

模型实验在交通噪声评价中的应用

胡天羽 张昌龄

(清华大学)

1987年3月9日收到

摘要 本文给出了一种简单而经济的用于评价和预测城市建筑群内交通噪声影响的物理模拟实验方案。在1:80的模型中,常规的实时频率分析仪被用于检测电火花所发出的脉冲频谱,使实验得以简单化。将多车道多车种随机的自由车流简化为在平均车道上朝同一方向行驶且有着共同的声影响函数、时距满足负指数分布的数学模型,在微型计算机上进行模拟分析与计算,得出的统计声参量(L_{eq} 和 L_{10})与实测值有较好的吻合。

SCALE MODEL EXPERIMENT FOR TRAFFIC NOISE EVALUATION

HU TIANYU ZHANG CHANGLING

(Qinghua University)

Received March 9, 1987

Abstract A simple and economical scale model experiment scheme is presented for evaluating and predicting the traffic noise impact in built-up areas. A real-time frequency analyzer is used in a 1:80 scale model to measure pulse spectra from a spark. It makes the experiment easy. The random mixed-vehicle free flow traffic in multilane street is simulated mathematically by a stream with negative exponential headway distribution and in which all vehicles move toward the same direction along the mean lane having the same noise impact function. The statistical sound parameters (L_{eq} and L_{10}) being analyzed and calculated in micro-computer are consistent with measurement data.

一、引 言

交通噪声是城市环境污染的重要成分之一,随着城市的发展,车辆增多,交通噪声的影响程度及范围也日益增大。这时,如何合理地安排临街住宅使交通噪声对居民的干扰达到最低限度,便成为人们所关心的问题,而这一问题的解决,又必须以交通噪声特性及传播规律方面充分的研究成果为前提。

交通噪声在建筑群中传播规律的研究,就国外二十年来的科研进展来看,模型实验方法是比较有效的,它是依据相似规律准则,对建筑环境按比例缩小并在模型中再现噪声传播物理过程的一种实验手段。目前,这一技术已日臻成熟,各种比尺的模型实验在有条件的实验室内被用作制订防噪规划的辅助工具和建立与评价数学模型的手段,以替代大规模的实地测量,特别是因受到某种干扰使实测变得困难或虚拟的与尚属未来的场合。

鉴于模型实验在交通噪声评价方面的意义,本论文致力于这一课题的探讨,力求以更加简单方便的手段,结合我国交通噪声的实际特点,寻求一种满足一定精度和稳定度的实验方案。本文所述实验在一个简易半消声室内进行,模型比尺 1:80。模型材料选用 12mm 厚石膏板,水磨石地板上粘贴两层高丽纸用以模拟地面衰减。实验声源选用电火花高频脉冲,1/8 英寸 B&K4138 传声器接常规实时频率分析仪(B&K2131)作为量测手段。测试数据以 1/3oct 的分频形式输入微型计算机(NEC8000)进行数学处理(包括空气吸收修正、车流的 Monte Carlo 仿真模拟、声级的统计计算等),其结果与实测数据有较好的吻合。

二、模型实验的相似原则

对于空气中的声传播问题,忽略次要因素,可以认为声压 p 主要由下述参量决定

声源参数: 声功率 W , 频率 f

几何参数: 长度 l , 角度 θ

介质参数: 声速 c , 密度 ρ , 比热比 γ , 相对湿度 RH

界面参数: 表面阻抗 Z , 入射角 θ_i

即可写有如下形式 $p \parallel W, f, l, \theta, c, \rho, \gamma, \text{RH}, Z, \theta_i$ (1)

由于空气吸声系数 α_A ($[\alpha_A] = [l]^{-1}$) 由气体状态及声频率 f 决定

$$\alpha_A \parallel \rho, c, \gamma, \text{RH}, f$$

固体界面的吸声系数 α_i 由界面阻抗 Z 、气体特性阻抗 ρc 、声频率 f 及入射角 θ_i 决定

$$\alpha_i \parallel Z, \rho, c, f, \theta_i$$

将二式略做变形

$$\text{RH} \parallel \rho, c, \gamma, f, \alpha_A \quad Z \parallel \rho, c, f, \theta_i, \alpha_i$$

代入关系表达式(1),并引入基准声压 p_0 (常量)使 $L_p = 20 \lg(p/p_0)$, 则有

$$L_p \parallel W, f, l, \theta, c, \rho, \gamma, \alpha_A, \alpha_i, \theta_i, p_0$$
 (2)

将上式各参量施以无量纲化并根据 π 定理得到一个八元函数

$$L_p = F \left(L_w + 10 \lg \frac{W_0}{p_0 c l^2}, \frac{f l}{c}, \theta, \frac{\rho c^2}{p_0}, \gamma, \theta_i, \alpha_A l, \alpha_i \right)$$
 (3)

其中 W_0 为基准声功率。

相似模型中的物理过程,要求仍然满足函数 F 的形式,且若希望原型中的声压级 L_{pr} 与模拟值 L_{pm} 在相应的时空间内恒等,则要求函数中各变量做到模型与原型的一一对等

$$\begin{cases} L_{wr} - 10 \lg(c_r l_r^2) = L_{wm} - 10 \lg(c_m l_m^2) \\ f_r l_r / c_r = f_m l_m / c_m \quad \rho_r c_r^2 = \rho_m c_m^2 \\ \alpha_{Ar} l_r = \alpha_{Am} l_m \quad \alpha_{Sr} = \alpha_{Sm} \\ \theta_r = \theta_m \quad \theta_{Sr} = \theta_{Sm} \quad \gamma_r = \gamma_m \end{cases}$$
 (4)

对于声学模拟实验,一般仍希望在空气中进行,处于常温常压状态,这样,在忽略了微小的温度和气压变化的条件下,近似满足

$$\rho_r = \rho_m \quad c_r = c_m \quad \gamma_r = \gamma_m$$

此外, θ_r 和 θ 的相似关系在模型中将自然得以满足,不必强调,从而,模型实验的相似律在引

入了比例因子 $s = l_m/l_r$ 之后,可写为

$$\begin{cases} L_{w_r} = L_{w_m} - 20 \lg s \\ f_r/f_m = \alpha_{A_r}/\alpha_{A_m} = s \\ \alpha_{S_r} = \alpha_{S_m} \end{cases} \quad (5)$$

(5)式给出的相似律貌似简单,但其中对 $f_r/f_m = \alpha_{A_r}/\alpha_{A_m}$ 的要求却很难依靠物理的手段予以满足。空气吸收问题的处理,成为模型实验的关键技术之一。

三、实验装置与测试设备

本实验所采用的检测仪器为 B&K2131 数字频率分析仪,并配置有 B&K5765 频率扩充单元(频率上限 160kHz)及 B&K2113 数字存储器,该设备可以方便地与计算机相联使数据分析变得简单。但需要指出,这只是普通的用于常规测量的装置,不适用于脉冲测试。B&K5765 最短的采样时间为 1/16s,而实验所用的电火花声源,其脉冲宽度仅零点几至几个毫秒,显然,我们无论如何也无法得出电火花脉冲的真实声级,除非使用示波器。不过,实验中所需要的是噪声传播的相对衰减值,我们只希望当脉冲声级增减一定的分贝数时,仪器所显示的结果也能有相同的增减。利用 B&K2131 系统(采样时间 1/16s)和火花声源对半消声室进行测定,从结果上看,这一设想是可行的。在模型实验过程中,曾将采样时间放慢至 1/4s,其结果亦保持有良好的一致性。

本实验以电火花脉冲作为点声源。火花发生器输出端经高压电缆与 TORCH-1137 汽缸火花塞相联,通过火花塞两尖端放电产生高频脉冲。为了克服电火花的不稳定所造成的影响,脉冲测量以如下方式进行: 采样时间选定 1/16s,读取连续六次脉冲的最大保持频谱作为一个样本,以三个样本的能量均值作为脉冲的测试数据。实测表明,这种处理方案的稳定度在实验频率范围(4kHz—100kHz)内不超过 1dB。火花塞连续放电时,会因两极端的电蚀产生系统偏差,实测中发现,这种系统偏差一般亦不超过 1dB。TORCH-1137 火花塞尺寸较小(截面直径 10mm),对声场干扰有限,对其指向性进行测量(测量结果见图 1)表明,除火花塞尾端方向外,火花脉冲是各向均匀辐射的。考虑到 1 英寸传声器在原型声场(频率范围 50—1250Hz)中的指向性具有类似特点,在模型实验中,将点源处于模拟测点的位置,不仅使实验操作变得容易,对声场模拟亦有好处。

B&K4138 1/8 英寸传声器是目前可供选择的最小的传声器之一,在模型实验中有较强的指向性(其前端外径在原型中相当为 10 英寸)。指向性曲线由图 2 给出,传声器指向 0° 方位。鉴于车辆的声辐射也是非均匀的,车辆向上的辐射较其它方向为少,这样,我们可以将传声器倒悬于模型路面上,依据互易原理模拟交通车辆。

尽管实验选用电火花脉冲作为声源,但测试系统仍是常规仪器,采样时间较慢,无法分检直达声与混响声,因此,一个半消声室是必需的。好在高频频段,半自由场容易实现。

建筑物外壁的吸声系数一般在 0.1 以下^[1],因而建筑模型的材料除考虑加工方便外,还应较小的吸声系数。经检测认为,选用石膏板作为模型材料是适宜的。

原型中的混凝土或柏油路面,因其吸声系数极小可以忽略地面衰减的影响,实验中以半消声室的水磨石地板模拟这类路面。在水磨石地板上粘贴两层高丽纸用来模拟软性地面(土地

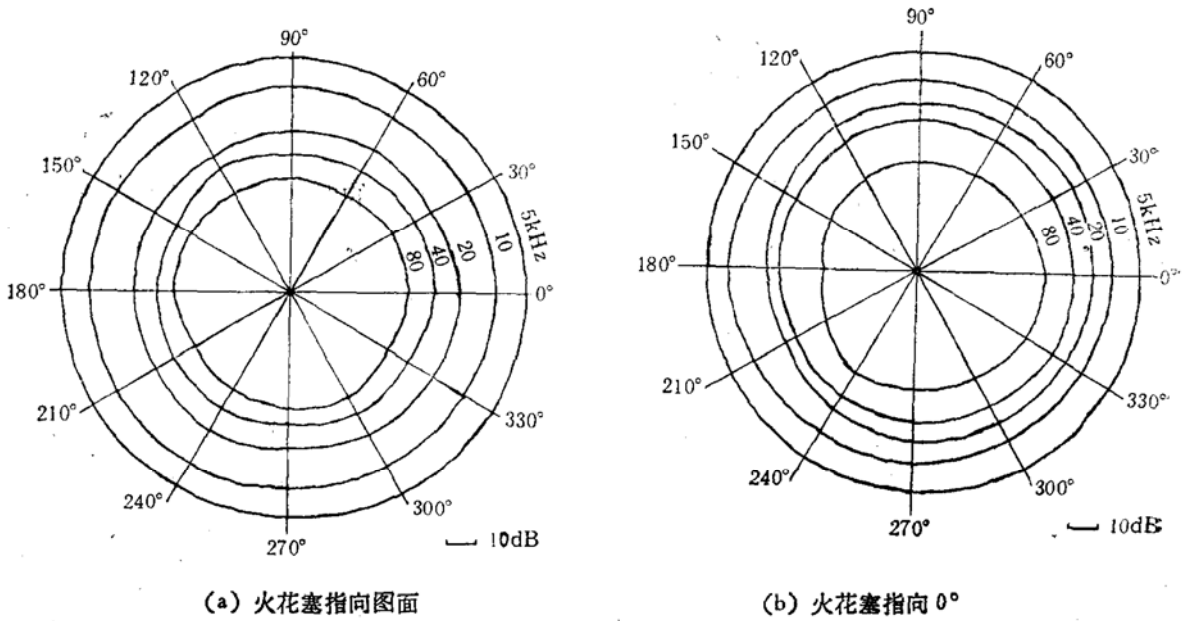


图 1 电火花指向性曲线

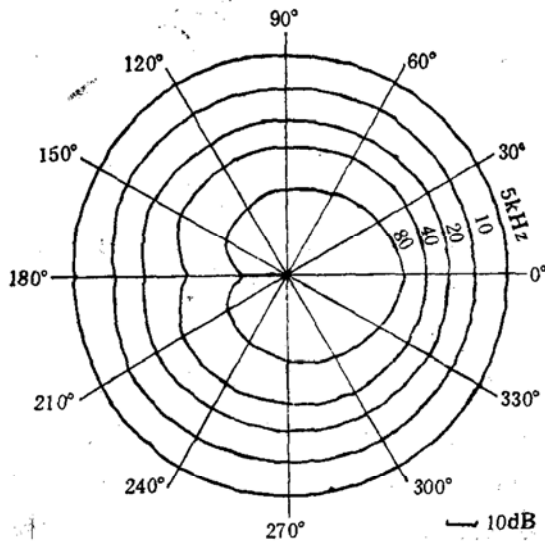
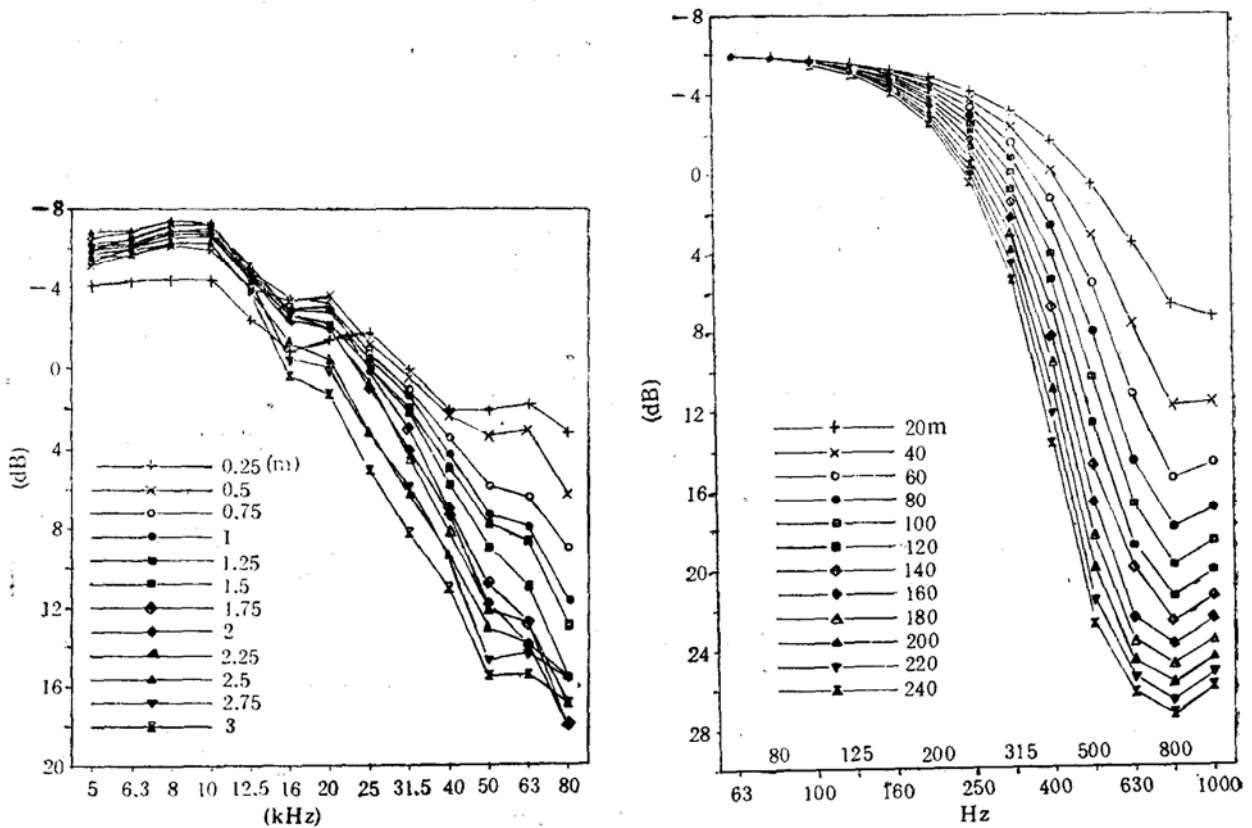


图 2 传声器指向性曲线

与草坪),通过对声衰减效果的检测发现,它与理论计算值(计算方法参见文献[2,3])趋势相近,但衰减量不足。不过在模拟实验过程中,尚未发现地面模拟的不准确性对实验精度产生大的影响。

四、模型实验的数学处理

在研究多车道的交通噪声传播过程中,通常引入等效车道的概念^[4],记 D_e 、 D_n 和 D_f 分别为等效车道、最近与最远车道至测点的平面距离,有 $D_e = \sqrt{D_n \cdot D_f}$, 设定所有的车辆都在等效车道上行驶并将由此得到的声参量近似我们所需的该道路交通噪声指标。这种方法对于测



(a) 模拟地面的测量值

(b) 理论计算值 ($\sigma = 350\text{g/s}\cdot\text{cm}^3$)

图3 地面衰减模拟效果比较

点距道路较远的场合是有效的。但是,在实验过程中,当测点位置改变时,等效车道位置随之改变,从而会给实际操作带来不便。以道路中线(即测点趋于无穷远时等效车道的极限位置,不妨称之为平均车道)替代等效车道,是一种简单而有效的办法。记 D_m 为平均车道与测点的间距,有

$$D_m = \frac{D_n + D_f}{2} \quad (6)$$

记 h 为测点距地表面的高度,设定声源高度 0.5m ,则测点与声源移动线路的直线距离为

$$D_M = \sqrt{D_m^2 + (h - 0.5)^2} \quad (\text{m}) \quad (7)$$

关于测点对称,在道路上划取 $8D_M$ 的路段作为模拟路段,代表着一条无限长道路,这一区间以外的车辆噪声因对总声级贡献较小而被忽略^[9]。

对于车道上行驶的车辆,当车流量不过分大且没有受到诸如交通信号之类因素的干扰时,交通状况呈现随机性。一般认为,相邻车辆间的时距 τ 满足负指数分布^[6]

$$f(\tau) = q_i e^{-q_i \tau} \quad (8)$$

其中 q_i 为第 i 条车道上的车流强度 (veh/s)。需要指出,负指数分布对于交通流的描述不是最精确的,但在交通噪声研究方面,这种表述已经满足精度要求^[7]。

鉴于所要模拟的声学统计量只由车辆的概率分布、车辆位置至测点的声衰减以及车辆的声参数决定,与车辆行驶方向无关,因而,对于通常的双向车流问题,在保证车流参数不变的

前提下,允许将其转换为单向车流问题,认为所有的车辆都在平均车道上朝同一方向行驶.记 $Q(\text{veh/hr})$ 为总车流量且有 $q = \sum_i q_i = Q/3600$, 设定各车道车流互无干扰, 则得到平均车道上车辆的时距分布为

$$f(\tau) = qe^{-q\tau} \quad (9)$$

记 R 为满足 $(0,1)$ 区间上均匀分布的随机量,(9)式所决定的时间参量 τ 可由下式给出

$$\tau = -\frac{1}{q} \ln R = -\frac{3600}{Q} \ln R \quad (10)$$

在计算机仿真模拟过程中,此式得到了充分的应用.

车辆的声参数因车型的不同而有较大差异,应将各类车辆分别对待.本文将车辆分为轻型(小汽车、小型面包车)、中型(吉普车、面包车、轻骑摩托车)、次重型(卡车、客车、摩托车)、重型(重型卡车、大型客车、拖拉机)四类.设定各类车具有各自恒定的声指标,包括声功率随车速的变化关系和频谱谱形.以距行驶中线 7.5m 处车辆匀速行驶时的 A 计权声级作为反映车辆声功率的指标,由文献[8]的测试结果,可认为四类车的声级 $L_p(\text{dBA})$ 与车速 $v(\text{km/h})$ 在 20—80km/h 速度范围内成线性关系且分别为

$$55 + 0.3v \quad 60 + 0.3v \quad 68 + 0.26v \quad 70 + 0.3v$$

根据实测及其它文献介绍的图表,得到一组 A 计权频谱谱形如下图,并认为谱形只与车型有关,不随车速的变化而变化.

当研究重点在于以等效声级 L_{eq} 为指标的噪声传播问题时,我们有理由在满足声能均值等价的前提下,对多车种的问题进一步简化.第 j 类车辆位于平均车道 x 处时,称测点处得到的声级 $L_j(x)$ 为声影响函数,记 p_j 为第 j 类车出现的几率,则令

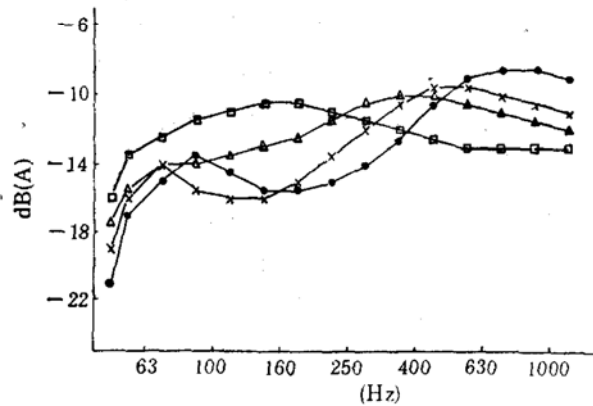


图4 车辆噪声 A 计权频谱谱形(总声级为 0dBA)

● 轻型; × 中型; △ 次重型; □ 重型

$$L(x) = 10 \lg \left(\sum_{j=1}^4 p_j \cdot 10^{L_j/10} \right) \quad (11)$$

并认为当平均车道 x 处有一辆车通过时,其对测点的声影响为 $L(x)$ 且与车型无关.在这里,不妨称 $L(x)$ 为等效声影响函数.

本实验以数学手段处理空气吸收的修正问题,其修正量 $\Delta\alpha_A$ 为

$$\Delta\alpha_A = \alpha_A(f, T, \text{RH}) - 80\alpha_A(f/80, T_r, \text{RH}_r) \quad (12)$$

其中 f 为实验测试频率, T 、 RH 为实验室温湿度。化简 Sutherland 公式^[9]并以中心频率处的纯音吸声系数替代所在 1/3oct 的参量, 当设原型参量 $t_r = 20^\circ\text{C}$ 、 $RH_r = 40\%$ 时, 得到修正公式如下

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta\alpha_A &= 1.753h \frac{0.05 + h}{0.391 + h} \cdot \frac{f^2}{\left(44100h \frac{0.05 + h}{0.391 + h}\right)^2 + f^2} \cdot \left(8.99 - \frac{2239}{T}\right) \\ &+ 1.60 \times 10^{-10}f^2 - 0.256 \frac{f^2}{25600^2 + f^2} \quad (\text{dB/m}) \\ h &= RH \cdot 10^{20.5318 - 2939/T - 4.9221gT} \quad (\%) \end{aligned} \right. \quad (13)$$

当实验中得到频谱 $L_p(f)$ 且知声源与传声器的直线距离 d 时, 修正后的频谱 $L_p^*(f)$ 为

$$L_p^*(f) = L_p(f) + d \cdot \Delta\alpha_A(f) \quad (14)$$

这种按直线传播方式进行的修正, 与实际情况会有一定差距, 但仍被认为可行^[10]。

五、模型实验步骤

- (1) 向计算机输入实验室温湿度, 根据(13)式计算各频带的空气吸收修正量。
- (2) 测得半自由场中距声源 9.4cm (原型 7.5m) 处的声频谱, 送入计算并修正空气吸收。
- (3) 电火花位于模型测点位置, 传声器贴近地面沿平均车道由 1 点顺序移至 17 点 (每点间距 25cm), 测量频谱送入计算机并按直线传播方式修正空气吸收。
- (4) 逆序重复如上过程与步骤(2)。
- (5) 将平均车道上相应各点数据加以平均并与步骤(2)所得频谱均值相减, 得到道路 17 个位置上的各频带衰减值 (相对于 7.5m 处的测量数据)。需要指出, 由于测量过程经历了顺逆两个过程, 平均之后, 电火花的系统误差得以忽略。
- (6) 将四类车总声级为零时的 A 计权频谱谱形 (见图 4) 与步骤(5)所得结果相加, 叠加各频带数据得到道路 17 个位置上各类车辆噪声的 A 声级衰减值。
- (7) 向计算机输入车流量、四类车所占比例、车速及背景声级。
- (8) 根据车速算出各类车的噪声级并与步骤(6)的结果相加, 得到四类车在 17 个位置上对测点的声影响。
- (9) 依据各类车的比例按 (11) 式进行计权平均并将 17 个点的均值加以曲线拟合得到等效声影响函数 $L(x)$ 。需要指出, 模型中的实验路段长 4m (原型 320m), 当其不能满足 $8D_M$ 路长要求时, 可将实验数据按对数规律外推。
- (10) 利用计算机仿真模拟随机车流, 相邻车辆时距满足负指数分布。叠加某时刻道路上各车辆噪声影响的总和。
- (11) 以 5s 为一个时间间隔, 连续执行步骤(11), 测取 200 个噪声值。
- (12) 计算统计声级。

六、实验结果与分析

为了验证前述实验方案的可行性, 我们在北京三处临街居住小区共十六个测点进行了实



图 5 双榆树小区图示

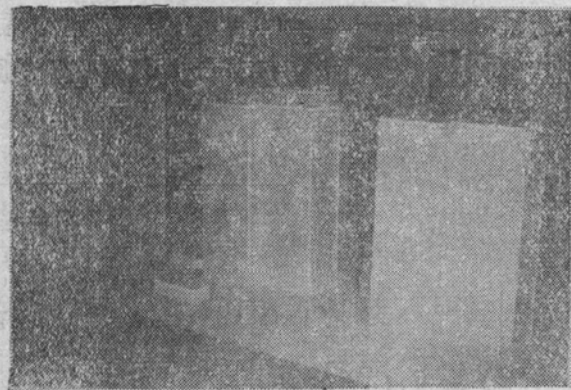


图 6 小区模型图示

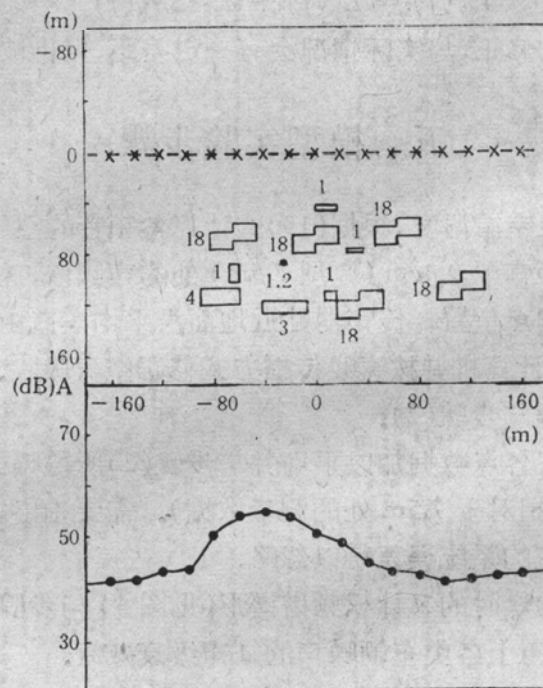


图 7 测点布置及其等效声影响曲线

测,并在实验室内进行缩尺模拟。图 5 中的建筑群位于三环北路双榆树南里,模型如图 6 所示。实验中忽略了围墙、树木等一切细节,只研究建筑外形对噪声传播的干扰作用。该小区内某一测点的位置及关于该点的等效声影响曲线见图 7,其中四类车的比例由轻至重分别为 0.35、0.25、0.25 和 0.15,车速为 40、40、30 和 30 km/h。图中建筑物之内或旁侧的数据为建筑层数,测点 \bullet 下的数字为测点距地面的高度 (m),标注距离为原型尺度。

依据实测时统计的车流参数(车流量、车型比例及车速)和实验数据计算出相应的等效声影响函数,经计算机仿真模拟与计算得出统计声级 L_{eq} 和 L_{10} 。与按常规方法在原型中的实测结果相比较,可以认为模拟值与实测值有较好的吻合。在 16 个测点(其中包括一组沿住宅不同高度的测试)的数据比较中, L_{eq} 与 L_{10} 的标准偏差均在 2 dB(A) 左右,最大偏差 ± 4 dB(A),这样的精度对于交通噪声的评价与预测是适用的。

模型实验的稳定性是我们所关心的问题之一。对某一测点,曾连续进行了九组测试,其中

一组仪器采样时间为 1/4s。对测试结果进行模拟计算, L_{eq} 与 L_{10} 在各种车流量状态下的偏差均不超过 $\pm 2\text{dB(A)}$ 。

从模拟结果中看, L_{10} 的数据一般略小于实测值(平均值偏差约 1dB(A)), 其原因在于等效声影响的引入改变了噪声级的统计分布, 测点检测到较高声级的几率下降。采用将车辆分类考虑并叠加各类车模拟结果的方法替代等效声影响法, L_{10} 的一致性会得到一定程度的改善, 而标准偏差仍处于 2dB(A) 的水平。

根据上述内容, 可以得出如下结论: (1) 实验方案有效, 模拟结果 (L_{eq} 和 L_{10}) 的标准偏差约 2dB(A) 。(2) 模型实验的稳定性得到满足。(3) 等效声影响法基本适用, 但若要求 L_{10} 具有更好的一致性, 可将车辆分类考虑。

参 考 文 献

- [1] 马大猷等, “声学手册”, (科学出版社, 1983)。
- [2] Chessell, C. I., “Propagation of noise along a finite impedance boundary”, *J. Acoust. Soc. Am.*, **62** (1977), 825—34.
- [3] Attenborough, K., “Predicted ground effect for highway noise”, *J. Sound & Vib.*, **81**(1982), 413—24.
- [4] White, F. A., “Our acoustic environment”, (John Wiley & Sons, 1975).
- [5] Edward, B. M., “Environment noise control”, (John Wiley & Sons, 1975).
- [6] 鸠洛夫 D. L. 等, “交通流理论”, (人民交通出版社, 1983)。
- [7] Jacobs, L. J. M. *et al*, “A computer model to predict traffic noise in urban situations under free flow and traffic light condition”, *J. Sound & Vib.*, **72**(1980), 523—37.
- [8] 北京劳动保护研究所, “机动车辆噪声特性和整车噪声统计模型”, 北京交通噪声综合控制资料之八, 1984.
- [9] Sutherland, L. C., “Review of experimental data in support of a proposed new method for computing atmospheric absorption losses”, *DOT-TST-75-87*, (1975).
- [10] Delany, M. E. *et al*, “A scale model technique for investigation traffic noise propagation”, *J. Sound & Vib.*, **56**(1978), 325—40.