

# 低噪声沥青路面降噪机理及研究进展

何虹霖<sup>1</sup>, 邹晓翎<sup>1,2</sup>, 叶向前<sup>1</sup>, 曾涛<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆市 400041; 2. 重庆交通大学 土建材料国家地方联合工程实验室, 重庆市 400041)

**摘要:** 为了有效降低交通噪声对人类健康的危害, 促进低噪声沥青路面的推广应用, 对沥青路面降噪机理及研究进展进行了综述。介绍了路面噪声的产生及增强原理, 从内部和外部影响因素深入剖析多种因素对沥青路面降噪效果的影响, 总结了当前热门前沿的轮胎/路面噪声数值仿真模型研究进展。根据调研结果, 提出了现阶段该研究领域的不足, 并对低噪声沥青路面发展进行展望。可为低噪声沥青路面进一步发展提供基础资料和新的视角。

**关键词:** 低噪声沥青路面; 降噪机理; 影响因素; 数值仿真模型

随着社会和科学的进步, 公路已经由最初的以保障通行顺畅为目的逐步向可靠、绿色、智能、安全和人文等方面发展。降低路面噪声, 是绿色理念的主要要求之一。长期处于噪声环境, 会使人的心跳加速, 从而导致精神紧张, 烦躁不安等, 同时还会增加患高血压的风险, 不仅影响着人们的身体健康, 还会影响人们的精神状况。降低道路的噪声, 改善居民和驾驶员行驶环境已成为行业发展的方向。

由于目前胎/路噪声研究大多是基于路面和轮胎的室外噪声测试结果进行分析, 缺乏对噪声产生机理的分析。该文对路面噪声形成机理及其特性进行阐述, 讨论沥青路面噪声产生的内部影响因素和外部影响因素。但由于胎/路噪声的复杂性, 常规的经验方法不能对轮胎噪声进行准确的描述, 因此介绍当前胎/路噪声数值仿真模型的研究, 并分析当前低噪声沥青路面存在的不足, 为低噪声沥青路面的设计提供新的研究途径, 并为其发展提供参考和借鉴。

## 1 路面噪声形成机理

汽车行驶中产生的交通噪声主要由 3 部分构成:

① 道路和轮胎相互作用产生的摩擦噪声; ② 汽车自身的引擎机械振动产生噪声; ③ 汽车在行驶过程中空气动力学噪声。Bernhard R<sup>[1]</sup>将人们所听到的交通噪声, 根据它们的形成机理, 进行耦合作用, 如图 1 所示。随着车辆速度的增加, 各种噪声的 A 计权声压级都在逐渐增加, 当车速大于 50 km/h 时, 轮胎/路面的摩擦

噪声成为主要交通噪声源, 其次是车辆自身的机械噪声。在车辆速度到达一定水平后, 汽车的空气动力学噪声将超过引擎振动的机械噪声。在低速行驶时, 汽车的机械噪声为主要噪声源, 而在高速行驶时, 路面与轮胎作用产生的噪声为主要声源。

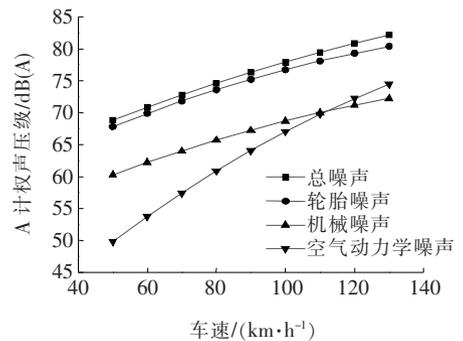


图 1 不同交通噪声的组成

滚动的轮胎与路面相互作用形成的噪声主要包含 6 个方面。

### (1) 轮胎与路面冲击噪声

汽车在行驶中, 轮胎表面花纹与路面发生撞击, 在撞击时车轮表面会产生径向模式和切向模式的波动激励从而形成噪声, 一般这类噪声在 1 000 Hz 以下, 控制路面的平整度能有效降低这类噪声<sup>[2]</sup>。

### (2) 轮胎的泵吸效应

轮胎主要由弹性体构成, 车辆行驶过程中, 轮胎凸起的花纹会压缩导致沟槽内空气压力急剧增大; 轮胎滚动后, 压缩的空气排出, 形成噪声; 当轮胎接触部分完全离开后, 沟槽腔体恢复到原状, 腔体内压力变小产

生强度较弱的噪声。腔体的空气压缩和膨胀即为泵吸效应。Hayden 指出轮胎的摩擦和切向模式波动激励是产生泵吸的原因。提出单极子声源花纹沟的声压级公式,但是这个模型对轮胎花纹进行大量简化,不能准确地模拟胎/路噪声<sup>[3]</sup>。

噪声与沟槽的参数密不可分,在实际轮胎生产中,对沟槽深度有一定的要求,可以认作定值,在模拟分析中通常只考虑花纹沟槽长度与宽度。当路面平整无空隙时,泵吸产生的噪声是轮胎/路面噪声主要声源,铺装多空隙或者半空隙路面材料,能有效降低泵吸效应产生的噪声。

### (3) 气柱共鸣噪声

汽车行驶时,轮胎沟槽和路面形成管道,当声波的相位差为  $180^\circ$  时,并且固有的频率和发声频率相同时会产生共振噪声。Sandberg<sup>[4]</sup> 通过谐振器模拟了轮胎沟槽内空气共振现象,发现这种现象是在腔体尺寸小于声波长度时发生的。这种由空气共振产生声音的现象通常描述为“管风琴”效应,较短的路面纹理能有效控制此类噪声。

### (4) 轮胎的黏滞机理

轮胎和路面进行接触的时候在荷载作用下会产生切向力,花纹块也会产生径向的变形,产生由迟滞力和黏附力组成的“黏滞效应”,使轮胎胎体和胎侧产生振动噪声<sup>[5]</sup>。张涛<sup>[6]</sup> 对轮胎模态和振动噪声进行数值分析发现:在轮胎接触路面后产生的高频噪声是由于胎/路之间摩擦和黏滞作用产生的切向变形,可以通过优化轮胎花纹图案降低此类噪声。

### (5) 空气扰流噪声

车辆行驶会导致轮胎周围的空气乱流,在车轮行进方向的空气会被分开,而后方的空气会被卷入,引起周围空气振动,从而引起声压变化产生噪声<sup>[7]</sup>。

### (6) 喇叭筒效应

轮胎前边缘由圆形的轮胎和路面之间的气体构成了喇叭筒形状,由于几何作用,放大了噪声和其他声源的声音<sup>[8]</sup>。黄林<sup>[9]</sup> 经过噪声的数值分析计算,发现噪声增强主要是由于汽车行驶中轮胎与路面会产生一个夹角,像一个“喇叭口”形状,导致的声散射。

## 2 轮胎/路面噪声影响因素

### 2.1 内部因素

#### 2.1.1 轮胎种类

美国 NACT<sup>[10]</sup> 采用噪声检测车对美国常用的轮

胎进行噪声测试,结果如表 1 所示。可以发现:ASTM 标准的光滑轮胎不存在空气泵噪声,产生噪声最小,但此类轮胎不含花纹,抗滑能力不足,不同类型的轮胎噪声差值能够达到 4 dB(A)。黄林<sup>[9]</sup> 针对 3 种不同花纹的轮胎进行边界元分析,发现在低频的噪声中,花纹的倾斜角度和深度对噪声没有明显的影响;但是在高频噪声中随着倾斜角度增加,噪声越大,随着花沟槽深度增加,噪声放大作用减弱;毛飞<sup>[11]</sup> 通过对轮胎进行室内噪声分析测试,发现采用多节距变化的胎面花纹,能够使集中的声能量分散成宽频带的声音,从而使声音变得顺滑。

表 1 不同轮胎的测试结果

轮胎类型	NAC TCPX 噪声级/dB(A)
ASTM 标准的光滑轮胎	91.2
皇家虎爪轮胎	92.4
ASTM 标准的 501 条纹胎	93.8
Firestone FR 380 凡世通	93.9
Master Craft Glacier Grip	94.7
Goodyear Aquatread	94.9
米其林雨林轮胎	95.2

通过研究可以发现:各种轮胎产生噪声大小顺序为:纵向直线花纹=光面<纵向普通花纹<双向混合花纹<越野花纹=横向普通花纹<横向直线花纹。

#### 2.1.2 路面空隙率

泵吸效应也是胎/路噪声产生的主要来源之一,泵吸效应产生的噪声是由于轮胎的花纹块受到了挤压变形。当轮胎接触的路面含有大量的空隙时,空气与空隙之间存在摩擦和黏滞阻力,在通道内摩擦并消耗能量,将声能转化为热能噪声将会大为降低。图 2、3 为普通路面与多空隙路面噪声反射图,多空隙的路面存在许多的微管和窄缝,空隙间相互连通,减小压缩空气爆破声音,并对噪声产生反射、衍射<sup>[12]</sup>。

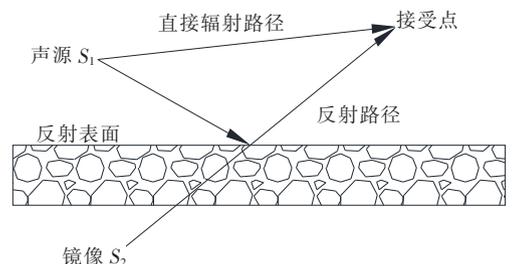


图 2 普通沥青路面噪声反射图

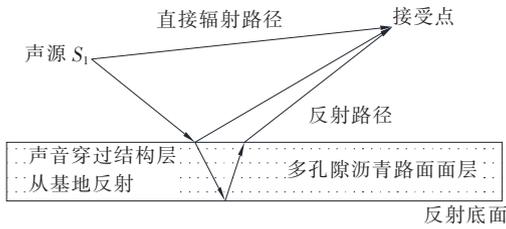


图3 多空隙沥青路面的噪声反射图

多空隙路面吸声机理可以用 Helmholtz 共振器表征。吸声效果一般不超过 10 dB。其声波方程为:

$$M_a \frac{d^2 X}{dt^2} + R_a \frac{dX}{dt} + \frac{X}{C_a} = p e^{i\omega t} \quad (1)$$

其稳态解为:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{p e^{i\omega t}}{R_a i \omega M_a - i \frac{1}{\omega C_a}} = \frac{p}{Z_a} \quad (2)$$

式中:  $R_a$  为声阻抗 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3$ );  $p$  为测点处声压 ( $\text{Pa}$ );  $\omega$  为圆频率 ( $\text{rad}/\text{s}$ );  $M_a$  为共振吸声器的声质量 ( $\text{kg}/\text{m}^4$ );  $Z_a$  为等效声阻抗 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3$ );  $C_a$  为声速 ( $\text{m}/\text{s}$ );  $i$  为虚数单位;  $t$  为时间 ( $\text{s}$ )。

Steven<sup>[13]</sup>认为:采用多空隙沥青混凝土可以使噪声降低 2~5 dB(A);魏建军<sup>[14]</sup>采用驻波法对具有不同空隙率的混合料进行吸声系数测量,试验结果如图 4 所示。由图 4 可知:吸声系数随着沥青混合料空隙率增大而增大,吸声系数峰值与空隙率之间大体存在线性关系。表明增加沥青混合料的连通空隙率有助于提高路面的吸声功能。

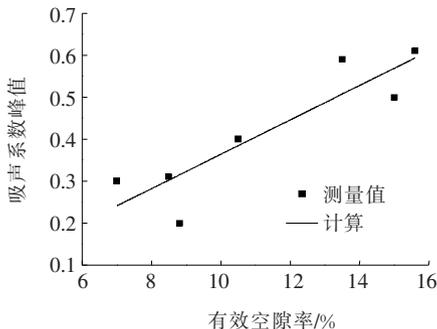


图4 沥青混合料空隙率与吸声系数关系曲线

王宏畅<sup>[15]</sup>通过有限元软件 Abaqus 对多孔隙沥青路面吸声结构建立声-固耦合模型,对其吸声性能进行数值仿真模拟,分析不同路面空隙率水平下轮胎/路面噪声的分布规律,如图 5 所示。由图 5 可知:噪声随空隙率的增大而快速减小,当空隙率达到 30% 时,噪声减少量达到 4 dB(A)。与魏建军等的试验结果相似。

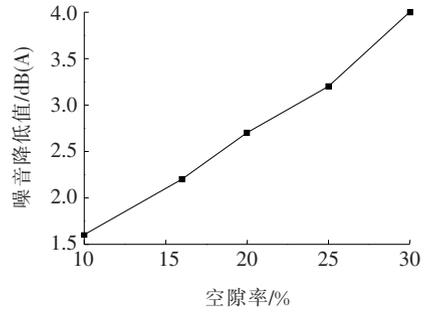


图5 声压降低值随空隙率变化

为了改善单层多空隙沥青混凝土的风砂堵孔、结构强度不足等问题,出现了双层多空隙沥青路面结构,可以有效地减缓降噪效果的衰减,王宏畅<sup>[15]</sup>通过数值仿真模拟分析双层多空隙沥青路面降噪效果,发现下层空隙率是影响双层多空隙沥青路面吸声性能的最主要因素,基本随着下层空隙率增加,吸声性能也在增大;吴文彪<sup>[16]</sup>利用驻波管法测试双层多空隙沥青混合料的吸声系数发现:当上层混合料空隙率增大时,路面降噪性能增强,随着下层空隙率增大,路面的降噪性能却在降低,和王宏畅的研究具有相异结论,对此尚具有较大的争议,当前中国对双层多空隙沥青路面的研究非常少,还亟需学者进一步探究。

### 2.1.3 路面厚度

路面材料厚度对吸声性能也有着重要的影响,吸声材料厚度决定了材料的吸声系数和频率范围。增加吸声材料厚度,材料的重量也相应增加,导致第一共振频率往低频方向移动,使得对低频的吸声性能显著提高,但对高频吸声性能影响较小<sup>[17]</sup>。声波射向多孔材料的边界会衍射到材料内,声波在材料中传播一定距离后,其声压衰减  $e^{-1}$ 。

当路面厚度超过透射深度,实际上具有无限厚度的声阻抗和吸声系数。张丽宏<sup>[18]</sup>利用有限元软件模拟,建立了噪声和厚度之间的关系曲线,如图 6 所示,噪声随着厚度的增加而减小;齐琳<sup>[19]</sup>通过试验测定频率值分别为 630、1 000 Hz 时,厚度不同的多孔沥青混合料的吸声系数的变化,如图 7 所示。由图 6 可知,当沥青路面厚度增加,噪声呈线性下降,在路面厚度值小于 30 mm 时最为显著,但当路面厚度大于 30 mm 以上时,这种降低的效果不再显著。为了满足路用性能要求推荐的降噪路面厚度合理范围为 3.8~5.1 cm。

瑞典专家 Bendtsen<sup>[20]</sup>根据路面材料厚度、空隙率对减噪效果的影响总结了一个关系式:

$$\Delta L = 0.005 \cdot e \cdot v \quad (3)$$

式中:  $\Delta L$  为降噪水平 [dB(A)];  $e$  为多空隙沥青混凝

土层厚度(mm); $v$ 为混合料空隙率。

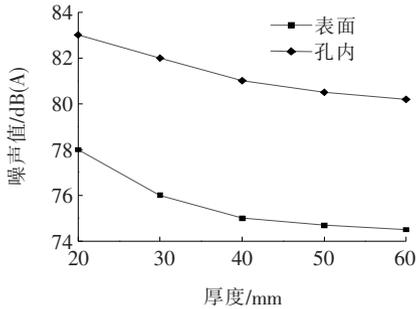


图 6 噪声与表面层厚度关系

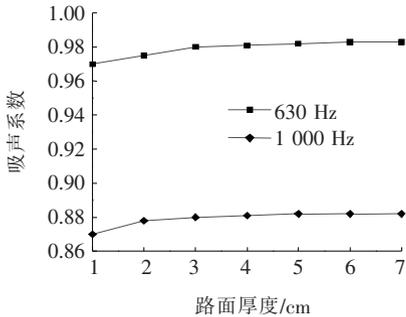


图 7 吸声系数与路面厚度关系

#### 2.1.4 路面材料黏弹性

汽车在行使过程中,肯定会发生振动,产生噪声。橡胶沥青混凝土中的橡胶颗粒和沥青都属于良好的阻尼材料,导致路面动态模量减小和相位角增大从而提高路面减振能力<sup>[5]</sup>。

橡胶沥青混凝土路面降噪机理:①橡胶沥青的级配一般是断级配具有较大的构造深度,空隙率增加,路面结构具有更多的内部连通空隙。在声波传到路面时,会被混合料中的微缝吸收,并且在传递过程中,由于声波与空隙壁之间摩擦和黏滞阻尼的作用,使得部分声波耗散,从而达到抑制噪声的效果;②由于橡胶粉的高弹性改善了路面阻尼性能,减小了路面阻尼振动,可以有效降低噪声的产生从而减少噪声。

王淞和 Shatanawi 对于不同胶粉的掺量对降噪效果进行分析,发现随着胶粉掺量增加,声压级不断降低,减振降噪能力越好<sup>[21]</sup>。广东中山 105 国道的鸦岗路段,分别采用了 SBS 改性沥青和橡胶粉沥青混凝土铺设的试验路段,通过对行车噪声进行检测可以看出:采用 SBS 改性沥青混凝土噪声明显大于采用橡胶粉沥青混凝土,当速度达到 120 km/h,两者相差达到 5.4 dB(A)<sup>[22]</sup>;乐兴堃<sup>[23]</sup>通过噪声测试,测得普通沥青路面、大孔隙橡胶沥青路面、普通橡胶沥青路面 3 个不同路面的等效噪声。大孔隙橡胶沥青路面比普通沥

青路面和普通橡胶沥青路面平均等效声级分别降低 4.9、1.8 dB(A);许雪莹等<sup>[24]</sup>发现当橡胶粉掺量为 3%时,密实型路面的动态模量最小,其减振降噪效果最好。为进一步提高降噪能力,日本引入了多孔弹性路面,这是一种复合型降噪路面,在混合料中掺入橡胶颗粒,并使用聚氨酯树脂进行固结,路面材料空隙率为 30%~40%,同时具有减振降噪和多孔吸声降噪的特点<sup>[25]</sup>;曹卫东<sup>[26]</sup>通过室外现场检测发现,多孔弹性路面对小汽车降噪能力可达 13 dB(A),对轻卡车和重车达到 6 dB(A),但此种路面虽然降噪效果突出,但施工技术复杂,造价较高,相应的研究还比较少。

#### 2.1.5 最大公称粒径

沥青混凝土集料的尺寸、表面纹理、摊铺厚度以及空隙率都受到最大公称粒径的影响。若混合料空隙率和构造深度相似时,采用粒径较小的集料,混合料空隙的孔径较小,容易生成更多连通的细微空隙,从而有效地提高吸声性能。

王淞<sup>[27]</sup>利用加速度法模拟室外现场路面噪声,分析了级配最大公称粒径与噪声的 A 计权声压级之间的关系,芬兰专家 Jarkko Valtonen<sup>[28]</sup>等,通过在试验路段现场测试,也分别评价了最大公称粒径为 5、8、11 和 16 mm 的 SMA 型沥青混合料的噪声水平。

两位学者做了类似的试验,由于他们试验路段选取不一样,沥青材料,温度、湿度以及测试速度等不一致导致测得的噪声水平具有一定差值。但是从他们试验结果也得出了相似的结论:随着集料粒径增大,噪声水平具有明显上升趋势,SMA-5 的轮胎路面噪声值要比 SMA-16 的轮胎路面噪声值低近 5 dB(A),由于混合料粒径的减小,对于多孔沥青路面单个空隙的体积减小,混合料内部空隙增多进而改善了混合料内部微空隙结构,对于密实型沥青路面,随着路表混合料集料粒径的减小,由路表激励引起的轮胎振动噪声将相应减小,同时还可以改善路面的纹理状态,增加轮胎下碎石数量,每颗碎石与胎/路噪声产生相互干涉,达到降低噪声的效果。因此低噪声沥青混合料宜选用小粒径多微空隙的矿料结构。

## 2.2 外部因素

### 2.2.1 路表指标

路面凹凸不平和其他一些随机无规则障碍物(如井盖)也增加了轮胎/路面噪声和车体振声。在不平整的路面,噪声值可能会提高 3~4 dB(A),提高路面平整度和经常维护路面平整对于降低交通噪声十分重要。孙立军<sup>[29]</sup>等在上海市选取了国际平整度指数

IRI变化范围为2.76~7.24的10条路段,研究噪声与平整度之间的关系,发现在各个速度值下,IRI值的增加,最大噪声级 $L_{\max}$ 也会增加。

熊潮波<sup>[30]</sup>为科学分析轮胎与路面产生的车外噪声机理,探究沥青路面路表指标与车外噪声间的相关影响关系,选取了某市两段单向四车道的高架路段作为试验路,试验路段沥青路面的车外噪声采用滑行法测量,研究国际平整度指数IRI、路面抗滑值BPN和构造深度TD3个路面路表性能指标对沥青路面噪声的影响。试验结果中噪声基本不受抗滑值影响,与路面平整度IRI及构造深度TD的乘积有关,当 $IRI \times TD = 1.112$ 时,车外噪声达到最小值。

### 2.2.2 气候条件

一般来说,高温条件下,由于轮胎的软化导致轮胎的振动噪声减弱,从而降低了轮胎/路面噪声。通过统计通过法(SPB)检测表明:温度每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,普通沥青路面降低噪声 $0.10\text{ dB(A)}$ ,多孔沥青路面噪声降低 $0.06\text{ dB(A)}$ <sup>[31]</sup>。空气湿度对轮胎/路面噪声没有显著影响。噪声和空气湿度没有关系因为噪声是频率成分,而湿度不会对频率产生影响。一般情况下路面温度与空气温度之间还存在着温差,噪声传播方向会发生改变,向着温度较低的方向传播,风向同样对噪声传播产生影响,在顺风情况下,噪声会沿着地面方向传播<sup>[32]</sup>。

## 3 低噪声沥青路面数值仿真模型

### 3.1 理论计算模型

沥青路面噪声影响因素众多,空隙率、平整度、构造深度等指标往往是牵一发而动全身,不能对每一个影响因素进行有效的单独分析。研究者们为了实现噪声的量化分析,建立轮胎解析模型,经历了圆环模型、圆环-弹簧模型再到薄壳模型以及Kropp模型(综合物理模型)。最初只是把轮胎看作一个有张力的圆环,到现在模型采用声源叠加技术建立解析支撑板模型,考虑了轮胎在转动中会产生径向振动和喇叭效应产生二维声辐射,然而此模型仅在低频范围内与试验结果部分符合。这些模型大多从轮胎出发未考虑不同路面材料和结构对噪声产生的影响,而且计算过程复杂、繁琐,因此没有推广应用的价值。因此难以纯粹从解析角度预测和模拟轮胎噪声的特性。

### 3.2 数值仿真

由于轮胎噪声机理的复杂性,解析方法和经验方

法都不可能对轮胎噪声进行精确和可靠的预测。因此近年来,随着计算机技术高速发展,越来越多的学者采用有限元、边界元等数值仿真方法对轮胎噪声进行研究<sup>[33]</sup>。Sungtae等<sup>[34]</sup>在计算空气泵吸产生的噪声时,利用柯西霍夫积分和CFD计算流体力学的方法。但这种方法仅仅考虑了简单的横沟情形,没有考虑复杂的横沟和纵沟产生的影响;余洁冰等<sup>[35]</sup>根据轮胎沟槽与空气的相互作用关系,建立了流-固耦合模型,模拟在荷载作用下轮胎沟槽的开闭过程,计算压力差来得到泵吸效应产生的噪声。这个模型没有考虑轮胎的转动,产生较大的误差,与真实情况不符;Nakajima等<sup>[33]</sup>利用有限元软件,分析轮胎的模式,并将计算出的轮胎固有频率代入边界元声学软件中得到噪声数值。但该方法是一种频域求解方法,没有考虑轮胎花纹形式且计算过程繁琐;王国林等<sup>[36]</sup>提取轮胎转动时表面节点加速度,作为声学边界条件,进行轮胎振动噪声的计算。其缺点是未计算泵吸效应产生的噪声,也无法模拟轮胎花纹对噪声的影响;Y. T. Wei<sup>[37]</sup>等利用Lab Virtual仿真软件进行有限元分析,考虑了轮胎的花纹以及轮胎的材料特性和受载情况,模型符合实际的情况;冯希金<sup>[38]</sup>基于混合拉格朗日-欧拉方法(MLE),建立了时域有限元仿真模型计算噪声,此模型考虑轮胎的转动,通过与试验结果比较可知,该方法有相当的可靠性;谢永<sup>[39]</sup>使用扫描仪获取典型沥青路面的表观纹理,得到路面对于轮胎的激励作用函数,构建“空气-轮胎-路面”三维泵气噪声模型。这种模型考虑了路面表观纹理对胎/路噪声的影响,未考虑路面的空隙率、路面厚度以及材料吸声系数对噪声产生的影响。

## 4 存在的问题与展望

### 4.1 目前研究中存在的不足

(1) 噪声机理方面,关于轮胎振动噪声和气动噪声仍缺乏有力的研究数据,其内在关联以及在轮胎噪声中的具体占比并未完全明确。

(2) 目前国内外提出了多种室内外噪声测试方法和标准,但都存在一定局限性,室外检测并无法完全消除环境噪声的干扰,室内检测不论是“混响室法”还是“驻波法”都是从外部产生噪声源,与胎/路噪声产生机理和降噪对策不一致,对改善路面黏弹性降低胎/路振动噪声的降噪效果评价并不显著。建立一种室内便捷有效的胎/路噪声测试方法还需要进一步深入研究。

(3) 通过铺筑大量试验路研究发现胎/路噪声主要影响因素是:车速、荷载、混合料空隙率、路面材料黏弹性、路面厚度、级配等,但各个影响因素对噪声影响的显著程度,尚存在较大的争论。

(4) 虽然仿真软件日新月异且计算速度有大幅度的提高,但是在仿真计算中对胎/路噪声仍进行了大量简化,如何又快又准确地用仿真手段针对不同类型轮胎进行可靠、有效的噪声水平预报及研究,仍待探索。

#### 4.2 展望

(1) 为了使中国在不同地区、不同道路的路面噪声水平评价中具有可比性,室外试验应更加规范化,建立轮胎/路面噪声与室内路面材料声学性能的关系。

(2) 开展大规模的道路噪声评价,建立中国典型道路路面噪声库,积累完整、可靠、长期的路面噪声数据,为沥青路面噪声机理研究奠定数据基础。

(3) 基于轮胎/路面噪声产生机理,确定不同机理产生噪声所占比例,从而建立针对性的低噪声沥青路面结构设计方法。

(4) 随着计算水平的提高、基础理论的完善,以仿真方法对未知世界真理的探索必然是未来研究轮胎噪声不可或缺的手段之一。轮胎噪声问题本就是多场耦合问题,要从单一场计算向多物理耦合场转变,对流—固耦合、声—固耦合、流—固—声耦合的研究是大势所趋。同时也要从线性问题求解向非线性问题发展,轮胎材料结构变形、流场改变都是非线性问题,仅靠线性理论根本无法解决。

## 5 结论

(1) 轮胎/路面噪声的产生机理主要包括轮胎与路面冲击振动、气柱共鸣、轮胎黏滞作用、泵吸效应等多种类型,噪声增强机理主要有胎体与胎侧振动、喇叭筒效应、内部声学共振等多种形式,噪声产生的机理和噪声增强的机理难以进行准确的区分,大多数情况都是共同存在的,是受到多种因素影响的复杂问题。

(2) 沥青路面选择小粒径多空隙矿料结构,加大材料的空隙率,并提升施工工艺使  $IRI \times TD = 1.1158$  时,路面具有较低的噪声水平,但不能盲目追求高空隙率,追求低噪声的同时,为满足路用性能要求路面厚度宜控制为 3.8~5.1 mm。

(3) 橡胶材料不仅对声能具有黏滞性、内摩擦吸收、热传导吸收和分子弛豫吸收的特点,且具有良好的阻尼及高弹性,使得橡胶沥青路面具有较高的吸收振

动和冲击性能,适当增加橡胶掺量,可以减少路面振动达到降低路面噪声的目的。

(4) 大多数学者都停留在材料和级配方面去研究低噪声沥青路面。研究者缺乏采用力学公式、声学公式和经验公式相结合的方法对轮胎/路面噪声进行理论研究,并利用有限元软件对噪声进行有限元仿真提出胎/路噪声耦合预测模型。从机理出发,在设计阶段对低噪声沥青路面进行标准化的噪声水平评价。

#### 参考文献:

- [1] Bernhard R, Wayson R L. An Introduction to Tire/Pavement Noise of Asphalt Pavement/[M/OL]. West Lafayette: Purdue University. www. asphaltroads. org/assets/\_control/content/files/anintroductiontotire - pavement-noiseofasphalt pavement. pdf, 2004.
- [2] FEHRL. FEHRL Report 2006/02 Guidance Manual for the Implementation of Low - Noise Road Surfaces[R]. Brussels: FEHRL, 2006.
- [3] Hayden R E. Roadside Noise from the Interaction of a Rolling Tire with the Road Surface[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1971, 50(1A): 113-113.
- [4] Sandberg, U., Ejsmont, J.. Tyre/Road Noise Reference Book [M]. Informex: Harg, S0E59040 Kisa, Sweden, 2002.
- [5] 肖飞鹏, 王涛, 王嘉宇, 等. 橡胶沥青路面降噪技术原理与研究进展[J]. 中国公路学报, 2019, 32(4): 73-91.
- [6] 张涛. 轮胎模态和振动噪声的数值分析[D]. 中国科学技术大学硕士学位论文, 2005.
- [7] 葛剑敏, 范俊岩, 王胜发, 等. 低噪声轮胎设计方法与应用[J]. 轮胎工业, 2006, 26(2): 79-84.
- [8] Schaaf K. Noise Radiation from Rolling Tire—Sound Amplification by the “Horn Effect” [J]. Proc. Inter - Noise82, 1982: 131-134.
- [9] 黄林. 轮胎与路面喇叭效应的特性研究[D]. 东华大学硕士学位论文, 2016.
- [10] Hanson D I, James R S, Ne Smith C. NCAT Report 04-02 Tire/Pavement Noise Study [R]. Auburn: NCAT, 2004.
- [11] 毛飞. 室内轮胎噪声测试分析评价系统的设计[D]. 武汉理工大学硕士学位论文, 2008.
- [12] 王旭东, 李美江. 低噪声沥青路面[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [13] Steven H. Recent Experience with Open - Pored Surfaces[C]. ARRB. International Tire/Road Noise Conference 1990. Melbourne: ARRB, 1990: 297-314.
- [14] 魏建军, 孔永健. 多孔隙低噪声沥青路面降噪机理的研

- 究[J]. 黑龙江工程学院学报, 2004(1): 11-13, 19.
- [15] 王宏畅, 黄晓明, 廖公云, 等. 双层多空隙沥青路面吸音降噪有限元分析[J]. 环境工程学报, 2011, 5(12): 2 910-2 914.
- [16] 吴文彪, 张玉富, 李淑明, 等. 双层多空隙沥青混凝土路面降噪性能研究[J]. 公路, 2011, 56(11): 186-189.
- [17] 梁小光. 基于 Virtual. lab 的多孔材料吸声性能仿真研究[D]. 西南交通大学硕士学位论文, 2015.
- [18] 张丽宏, 黄晓明. 轮胎/路面噪声的有限元分析[J]. 环境工程学报, 2008(12): 1 695-1 697.
- [19] 齐琳. 多孔沥青路面吸声性能评价与优化研究[D]. 长安大学博士学位论文, 2011.
- [20] Bendtsen H, Larsen L E. Two - Layer Porous Pavements and Noise Reductions in Denmark[C]. Ninth International Conference on Asphalt Pavements International Society for Asphalt Pavements, 2002.
- [21] Chandran V, Nagarajan L, Thomas M R. Evaluation of Vibration Damping Behavior of Different Sizes of Waste Tyre Rubber in Natural Rubber Composites[J]. Journal of Composite Materials, 2018, 52(18): 2 493-2 501.
- [22] 交通部公路科学研究院. 废胎胶粉改性沥青应用研究[R], 2005.
- [23] 乐兴堃, 索智, 赵宇, 等. 大孔隙橡胶沥青路面降噪效果与路用性能研究分析[J]. 公路, 2018, 63(5): 12-16.
- [24] 许雪莹, 曹卫东, 葛剑敏, 等. 骨架密实型低噪声路面降噪机理的实验研究[J]. 应用声学, 2008, 27(1): 7-10.
- [25] 郑鑫, 雷学坤, 章建龙, 等. 国内外低噪声沥青路面研究状况概述[J]. 公路与汽运, 2007(3): 67-69.
- [26] 曹卫东, 吕伟民, 周海生. 多孔弹性路面的降噪机理与评价方法[J]. 中外公路, 2004, 24(6): 90-93.
- [27] 王淞. 间断级配沥青混合料轮胎路面噪声特性研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2011.
- [28] Valtanen J, Hyypä I, Sainio P. Noise Reduction vs Wearing Properties[C]. Ninth International Conference on Asphalt Pavements International Society for Asphalt Pavements, 2002.
- [29] 孙立军, 耿媛婧, 周晓青. 车辆噪声与城市道路路面平整度关系的试验研究[J]. 公路交通科技, 2007, 24(6): 24-28.
- [30] 熊潮波. 沥青路面路表指标对车外噪声的影响研究[J]. 公路交通技术, 2019, 35(3): 145-150.
- [31] Wehr R, Fuchs A, Aichinger C. A Combined Approach for Correcting Tire Hardness and Temperature Influence on Tire/Road Noise[J]. Applied Acoustics, 2018, 134: 110-118.
- [32] Cowan J P. Community Noise Issues Arounda NASCAR Racing Facility[C]. Transportation Research Board 79th Annual Meeting, Washington D. C. , 2000.
- [33] Nakajima Y, Inoue Y, Ogawa H. Application of the Boundary Element Method and Modal Analysis to Tire Acoustics Problems[J]. Tire Science and Technology, 1993, 21(2): 66-90.
- [34] Sungtae Kim, Wontae Jeong, Yonghwan Park, et al. Prediction Method for Tire Air - Pumping Noise Using a Hybrid Technique[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2006, 28(6): 3 799-3 812.
- [35] 余洁冰, 臧孟炎. 轮胎泵气噪声有限元仿真研究[J]. 中国制造业信息化, 2010, 39(15): 48-50.
- [36] Wang Guo-lin, Mao Zhu-jun, Zhou Hai-chao, et al. Boundary Element Analysis of Rolling Noise[C]. IEEE. 2011 International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering. New York: IEEE, 2011: 1 970-1 973.
- [37] Wei Y T, Feng X J, Xiang D B, et al. The Simulation of Rolling Noise Based on Mixed Lagrange-Euler Method [C]. The 33rd Annual Meeting and Conference on Tire Science and Technology, Akron, 2014: 8-10.
- [38] 冯希金. 卡车子午线轮胎振动噪声仿真技术研究[D]. 清华大学博士学位论文, 2016.
- [39] 谢永. 车-胎-路耦合下沥青路面车外噪声特性及频谱评定[D]. 东南大学硕士学位论文, 2017.