

公路隧道声场分布特征及降噪技术研究进展

胡指南¹, 王跃健¹, 王永刚^{1,2}, 李彪², 孙广贤², 吴立朋¹

(1. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 石家庄 050043;

2. 石家庄市交通投资开发有限公司, 石家庄 050020)

摘要: 针对公路隧道噪声控制问题, 系统开展了噪声源识别、传播规律分析及降噪技术评述研究。首先, 明确了隧道内主要噪声源为车流, 次要噪声源为风机等既有设备; 深入分析了噪声声压在隧道纵向与横向的分布规律及其传播机制, 揭示了隧道内的噪声特性, 并特别指出马蹄形断面隧道中存在的“声聚焦”与“混响”现象。其次, 全面归纳了当前主流的主动与被动降噪技术的降噪机理、适用场景及优缺点, 指出被动降噪对中高频噪声效果显著, 而主动降噪在低频噪声控制方面更具优势。研究表明, 未来隧道噪声的有效控制需综合考虑道路等级、车流特征、断面形式等因素, 科学融合主动与被动降噪技术。该研究成果可为公路隧道噪声控制的理论研究及降噪工程设计提供重要的理论依据和技术参考。

关键词: 公路隧道; 噪声特性; 被动降噪; 主动降噪

中图分类号: U453.8+2

文献标志码: A

Research Progress on Sound Field Distribution Characteristics and Noise Reduction Technology in Highway Tunnels

HU Zhinan¹, WANG Yuejian¹, WANG Yonggang^{1,2}, LI Biao², SUN Guangxian², WU Lipeng¹

(1. Shijiazhuang Tiedao University, Key Laboratory of Road and Railway Engineering Safety Assurance of the Ministry of

Education, Shijiazhuang 050043, China; 2. Shijiazhuang City Traffic Investment Development

Co., Ltd., Shijiazhuang 050020, China)

Abstract: In response to the problem of noise control in highway tunnels, the system has carried out research on noise source identification, propagation law analysis, and noise reduction technology review. Firstly, it is clarified that the main noise source in the tunnel is traffic flow, and the secondary noise source is existing equipment such as fans; In depth analysis was conducted on the distribution and propagation mechanism of noise pressure in the longitudinal and transverse directions of tunnels, revealing the characteristics of noise inside tunnels, and specifically pointing out the "sound focusing" and "reverberation" phenomena that exist in horseshoe shaped cross-section tunnels. Secondly, the noise reduction mechanisms, applicable scenarios, advantages and disadvantages of the current mainstream active and passive noise reduction technologies were comprehensively summarized. It was pointed out that passive noise reduction has a significant effect on mid to high frequency noise, while active noise reduction has more advantages in low-frequency noise control. Research has shown that effective control of tunnel noise in the future requires comprehensive consideration of factors such as road grade, traffic characteristics, and cross-sectional form, and the scientific integration of active and passive noise reduction technologies. This research result can provide important theoretical basis and technical reference for the theoretical research and noise reduction engineering design of highway tunnel noise control.

Key words: highway tunnel; noise characteristics; passive noise reduction; active noise reduction

收稿日期: 2024-12-26

修回日期: 2025-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(52178392); 河北省自然科学基金(E2021210025)

第一作者: 胡指南(1986—), 男, 辽宁铁岭人, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为隧道与地下工程。E-mail: huzhinan@stdu.edu.cn

通讯作者: 王永刚(1980—), 男, 河北石家庄人, 教授级高级工程师, 主要研究方向为公路工程施工技术。E-mail: 18931856499@163.com

由于隧道相对封闭的空间特性,车辆行驶产生的噪声,尤其是低频噪声,会在隧道内通过声波的反射和折射形成显著的声场叠加和混响现象。这种声场的复杂性导致噪声强度在隧道内远超过开放空间^[1],不仅显著降低了行车舒适性,而且陈妍等^[2]通过室内模拟和实地试验揭示了隧道噪声对驾驶员疲劳的显著影响,凸显了声场优化的紧迫性。

近年来,我国在隧道降噪领域的研究已经取得了显著进展。从新型降噪沥青路面材料的研发(丛卓红等^[3]、马保国等^[4]、周志刚等^[5])到沥青混凝土降噪机理的系统解析(Zhang等^[6]、徐道根^[7]),该领域研究不仅丰富了隧道噪声控制的材料储备,更通过建立材料声学性能与结构参数的响应关系,为工程技术创新提供了理论支撑。关口哑隧道^[8]、广渠路东延隧道^[9]等项目通过铺设降噪路面或拱壁吸声构造,显著改善了隧道内的声环境。如图1所示为广渠路东延隧道低噪音超薄罩面试验路铺设现场。这些措施不仅提升了行车安全,也改善了驾驶员的工作条件,保护了他们的健康。

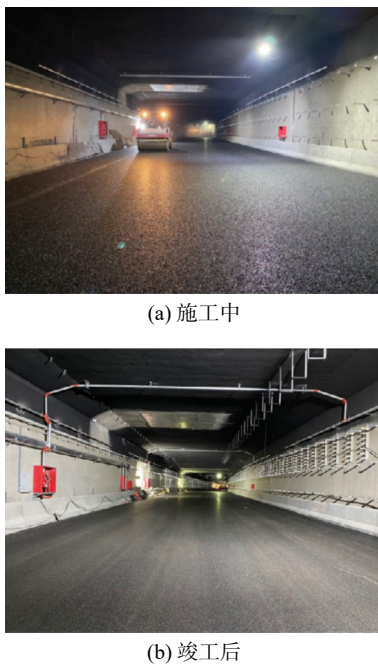


图1 低噪音超薄罩面试验路铺设现场^[9]

Fig. 1 Low noise ultra-thin cover test road laying site^[9]

当前隧道降噪技术体系根据作用机制可分为被动降噪与主动降噪两类。被动降噪指通过材料物理特性实现噪声衰减的技术路径,其核心在于构建声阻抗梯度结构或增加声能转化耗散。主动降噪则特指基于声波相干干涉原理的实时调控技术,通过加速度传感器阵列捕捉噪声主频、扬声器阵列,发射反向声

波实现噪声抵消。因此,主被动协同推进定会成为隧道降噪措施的主要发展趋势。尽管主动降噪方式在理论上具有将噪声源与主动声源进行相干干涉以实现噪音中和的潜力,但目前仍处于试验阶段,尚未在实际工程中得到广泛应用。故而,有必要对隧道降噪技术进行综述,系统性的掌握主、被动降噪技术的机理。

鉴于此,本文聚焦公路隧道半封闭空间的噪声控制难题,系统解析车流及设备噪声的复杂来源与声场分布规律(含混响效应及声聚焦现象),集成声学理论、数值仿真与试验方法,综合评价主被动降噪技术的适用条件与工程瓶颈,并提出面向实际场景的优化路径,为隧道降噪设计提供理论支撑与实践指南。

1 隧道内噪声源分析

通行车辆和射流风机等隧道内自有设备是隧道内主要的噪声源^[10]。为了深入分析噪声的成因,国内王明年等^[11]分别对隧道内单独射流风机的噪声、射流风机和车流共同运行产生的混合噪声进行了一系列测试研究,结果显示,车辆噪声是隧道内的主要噪声源,而风机噪声则作为次要噪声源。这一发现在如图2所示的实测数据中得到了直观的展示。

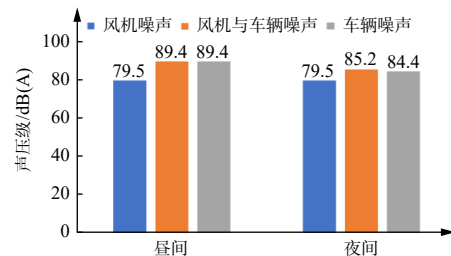


图2 隧道内噪声源测定结果^[11]

Fig. 2 Measurement result of noise source in tunnel^[11]

1.1 设备噪声

实测研究表明,隧道设备噪声对声环境存在显著叠加效应,陈建勋^[12]量化分析显示隧道内风机噪声高达92 dB(A),如表1所列;田杨明等^[13]针对射流风机进行测试,进一步肯定了射流风机为噪声源如图3所示。针对设备问题,杨立新等^[14]研发的微穿孔板消声器使风机出口噪声降低18 dB(A),邢荣军等^[15]通过变频器滤波装置实现噪声频谱峰值削减12.3 dB。

隧道风机噪声控制的研究领域,尽管已经取得了诸多成果,但针对不同类型隧道、风机及多变运行环境下的噪声特性研究仍不全面。例如,城市隧道与山区隧道在结构和使用环境上的差异,可能会对风机噪声的传播特性产生显著影响。此外,不同型号的风机

表 1 隧道内各种工况下噪声测试结果汇总^[12]

工况	无交通射流风机开启	有交通射流风机开启
实测值	80~100	91~105
最大值	100	105
最小值	80	91
计权平均	92	97
标准	80	-

图 3 风机标准噪声测试方法示意^[14]Fig. 3 Schematic diagram of standard noise testing method for wind turbines^[14]

在设计和运行参数上的差异,也可能导致噪声特性的变化。因此,要想准确把握设备噪声影响,需要更加注重风机噪声特性的研究分析,以及降噪措施在不同工程环境下的适应性和经济性评估。

1.2 车流噪声

车流噪声主要指汽车发动机噪声、轮胎与路面接触的胎噪以及车辆与空气摩擦和碰撞的风噪。

1.2.1 发动机噪声

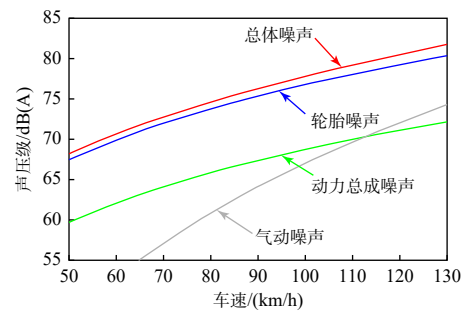
发动机噪声是影响汽车整体噪声水平的关键因素,其产生机理多样,包括燃烧噪声、机械噪声和空气动力噪声。郭文勇等^[16]揭示了柴油机排气噪声的显著低频特性,主要由谐波构成。王裕等^[17]通过现场实测指出发动机在 2 000 r/min 运行时,最大声压出现在 400~500 Hz 频带。同时,贾晓宏等^[18]通过建立耦合模型,指出采用钢弹簧浮置板轨道结构时车辆引起的 Z 振级小于 70 dB。张翠青等^[19]成功识别了大众 2VQS 电喷发动机的噪声源位置,指出噪声源主要集中在发电机、缸体、皮带轮、齿轮系、冷却风扇 5 处,同时,发现当转速达到 2 500 r/min 后噪声声压级趋于稳定。因此,采取优化发动机设计、改进排气系统、使用高效的隔音材料等有效的降噪措施对于改善隧道内整体噪声问题至关重要,同时对提升车辆舒适性和降低噪音污染有显著影响。

一方面,针对传统燃油汽车来讲尽管研究确认了转速与噪声级之间的关联,但在不同转速区间内噪声的具体变化规律,以及如何更有效地控制噪声,仍需进一步研究。另一方面,随着电动汽车和其他新型动

力系统的出现,其噪声特性与传统内燃机不同,特别是电池热管理系统气动噪声与驱动电机电磁噪声的相位干涉效应尚未建立量化评价体系。

1.2.2 轮胎/路面噪声

Wayson 等^[20]指出,开放道路场景下,当车速超过 50 km/h 时,轮胎/路面相互作用是主要的噪声源。如图 4 所示为各种噪声源在不同车速下的贡献分布。与此同时,这种噪声主导特性在封闭空间内同样存在:乔海滨等^[21]通过对隧道噪声的实测和数值模拟分析,确认了轮胎/路面噪声是城市隧道内交通噪声的主要来源。

图 4 公路交通噪声各声源的贡献^[20]Fig. 4 Contributions of various sound sources to highway traffic noise^[20]

在胎噪影响因素方面,刘武斌等^[22]通过应用两种噪声测试方法对西安市某道路的两个路段进行了测量,使用平均声强级和 1/3 倍频程频谱作为评估标准,证实了行驶速度为胎噪的重要影响因素。进一步,肖旺新等^[23]的研究表明,路面粗糙度的增加和凹凸不平度的降低能有效减少摩擦振动噪声。

在胎噪识别技术方面,蔡旭等^[24]基于“主驱动轮式路面功能评价系统”结合 Matlab 软件进行了室内轮胎/路面噪音分析,为精确测量轮胎/路面噪声提供了有效手段。陈理君等^[25]从声学机理的角度出发,分析了轮胎/道路噪声的发声原理,并建立了发声模型,通过离散傅立叶变换将两种噪声波合成,得到了总体的噪声频谱。袁旻恣等^[26]提出了一种近距法来评估轮胎/路面的噪声水平,并通过实际测量验证了该方法的准确性。

一方面,尽管已有研究考虑了车速与胎噪之间的关系,但对环境因素(如温度、湿度)对胎噪的影响研究尚不充分,且对驾驶员和乘客的舒适度、疲劳以及心理影响的研究可能还不够深入。另一方面,目前不同的研究者采用了不同的研究计算方法或不同的评估标准,从而导致对结果的可比性不足,需加强研究

方法的统一性或不同研究方法之间差异性的探索, 进而对问题进行更加全面共和深入的研究。

1.2.3 风噪

在普通燃油车中, 当车速达到 100 km/h 时, 风噪成为主要噪声源^[27]。在风噪识别方面, 王毅刚等^[28]通过现场测试和数值模拟分析了车辆表面压力脉动特性, 确认表面压力脉动是气动噪声的根源。Hu 等^[29]对汽车的流场进行模拟和试验, 发现气流经过后视镜产生湍流涡流, 导致了压力脉动和气动噪声。马瑶等^[30]基于精细化仿真模型, 分析了隧道内动车交会过程中气动阻力与升力等流场特性。

在风噪特征方面, 刘英杰等^[31]采用流体力学和有限元方法对红旗 H7 轿车的车内气动噪声进行了综合求解, 发现车内噪声主要集中在中低频段。Zhong 等^[32]认为气动噪声显著影响汽车的舒适性, 并对某乘用车进行风洞试验, 得出汽车外部声压级和压力谱具有一致性, 确定了主要气动噪声源分别为 200 Hz 以下的下车体和 200 Hz 以上的车窗。通过对气动噪声特性的深入了解, 要想解决汽车行驶中的风噪需要在汽车设计阶段就做出细致分析对比, 从根本上弱化车辆行驶过程中风噪产生的影响。

但当前研究仅仅是对某一特定车辆进行分析, 其结论也许不能适应所有车型; 并且实验室或者计算模拟的条件与实际的假释条件有所不同, 未来的研究应开发更适应实际噪声机理、更加准确的计算模型, 来整体提升风噪研究的经济性和准确性。

1.3 现阶段总结与不足

对隧道内噪声源准确的识别与分析, 是解决隧道内复杂噪声问题的前提。其中, 发动机噪声一般在处于低频 20~500 Hz 范围内, 但随着发动机转速的增加, 高频噪声也会逐渐增强; 胎噪主要集中在中频 500~2 000 Hz 范围内, 其中不同的轮胎花纹将产生不同强度的泵气效应, 从而使噪声频率升高; 风噪主要由于气流与车身相互作用引起, 在 2 000 Hz 以上较为明显, 其频率特性与车速、车身、汽车气密性能等因素有关; 既有风机设备的流体噪声主要分布在 1 000~5 000 Hz 之间。

在如此复杂的噪声特征环境下各种噪声源之间可能相互叠加, 难以统一控制其噪声产生, 使得噪声污染程度加重。前者的研究多集中于针对单一噪声源的识别, 虽然这是改善整体噪声环境的基础, 但仍需要构建多维度的噪声源协同分类框架。改善车流噪声, 一方面, 需要准确识别各种声源及其频率特性,

进行逐一击破; 另一方面, 在识别的基础上要分析各种声源在整体声场中的占比及作用大小, 优先采取对大占比声源的降噪措施, 使降噪措施效果更加明显。

2 隧道内声场分布规律

2.1 纵向分布规律

朱文等^[33]对重庆地区包括真武山隧道、中梁山隧道、北碚隧道和西山坪隧道在内的多个隧道进行了详尽的声压级对比。分析了混凝土路面与沥青路面在噪声波形和频率上的差异, 指出隧道内噪声的产生是一个多因素共同作用的复杂过程。罗威力等^[34]则利用计算机仿真技术, 结合微观交通仿真、噪声排放模型和声波传播模型, 计算了隧道内不同位置的噪声水平。陈立平等^[35]采用理论计算与实测相结合的研究方法, 深入探究了隧道噪声的纵向分布特性。研究结果如图 5~6 所示, 清晰地揭示了隧道内噪声沿纵向呈现出中间高、两端低的分布特征, 主要集中在中低频段。刘小明等^[36]通过对重庆主城区内 6 条隧道的汽车行驶噪声的实测来分析噪声分布特性, 在得到类似结论的同时, 还发现隧道洞口内外的噪声水平存在显著差异, 洞口附近噪声值有明显提升。

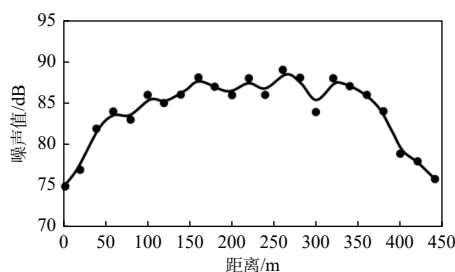


图 5 隧道噪声纵向分布规律^[35]

Fig. 5 Propagation rules of noise along longitudinal direction of tunnel^[35]

大量学者通过研究不同隧道和路面材料对噪声的影响, 为理解隧道内的噪声传播特性提供了实证数据。但没有充分考虑隧道设计、车辆类型、交通流量等环境因素对噪声的影响; 并且缺乏长期监测数据, 没有对隧道内实施长期降噪策略提供现实依据。要合理依据噪声分布规律, 开发和测试新的降噪材料和技术, 使降噪材料和降噪措施实现有针对性地发挥作用。

2.2 横向分布规律

首先, 王美燕等^[37]通过仿真模拟的方法研究了隧道横截面积对洞口噪声的影响。研究发现, 在隧道长度保持不变的情况下, 隧道横截面积的增大会导致洞口处噪声水平的显著增加。如图 7 所示展示了噪声

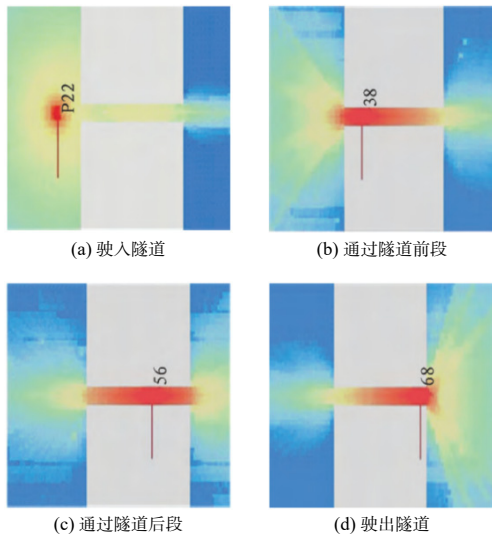


图 6 隧道纵向噪声传播扩散规律^[35]

Fig. 6 Propagation rules of noise along longitudinal direction of tunnel^[35]

级随横截面积变化的趋势,强调了在隧道设计中考虑横截面积对噪声控制的重要性。接着,张雪峰等^[38]利用 LMS Virtual Lab 软件对隧道内声场进行有限元分析,得出在声源频率达到一定临界值后声场会分布成 2 种区域:声场紊乱区和声场稳定区。陈立平等^[35]、张忠宇等^[39]通过数值模拟软件观察到了声波一次反射后产生的显著声聚焦现象,指出隧道横断面内的直达声是噪声的主要来源,如图 8~9 所示。田琪^[40]通过数值模拟计算了隧道的纵向声场分布情况。研究指出,在纵向分布中,如图 10 所示,只有距隧道洞口 5 米范围内声压降低比较明显。在横断面内,如图 11 所示,随着声源频率的升高,隧道壁附近区域声压幅值明显增大的叠加范围逐渐减小。

大量学者对于理解隧道内噪声场分布和噪声传播规律提供了重要的理论支持,但由于隧道环境复杂,研究过程中对于隧道内环境(温度、湿度等)的变化考虑不足,这些动态因素也是噪声传播的重要条

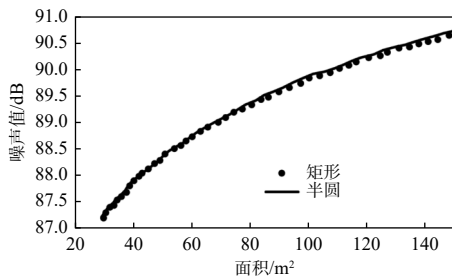


图 7 噪声级随横截面积的变化^[37]

Fig. 7 Variation of noise level with cross-sectional area^[37]

件。同时,研究多次反射和复杂声场条件下的声聚焦效应,以及如何通过设计优化来减少噪声是未来不可避免的研究趋势。

2.3 现阶段研究总结与不足

公路隧道内噪声主要分为两大区域分布,即贴近

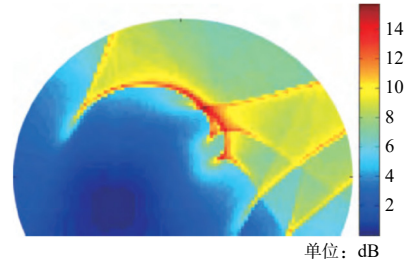


图 8 一次反射声增加的声压级分布^[35]

Fig. 8 Distribution of first reflected sound line^[35]

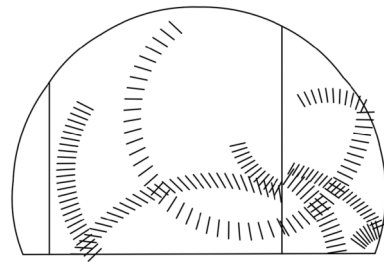


图 9 某隧道内噪声反射声聚焦现象^[39]

Fig. 9 Sound focusing phenomenon of noise reflection in a tunnel^[39]

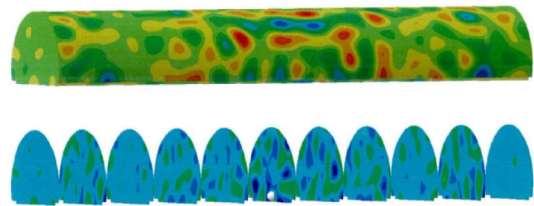


图 10 声源频率为 250 Hz 时声压分布云图^[40]

Fig. 10 Sound pressure distribution when the source frequency is 250 Hz^[40]

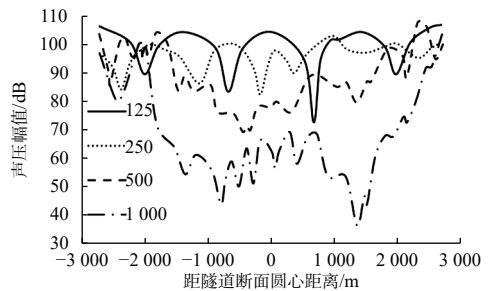


图 11 声压随距隧道断面圆心距离变化趋势^[40]

Fig. 11 Trend of sound pressure variation with distance from tunnel section center^[40]

界面的声场紊乱区和远离界面的声场稳定区。当声源频率从 250 Hz 逐步增加到 1 000 Hz 时, 紊乱区的范围由距离隧道壁 2.3 m 以内范围向 0.7 m 以内递减。这意味着随着声源频率的增加, 紊乱区向隧道壁方向收缩。与声场紊乱区类似, 声源位置的改变对声场稳定区的整体范围影响不大, 但声源附近的声场分布会随声源的移动而发生变化。

首先, 对于贴近界面的声场紊乱区和远离界面的声场稳定区这两个区域的具体特性、相互转换的条件以及它们对隧道内噪声的总体贡献等, 尚缺乏深入的理解。其次, 研究表明声源频率和位置对隧道内的声场分布有显著影响, 针对如何通过控制这些因素来优化声场分布应重点研究。最后, 目前的研究主要集中在特定频率范围和隧道尺寸下的声场分布, 对于不同隧道类型、不同交通状况下的声场分布规律研究较少。

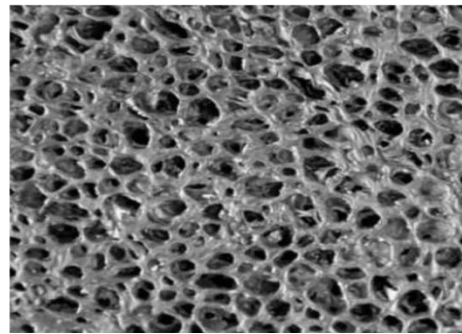
3 主要降噪技术研究现状

3.1 被动降噪

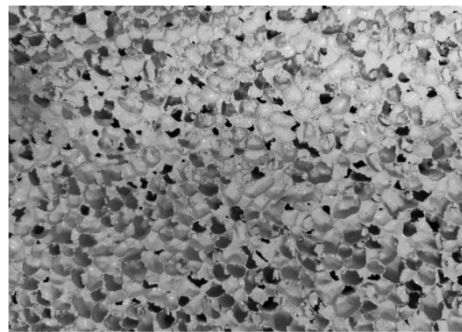
被动降噪技术, 也称为无源控制方法, 是目前广泛采用的降噪手段, 主要包括在隧道壁安装吸声材料。传统技术包括吸收、隔离、阻尼和结构消声等方法。

3.1.1 试验研究

在隧道壁降噪材料方面, Lin 等^[41] 依托青兰高速濠山峪隧道, 验证了泡沫闭孔铝板在 250~1 000 Hz 频段良好的吸声性能, 泡沫铝板样品如图 12 所示。张锐等^[42] 依托玄武湖隧道, 通过现场测量和理论计算, 分析了铺设吸声材料后的降噪效果, 平均降噪量高达 6.33 dB。王卫东等^[43] 通过在隧道内铺设吸声构造, 以语言清晰度为依据对材料降噪性能进行研究, 指出吸声构造不仅显著降低了隧道的混响时间, 而且提升了语言清晰度, 如图 13 所示。在实际应用中, 吸声材料和构造的铺设位置、类型和数量都需要根据隧道的具体环境和预期的声学效果进行精心设计, 例如对于行人和非机动车通行的隧道, 则可能需要更多地考虑声音的传播特性和回声问题。王永东等^[44] 探索了不同频率噪声下膨胀珍珠岩材料的铺设位置对噪声控制效果的影响。但没有通过改变材料自身结构来优化降噪效果。Lam 等^[45]、史小丽等^[46] 总结了吸声材料的数量和位置对声场的影响规律, 提出了最佳的铺设方案。未来为了全面评估吸声材料和构造在隧道声学环境中的效果, 还需要进行长期的监测和评估。通



(a) 开孔泡沫



(b) 闭孔泡沫

图 12 泡沫铝样品图^[41]

Fig. 12 Aluminum foam sample diagram^[41]

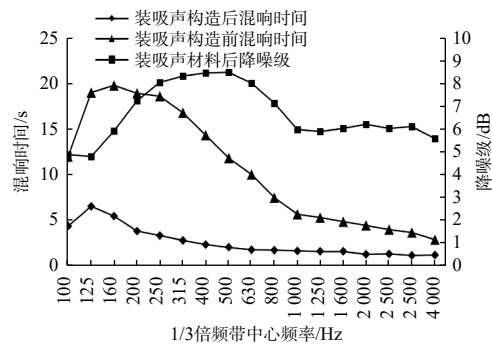


图 13 混响时间与降噪级^[43]

Fig. 13 Reverberation time and noise reduction level^[43]

通过对噪声水平、混响时间、语言清晰度等指标的定期测量, 不断优化和调整吸声材料和构造的设计, 以达到最佳的声学效果。

3.1.2 数值模拟

在声学领域, 对隧道壁粗糙表面的声阻抗评估是一项关键的研究课题。Law 等^[47] 通过 Twersky 模型对隧道壁粗糙表面进行声阻抗评估, 指出在 500 Hz 至 5 000 Hz 频率范围内, 粗糙表面平均可降低约 3 dB 的噪声水平, 并通过模型隧道的噪声测试进行了验证。

经典声学理论认为混响时间在长空间中是处处相等的。但 Kang^[48] 提出混响时间实际上是随着与声源距离的增加而变化, 并通过理论分析证明了经典声

学理论是不适用于公路隧道、地铁车站等长空间结构物的。这种长空间结构物的声场可以利用声波的多次反射和吸收来解释。由此提出了计算声压级(SPL)的经典公式:

$$SPL = L_w + 10 \lg \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R_T} \right) \quad (1)$$

式中: SPL 为声压级, 单位 dB; L_w 为声源的声功率级, 单位 dB; Q 为声源的指向系数, r 为该点距离声源的距离, 单位 m; R_T 为房间常数, 与房间混响声有关, 单位 m^2 。

当声源处于隧道中时, 隧道中不仅存在从声源直接辐射出来的声能, 还会存在由于隧道壁和路面的不断反射而引起的混合声能, 它们不断叠加使隧道内声场环境更为复杂。为了便于分析研究, 将隧道内受声点处的声场分解为直达声场与混合声场, 再将二者进行叠加得到更为接近隧道内噪声实际的总声场^[40]。

直达声场相应的声压级为

$$L_{pd} = L_w + 10 \lg \left(\frac{QW}{4\pi r^2} \right) \quad (2)$$

混合声场相应的声压级为

$$L_{pr} = L_w + 10 \lg \left(\frac{4}{R} \right) \quad (3)$$

所以总声场的声压级为

$$L_p = L_w + 10 \lg \left(\frac{Q}{4\pi r^2 + \frac{4}{R}} \right) \quad (4)$$

式中: Q 为指向性因子; 当点声源位于无限空间, Q 为 1; 位于刚性无穷大的平面上时, Q 为 2; 位于两刚性平面交线上时, Q 为 4; L_w 为声源的声功率级, 单位 dB; W 为点声源的声功率, r 为距点声源的距离, R 为隧道常数, 单位为 m^2 。

因此, 隧道内壁铺设吸声材料以及铺设低噪声路面对于改善隧道内声场环境极为重要。而吸声降噪通常利用吸声系数来衡量吸声材料或结构的吸声性能, 当声波入射到材料表面时, 吸收的声能与入射的总声能之比即为吸声系数, 即^[49]

$$\alpha = \frac{E_1}{E_2} \quad (5)$$

式中: α 为吸声系数, E_2 为被吸收的声能, E_1 为入射声能。吸声系数越大, 吸声材料的吸声性能就越好。

3.2 主动降噪

被动降噪技术在降低中高频噪声方面效果显著, 但在处理低频噪声时存在局限。此外, 这些技术在实际应用中还面临着一些挑战, 包括安装和维护的复杂性、设备的体积庞大以及操作的不便性。相比之下, 主动降噪技术中低噪声路面能在声源处减弱噪声, 且降噪效果明显。有源消声技术基于声波的相消干涉原理, 通过产生相反相位的声波来抵消噪声, 展现出在降噪方面的独到优势, 特别是在有限空间内的应用。

3.2.1 试验研究

1) 低噪声路面

自 20 世纪 70 年代起, 国内外学者开始关注轮胎与路面相互作用产生的噪声问题。早期欧洲为了提升路面的抗滑性能提出了露石水泥混凝土路面, 但是德国、日本、奥地利等国家发现其具有良好的降噪性能, 对其降噪性能进行了大量研究。韩森等^[50]通过室内轮胎落下法验证了露石水泥混凝土路面在吸收 1 250 Hz 以上频率噪声方面的优势, 能够实现高达 7 dB(A) 的降噪效果。文献 [51-52]、金少春等^[53]、杨小龙等^[54]的研究相继证实了露石水泥混凝土路面在降噪方面的卓越表现。王岚等^[55]通过试验总结出大孔隙胶粉改性沥青试件吸声系数随厚度的增加而增大; 王云鹏等^[56]指出橡胶粉改性沥青路面与 SBS 改性沥青路面相比有明显的降噪作用。

对于多孔水泥混凝土路面我国于 20 世纪 90 年代开始研究, 且被广泛应用于各大城市。胡力群等^[57]研发的多孔水泥混凝土路面具备降噪、抗滑及污染物降解功能, 该成果为城市道路可持续建设提供了技术路径, 对改善人居环境具有实践价值。

多孔水泥混凝土由于不含细集料, 面临强度和耐久性的问题, 这促使了对多孔沥青路面研究的开展。国外研究表明多孔沥青路面的孔隙率影响着降噪效果^[58]。国内张玉芬等^[59]最早提出首次提出通过调整路面孔隙率来增强材料的吸声效果。徐秋新等^[60]、王波等^[61]进一步指出在保证降噪效果的同时, 路面孔隙率应控制在 15%~20% 之间。Peng 等^[62]使用 TRD 方法研究了不同因素对路面噪声的影响, 发现孔隙率 20% 时能改善路面吸声性能且不损失耐久性。乐兴堃等^[63]依托实际工程指出橡胶沥青路面材料最佳沥青用量为 4.8%, 最佳空隙率为 15.8%。

董旭峰等^[64]指出橡胶颗粒质量分数为 3% 的低噪声路面减振效果最为显著; 荆祿波等^[65]通过量测轮胎/路面噪声, 指出 8 cm 厚的多孔水泥混凝土低噪声

路面有最佳的降噪效果。如图 14 所示为传感器布置位置。

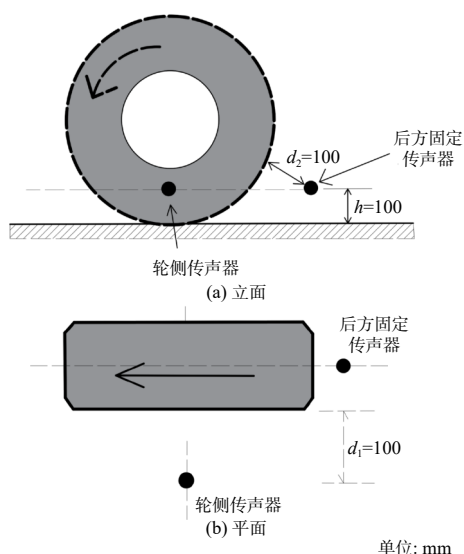


图 14 轮胎传声器固定位置示意图^[65]

Fig. 14 Schematic diagram of the fixed position for the tire microphone^[65]

2) 有源噪声控制技术

最早在 1933 年德国物理学家 Paul Lueg 专利中提出在原有噪声上叠加反向的声音来降低噪声的方法,但是当时由于电子技术的限制,该方法未能实现。尽管如此,这一概念为后来的有源噪声控制技术奠定了理论基础。马大猷^[66]通过简正波抑制原理,对有源噪声控制系统的有效性进行了科学验证,为该领域的研究提供了重要的理论支持。沈甦等^[67]深入探讨了有源噪声控制的机理,分析了不同类型有源噪声控制系统的传输特性,如图 15 所示为工作原理。这些研究不仅加深了我们对有源噪声控制技术的理解,也为后续的技术发展和应用提供了坚实的科学依据,在多个领域展现出其卓越的降噪效果。

有源降噪技术在不同空间的应用逐渐广泛,从理论研究到实际应用均取得了显著进展。刘会灯等^[68]专注于研究主动声源位置的变化对降噪效果的具体

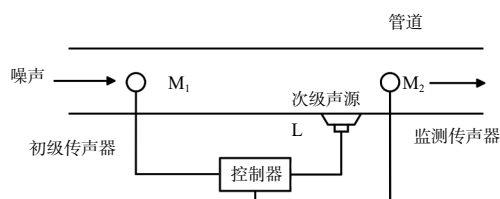


图 15 管道有源噪声控制系统示意图^[68]

Fig. 15 Schematic diagram of pipeline active noise control system^[68]

影响,为优化声源布局提供了实验依据。在汽车噪声控制领域,邹海山等^[69]、张立军等^[70]研究均采用了有源噪声控制技术,显著改善了汽车行驶过程中的噪声问题。但是在对有源噪声控制系统的稳定性和有效性的研究尚有不足,特别是在实际工作环境中其受温度、湿度、以及外部噪声源的变化等影响,这些都可能影响系统的降噪性能。

3.2.2 数值模拟

1) 低噪声路面

乔建刚等^[71]通过有限元仿真软件分析,结合能量守恒定律,揭示了胶粉沥青路面能有效减弱轮胎与路面的接触震动原理,如图 16 所示,并进行了噪声值实测,验证了沥青路面噪声比普通路面噪声低 5~6 dB。孙俊锋等^[72]采用有限元法建立沥青路面孔隙结构的微观模型,发现 OGFC-13 在中低频噪声降噪方面表现更为出色,说明噪声的频率也会影响材料的降噪效果。

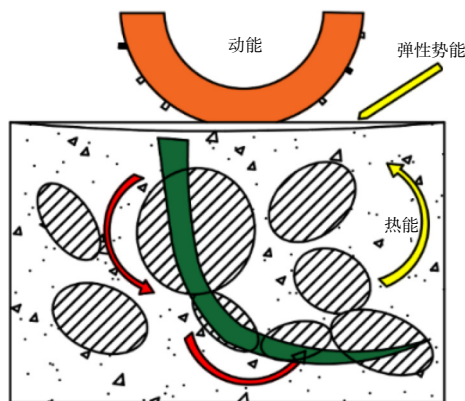


图 16 橡胶沥青路面降噪原理^[72]

Fig. 16 Noise reduction principle of rubber asphalt pavement^[72]

2) 有源噪声控制技术

邵军等^[73]采用数值模拟方法,深入分析了引入有源控制措施后有源声屏障的控制效果,特别是对低频噪声的控制优势。王国领等^[74]构建了模拟汽车内声学特性的主动噪声控制理论模型,为车内有源噪声控制的实施提供了理论依据和可行性证明。臧传臻等^[75]以北京地铁 13 号线为研究对象,建立了半自由场模型,指出在声屏障的基础上增设主动声源,能有效降低声压级 3~12 dB。罗平展等^[76]针对管道中的声波控制,提出了次级声源独立控制高阶模式声波的理论模型,并通过数值模拟对比分析了不同次级声源布局的控制效果,验证了所提模型在控制效率上的可靠性。

尽管上述研究在有源噪声控制领域取得了一系

列成果,但仍存在一些局限性和挑战。例如,现有研究多集中在特定环境或特定频率范围内的噪声控制,对于宽频带噪声或复杂环境下的噪声控制研究相对较少。此外,实际工程应用中,如何平衡降噪效果与成本、系统的稳定性和可靠性也是需要进一步研究的问题。

魏庆朝等^[77-78]基于声波干涉原理对主动降噪进行理论分析,采用有限元法建立隧道模型,计算隧道内声压级分布,基于有限元法的声场计算公式为

$$[\mathbf{K} + i\omega\mathbf{C} - \omega^2\mathbf{M}]\mathbf{P} = F_A \quad (6)$$

式中: ω 为物体固有振动频率, i 为物体阻尼的虚部, F_A 为作用于节点处声学激励, \mathbf{M} 为结构质量矩阵, \mathbf{K} 为结构刚度矩阵, \mathbf{C} 为结构阻尼矩阵, \mathbf{P} 为未知声压矢量。

叠加模态得到声场声压分布:

$$\mathbf{P} = \sum_{k=1}^m \beta_k \boldsymbol{\phi}_k = \boldsymbol{\phi} \boldsymbol{\beta} \quad (7)$$

式中: β 为模态系数, β_k 为第 k 个特征向量的模态系数, $\boldsymbol{\phi}$ 为模态矩阵, $\boldsymbol{\phi}_k$ 为第 k 个特征向量, m 为特征向量个数。

模态系数 β 的确定公式为

$$[\boldsymbol{\phi}(\mathbf{K} + i\omega\mathbf{C} - \omega^2\mathbf{M})\boldsymbol{\phi}]\boldsymbol{\beta} = \boldsymbol{\phi}F_A \quad (8)$$

结果表明,当主动声源与噪声源差值为噪声波长的整数倍可在降噪点附近实现 3 dB 以上区域降噪。吴礼福等^[79]提出了一种基于 FxLMS 算法引入自校正自适应的算法,在降低计算复杂性的基础上能获得与 FxLMS 算法相当的计算结果。Jiang 等^[80]提出 ASSFxLMS 算法,通过自动调整步长提高了自适应的稳定性,且能够达到对低频噪声最大 100 dB 的降噪效果。

3.3 现阶段研究总结与不足

声屏障是常见的降噪措施之一,通过阻挡声波传播达到降噪效果,同时膨胀珍珠岩、超细玻璃纤维、泡沫水泥、铝纤维板、微孔砖等材料具有良好的吸声性能,在铺设这些吸声构造后,混响时间可减少约 64%~84%,预估降噪量在 4.7~8.5 dB 之间。

当前的降噪技术分为被动和主动两种方法。被动降噪技术,例如在路面或隧道壁上使用吸声材料或声屏障,虽然能在一定程度上减少噪声,但在降低高频噪声方面效果并不理想。另一方面,主动降噪技术,它利用声波的干涉原理,虽然具有创新性,但目前

仍处于研发阶段。在实际应用中,它面临诸多挑战,包括声源定位不精确、控制策略复杂以及实时响应的难度。此外,降噪材料的性能可能会因环境因素,如湿度、温度和车辆摩擦等,而逐渐下降。因此,研究这些材料在不同环境因素影响下的退化规律,对于推动降噪技术的进步至关重要。尽管主动降噪技术在实验室环境中显示出了良好的降噪效果,但在实际应用中仍需提高技术的成熟度和稳定性。同时,由于研发和生产成本较高,主动降噪设备尚未在公路隧道等场景中得到广泛应用。

4 下一代隧道降噪技术

基于公路隧道噪声分布规律,国内外学者在噪声控制方法上取得了一定成果,并通过理论分析、数值模拟、模型试验验证了降噪方法的可行性。结合当前学科交叉、大数据与智慧运维技术^[81-82],认为未来隧道降噪技术的发展方向包括以下几个方面:

1) 公路隧道内噪声来源差异性较强,针对隧道内壁、路面研发新型吸声材料,以期隧道内壁在吸收噪声的前提下达到防火、易清洁、耐腐蚀等复合功效;研发抗滑、防眩目、强度高、吸声系数高等多功能于一体的路面吸声材料。

2) 结合其他领域降噪技术,例如汽车、室内、耳机降噪等领域,借鉴其主动降噪原理及方法,研发适用于公路隧道内噪声环境的主动噪声控制系统或方法。

3) 将主动降噪与大数据和 AI 技术相融合,形成感知系统(监测系统)-远程传输-分析/决策-发生源(发射干涉声源)的逻辑,再通过大数据和机器学习对系统模型进行训练从而形成基于公路隧道内噪声分布规律的智慧噪声控制系统,如图 17 所示。达到根据车辆所处位置、噪声特征,进行精准发射主动干涉声源的效果。

5 结论

本文明确了公路隧道内噪声源,从不同角度出发总结分析了公路隧道内噪声分布规律,以客观态度评价了主、被动降噪方法的优缺点。从识别到分析规律再到解决,实现了对公路隧道内噪声问题的系统阐述,得出主要结论如下:

1) 在噪声源方面,公路隧道内的主要噪声源为交通流噪声,其中包括胎噪、汽车发动机噪声以及风噪。次要噪声源则为风机噪声。在实际工程中,路面

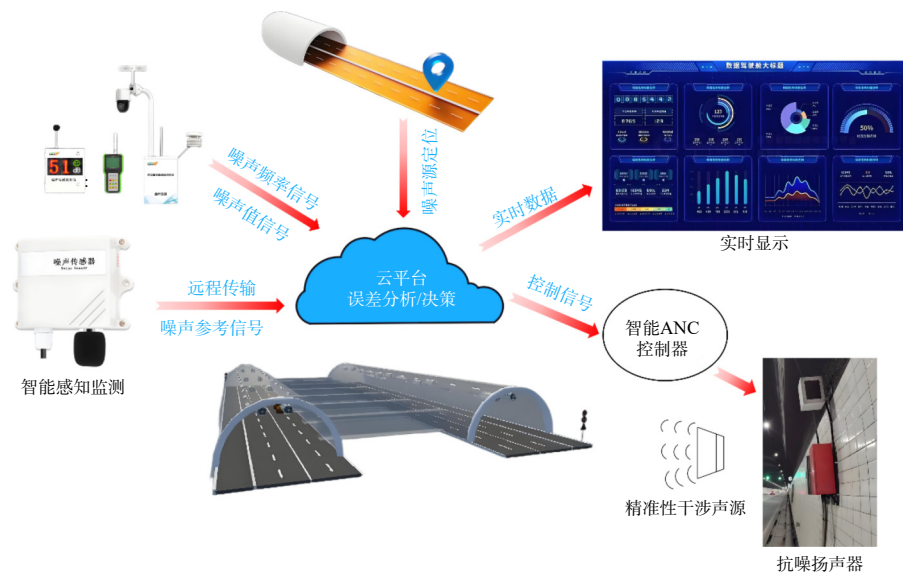


图 17 智慧噪声控制系统

Fig. 17 Intelligent noise control system

与轮胎的阻尼系数、汽车的隔声性能以及汽车的风阻系数是影响噪声水平的关键因素,应予以充分重视。

2) 在隧道噪声特性方面,隧道内噪声的纵向传播呈现出中间高两端低的分布特点,且隧道内的噪声声压级显著高于外部环境。噪声影响范围在隧道入口和出口的 50 m 范围内较为显著。在隧道横截面上,噪声分布呈现出紊乱区和稳定区,其中“混响”和“声聚焦”现象在马蹄形隧道内尤为突出。

3) 主动降噪方法在处理公路隧道内的中低频噪声(如发动机噪声)方面表现更为出色,而被动降噪方法则对高频噪声的降噪效果更佳。尽管两种技术各有优势,但也存在一定的局限性。被动降噪技术在施工过程中可能会占用较长的时间,且在降噪处理上难以实现精准控制,可能导致吸声材料的浪费。相比之下,主动降噪技术虽然设计成本较高,但具有更强的针对性和效果。

4) 鉴于单一降噪技术难以全面满足公路隧道内噪声控制的需求,在实际工程中,应根据具体情况选择适合实际工程背景的降噪方式,或设计主被动降噪技术的组合应用方案,以实现最优的降噪效果。

通过本文,不仅为公路隧道的噪声控制提供了科学依据,也为未来的降噪技术研究和工程实践指明了方向。期待能够为提升隧道行车安全、改善行车环境以及保护驾驶员健康做出贡献。

参考文献:

[1] 杜森,张小安,王开云. 高速铁路桥梁结构噪声对沿线建

筑物室内噪声影响研究[J]. 兰州交通大学学报, 2024, 43(6): 21-30.

DU M, ZHANG X A, WANG K Y. Research on the impact of high speed railway bridge structure noise on indoor noise of buildings along the line[J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2024, 43(6): 21-30.

[2] 陈妍,杨芸翰,陶建成,等. 隧道噪声干扰下疲劳影响研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2021, 57(4): 690-694.

CHEN Y, YANG Y H, TAO J C, et al. Study on fatigue effects under tunnel noise interference[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2021, 57(4): 690-694.

[3] 丛卓红,王莎,郑南翔,等. 抗滑降噪型隧道沥青混合料设计[J]. 中国公路学报, 2012, 25(4): 36-41.

CONG Z H, WANG S, ZHENG N X, et al. Design of anti-skid and noise reducing tunnel asphalt mixture[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2012, 25(4): 36-41.

[4] 马保国,魏定邦,李相国,等. 隧道低噪音沥青路面降噪性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(7): 69-71.

MA B G, WEI D B, LI X G, et al. Research on noise reduction performance of low noise asphalt pavement in tunnels[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2010, 32(7): 69-71.

[5] 周志刚,周建雄,罗根传,等. 温拌阻燃沥青混凝土路面性能加速加载试验模拟分析[J]. 公路交通科技, 2019, 36(7): 1-9.

ZHOU Z G, ZHOU J X, LUO G C, et al. Simulation analysis of accelerated loading test for performance of warm mix flame-retardant asphalt concrete pavement[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2019, 36(7):

- 1-9.
- [6] ZHANG Z W, LUAN B, LIU X, et al. Effects of surface texture on tire-pavement noise and skid resistance in long free-way tunnels: from field investigation to technical practice[J]. *Applied Acoustics*, 2020, 160: 107120.
- [7] 徐道根. 沥青混凝土路面降噪处理措施研究[J]. *公路*, 2014, 59(7): 111-113.
- XU D G. Research on noise reduction measures for asphalt concrete pavement[J]. *Highway*, 2014, 59(7): 111-113.
- [8] 陈兴, 梁志坚, 阙秀明. 公路隧道噪声降噪案例研究[J]. *声学技术*, 2008, 27(2): 244-246.
- CHEN X, LIANG Z J, JUE X M, et al. Case study on noise reduction in highway tunnels[J]. *Technical Acoustics*, 2008, 27(2): 244-246.
- [9] 宁瑞林, 崔亚萍, 李劲, 等. 低噪音超薄罩面在长大隧道工程中的应用分析[J]. *中国公路*, 2022, 612(8): 104-106.
- NIING R L, CUI Y P, LI J, et al. Application analysis of low-noise ultra-thin cover in long tunnel engineering[J]. *China Highway*, 2022, 612(8): 104-106.
- [10] 张振华, 郭春, 郑鑫, 等. 公路隧道内噪声控制技术研究[J]. *现代隧道技术*, 2018, 55(增刊2): 1015-1019.
- ZHANG Z H, GUO C, ZHENG X, et al. Research on noise control technology in highway tunnels[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2018, 55(S2): 1015-1019.
- [11] 王明年, 翁汉民, 关宝树. 我国 3 条高速公路隧道污染状况调查[J]. *环境科学*, 1997, 18(3): 52-55, 95.
- WANG M N, WENG H M, GUAN B S. Investigation on the pollution status of three highway tunnels in China[J]. *Environmental Science*, 1997, 18(3): 52-55, 95.
- [12] 陈建勋. 公路隧道运营通风效果现场实测与分析[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2002, 22(5): 51-54.
- CHEN J X. On site measurement and analysis of ventilation effect in highway tunnel operation[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2002, 22(5): 51-54.
- [13] 田杨明, 张志刚, 邓涛, 等. 城市隧道纵向通风风机噪声分布特性实测及应用研究[J]. *现代隧道技术*, 2020, 57(3): 154-160.
- TIAN Y M, ZHANG Z G, DENG T, et al. Measurement and application research on noise distribution characteristics of longitudinal ventilation fans in urban tunnels[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2020, 57(3): 154-160.
- [14] 杨立新, 周镕义. 隧道轴流风机消声器的研制[J]. *隧道建设*, 1994, 14(1): 35-39.
- YANG L X, ZHOU R Y. Development of tunnel axial flow fan muffler[J]. *Tunnel Construction*, 1994, 14(1): 35-39.
- [15] 邢荣军, 徐湃, 蒋树屏, 等. 交通隧道远程变频通风技术研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2017, 36(4): 18-23.
- XING R J, XU P, JIANG S P, et al. Research on remote variable frequency ventilation technology for traffic tunnels[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science Edition)*, 2017, 36(4): 18-23.
- [16] 郭文勇, 黄映云, 朴甲哲. 柴油机排气噪声有源控制的试验研究[J]. *内燃机学报*, 2001, 19(1): 39-42.
- GUO W Y, HUANG Y Y, PIAO J Z. Experimental study on active control of diesel engine exhaust noise[J]. *Transactions of CSICE*, 2001, 19(1): 39-42.
- [17] 王裕, 常习政, 岳健鹏, 等. 汽车发动机振动及噪声辐射特性研究(英文)[J]. *机床与液压*, 2018, 46(6): 158-163.
- WANG Y, CHANG X Z, YUE J P, et al. Study on vibration and sound radiation characteristics of automobile engine[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2018, 46(6): 158-163.
- [18] 贾晓宏, 石广田. 地铁列车在隧道运行时引起的环境振动影响分析[J]. *兰州交通大学学报*, 2025, 44(2): 104-110.
- JIA X H, SHI G T. Analysis of environmental vibration effects caused by subway trains running in tunnels[J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2025, 44(2): 104-110.
- [19] 张翠青, 高志鹰, 韦丽珍. 基于波束形成的发动机噪声源识别试验研究[J]. *现代电子技术*, 2019, 42(13): 165-168, 172.
- ZHANG C Q, GAO Z Y, WEI L Z. Experimental study on engine noise source identification based on beamforming[J]. *Modern Electronic Technique*, 2019, 42(13): 165-168, 172.
- [20] WAYSON R L, HADDOCK J. An introduction to tire/pavement noise of asphalt pavement[J]. *Quality of Life*, 2004(13): 1-26.
- [21] 乔海滨, 黄晓明. 隧道交通噪声数值模拟及调查研究[J]. *公路交通科技*, 2009, 26(12): 154-158.
- QIAO H B, HUANG X M. Numerical simulation and investigation of tunnel traffic noise[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2009, 26(12): 154-158.
- [22] 刘武斌, 韩森, 陶志金, 等. 轮胎/路面噪声量测与分析[J]. *中外公路*, 2009, 29(4): 63-66.
- LIU R B, HAN S, TAO Z J, et al. Measurement and analysis of tire/road noise[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2009, 29(4): 63-66.
- [23] 肖旺新, 魏显威, 王彦琴. 基于胎/路纹理耦合的交通噪声控制新方法[J]. *中外公路*, 2010, 30(1): 12-17.
- XIAO W X, WEI X W, WANG Y Q. A new method for traffic noise control based on tire/road texture coupling[J]. *Jour-*

- nal of China & Foreign Highway, 2010, 30(1): 12-17.
- [24] 蔡旭, 王端宜. 轮胎/路面噪音室内测量系统研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(增刊1): 161-165.
CAI X, WANG D Y. Research on indoor measurement system for tire/road noise[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2011, 33(S1): 161-165.
- [25] 陈理君, 姚忠杰, 肖旺新, 等. 轮胎/道路噪声耦合预测模型[J]. 轮胎工业, 2008, 28(1): 20-23.
CHEN L J, YAO Z J, XIAO W X, et al. Tire/road noise coupling prediction model[J]. Tire Industry, 2008, 28(1): 20-23.
- [26] 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.
YUAN M M, LI M L, LIU X F. A method for estimating the noise reduction effect of low-noise road surfaces based on the close range method (CPX) improvement[J]. China Environmental Science, 2021, 41(12): 5943-5952.
- [27] BUCHHEIM R, DOBRZYNSKI W, MANKAU H. Vehicle interior noise related to external aerodynamics[J]. International Journal of Vehicle Design, 1982, 3(4): 398-410.
- [28] 王毅刚, 杨超, 杨志刚, 等. 汽车外表面气动噪声特性分析[J]. 声学技术, 2014, 33(1): 50-55.
WANG Y G, YANG C, YANG Z G, et al. Analysis of aerodynamic noise characteristics on the exterior of automobiles[J]. Technical Acoustics, 2014, 33(1): 50-55.
- [29] HU X J, GUO P, WANG J Y, et al. Calculation of external vehicle aerodynamic noise based on LES subgrid model[J]. Journal of Energies, 2020, 13(7): 1822-1838.
- [30] 马瑶, 滕万秀, 余以正, 等. 400 km/h 动车组隧道交会压力波与气动特性仿真分析[J]. 兰州交通大学学报, 2025, 44(1): 121-128, 136.
MA Y, TENG W X, YU Y Z, et al. Simulation analysis of pressure waves and aerodynamic characteristics at the intersection of 400 km/h high-speed train tunnels[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2025, 44(1): 121-128, 136.
- [31] 刘英杰, 鲁文波, 王幸, 等. 基于CFD/FEM的汽车车内气动噪声分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021, 44(6): 725-730.
LIU Y J, LU W B, WANG X, et al. Analysis of aerodynamic noise in automotive interior based on CFD/FEM[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 44(6): 725-730.
- [32] ZHONG L Y, LI Q L, WANG Y G, et al. Aerodynamic noise prediction of passenger vehicle with hybrid detached eddy simulation/acoustic perturbation equation method[J]. Journal of Automobile Engineering, 2019, 233(10): 2390-2404.
- [33] 朱文, 马非, 何川, 等. 高速公路隧道内噪音特性研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2008, 27(6): 1042-1045.
ZHU W, MA F, HE C, et al. Research on noise characteristics in highway tunnels[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2008, 27(6): 1042-1045.
- [34] 罗威力, 蔡铭, 刘济科. 矩形截面隧道交通噪声计算机仿真[J]. 振动与冲击, 2012, 31(8): 33-37, 46.
LUO W L, CAI M, LIU J K. Computer simulation of traffic noise in rectangular cross-section tunnels[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(8): 33-37, 46.
- [35] 陈立平, 方继伟, 干啸洪, 等. 隧道噪声传播扩散规律及其检测方案探讨[J]. 隧道建设, 2016, 36(12): 1442-1448.
CHEN L P, FANG J W, GAN X H, et al. Discussion on the propagation and diffusion law of tunnel noise and its detection scheme[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(12): 1442-1448.
- [36] 刘小明, 赵欣, 徐进. 山地城市隧道交通噪声分布特性实测[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(3): 1181-1190.
LIU X M, ZHAO X, XU J. Measurement of distribution characteristics of traffic noise in mountain city tunnels[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(3): 1181-1190.
- [37] 王美燕, 盛美萍, 刘彦森. 一种通用的公路隧道洞口噪声预报模式[J]. 机械设计与制造, 2007(2): 142-143.
WANG M Y, SHENG M P, LIU Y S. A universal noise prediction model for highway tunnel entrances[J]. Machinery Design & Manufacture, 2007(2): 142-143.
- [38] 张雪峰, 魏庆朝, 赵泽鹏, 等. 高速公路隧道内噪声声场分布特性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2014, 34(6): 131-138.
ZHANG X F, WEI Q C, ZHAO Z P, et al. Distribution characteristics of noise field in highway tunnels[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2014, 34(6): 131-138.
- [39] 张忠宇, 马波, 郭映飞, 等. 城市低等级公路隧道声学改造探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(增刊1): 493-496.
ZHANG Z Y, MA B, GUO Y F, et al. Discussion on acoustic renovation of urban low level highway tunnels[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(S1): 493-496.
- [40] 田琪. 固定点声源作用下高速公路隧道内噪声声场分布特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
TIAN Q. Research on the distribution characteristics of noise

- field in highway tunnels under the action of fixed point sound sources[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [41] LIN Z Q, GONG W P, WAN L, et al. Field measurements for traffic noise reduction in highway tunnels using closed-cell aluminum foam board[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(2): 538-556.
- [42] 张锐, 黄晓明, 赵永利, 等. 隧道噪声的调查与分析[J]. *公路交通科技*, 2006, 23(10): 29-32, 40.
- ZHANG R, HUANG X M, ZHAO Y L, et al. Investigation and analysis of tunnel noise[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2006, 23(10): 29-32, 40.
- [43] 王卫东, 梁志坚, 阙秀明, 等. 以吸声构造提升隧道内声学系统语言清晰度[J]. *新型建筑材料*, 2008, 35(9): 77-80.
- WANG W D, LIANG Z J, QUE X M, et al. Enhancing the language clarity of the acoustic system inside the tunnel through sound absorption construction[J]. *New Building Materials*, 2008, 35(9): 77-80.
- [44] 王永东, 刘洋, 赵海平, 等. 利用膨胀珍珠岩吸声的公路隧道局部降噪研究[J]. *人民长江*, 2021, 52(5): 167-173, 179.
- WANG Y D, LIU Y, ZHAO H P, et al. Research on local noise reduction in highway tunnels using expanded perlite for sound absorption[J]. *Yangtze River*, 2021, 52(5): 167-173, 179.
- [45] LAM P M, LI K M. A coherent model for predicting noise reduction in long enclosures with impedance discontinuities[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 299(3): 559-574.
- [46] 史小丽, 王选仓. 公路隧道内降噪优化设计[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2010, 40(2): 420-424.
- SHI X L, WANG X C. Optimization design of noise reduction in highway tunnels[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2010, 40(2): 420-424.
- [47] LAW M K, LI K M, LEUNG C W. Noise reduction in tunnels by hard rough surfaces[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2008, 124(2): 961-972.
- [48] KANG J. The unsuitability of the classic room acoustical theory in long enclosures[J]. *Architectural Science Review*, 2011, 39(2): 89-94.
- [49] 周亚丽, 张奇志. 有源噪声与振动控制——原理, 算法及实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- ZHOU Y L, ZHANG Q Z. Active noise and vibration control - principles, algorithms, and implementation[M]. Beijing: Tsinghua university press, 2014.
- [50] 韩森, 董雨明, 陈海峰, 等. 露石水泥混凝土路面降噪特性[J]. *交通运输工程学报*, 2005, 5(2): 32-34.
- HAN S, DONG Y M, CHEN H F, et al. Noise reduction characteristics of exposed stone cement concrete pavement[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2005, 5(2): 32-34.
- [51] 宋永朝, 付波飞, 梁乃兴. 露石水泥混凝土路面表面功能综合评价研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2015, 34(6): 43-47.
- SONG Y C, FU B F, LIANG N X. Comprehensive evaluation of surface function of exposed stone cement concrete pavement[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition)*, 2015, 34(6): 43-47.
- [52] 宋永朝, 梁乃兴. 低噪音高抗滑露石水泥砼路面技术[J]. *重庆交通学院学报*, 2007, 27(3): 58-61.
- SONG Y C, LIANG N X. Low noise and high anti slip exposed stone cement concrete pavement technology[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University*, 2007, 27(3): 58-61.
- [53] 金少春, 高培伟, 李小燕, 等. 新型低噪声水泥混凝土路面研究与探讨[J]. *华东公路*, 2007(4): 36-38.
- JIN S C, GAO P W, LI X Y, et al. Research and discussion on new low noise cement concrete pavement[J]. *East China Highway*, 2007(4): 36-38.
- [54] 杨小龙, 李波, 张正伟. 基于随车声强法的水泥混凝土路面噪声特征[J]. *公路*, 2015, 60(5): 219-222.
- YANG X L, LI B, ZHANG Z W. Noise characteristics of cement concrete pavement based on on-board sound intensity method[J]. *Highway*, 2015, 60(5): 219-222.
- [55] 王岚, 唐宝利, 邢永明. 大孔隙胶粉改性沥青混合料吸声特性试验研究[J]. *工程力学*, 2009, 26(增刊1): 181-184.
- WANG L, TANG B L, XING Y M. Experimental study on sound absorption characteristics of large pore rubber powder modified asphalt mixture[J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(S1): 181-184.
- [56] 王云鹏, 韦大川, 李世武, 等. 橡胶粉改性沥青降噪机理及试验研究[J]. *公路交通科技*, 2008, 25(12): 201-206.
- WANG Y P, WEI D C, LI S W, et al. Noise reduction mechanism and experimental study of rubber powder modified asphalt[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2008, 25(12): 201-206.
- [57] 胡力群, 张靖, 杨凤雷. 具有降解NO功能的多孔水泥混凝土路面材料研究[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2015, 40(1): 99-105.
- HU L Q, ZHANG J, YANG F L. Research on porous cement concrete pavement materials with NO degradation function[J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*,

- 2015, 40(1): 99-105.
- [58] 林正清. 欧洲国家采用透水沥青材料铺路的经验[J]. 中外公路, 1992, 12(1): 46-48.
LIN Z Q. Experience of european countries in using permeable asphalt materials for paving roads[J]. Journal of China & Foreign Highway, 1992, 12(1): 46-48.
- [59] 张玉芬, 王波. 低噪声路面材料构造吸声性能试验研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1996, 16(3): 4-7.
ZHANG Y F, WANG B. Experimental study on sound absorption performance of low-noise pavement material construction[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1996, 16(3): 4-7.
- [60] 徐秋新, 刘岩, 王勇, 等. 改性沥青对多孔性沥青混合料性能影响的研究[J]. 噪声与振动控制, 2010, 30(4): 61-63.
XU Q X, LIU Y, WANG Y, et al. Study on the effect of modified asphalt on the performance of porous asphalt mixtures[J]. Noise and Vibration Control, 2010, 30(4): 61-63.
- [61] 王波, 霍亮, 高建明. 多孔混凝土铺装吸声性能试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2004, 30(4): 85-86, 89.
WANG B, HUO L, GAO J M. Experimental study on sound absorption performance of porous concrete pavement[J]. Sichuan Building Science, 2004, 30(4): 85-86, 89.
- [62] PENG B, HAN S, HAN X, et al. Laboratory and field evaluation of noise characteristics of porous asphalt pavement[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2022, 23(10): 3357-3370.
- [63] 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.
YUE X K, SUO Z, ZHAO Y, et al. Research and analysis on noise reduction effect and road performance of large pore rubber asphalt pavement[J]. Highway, 2018, 63(5): 12-16.
- [64] 董旭峰, 葛剑敏, 王佐民. 密实型低噪声沥青路面振动特性试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(8): 1031-1034.
DONG X F, GE J M, WANG Z M. Experimental study on vibration characteristics of dense low noise asphalt pavement[J]. Journal of Tongji University(Natural Science Edition), 2006, 34(8): 1031-1034.
- [65] 荆禄波, 田波, 刘英, 等. 多孔水泥混凝土路面降噪性能研究[J]. 公路, 2010, 55(7): 75-79.
JING L B, TIAN B, LIU Y, et al. Research on noise reduction performance of porous cement concrete pavement[J]. Highway, 2010, 55(7): 75-79.
- [66] 马大猷. 室内断续噪声的有源控制[J]. 声学学报, 1995, 20(2): 106-114.
MA D Y. Active control of indoor intermittent noise[J]. Acta Acustica, 1995, 20(2): 106-114.
- [67] 沈甦, 韩秀苓. 有源噪声控制技术分析[J]. 电声技术, 1994, 18(7): 7-13.
SHEN S, HAN X L. Analysis of active noise control technology[J]. Audio Engineering, 1994, 18(7): 7-13.
- [68] 刘会灯, 邱阿瑞. 管道噪声有源控制系统的次级声源和误差传感器位置优化[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011, 51(3): 382-389.
LIU H D, QIU A R. Optimization of secondary sound source and error sensor positions for active control system of pipeline noise[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2011, 51(3): 382-389.
- [69] 邹海山, 邱小军. 复杂声学环境中人耳附近空间有源降噪研究综述[J]. 物理学报, 2019, 68(5): 7-18.
ZHOU H S, QIU X J. A review of active noise reduction research in the vicinity of the human ear in complex acoustic environments[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(5): 7-18.
- [70] 张立军, 宁友博, 孟德建, 等. 车内道路噪声有源控制的虚拟参考信号分组构建方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 712-720.
ZHANG L J, NING Y B, MENG D J, et al. Virtual reference signal grouping construction method for active control of road noise inside vehicles[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2021, 49(5): 712-720.
- [71] 乔建刚, 孔伟伟, 宋志旭. 基于废旧胶粉沥青混凝土路面降噪效果分析[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(4): 219-225.
QIAO J G, KONG W W, SONG Z X. Analysis of noise reduction effect of asphalt concrete pavement based on waste rubber powder[J]. Noise and Vibration Control, 2022, 42(4): 219-225.
- [72] 孙俊锋, 张海涛, 于腾江, 等. 多孔沥青混合料降噪的微观模拟与宏观试验[J]. 林业工程学报, 2021, 6(6): 165-171.
SUN J F, ZHANG H T, YU T J, et al. Microscopic simulation and macroscopic experiment of noise reduction in porous asphalt mixture[J]. Journal of Forestry Engineering, 2021, 6(6): 165-171.
- [73] 邵军, 张自力, 沙家正. 有源声屏障降噪中的几个基本问题[J]. 南京大学学报(自然科学), 1996, 32(4): 154-159.
SHAO J, ZHANG Z L, SHA J Z. Several basic issues in active sound barrier noise reduction[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 1996, 32(4): 154-159.

- [74] 王国领, 许国贤, 连小珉, 等. 车内有源噪声控制的研究[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 1996, 36(4): 23-26.
WANG G L, XU G X, LIAN X M, et al. Research on active noise control in vehicles[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 1996, 36(4): 23-26.
- [75] 臧传臻, 魏庆朝. 有源声屏障对地铁轮轨噪声的消减性能[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2022, 54(3): 114-121.
ZANG C Z, WEI Q C. The reduction performance of active sound barriers on subway wheel rail noise[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, 54(3): 114-121.
- [76] 罗平展, 张芳杰, 徐健, 等. 管道有源噪声控制中壁面分布次级声源的空间分布优化[J]. *应用声学*, 2022, 41(5): 776-784.
LUO P Z, ZHANG F J, XU J, et al. Optimization of spatial distribution of secondary sound sources on the wall surface in active noise control of pipelines[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2022, 41(5): 776-784.
- [77] 魏庆朝, 张雪峰, 臧传臻, 等. 公路隧道内主动降噪声源布置位置仿真模拟[J]. *北京交通大学学报*, 2017, 41(4): 17-22.
WEI Q C, ZHANG X F, ZANG C Z, et al. Simulation of the placement of active noise reduction sound sources in highway tunnels[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2017, 41(4): 17-22.
- [78] 魏庆朝, 张雪峰, 臧传臻, 等. 公路隧道内主动降噪声场研究[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(1): 77-82.
WEI Q C, ZHANG X F, ZANG C Z, et al. Research on active noise reduction sound field in highway tunnels[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(1): 77-82.
- [79] 吴礼福, 胡秋岑, 陈晶晶. 自校正滤波有源噪声控制算法[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2022, 58(2): 364-368.
WU L F, HU Q Y, CHEN J J. Self correcting filtering active noise control algorithm[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2022, 58(2): 364-368.
- [80] JIANG T, LIU J, PENG C, et al. Laboratory test of a vehicle active noise-control system based on an adaptive step size algorithm[J]. *Applied Sciences*, 2022, 13(1): 225-225.
- [81] 于秋波, 魏秋实, 冯培, 等. 城市轨道交通智慧运维研究现状及展望[J]. *兰州交通大学学报*, 2025, 44(2): 53-58.
YU Q B, WEI Q S, FENG P, et al. Current status and prospects of intelligent operation and maintenance research on urban rail transit[J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2025, 44(2): 53-58.
- [82] 李小静, 张金伟, 李子文. 城市交通承载力系统动力学评估及多情景预测[J]. *兰州交通大学学报*, 2024, 43(4): 17-27.
LI X J, ZHANG J W, LI Z W. Dynamic evaluation of urban transportation carrying capacity system and multi scenario prediction[J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2024, 43(4): 17-27.

(责任编辑: 马廷麟)