

# 道路交通噪声控制技术研发进展

袁旻恣<sup>1,2</sup>, 王彦琴<sup>1,2</sup>, 邵社刚<sup>1,2</sup>, 李明亮<sup>1,2</sup>

1. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088

2. 国家环境保护道路交通噪声控制工程技术中心, 北京 100088

**摘要** 道路交通噪声具有影响范围广、持续时间长等特点, 已成为道路交通面临的主要环境问题。根据中国道路交通噪声污染概况, 介绍了声屏障、低噪声路面、通风隔声窗、降噪林带以及智能化管控等噪声控制措施的技术特点和适用范围, 分析了这些技术措施存在的问题及研发方向。阐明了典型结构、材料的声屏障和低噪声路面的优缺点和降噪效果, 提供了中国不同区域可以用作降噪林带的植被种类, 并从低噪声路面声学设计、声频和信息化技术应用、绿色低碳材料循环利用、路域声景观营造、环境噪声与可持续发展等几个方面, 提出了道路交通噪声控制技术的下一步发展方向。

**关键词** 道路交通; 噪声控制; 声屏障; 低噪声路面; 噪声管控

党的十八大以来, 宁静成为美丽中国建设的重要内容。近年来, 每年噪声投诉超200万件。2022年6月, 《中华人民共和国噪声污染防治法》修订实施, 2023年1月, 生态环境部等16部门联合印发《“十四五”噪声污染防治行动计划》, 旨在提高行业噪声污染防治水平, 推动声环境质量持续改善<sup>[1]</sup>。

交通噪声是一种非稳态的噪声, 在交通干线两旁, 噪声随时间而变化, 与机动车辆的类型、数目、速度、运行状态、相互距离、是否鸣笛、道路宽度、坡度、干湿状态、路面情况和交叉路口建筑物的层数, 以及风速等因素有关。道路交通噪声主要来源为机动车辆在路面行驶过程中产生的噪声, 包括发动机噪声、排气管噪声、轮胎/路面噪声和车辆运行产

生的气动噪声。

目前, 中国机动车保有量世界第一, 道路总里程世界第二。随着城市化进程的推进和交通运输业的发展, 道路交通噪声已经成为现代社会中主要的噪声源, 部分严重噪声污染路段超标最多可达30 dB。噪声对人体健康和生活质量的不良影响正逐渐为人们所认知, 公众对控制噪声的要求进一步提高, 交通噪声污染已成为环境污染投诉最主要的问题之一<sup>[2]</sup>。

综上, 有效控制道路交通噪声势在必行。道路交通噪声的治理和控制是一个体系性的问题, 涉及到城市土地利用、路网建设、交通需求控制、道路设计等多层次多方面。构建安全、便捷、绿色、高效、

收稿日期: 2023-11-07; 修回日期: 2024-03-22

作者简介: 袁旻恣, 研究员, 研究方向为噪声振动控制和声学信号处理, 电子信箱: mm.yuan@rioh.cn

引用格式: 袁旻恣, 王彦琴, 邵社刚, 等. 道路交通噪声控制技术研发进展[J]. 科技导报, 2024, 42(20): 85-94;

doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2023.11.01656

经济、包容、韧性的可持续交通,创建宁静舒适人居环境,推动交通与环境和谐发展,是新时代实现交通强国建设的重要任务之一。

## 1 道路交通噪声污染防治概况

随着中国综合立体交通基础设施的建设和发展,交通噪声污染不仅面临更大的防治压力,也面对许多新的特点:综合交通发展带来的混合噪声,难以针对性实施降噪措施;超宽道路断面,使得道路交通噪声由线源辐射转为面源辐射;双层道路、交通枢纽,以及城镇化的发展,交通噪声由平面影响转为立体空间作用;杭州市等地超高速公路的试验,改变了道路交通噪声源强特性;低空经济等新业态也带来了新的噪声问题。这些转变是交通强国和综合立体交通建设的成就,也为道路交通噪声治理带来了新的挑战。

关于道路交通环境保护的投诉中,85%以上是关于道路交通噪声的;在有关道路交通噪声投诉中,80%以上是道路运营期的交通噪声,只有不到20%是建设期的。从分布来看,交通噪声投诉量与中国各省份的国内生产总值(GDP)、路网密度直接相关,噪声投诉集中在中国“胡焕庸线”以东,尤其是沿海经济相对发达的地区。根据各地生态环境部门、市长热线,以及12369和生态环境部等方面的数据综合来看,投诉最多的为长三角、珠三角和京津冀区域。其中最高省份接近一半的公路路段均涉及到噪声方面的投诉,噪声投诉范围占路网比例达到40%以上。

## 2 技术现状分析

### 2.1 声屏障

声屏障是目前应用最广泛的一种交通环境噪声控制措施。一个典型的声屏障通常是针对某一特定噪声源和声敏感区域而设计的。声屏障立于声源和声敏感区域之间,通过阻断直达声,达到减弱声敏感区内噪声影响的目的<sup>[1]</sup>。

声屏障按照材质分类可以分为金属声屏障、混

凝土声屏障、有机合成透明材料、生态式声屏障等;按照结构形式可以分为单侧直立式声屏障、双侧直立式声屏障、半封闭声屏障和全封闭声屏障;按照降噪原理可以分为隔声屏障,吸、隔声屏障和有源声屏障;按照声屏障顶部结构形式可以分为直立式、折板型、特殊形状型等,其中特殊形状型一般指顶端结构,包括有“T”型、“Y”型、蘑菇型、管型和其他多重边缘型等结构;按照排列方式可以分为直线型、蜿蜒型和交错型。在实际应用中,应该按照周围的实际情况进行设计。随着超宽断面道路、双层公路的出现,声屏障不再仅设置在道路两侧,道路中分带等地方也会根据实际需要进行设置,增加声屏障对道路的覆盖范围。

声屏障设计不仅需要考虑本身的声学性能,非声学性能在设计中也同样重要。声屏障自身声学方面特性设计包括声屏障材料的选择、安装的位置、建造的规模和形状等;非声学方面特性则包括安全性问题、视线的影响、维护的难易、空气污染对声屏障的影响等一系列问题。

隔声是声屏障屏体材料的基本性能,通常要求透射声远远小于绕射声即可。吸声材料可以进一步降低声屏障反射和绕射声,常见吸声材料有泡沫、玻璃棉、纤维等,吸收声能量转化为热能。吸声材料吸收中高频噪声效果较好,一旦多孔材料的厚度小于声波波长的1/4,效果就变得微弱;灰尘易在孔中堆积,随着使用过程受潮,纤维会粉尘化。

声学超材料是一种通过亚波长尺度上声学功能单元紧密排列构建的人工声学界面,在声波操控上展现了高效灵活的特点,如异常折射与反射、声全息以及紧凑完美吸声体等<sup>[4]</sup>。迷宫式消声器是通过将空间卷曲而延长声波的传播路径,通过将原始的、巨大的体积缩小到亚波长尺寸,从而使得结构具备独特的性能,为声屏障实现低频吸声提供了路径<sup>[5]</sup>。近年来,声学超材料的研究给声屏障噪声控制问题提供了新的思路。例如,周期性结构,由于Bragg反射(布拉格反射)存在于弹性波传播的某些频域内,使得系统呈现出通带和禁带。利用这个特性,由周期结构构成的声子晶体应用于声波过滤器、声学隐形斗篷和声扩散器等。而在交通噪声控

制领域,也让开发通风隔声屏障成为可能,从而减少设置声屏障导致的物理隔离和景观破碎现象。

以上声屏障可有效降低中高频噪声,但低频降噪性能较差,而低频噪声恰恰更加接近人体一些器官的共振频率,对人体的危害更大。有源降噪技术是基于声波叠加原理的一种电声控制技术,利用数字信号处理器生成与噪声源信号相位相反、幅值相同的声音信号,与噪声源反向抵消达到降噪目的,对低频噪声降噪效果明显。有源控制系统通过次级源产生与原始声波频率和振幅相同且相位相反的声波实现噪声控制,具有低频降噪性能好的优点,将传统屏障与有源控制系统结合形成有源声屏障,可以增大屏障的低频插入损失,从而拓宽声屏障的控制频率范围<sup>[6]</sup>。

## 2.2 低噪声路面

低噪声路面作为一种降低轮胎/路面噪声源强,减轻交通噪声影响的措施,随着道路沿线现代城镇立体空间化发展和高层建筑的建设,相比阻隔噪声传递路径的声屏障,更具有普适作用。轮胎/路面噪声主要是路表因素、环境条件、车辆特性通过不同机理的综合作用而形成的。轮胎/路面噪声产生的机理主要有轮胎振动、气泵噪声、轮胎与路面间黏滑及黏扣作用,此外,轮胎与路面接触的楔形空间也易形成扩音喇叭和共振,形成噪声的放大<sup>[7]</sup>。与轮胎/路面噪声产生最为相关的路面参数主要有:路表纹理构造深度、吸声系数、劲度模量(或力学阻抗)。而这些路面性能又取决于沥青混合料本身的材料和结构参数,如空隙率、级配、沥青含量、路面厚度等<sup>[8]</sup>。

通常来说,对于小型燃油车辆,当行驶速度为40~50 km/h时,轮胎/路面噪声成为主要噪声源,对于大型燃油车辆来说,当行驶速度为80~90 km/h时,轮胎/路面噪声成为主要噪声源。随着以电动汽车为代表的新能源车辆渗透率不断提高,道路交通噪声特点发生了变化,主要噪声频段提高,发动机产生的电磁噪声下降,轮胎/路面噪声成为主要噪声源的过渡速度进一步降低。

在国内外路面结构设计中,均采用力学经验法,通过试验观测,建立路面结构力学响应和路面

使用性能关系的是以疲劳性、变形、抗裂等使用性能为控制目标,确定原材料、混合料配合比、结构组合设计和结构层设计等路面结构参数的要求,降噪作为一种“附属”功能出现。随着环保要求的不断提高,许多国家开始深入低噪声路面声学设计研究。英国公路署从噪声、阻抗、耐久性、全生命周期、水毁等方面调查了低噪声路面和薄层路面声学性能;挪威开展“环境友好路面”项目,建设了25种试验路面,并同时测量了其他43种路面,收集路面有关降噪性能的参数;美国联邦公路管理局(Federal Highway Administration, FHWA)和国家公路合作研究计划(national cooperative highway research program, NCHRP)等实施安静路面项目,研究了纹理特征预测降噪的模型;法国、德国共同实施的滚动噪声传播和预测项目(prediction and propagation of rolling noise, P2RN), P2RN建立了密实型路面的声学优化模型;荷兰道路铁路的噪声改善计划项目建立了一个路面全生命周期声学优化模型工具(acoustics optimize tool, AOT), AOT利用40种试验路面建立试验段观测数据库,用来预测辐射噪声,取得较好的效果。但是AOT没有建立针对降噪的力学响应的修正模型。

为了对低噪声路面更好地描述,可以按空隙率进行分类。(1) 大空隙低噪声路面(空隙率 $\geq 14\%$ )。进一步划分为:单层大空隙路面(厚度为30~60 mm);薄层大空隙路面(厚度为10~30 mm);双层大空隙路面及大厚度大空隙路面(总厚度 $> 60$  mm)。(2) 半开级配路面(空隙率为5%~14%)。(3) 密级配低噪声路面(空隙率 $< 5\%$ )。其中,大空隙路面主要基于表面气动噪声消散和噪声传播途径吸声降低噪声,同时可以进一步通过降低模量、降低表面构造等方式形成降噪功能的协同优化;密级配路面主要通过降低路面力学阻抗提升降噪效果,如橡胶沥青路面等,但缺少吸声功能。

欧美、日本以及中国的城市道路及高速公路上广泛采用的降噪路面多为空隙率20%以上的多孔型路面。此外,双层排水沥青路面、细粒式薄层铺面、橡胶沥青路面、高弹沥青路面等形式也作为典型的低噪声型路面在国内外应用。目前,为满足日

益增长的环保需求,荷兰、德国等欧洲国家,正在广泛开展能够进一步提升降噪功能而又能够保持路面耐久性的功能性路面研究。

多孔性沥青路面(porous asphalt concrete, PAC),通常单层降噪量为2~3 dB,双层在5 dB左右;橡胶沥青材料(asphalt rubber, AR)在美国、波兰、西班牙等国家使用,造价昂贵,降噪量为1~3 dB;多孔弹性路面(porous elastic road surface, PERS)最早由瑞典提出,后日本、荷兰进行了研究,目前存在面层基层黏合力、防火、防滑性能较差的问题,但降噪量可达5~15 dB;沥青玛蹄脂(stone mastic asphalt, SMA)路面是通过改善纹理来达到降噪要求的,降噪效果有限,通常为1~2 dB;薄层路面(very thin asphalt concrete, VTAC)在城市多有应用,耐久性低于单层多孔路面,可提供1~3 dB的降噪量;多孔水泥路面和多孔混凝土路面降噪量可达4~5 dB,但是在使用过程中结构破坏率可达到75%,养护成本较高<sup>[9]</sup>。

目前,路面降噪性能评估主要通过测量路面参数表征评估或者直接测量轮胎路面噪声声压和声强。通过测量路面参数表征降噪效果,通常包括测量吸声的驻波管法、扩展表面法(extended surface method, ESM)、移动原位吸声法和P-U法(P为声压、U为质点速度),纹理构造包括铺沙法测纹理构造深度(texture depth, TD)和激光测平均断面深度(mean profile depth, MPD)等,这些参数不能直接体现路面降噪效果,且测试会存在一定误差;直接测量包括控制通过法(control pass-by, CPB)、统计通过法(statistical pass-by, SPB)、车载声强法(on-board sound intensity, OBSI)和近距法(close proximity, CPX)等,这些方法优点在于可以直接得到结果,但由于未考虑不同路段、环境和交通流的特点,难以直接评估路面降噪贡献和降噪性能<sup>[10]</sup>。

### 2.3 通风隔声窗

自然通风是绿色建筑重要的构成部分,也是城市可持续发展的要素。由于城市日益严重的交通噪声污染,自然通风不可避免地受到外界噪声侵扰。因此,兼顾高效通风和宽带隔声的声功能结构

开发成为一个非常重要的声学科学问题,具有较大的研究价值和广泛的应用前景<sup>[11]</sup>。

传统的通风隔声窗是一种能够实现通风且隔声的声学结构,在屏障体的周边或内部设置铺设有声衬、(微)穿孔板等结构的曲折气流通道。在实际应用中,为实现较好的声学效果,此类气流通道通常设有曲折蜿蜒的路径或大比重的声衬结构,会带来明显的压力损失,难以保证自然通风的效果。因此,追求更好的通风意味着更短的气流通路或更小比重的声衬,导致其隔声性能大大降低。因此,传统通风隔声窗设计的思路面临着通风效果和降噪量相互制约的问题。

声学超材料同样为通风隔声窗设计带来了新的思路。基于声学超材料的通风隔声窗设计与传统策略不同,整个屏障体由多个单元周期排列构成,其中每一个单元都为开孔结构<sup>[12]</sup>。这样一种设计大大提高了隔声屏障的通风效果。其中,基于局域共振单元(如Helmholtz共鸣器、薄膜以及1/4波长管)设计的超构隔声屏障实现了在亚波长尺度的低频噪声控制。除此之外,基于类法诺干涉的二元结构单元设计,在进一步改善其空气流通效果的同时保证了有效的低频隔声性能。基于这些超构材料设计的通风隔声窗虽然大大改善了空气流通的效果,但受制于其声学原理,工作频带往往较窄。对于局域共振型通风隔声结构来说,只有在共振频率附近才能获得理想隔声效果。尽管已经有研究采用了多共振单元的方法来拓宽工作频带,但是这些设计要么带宽拓展有限,要么通风效果较差。城市交通噪声通常为宽频噪声,一种宽频带且具有良好通风效果的隔声窗仍然有待继续研究。

### 2.4 降噪林带

在道路两侧红线范围内设置降噪林带,通过植物的遮挡和吸收,可降低车辆行驶产生的噪声。综合考虑植被叶片吸声、枝条吸声,植被对声音的扩散、散射和衍射,优化路侧降噪林带植被类型、组合配置等,从而提高林带的噪声衰减量<sup>[13]</sup>。

声音在林带中传播时,由于植被的枝丫、叶片对声波的吸收、扩散、折射、散射等作用,会降低交

通噪声的影响。合理调配植被构成类型和设置方法,不仅可以美化路域环境,提升路域景观,还可有效提升植被附加的降噪效果。生态植被选择可以大体上分为乔、灌、草3类辅植,其中,乔木分针叶和阔叶。影响植被降噪效果的主要植物要素可分为:植物种类、物理特性、植物绿量。具体表现为:叶片密度、叶片大小、枝干粗细、树干弹性模量等。

植被对声音的衰减通常分为4个方面:吸收、扩散、反射、折射。声音通过植被表面发生摩擦、阻尼或者产生振动来使得通过的声音发生衰减。叶片吸收声能取决于叶片面积、叶片圆周频率、激发声频率、动态黏滞度和空气密度。枝叶主要是通过树枝与声波产生共振,从而吸收降低交通噪声,增加植被附加降噪量。通过选择叶片总绿量、树枝末端分支量高的植被,可以增加生态植被的附加降噪量;通过选择合适的叶片类型、木质和树枝的尺寸,可以调节插入损失的频率特性范围。通常来说,草藤、灌木为主植被对中、低频有作用,乔木、灌木类对中、高频起作用<sup>[14]</sup>。

降噪林带为了获得良好的降噪效果,一般采用设置高矮结合的植物密集搭配方法。但对于道路而言,两侧能够用于种植植物的范围有限,一般不超过40 m。因此,需要利用不同高度植被茂盛的枝叶,吸收、阻隔噪声的传播,提高林带降噪效果。

## 2.5 智能化管控

噪声智能化管控一般是以噪声地图为基础实现的。噪声地图以数据系统为基础,系统在查询、分析和模拟的过程中都必须从数据库中获取相关的数据信息。数据系统核心作用是根据噪声的时间、空间分布,摸清不同噪声影响下的人口情况,并且在现有交通规划、噪声监管政策前提下,预测未来一段时间的噪声状况及变化趋势。其主要延伸功能,一是提供科学依据,包括降噪目标、措施、规划,达标区管理、监测布点、城市规划;二是提供信息化平台,为信息公开、各部门协同噪声监管提供平台和数据支撑;三是服务于噪声投诉,噪声源定性识别定量分析<sup>[15]</sup>。

中国道路交通噪声的管理主要环节有:规划阶

段的选线避让噪声敏感建筑物,项目环境影响评价阶段预测项目噪声影响并提出对策措施,竣工环保验收阶段调查噪声影响程度及措施落实情况。道路建设项目很少会在完成验收后持续监测噪声影响,一般在有公众投诉时管理才会跟进。前期环评文件对噪声的预测及措施是基于设计文件中的车速、流量、车型等的预测,实际运行状况与设计阶段的预测往往存在差异,特别是运行数年、周边路网发生变化时交通量变化更大。同时,道路建设一定程度上会带动两侧区域的开发,“先有路后有房”而发生的噪声投诉事件也多有发生,从管理角度来看,对于这种情况发生的预警、预判、预防与及时响应都缺乏手段。

在这样的背景下,基于大数据平台、融合多种功能的噪声地图研发,不仅填补了道路环境影响管理空白,且对推进交通运输行业环境保护与生态文明建设,促进交通运输行业绿色发展具有积极意义。

目前,国内外噪声地图或在线监测系统应用较为普遍。噪声地图通常为静态等声级分布图,监测系统包括测点定位、多指标噪声数据采集、存储与传输,噪声超标报警等。早在2002年,欧洲议会和欧洲理事会正式通过环境噪声指令(ENI, Directive 2002/49/EC),要求通过噪声地图的形式开展道路噪声的智能化管理,并在此基础上编制噪声行动计划。噪声地图采用图形格式,一般由噪声软件对一定范围内的道路声源进行计算,从而生成不同颜色代表的噪声分布图。此类地图一般用于查看区域年均的噪声影响及变化情况。现阶段欧洲、北美等大多数国家和地区仍在使用这种方式的噪声地图,适用于长期以来城市发展变化较小的地区。另一种形式则是通过在区域内以网格点的形式布设大量的噪声监测仪,并在线收集所有测点的噪声数据用于道路的噪声管理。噪声地图智能化管控将结合噪声模型计算和实测的优势,系统通过接入实时交通流量信息,可以做到噪声分布数据每小时更新,并可查询任意点声级,直观地反映道路两侧高层建筑立面声级分布,结合噪声监测仪可用于噪声监控,具有广泛的应用价值。

### 3 典型措施降噪效果

#### 3.1 声屏障

按照《公路声屏障 第5部分:降噪效果检测方法》(JT/T 646.5),本研究在实际道路上,选取4 m高典型结构声屏障以及半封闭、全封闭声屏障,测

试其降噪效果,典型声屏障降噪效果及优缺点分析结果如表1所示。相同高度下,不同结构声屏障的降噪效果差异,可以认为是屏体结构差异导致声屏障的等效高度不同造成的。因此,在设计声屏障时,以等效高度来表述所需设置声屏障的高度更为合理。

表1 声屏障结构优缺点分析

类型	典型降噪量/dB	优点	缺点
直立式	6~8	线条简洁明快,易于施工	不能有效增加防护高度,造型缺少变化
折角型	6~9	折角能有效提高声屏障的防护高度	折角连接处施工处理难度较大
微弧形	6~9	能提高声屏障的防护高度	微弧形弯头容易与桥梁交通机电设施交叉,影响造型及耐久性
半封闭	10~12	降噪效果较为突出	施工困难、造价高
全封闭	15~18	降噪效果突出	施工困难、造价高
顶端结构	2~5(附加)	顶端结构能够提高降噪效果	施工工序繁杂、造价较高
有源声屏障	3~5(附加)	能够提高中低频噪声降噪效果	需要供电工作
异型结构	6~10	造型新颖	施工工序繁杂、造价较高

声屏障常用材料的优缺点分析见表2。研究发现,金属声屏障工艺简单、价格较低、效果较好,

使用占比超过85%以上,是中国使用最广泛的声屏障材料。

表2 声屏障材料优缺点分析

材质	应用情况	优点	缺点
金属声屏障	使用最为广泛	吸声效果突出,抗冲击性能好,不受声屏障造型限制	耐腐蚀性较差
铝纤维材质	此类材质须与金属骨架配合使用,实际应用较少	吸声效果较好,不受造型限制	造价较高,抗冲击性能一般,耐久性差
聚碳酸酯(亚克力)材质	国内大部分地区采用此类材质与金属屏体搭配使用	隔声效果较好,抗冲击性能好,不受声屏障造型限制	造价较高,易黄变,耐久性差,防火性能为B2
高强水泥材质	国内北方地区使用较多	造价低廉、吸隔声效果俱佳	建造高度受限制,不能高于6 m,受到造型限制
玻璃钢	国内南方地区使用较多	不受造型限制	造价较高、隔声效果一般
珍珠岩发泡	国内南方地区使用较多	造价低廉	抗冲击性能差,受到造型限制
木屑材质	国内铁路沿线采用此类材质声屏障较多	造价低廉,耐久性一般	抗冲击性能较强,受到造型限制
光伏声屏障	绿色“双碳”试点示范工程为主	复合太阳能供电功能	造价高,发电消纳、并网难
景观声屏障	景观公路、旅游公路等沿线	隔声效果突出,造型美观,施工简便	造价较高,受到地形限制
生态声屏障	景观公路、旅游公路等沿线	因地制宜、就地取材,隔声效果突出	造价较高,受到地形限制

#### 3.2 低噪声路面

利用CPX法,通过在试验环道和一些实际道

路上测试不同路面对交通噪声的影响,以SMA13为参考路面,辐射噪声相对值及路面部分参数见表

3. 目前,中国使用最多的低噪声路面为多孔性沥青路面,在降噪的同时兼具良好的排水效果,提高雨天行驶安全性,在江苏省、江西省等地已大范围使用。

### 3.3 降噪林带植被

降噪林带在宽度为 40 m,枝叶较为茂密的情况下,通常降噪量为 3~5 dB。考虑到地区气候适应性,中国不同地区典型降噪植被见表 4。

表3 低噪声路面降噪效果

类型	厚度/mm	最大工程粒径NMMAS/mm	纹理/mm	空隙率/%	辐射噪声相对值/dB
DAC8	30	8	0.5	4	-2~-1
DAC10	30	10	0.6	4	-2~-1
DAC13	30	13	0.7	4	1~2
DAC16	30	16	0.8	4	2~3
PERS	30	2(橡胶)、8(混合料)	—	30~35	-16~-6
RAC(O)	30	12(OGFC)	—	14~20	-8~-7
RAC(G)	30	12(OGFC)	—	4	-6~-4
SMA16	30~50	16	—	4	2~3
SMA13	30~50	13	—	4	0
SMA10	30~50	10	—	4	-2~-1
SMA8	30~50	8	—	4	-3~-2
PAC13	45	16	—	25	-4~-3
PAC10	45	11	—	25	-5~-4
PAC8	45	8	—	25	-6~-5
双层TPA薄层	25 顶部、45 底部	8 顶部、16 底部	—	20 顶部、25 底部	-7~-5
bardon	5~8	5~8	—	5~15	-9~-4
masterflex	25、35、50	14	2	—	-4~-3
Novachip	15~50	6、10、14	2	—	-8~-6
MASTERpave	12~25	6、9、12	—	25	-3~-2
UL-M	20~50~75	6、14、20	1.5~2	—	-6~-5
MicroFlex	20~50	6、10、14	1.5	—	-9~-7
Colsoft	20	6	—	13	-7~-5
Rugosoft	20~30	6~10	2	—	-7~-3
Nanosoft	20~50	—	—	—	-9~-7
Microvia	25~40	4	—	—	-10~-8
Rollpave	10~30	6	0.8	—	—
Nobelpave	30	6	—	—	-6.3~-4
Surface dressing	—	—	—	—	—
PCC	—	—	—	—	-4~-2
Portland CC	80	9.5	—	20~25	-10~-6
	—	—	—	4~25	-10~-1

表4 不同区域植被类型示例

植被类型	高度/m	植被名称		
		东北华北温带区	华中西南温带亚热带区	华南西南热带区
草本、藤本类	<0.5	野牛草、高羊茅、早熟禾、沙蓬、苜蓿、爬山虎、萱草	狗牙根、结缕草、高羊茅、黑麦草、紫花苜蓿、五叶地锦	马尼拉草、台湾草、狗牙根、佛甲草、大叶油草、爬山虎、辟荔
灌木类	2	大叶黄杨、小叶黄杨、沙地柏、小叶女贞、野蔷薇、迎春、荆条	夹竹桃、红花继木、海桐、法国冬青、紫薇、野蔷薇、多花木兰、丰花月季	灰莉、夹竹桃、红花继木、美蕊花、朱槿、双荚槐、三角梅、小叶女贞、福建茶、鸭脚木

表4 不同区域植被类型示例(续)

植被类型	高度/m	植被名称		
		东北华北温带区	华中西南温带亚热带区	华南西南热带区
灌木类	3	圆柏、紫穗槐、胡枝子、丁香、黄刺玫、丁香	火棘、木芙蓉、紫穗槐、胡枝子、红叶石楠	黄金榕、多花红千层、红叶石楠、黄素馨
乔木类	3~4	黑松、龙柏、山桃、山杏、元宝枫、紫叶李、桤柳	龙柏、圆柏、紫叶李、红叶石楠树、枇杷、黄花槐、四季桂、樱花	垂叶榕、黄花槐、山杜英、小叶榕、枇杷
乔木类	5~7	油松、侧柏、刺柏、雪松、桧柏、刺槐、国槐、柳树、香花槐、臭椿	桧柏、香樟、大叶女贞、红花刺槐、杜英、乐昌含笑栎树、垂柳、玉兰	大叶榕、香樟、大叶紫薇、羊蹄甲、海南蒲桃、广玉兰、桃花心木、火力楠、木荷、复羽叶栎树、垂柳

## 4 发展趋势

### 4.1 低噪声路面正向声学设计

现阶段国内外低噪声路面设计普遍使用力学经验法,没有以路面降噪量为目标建立降噪理论模型和优化设计方法。因此,尚未能根据环境因素和交通流特性,对影响声学性能的多孔路面结构参数进行设计优化。现有的路面降噪性能评估模型和方法,均难以客观体现低噪声路面降噪性能和降低交通噪声的贡献。这制约了低噪声路面在法律和标准规范层面作为降噪措施的应用实施。

以路面吸声为路面设计指标,利用孔隙率、平均孔径和孔径标准偏差优化多孔介质吸声模型,以道路混合材料设计比表征多孔介质关键参数,可以为路面吸声提供设计依据。然而,路面声学性能是受路表吸声、路表纹理构造深度和劲度模量综合作用的,三者之间以路面混合料设计比等非声学参数相互耦合关联,尚未建立合理有效的预测模型。路面声学性能可能会对路面耐久性能、抗滑性能等造成影响,因此,如何合理地构建路面声学设计理论仍有待研究。

目前,路面降噪性能随使用衰减,通常4~5年后,降噪效果将基本失去。因此,通过设计主动磨耗层,优化路面孔隙结构,研发疏水防尘涂层等,增加路面使用寿命,降低养护成本,对于低噪声路面的使用也具有非常重要的积极意义。根据轮胎/路面噪声特征,利用3D打印技术打印路面纹理结构,减振降噪同时提高抗滑耐久,也是一种发展方向。

### 4.2 声频技术与靶向控制

随着人工智能和机器学习技术的发展,以有源控制技术和声阵列技术为代表的声频技术在道路交通噪声控制中,利用数字化、智能化手段,更准确地识别和预测交通噪声的来源和传播路径,从而有效地进行靶向控制<sup>[6]</sup>。随着传感器技术和信号处理技术的发展,可以实现更精准的噪声源定位和特征识别。随着声阵列等技术的发展,可以更精细地感知和测量交通噪声频率、强度、来源等各项参数,与声学超材料等技术相结合,从而能够更精确地控制噪声,形成更为综合、有效的噪声控制方案。

通过物联网和云计算等技术,对多个区域的交通噪声实现远程监控和管理,并根据管控要求,为管理者提供决策参考,能够大大提高城市交通噪声管理的效率和效果<sup>[7]</sup>。同时声频技术的集成化发展与智慧交通、数字交通相融合,可以为团雾、道路预警、故障识别等特殊场景提供技术支撑,实现道路交通噪声的智能识别、智能监测和智能控制。

### 4.3 绿色低碳循环材料

随着环保意识的增强和绿色技术的不断发展,发展绿色低碳材料,可减少对环境的污染,实现资源集约循环利用。绿色低碳材料的可持续性不仅体现在材料本身的再生性和可循环性上,还体现在其生命周期的各个环节降碳减排效益中。为探索道路交通噪声控制绿色低碳转型,将注重选择生命周期内对环境影响小的绿色低碳循环材料,并采取降低材料在使用过程中的能耗和排放。因此,声屏障和低噪声路面将更多地采用可再生、可

循环利用的环保材料,如钢渣、煤矸石、磷石膏、废旧轮胎橡胶等工业固体废弃物再利用,以减少对自然资源的消耗和环境污染。

#### 4.4 路域声景观营造

《声环境质量标准》中,道路声环境质量是通过限值进行约束的。然而对于人来说,声环境的感受与噪声的种类、特征等密切相关。路面、树木、水体、天空等不同的景观元素可以改变人们对噪声的感知,提高声舒适度,缓解噪声对道路沿线居民的声主观感受负面影响。路边树木的密度、与道路的距离,在不同植被搭配下,虽然不会大幅降低人们感知噪声的水平,但是会对交通干线人群心理健康起到积极的作用,创造更为健康的声环境<sup>[18]</sup>。路网的密度也会对提高区域声环境水平有较为明显的作用,从总体上分析,随着路网密度增加,区域噪声平均值与噪声超限率呈明显下降趋势。当路网密度较低时,路网密度的变化对交通噪声的影响较大,随着路网密度的增加,路网密度的变化对交通噪声的影响减小<sup>[19]</sup>。道路沿线不同建筑空间形式以及水体、湿地、树木等景观要素,均会影响沿线人群对于道路交通声舒适度的影响。因此,道路沿线通过营造声舒适景观,对于缓解交通噪声带来的负面作用具有积极的意义。

#### 4.5 环境噪声与可持续发展

交通噪声的污染需要多种措施综合治理,也需要结合可持续发展目标(sustainable development goal,SDG)系统性地考虑。为了推动SDG的实现,噪声污染防治需要与国土空间规划和城市建设过程相协调,与社会经济发展相协同,提高公众的环保意识和噪声污染防治意识,引导企业采取更加宁静的生产方式,加强科技创新,鼓励公众参与噪声污染防治工作,形成政府、企业和社会共同参与的局<sup>[20]</sup>。

## 5 结论

1) 现有的道路交通噪声控制技术,面对综合立体交通的建设与发展,声屏障、低噪声路面等单一措施往往难以满足道路交通噪声治理的要求,需

要通过多种控制措施协同设计进行治理。

2) 目前道路交通噪声以无源控制为主,声学超材料的发展为道路交通噪声的精确治理提供了新的思路;有源噪声控制在应用于道路交通噪声控制过程中,仍面临着干扰因素多、控制区域远、误差传感器难以设置、传递函数难以计算等问题,需要发展和解决。

3) 利用人工智能等先进技术实现道路交通噪声的智能识别、监测和控制系统,通过先进的传感器技术和信号处理技术,实现道路交通噪声源的精准定位和特征识别,可以为有针对性地控制噪声提供依据。

4) 随着科学技术的不断发展和人们环保意识的不断提高,道路交通噪声控制技术将会越来越智能化、精准化、绿色化和可持续。

### 参考文献(References)

- [1] 魏新渝,汪赞,张爱玲.中国道路交通噪声管理体系的完善[J].科技导报,2023,41(11):96-104.
- [2] Sanok S, Berger M, Müller U, et al. Road traffic noise impacts sleep continuity in suburban residents: Exposure-response quantification of noise-induced awakenings from vehicle pass-bys at night[J]. The Science of the Total Environment, 2022, 817: 152594.
- [3] Laxmi V, Thakre C, Vijay R. Evaluation of noise barriers based on geometries and materials: A review[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 29(2): 1729-1745.
- [4] Lu Q B, Li X, Zhang X J, et al. Perspective: Acoustic metamaterials in future engineering[J]. Engineering, 2022, 17: 22-30.
- [5] 李东庭,黄思博,莫方朔,等.基于微穿孔板和卷曲背腔复合结构的低频宽带吸声体[J].科学通报,2020,65(15):1420-1427.
- [6] Chen W S, Min H Q, Qiu X J. Noise reduction mechanisms of active noise barriers[J]. Noise Control Engineering Journal, 2013, 61(2): 120-126.
- [7] Ling S L, Yu F, Sun D Q, et al. A comprehensive review of tire-pavement noise: Generation mechanism, measurement methods, and quiet asphalt pavement[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 287: 125056.
- [8] Lou K K, Xiao P, Kang A H, et al. Effects of asphalt

- pavement characteristics on traffic noise reduction in different frequencies[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, 106: 103259.
- [9] Mikhailenko P, Piao Z Y, Kakar M R, et al. Low-noise pavement technologies and evaluation techniques: A literature review[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2022, 23(6): 1911–1934.
- [10] 袁旻恣, 李明亮, 刘晓霏. 一种基于近距法(CPX)改进的低噪声路面降噪效果预估方法[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(12): 5943–5952.
- [11] 蔡阳生, 张存勳, 陈位凤, 等. 建筑整窗隔声性能的预测方法研究[J]. *建筑科学*, 2023, 39(6): 18–24.
- [12] 李瀚翔, 梁彬, 程建春. 声人工结构的声场调控研究进展[J]. *中国科学(物理学 力学 天文学)*, 2022, 52(4): 2–29.
- [13] Lacasta A M, Penaranda A, Cantalapiedra I R, et al. Acoustic evaluation of modular greenery noise barriers[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, 20: 172–179.
- [14] Attal E, Dubus B, Leblois T, et al. An optimal dimensioning method of a green wall structure for noise pollution reduction[J]. *Building and Environment*, 2021, 187: 107362.
- [15] Murphy E, King E A. *Environmental noise pollution: Noise mapping, public health, and policy*[M]. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2022.
- [16] Meng W X, Yuan M M, Zheng C S, et al. A comparison of robust capon beamformers using a large-scale microphone array for speech extraction[J]. *Applied Acoustics*, 2023, 202: 109123.
- [17] Liang R H, Liu W F, Li W B, et al. A traffic noise source identification method for buildings adjacent to multiple transport infrastructures based on deep learning[J]. *Building and Environment*, 2022, 211: 108764.
- [18] Wu Y, Kang J, Zheng W Z, et al. Acoustic comfort in large railway stations[J]. *Applied Acoustics*, 2020, 160: 107137.
- [19] Yuan M M, Wu Z P, Wang H B, et al. Impact evaluation of different network planning concepts on traffic noise[J]. *Noise & Vibration Worldwide*, 2023, 54(7/8): 325–336.
- [20] Liu X F, Yuan M M. Assessing progress towards achieving the transport dimension of the SDGs in China[J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 858(1): 159752.

## Current status and development trends of road traffic noise control technology

YUAN Minmin<sup>1,2</sup>, WANG Yanqin<sup>1,2</sup>, SHAO Shegang<sup>1,2</sup>, LI Mingliang<sup>1,2</sup>

1. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China

2. National Environmental Protection Engineering and Technology Center for Road Traffic Noise Control, Beijing 100088, China

**Abstract** With the characteristics of wide influence range, long duration, and deep pollution degree, road traffic noise has become the main environmental problem in road traffic. According to the overview of road traffic noise pollution in China, combined with the development of acoustic metamaterials and electroacoustic technology, the technical characteristics, application scope, and research and development direction of noise control measures such as sound barriers, low noise pavements, ventilated soundproof windows, noise reduction forest belts, and intelligent control are introduced. The advantages and disadvantages of sound barriers made with typical structures and materials and low noise road surfaces are reviewed, as well as their noise reduction effects. Vegetation types that can be used as noise reduction forest belts in different regions of China are provided. And the next development direction of road traffic noise control technology is pointed out from several aspects, such as low noise pavement acoustic design, application of audio and information technology, recycling of green and low-carbon materials, creation of road acoustic landscapes, environmental noise and sustainable development, to support the construction and development of peaceful transportation and comfortable living environments.

**Keywords** road traffic; noise control; sound barrier; low noise road surface; noise management and control ●



(责任编辑 王微)