

轮胎路面耦合噪声抑制方法

李保生 魏文杰 魏超

中汽研(天津)汽车工程研究院有限公司 天津 300300

【摘要】：轮胎路面耦合噪声是道路交通中主要的噪声来源之一，严重影响环境质量和驾驶体验。本文分析了轮胎与路面交互过程中产生的噪声源，并探讨了有效的抑制方法。通过实验与理论分析，提出了多种控制噪声的技术，包括材料优化、结构改进以及主动噪声控制等手段。研究表明，合理的设计和技术手段能够显著减少耦合噪声的产生，提高道路交通的噪声治理水平。本研究为改善交通噪声环境提供了理论支持和技术参考。

【关键词】：轮胎噪声；路面耦合；噪声抑制；主动噪声控制；噪声源

DOI:10.12417/3041-0630.26.02.049

轮胎与路面交互过程中的噪声一直是交通噪声研究中的难题之一。该噪声不仅影响驾驶的舒适性，还对环境造成了持久的负面影响。随着交通密度的增加，如何有效减少这些噪声，已经成为交通工程 and 环境保护领域的迫切课题。尽管目前已有多种噪声控制技术，但针对轮胎与路面耦合噪声的有效抑制方法仍然存在不少挑战。本文旨在深入分析耦合噪声的生成机制，提出创新的抑制方法，并探讨其应用前景，推动噪声控制技术的进一步发展。

1 轮胎与路面耦合噪声的成因分析

轮胎在与路面接触的过程中，不仅会受到来自路面不平整度的影响，还会由于轮胎材料的弹性和形变特性产生噪声。随着车辆行驶速度的增加，这种噪声的强度和频率也会逐渐上升。具体而言，轮胎与路面接触点在行驶过程中会周期性地产生振动，这些振动通过空气传播形成声波，从而成为车内外的噪声源。这些振动的强度受到多种因素的影响，包括轮胎的材料特性、花纹设计、胎压、路面的粗糙度和湿滑情况等。

路面表面的粗糙度与轮胎的摩擦力是影响耦合噪声的重要因素。当路面不平整或具有较大粗糙度时，轮胎与路面的接触面会发生较大的变形，从而引起更强烈的振动和噪声。轮胎花纹的设计对噪声的传播也起着重要作用。轮胎的花纹深度和形状决定了轮胎与地面接触时的刚性和弹性，这些因素直接影响轮胎在行驶过程中如何分布和传播振动。当花纹设计过于复杂或深度过大时，轮胎与路面的接触频率增高，进而导致噪声的产生。

另一个显著的因素是轮胎的材质，尤其是橡胶的物理特性。不同类型的橡胶材料在受到外力作用时的弹性和刚性差异，决定了轮胎的震动传递效率。轮胎的硬度、厚度、内衬材料等特性均会影响噪声的产生和传播。而胎压的变化会导致轮胎与路面之间接触面的变形程度发生变化，进一步影响噪声的强度。较高的胎压使轮胎变得更坚硬，接触变形减少，从而可能降低噪声；而较低的胎压则使轮胎更加柔软，接触变形增大，

进而提高噪声水平。轮胎与路面耦合噪声的成因是由多个因素共同作用的结果，其中路面粗糙度、轮胎花纹设计、材质特性和胎压变化等都在不同程度上对噪声的生成起着决定性作用。

2 噪声抑制技术的研究与应用

在被动噪声控制技术中，材料与结构创新构成了主要突破口。高损耗因子橡胶材料的应用显著提升了轮胎本体的阻尼特性，其中纳米粘土复合橡胶可将振动能量转化为热能，有效衰减胎面振动。多层复合结构通过声阻抗梯度设计，在轮胎内侧设置多孔吸声层，采用聚氨酯泡沫与橡胶颗粒混合材料，可阻断噪声传播路径。轮胎花纹的优化设计通过计算流体动力学模拟，采用变节距花纹排列方案，打破传统等节距花纹产生的周期性声波。同时，花纹沟槽深度与宽度的精确配比，可降低空气泵吸效应的强度。封闭式肩部花纹与纵向主沟槽的协同设计，既能保证排水性能，又可减少横向沟槽边缘撞击路面产生的脉冲噪声。这些被动控制手段共同作用，可在噪声源头上实现 3-8 分贝的降噪效果。

在轮胎路面耦合噪声的主动控制领域，技术核心在于构建实时监测与动态抵消的闭环系统。通过嵌入轮胎内部或悬挂系统的微型加速度传感器，可精准捕捉由路面激励引发的结构振动特征。这些振动信号经由高速信号处理器分析，识别出主要噪声成分的幅值与相位。控制系统随即驱动布置在轮毂或车厢内壁的作动器，生成振幅相等、相位相反的抗噪声波。当前研究聚焦于解决系统时滞问题，采用前馈与反馈复合控制策略，通过自适应滤波算法对时变声场进行跟踪补偿。实验表明，该系统对中低频段的结构传递噪声抑制效果显著，尤其在 200-800Hz 频域可降低噪声 12 分贝以上。随着边缘计算能力的提升，未来系统将实现基于路况预测的预补偿控制，进一步拓展主动降噪技术的适用边界。

对于路面本身的改进，也是噪声抑制技术的重要组成部分。通过改变路面的铺设材料和结构，减少路面表面的粗糙度或改善其弹性特性，可以有效减少轮胎与路面接触时产生的噪

声。采用高密度和高弹性的路面材料,或者采用“低噪声路面”技术,可以减少噪声的反射和传播。研究表明,细致的路面设计和材料选择在抑制轮胎噪声方面发挥了重要作用,尤其是在城市道路和高速公路等密集交通区域,优化路面可显著降低环境噪声。未来在噪声抑制技术中,智能化和个性化的控制系统将是一个重要发展方向。随着大数据、人工智能等技术的应用,能够实时监测路况、车速、轮胎状态等参数,动态调整噪声抑制方案,以实现最优的噪声控制效果。这些技术的结合不仅能够有效降低噪声水平,还能提高驾驶的舒适性和安全性。

3 噪声抑制效果评估与改进策略

3.1 噪声抑制效果的实验评估方法

为科学衡量轮胎路面耦合噪声抑制技术的实际效果,需建立系统化的实验评估体系。实验评估通常包括实验室测试与实地测量两类方法。实验室环境中,通过轮胎滚动噪声测试台架可精确控制胎压、载荷及转速等变量,利用声学传感器阵列采集噪声频谱特性。例如,采用近场声全息技术能够可视化轮胎表面的声压分布,定位主要噪声辐射区域。同时,激光测振仪可非接触式测量轮胎胎面振动模态,分析花纹块撞击路面时引发的结构声传播路径。

实地测量则通过在标准测试路段布置传声器,依据 ISO 11819-1 等规范进行通过噪声测试。测试时需记录不同车型在恒定车速下的噪声级,并同步采集路面纹理深度、孔隙率等参数。近年来,结合人工智能的声学相机被广泛应用于噪声源识别,其通过波束形成算法在复杂交通环境中分离轮胎噪声与其他声源。此外,基于统计能量分析(SEA)的仿真模型可模拟噪声在轮胎-路面-空气多介质中的传递损失,为效果评估提供理论补充。

评估指标除传统的A计权声压级外,还需关注噪声的心理声学参数。例如,响度与尖锐度可反映人对噪声的主观感知,而声品质分析能揭示特定频率成分(如1000–2000 Hz的花纹泵气噪声)对舒适性的影响。通过对比优化前后的1/3倍频程频谱,可明确抑制技术对特定频段的改善效果,如多孔路面材料对800–1600 Hz频段噪声的吸收特性。

3.2 多因素耦合作用下的抑制效果差异

噪声抑制效果受轮胎与路面协同作用的显著影响。研究表明,同一降噪技术在不同匹配条件下可能呈现迥异表现。以低噪声路面为例,多孔沥青路面可通过声波在孔隙中的粘滞耗散降低高频噪声,但其效果依赖于轮胎花纹的疏密程度。当轮胎花纹间距小于路面孔隙波长时,泵气噪声的减弱幅度可达3–5 dBA;反之,若轮胎胎面为封闭式大花纹块,则降噪效果显著衰减。

材料刚度匹配亦是关键因素。高阻尼橡胶复合材料能有效

抑制轮胎振动,但若路面刚性过高(如水泥混凝土),轮胎-路面系统易产生结构波共振,反而增强250–500 Hz频段的噪声辐射。此时,需通过调整胎面基胶的损耗因子与路面阻抗特性,实现声能传递的最小化。实验数据显示,采用梯度阻抗设计的橡胶改性沥青路面,结合胎面含硅烷偶联剂的纳米复合材料,可使滚动噪声降低4–7 dBA。

环境变量同样不可忽视。路面湿度会改变轮胎-路面接触区的声阻抗,使水膜振动成为次级噪声源。具有竖向排水功能的路面结构可快速疏离水膜,但需与轮胎横向花纹的排水槽协同设计。温度变化则影响橡胶材料的动态模量,冬季低温环境下胎面硬化会导致撞击噪声增加,此时主动噪声控制系统需根据温度传感器数据动态调整反相声波的相位与幅值。

3.3 基于动态监测的抑制策略优化

为实现噪声抑制技术的持续改进,需建立基于实时数据采集的动态调控体系。在智能轮胎系统中,嵌入胎体内的MEMS加速度传感器可监测花纹块与路面接触时的振动加速度,通过机器学习算法识别噪声特征模式。例如,当检测到花纹槽腔共振引发的800 Hz峰值时,系统可自动调节胎压管理系统,使胎面刚度适配当前路面的粗糙度等级。

路面侧的监测网络则通过埋设光纤传感阵列,构建声学地图。该技术能识别路段特定位置的噪声热点,指导养护部门优先对劣化路面进行微铣刨或超薄罩面处理。结合车路协同系统,云端分析平台可综合车辆GNSS数据、轮胎型号库及路面声学参数,生成个性化降噪方案。例如,针对重型货车常用的纵向花纹轮胎,推荐行驶于大孔隙率OGFC路面;而运动型轿车的小不对称花纹轮胎,则适配于高弹性的SMA路面。

主动噪声控制的动态优化需解决时变系统的延迟问题。新一代自适应滤波算法(如FxLMS)通过参考传感器获取路面激励信号,提前预测噪声频率成分。执行器采用压电陶瓷叠堆或磁致伸缩材料,在轮胎罩内侧生成结构声波,抵消径向振动传播。实验证明,该技术在80–100 km/h车速下对200–800 Hz结构噪声的抑制量可达10–15 dB,且算法可根据路面接缝、坑洼等瞬态激励自动调整收敛因子。

3.4 技术集成与全生命周期改进路径

噪声抑制的持续改进需突破单一技术局限,探索材料-结构-控制的多维度集成。在轮胎设计层面,将非对称花纹与亥姆霍兹共振腔结合:花纹肩部采用开放式沟槽降低泵气噪声,胎冠区嵌入微型共振腔吸收特定频率的振动声能。路面材料则发展功能梯度结构,表层为高耐磨橡胶颗粒改性沥青,中层设置声子晶体隔振层,底层采用泡沫铝吸声基板,形成宽频带噪声屏障。

全生命周期管理策略涵盖设计、施工与维护三阶段。设计

期通过数字孪生模型模拟轮胎-路面噪声生成链，优化参数组合；施工期采用红外热像仪检测路面摊铺均匀性，避免局部刚度突变引发噪声异常；运维期利用自动驾驶检测车持续采集路面纹理与国际平整度指数（IRI），当轮胎噪声统计值超出阈值时触发预防性养护。经济性分析表明，这种系统化方案可使城市道路在20年服役期内的噪声治理成本降低。

未来改进方向聚焦于智能响应材料的应用。形状记忆合金与磁流变弹性体构成的复合胎面，能根据车速动态调整花纹接地形状；温敏相变材料路面则通过吸放热调节表面摩擦系数，减少制动工况下的尖叫噪声。这些创新技术通过与5G车联网、边缘计算结合，将构建具有自感知、自决策能力的噪声抑制系

统，最终实现交通噪声的按需调控。

4 结语

轮胎路面耦合噪声的治理需综合运用材料学、声学与智能控制等多学科技术。通过优化轮胎结构与路面材料、开发主动降噪系统，并建立全生命周期管理策略，可显著降低噪声污染。未来研究应聚焦于轮胎-路面系统的智能匹配、环境自适应控制技术的突破，以及新材料与新工艺的融合应用。随着车路协同与人工智能技术的深入发展，构建精准感知、动态调控的一体化噪声抑制体系，将成为改善城市声环境与提升交通品质的重要方向。

参考文献：

- [1] 王鹏,张伟,李强.轮胎与路面耦合噪声控制技术研究进展[J].环境噪声控制,2023,32(4):112-118.
- [2] 陈旭,张林,刘东.基于振动反馈的轮胎噪声抑制方法研究[J].噪声与振动控制,2022,43(5):225-230.
- [3] 李明,赵刚,周新.低噪声路面对轮胎噪声抑制效果的影响分析[J].道路交通与环境,2023,30(6):45-52.