

◇ 研究报告 ◇

基于改进声线跟踪法的室内交通噪声动态模拟*

李 锋¹ 蔡 铭^{2†}

(1 广东技术师范学院汽车学院 广州 510665)

(2 中山大学广东省智能交通系统重点实验室 广州 510006)

摘要 对碰撞点的有效性判断是传统声线跟踪法的一个重要步骤,在计算复杂的室内空间问题时计算量较大,为解决这一问题采用了一种与空间剖分相结合的改进的声线跟踪法。将该方法与微观交通流仿真和车辆噪声排放模型进行结合,实现了道路交通噪声透过窗户在多连通室内空间传播的动态模拟。最后采用该方法对相同道路和交通流条件下不同建筑朝向的 4 种布局室内噪声进行动态模拟。分析了室内交通噪声的大小和分布与建筑物布局、窗户的朝向、窗户的形式和面积等因数之间的关系。结果表明:窗户正对道路的房间比窗户侧对道路的房间噪声高 4~6 dB(A),房间内等效声级与窗户面积的对数成正比关系。

关键词 三维声线跟踪法,交通噪声,动态模拟,室内空间

中图分类号: TB5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-310X(2016)06-0527-06

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2016.06.008

An improved ray tracing method for dynamic simulation of traffic noise in indoor space

LI Feng¹ CAI Ming²

(1 School of Automotive Engineering, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510665, China)

(2 Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Transportation System, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

Abstract The validity check of collision point is an important process in classical ray tracing method, but it may take massive calculation while calculating a complex interior space. In order to solve this problem, an improved ray tracing method combining with space partition is adopted to omit the validity check. The dynamic process of road traffic noise passing through the window and propagating inside the building on the roadside is simulated, by combining this method with the microscopic traffic flow simulation and a vehicle noise emission model. Finally, the traffic noise propagations in 4 different layouts of interior spaces are simulated respectively using the presented method. The relationships between indoor traffic noise intensity and building orientation, direction of windows, type of windows, and area of windows are analyzed. The results show that, the noise in the room with window facing forward the road is 4~6 dB(A) higher than that facing lateral the road, and the equivalent sound level in the room is proportional to the logarithm of the window area.

Key words 3D ray tracing, Traffic noise, Dynamic simulation, Indoor space

2016-01-07 收稿; 2016-04-25 定稿

*国家自然科学基金(11574407), 广东省科技计划项目(2015B010110005), 广东省智能交通系统重点实验室开放基金(201601001)

作者简介: 李锋(1983-), 男, 广东河源人, 博士, 工程师, 研究方向: 城市交通噪声预测与控制研究。

† 通讯作者 E-mail: caiming@mail.sysu.edu.cn

1 引言

城市道路交通给人们生活带来便利的同时也造成了噪声污染。交通噪声不仅对室外环境造成污染,也对有开口的室内环境造成影响。因此对道路交通噪声在室内传播的动态模拟分析对道路交通规划和建筑布局设计具有重要的意义。

随着计算机对交通流模拟技术的发展,利用计算机对交通噪声进行动态模拟的方法在过去几十年中应用得越来越广泛。该方法通常将交通流的动态模拟与交通噪声计算模拟进行结合,实现交通噪声的实时动态模拟^[1-3],具有精度高且可反映噪声变化的动态实时性的优点。目前该方法已被应用到信号控制路口^[4-5]、十字路口^[6-8]、环形交叉口^[9]等场景下的交通噪声预测中。但以往的研究多集中于对室外环境的模拟,对室内交通噪声的动态模拟仍非常少见。

声线跟踪法是室内声场计算的常用方法之一,该方法通过跟踪由声线发出的大量不同方向的声线的传播过程,可准确得到接收点处的声脉冲响应^[10-11]。在交通噪声研究领域,声线跟踪法已被用于计算复杂建筑物影响下的交通噪声传播衰减问题,并得到了较高的精度^[12-14]。该方法在有多个开口的复杂连通空间中应用时,每跟踪一步都要进行交点的有效性判断,计算方法较复杂。为解决这一问题我们在前期工作中提出了一种将室内空间剖分与声线跟踪法相结合的方法,可以省去复杂的交点有效性判断步骤,提高了计算效率^[15]。本文在此基础上将该方法与微观交通仿真进行结合,实现室内交通噪声的动态模拟。然后应用该方法对建筑物和窗户的朝向、窗户面积等对室内噪声的影响进行计算分析。

2 方法

2.1 与空间剖分相结合的声线跟踪法

在传统的声线跟踪法中,一般将声源看作具有一定能量并向四周均匀发射大量声线的点源模型。每根声线所携带的能量与声源的总辐射能量和声线的根数有关。声线在室内空间传播时,与壁面发生碰撞,并同时发生反射和散射。反射方向可根据镜面反射定律进行计算,而散射方向由散射模型决

定。声线每反射一次它的能量都有一定程度的衰减,利用计算机模拟跟踪每一次反射的过程,直到声线的能量衰减到所设定的阈值为止。在声线跟踪过程中,如果声线穿过预先设定的接收球时,记录下声线到达时间和所接收到的能量。当所有声线都被遍历跟踪后,便可得到接收点接收到的能量随时间的分布。

在跟踪某一声线的过程中,每反射一步都需先求出直线与构成室内空间的所有平面的交点,然后在这些交点中找出唯一的有效碰撞点。一般步骤为:先根据上一碰撞点到本次碰撞点的距离由小到大进行排序,然后对距离最近的碰撞点进行有效性判断(即判断该交点是否在实际壁面范围内),如果是有效点,则该交点就是唯一碰撞点,如果不是,则对距离第二近的碰撞点进行有效性判断……如此循环,直至找出唯一碰撞点。如果声线跟踪在一个封闭的凸多面体空间内进行,那么离声线出发点距离最近的交点必然落在实际壁面范围内,这时可以省略有效性判断的步骤。如果声线所在空间不是一个封闭的凸多面体空间,那么需要进行有效性判断,常用的判断方法有夹角和检验法、叉积检验法和交点计数判别法3种。如果室内空间结构较复杂,碰撞点有效性判断的步骤较为繁琐,计算量较大。

为了省略交点的有效性判断,提高声线跟踪法的计算效率,本文采用空间剖分方法与室内空间进行预处理。将整个室内空间按照其实际结构剖分成有限个凸多面体子空间(图1),其主要作用有两个方面:一是在跟踪时大大减少了声线所要求交的平面个数;二是将计算空间划分成有限个凸多面体子空间后,可以省去繁琐的交点有效性判断。具体空间剖分方法参见文献^[15]。

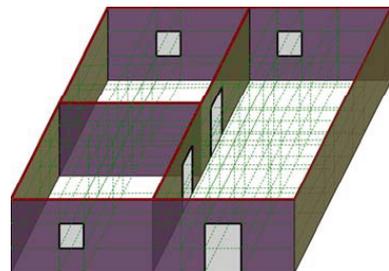


图1 空间剖分示意图

Fig. 1 Schematic diagram of space division for indoor space

空间剖分后的声线跟踪过程如图2所示。将声源看作点声源，声源发出的声能平均分配到大量向四周发散的声线中。如果声源的声功率级为 L_{W0} ，那么每根声线开始时携带的声能为

$$I_0 = \frac{10^{(0.1 \cdot L_{W0} - 12)}}{N}, \quad (1)$$

式(1)中， N 为声线总数。经 k 次反射后，声线的能量变为

$$I_k = I_0 \cdot \alpha^{k-1}, \quad (2)$$

式(2)中， α 为反射系数。将所有声线跟踪完成后，可得到接收点处随时间变化的系列声脉冲 $I(t)$ ，由此可以计算接收点处的声压级^[10,16]

$$SPL = 120 + 10 \lg \left(\int_0^\infty I(t) dt \right). \quad (3)$$

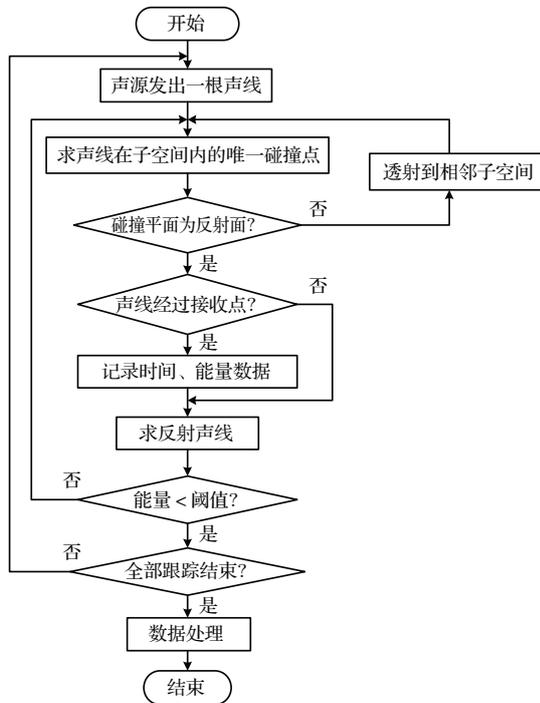


图2 声线跟踪计算流程图

Fig. 2 Process of the ray tracing

2.2 交通噪声在室内传播的动态模拟方法

在城市道路——建筑物环境中，交通噪声可透过建筑物的门、窗进入室内，从而对在室内工作的人们造成影响。将微观交通流仿真、车辆噪声排放模型和声线跟踪法进行结合，可实现交通噪声在室内传播的动态模拟^[14-15]。模拟步骤为：首先根据交通流理论模型可对道路上的交通运行状况进行模拟，得到动态变化的车辆位置和速度信息，再根据车辆噪声排放模型计算出各时刻车辆的声功率级

L_{W0} ，然后利用声线跟踪法跟踪透过建筑物门、窗的剖分声线，便可模拟出交通噪声在室内传播的整个过程，得到交通噪声在室内的动态变化及室内声场分布。

我们已通过实验的方法得到了大、中、小三种车型的单车在7.5 m参考距离处的平均辐射声级与车速的关系^[6]：

$$L_0 = \begin{cases} 24.92 \lg v + 27.96, & \text{小型车,} \\ 36.73 \lg v + 16.44, & \text{中型车,} \\ 29.71 \lg v + 31.77, & \text{大型车,} \end{cases} \quad (4)$$

实验时声场为半自由声场，由此可以得到各种车型车辆的声功率级为

$$L_{W0}(v) = L_0(v) + 10 \lg(2\pi \cdot 7.5^2). \quad (5)$$

3 算例与讨论

3.1 建筑布局对室内噪声分布的影响

对如图3所示的4种布局的室内交通噪声分别进行模拟，假设道路长度为500 m，为双向两车道。车流量为500 veh/h，小、中、大型车的比例为70%:10%:20%，车速为54 km/h。建筑物到道路中心线的距离为10 m，道路高度为0 m，建筑物楼层的地板高度为10 m，天花板的高度为14 m，即建筑物室内空间高度为4 m。建筑物室内空间均为互相连通的双房间结构，连通门的尺寸为2 m×4 m，窗户的尺寸为2 m×2 m。4种布局除建筑物和窗户的朝向不同外，其它条件完全一致。计算时，壁面的反射系数取0.8，散射系数取0.1，接收球的半径为0.5 m，接收球的高度为11 m，即地板上方1 m。

图4为模拟所得的室内噪声 L_{eq} 分布图，容易看出，窗口附近的噪声最大，达到70 dB(A)左右，每个房间四个角点的噪声较小。由于建筑层地面的高度为10 m，与路面不在同一水平面上，导致窗户正向面对道路的房间(布局A，房间1；布局C，房间1)噪声呈带状分布。将不同等级的 L_{eq} 所占房间的面积进行统计，结果如图5所示。大部分房间60~70 dB(A)范围的噪声所占面积最大，各种建筑布局下的房间1均有部分面积超过60 dB(A)。噪声最大的是布局C的房间1，有53%的面积超过60 dB(A)，其余47%面积为50~60 dB(A)；噪声最小的是布局D的房间2，仅有32%的面积超过50 dB(A)。

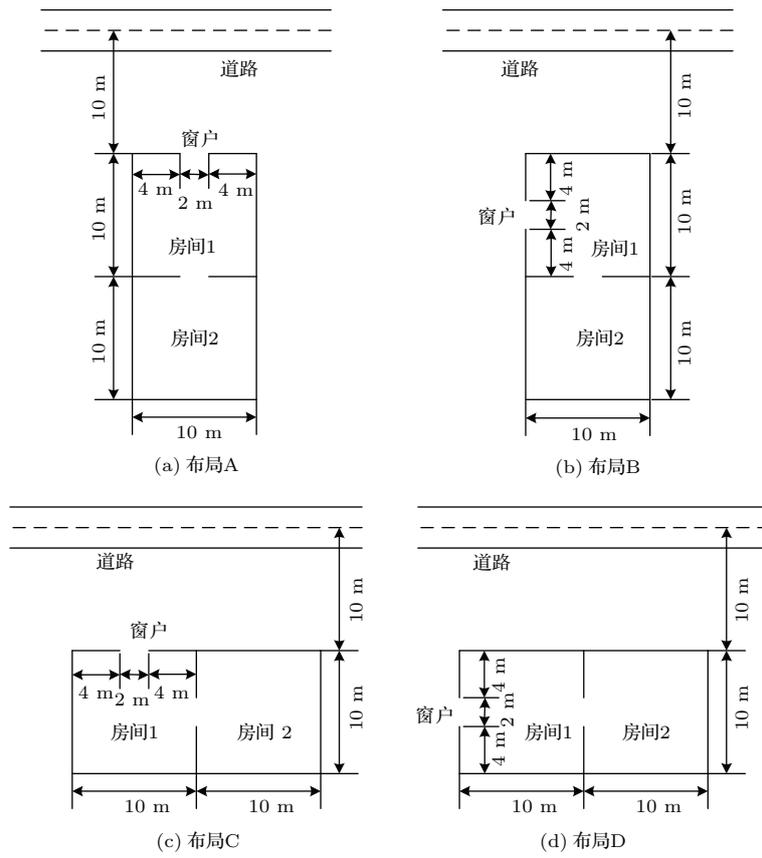


图3 建筑布局

Fig. 3 Architectural layouts

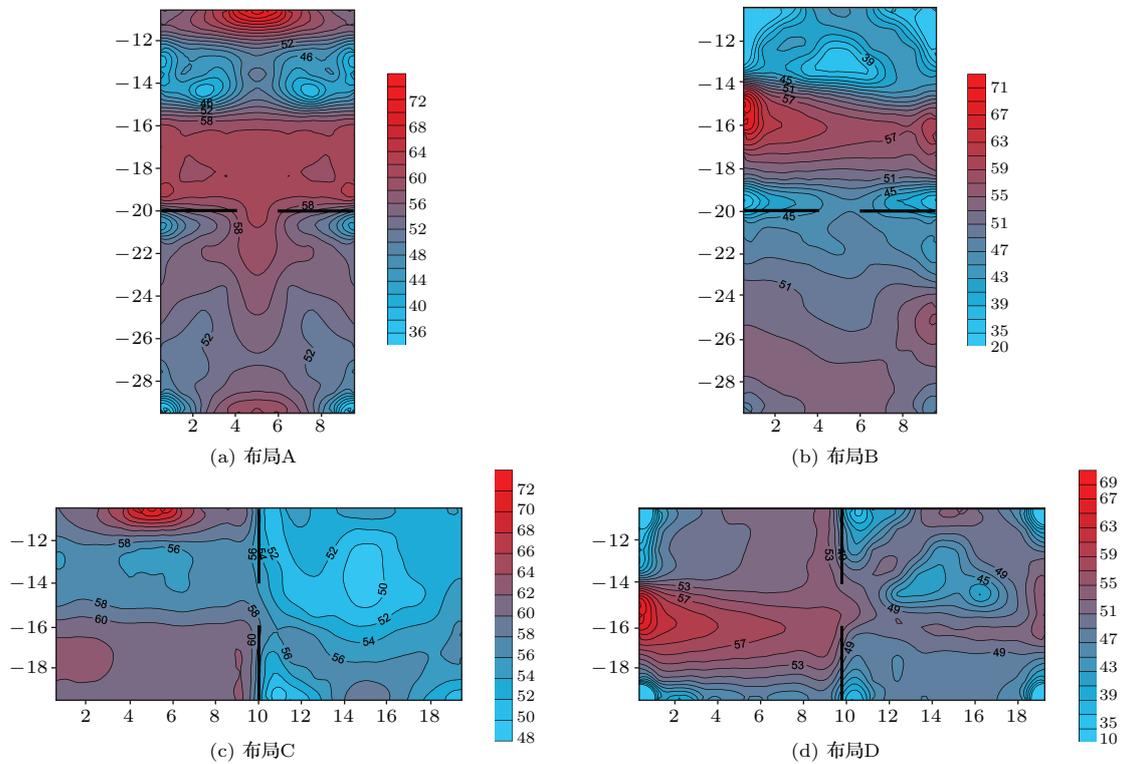


图4 室内噪声分布

Fig. 4 Distribution of indoor traffic noise

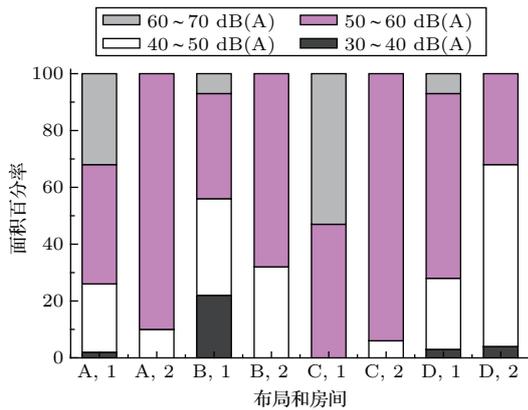


图5 噪声面积百分率

Fig. 5 Percentage of area of different noise level

各种布局下室内噪声的统计结果如表1所示。由于建筑物和窗户的朝向不同导致室内接收到的噪声能量也各不相同。窗户正对道路的布局(布局A, C)室内平均噪声比窗户非正对道路的布局(布局B, D)平均噪声高4~6 dB(A)。与道路垂直方向排布的建筑物(布局A, B)两个房间的平均噪声差距较小,为3~4 dB(A);而与道路平行方向排布的建筑物(布局C, D)两个房间的平均噪声差距较大,达到6~7 dB(A)。各种布局中,房间1的噪声分布不均匀, L_{10} 与 L_{90} 的差值较大,为6~20 dB(A);而房间2的噪声分布则均匀得多, L_{10} 与 L_{90} 的差值仅为6~9 dB(A)。

表1 模拟结果统计数据 (dB(A))

Table 1 Statistics of simulated result (dB(A))

	布局 A		布局 B		布局 C		布局 D	
	房间 1	房间 2						
L_{eq}	58.6	54.5	54.1	51.6	60.6	54.0	54.8	48.8
L_{10}	60.4	57.3	58.6	53.8	62.1	56.3	58.7	51.7
L_{50}	58.1	53.8	46.2	51.6	60.6	53.2	52.2	48.2
L_{90}	44.9	50.5	37.1	46.7	56.5	50.9	46.1	42.7

3.2 窗户面积及形式对室内噪声的影响

将对外窗户设置成正方形,面积从1 m²逐步增加到9 m²,其它条件不变,对布局A进行计算,结果如图6所示。房间1和房间2的 L_{eq} 、 L_{10} 、 L_{50} 和 L_{90} 均随窗户面积的增大而增加,且 L_{eq} 的值与窗户面积的对数成正比关系。计算结果显示房间1的噪声分布范围较大,而房间2的噪声分布范围较小,且随

着窗户面积的增加,噪声分布范围势于缩小,表明大的窗户会使房间内的噪声变得均匀。

现代城市建筑中的窗户经常采用飘窗的形式,如图7所示。将四种不同布局的对外窗户设置成飘窗的形式,伸出部分的尺寸从0.1 m逐步增加到1.5 m,其它条件不变。将四种不同布局中房间1的 L_{eq} 进行比较,结果如图8所示。容易看出各种布局的噪声均随飘窗伸出尺寸的增加而增大,窗户正

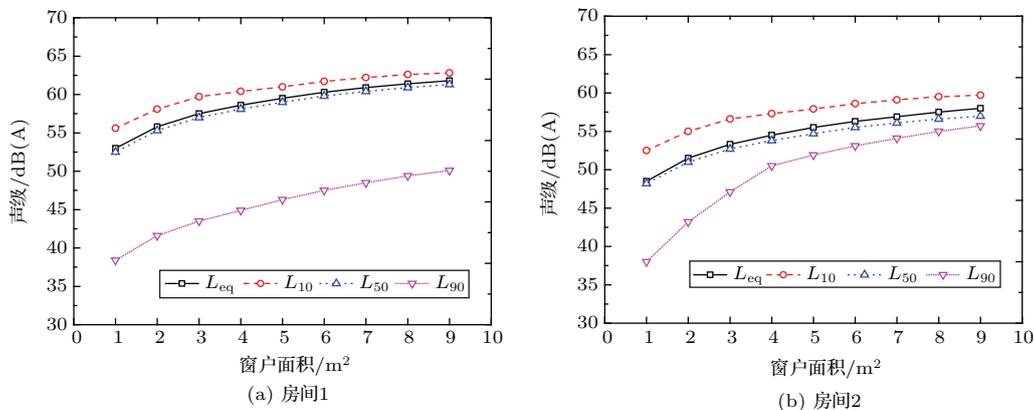


图6 窗户面积与室内噪声的关系

Fig. 6 Relationship between window area and indoor noise level

对道路的布局(布局A,C)噪声增加值较大,最大增加值约为2.2 dB(A),而窗户侧对道路的布局(布局B,D)最大增加值仅为1.2 dB(A)。飘窗的伸出实际上相当于增加了窗户面积,同一时间内有更多的声线进入室内,但噪声的增加幅度不大。

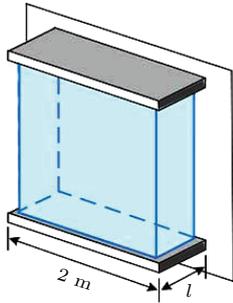


图7 飘窗立面图

Fig. 7 Vertical view bay window

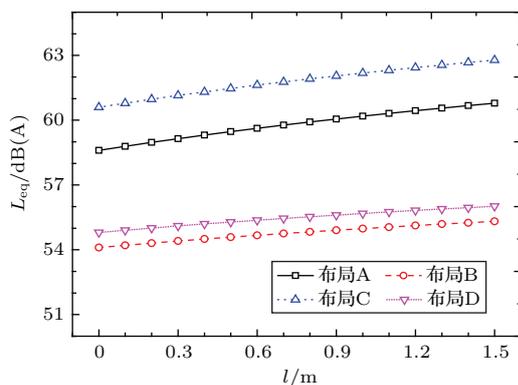


图8 飘窗伸出尺寸与室内噪声的关系

Fig. 8 Relationship between the pendent size of bay window and indoor noise level

4 结论

本文通过空间剖分简化了声线跟踪的计算过程,并将微观交通仿真、车辆噪声排放模型和声线跟踪法结合实现多孔连通空间室内交通噪声的动态模拟分析。模拟算例的结果揭示了室内交通噪声的大小和分布与建筑物布局、窗户的朝向、窗户的形式和面积等因数之间的关系。该方法适用于分析不同建筑物布局结构对室内交通噪声分布的影响,具有较高的应用价值。

参 考 文 献

[1] 李锋, 蔡铭, 刘济科. 基于微观交通仿真的交叉口交通噪声模拟方法[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(5): 179-182.

- LI Feng, CAI Ming, LIU Jike. Intersection traffic noise simulation method based on microscopic traffic simulation[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(5): 179-182.
- [2] JONES R R K, HOTHERSALL D C, SALTER R J. Techniques for the investigation of road traffic noise in regions of restricted flow by the use of digital computer simulation methods[J]. Journal of Sound and Vibration, 1981, 75: 307-322.
- [3] OSHINO Y, TSUKUI K, TACHIBANA H. Road traffic noise prediction taking account of transient vehicle running condition[C]. Liverpool, UK: Inter-noise, 1996, 3117-3120.
- [4] 李锋, 蔡铭, 刘济科, 等. 行人过街信号控制路口交通噪声动态模拟与特性分析[J]. 环境科学学报, 2011, 31(2): 424-429. LI Feng, CAI Ming, LIU Jike, et al. Dynamic simulation and analysis of traffic noise at a signal-controlled pedestrian crossing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(2): 424-429.
- [5] TSUKUI K, OSHINO Y, BLOKLAND G V, et al. Study of the road traffic noise prediction method applicable to low-noise road surfaces[J]. Acoustical Science & Technology, 2010, 31: 102-112.
- [6] LI F, CAI M, LIU J K, et al. Dynamic traffic noise simulation at a signalized intersection among buildings[J]. Noise Control Engineering Journal, 2011, 59(2): 202-210.
- [7] CHEVALLIER E, CAN A, NADJI M, et al. Improving noise assessment at intersections by modeling traffic dynamics[J]. Transportation Research Part D-Transport and Environment, 2009, 14(2): 100-110.
- [8] SUZUKI T, TSUKUI K, OSHINO Y, et al. Road traffic noise prediction model around signalized intersections[C]. SEOGWIPPO, Korea: Inter-Noise, 2003: 1870-1873.
- [9] CHEVALLIER E, LEDERCQ L, LELONG J, et al. Dynamic noise modeling at roundabouts[J]. Applied Acoustics, 2009, 70(5): 761-770.
- [10] 李太宝. 计算声学: 声场的方程和计算方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [11] KULOWSKI A. Algorithmic representation of the ray tracing technique[J]. Applied Acoustics, 1985, 18(6): 449-469.
- [12] HEUTSCH K. A simple method to evaluate the increase of traffic noise emission level due to buildings: For a long straight street[J]. Applied Acoustics, 1995, 44(3): 259-274.
- [13] HOSSAM EL D H, WOLOSZYN P. The acoustical influence of balcony depth and parapet form: Experiments and simulations[J]. Applied Acoustics, 2005, 66(5): 533-551.
- [14] LUO W L, CAI M, LI F, et al. Dynamic modeling of road traffic noise around building in an urban area[J]. Noise Control Engineering Journal, 2012, 60(4): 353-362.
- [15] CHEN Z B, CAI M, LI F, et al. Dynamic simulation of traffic noise by applying ray tracing method based on indoor space partitioning[C]. The Transportation Research Board (TRB) 92nd Annual Meeting, Washington, D. C. 2013.
- [16] 马大猷. 现代声学理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2006.