

# 城市道路交通噪声预测理论—统计模型

李本纲, 陶澍, 曹军, 徐福留(北京大学城市与环境学系, 北京 100871)

摘要: 在分析影响道路交通噪声各因素的基础上, 根据道路交通噪声预测的理论公式, 结合实测数据, 建立了适合中国城市交通、路况和环境标准的理论-统计模型。该模型对机动车参考噪声、车流量、车速、路面坡度、地面植被等因素对噪声的影响作了有效的预测, 使模型在实际应用中计算更简单、结果更准确。

关键词: 交通噪声预测; 等效车流量; 等效车速

中图分类号: X593 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2000)06-05-0001

## A Theoretical-statistical Model for Urban Road Traffic Noise Prediction

Li Bengang, Tao Shu, Cao Jun, Xu Fuliu(Department of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** A theoretical-statistical model for road traffic noise prediction was developed based on basic mathematical forms and data measured in field. Because this model is based on Chinese vehicles and field work is performed following Chinese GB standards, it is more suitable for noise prediction in China. Equivalent traffic flow and equivalent traffic speed are used to deal with mixed vehicles flow. More accurate modeling of influences and ground absorption on noise propagation is performed by detailing ground absorption rate and using vegetation covering rate. This model has more reasonable result in road traffic noise prediction in comparison with similar models used abroad.

**Keywords:** road traffic noise prediction; equivalent traffic flow; equivalent traffic speed

目前, 已提出的道路交通噪声预测模型有美国的 FHWA 高速公路交通噪声预测模型<sup>[1]</sup>、英国的 CRTN88<sup>[2]</sup>、多层递阶预报模型<sup>[3]</sup>、考虑街道声散射的交通噪声预报模型<sup>[4]</sup>、神经网络模型<sup>[5]</sup>、高架桥交通噪声预测模型<sup>[6]</sup>和灰色预测模型<sup>[7]</sup>。在实际工作中国内应用最多的还是美国的 FHWA 模型。但该模型产生于 20 年前, 主要用于高速公路匀速车流的交通噪声预测, 模型建立时所依据的车型、路况及环境标准与我国的实际情况有较大差异, 而且该模型中存在某些明显缺陷, 应用在城市道路交通噪声预测中精度难以保证。

本文以北京市道路交通为研究对象, 建立道路交通噪声预测的理论-统计模型, 它将更适合我国车辆、道路、环境标准等实际情况。

### 1 道路交通噪声预测理论模型

影响道路交通噪声的因素主要包括: ① 声

源的强度, 例如车流量、车速、车型、路面材料及道路的宽度、坡度和平整度等; ② 噪声传播的方式和传播路径, 如接受点到声源的距离、地形起伏、地面植被状况、各类声屏障对噪声的阻挡作用、各类地物对噪声的反射以及空气的温度、湿度和流动等; ③ 噪声接受点的空间位置, 如接受点对声源的视角、接受点距路口和公共汽车站的距离等。各类预测模型进行道路交通噪声预测的过程基本一致(图 1), 但在一些方面差异明显, 如考虑因素的多少、繁简不同, 实验统计参数差别大, 以及对复杂情况如多个声屏障、噪声多次反射的处理方法不同。

各类预测模型对影响道路交通噪声主要因素在数学表达形式上基本一致(表 1)。本研究

基金项目: 国家自然科学基金项目(49901016)和国家杰出青年基金资助项目(49525102)

作者简介: 李本纲(1971~), 男, 博士, 讲师, 主要从事地理信息系统与遥感技术在环境科学中的应用研究。

收稿日期: 1999-12-16

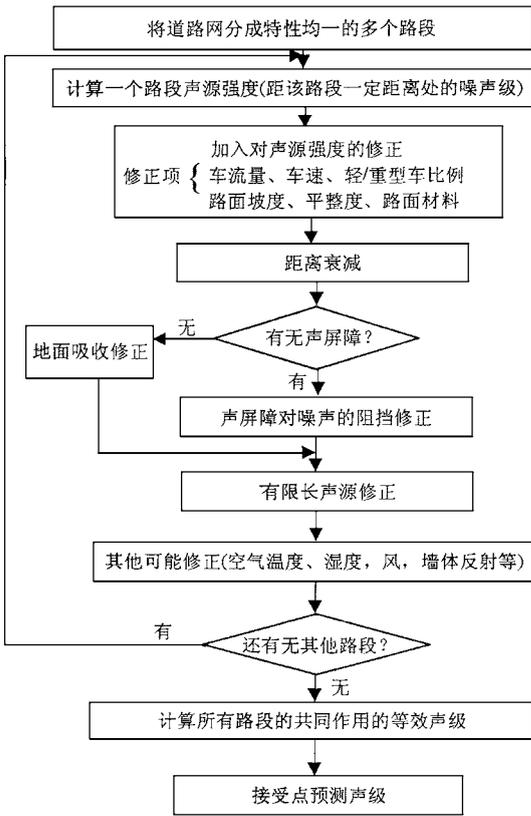


图 1 应用数学模型进行道路交通噪声预测流程

Fig. 1 Process for road traffic noise prediction using mathematical model

中仍沿用这些经过严密理论推导得到的公式。

## 2 理论模型参数的确定

### 2.1 研究方法

为了确定理论模型参数,在北京二环、三环、长安街、白颐路等主干道共 154 个测点进行实测,然后应用统计方法确定相应参数。实测根据《城市环境噪声测量方法》(GB3222-82)和《机动车辆噪声测量方法》(GB1496-79)进行,采用国产 HS5691 型精密声级计和 ND9 型声级校准器,在每个测点测量 30min 等效连续 A 声级  $L_{eq}$  及累计百分声级  $L_{10}$ 、 $L_{50}$ 、 $L_{90}$ ,测量在道路两边相应位置同时进行,并取平均值。其它模型所需参数如重、中、轻 3 类车辆的车流、车速、道路宽度、车道数、测点准确位置、地面植被覆盖种类和覆盖率等也作同步测量。

### 2.2 车辆参考噪声级

对于车辆参考噪声级,各国的标准测量方法差异甚大。FHWA 模型所用的车辆参考噪声是在距声源 15m、高 1.5m 处测量得到的,而且所得统计结果仅适用于车速 50~100km/h。CRTN88 模型所用的车辆参考噪声则是在距路沿 10m、高 1.2m 处测量得到,基准测量车速为 75km/h。根据我国《机动车辆噪声测量方

表 1 道路交通噪声预测理论模型的基本公式

Table 1 Basic forms for road traffic noise prediction

影响因素	基本公式 $L_{eq}(1\text{-hour})$	基本公式 $L_{10}(1\text{-hour})$	变量说明
机动车参考噪声	$L_0 = A_1 + A_2 \times \lg v$	$L_0 = A_1$	$A_{1, i}$ 为系数
车流量修正	$\Delta Q = A_3 \times \lg Q$	$\Delta Q = A_2 \times \lg Q$	$L_0$ 为车辆参考噪声
车速修正	$\Delta v = A_4 \times \lg v$	$\Delta v = A_3 \times \lg(v + 40 + 500/v) + A_4 \times \lg(1 + 5 \times P/v)$	$Q$ 为车流量, $v$ 为车速 $P$ 为重型车百分比
距离衰减修正	$\Delta D = A_5 \times \lg(D_0/D)$	$\Delta D = A_5 \times \lg D$	$D_0$ 为参考噪声测量距离
路面坡度修正	$\Delta G = A_6 \times G$	$\Delta G = A_6 \times G$	$D$ 为距声源垂直距离
地面植被影响	$\Delta \alpha = A_7 \times \lg(D_0/D)^\alpha$	$\Delta \alpha = A_5 \times \lg(D_0/D)^\alpha$	$G$ 为路面坡度, $\Phi$ 为受声点
有限长声源修正	$\Delta \Phi = F(\Phi, \alpha)$	$\Delta \Phi = 10 \times \lg(\Phi/180)$	对声源视角, $\delta$ 为声程差
声屏障修正	$\Delta_s = F(\delta, \Psi)$	$\Delta_s = F(\delta)$	$\Psi$ 为受声点对声屏障视角
大气影响修正	$\Delta_m$ —根据实测表格计算	$\Delta_m$ —根据实测表格计算	$D$ 和 $H$ 为植被高度和宽度
常数项	$10 \lg D_0 + 10 \lg \pi - 30$	$10 \lg D_0 + 10 \lg \pi - 30$	$\alpha$ 为地面吸声系数

法》(GB1496-79),车辆参考噪声测量应在距声源 7.5m、高 1.2m 处进行,基准车速为 50km/h。这也是国外模型与我国实际情况不符之处。

本研究按照车辆的噪声特性,将混合车流分为重、中、轻 3 类。重型车包括载重量大于 3.5t 的各类载重汽车,中型车包括载重量小于

3.5t 的载重汽车以及各类公共汽车, 轻型车则包括小型面包车和各类轿车. 根据 GB1496-79, 选取车速接近 50km/h 的平直且较窄的单车路段, 在距车道中心线 7.5m 的道路两侧 1.2m 高处设置测点, 测量各类车辆的匀速行驶噪声. 然后对大量实测数据统计得到上述 3 类车的参考噪声级及其标准差(表 2).

表 2 不同车辆类型的参考噪声级

Table 2 Reference noise levels of three vehicle types

车辆类型	参考噪声均值( $L_0$ )	参考噪声标准差( $\sigma$ )
重型车	81.2 dBA	3.1 dBA
中型车	76.6 dBA	2.1 dBA
轻型车	71.6 dBA	1.9 dBA

### 2.3 平坦道路交通噪声自由传播模型

FHWA 模型将混合车流划分为重、中、小 3 类, 根据每一类车的流量和车速分别计算所产生的噪声及其传播, 然后将 3 类车辆在受声点的噪声进行能量叠加得到最终结果. CRTN 模型将混合车流分为轻、重 2 类, 并根据重型车比例加入修正. 本研究则采用等效车流量和等效车速的新机制来处理混合车流. 该方法根据表 2 中 3 类车的参考噪声级, 按照噪声的能量叠加原理, 将重型车和中型车的流量换算为相应的轻型车流量, 即:

$$Q = b_1 \times Q_H + b_2 \times Q_M + Q_L \quad (1)$$

式中,  $Q$  为总等效车流量,  $Q_H$ 、 $Q_M$ 、 $Q_L$  分别为重、中、轻型实际车流量, 系数  $b_1$  的物理意义是 1 辆重型车产生的噪声相当于  $b_1$  辆轻型车产生的噪声( $b_1 = 10^{0.1 \times (81.2 - 71.6)} = 9.12$ ), 系数  $b_2$  的物理意义是 1 辆中型车产生的噪声相当于  $b_2$  辆轻型车产生的噪声( $b_2 = 10^{0.1 \times (76.6 - 71.6)} = 3.16$ ). 等效车速公式为:

$$v = (9.12 \times Q_H \times v_H + 3.16 \times Q_M \times v_M + Q_L \times v_L) / Q \quad (2)$$

式中,  $v$  为等效车速,  $v_H$ 、 $v_M$ 、 $v_L$  分别为重、中、轻型车的实际测量车速.

由于城市街道一般为多车道, 受声点距声源距离  $D$  是等效距离, 它由(3)计算:

$$D = \frac{D_N \times D_F}{\dots} \quad (3)$$

为了确定表 1 中的模型参数  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ 、 $A_5$ , 首先选取无坡度的交通道路, 而且噪声在硬地面自由传播的测点共 60 个, 然后根据 60 点的实测数据进行回归分析. 另外, 根据文献[8]可知, 机动车辆参考噪声级与车速是线性关系, 而不是对数线性关系. 此时道路交通噪声预测模型形式为:

$$L_{eq} = A_1 + A_2 \times (v - 50) + A_3 \times \lg Q + A_4 \times \lg v + A_5 \times \lg(D_0/D) \quad (4)$$

$$L_{10} = A_1 + A_2 \times \lg Q + A_3 \times \lg(v + 40 + 500/v) + A_5 \times \lg D \quad (5)$$

回归分析结果是( $R^2$  为可决系数, S. E. 为标准误差):

$$L_{eq} = 55.7 + 0.12 \times (v - 50) + 9.97 \times \lg Q - 8.06 \times \lg v + 14.38 \times \lg(D_0/D)$$

$$R^2 = 0.997 \quad S. E. = 0.98 \text{ dBA} \quad (6)$$

$$L_{10} = 32.45 + 9.39 \times \lg Q + 13.88 \times \lg(v + 40 + 500/v) - 15.40 \times \lg D$$

$$R^2 = 0.878 \quad S. E. = 1.02 \text{ dBA} \quad (7)$$

### 2.4 路面坡度的影响

机动车辆在平路、上坡与下坡行驶状态差别很大, 上坡时发动机加大转速, 辐射噪声增强, 排气噪声也增大; 下坡时制动下行, 因此下坡比上坡噪声明显减弱, 比平路行驶也小. 噪声差主要取决于路面坡度, 但当坡度大于 0.08 时, 噪声差趋于稳定. FHWA 模型对此作了简化处理, 当重、中型车上坡时, 坡度小于 0.02 不加修正, 坡度在 0.03 到 0.04 加 2dBA, 坡度在 0.05 到 0.06 加 3dBA, 坡度大于 0.07 加 5dBA. 对下坡或小车不加修正. CRTN88 模型则统一加修正值( $30 \times G$ )dBA. 陈子明在文献[9]中对此作了详尽的研究, 其结果为: 当坡度小于 0.08 时, 重型车加修正值( $98 \times G$ )dBA, 中型车加修正值( $56 \times G$ )dBA, 轻型车加修正值( $28 \times G$ )dBA, 而且修正值上坡为正, 下坡为负. 该结论与本研究实测结果符合较好, 直接应用其结果. 结合 3 类车流量即可得到坡度修正:

$$\Delta_G = (98 \times Q_H + 56 \times Q_M + 28 \times Q_L) \times G / (Q_H + Q_M + Q_L) \quad (8)$$

## 2.5 地面植被的影响

在考虑噪声传播时,通常将地面划分为2类声学表面。一类称声学硬地面,可视为全反射表面,其吸声系数近似于0,如水面、混凝土地面、沥青地面等;另一类称声学软地面,可视其为吸收表面,如草地、灌木等地面植被,吸声系数则与覆盖率、植被种类有关。地面植被对噪声的传播特性产生明显的影响,也是城市噪声治理的措施之一。地面植被产生的附加衰减是指软地面相对于硬地面的附加声吸收。

FHWA模型在考虑地面植被对交通噪声传播影响时,采用下面公式进行修正:

$$\Delta_{\alpha} = \alpha \times 10 \times \lg(D_0/D) \quad (9)$$

式中,吸声系数 $\alpha$ 根据4个条件决定:①当声源或受声点位于地面3m以上时, $\alpha=0$ ;②当噪声传播受高于3m的声屏障阻挡时, $\alpha=0$ ;③当噪声在硬地面传播时, $\alpha=0$ ;④当上述3个条件均不满足时, $\alpha=0.5$ 。

如此决定吸声系数存在明显缺陷,其一是当声源或受声点高度从3m增加到3m以上时, $\alpha$ 从0增加到0.5,导致预测噪声值发生突变;其二是没有考虑地面植被覆盖率对 $\alpha$ 的影响,这明显与实际情况不符。

本研究在27个实测点的测量结果显示,当(声源高度+受声点高度)达15m时地面植被的影响仍然存在。因此,假设吸声系数与植被覆盖率成正比,则地面植被吸声系数 $\alpha$ 和附加衰减可按以下公式计算:

$$\Delta_{\alpha} = \alpha \times C \times 10 \times \lg(D_0/D) \quad (10)$$

对硬地面, $\alpha=0$ ;

对软地面,

$$\alpha = \begin{cases} 0.5 & H_{\text{eff}} \leq 3\text{m} \\ 0.625 \times \left| 1 - \frac{H_{\text{eff}}}{15} \right| & 3\text{m} < H_{\text{eff}} \leq 15\text{m} \\ 0 & H_{\text{eff}} > 15\text{m} \end{cases}$$

式中, $C$ 为地面覆盖率, $H_{\text{eff}}$ 为声源高度与受声点高度之和。

## 2.6 其它因素的影响

对于有限长声源修正、声屏障修正和大气影响修正,由于其物理意义明确,而且无地域差

异,在各类模型中形式统一。本研究直接应用FHWA模型和CRTN88模型中的有关结果。具体公式、表格见文献[1]和文献[2],在此不再赘述。

## 2.7 模型最终形式

综上所述,可以得到道路交通噪声预测理论-统计模型,其形式如下:

$$\begin{aligned} L_{\text{eq}} &= 55.7 \\ &+ 0.12 \times (v - 50) - 8.06 \times \lg v && \text{速度修正} \\ &+ 9.97 \times \lg Q && \text{车流量修正} \\ &+ 14.38 \times \lg(D_0/D) && \text{距离衰减} \\ &+ (98 \times Q_H + 56 \times Q_M + 28 \times Q_L) \times G / (Q_H + Q_M + Q_L) && \text{路面坡度修正} \\ &+ \alpha \times C \times 10 \times \lg(D_0/D) && \text{地面植被附加衰减} \\ &+ F(\Phi, \alpha) && \text{有限长声源修正} \\ &+ F(\delta, \Psi) && \text{声屏障阻挡修正} \\ &+ \Delta_m && \text{大气状况修正} \\ L_{10} &= 32.45 \\ &+ 9.39 \times \lg Q && \text{车流量修正} \\ &+ 13.88 \times \lg(v + 40 + 500/v) && \text{速度修正} \\ &- 15.40 \times \lg D && \text{距离衰减} \\ &+ (98 \times Q_H + 56 \times Q_M + 28 \times Q_L) \times G / (Q_H + Q_M + Q_L) && \text{路面坡度修正} \\ &+ \alpha \times C \times 10 \times \lg(D_0/D) && \text{地面植被附加衰减} \\ &+ 10 \times \lg(\Phi/180) && \text{有限长声源修正} \\ &+ F(\delta) && \text{声屏障阻挡修正} \\ &+ \Delta_m && \text{大气状况修正} \end{aligned}$$

## 3 模型验证

为了验证模型精度,从154个实测点中除已用于模型参数确定的点以外随机选取25个测点,用上述模型计算预测噪声值,并与实测值比较(表3)。从表3中可以看出,大部分测点的 $L_{\text{eq}}$ 预测精度在1dBA以内, $L_{10}$ 的预测精度稍差,但也在1.5dBA以内。而且 $L_{\text{eq}}$ 和 $L_{10}$ 的预测

都不含明显的系统误差. 证明本研究所得模型 是可用的.

表 3 模型预测值与实测值比较

Table 3 Comparison between predictions and measurements in 25 field points

测点	$Q/\text{辆} \cdot \text{h}^{-1}$	$v$ $/\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	$D/\text{m}$	$L_{\text{eq}}$ 实测值	$L_{\text{eq}}$ 预测值	$L_{\text{eq}}$ 误差	$L_{10}$ 实测值	$L_{10}$ 预测值	$L_{10}$ 误差
				$/\text{dBA}$	$/\text{dBA}$	$/\text{dBA}$	$/\text{dBA}$	$/\text{dBA}$	$/\text{dBA}$
西直门外大街	1 483	44.8	8.7	71.5	72.5	1.0	73.8	75.3	1.5
白颐路, 北图	5 315	39.9	11.5	75.6	76.1	0.5	77.5	78.4	0.9
万泉河路, 西苑	2 174	36.8	10.4	73.7	72.7	- 1.0	77.5	76.3	- 1.2
二环, 阜成门	12 319	36.0	12.7	78.4	79.0	0.6	80.0	81.0	1.0
二环, 长椿街	6 712	37.1	10.8	78.1	77.4	- 0.7	80.0	79.6	- 0.4
二环, 和平门	5 058	46.3	11.7	76.7	76.0	- 0.7	79.0	78.4	- 0.6
北新华街	1 068	28.8	7.8	70.8	71.3	0.5	73.0	74.0	1.0
二环, 台基厂	5 690	40.8	9.5	77.0	77.6	0.6	79.8	80.0	0.2
二环, 崇文门	3 367	32.3	9.5	75.4	75.1	- 0.3	78.0	77.5	- 0.5
二环, 小街北口	10 614	66.1	23.8	74.8	75.9	1.1	76.3	77.6	1.3
三环, 安贞桥	10 461	56.2	18.0	77.0	77.0	0.0	79.0	78.9	- 0.1
三环, 亮马桥	13 958	38.2	29.4	74.6	74.3	- 0.3	76.0	76.0	0.0
三环, 双井桥	11 652	58.1	26.8	75.4	75.1	- 0.3	76.8	76.8	0.0
三环, 木樨园	9 618	60.8	29.0	73.2	73.9	0.7	74.8	75.6	0.8
三环, 六里桥	13 887	39.3	26.8	75.2	74.9	- 0.3	77.3	76.6	- 0.7
三环, 中央电视塔	15 791	44.5	28.1	75.2	75.4	0.2	77.0	77.1	0.1
长安街, 礼士路	6 072	47.1	21.4	74.1	73.1	- 1.0	75.5	75.1	- 0.4
长安街, 西单	6 344	46.8	27.7	72.1	71.6	- 0.5	73.5	73.6	0.1
长安街, 东单	5 989	68.0	27.9	71.8	72.6	0.8	74.0	74.3	0.3
长安街, 日坛路	5 431	50.1	28.0	70.1	71.0	0.9	73.0	73.0	0.0
长安街, 大北窑	5 177	42.9	29.6	70.9	70.2	- 0.7	72.5	72.1	- 0.4
长安街, 公主坟	6 221	42.9	18.3	74.5	73.9	- 0.6	77.0	76.1	- 0.9
长安街, 东翠路口	5 226	47.6	15.5	75.1	74.4	- 0.7	77.0	76.7	- 0.3
长安街, 玉泉路	2 362	51.0	15.9	70.7	71.0	0.3	73.2	73.4	0.2
长安街, 老山	2 163	39.6	15.9	69.3	70.1	0.8	72.5	72.5	0.0
合计						$\Sigma = 0.8$			$\Sigma = 1.7$

#### 4 结论

本研究所得模型能用于城市道路交通噪声的  $L_{\text{eq}}$  和  $L_{10}$  预测计算. 相对于国外同类模型而言, 由于参考噪声级是基于我国的车型、路况和环境标准, 因此更适用于我国实际情况. 在使用了等效车流量和等效车速以后, 模型应用更简洁. 在路面坡度、地面植被修正方面, 也比同类模型有所改进.

当车辆以中、高速行驶时, 噪声与车速成线性关系<sup>[8]</sup>, 可以应用本模型进行交通噪声预测. 但如果城市交通堵塞导致车速过低或车辆加速、减速, 使用本模型时要进行一定修正. 本模型理论公式推导中对车流量大小并无限制, 因此可以用于高速公路大车流量及夜间小车流量的交通噪声预测. 另外, 本模型仅适用于距声源距离大于 7.5m 的情况. 对于 7.5m 以内的道路交通噪声预测, 应当使用其它模型.

#### 参考文献:

- Barry T M, Reagan J A. FHWA-RD-77-108, FHWA highway traffic noise prediction model, U. S. Department of Transportation. Washington DC: 1978.
- Department of Transport of U. K. Calculation of road traffic noise. London: HMSO. 1988.
- 姜海涛, 夏青海等. 道路交通噪声预测模型及其应用. 环境科学, 1989, 10(6): 62~ 66.
- 吴硕贤, Kittinger E. 考虑声散射的街道交通噪声预报模型. 环境科学学报, 1996, 16(3): 364~ 371.
- 张继萍, 吴硕贤. 神经网络在道路交通噪声预测中的应用. 环境科学学报, 1998, 18(5): 471~ 476.
- 陈子明, 路德明等. 高速高架复合道路交通噪声的分析和预测. 环境科学, 1994, 15(2): 24~ 28.
- 王国平. 灰色系统理论在城市交通噪声预测和绝对关联度分析中的应用. 中国环境科学, 1996, 16(1): 56~ 59.
- 任文堂, 郝维周. 交通噪声及其控制. 北京: 人民交通出版社, 1984. 316.
- 陈子明, 林董. 山城道路交通噪声的分析和预测. 环境科学. 1991, 12(2): 38~ 41.