

# 带有光控照明系统的公路 隔音墙的设计与制作

李灵杰 张进治 刘祎然 路建航 杨金

(北方工业大学理学院 100144)

隔音墙是设置在声源与受声点之间来阻隔声音的障碍物,也称声屏障。在公路上设置隔音墙是从传播途径上控制噪声的一种有效方法。当临街建筑物窗外1m处白天噪声声压级超过70dB,夜间超过55dB,就应采取降噪措施。最早使用隔音墙的国家是日本,起步于20世纪60年代。我国第一次启用隔音墙是在80年代末的贵黄公路上。如今,随着高铁、城铁、高等级公路和城市快速路建设的迅速发展,城区交通噪声污染日趋严重,隔音墙正成为道路工程研究开发的热点。人们希望隔音墙不仅能降低交通噪声,而且还要美观高效。本文通过对现场录制的交通噪声进行频谱分析,优化建立墙体模型并进行测试,有针对性地完成了隔音墙的设计与制作。

## 一、设计原理

当声波遇到障碍物时传播路径将做如下改变:一部分反射、一部分衍射、一部分透射,如图1。隔音墙的降噪效果就取决于这3部分声能的分配比例。增加反射声能,减少透射和提高衍射衰减即是隔音墙的设计目标。衡量隔音墙降噪指标的物理量是插入损失IL,其定义为同一受声点在放置隔音墙前后的声压级差,插入损失越大,降噪效果越好。

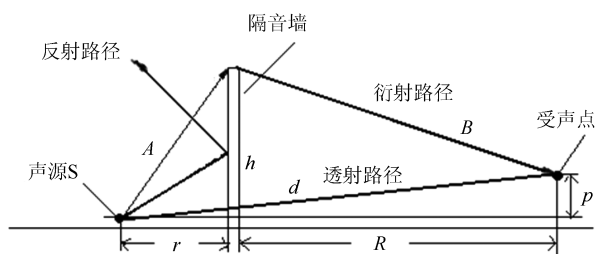


图1 声波遇隔音墙传播示意图

## 1. 隔音墙外形尺寸设计

### 隔音墙的高度设计

隔音墙高度 $h$ 和声程差 $D$ 之间存在一定的几何关系( $D = A + B - d = \sqrt{h^2 + r^2} + \sqrt{(h-p)^2 + R^2} - \sqrt{p^2 + (r+R)^2}$ ),见图1。声程差的大小决定衍射

衰减量 $\Delta L$ ( $\Delta L = -10 \lg \frac{1}{3 + \frac{20D}{\lambda}}$ ,  $\Delta L$ 是插入损失的主要部分),通过给定声程差值可计算出隔音墙高度。

假设受声点与声源位于同一水平高度,且 $R \gg r \gg h$ ,

则 $p=0$ ,  $D \approx \frac{h^2}{2r}$ ,  $\Delta L \approx 10 \lg \frac{h^2}{r} + 10 \lg f - 12$ ,可见,高度增加,绕射声衰减增大,降噪效果好。不过由声衰减理论可知,隔音墙最大声衰减是24dB,当把交通噪声等效频率 $f=500\text{Hz}$ ,声源到隔音墙水平距离 $r=4\text{m}$ (理论上取值)代入上式,得到隔音墙最大高度为3m。即,隔音墙顶端距噪声源与受声点连线垂直距离为3m时,声衰减达到最大值,此时,再通过增加高度来增大绕射衰减将得不到理想的效果。当受声点和声源不在同一水平高度时,应通过几何的方法加以转换计算来确定隔音墙高度。这里的 $h$ 为有效高度,加上声源距地面的高度才是隔音墙的建筑高度。

### 隔音墙的长度设计

隔音墙长度的确定,一般以声源通过隔音墙末端传至接收点的声级比声源经过隔音墙顶端绕射后的声级低10dB以上,计算公式比较复杂。按照国内外的设计经验,在距路边50m的范围内,如果受保护区长度为 $S\text{m}$ ,实践证明,当隔音墙长度在 $S\text{m}$ 的基础上再

在两端各延长 60m, 则隔音墙两边侧向绕射的噪声对受保护区降噪量的影响可以忽略不计, 由此可以确定隔音墙的总长度为  $(120+S)$  m。

## 2. 隔音墙的墙体结构设计

本文设计的隔音墙采用复合式结构, 下部为吸声体结构, 中部为扩散反射体结构, 上部是不同形式的顶端。吸声材料是目前隔音墙的首选, 中部采用透明材料, 不仅隔音, 还能使墙里墙外通透, 视野开阔。吸声共振型和扩散反射型是公路隔音墙两种基本类型, 二者配合使用更为合理、有效。

### 亥姆霍兹共振器和空腔共振吸声原理

吸声体采用空腔共振吸声原理, 其核心是亥姆霍兹共振器。如图 2 (a), 孔颈的空气柱可看作一个具有质量的活塞, 空腔中的空气起到气体弹簧的作用, 形成一个振动系统。当外界入射波频率等于其固有频率时, 孔颈中空气就会因共振产生强烈的震动, 从而将声能转化为热能, 达到减小声音的目的。图 2 (b) 为亥姆霍兹共振器的机械类比系统。多孔结构相当于多个亥姆霍兹共振器并联, 图 2 (c)。由亥姆霍兹共振器共振频率计算公式可推导出穿孔板吸声结构的共振频率为:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V(t+\delta)}} \quad (2-1)$$

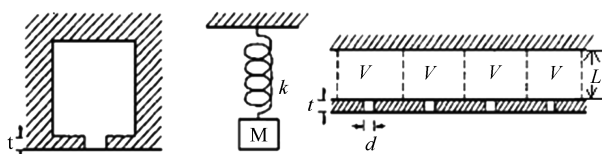
式中,  $c$  声速,  $S$  颈口面积,  $V$  空腔容积,  $t$  孔颈深度,  $\delta$  开口末端修正量,  $\delta=0.8d$  ( $d$  为孔径)。

如果已知穿孔率  $P$  (穿孔面积与板面积之比) 和空腔厚度  $L$ , 设单位面积空腔单元数为  $n$ , 则  $P=nS$ ,

$$L=nV, \text{ 代入上式有 } f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{L(t+\delta)}}。$$

### 扩散反射体隔音原理

声波在传播过程中, 遇到凸形的表面 (图 3), 就会被分解成许多比较弱的反射声波, 此过程即为扩散。为使声能充分扩散, 扩散体尺寸应满足:



(a)亥姆霍兹共振器 (b)机械类比系统 (c)穿孔板吸声结构

图2 亥姆霍兹共振器吸声原理

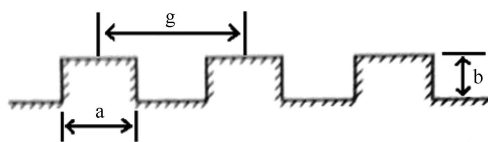


图3 扩散反射体

$$\left(\frac{2\pi f}{C}\right)a \geq 4 \quad \frac{b}{a} \geq 0.15 \quad \lambda \leq g \leq 3\lambda \quad (2-2)$$

式中,  $a$  扩散体宽度;  $b$  凸出高度;  $f$  入射声频率;  $C$  声速;  $\lambda$  声波波长;  $g$  扩散体间距。

### 顶端结构设计

隔音墙的顶端设计可分为直臂型、倒 L 型、和 Y 型等, 如图 4。其原理在于通过改变顶端形状, 增加声波的衍射路径, 减小衍射能量, 达到降噪的目的。

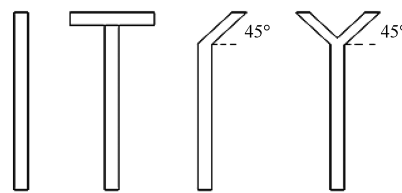


图4 不同形式的顶端

### 缩尺模型实验依据

隔音墙性能的优劣, 不能建成后到公路上再进行测试, 应在实验室建立缩尺模型进行研究, 由相似理论, 尺度缩小  $n$  倍的模型应与原型墙体有相同的边界形状, 测试频率应为实际噪声频率的  $n$  倍, 同时测试点和声源距离地面的高度和距离墙体的远近也应按比例缩尺。可参考的原型隔音墙高 6m, 按 4:1 缩尺得模型高为 1.5m, 测试布点如图 5。

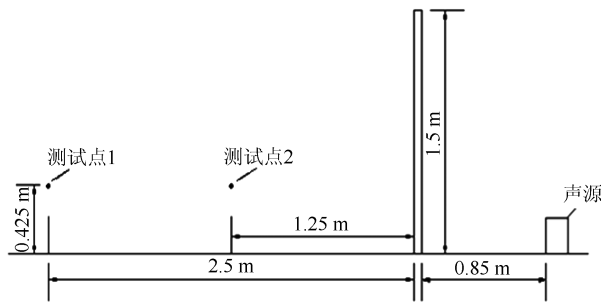


图5 模型测试布点图

### 光控照明系统

考虑到有些路段没有路灯, 在设计隔音墙时引入太阳能发电技术, 将太阳能转换成电能供给照明设备, 可以解决夜间照明问题。光控照明系统如图 6, 太阳能充放电控制器的主要作用是保护蓄电池, 基本功能是过充保护、过放保护、光控、时控与防反接等。控制器中含有光感元件, 通过对蓄电池和太阳能电池组

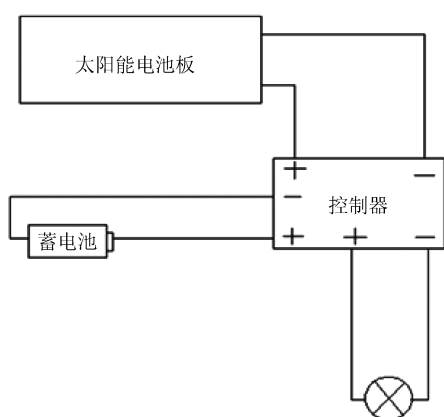


图6 光控照明系统

件电压、电流等参数的检测判断，控制 MOSFET 器件的开通和关断，达到各种控制和保护功能。白天太阳能电池板给蓄电池充电，路灯关闭，晚上蓄电池给电路供电照明。

## 二、制作方法

### 1. 对实际录制的交通噪声进行频谱分析

在车流量高峰期采集了公路噪声，图7为噪声频谱分析图。由图可见，频率在1000Hz和2400Hz附近的噪声较强。根据实际情况，决定就峰值频率以及难以控制的低频噪声进行有针对性的降噪设计。

### 2. 制做穿孔板空腔共振吸声墙体吸收低频噪声

通常穿孔板分两种，一种是直排孔，一种是梅花孔（图8），本文采用直排孔，通过不同的穿孔率来控制低频噪声。孔间距为3cm，孔径分别为0.4mm、0.5mm、0.8mm、0.9mm，选择合适的空腔厚度，制成空腔共振吸声墙体。墙体一面是开孔密度板，一面是金属背板，中间是空腔，腔体内设置肋板来加固穿孔

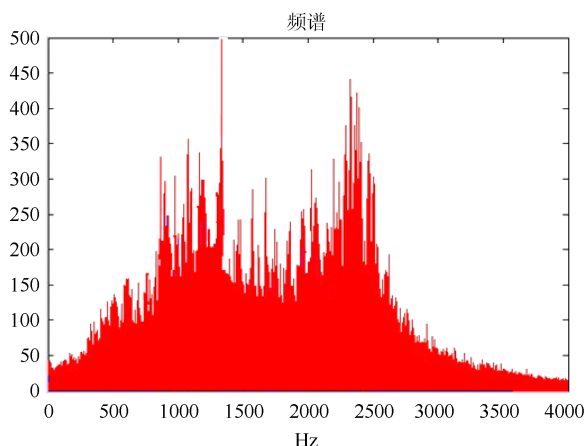


图7 实际交通噪声频谱图

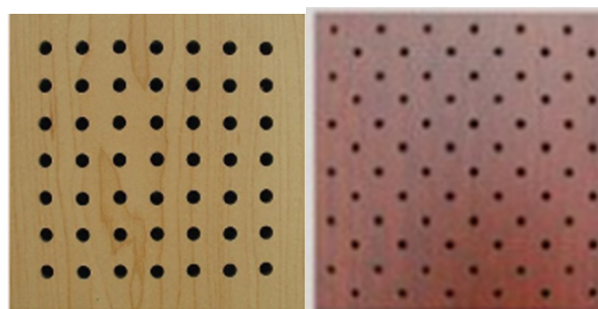


图8 直排孔和梅花孔穿孔板

板，开孔板朝向声源一侧。由式(2-1)可计算出控制频率范围。经测试，该结构对于较低频率(300~1000)Hz的噪声降噪效果比较好。

### 3. 制做扩散反射体控制高频噪声

扩散反射体的凸面可以是三角形、半圆形和方形，本文采用容易加工的方形。由(2-2)式计算，扩散体 $a=20\text{cm}$ ， $b=3.5\text{cm}$ ， $g=36\text{cm}$ ，控制高频噪声。

### 4. 组装隔音墙

模型高度为1.5m，下部和中部高度为60cm，顶端垂直高度为30cm，长度为测试现场的楼道宽度：2米，加工时分成两部分，每部分宽1m，如图9。中部和下部为一体框架，框架上留有卡槽，可插入不同形状的顶端。中部镶入双层透明玻璃板，再附上扩散反射体；下部装入空腔共振结构体和吸音玻璃棉，表面嵌入百叶穿孔板，百叶穿孔板具有吸声和防尘防雨的作用。照明系统的蓄电池和控制器都安装在下部的墙体内，布线在两部分拼接处。

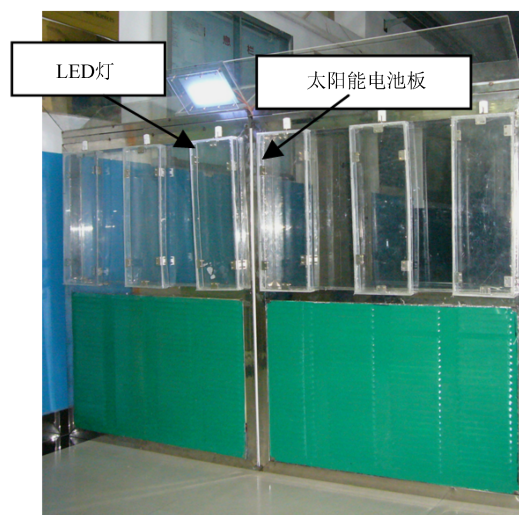


图9 隔音墙实物

她用物理的情趣，引我们科苑揽胜；  
她用知识的力量，助我们奋起攀登！

欢迎投稿，欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会，由中国科学院高能物理研究所主办，是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

为进一步提高《现代物理知识》的学术水平，欢迎物理学界的各位专家、学者以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn，并将联系人姓名、详细地址、邮政编码，以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用，作者须将该篇论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有，并签署《现代物理知识》版权转让协议书（全部作者签名），如不接受此协议，请在投稿时予以声明。来稿一经发表，将一次性酌情付酬，以后不再支付其他报酬。

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯等栏目。

2015 年《现代物理知识》每期定价 10 元，全年 6 期 60 元，欢迎新老读者订阅。

邮局订阅 邮发代号：2-824。

编辑部订阅 汇款到：北京市玉泉路 19 号乙高能物理所《现代物理知识》编辑部；邮编：100049。

需要过去杂志的读者，请按下列价格汇款到编辑部。1992 年合订本，18 元；1993 年合订本，18 元；1994 年合订本，22 元；1994 年增刊，8 元；1994 年附加增刊合订本，36 元；1995 年合订本，22 元；1996 年合订本，26 元；1996 年增刊，15 元；1997 年合订本，30 元；2000 年附加增刊合订本，38 元；2000 年增刊，10 元；2001 年合订本，48 元；2002 年合订本，48 元；2003 年合订本，48 元；2004 年合订本，48 元；2006 年仅剩 4、5、6 期，每期 7 元；2007 ~ 2011 年单行本每期 8 元；合订本每本 50 元；2012 ~ 2014 年单行本每期 9 元，合订本每本 60 元。

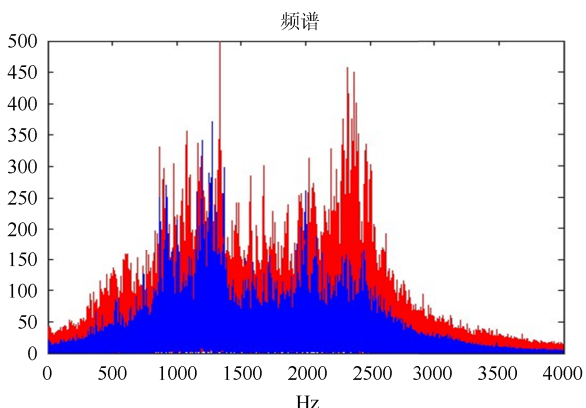


图 10 加入隔音墙前后噪声图谱

### 三、测试结果与分析

测试时，墙体垂直楼道放置，衔接处用密封带密

封，防止漏声，可模拟无限长隔音墙。首先不加入墙体，选取 200 ~ 4000Hz 单一频率正弦波纯音，在测试点直接获取声压级值。然后置入隔音墙，测试顶端为直臂型、倒 L 型和 Y 型 3 种情况下的隔音效果，由插入损失得到，Y 型隔音墙的降噪效果相比之下更好。最后选择 Y 型顶端并利用实际录制的交通噪声进行实验，结果见频谱图。图中上部红色部分为不加入墙体时的频谱图，下部蓝色部分为加入墙体后的图谱，由图 10 可见，隔音墙对各个频段都有明显的降噪效果。

本文从隔音墙降噪原理出发进行了设计与制作，实际上隔音墙设计是一个系统工程，在满足声学性能的同时，还要考虑隔音墙的结构强度、景观以及经济耐用等各方面的综合效应。