

文章编号:1006-1355(2021)02-0190-06

# 考虑路网交通流状态的单变量交通噪声预测

孙 滨<sup>1</sup>, 陈 亮<sup>1</sup>, 王海波<sup>2</sup>, 李巧茹<sup>1</sup>, 胡 乐<sup>1</sup>, 武泽宇<sup>1</sup>

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401;  
2. 广东工业大学 土木与交通工程学院, 广州 510006)

**摘要:**为实现路网区域交通噪声预测,克服传统预测模型中路段间交通特性相互独立以及路段内流量与速度相互独立的缺陷,借助Van Aerde交通流模型,在不同道路等级、设计速度约束下,结合道路线声源噪声排放,构建基于速度的单变量交通噪声预测模型。分别对比4种常见城市道路的交通噪声实测值,模型预测值平均偏差为1.63 dB,满足精度需求。应用该模型对典型路网进行噪声模拟,结果显示:设计速度由40 km/h连续变化到80 km/h时,不同位置路段产生的路网交通噪声变化量大小依次为内侧路段、偏外侧路段和外侧路段,且路网内侧区域交通噪声变化量明显大于路网外侧区域,两者平均差值为5.2 dB。研究可为路网交通噪声控制提供参考。

**关键词:**声学;交通噪声预测;交通流;设计速度;噪声分布

中图分类号:U491.9<sup>1</sup>

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2021.02.032

## Single-variable Traffic Noise Prediction with Consideration of Traffic States in Urban Road Networks

SUN Bin<sup>1</sup>, CHEN Liang<sup>1</sup>, WANG Haibo<sup>2</sup>,  
LI Qiaoru<sup>1</sup>, HU Le<sup>1</sup>, WU Zeyu<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;  
2. Faculty of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** To realize the prediction of traffic noise in road networks and overcome the independence of traffic characteristics and the independence between flow and speed in traditional prediction models, a single-variable traffic noise prediction model based on the speed is presented. This model is established in virtue of Van Aerde traffic flow model, under the constraints of road grades and design speed and based on road line-source noise emission model. Comparing with the measured values of 4 types of urban roads, the average deviation of traffic noise predicted by the model is 1.63 dB, which meets the accuracy requirements. The traffic noise of a typical road network is simulated with the model. The results show that when the design speed is continuously increased from 40 km/h to 80 km/h, road network traffic noise variation quantity generated by sections at different locations increases in the order of the inner road, the partially outer side road, and the outside road. And the change value of traffic noise in the inner area of the road network is significantly greater than that in the outer area of the road network. Their average difference of increase is 5.2 dB. The study has provided a reference for road network traffic noise control.

**Key words:** acoustics; traffic noise prediction; traffic flow; design speed; noise distribution

城市交通噪声污染越来越严重。据2018年中国生态环境情况公报,区域声环境质量相比2017年更恶劣,且城市夜间道路交通噪声不达标率高达

27.5%<sup>[1]</sup>。研究表明,长时间暴露于交通噪声的人群在冠心病死亡率、心肌梗塞及高血压患病率等方面风险明显增大<sup>[2-3]</sup>。因此,减小城市交通噪声迫在眉睫。交通噪声预测是交通噪声管控的基础,合理精确的预测模型至关重要。

交通噪声预测模型中最常用类型是理论-统计模型,美国FHWA模型<sup>[4]</sup>作为典型的理论-统计模型,自上世纪被提出后得到广泛应用并不断被完善,通过考虑加减速车道<sup>[5]</sup>、噪声时空分布规律<sup>[6]</sup>、不同交

收稿日期:2020-06-26

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2019202447);

广东省自然科学基金资助项目(2018A030310333)

通信作者:王海波(1989-),男,河北省保定市人,讲师,主要研究方向为道路交通环境工程。

E-mail: wanghb\_edu@126.com

通流状态(自由流、控制流)<sup>[7]</sup>、货车类型<sup>[8]</sup>等影响,学者们扩充了此类模型的适用范围并进一步提高模型预测精度。相比理论-统计模型,神经网络模型以交通流结构、速度、车型等作为输入量,通过训练历史数据可得到更为精确的交通噪声预测值<sup>[9-10]</sup>。此外,仿真软件<sup>[11]</sup>、灰色理论<sup>[12]</sup>、遗传算法<sup>[13]</sup>等技术方法的应用使交通噪声预测模型的应用场景更广,影响因素考虑更加全面,预测精度更高。但上述方法严重依赖速度、流量等实测值,模型中速度、流量等变量相互独立,无法直接表明交通流与交通噪声的内在关联。同时,为使当前路段交通噪声预测模型应用到路网层面,学者进行大量研究,发现道路属性(道路间距<sup>[14,16]</sup>、道路密度<sup>[15]</sup>、路段长度<sup>[16-17]</sup>、道路等级<sup>[17-18]</sup>等)与交通噪声排放存在关系,但其研究对象为已建成路网单一路段,所得结论难以描述路段属性连续性变化与路网交通噪声变化关系。

综上,现有研究所用交通噪声预测模型多以速度、流量为双独立输入量,没有考虑交通流中流量与速度本质联系。此外,路段属性连续性变化与路网交通噪声排放关系缺乏研究。本文借助 Van Aerde 模型,以车头间距、流量与速度关系为基础,分析路网属性(等级、设计速度)与交通噪声内在关系,构建基于速度的单变量路网交通噪声预测模型,并利用实测交通噪声验证该模型精度,通过路网模拟分析,明确路段设计速度连续改变与路网交通噪声排放的规律。

## 1 基于速度的单变量路网交通噪声预测模型

### 1.1 线声源交通噪声排放模型

本文以国家标准(JTG B03-2006)<sup>[19]</sup>中交通噪声预测模型为基础模型,见式(1)。该模型是线声源交通噪声排放模型,预测精度满足实际需求<sup>[20]</sup>。

$$L_{eq} = L_o + 10 \log(q/Tv) + 10 \log(r_0/r)^{1+\alpha} - 16 \quad (1)$$

其中: $L_{eq}$ 为车流在接受点处的等效声级,dB; $L_o$ 为车流参照点处的平均辐射噪声级,dB; $q$ 为车流量,veh/h; $v$ 为车速,km/h; $r_0$ 为参考点至行车线距离,m; $r$ 为计算点距行车线的距离,m; $T$ 为计算时间; $\alpha$ 为与地面相关的吸收因子。

在以式(1)表示的模型中, $q$ 与 $v$ 相互独立,均为实际测量值,根据交通流理论,两者之间本质联系在模型中未体现。因此,借助适当的交通流模型,利用道路属性作为约束,将流量 $q$ 转换为速度 $v$ 的函数,改进现有模型以形成基于速度 $v$ 的单变量交通预测模型是可行的。

### 1.2 考虑交通流的单变量交通噪声预测模型

研究利用 Van Aerde 交通流模型描述流量与速度关系,进而改进交通噪声预测模型。Van Aerde 宏观交通流模型结合 Green Shield 模型和 Pipes 模型,甚至在某些条件下可简化为 Green Shield 模型,该模型可适用于不同交通环境、等级的道路,所反映的城市道路交通流更加真实<sup>[21-22]</sup>。鉴于 Van Aerde 模型比其他模型在交通流预测方面更加优异,本文选择 Van Aerde 宏观交通流模型构建  $q$  与  $v$  关系,构造过程见式(2)。

$$L_{eq} = f(v, q) \rightarrow f(v, q(v)) = F(v) \quad (2)$$

Van Aerde 宏观交通流模型中,利用道路属性(等级、设计速度等)与交通流参数(堵塞密度、自由流速度等)间相互关系,建立车头间距  $h$  与实际道路运行速度  $v$  的关系:

$$h = c_1 + c_3 v + c_2 / (v_f - v) \quad (3)$$

交通流中车头间距  $h$  与车流密度  $k$  的关系如下:

$$k = 1/h \quad (4)$$

此外,交通流理论中流量、速度、密度三者关系为

$$q = kv \quad (5)$$

联立求解式(3)、式(4)、式(5),可得  $q$  与  $v$  关系,见式(6)。该式以车头间距为过渡变量,依据交通流关系,对实际道路流量及速度建模。由于模型综合考虑道路结构及主要交通流参数,式(6)可揭示规划路网中流量与速度的关系。

$$q = \frac{v}{c_1 + c_3 v + c_2 / (v_f - v)} \quad (6)$$

将式(6)代入式(1),构建基于速度的单变量路段交通噪声预测模型,见式(7):

$$L_{eq} = L_o + 10 \log \left( \frac{I}{c_1 + c_3 v + c_2 / (v_f - v)} \right) + 10 \log (r_0/r)^{1+\alpha} - 16 \quad (7)$$

其中: $k_j$ 为道路堵塞密度; $v_f$ 为道路自由流速度; $q_c$ 为道路最大通行能力; $v_c$ 为道路最大通行能力所对应的速度。

$c_1$ 为固定车头间距常量(km):

$$c_1 = mc_2 \quad (8)$$

$c_2$ 为第一可变车头间距常量(km<sup>2</sup>/h):

$$c_2 = \frac{1}{k_j (m + 1/v_f)} \quad (9)$$

$c_3$ 为第二可变车头间距常量(h):

$$c_3 = \frac{-c_1 + v_c/q_c - c_2 / (v_f - v_c)}{v_c} \quad (10)$$

$m$ 为常量(h/km),反映  $c_1$  和  $c_2$  的关系:

$$m = (2v_c - v_f) / (v_f - v_c)^2 \quad (11)$$

当接受点到路段距离小于4倍的路段长度,或者接受点位于路段两侧时,应加入有限路段修正量 $\Delta L$ ,见图1。

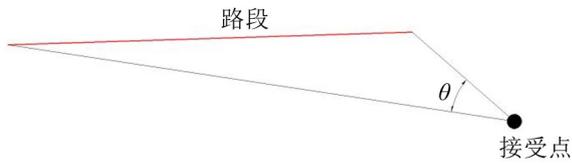


图1 路段修正示意图

$$\Delta L = 10 \log \theta \quad (12)$$

路网内某点的连续等效声级可利用噪声叠加原理通过将各路段交通噪声叠加求解:

$$L_{eq} = 10 \log \sum 10^{(L_{eqi}/10)} \quad (13)$$

道路等级及设计速度决定道路承载能力,间接影响路网交通流分配,而交通流量的变化导致路网交通噪声排放变化。由于在以式(7)表示的模型中采用的速度变量为理论行车速度,故单变量噪声预测模型可根据某一种路网结构交通分配各路段流量,进而计算出对应的交通噪声,这表明道路等级及设计速度应为交通噪声预测模型的约束。模型中交通噪声 $L_{eq}$ 、速度变量 $v$ 与道路等级 $p$ 、设计速度 $v_d$ 间接相关,关系见图2。

由于存在上述约束,只有当道路结构(道路等级、设计速度)确定后,该模型才可使用。此外,考虑到交叉口交通流的复杂性,以单变量噪声预测模型为基础,参照国家标准《环境影响评价技术导则声环境》HJ2.4-2009<sup>[26]</sup>对交叉口噪声进行叠加修正。模型中参数如堵塞密度等可根据实际交通状况进行标定以提高模型预测精度。

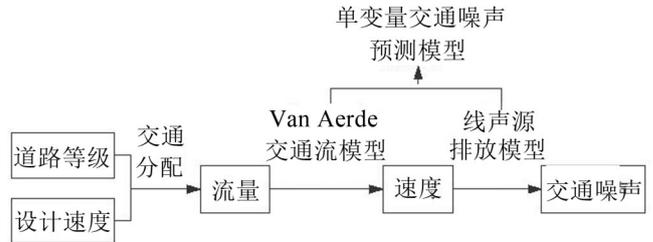


图2 道路等级、设计速度对交通噪声约束原理

考虑道路等级及设计速度的约束,噪声预测模型中参数 $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$ 、 $m$ 应依据表1计算。其中,堵塞状态最小安全车头间距 $h'$ 取为8 m,根据 $k_j = 1000/h'$ ,计算出 $k_j$ 为125 veh/km,参考Rakha H为保证Van Aerde模型的有效性推导出的相关参数取值范围: $v_f = v_d$ ,经多组实验后确定最佳 $v_c = 0.75 v_f$ , $q_c$ 为道路基本通行能力<sup>[23]</sup>。

表1 不同道路等级和设计速度下的参数取值

道路等级/设计速度 $v_d$ (km/h)	次干路		主干路		快速路
	40	50	60	80	
通行能力最大时对应的行驶速度 $v_s$ ( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )	30	37.5	45	60	
自由流速度 $v_f$ ( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )	40	50	60	80	
堵塞密度 $k_j$ ( $\text{veh}\cdot\text{km}^{-1}$ )	125	125	125	125	
最大通行交通量 $q_c$ ( $\text{veh}\cdot\text{km}^{-1}$ )	1 650	1 700	1 800	2 100	

## 2 模型精度验证

选取4种常见城市道路作为研究对象,如表2所示。依据交通噪声测量国家标准<sup>[24-26]</sup>规定,在开阔、遮挡建筑少且远离交叉口的研究道路周边区域布置5个测量点,测量点距离道路行车道边缘线分别为7.5 m、25 m、50 m、75 m、100 m,测量仪器为CENTER322声级计,并人工记录测量期间车流量。测量时间为工作日,气候状况为非雨雪天气,微风。同时,记录测量路段车流量见表2。

表2 研究道路结构及实测流量

道路编号	设计速度/ $(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	车道数	车流量/ $(\text{veh}\cdot\text{km}^{-1})$
a	40	2	2 726
b	50	2	2 997
c	60	4	6 309
d	80	6	15 890

根据各道路结构,可参考表1得到模型中参数值。利用式(6)可求解路段理论行驶速度,再利用单变量交通噪声预测模型式(7)可计算4条道路各测量点噪声值,与实测噪声值对比如图3所示。图3表明,模型预测值小于实测值,这与模型标定参数如 $v_c$ 等的设计有关,根据参数约束下Van Aerde模型计算出的理论速度偏低,进而使交通噪声预测值偏小。

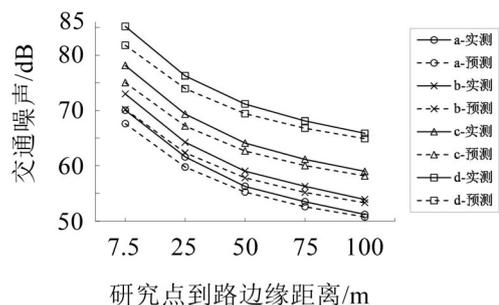


图3 交通噪声实测值及预测值

进一步分析4条道路的交通噪声实测值与预测值的差值,得到图4。结果显示,4条道路预测值与实测值最大偏差为3.41 dB,最小偏差为0.46 dB,平均偏差为1.63 dB。随着测量距离的增大,模型预测精度越低,这可能是由于测量距离增大使产生的交通噪声衰减增加,而导致实测噪声的减小快于模型预测值。此外,由于不同道路结构交通噪声排放及噪声衰减差异,4条道路在不同测量位点的交通噪声实测值与测量值的大小存在差异。

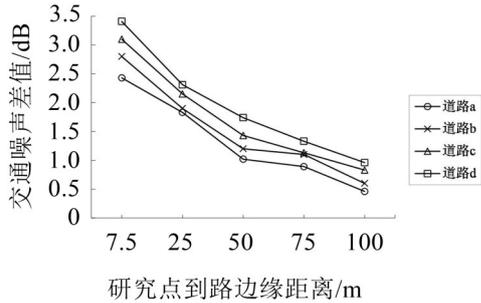


图4 4条道路实测值与预测值差值

考虑到模型预测值与实测值的偏差较小,单变量交通噪声预测模型具有足够的精度,可进一步用于路网结构对噪声排放的影响分析。

### 3 设计速度连续变化对路网交通噪声排放影响

为克服已建路网由于路段属性不可更改而无法研究路网交通噪声与路段属性的动态关系的缺陷,利用模拟路网,通过连续变化路段设计速度,使之分别为40 km/h、50 km/h、60 km/h、80 km/h,分析对应的交通噪声、研究点位置、目标路段位置之间关系,以寻找设计速度连续变化对路网交通噪声排放影响。

#### 3.1 研究路网

考虑到城市路网布局以网格布局居多,选取图5为研究路网,初始路网道路编号及结构见图5,图中数据依次为编号、道路等级(a:主干路;m:次干路)、设计速度、车道数、流量,其中路网中各路段非垂直连接,交叉口简化为节点,所模拟的车辆为小汽车。

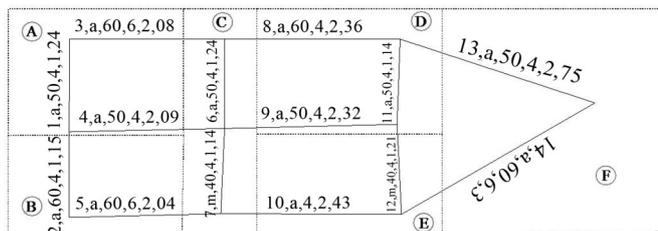


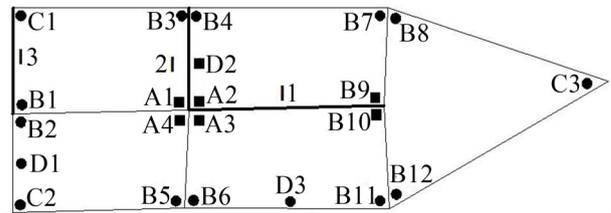
图5 路网结构及小区划分

路网所在区域划分为A、B、C、D、E、F共6个小区,且出行矩阵固定,见表3。

表3 出行矩阵/(veh·km<sup>-1</sup>)

	A	B	C	D	E	F
A	--	1 764.47	1 210.30	886.05	589.19	1 049.98
B	1 393.48	--	589.80	990.58	2 695.79	1 330.36
C	1 445.80	1 163.94	--	670.44	388.67	831.15
D	773.97	2 253.50	1 223.01	--	430.00	919.53
E	1 024.46	1 002.63	238.06	1 665.94	--	1 968.90
F	862.35	815.21	1 238.79	1 387.03	1 796.62	--

为使研究点位可代表路网整体区域,选取研究点共计22个(交叉口区域点位19个,路段中间点位3个),另选取路网中3条路段作为设计速度变化的目标路段,分别在路网内侧、偏外侧、外侧,编号分别为 $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ ,见图6。



备注 ■: 路网内侧研究点 A: 十字路口区域研究点  
 ●: 路网外侧研究点 C: 两路段交叉口区域研究点  
 ■: “T”交叉口区域研究点  
 ●: 路段中间区域研究点

图6 路网研究点、研究路段布局

#### 3.2 研究方法

采用控制变量法,具体流程为:控制路段其他属性不变,每次仅更改一条目标路段设计速度,通过路网交通分配得到路段流量,利用单变量交通噪声预测模型求解此时路网各研究点交通噪声。再次更改另一条目标路段设计速度,重复上述过程。

利用上述方法,实验中对3条目标路段依次改变设计速度,利用UE模型对路网进行交通分配,后利用上述模型编程求解22个点位的噪声值,共计得到12组噪声数据,共264个点噪声数据。

#### 3.3 结果分析

##### 3.3.1 设计速度连续改变时目标路段的位置对路网交通噪声影响

研究中以22个研究点噪声变化量绝对值的累计值代表路网交通噪声变化,用以处理路段位置与交通噪声关系。

目标路段的设计速度连续变化时,即从40 km/h变为50 km/h、从50 km/h变为60 km/h、从60 km/h变为80 km/h时,路网交通噪声排放变化情况见图7。在设计速度路段对设计速度连续取值时,不同位置

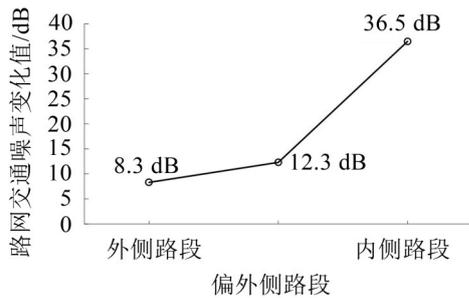


图7 不同位置路段设计速度变化时路网交通噪声变化

路段产生的路网交通噪声变化量大小依次为:内侧路段、偏外侧路段、外侧路段;其中,路网内侧区域的路段产生的路网平均交通噪声变化量高达36.5 dB,显著大于路网偏外侧路段的15.1 dB及外侧路段的8.3 dB,表明路网内侧路段的设计速度变化对路网噪声排放调节作用更强,这可能是由于内侧路段在交通网络中起枢纽作用,其交通量变化对路网流量分布影响更强,进而导致路网噪声排放变化更显著。

### 3.3.2 设计速度连续改变时路网交通噪声变化情况

研究中累计3条目标路段在设计速度变化时产生的交通噪声变化量,并将其作为处理区域位置影响的路网交通噪声变化指标。在设计速度连续变化时,即从40 km/h变为50 km/h、从50 km/h变为60 km/h、从60 km/h变为80 km/h时,此时不同区域路

网交通噪声排放变化情况见图8。

对比图8(a)、图8(b)发现,在3组设计速度变化(从40 km/h变为50 km/h、从50 km/h变为60 km/h、从60 km/h变为80 km/h)时,路网内侧区域交通噪声变化幅度均显著大于路网外侧区域,较之平均增大5.2 dB;这是由于区域交通噪声由其周围路段交通噪声叠加而得,相比路网外侧区域,路网内侧区域周围路段密度更大,故路段流量变化导致的交通噪声变化越显著。

由反映路网平均交通噪声变化情况的图8(c)可知,在设计速度从40 km/h变为50 km/h、从50 km/h变为60 km/h时,路网交通噪声分别增大0.67 dB、0.35 dB,在设计速度从60 km/h变为80 km/h时,路网交通噪声却减小1.5 dB。这表明随着设计速度变大,路网交通噪声排放呈先增后减趋势,这可能是由于设计速度为60 km/h时,在所采用的区域出行流量下路网交通效率较高,路网中路段流量分配较为合理,各路段交通噪声较高,路网整体噪声排放较大。但设计速度为80 km/h时,路网交通噪声降低,这是由于区域出行流量固定且相对较小,过大的设计速度致使流量较多集中在部分路段,路网流量分布不均匀,路网交通噪声整体降低。

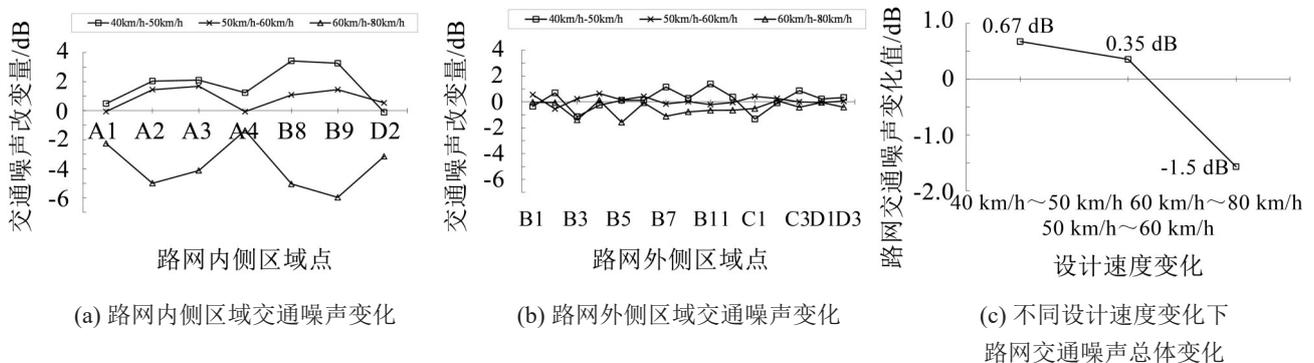


图8 设计速度连续变化时路网不同位置交通噪声排放变化

## 4 结语

本文提出一种基于Van Aerde交通流模型的单变量交通噪声预测模型:

(1) 借助Van Aerde交通流模型,分析车头间距、流量、速度与交通噪声之间关系,以道路等级、设计速度为约束,构建基于速度的单变量交通噪声预测模型。4条不同等级道路的交通噪声实测表明,单变量交通噪声预测模型计算结果与由实测数据所得的平均交通噪声值偏差为1.63 dB,满足精度要求。

(2) 路网模拟仿真结果显示,设计速度在40 km/h、50 km/h、60 km/h、80 km/h连续变化时,不同位

置路段产生的路网交通噪声变化量大小依次为:内侧路段、偏外侧路段、外侧路段;路网内侧区域交通噪声显著大于路网外侧区域,较之平均增大5.2 dB;在设计速度连续变化时,路网内侧平均交通噪声改变程度大于路网外侧。

(3) 分析路段设计速度对路网交通噪声影响可为路网交通噪声控制提供参考。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部. 2018年中国生态环境状况公报[Z]. 2018.
- [2] BABISCH W, WOLKE G, HEINRICH J, et al. Road traffic noise and hypertension - accounting for the location of

- rooms[J]. *Environmental Research*, 2014, 133: 380-387.
- [3] TOBIAS A, RECIO A, DIAZ J, et al. Health impact assessment of traffic noise in Madrid (Spain)[J]. *Environmental Research*, 2015, 137: 136-140.
- [4] FHWA traffic noise prediction model US[R]. Washington: Department of Transportation, Federal Highway Administration National Technical Information Service, 1978.
- [5] RAJAKUMARA H N, GOWDA R M MAHALINGE. Road traffic noise prediction model under interrupted traffic flow condition[J]. *Environ Model Assess*, 2009, 14: 251-257.
- [6] 王艳华, 赵志强, 丁建立, 等. 基于 FHWA 的城市交通噪声预测模型研究[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(9): 116-119+132.
- [7] LI FENG, LIAO SHAOYI STEPHEN, CAI MING. A new probability statistical model for traffic noise prediction[J]. *Transportation Research Part D*, 2016, 49: 313-322.
- [8] PENG JEFFREY, PARNELL JEFFREY, KESSISSO-GLOU NICOLE. A six-category heavy vehicle noise emission model in free-flowing[J]. *Applied Acoustics*, 2019, 143(1): 211-221.
- [9] NEDIC VLADIMIR, DESPOTOVIC DANIJELA, CVETANOVIC SLOBODAN, et al. Comparison of classical statistical methods and artificial neural network in traffic noise prediction[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2014, 49: 24-30.
- [10] GARG N, MANGAL S K, SAINI P K, et al. Comparison of ANN and analytical models in traffic noise[J]. *Acoust Australia*, 2015, 43: 179-189.
- [11] 娄金秀, 马建华. 基于 Cadna/A 的高层建筑环境噪声垂直分布仿真[J]. *噪声与振动控制*, 2014, 34(3): 136-138+181.
- [12] 沈艳, 余冬华, 李丽萍. 新息累积 GM(1,N) 模型在交通噪声预测中的应用[J]. *噪声与振动控制*, 2013, 33(3): 184-187.
- [13] 侯德劭, 晏克非, 成峰. 城市交通噪声环境承载力分析模型及算法[J]. *计算机工程与应用*, 2008(18): 215-217+220.
- [14] 路晓东, 刘曦东, 张梦迪, 等. 城市路网间距对交通噪声动态变化的影响研究[J]. *电声技术*, 2018, 42(8): 41-43.
- [15] SALOMONS ERIK M, PONT META BERGHAUSER. Urban traffic noise and the relation to urban density, form, and traffic elasticity[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 108: 2-16.
- [16] LU XIAO DONG, KANG JIAN, ZHU PEI SHENG, et al. Influence of urban road characteristics on traffic noise[J]. *Transportation Research Part D*, 2019, 75(1): 136-155.
- [17] WANG BO, KANG JIAN. Effects of urban morphology on the traffic noise distribution through noise mapping: A comparative study between UK and China[J]. *Applied Acoustics*, 2011, 72(8): 556-568.
- [18] TANG U W, WANG Z S. Influences of urban forms on traffic-induced noise and air pollution: results from a modelling system[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2007, 22: 1750-1764.
- [19] JTG B03-2006. 公路建设项目环境影响评价规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [20] 范东平, 张玉环, 刘蕴芳, 等. 道路交通噪声预测模式预测结果的比较[J]. *环境工程学报*, 2013, 7(6): 2391-2395.
- [21] RAKHA H, CROWTHER B. Comparison of green-shields, pipes, and van aerde car-following and traffic stream models[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2002(1802): 248-262.
- [22] KHAIRUL ANUAR, FILMON HABTEMICHAEL, MECIT CETIN. Estimating traffic flow rate on freeways from probe vehicle data and fundamental diagram[C]. 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems, 2015: 2921-2926.
- [23] RAKHA H. Validation of Van Aerde's simplified steady-state car-following and traffic stream model[J]. *Transportation Letters*, 2009, 1(3): 227-244.
- [24] 国家环境保护局. GB 3096-2008 声环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 3222.2-2009 声学 环境噪声的描述、测量与评价 第2部分: 环境噪声级测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [26] 中华人民共和国环保部. HJ2. 4-2009 环境影响评价技术导则 声环境[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.