔吸声板（穿孔率 P=26%）。声闸内吊顶采用铝穿孔吸声板（铝板穿孔率为 20%，板后贴 SoundTex 吸声无纺布）。

所有隔声门周边应采用高质量的密封，尤其隔声门的中间接缝处以及底部与地面接缝处，底部应采用底框可自动升降的接缝处理（隔声门关闭时底框自动升起，和门的下缘密封好；和地面平齐。声闸的内部门（靠近观众厅）：隔声量应≥30dB（A），声闸的外部门采用防火隔声门，隔声量应≥35 dB（A）。

2.2 声学装饰设计及工程施工是声学装饰设计实施性的保障

与建筑中其他设计专业不同，声学设计并不能简单地通过图纸来体现全部的设计内容，而声学设计的内容是通过建筑设计、室内装饰等其他建筑专业的图纸和成果体现出来的^[1]。因此，声学装饰设计及工程施工是保证声学设计实施性的重要措施。

在甘肃大剧院建设中，为争取早期反射声以及侧向反射声，声学装饰设计对观众厅内天花、墙面选用 GRG 板。为避免低频的吸收，要求 GRG 声反射板面密度≥40 kg/m²，且空腔尽可能小，如 30 mm 左右；龙骨间距宜控制在 200 mm ~ 400 mm 之间，且大小不等，随机排列，以避免固定间距对某一固定频率吸收太多^[2]。

观众厅内整个天花与墙面以三维双曲面造型自然顺畅地融合，浑然一体，既保证观众厅各部位能均衡地反声，实现声场均匀，同时又能体现出气势磅礴的视觉效果，七条从天花与两侧墙面贯通相连的造型灯带犹如七条飞天彩带，环绕飞舞在大剧场观众厅的上空及两侧，具有强烈的视觉冲击力。为实现声学装饰设计的视听效果，经过分析、研究，确定一套合理的施工技术方

通过具体的深化设计，采取合理的施工技术，甘肃大剧院大剧场观众厅的 GRG 声学挂板施工最终完美地实现了设计效果，每个部位完成面均自然流畅，平整顺滑，而且整体结构稳定，无变形开裂，完全避免了声桥现象，天花与墙面浑然一体，气势磅礴。甘肃大剧院观众厅室内效果如图 3、4 所示。

2.3 声学装饰设计及工程施工是声学装饰设计合理性的保障

剧场建筑从建设角度上来说，是以建筑设计为主，包含建筑结构、暖通空调、室内装饰、建筑声学等众多建筑相关专业相互配合、共存的有机统一体，而工程施工是各个专业最终的集中表现。因此，科学、正确地工程施工组织是声学装饰设计合理性的保障。



图3 甘肃大剧院侧墙

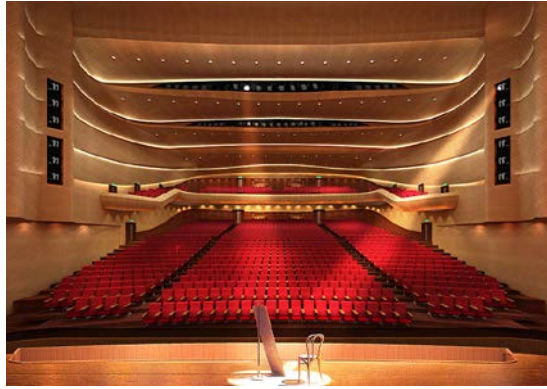


图4 甘肃大剧院观众区

为保证声学装饰设计的合理性，要求施工人员具备声学专业水平，加强施工过程的组织和监督管理，编写施工组织计划、落实施工方案。

例如，在广州大剧院声学装饰设计及工程施工过程中，充分理解了建筑设计理念，顺势而为，利用异形双曲面形体构成良好的声学构造，达成声学技术与装饰艺术合二为一的目的。用分解的观念强调打碎、叠加、重组，重视形态、动感、节奏、韵律、独特、情境、多元化表现室内空间的设计理念。以 GRG 材料的“融力”，以突出自然主题的力量、材料自身的美感和质感，又结合了形式感强烈的现代雕塑语言为结构支撑，彰显强悍的气质，结构严谨，充满气势与张力，实现了其“双手环抱形”看台这种不规则室内体形以及“倒八字形”乐池等设想，有利于声场的扩散和创造良好的声空间。保证了世界上仅有的两个非对称设计观众厅之一的优良音质效果。

3. 近二十年来，中国大陆剧场建设迅猛发展，大大提高了国内建筑声学专业技术以及工程施工技术水平

近二十年来，随着我国社会经济、城镇化建设、科技文化的迅猛发展，尤其是在文化强国理念的感召下，全国各地大量建设文化演艺建筑，掀起了剧场建设热潮，其中不乏上乘之作。表一是近二十年来，中国大陆部分剧场建设概况。

表1 中国大陆近二十年部分剧场建设概况一览表

工程名称	座位数	竣工年份	室内装修单位
广州大剧院	大剧场：1803座 小剧场：400座	2010年	深圳市中孚泰文化建筑建设股份有限公司及其团队
武汉琴台大剧院	大剧场：1802座 小剧场：429座	2007年	深圳市中孚泰文化建筑建设股份有限公司及其团队
武汉琴台音乐厅	大剧场：1602座 小剧场：428座	2009年	深圳市中孚泰文化建筑建设股份有限公司及其团队
东莞玉兰大剧院	大剧场：1600座 小剧场：400座	2006年	深圳市中孚泰文化建筑建设股份有限公司及其团队
大连国际会议中心	主剧场：1800座	2012年	深圳市中孚泰文化建筑建设股份有限公司及其团队
甘肃大剧院兼会议中心	大剧场：1500座 报告厅：300座 会议厅：200座	2011年	深圳市中孚泰文化建筑建设股份有限公司及其团队
三门峡文体中心	大剧场：1200座	2011年	深圳市中孚泰文化建筑建设股份有限公司及其团队

辽阳大剧院	主剧场：1222座 小剧院兼电影院： 350座 音乐厅：306座	2012年	深圳市中孚泰文化建筑建设股份有限公司及其团队
辽宁抚顺大剧院	主剧场：1306座	2012年	深圳市中孚泰文化建筑建设股份有限公司及其团队
青岛大剧院	大剧场：1600座 音乐厅：1200座 小剧场：400座	2010年	深圳市中孚泰文化建筑建设股份有限公司及其团队
山西大剧院（设计）	大剧场：1628座 小剧场：458座 音乐厅：1170座	2012年	深圳市中孚泰文化建筑建设股份有限公司及其团队
重庆涪陵大剧院	大剧场：1009座	2012年	深圳市中孚泰文化建筑建设股份有限公司及其团队
闽南大剧院	大剧场：1496座	2012年	深圳市中孚泰文化建筑建设股份有限公司及其团队
金昌大剧院	大剧场：1100座	2012年	深圳市中孚泰文化建筑建设股份有限公司及其团队
山东省会文化艺术中心（歌剧厅）	歌剧厅：1800座 音乐厅：1500座 多功能厅：500座	2013年 （预计）	深圳市中孚泰文化建筑建设股份有限公司及其团队
桂林大剧院	大剧场：1500座	2013年 （预计）	深圳市中孚泰文化建筑建设股份有限公司及其团队
哈尔滨大剧院	大剧场：1600座 小剧场：400座	2013年 （预计）	深圳市中孚泰文化建筑建设股份有限公司及其团队
常州传媒中心大剧院（设计）	剧场：919座	2013年 （预计）	深圳市中孚泰文化建筑建设股份有限公司及其团队
南山文体中心	大剧场：1701座	2013年 （预计）	深圳市中孚泰文化建筑建设股份有限公司及其团队

大量的剧场建设工程，使得声学设计单位、装饰设计单位以及工程施工单位积累了丰富的实践经验，提高了专业技术能力。

如表一所示，甘肃大剧院、东莞玉兰大剧院的成功建设，足以表明中国完全具备独立设计、完美施工的剧场建设能力。在广州大剧院室内声学装饰设计及施工实践中，为了达到扎哈·哈迪德的双曲面造型和马歇尔的室内声学的音质要求，做了大量的技术创新以便解决施工工艺构造上的难题，例如：无施工图纸红外线三点定位法放线，利用犀牛软件建模、建网格，解决双曲面线造型难题；室内界面材料的无缝处理；材料安装工艺及误差修正等。这些为解决实际问题而提出的创造性解决方案，不仅巧妙、成功地解决工程实际问题，同时大大提高了施工技术水平，为以后的剧场建设积累了宝贵的经验和提升了专业技术能力。

4. 结语

剧场建筑是建筑行业公认的专业性最强、技术复杂程度最高、涉及专业种类最多的工程项目。一个大剧院的成功与否，除了整体建筑设计外，最重要的是大剧院室内的声学装修设计与施工（含声学深化设计）、舞台机械设备功能设计与室内环境艺术等诸因素；其中室内声学装修设计与大剧院的声学深化、功

能优化、室内空间、选材密不可分，尤其关键地决定了一个大剧院的成败。

而参与剧场建设的主管单位、建筑设计、装饰设计单位及施工单位对剧场建设缺乏足够的重视，导致目前也存在一种现状是：一些建筑设计院没有设计剧院的经验，也没有专业声学设计技术人员，只把剧院的设计当做普通的公共空间来设计，当图纸已经完成才找声学工程师来补充声学设计，修修改改造成效果支离破碎、影响了建筑设计思路的完整性；对于施工单位，一些做酒店、歌厅类项目的装修公司，凭借着做酒店的经验来施工大剧院，这些没有剧院经验和声学意识概念的施工队所做出的工程，最终结果是金玉其外败絮其中，剧院的基本功能得不到满足。导致国内目前已建成的剧院中有近半数的剧院不能满足大剧院的功能和声学要求，造成了极大的浪费。

鉴于目前中国剧场建设现状，为了建设音质效果好的剧场，急需规范剧场建设准入门槛。在剧场建设过程中，应当尊重科学、尊重专业技术，充分意识到声学装饰设计及工程施工在剧场建设工程当中的重要性。

[1] 王峥， 陈金京. 建筑声学设计中的质量保障措施[J]. 电声技术, 2008 年第 32 卷第 12 期.

[2] 杨志刚. 甘肃大剧院剧场的建筑声学设计[J]. 演绎科技, 2011 年第十一期.

高校小型音乐厅声学设计

The acoustics design about small concert hall of college

贺加添、杨杰

HE-jia tian, YANG Jie

中国 长沙 湖南大学

Hunan University, Changsha, China

一、引言

湖南第一师范学校因曾国藩、左宗棠、毛泽东、何叔衡、李达、黄兴等一大批名人在此学习和工作过，在中国近代史上享有盛名。

学校下设音乐系，开办了音乐学、舞蹈学、小教音乐三个本科专业，及音乐教育和舞蹈表演两个专科专业。学校于 2011 年建设音乐教学大楼，内设 1100 座剧院、295 座音乐厅和音乐专业教室等。

本文对 295 座音乐厅的声学设计做一简单介绍。

二、功能及定位

内地很多高校都设有音乐院系，大多建设有小型音乐厅。有相当一部分未作声学设计，最后变成了多功能会议厅或演艺厅，离音乐教师理想中的音乐厅相距甚远。

高校小型音乐厅的功能应能满足师生小型声乐演唱或器乐演奏，是一座纯自然声的音乐厅。其声学设计与大型交响乐大厅相比要简单得多。

主要涉及以下内容：

1. 背景噪声低

自然声声音能量小，音乐弱音时声能更小。背景噪声应比音乐弱音声级低 10dB 以上。本音乐厅设定指标为小于 NR20，或 A 声级不超过 30dBA。

2. 声场均匀度

小型音乐厅面积小，声场容易均匀。本音乐厅设定声场强度差别小于 4dB。

3. 混响时间控制

音乐厅混响时间宜长，设计目标值为中频满场混响时间 1.6 秒。

4. 声学设计与室内装修的协调

确保音乐厅的声学效果和装饰效果都满意，常常是一件头痛的事，有时需要妥协和舍弃。

5. 声学设计与演出功能的协调

声学设计与演出功能的协调也不是一件容易的事。如舞台所需的灯光孔槽、空调口等，既要满足功能的要求，又要尽量降低对音质的影响，确实不易。

三、声学设计

1. 隔声设计

音乐教学大楼位于校园内，室外环境比较安静，无强噪声干扰源。音乐厅出入口采用声闸，墙体为 300 厚混凝土墙，能提供较好的隔声效果，对原设计中墙面通风口，采用了隔声封堵措施。

2. 满座容积

原建筑设计音乐厅容积不是很富余，室内声学设计将容积发挥到了最大，每座容积为 7.5m³/人。

只有达到一定的容积，才能实现混响时间指标。

3. 饰面材料

为了减少内装修饰面材料对声音的吸声，吊顶和墙面均采用 20mm 厚 GRG 材料。由于音乐厅呈椭圆形平面。为了避免声聚焦，改善声场均匀度，故墙上采用扩散体造型。

4. 吊顶造型

吊顶采用平板造型，有利于顶部声音反射，为了安装舞台灯具，设置面光桥及获得满意的顶棚视觉效果，适当做了一些高低错落的造型处理。

5. 混响时间

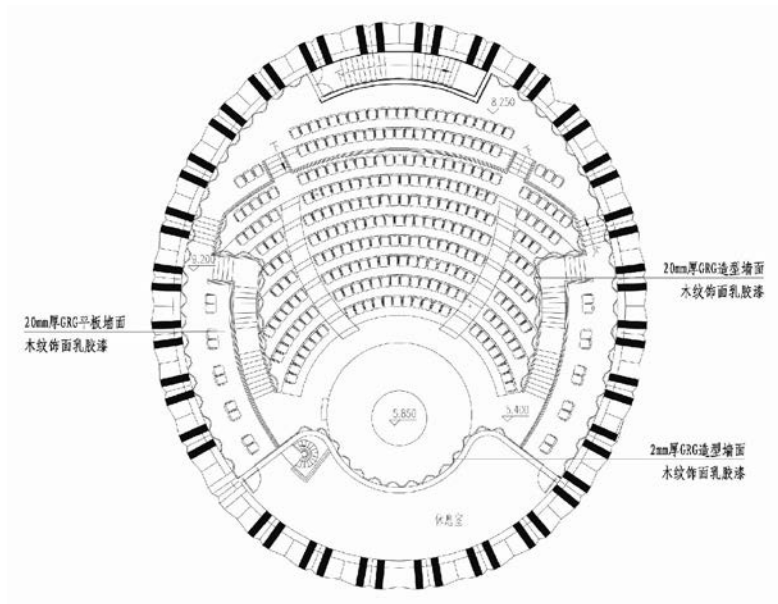
设计阶段对音乐厅混响时间进行了验算，能达到设定指标值。



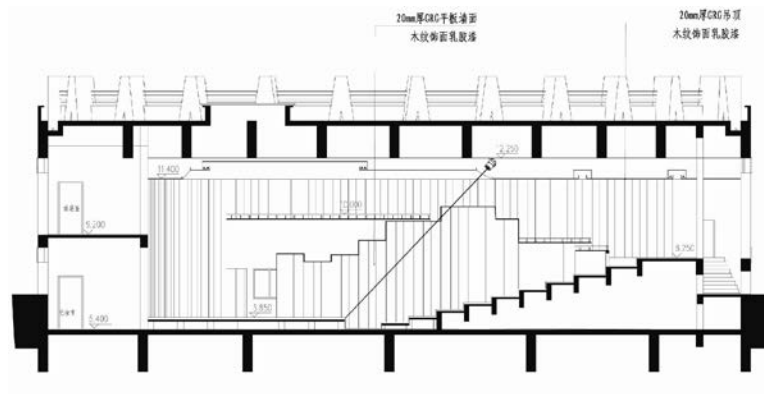
图一 音乐厅室内装修效果（一）



图二 音乐厅室内装修效果（二）



图三 音乐厅平面



图四 音乐厅剖面

基于声环境管理的噪声地图开发

Study on Noise Management Application of Noise Mapping

周裕德、夏丹、祝文英

ZHOU Yude, XIA Dan, ZHU Wenying

上海市环境科学研究院 环境物理研究所 上海 200233

(Institute of Environmental Physics, Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

Abstract: The necessity of study on noise mapping is carried out in this paper. The composition and process of noise mapping are studied systematically. A noise management system is developed and tested based on the analysis of the relationship between Geographic Information System, acoustic model system, check system, display & management system, and then try to find a method of noise management based on this system. The study results may be helpful and referential for the construction of noise management platform.

Key words: Acoustic; Noise Mapping; model calculation; Noise management

摘要: 国际上关于噪声地图开发,应用已有较长的历史,但作为服务于城市环境噪声管理的例子较少,本文针对国内密集型大城市,发展快、影响城市环境噪声的因子较多、环境噪声起伏较大,提出了利用环境噪声地图来实现城市环境噪声的管理,对噪声地图的组成和实现过程进行了系统性研究,研究了城市环境噪声地图的输入因子,选择了适合国内密集型城市的核心软件及其二次开发,重点研究了噪声地图的精确性及其相对应的校验系统、完成了人机友好的显示管理系统,在此基础上自主开发了环境噪声管理系统并开展试用,从而研究基于噪声地图的声环境管理的方法。该研究成果为声环境信息化管理平台的建设打下基础,为城市环境噪声管理提供了有益的参考。

关键词: 声学; 噪声地图; 模型计算; 声环境管理

中国的城市有别于欧美城市,其主要特点显示在人口多,从而与其相适应的城市配套服务的设施较多且较密集,如路网密集,交通类别较杂,因此城市交通噪声污染在日益加剧的基础上还呈现出复杂性、多样性的特征:声源组成异常复杂,交通干道两侧区域成为噪声污染集中区,立体化的道路布局形成了立体分布的声场,中心城区路网密集构成对区域声环境影响较大,噪声污染时间变化特征明显,另外密集城市大量的固定设备产生的噪声,直接或经多次反射影响范围也在增大,这些都为城市声间的城市声环境管理。

环境管理提出了新的挑战,尽管相关管理部门也加大了人力物力的投入,但基于传统的管理和技术手段已不能满足目前的实际需求,也难以采取有效的、针对性较强的噪声污染防治措施。因此亟须研究开发新的噪声管理技术和平台,服务于当前乃至今后较长时。

噪声地图管理系统就是基于上述原因而研究的一种数字-图形化声环境管理平台,其核心是通过模型计算+实测校验来建立系统并实现其各项系统功能。利用噪声地图可以更为直观地了解区域噪声分布以及达标情况,建立噪声数据库;更好的辨析噪声源,使噪声治理措施更具有针对性和有效性,避免设施的盲目建设和重复建设带来的经济损失;为城市规划提供环境适宜性分析;用于验证环评的噪声预测结果;可使公众更加方便、直观地了解城市区域的噪声情况,提高公众的声环境保护意识;还可以发展成为声环境质量的预警预报的技术手段。

1、噪声地图的组成和建立

噪声地图是一项系统工程，其组成包括地理信息系统、声学模型系统、校验系统、显示管理系统，以及后台相应的数据库。

图1是噪声地图系统的组成架构。各类地理信息在GIS系统中整合成地理信息库，结合声源信息数据库在计算系统中通过数据解析、声学算法、预测模型和计算管理等，再经过外部实测数据校验，建立完整的噪声地图数据库，然后将各类数据库集成开发噪声地图管理系统平台，最后利用系统实现数据查询、分析、措施实施、规划建议、预测和管理等功能。

图2是噪声地图结构拓扑图。主要由“输入—计算—输出”三大部分构成，声源信息结合地理信息输入至计算服务器中进行运算，同时外部监测站的实测数据通过传输网络也进入服务器用于校验计算数据，最后通过服务器输出数据库和相应的噪声地图。

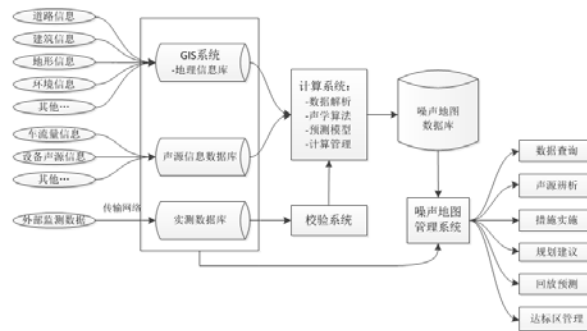


图1 噪声地图系统组成框架
Fig.1 Framework of Noise Mapping

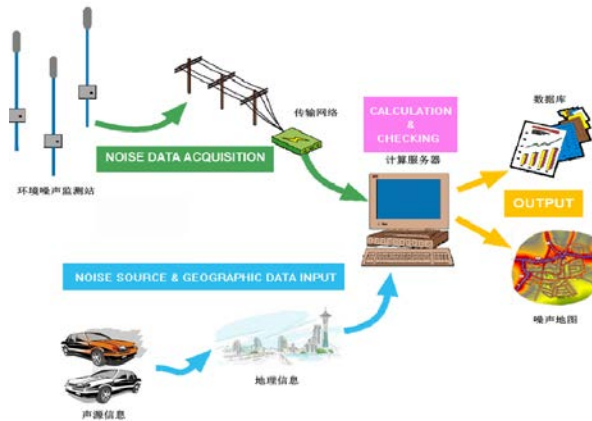


图2 噪声地图结构拓扑图
Fig.2 Structure Topology of Noise Mapping

利用地理信息系统可以将各类地理信息分层显示，并建立数据库。地理信息系统在噪声地图中的作用主要包括：提供标准的数据平台，使系统内各类数据可以相互关联；整合各类数据资源，如地理信息、噪声信息、人口信息等，进一步对环境、土地利用等问题开展综合分析；依托 WebGIS 技术可以将噪声地图结果对外发布，使用户可以获取相关的信息。

基于上述原理，我们开发了环境噪声管理系统软件（ver1.1.1）



2、系统介绍

1、核心计算软件

声学模型系统是噪声地图的核心，在噪声地图制作中一般采用成熟的噪声计算软件，也可自主开发（需经权威部分验证、认可），计算原理遵循声波在空间传播规律^[2]，并考虑声源的指向性以及声能量在空间中的衰减等因素。本研究采用的Cadna/A计算模型主要依据ISO、RLS等标准，并采用专业领域内认可的方法进行修正，能够提供复杂的声学计算功能，计算精度经德国环保局和我国环保部认可，得到广泛应用。XL模块是专门适用于大城市噪声地图的计算工具，也符合欧盟指令的相关技术要求。XL模块为处理城市噪声地图提供了很多便捷的特性。

2、输入系统

利用城市地图，建立三维的城市地理信息系统，其中包括地理信息、噪声信息、人口信息等内容，该部分内容只需每年更新一次。

城市固定噪声源噪声以实测与环保系统污染源调查及环境保护验收数据信息相关联，作每年不定期修正。

实时交通类数据，包括道路流量、车种比，轨交、火车班次等的输入，这些数据经数据库软件校核后被自动进入核心软件进行计算。

建筑施工噪声以监控噪声数据实时自动进入系统。

3、校验系统

本系统采用城市固定环境噪声监控点的噪声数据与配备的流动噪声监测站发回的环境噪声数据与计算数据进行校验，这种情况只对昼间等效声级及夜间等效声级进行校验，这与国标相一致。

4、输出系统

系统可以输出三种噪声地图型式：一定时间间隔（半小时、小时等效声级）环境噪声动态图；与国标相对应的昼、夜间等效声级图；表示一个城市长期声环境质量变化趋势图（年等效声级图或年声级变化曲线图），该类图可以作为预测预报图。

噪声地图可以以二维、三维或动态的方式显示。平面二维显示最为普遍，可提供全面的区域噪声分布情况，了解主要的影响区域，判断声源位置，并进行达标分析，此类显示方式一般用于了解区域昼夜平均的噪声影响程度，而不反映即时或短期的噪声影响。三维立体显示适合建筑密度大、楼层高，且需要了解不同楼层受影响情况的区域，系统将声学模型与三维GIS模型相结合可以建立基于三维GIS的噪声地图^[3]，由于实现三维立体建模和计算过程相对复杂，可作为城市噪声地图的辅助显示技术。动态显示的方式适合噪声起伏较大、变化趋势明显的情况，可以按需设置的更新频率，动态显示对声源信息要求较高、技术复杂且难以对照标准，一般用于演示局部区域的声级变化情况。

3、主要管理功能的介绍

为了充分实现噪声地图的环境管理功能，本研究自主开发了相关管理系统，并试用于典型区域，从而研究基于噪声地图的声环境管理的方法。

试验以上海某典型区域为例，该区域包含高架道路、地面主干道、次干道、城市支路、高架轨

道交通等多种交通形式，工厂企业和高层/多层住宅穿插其中，总体而言，该区域地理布局和声源特性较为复杂，作为噪声地图试验区具有一定的代表性和典型性。

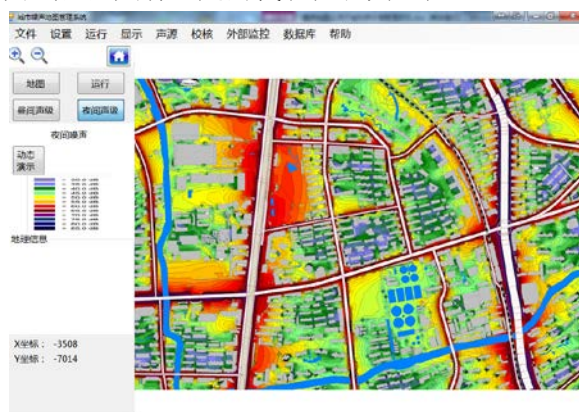


图3 噪声地图管理系统

Fig.3 Management System of Noise Mapping

3.1 数据库信息查询

系统集成区域地理信息、声源信息以及噪声数据信息，后台建立信息数据库，并在系统中读取并显示。系统建立并可查询的数据库包括建筑（住宅、商务办公、工业企业）信息数据库、道路/水系/轨道交通信息数据库、声源信息数据库、网格声级数据库和声源贡献数据库、高层住宅立面声级数据库等，并具有数据库更新和扩充功能，以方便后续调整和补充数据。

3.2 噪声信息显示与查询

系统包括区域范围内昼间和夜间时段噪声分布情况，并以计算云图的形式显示，可以从整体上直观反映噪声分布情况，掌握高噪声区域、判断超标区和达标区、比较昼夜噪声变化情况。

3.3 噪声贡献量分析

在噪声管理和治理中，仅仅知道单一的声级值是不够的，由于声源的组成过于复杂，也很难通过实测的方法获取，这就需要噪声地图噪声贡献量分析功能。贡献量分析实质是噪声地图声源计算法的逆运算，即通过多个声源计算所得的总声级反推各声源的贡献声级。

例如，欲了解某小区A的声环境质量，以便评估达标小区及采取噪声治理措施，通过系统查询小区声级最高处略有超标，噪声源为周边4条道路，分析噪声贡献量可知，主要污染源为西侧高架道路，因此只要控制高架路噪声即可确保小区噪声达标，据此可针对高架路采取声屏障等防治措施。

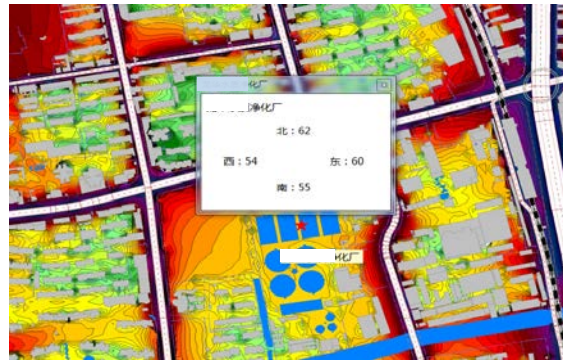


图4 噪声地图中噪声贡献量分析

Fig.4 Noise Contribution Analysis in Noise Mapping

3.4 达标区及厂界噪声查询

噪声地图可以直观的了解了居住小区边界与工业企业厂界的噪声情况. 下图5所示为某工厂企业的厂界噪声查询。



3.5 措施效果分析

噪声地图系统利用声学计算功能能够较好地分析声屏障等工程性措施的效果，系统可以反复演算不同组合的措施和不同尺寸外形，直至达到满意的效果，这就使工程措施更具有有效性。

下图6所示为采取措施后在某小区A相同位置的声级，可见对主要贡献源采取声屏障措施后降噪效果非常明显，高架路对该处的声级贡献值显著下降，从而使小区实现声环境达标。



图6 噪声地图中措施效果分析

Fig.6 Effect Analysis of Noise Reduction Measures in Noise Mapping

下图7为道路一侧采取措施前后的声级分布的变化情况，对比传统的措施效果分析，利用噪声地图系统可以实现不同尺度措施的效果演算和显示，可以为噪声治理工程设计和声环境管理提供充分的理论依据。

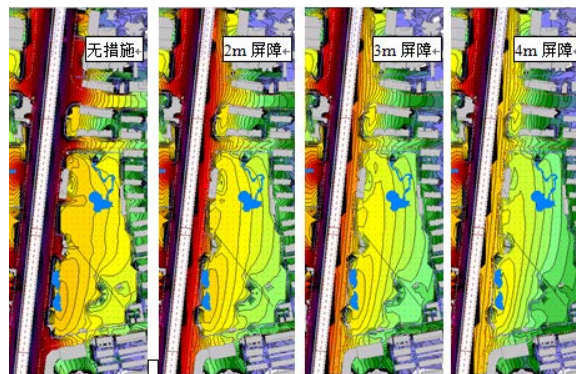


图7 不同尺度措施的效果演算

Fig.7 The Effect of Different Scale Measures in Noise Mapping

3.6 立面声级分布

随着城市区域高架道路的密集，噪声呈现出立体声场分布的特点，对于高层住宅建筑而言底层往往并不是受噪声影响最大的位置，这就需要了解高层建筑的立面声级分布，以更为合理地分析住宅实际受影响情况。通过噪声地图系统可以建立受关注建筑各立面声级数据库，并在系统中显示和分析建筑立面声级情况。

3.7 规划用地的环境适宜性分析

噪声地图管理系统不仅可以显示、分析和管理建成区的噪声影响，还可以为城市中的未建成区域提供声环境适宜性分析。下图8为区域内相距不远的两处规划用地，通过噪声地图管理系统，可以直观地了解两个地块不同的噪声影响程度，1#地块平均声级要比2#地块高约5dB(A)。据此，规划部门可以根据噪声敏感程度在不同的地块布置相应功能的建筑，比如在1#地块宜设置商业类建筑，2#地块宜设置办公居住类建筑。因此利用噪声地图管理系统可以在规划阶段避免噪声污染影响。

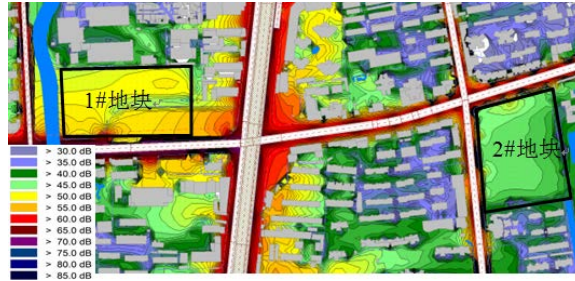


图8 规划地块声环境适宜性分析

Fig.8 Noise Analysis of Planning Area in Noise Mapping

3.8 应用前景

噪声地图是在以计算为主的基础上建立的，因此可以实现噪声的回顾和预测功能。噪声回顾有助于噪声污染投诉事件的处理，可以确定投诉点位置当时的声级以及主要污染源，并进行后续处理。而通过噪声预测可以事先了解可能产生的噪声污染，便于规划布局和实施预防措施，还能进一步实现声环境的预警和预报。

4、结束语

噪声地图以其直观、便捷、高效的特性在城市声环境管理中起到越来越重要的作用。除此之外，噪声地图提供了一种声环境质量的预警预报技术；也有利于公众更为直观地了解整个城市区域和其所居地的声环境状况，参与管理和监督；同时也可以为城市总体规划、交通发展、噪声污染控制提供科学决策依据。

参考文献

- [1] European Parliament and Council. Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise.2002,189:12-25
- [2] 马大猷, 等. 噪声与振动控制手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. 29-33.
- [3] 宁方立, 王康. 基于三维 GIS 的城市高架环线噪声地图研究[J]. 电声技术, 2010, 9: 68-70, 75.

全采光隔声通风窗在上海大面积应用

The application of transparent ventilative soundproof window in Shanghai

张恒¹, 张明发², 刘耀芳³

ZHANG Heng¹, ZHANG Ming-fang², LIU Yao-fang

(上海中华声学装备有限公司, 上海 200070)

(Shanghai Shen Hua Acoustic Equipment Co., Ltd. Shanghai 200070)

Abstract: Improve and control the road traffic noise has become an urgent requirement for urban residents. Installing the transparent ventilative soundproof window along the sides of the road is a very effective measure to reduce traffic noise and to make up for the limitations of using sound barriers to control traffic noise. At present, the products have been widely used in Shanghai and receive the high praise from residents along the road.

Keywords: Highway; Traffic noise; the transparent ventilative soundproof window; Energy conservation; environmental

摘要: 改善和控制道路交通噪声已成为城市居民的迫切要求, 在道路交通沿线二侧居民住宅安装全采光隔声通风窗是一种非常有效的降低交通噪声的措施, 弥补了运用声屏障来控制交通噪声的局限性。目前, 该产品已在上海广泛采用, 得到道路交通沿线居民的一致称赞。

关键词: 高速公路; 交通噪声; 全采光隔声通风窗; 节能; 环保

1 引言

随着城市建设的快速发展, 铁路、轨道交通、高架道路、高速公路等公共交通也飞速发展。人们的出行便捷了, 生活节奏快了, 然而也随之带来了烦恼—交通噪声危害。

设置道路声屏障是国内外普遍采用的控制道路交通噪声的一种基本措施。上海 90 年代就开始在南北高架上运用声屏障至今已有 20 多年了, 声屏障也随之升级换代。从第一代直立反射型声屏障一直到第六代的全封闭声屏障的运用 (见下图), 吸声材料也不断更新换代。声屏障效果的局限性显现而出。

1.1 对于建筑密度较高的城市中心区, 则受到发展用地紧张及其它诸如交通安全、环境、城市景观等因素的制约, 设置声屏障的可能性较小。

1.2 对于城市高层住宅, 声屏障的作用仅能体现在较低的几个楼层, 对于大部分楼层来说, 常规的声屏障则不起作用。

1.3 常规的声屏障使道路沿线居民住宅接受到的噪声级仅有 7-10dB。

1.4 道路交通声屏障的五种形式:

反射形隔声屏障、圆弧形吸隔声屏障、防绕射吸隔声屏障、全封闭吸隔声屏障、直立型吸隔声屏障

随着城市大量高层住宅的出现, 降低交通噪声的影响是噪声控制面临的一门新课题。上海中华声学装备有限公司与同济大学声学研究所共同设计了一种既能采光、通风, 又具有较高隔声量的全采光隔声通风窗, 它可以降低交通噪声对住宅立面的辐射。该产品现已在上海广泛使用, 深受广大用户的青睐。

2 全采光隔声通风窗介绍

2003 年上海中华声学装备有限公司与同济大学声学研究所共同开发完成全采光隔声通风窗新产品。

2005 年获国家专利（专利号：2005 2 0046599.9）。2006 年 2 月被上海市高新技术成果转化办公室认定为上海市高新技术成果转化项目。2007 年建设部住宅产业化促进中心颁发了全采光隔声通风窗列为《国家康居示范工程选用部品与产品证书》。

2009 年 7 月，上海市建材业市场管理总站以沪建市管[2009]63 号文的形式发布通知：由上海中房建筑设计院有限公司主编的《中华全采光隔声通风窗》应用图集，经有关专家审查，现批准为上海市建筑产品推荐性应用图集。该图集号为 2009 沪 J/T—703。2012 年该图集有效期满，经上海中房建筑设计院有限公司与中华公司等单位重新修订后，上海市建材业市场管理总站批准后该图集号更新为 2012 沪 J/T—703。

2.1 全采光隔声通风窗基本原理

全采光隔声通风窗局部采用双层窗结构，双层窗结构中间是消声、通风通道，安装特指的透明微穿孔吸声薄膜。使用时只要打开双层结构外层的一扇窗，内侧窗则保持关闭，这样就会把微风通过消声通道送入室内。一般自然通风开窗角度小于 25° 。声音在进入消声通道时先经过体积扩张抗性消声腔，消除部分噪声（开窗角度小，内外层窗形成抗性消声腔），然后声音通过消声通道、多层微穿孔吸声材料再次吸声使进入室内的声音达到控制要求。由于吸声材料采用透明微穿孔薄膜材料，所以该窗具有全采光功能。在削弱声音的同时，空气通过自然通风的方式由消声通道进入室内，实现了既隔声又通风的功能。

（1）透明通风消声装置

透明通风消声装置选用高度为：500mm、长度为 500—1000mm、宽度为 200mm。通风消声装置的设计左右外壁为 5+9+5 中空玻璃、上下外壁为铝合金板、消声片为透明的 1mm 厚共聚酯薄板上分别穿 1.5%、3%微孔并制作成消声通道，安装在双层窗的空腔中。该消声装置设计成模块式，具有耐老化、消声性能好、采光性能好，造型简洁、安装方便、可拆卸，利于清洗。

（2）窗框、窗扇

窗框、扇型材分别为隔热铝合金和未增聚氯乙烯 PVC—U 两大类。其中铝合金平开窗采用 70、80 系列，塑钢窗采用 50、58、60 系列。

隔热铝合金型材符合 GB5237.6 的规定。型材的壁厚 $\geq 1.5\text{mm}$ 。塑钢型材符合 GB/T8814 的规定。平开窗主型材壁厚为 2.5mm。玻璃选用符合《建筑玻璃应用技术规程》（JGJ113）规定的 5+9+5 中空玻璃。

（3）微型风机

微型风机规格有两种：外形尺寸为：70*70（92*92）mm、25mm（厚），电压 12（220），V，电流 0.08（0.07）A，转速 2500（1900）rpm，通风量 37.2（46.7） m^3/h ，自身噪声不大于 22dB（A），功率为 0.96（15.4）W，重量 61（230）g。两种风机均不能调速。如图：



（4）五金件

五金件选用质量好的品牌产品，也可以根据用户需求配置遥控开窗装置或通风器。

2.2 全采光隔声通风窗规格

全采光隔声通风窗系列产品根据不同的窗洞、隔声量、使用场合要求设计了三种（A、B、C）基本窗型。同时可根据住户窗不同的窗洞尺寸进行非标设计。

A 型窗一般采用上悬双层结构、四级消声设计，形成特殊型材空腔的消声、通风通道，气流方向为横

向。具有结构紧凑、隔声量大的特点（见图）。

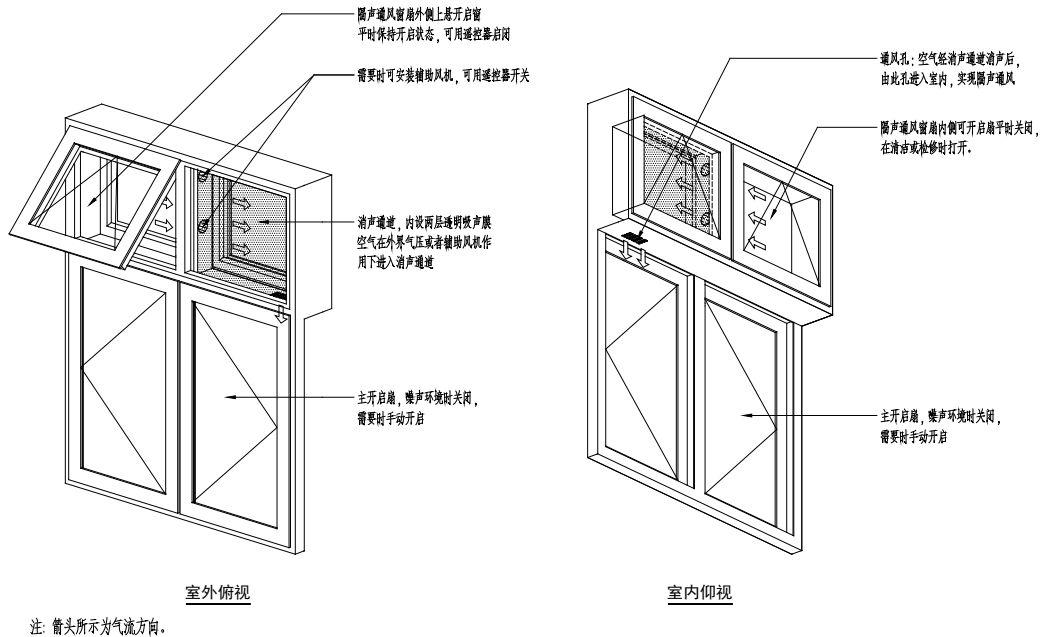
B 型窗一般采用下悬双层结构，B 型窗的技术数据与 A 型窗相同。

C 型全采光隔声通风窗一般采用侧悬（左侧、右侧或双侧）双层结构，二级消声设计。消声、通风道夹在两层窗的玻璃空腔内，气流方向为纵向。

A 型窗：隔声量 R_w ：自然通风状态下计权隔声量为 27 - 30dB，通风通道关闭状态下计权隔声量为 33 - 38dB。

自然通风时通风量：35 - 37 立方米/小时，（室外风速 2.5 - 3 米/秒）。

机械通风时通风量：50 - 70 立方米/小时，（室外风速 0 米/秒、风机功率 16 瓦）。



在实际应用中除 3 个基本型外，可以根据用户的需求设计成组合式结构，使产品外型美观、结构合理、性能优越，更好地满足用户的需求。

2.3 全采光隔声通风窗主要技术数据测试

2.3.1 隔声测试

全采光隔声通风窗隔声测试在上海同济大学声学研究所建筑构件空气声隔声量的实验室测量。被测试件通风隔声窗规格：2050*1450mm，窗体材料为：隔热断桥铝型材。测试时处于自然通风状态。测试仪器为：HP3569A 双通道实时分析仪，N-118 声级计，GRAS 42AB 校准器。声源室容积为：108m³，接受室容积为：108m³。依据 GB/T50121-2005 的评价标准测得计权隔声量： $R_w=29\text{dB}$ ；平均隔声量： $R_a=25\text{dB}$ 。

表 1 隔声测试
Tab.1 Sound test

频率 (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500
R_w (1/3 倍频程 dB)	18.3	12.2	19.8	16.4	17.8	24.6	26.3	22.6
频率 (Hz)	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
R_w (1/3 倍频程 dB)	26.5	27.8	27.8	29.1	30.7	31.5	32	33.6
R_a 平均隔声量 (dB)	25							

2.3.2 通风量测试

全采光隔声通风窗通风测试由同济大学教授在上海市中华声学装备有限公司厂区内模拟室外自

然风速自然通风量、机械通风量进行测试。被测试件通风隔声窗规格：1200*1500mm，窗体材料为：隔热断桥铝型材。检测仪器仪表：QDFS 型多点数字风速仪；量程：0.01—30m/s；最小分度值或精度：0.1m/s。

表 2 自然通风检测结果

Tab.2 Natural ventilation test results

自然风速 (m/s)	1.68	2.28	2.89	3.34	3.7	4.2	4.88	5.24	5.88	6.59	7.22	7.92
通风量(m ³ /h)	32.0	34.7	36.2	38.6	40.9	51.6	54.3	56.9	57.9	62.03	65.4	67.6

表 3 机械通风检测结果

Tab.3 Mechanical ventilation test

工况	两个风机			三个风机		
开窗度数 (度)	45	30	15	45	30	15
通风量(m ³ /h)	62.8	55.6	51.4	69.3	64.1	61.9

根据检测得出以下结论：

- (1) 2.89 m/s以上时，全采光隔声通风窗的通风量超过 36.2 m³/h以上。
- (2) 随着室外风速的增加，全采光隔声通风窗的通风量增加。
- (3) 机械通风工况条件下，全采光隔声通风窗全开状态下的通风量超过 120 m³/h。
- (4) 增加风机的数量可以提高全采光隔声通风窗的通风量。
- (5) 开窗度数对全采光隔声通风窗的通风量有影响，对于在两个风机和三个风机工况下，开窗度数对风量的影响不同。
- (6) 如果室外有风速的时候开通机械通风，通风量将大于检测的数据。
- (7) 全采光隔声通风窗的机械通风量与三级左右的室外自然风速时的通风量相当。

2.3.3 抗风压性能、气密性、水密性、保温性能测试

全采光隔声通风窗经上海市质量监督检验技术研究院、国家轻工业建筑五金质量监督检测中心检测：

隔热断桥铝型材全采光隔声通风窗的抗风压性能属第 5kPa 级，气密性能属第 5 级，水密性能属第 5 级，保温性能分级为 6 级。

塑钢型材全采光隔声通风窗的抗风压性能属第 5kPa 级，气密性能属第 4 级，水密性能属第 5 级，保温性能分级为 9 级。

3 全采光隔声通风窗在上海大面积应用

3.1 公司在 2007 年将全采光隔声通风窗投入小批量生产，并在在共和新路主干道一侧 4703 弄居民小区、康城小区、6 号线车辆段驾驶员公寓、2 号线东延伸车辆段办公公寓等交通噪声较严重的区域的居民家里及办公室安装全采光隔声通风窗，普遍反映应用该全采光隔声通风窗效果良好，解决了长期不敢开窗的困扰。工程实例照片：



共和新路居民小区



康城居民小区

3.2 随着北翟路高架的运行使用，地处北虹路 285 弄《天申大楼》一栋 15 层高楼的居民遭受中环高架、北翟路高架的双重交通噪声的困扰。虽然高架两侧装有声屏障，但居住四楼以上居民无法休息、就寝。为此该楼居民请求政府协调解决。2009 年本公司承接了为时 5 个月的《天申大楼全采光隔声通风窗》改造项目。我们按照每个居民家里不同的窗型进行量身定做全采光通风隔声窗。隔声通风窗安装以后，194 户居民们一片称赞。901 室的陈阿姨激动的说：“以前我们家里窗关着噪声也很大，平时要大声讲话，晚上觉也睡不着。通风隔声窗装好了以后几乎听不到交通噪声，晚上也可以睡个安稳觉了。窗型既美观漂亮又环保。现在这个小区房价也上涨好几千元。”



北虹路 285 弄《天申大楼》



3.3 举世瞩目的 2010 年中国上海世博会在上海召开，城市最佳实践区“沪上-生态家”是代表世博会的唯一实物展示案例。“沪上-生态家”作为一幢展、住结合的示范住宅楼，以“关注节能环保，倡导乐活人生”为主题，展示具有中国和上海特色、引领未来发展趋势的生态住宅技术集成方案。我司有幸为“沪上-生态家”提供西立面全采光隔声通风窗的方案设计、产品供应、安装调试。世博会展示期间，得到了领导、专家及参观者的一致称赞。

3.4 茂盛小区位于虹桥机场二号航站楼附近，该跑道起降的飞机产生的巨大飞机噪声对居民的生活产生了严重的影响。受上海房地产科学研究所委托，我公司先后两次到茂盛小区进行 24 小时飞机起降时的噪声监测，飞机噪声 A 声级最大值为 100dB，平均值为 70.5-83.7 dB。在对噪声频谱分析后，我们提出了对 85 号楼卧室安装双层隔声通风窗、进户门安装隔声门、走道、厨房间安装卫生间安装单层隔声窗治理方案。方案实施后在房间里基本听不到飞机的轰鸣声，得到了市建交委的称赞。

3.5 为缓解本市高速交通噪声对公路沿线居民的生活影响，体现“城市，让生活更美好”的世博理念，上海市建交委颁发了《关于落实迎世博 600 天行动高速公路噪声治理项目中隔声窗措施的通知》，通知明确：在经专家评审确定范围内的沿线居民住宅安装中华公司生产的全采光隔声通风窗。为此我们先后为 A60 沪杭高速、G1501、A16、A4、S4 等高速公路沿线两侧居民住宅安装全采光隔声通风窗，涉及的区有：青浦区、金山区、松江区、奉贤区、浦东新区及嘉定区。

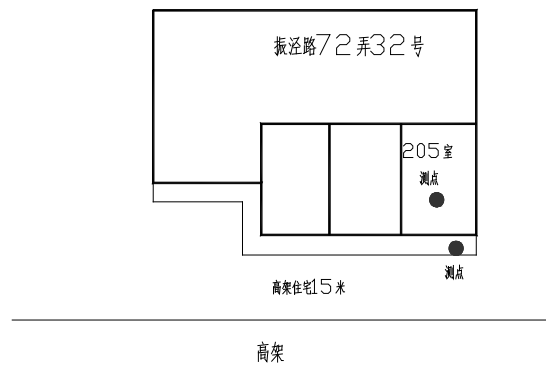


青浦徐泾镇一农户住宅

4 现场效果测试

2010年11月23日，我们对青浦区徐泾镇振泾路72弄32号居民家已装好的隔声通风窗内外两端 Leq 声压级差进行了现场测试。测量仪器选用：丹麦 B&K2250 噪声测量分析仪、测试前经 CASELLA CEL-110/1 校准器校准。

测点布置：



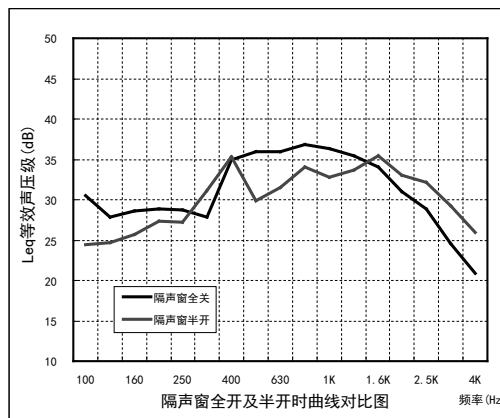
205 室隔声通风窗测量结果见表 4 表 5。

表 4 隔声窗全关时隔声量

1/3 倍频带中心频率 f /Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630
背景噪声 Leq 等效声压级 dB	64.3	62.9	61.8	61.3	63.4	62.4	62.1	60.3	58.6
205 客房内 Leq 等效声压级	33.8	35.0	33.2	32.4	34.7	34.5	37.1	24.4	22.7
隔声声压级改善 dB	30.5	27.9	28.6	28.9	28.7	27.9	35.0	35.9	35.9
1/3 倍频带中心频率 f /Hz	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	隔声量 (dB)	
背景噪声 Leq 等效声压级 dB	58.2	58.3	56.1	53.8	50.8	48.2	44.4	31.8	
205 客房内 Leq 等效声压级	21.4	22.0	20.7	19.9	19.7	19.4	19.9		
隔声声压级改善 dB	36.8	36.3	35.4	34.0	31.0	28.8	24.5		

表 5 隔声窗半开时隔声量:

1/3 倍频带中心频率 f /Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630
背景噪声 Leq 等效声压级 dB	64.3	62.9	61.8	61.3	63.4	62.4	62.1	60.3	58.6
205 客房内 Leq 等效声压级	39.9	38.1	36.1	34.1	36.2	31.1	26.9	30.4	27.1
隔声声压级改善 dB	24.4	24.7	25.7	27.3	27.2	31.2	35.3	29.9	31.5
1/3 倍频带中心频率 f /Hz	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	隔声量 (dB)	
背景噪声 Leq 等效声压级 dB	58.2	58.3	56.1	53.8	50.8	48.2	44.4	31.1	
205 客房内 Leq 等效声压级	24.2	25.5	22.4	18.3	17.7	16.1	15.1		
隔声声压级改善 dB	34.0	32.8	33.7	35.5	33.0	32.1	29.2		



通过对青浦区徐泾镇振泾路 72 弄 32 号居民隔声通风窗现场隔声实测结果表明，隔声通风窗全关时等效 A 声级隔声量为 31.8dB，隔声通风窗半开时等效 A 声级隔声量为 31.8dB，符合并优于隔声通风窗隔声量设计要求。该居民高兴的对我们说：“我在这儿住了那么多年了，过去高速公路上车辆开过的时候窗框子都打颤，屋里屋外一样吵，夜里还睡不好觉。现在好了，这种新窗子有双层玻璃，关上后安静了许多，又有新风进来，我们再也不用为交通噪声而烦恼了。”

5 结论

全采光隔声通风窗采用隔热断桥铝型材和塑钢型材两大类型材，并选用中空玻璃，保温隔热效果好，符合节能要求。消声通道内的微穿孔板采用具有全采光透明功能，且没有二次污染、抗氧化性能好的共聚聚酯薄板材料，为绿色环保型产品。该产品造型美观、结实耐用且安装方便、易于清洁。弥补了用声屏障控制交通噪声的所带来的缺陷，解决了道路交通沿线居民不敢开窗的困扰，提高了室内环境质量。为城市建筑控制公共交通带来噪声提供借鉴。

参考文献

- 1 王季卿. 王季卿建筑声学论文选集 [C]. 上海: 同济大学. 2001. 4
- 2 吕宇恒, 等. 噪声与振动控制设备及材料选用手册 [M]. 北京: 机械工业出版社. 1999. 5

提高阻抗管测量频率上限的研究

Extended Frequency Range of Impedance Tube Measurement

冯善勇^a, 盛胜我^b

FENG Shanyong^a, SHENG Shengwo^b

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

(b, 同济大学 声学研究所, 上海 200092)

(a, Zhangkuisheng Acoustics Design & Research Studio, Shanghai XianDai Architectural Design (Group) Co. Ltd, Shanghai 200041)

(b, Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A new method for extending the frequency range of impedance tube measurement is proposed in this paper. The method is based on decomposing and measuring higher-order mode waves in ducts and picking up (0, 0) mode of the incident- and reflected-wave for the material of uniform surface impedance. Therefore the normal-incidence absorption coefficient and the acoustic impedance can be determined. Compared with previous research, the limit of cut-off frequency in the tube can be avoided and the frequency range of measurement can be increased greatly. Finally, the verification test using above method is carried out by adopting the single-microphone axial transmission system in a large vertical impedance tube. From the test results, the upper limit frequency of the tube is extended from 280 Hz to 2 000 Hz or higher.

Keywords: cut-off frequency; modes decomposition; duct; impedance tube measurement; acoustic properties

摘要: 提出了一种提高阻抗管测量频率上限的新方法。该方法针对表面阻抗均匀的材料,通过对管道内高次模式声波的分解和测量,拾取对应于法向入射波与反射波的(0, 0)模式,获得法向吸声系数和法向声阻抗率,从而使测量不再受管道截止频率的限制,大幅度提高管道内的测量频率上限。文中介绍了利用单传声器轴向传动获取信号,在直立式阻抗管内进行材料声学特性的测量。结果表明,阻抗管原有的截止频率为280 Hz,采用本文提出的测试方法,可使测量频率上限提高到2 000 Hz 甚至更高。

关键词: 截止频率; 模式分解; 管道; 阻抗管测量; 声学特性

1 前言

采用阻抗管进行材料声学特性的测量已广泛应用于工程实践中。国内外已有相应的标准^[1-4]。最常用的是驻波比法和传递函数法。1953年, Lippert提出了驻波比法^[5], 通过一个可移动的传声器测量管道中驻波声压极大和极小处的声压振幅, 以及确定驻波声压第一极小值离材料表面的距离, 得到材料的法向反射因子、法向入射吸声系数和声阻抗率。1977年, Serbert和Ross提出了双传声器传递函数法^[6], 传递函数法是在管道内靠近待测材料的两个合适位置测量声压, 求得两个传声器信号的声传递函数, 用此计算材料的法向入射声学特性。1980年, Chung 和Blaser完善了传递函数法^[7,8], 简化了两测点之间传递函数计算方式。1984年Fahy^[9]和1986年Chu^[10]对传递函数法中两测点的位置的选择作了进一步的研究。

这两种方法均需要避免管道中出现非平面波的简正波模式, 其允许使用的频率上限取决于管道的横截面尺寸。以常用的圆形阻抗管为例, 一般直径是10 cm左右, 允许使用频率的上限为1 900 Hz。如需测量更高的频率段, 则要换用直径更小的细管, 使测量变得非常复杂。这种阻抗管的另一个实用上的缺陷是, 由于管径很小, 因此采用的试件面积非常有限。同时, 这种管道不能测试一些较大的声学构件。因此, 在

管道内扩展材料声学性能测量的频率范围显得十分重要。

作者在前文^[11]曾提出了在管道内分解与测量高次模式声波的原理和方法。在此基础上,本文针对表面阻抗均匀的材料,提出了一个在管道中测量其法向声学特性的新方法。相对于传统的驻波比法和传递函数法,此方法的容许使用的频率范围不再受管道横截面尺寸的限制,极大地扩展了阻抗管的测量频率上限。

2 基本原理

在阻抗管中,当声源激发频率超过截止频率时,管道内存在大量高次模式声波,通过单传声器在管道内沿轴向传动获取声信号,能够分解与测量得到管道中的所有高次模式声波的声压幅值与相位^[11]。本文将此运用于管道内材料声学性能的测量。对于表面阻抗均匀的材料,通过拾取管道中入射和反射方向传播的(0,0)次模式的分量,可以得到待测材料在截止频率以上时的法向声学特性。

2.1 单传声器轴向传动分解与测量管道内高次模式的原理^[11]

利用数字声源信号可完全重复的特点,精确地同步控制单个传声器在管道中均匀传动,通过处理在传动过程中获取的声压信号,使其等效于由一个线形传声器数组测量所获得的结果。这种方法也可以叫做 RTS (Repeated Translation System) 系统。

声源为重复激发的伪随机声信号,重复周期为 T , 重复次数为 M , 总的时间长度为 $M \times T$, 在单个周期 T 中包含有效的声信号以及静音。传声器沿管道步进传动,步进周期为 T 。对声源系统和接收系统进行同步控制,保证传声器在每个测点位置滞留的时间内,声源刚好激发有效的声信号。

假设在整个测量过程中,传声器测得的声信号为 $p(t)$, 将其进行连续性分段处理:

$$p_q(t) = p[(q-1)T + t] \quad (1)$$

其中 $q = 1, 2, \dots, M$, 并且 $0 < t \leq T$, 即可以得到 M 个持续时间为 T 的声压信号 $p_q(t)$, 所得的结果等效于沿管道均匀分布的 M 个传声器组成的线形数组实时测量所接收的信号。利用这 M 个测点的声压信号可以分解管道中存在的高次模式。

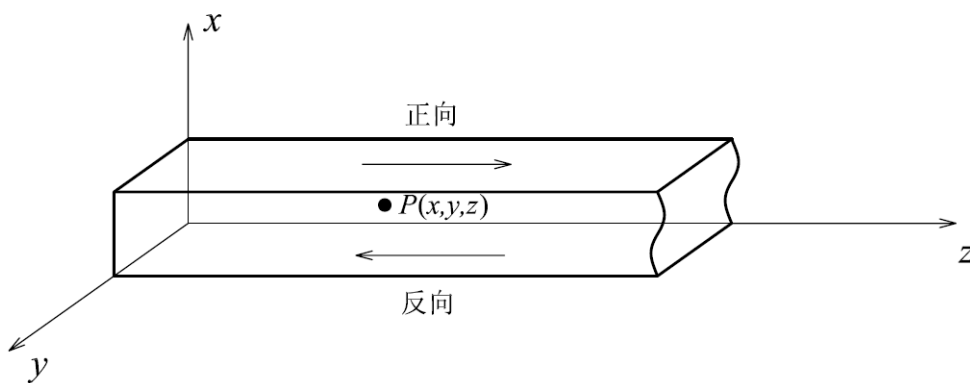


图1 声波在管道内传播示意图

当声源激发频率高于截止频率时,管道中会存在大量的高次模式声波。此时,管道内的稳态声场是沿管道正反方向传播的所有模式声波的迭加。如图1所示,在一个刚性壁面的方形管道中,管内任意点的声压 $P(x, y, z)$ 可写为:

$$P(x, y, z) = \sum_m \sum_n \psi_{mn}(x, y) (A_{mn} e^{jk_z z} + B_{mn} e^{-jk_z z}) \quad (2)$$

其中 $j = \sqrt{-1}$, A_{mn} 和 B_{mn} 分别为 z 轴正方向和反方向传播的各个模式声波的复系数, m 和 n 是相应的模数, k_z 是轴向的波数, $\psi_{mn}(x, y)$ 由边界条件决定。若坐标原点位于方形截面的一个顶点,则有:

$$\psi_{mn}(x, y) = \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{n\pi}{a}y\right) \quad (3)$$

式中： a 是管道的边长。轴向的波数 k_z 相应为

$$k_z = \sqrt{\left(\frac{\omega}{c_0}\right)^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2} \quad (4)$$

式中： $k = \omega / c_0$ 是波数， ω 是角频率， c_0 是声传播速度。

假设管道中存在的所有稳态的传播模式数为 N ，则式 (2) 中包含 $2N$ 个未知系数 A_{mn}, B_{mn} 。传声器的测点数为 M ，且 $M \geq 2N$ ，应用所有测点的声压值，可以形成方程组：

$$\begin{cases} P_1 = \sum_m \sum_n \psi_{mn}(x_1, y_1) (A_{mn} e^{jk_z z_1} + B_{mn} e^{-jk_z z_1}) \\ P_2 = \sum_m \sum_n \psi_{mn}(x_2, y_2) (A_{mn} e^{jk_z z_2} + B_{mn} e^{-jk_z z_2}) \\ \vdots \\ P_M = \sum_m \sum_n \psi_{mn}(x_M, y_M) (A_{mn} e^{jk_z z_M} + B_{mn} e^{-jk_z z_M}) \end{cases} \quad (5)$$

式中： P_1, P_2, \dots, P_M 对应于传声器在各测点的声压。通过求解方程组 (5)，即可得到管内传播的正向波与反向波的复系数 A_{mn}, B_{mn} 。

由上述的单传声器模式分解法，只要满足 $M \geq 2N$ ，就可求得管道中存在的各高次模式声波的声压幅值和相位。其分解高次模式声波的数量与传声器步进传动的测点数量相关。原则上，只要增加测点数量就可以测得管道内存在的所有高次模式声波。

2.2 管道内材料声学特性的测量

当管道中一端放置扬声器，另一端放置待测材料时，通过求解方程组 (5)，可以得到管道中相对于材料表面入射和反射方向的高次模式复系数 A_{mn} 和 B_{mn} ($m, n=0, 1, 2, 3, \dots$)，其中 A_{00} 和 B_{00} 对应于 (0, 0) 次模式，即沿材料表面法向入射和反射的平面波，其它都对应于其他方向入射和反射的高次模式声波。

对于表面阻抗均匀的材料，(0, 0) 模式的入射声波只会转化为 (0, 0) 模式的反射声波，不会转化为其它模式的反射波，同时其它模式反射波也不会转化为 (0, 0) 模式的反射声波。通过拾取管道中入射和反射方向传播的 (0, 0) 次模式的分量，可以得到待测材料在截止频率以上的法向声学特性。材料的法向反射系数 r 可以表示为：

$$r = \frac{B_{00}}{A_{00}} \quad (6)$$

进而可以求出材料的法向吸声系数 α 和法向声阻抗率比 ε 。

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (7)$$

$$\varepsilon = \frac{1+r}{1-r} \quad (8)$$

式中： ε 为复数，实部是声阻率比，虚部是声抗率比。

在管道中，每一阶高次模式分量都对应于以某个入射角度传播的声波。利用上述的原理，如果拾取管道中其它某阶高次模式分量，即可以得到待测材料在相应入射方向下的声学特性。

3 实验

3.1 实验装置

本文所提出的测试方法能有效地提高阻抗管容许使用频率的上限。为了验证此方法的有效性，选取两个不同口径的管道，对同一种表面阻抗均匀的材料进行测试。在较大口径的管道中采用本文所提出的模式分解法，在较小口径的管道中采用传统的传递函数法。

较大口径的管道为一个刚性壁面的直立式方形管道，横截面的口径为 60 cm×60 cm，管道上端安置扬声器，下端放置待测材料。管道总长为 10 m，避开两端近场效应的影响，管道的有效测量距离为 7 m。管道的截止频率为 280 Hz。利用本文提出的单传声器轴向传动（RTS）模式分解方法，将传声器安置在管道横截面的中点，由精密步进电机驱动控制其沿轴向缓慢均匀移动，传声器测点步进移动的距离 d 为 4 cm，实验中沿管道可得到 160 个测点的数据。按目前的装置，可以将频率范围扩展到 2 000 Hz。原则上，只要增加传声器沿轴向移动的距离，或者减小步进的间距，则能够大幅度的拓展其测试频率的范围。

作为比较，采用的标准驻波管测量设备为 BK Type 4206，圆型管道的直径为 10 cm，测试方法是双传声器传递函数法，其工作的频率范围为 50-1 600 Hz。本文选取了多种材料作为测试对象，下面给出了其中一个典型的实验测试结果。

3.2 实验结果

图 2 和图 3 分别示出了两种方法测得的实验结果。

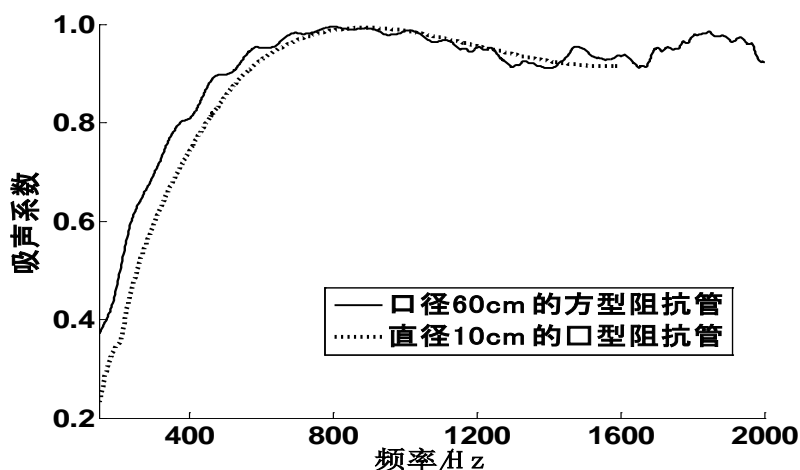


图 2 单传声器模式分解法和传统驻波管法测量的法向吸声系数比较

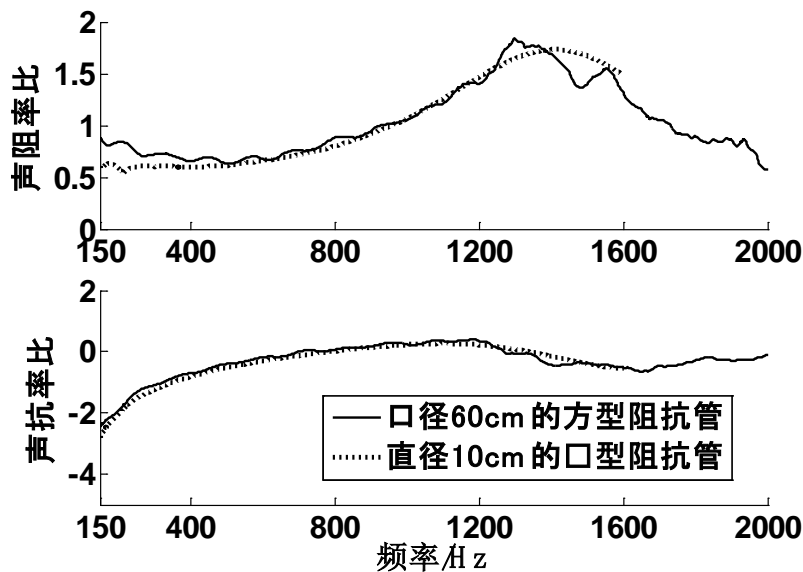


图3 单传声器模式分解法和传统驻波管法测量的声阻抗率比的比较

由图可见，采用单传声器模式分解法，在存在高次模式的管道中测得的法向吸声系数和法向声阻抗率数据，与采用双传声器传递函数法的结果相比较，两者符合良好。因此，证明了本文所提测试方法的有效性。实际测量中，较低频段的误差来源主要是传声器在管道横截面方向的定位精度尚不够高，可以通过改进装置进一步提高测量精度。

4 实际应用

通过上述管道内高次模式波的分解与测量，拾取零阶的入射平面波与反射波，即可在管道内测量材料法向吸声系数与声阻抗，而不受管道截止频率的限制。这样，在吸声材料的遴选与比较时，能够采用较大尺寸的试件样本，避免材料不均匀性带来的问题。一般商用的吸声材料与结构都以截面 60 cm×60 cm 为主，因此在边界 60 cm 的方形管道内，作较宽带带的测量具有显著的实用意义。

以下是一典型声学材料与结构的实例。待测产品是厚度为 8 cm 的多层复合结构吸声材料，每一层由相同特性的均匀材料构成，其表面阻抗均匀。应用本文提出的方法，在口径为 60 cm×60 cm 的直立式方形管道中进行法向吸声系数的测量，结果如图 4。由图可见，所测得的频率范围已远超管道的截止频率，涵盖了常用的全频带范围，基本满足了工程测量的需要。

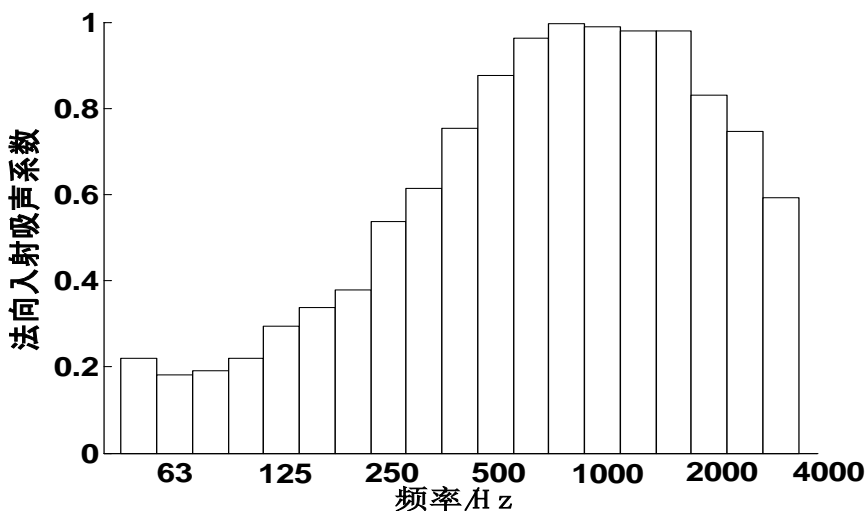


图4 材料 1/3 倍频程法向吸声系数

值得指出的是，管道中的高次模式数量会随着频率提高而显著增加。例如对于 60 cm×60 cm 的方形管道，当频率为 2 000 Hz 时，管道中存在 24 个模式声波；频率为 4 000 Hz 时，存在 88 个模式声波；而当频率为 8 000 Hz 时，则管道内将存在 330 个模式声波。分解与测量管道内声波的高次模式数量与传声器的步进测点数有关，虽然原则上只要通过增加测点数量就可以不断提高管道的测量频率上限，但从实际应用出发，因受实验装置硬件的限制，对于 60 cm×60 cm 的方形管道，目前允许频率上限取 4 000 Hz 较为合理。

5 结语

本文针对传统的驻波比法和传递函数法测量频率范围不能超过管道截止频率的限制，运用管道中单传声器轴向传动模式分解法，针对表面阻抗均匀的材料，通过拾取对应于法向入射和反射的零次模式测量值，从而得到材料的法向吸声系数与声阻抗。此方法可有效提高管道内允许使用的频率上限。通过对比实验，验证了其有效性。由于此方法可用于测量尺寸较大的材料，对于一般的声学材料与结构制品而言，具有很强的实用性。

利用单传声器轴向传动分解测量管道中高次模式声波，本文只拾取了其中入射和反射的 (0, 0) 模式分量，计算材料的法向声学特性。进一步，运用其它高次模式的分量，就可得到对应于其他入射方向的材料声学特性。

参考文献

- [1] GB/T 18696.1-2004, 声学 阻抗管中吸声系数和声阻抗的测量 第 1 部分: 驻波比法.
- [2] ISO 10534-1: 1996, Acoustics-Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes-Part 1: Method using standing wave ratio.
- [3] GB/T 18696.2-2002, 声学 阻抗管中吸声系数和声阻抗的测量 第 2 部分: 传递函数法.
- [4] ISO 10534-2: 1998(E), Acoustics-Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes-Part 2: Transfer function method.
- [5] Lippert W K R. The practical representation of standing waves in an acoustic impedance tube[J]. *Acustica*, 1953, 3: 153-160.
- [6] Seybert A F, Ross D F. Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1977, 61 (5): 1362-1370.
- [7] Chung J Y, Blaser D A. Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, 68 (3): 907-913.
- [8] Chung J Y, Blaser D A. Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. II. Experiment[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, 68 (3): 914-921.
- [9] Fahy F J. Rapid method for the measurement of sample acoustic impedance in a standing wave tube[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1984, 97 (1): 168-170.
- [10] Chu W T. Extension of the two-microphone transfer function method for impedance tube measurement[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1986, 80 (1): 347-348.
- [11] 冯善勇, 莫方朔, 赵跃英, 盛胜我. 利用单传声器分解和测量管道内的高次模式声波[J]. *同济大学学报*, 2012, 40 (8): 1276-1280

近場聲音全像術之解析度增強策略 Resolution-enhancing Strategies for Nearfield Acoustical Holography

白明憲、陳勁誠

Mingsian R. Bai, Ching-Cheng Chen

(台灣國立清華大學動力機械工程學系)

(Department of Power Mechanical Engineering, National Tsing Hua University, Taiwan)

Abstract: This study examines four reconstruction strategies with enhanced quality of Nearfield Acoustical Holography (NAH) based on Equivalent Source Models (ESM) and Basis Function Models (BFM). In practical applications where only patch array with scarce sensors are available, the ESM-based Interpolation (ESM-IP), Under-determined ESM (UD-ESM), Direct BFM (D-BFM) and BFM-based Interpolation (BFM-IP) are proposed to reconstruct source velocity with sound field interpolation. These methods were compared with the Direct ESM (D-ESM) method. In the ESM-based NAH, dense deployment of focal points realized by a virtual microphone technique is adopted to enhance the imaging resolution for the ESM-IP and UD-ESM. In the BFM-based NAH, basis functions including planar and spherical wave functions are used. Compressive Sampling (CS) is exploited in the BFM-IP and the D-BFM in light of convex optimization method. To validate the reconstruction strategies, numerical simulations were conducted for a baffled planar piston source and a baffled spherical piston source. Numerical results have shown that the ESM-IP and the UD-ESM provided better image quality in sound field resolution than the other two methods.

Key words: Nearfield Acoustical Holography, Equivalent Source Model, Basis Function Model, Compressive Sampling

摘要: 本研究檢驗四種基於等效聲源模型與基底函數模型之解析度增強策略於近場聲全息攝影術，由於在實際應用上能夠使用的感測器是有限的、ESM-based Interpolation (ESM-IP)、Under-determined ESM (UD-ESM)、Direct BFM (D-BFM) 和 BFM-based Interpolation (BFM-IP)被提出重建聲源表面速度藉由聲場內插的方法，並與基準的方法 Direct ESM (D-ESM)做比較，其中基於等效聲源模型之近場聲全息攝影術，將採用虛擬麥克風技術來增強聲場解析度。另一方面基於基底函數模型之近場聲全息攝影術中，基底函數則使用平面與球面波動方程式，壓縮取樣用於 D-BFM 和 BFM-IP 中按照凸規劃法架構去最佳化求解。數值模擬中將驗證兩種聲源模型，包含平面與球面屏障活塞聲源，數據顯示 ESM-IP 和 UD-ESM 能夠提供之重建優於其他兩類方法。

关键词: 近場聲全息攝影術; 等效聲源模型; 基底函數模型; 壓縮取樣

1 INTRODUCTION

In recent years, numerous approaches have been suggested for Nearfield Acoustic Holography (NAH). It frequently occurs in practical applications of NAH that only a limited number of microphones are available, which significantly compromises the reconstructed image quality and applicable frequency bandwidth. The main purpose of this paper is to demonstrate that, with some ingenious refinements, it is possible to enhance effectively the quality of the images reconstructed using the ESM-based NAH. Four reconstruction strategies termed the ESM-based Interpolation (ESM-IP), the Under-determined ESM (UD-ESM), the Direct BFM (D-BFM), and the BFM-based Interpolation (BFM-IP) are proposed in this paper. These methods are derived in various ways of sound field representation and interpolation. They are compared in terms of velocity reconstruction quality with the Direct ESM (D-ESM) in which no resolution enhancement is attempted. Specifically, in the ESM-IP, a virtual microphone technique^[1] is used to interpolate the pressure field in the microphone plane prior to inverse reconstruction. In the UD-ESM method a deployment of monopole sources denser than that of the microphones is assumed.

The remaining two approaches are based on BFM in which the sound field of interest is approximated by a finite-term expansion in basis functions. To enable such a sparse representation of sound field with a minimal number of expansion terms, Compressive Sampling (CS)^[2] is exploited in light of ConVex Optimization (abbreviated as CVX for simplicity) algorithm suggested by Candes et al.^[3] In the BFM-IP, the pressure field in the microphone plane is interpolated using BFM prior to the application of ESM NAH. Lastly, the D-BFM signifies the method if the velocity field is directly calculated in the reconstruction surface. Numerical simulations were conducted to compare four reconstruction strategies with the benchmarking D-ESM approach in terms of relative velocity reconstruction error. Planar and spherical baffled piston sources were used as the target source for which the velocity fields were reconstructed. Results will be discussed to identify the viable NAH approaches with enhanced reconstruction quality.

2 THEORETICAL BACKGROUND

2.1 ESM-based NAH

There are many methods available to formulate NAH. Among the methods, ESM offers the main vehicle for inverse reconstruction in this work, where the sound field is represented with an array of virtual monopole sources. In this figure, \mathbf{r}_i is the i th microphone position on the hologram surface S_h ; \mathbf{r}_l is the l th monopole source on the actual source surface S_s ; \mathbf{r}_j is the j th virtual source point on the virtual surface S_v . By assuming the time-harmonic dependence $e^{j\omega t}$, the pressure field based on ESM is formulated as

$$\mathbf{p}_h(\omega) = \mathbf{G}(\omega)\mathbf{q}(\omega), \quad (1)$$

where $\mathbf{p}_h(\omega)$ denotes the hologram pressure vector, $\mathbf{q}(\omega)$ represents the virtual source strength vector and $\mathbf{G}(\omega)$ is the transfer matrix whose entries is defined as

$$\{\mathbf{G}\}_{ij} = \frac{j\rho_0\omega}{4\pi} \frac{e^{-jkr_{ij}}}{r_{ij}}, \quad (2)$$

where $r_{ij} = |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$, $k = \omega/c$ is wave number and c is the speed of sound, $j = \sqrt{-1}$, ρ_0 is air density, ω is the angular frequency, I and J are the numbers of microphone positions and equivalent sources, respectively. The unknown virtual source strengths in Eq. (1) can be calculated by using appropriate regularization methods such as Truncated Singular Value Decomposition (TSVD)^[4] and Tikhonov Regularization^[5]. In this paper, TSVD is used. To cope with the ill-posedness, all singular values of pseudo-inverse matrix less than 1/1000 of the maximum value are set to be zero.

Given the source strengths $\hat{\mathbf{q}}_v$, we can calculate the surface velocity on the source. The normal velocity at the position \mathbf{r}_l on the source surface is

$$u_s(\mathbf{r}_l, \omega) = \frac{1}{j\rho_0\omega} \sum_{j=1}^J (\mathbf{n} \cdot \mathbf{e}_r)(jk + 1/r_{lj}) p_s(\mathbf{r}_l, \omega), \quad (3)$$

where \mathbf{n} is the unit normal vector, and $\mathbf{e}_r = (\mathbf{r}_l - \mathbf{r}_j)/r_{lj}$. Due to the singularity of virtual sources, we need a retreat distance (R_d) between S_v and S_s to assure reconstruction quality.

2.2 Compressive sampling of sound field using BFM

In the following, an efficient field representation technique based on CS, BFM, and CVX method is presented. We will consider only exterior problems and free-field conditions.

BFM refers to a class of methods that exploit series expansion on the basis of orthogonal functions derived from the solution of the wave equation. In BFM, the sound field of interest is approximated as a finite-term expansion

$$p(\mathbf{r}_i) = \sum_{j=1}^J a_j \phi_j(\mathbf{r}_i), \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad (4)$$

where $\phi_j(\mathbf{r}_i)$ is the j th globally regular basis function evaluated at the sampled position \mathbf{r}_i , a_j are unknown expansion coefficients, I and J are the numbers of sample field points and terms retained, respectively.

For problems with planar geometry, the plane wave functions are employed as the basis functions

$$\phi(\mathbf{r}) = e^{-j(k_x x + k_y y + k_z z)}, \quad (5)$$

where $\mathbf{r} = (x, y, z)$ is the position vector and k_x , k_y and k_z are three components of the wave

vector in the Cartesian coordinate system. For problems with spherical geometry, the spherical harmonics are employed as the basis functions

$$\phi(\mathbf{r}) = h_n^{(2)}(kr)Y_n^m(\theta, \varphi), \quad n = 0, 1, 2, \dots, N; \quad -n \leq m \leq n, \quad (6)$$

where “*” denotes complex conjugation, $h_n^{(2)}(\bullet)$ is the spherical Hankel function of the second kind of order n , $\mathbf{r} = (r, \theta, \phi)$, $Y_n^m(\bullet)$ is the spherical harmonics function of order m and degree n .

Suppose that only finite I terms in the BFM expansion of Eq. (4) are retained. BFM can be written in a matrix equation

$$\mathbf{p}_h(\omega) = \mathbf{H}(\omega)\mathbf{a}(\omega). \quad (7)$$

This representation can be obtained by l_1 -norm minimization of an underdetermined problem, with the aid of CVX solver.^{[3], [6]} To be specific, at each frequency, we wish to determine the unknown expansion coefficients $\hat{\mathbf{a}}$ as posed by the CVX problem below:

$$\min_{\hat{\mathbf{a}}} \|\hat{\mathbf{a}}\|_1 \quad st. \quad \|\mathbf{H}\hat{\mathbf{a}} - \mathbf{p}_h\|_2 \leq \delta, \quad (8)$$

where $\hat{\mathbf{a}} \in \mathbb{C}^J$, $\mathbf{p}_h \in \mathbb{C}^I$, $\|\cdot\|_2$ symbolizes the 2-norm, and δ is a constant threshold. Let number of nonzero entries of $\hat{\mathbf{a}}$ be K , $K \ll I < J$. Once the expansion coefficients are obtained, the normal velocity of BFM can be calculated from the Eq. (4) by the Euler's equation:

$$u_s(\mathbf{r}_l, \omega) = \frac{1}{\rho_0 c} \sum_{j=1}^K \hat{a}_j (\mathbf{n} \cdot \mathbf{e}_k) e^{-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_l}, \quad (9)$$

for planar geometry and

$$u_s(\mathbf{r}_l, \omega) = \frac{-1}{j\rho_0 c} \sum_{j=1}^K \hat{a}_j \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n h_n^{(2)'}(kr_l) Y_n^m(\theta_l, \varphi_l), \quad (10)$$

for spherical geometry. In the equation, \mathbf{n} is the unit normal vector, $\mathbf{k} = (k_x, k_y, k_z)$, and $\mathbf{e}_k = \mathbf{k}/k$. Vectors $\mathbf{r}_l = (x, y, z)$ and $\mathbf{r}_l = (r_l, \theta_l, \varphi_l)$ are the position vectors of the sample points on the actual source for the planar and spherical geometries, respectively. The symbol $h_n^{(2)'}(\bullet)$ denotes the derivative of the spherical Hankel function of the second kind.

3 STRATEGIES FOR RECONSTRUCTION ENHANCEMENT

Two benchmarking methods (D-ESM and D-BFM) and three refined methods (ESM-IP, UD-ESM, and BFM-IP) will be presented.

(1) Direct ESM (D-ESM)

As a benchmarking method, the D-ESM approach performs inverse reconstruction using identical number of microphones and equivalent sources. The unknown virtual source strengths are computed by using the pseudo-inverse matrix \mathbf{G}^+

$$\hat{\mathbf{q}}(\omega) = \mathbf{G}^+(\omega)\mathbf{p}(\omega), \quad (11)$$

where $\hat{\mathbf{q}} \in \mathbb{C}^J$ and the symbol “+” denotes the pseudo-inverse operation. Thus, the surface velocity on the source surface can be written as

$$\mathbf{u}'(\omega) = \mathbf{G}'_u(\omega)\hat{\mathbf{q}}(\omega) = \mathbf{G}'_u(\omega)\mathbf{G}^+(\omega)\mathbf{p}(\omega), \quad (12)$$

where $\mathbf{u}' \in \mathbb{C}^{L'}$ denotes the reconstructed velocity vector corresponding to high-resolution lattice points and $\mathbf{G}'_u \in \mathbb{C}^{L' \times J}$ is the transfer matrix from the source strength of virtual sources to the velocity reconstruction points. The superscript prime emphasizes that the vector in question is posed for high-resolution lattice.

(2) ESM Interpolation (ESM-IP)

The ESM-IP approach utilizes the virtual microphone technique^[1] to interpolate the pressure field on the microphone plane for subsequent reconstruction using the ESM-based NAH. The unknown virtual source strengths can be obtained as

$$\hat{\mathbf{q}}(\omega) = \mathbf{G}^+(\omega)\mathbf{p}(\omega). \quad (13)$$

The sound pressures regenerated using Eq. (1) at the interpolated virtual sensor locations with a finer spacing can be written as the matrix form

$$\mathbf{p}'(\omega) = \mathbf{G}'(\omega)\hat{\mathbf{q}}'(\omega). \quad (14)$$

where $\mathbf{p}' \in \mathbb{C}^I$, $\mathbf{G}' \in \mathbb{C}^{I \times J}$ and $\hat{\mathbf{q}}' \in \mathbb{C}^J$. The source strengths $\hat{\mathbf{q}}'$ are estimated with the augmented pseudo-inverse matrix \mathbf{G}'^+ in the frequency domain

$$\hat{\mathbf{q}}'(\omega) = \mathbf{G}'^+(\omega)\mathbf{p}'(\omega). \quad (15)$$

where $\mathbf{G}'^+ \in \mathbb{C}^{J \times I}$ and $\hat{\mathbf{q}}' \in \mathbb{C}^J$. By “augmented”, we mean that the matrix is posed for high-resolution lattice. Once $\hat{\mathbf{q}}'$ is obtained, the normal surface velocity can be written as

$$\begin{aligned} \mathbf{u}'(\omega) &= \mathbf{G}'_u(\omega)\hat{\mathbf{q}}'(\omega) = \mathbf{G}'_u(\omega)\mathbf{G}'^+(\omega)\mathbf{p}'(\omega) \\ &= \mathbf{G}'_u(\omega)\mathbf{G}'^+(\omega)\mathbf{G}'(\omega)\mathbf{G}^+(\omega)\mathbf{p}(\omega) \end{aligned} \quad (16)$$

where $\mathbf{G}'_u \in \mathbb{C}^{L \times J}$.

(3) Underdetermined ESM (UD-ESM)

The UD-ESM approach employs a denser deployment of equivalent sources than that of the microphones in the reconstruction, i.e., $J' > I$, using the ESM-based NAH. The source strengths $\hat{\mathbf{q}}'$ are obtained with the pseudo-inverse matrix \mathbf{G}'^+

$$\hat{\mathbf{q}}'(\omega) = \mathbf{G}'^+(\omega)\mathbf{p}(\omega), \quad (17)$$

where $\mathbf{G}'^+ \in \mathbb{C}^{J' \times I}$ and $\hat{\mathbf{q}}' \in \mathbb{C}^{J'}$. Thus, the surface velocity can be reconstructed as

$$\mathbf{u}'(\omega) = \mathbf{G}'_u(\omega)\hat{\mathbf{q}}'(\omega) = \mathbf{G}'_u(\omega)\mathbf{G}'^+(\omega)\mathbf{p}(\omega), \quad (18)$$

where $\mathbf{G}'_u \in \mathbb{C}^{L \times J'}$.

(4) Direct BFM (D-BFM)

The D-BFM approach is adopted as another benchmarking method based on plane-wave basis functions. In this approach, the sound field approximated by the basis function expansion is used to reconstruct the velocity on the source surface. Given the hologram pressures, we can calculate the unknown coefficients $\hat{\mathbf{a}}$ by using the CS method. The velocity \mathbf{u}' on a finer lattice can be calculated via Eqs. (9) and (10)

$$\mathbf{u}'(\omega) = \mathbf{H}'_u(\omega)\hat{\mathbf{a}}(\omega), \quad (19)$$

where $\hat{\mathbf{a}} \in \mathbb{C}^K$ is the reduced set of coefficients obtained using CS procedure and $\mathbf{H}'_u \in \mathbb{C}^{L \times K}$ is the transfer matrix from the coefficient vector to the reconstruction velocity.

(5) BFM Interpolation (BFM-IP)

Like D-BFM, the BFM-IP approach applies the CS technique to interpolate the pressure field on the microphone plane, with the aid of plane-wave BFM. The sound pressures regenerated using Eq. (7) at the interpolated virtual sensor locations can be written as

$$\mathbf{p}'(\omega) = \mathbf{H}'(\omega)\hat{\mathbf{a}}(\omega), \quad (20)$$

which is to be matched to those produced by the ESM

$$\mathbf{p}'(\omega) = \mathbf{G}'(\omega)\hat{\mathbf{q}}'(\omega), \quad (21)$$

where $\mathbf{p}' \in \mathbb{C}^I$, $\mathbf{H}' \in \mathbb{C}^{I \times K}$, $\mathbf{G}' \in \mathbb{C}^{I \times J'}$, $\hat{\mathbf{q}}' \in \mathbb{C}^{J'}$ and $\hat{\mathbf{a}} \in \mathbb{C}^K$. The source strengths $\hat{\mathbf{q}}'$ are calculated by the pseudo-inverse matrix \mathbf{G}'^+

$$\hat{\mathbf{q}}'(\omega) = \mathbf{G}'^+(\omega)\mathbf{p}'(\omega), \quad (22)$$

where $\mathbf{G}'^+ \in \mathbb{C}^{J' \times I}$. Once $\hat{\mathbf{q}}'$ is obtained, the normal surface velocity with finer resolution can be reconstructed as

$$\begin{aligned} \mathbf{u}'(\omega) &= \mathbf{G}'_u(\omega)\hat{\mathbf{q}}'(\omega) = \mathbf{G}'_u(\omega)\mathbf{G}'^+(\omega)\mathbf{p}'(\omega) \\ &= \mathbf{G}'_u(\omega)\mathbf{G}'^+(\omega)\mathbf{H}'(\omega)\hat{\mathbf{a}}(\omega) \end{aligned} \quad (23)$$

It is noted that the BFM-IP approach performs field interpolation on the microphone surface for subsequent ESM inversion, whereas the D-BFM calculates the normal velocity directly on the source surface without using ESM. As for the D-ESM, ESM-IP, UD-ESM and BFM-IP approaches, the ESM is used for the final reconstruction of surface velocity.

4 NUMERICAL SIMULATIONS

Relative velocity reconstruction error was used to quantify the reconstruction performance:

$$E_u(\omega) = \frac{\|\mathbf{u}(\mathbf{z}, \omega) - \mathbf{u}_s(\mathbf{z}, \omega)\|_2}{\|\mathbf{u}(\mathbf{z}, \omega)\|_2} \times 100\%, \quad (24)$$

where $\|\cdot\|_2$ symbolizes the 2-norm. The vectors \mathbf{u} and \mathbf{u}_s represent the desired and the reconstructed velocity vectors, respectively. The Matlab® solver named “cvx” developed by Grant and Boyd was used to solve the CS field interpolation problem.^[6]

4.1 The planar baffled piston source

The pressure field produced by a baffled planar source is given by the Rayleigh integral

$$p_h(\mathbf{r}_i) = \frac{j\rho_0\omega}{2\pi} \int_{S_s} G(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) u_0(\mathbf{r}_j) dS_v(\mathbf{r}_j), \quad (25)$$

where the surface velocity $u_0=5\text{m/s}$ is assumed. A piston embedded at the plane $z = -0.05\text{m}$ is arranged in two scenarios as denoted by $S_{s,i}, i = 1-2$, as depicted in Fig. 1. In order to compare different strategies, the reconstruction points were distributed at 9×11 rectangular grid points on the source plane S_s . In Fig. 2, the preceding five reconstruction approaches are compared for two scenarios in terms of relative velocity reconstruction error. Velocity reconstruction error of D-BFM is the largest, especially at low frequencies. Field interpolation using BFM has introduced significant errors at low frequencies. It seems that BFM is more sensitive to the aperture wraparound than the ESM. The BFM-IP has produced better reconstruction than the D-ESM in the frequency range 50 Hz~2.5 kHz. The difference in reconstruction errors attained by the ESM-IP and UD-ESM methods is less than 10% for the two scenarios in the frequency range 50 Hz~1.7 kHz. UD-ESM, BFM-IP and D-BFM methods appear more robust against spatial aliasing than the other strategies in the frequency range 1.7 kHz~2.5 kHz.

4.2 The spherical baffled piston source

The piston is placed on the top of the rigid sphere of radius a , subtending an angle θ_0 with respect to the z -axis.^[7] In the simulation, the source parameters are chosen to be: $a = 0.2\text{m}$, $r = 0.3\text{m}$, $u_0 = 5\text{ m/s}$, $\rho_0 = 1.21\text{ Kg/m}^3$ and $c = 343\text{ m/s}$. Numbers of reconstruction points and the microphone points for velocity reconstruction are 242 and 58, respectively. Specifically, $R_d = 1d$ for 30° and 60° . Fig. 3 shows relative velocity reconstruction error arising from the reconstruction strategies plotted versus frequency. The velocity reconstruction errors attained by all ESM-based approaches behaved extremely similar and never exceed 2% for all subtending angles. Larger velocity reconstruction error was observed in the BFM-based methods than the ESM-based methods, especially at the frequency ranges 50 Hz~500 Hz and 1.7 kHz~3.4 kHz. The effects due to spatial wrap-around at low frequencies and spatial aliasing at high frequencies are two factors that contribute to the reconstruction error. The reconstruction performance of the BFM-IP method is rather similar to that of the D-BFM method, where their difference in reconstruction errors is less than 1% at the frequency range 500 Hz~1.7 kHz for two subtending angles. However, the D-BFM produces slightly better velocity reconstruction than the BFM-IP at high frequencies.

5 CONCLUSIONS

Numerical simulations were undertaken to examine field interpolation and velocity reconstruction in light of the ESM-based and BFM-based NAH methods. Numerical simulations have shown that three interpolation approaches including ESM-IP, UD-ESM and BFM-IP are effective in interpolating the pressure field on the microphone surface. Three reconstruction strategies provided improved velocity reconstruction than the D-ESM and D-BFM methods for the planar baffled piston source. However, the BFM-based approaches have achieved comparable performance with the ESM-based approaches for the spherical baffled piston source, where the difference in reconstruction errors is within 1% at the frequency range 500 Hz~1.7 kHz. Despite the similarity on the surface, subtle distinctions in numerical properties exist between ESM-based and BFM-based approaches. As revealed in the numerical investigations, the BFM-based approaches whose formulation is coordinate dependent differ from the ESM-based approaches in various degrees in terms of reconstruction performance and robustness in low and high frequencies.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was supported by the National Science Council (NSC) in Taiwan, Republic of China, under the project number NSC 100-2221-E-007-016-MY3.

References

- [1] M. R. Bai, J. H. Lin and C. W. Tseng, "Implementation issues of the nearfield equivalent source imaging microphone array," J. Sound Vib. **330**, 545–558 (2011).
- [2] E. J. Candes and M. B. Wakin, "An introduction to compressive sampling," IEEE Signal Process. Magazine (March 2008).
- [3] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex optimization*, (Cambridge University Press, New York, 2004), Chap. 1-7.
- [4] W. A. Veronesi and J. D. Maynard, "Digital holographic reconstruction of sources with arbitrarily shaped surface," J. Acoust. Soc. Am. **85**, 588-598 (1989).
- [5] P. C. Hansen, *Rank-deficient and discrete ill-posed problems* (SIAM, Philadelphia, 1988), pp. 99-187.
- [6] M. Grant and S. Boyd, cvx, Version 1.21 Matlab Software for Disciplined Convex Programming available at <http://cvxr.com/cvx> (Last viewed February 14, 2012).
- [7] M. R. Bai, C. C. Chen and J. H. Lin, "On optimal retreat distance for the equivalent source method-based nearfield acoustical holography," J. Acoust. Soc. Am. **129**, 1407-1416 (2011).

Figure list

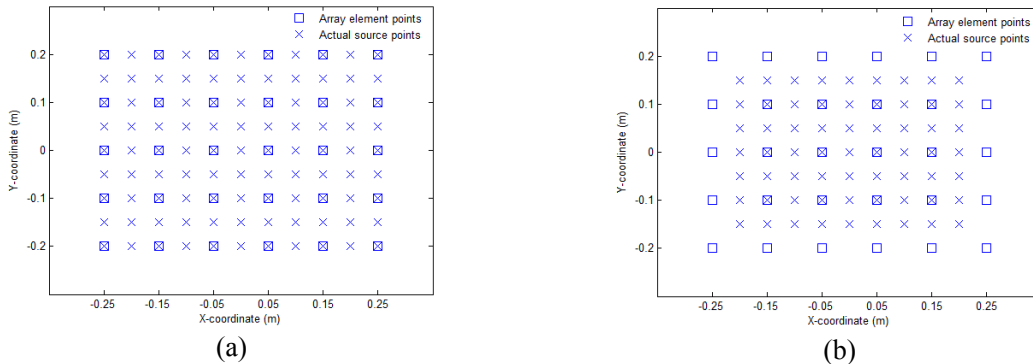


Fig. 1 Distributions of microphones and real source points for simulating the baffled planar piston. (a) $S_{s,1}$, (b) $S_{s,2}$.

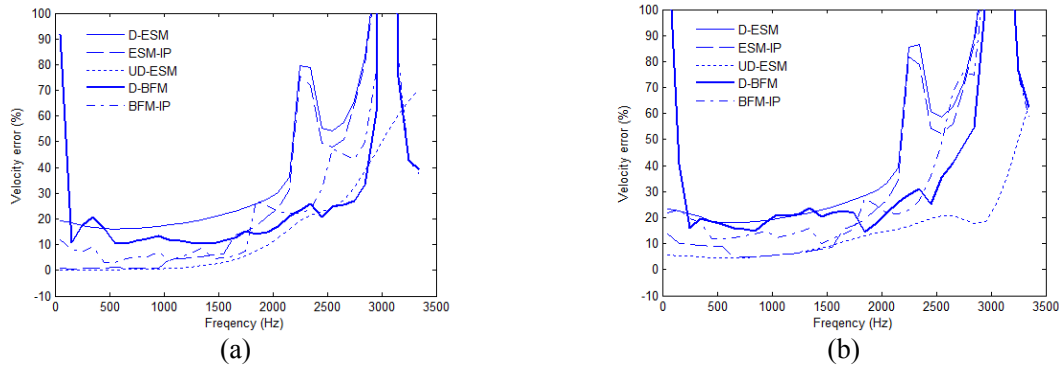


Fig. 2 The relative velocity errors of five reconstruction approaches for the baffled planar piston. (a) $S_{s,1}$, (b) $S_{s,2}$.

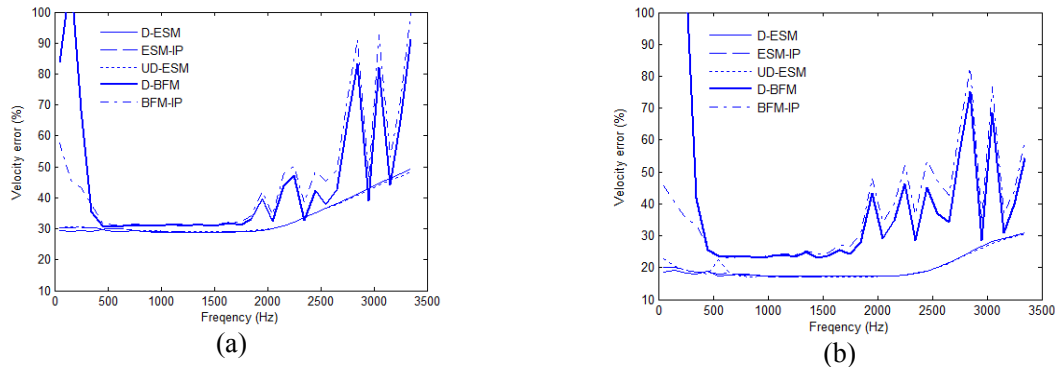


Fig. 3 The relative velocity errors resulting from five reconstruction approaches for two subtending angles in the baffled spherical piston example. (a) $\theta_0 = 30^\circ$, (b) $\theta_0 = 60^\circ$.

The Study on Light Floor Impact Sound Improvement By Void Slab Applied with Surface Covering Materials

Sung-chin CHUNG^{1, a}, Yaw-shyan TSAY^{1, b}, Yu-chun YEH^{2, c}, Feng-chu CHEN^{1, d}, and Yu-hui SHEN^{1, e}

¹National Yunlin University of Science and Technology, Dept. of Creative Design, 123 University Road, Section 3, Douliou, Yunlin 64002, Taiwan

²National Cheng Kung University, Dept. of Architecture, No.1, University Road, Tainan City 701, Taiwan

^achungsc@yuntech.edu.tw, ^btsayys@yuntech.edu.tw, ^cN78991196@mail.ncku.edu.tw, ^dmodern1010@yahoo.com.tw, ^eg9936701@yuntech.edu.tw

Abstract: The living quality of the Taiwanese citizens keeps rising; the improvement of floor impact sound has being carried out into practical project gradually. The void slab, used to be used in huge span building, is very common in housing building. From reference, the void slab represents the one of the latest architectural facilities, which focuses on the noise improvement for the living quality, by its characteristics of rigidity and lightweight. In order to select an appropriate floor covering material, the experimental investigation based on the standard ISO 140-7 and 140-8 should be carried out to experiment the performance of the bare void slab and the covering materials over the slab for discussing the possibility of material application on the void slab.

Therefore, in this study, the noise insulating performance of the void slab through the field experiments in the practical condominium-type housing projects will be tested, and the floor impact sound performance of the selected sample of covering materials (teak wood and carpet) applied on the existing void slab will also be shown in this paper. The results show that the void slab presents good effective performance for heavy floor impact sound, but the void slab should be applied with covering materials to demonstrate efficient improvement toward the light floor impact sound, and the performance varies from materials. The researchers expect that the database could provide designers and constructors the reference of the floor covering materials related to the floor impact sound insulation and reduce the time and the costs issue.

Key words: Floor Impact Sound; Void Slab; Covering Materials.

INTRODUCTION

The living quality of the Taiwanese citizens keeps rising; the improvement of floor impact sound has being carried out into practical project gradually. According to results from the investigation of public pollution, the most amounts of the petitioned and complaint cases are “Noise Pollution”, which grow rapidly from 1998 to 2009 (Fig. 1). The growth ratio is about 15% per year in the past ten years. Moreover, the residential performance evaluation system of new construction, which was established by Architecture

and Building Research institute, Ministry of Interior of Taiwan, has already listed the floor sound impact into the sound environment performance evaluation factors.

For improving the noise issue, one of the best methods is to thicken the floor slab (Chen, 1989). However, thickening the floor slab would increase the weight and the cost, and also is not suitable for Taiwan where there are frequent earthquakes appeared. Thus, void slab is the one of the latest architectural facilities, which focuses on the noise improvement for the living quality, by its characteristics of rigidity and lightweight. Also, Chen et al. indicates that the Taiwan citizens prefer to apply the wood covering material on the floor slab for living comfort, which is about 26% of all covering materials preferences (Table 1.); Chung (1993) demonstrates that floor covering materials show the effectiveness for improving the floor impact sound effect.

However, the researches regarding the sound insulating performance of void slab are relatively fewer and the performance of void slab applied with covering materials are even rare. Therefore, the practical selection of floor covering materials is based on the experience of constructors, which lacks the fundamental database and usually causes the gap in perception between constructors and users.

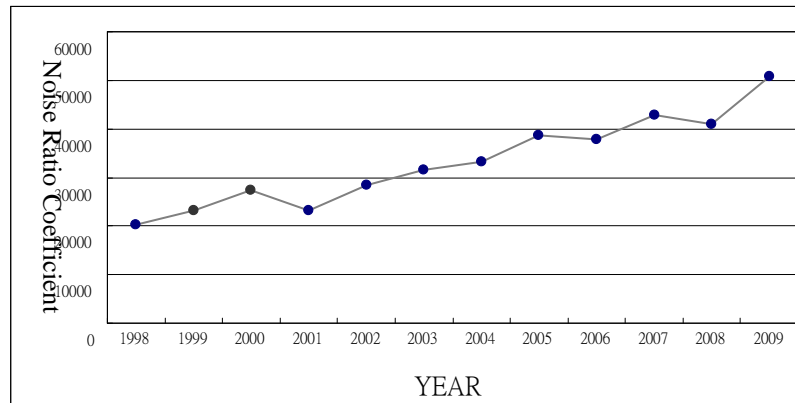


Fig. 1. The diagram of the increasing amount of the noise pollution petitioned cases (The Environmental Protection Administration Executive Yuan, Taiwan. 2010)

Table1. The preferences of the covering materials

types	wood	carpet	tiles	marble	foam	terrazzo	plastic	bare
preference	26	2	50	10	0	5	7	0

Moreover, according to the data of Construction and Planning Agency Ministry of Interior in Taiwan, the amount of residential buildings is 6,378,836. Among this number, the condominium type building is about 32.10% of the total (till 2005)(Fig. 2). The percentage of condominiums is roughly one third of the residential buildings, which could represent one of the typical Taiwan housing structures. Therefore, in this study, researchers took condominiums as the testing subjects.

Consequently, the objectives of this study are:

1. Comprehending the noise insulating performance of the void slab through the field experiments in the practical condominium-type housing projects.
2. Testing the floor impact sound performance of the selected sample of covering materials (teak wood and carpet) applied on the existing void slab with the full-scale size experiment room.
3. Analyzing the testing results and proposing the noise improving application of the void slab.

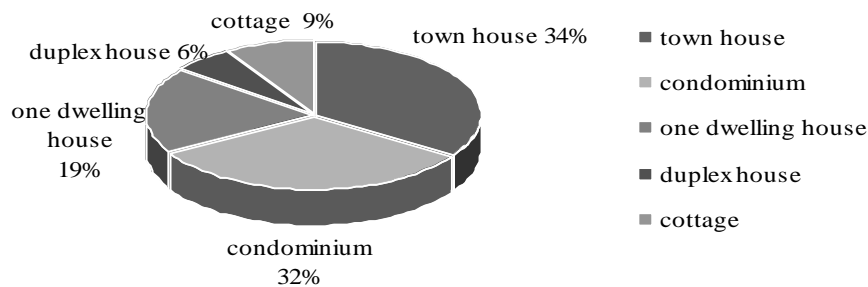


Fig. 2. The percentage of multi residential building types in Taiwan

METHODS

The experimental method of this study was based on ISO 140-7 “Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Laboratory measurements of impact sound insulation of floors” through field experiments for testing the void slabs with practical housing projects and ISO 140-8 “Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Laboratory measurements of impact sound insulation of floors” for testing covering materials with the full-scale size experiment room.

The Experiment Settings. (Fig. 3) All the setting followed ISO 140-7 and 140-8. The testing frequency was 50-5000 Hz, 1/3Oct.

The Subject 1 – The void slab. There were 9 condominiums, all with the void slab, tested in Taiwan. The total amount of the testing spaces is 28. The background information and testing locations of these condominiums, which were uncoated and unfurnished, show in Table 2; Fig. 4 and Table 3 represent the basic information of the void slab. In this paper, the researchers would reveal the testing results of Condo A and Condo B.

The Subject 2 – The covering materials (Teak Wood and Carpet). Table 4 Shows the covering materials installation. Both materials are common interior materials in Taiwan.

The Background noise. This study recorded the back noise once two hours. According to the standards, the suggested difference between the floor impact sound and the background noise is above 10dB, and if the difference is between 6-10dB, the value should be adjusted by Eq. 1.