

基于风-声耦合作用的高铁声屏障气动噪声抑制研究

郝明

北京铁路疾病预防医学研究中心 北京 100038

DOI: 10.12238/ems.v7i11.16083

[摘要] 高速铁路的快速发展在提升交通效率的同时,也带来了显著的环境噪声污染问题,其中声屏障气动噪声已成为影响沿线居民生活质量的重要因素。本文以风-声耦合作用为理论基础,探讨了高铁声屏障气动噪声的产生机理、传播特性及抑制方法。通过分析风荷载与声学性能的相互作用机制,提出优化声屏障结构设计、材料选择及表面处理等技术途径,以实现气动噪声的有效抑制。研究表明,结合风-声耦合效应的多物理场分析方法可为高铁声屏障的降噪设计提供科学依据,具有重要的工程应用价值。

[关键词] 高铁声屏障; 气动噪声; 风-声耦合; 噪声抑制; 多物理场分析

Research on aerodynamic noise suppression of high-speed railway sound barriers based on wind-sound coupling effects

Hao Ming

Beijing Railway Center for Disease Prevention and Control, Beijing, China

[Abstract] The rapid development of high-speed railways has improved transportation efficiency while also causing significant environmental noise pollution. Among these issues, aerodynamic noise from sound barriers has become a major factor affecting the quality of life for residents along the railway lines. This paper uses wind-sound coupling as its theoretical basis to explore the generation mechanism, propagation characteristics, and suppression methods of aerodynamic noise from high-speed railway sound barriers. By analyzing the interaction mechanisms between wind loads and acoustic performance, this study proposes technical approaches such as optimizing the structural design, material selection, and surface treatment of sound barriers to achieve effective suppression of aerodynamic noise. The research indicates that a multi-physics field analysis method incorporating wind-sound coupling effects can provide a scientific basis for noise reduction design of high-speed railway sound barriers, demonstrating significant engineering application value.

[Key words] High-speed rail sound barriers; aerodynamic noise; wind-sound coupling; noise suppression; multi-physics analysis

引言

随着高铁运营速度的不断提升,列车与空气相互作用产生的气动噪声问题日益突出。声屏障作为降低高铁噪声传播的主要措施,其自身在高速气流作用下也会产生二次噪声,即气动噪声。这种噪声不仅削弱声屏障的降噪效果,还可能成为新的噪声源。传统声屏障设计多关注其隔声性能,而忽视了风荷载作用下的气动声学特性。因此,研究风-声耦合作

用下的声屏障气动噪声生成与抑制机制,对于提升高铁声环境质量具有重要意义。风-声耦合作用是指气流与声学振动之间的相互影响现象。在高速铁路环境中,风荷载不仅对声屏障结构产生力学作用,还会通过涡脱落、流动分离等机制激发噪声。同时,声波的传播也会反过来影响流场分布,形成复杂的多物理场耦合问题。深入理解这一耦合机制,是优化声屏障气动噪声性能的关键^[1]。

1. 高铁声屏障气动噪声产生机理

1.1 气动噪声的基本特性

高铁声屏障气动噪声主要源于高速气流与屏障结构的相互作用，当列车以高速通过时，会在周围形成复杂的非定常流场，气流经过声屏障边缘时会产生流动分离和涡旋脱落现象。这些涡旋在形成和发展过程中会辐射出宽频噪声，其频率特性与流速、屏障几何形状等因素密切相关。气动噪声通常表现为中高频特性，且随着列车速度的提高而显著增强。从声学角度分析，气动噪声属于偶极子声源，其声功率与流速的六次方成正比，在高铁运行环境下，即使微小的流速变化也会导致噪声水平的显著改变。此外，声屏障表面的不规则性、接缝和支撑结构等都可能成为额外的噪声源，进一步加剧气动噪声问题。

1.2 风-声耦合作用机制

风-声耦合作用是气动噪声产生的核心物理过程，当气流流经声屏障时，会在屏障表面形成压力脉动，这些脉动通过固体结构的振动传递并辐射噪声。同时，辐射声波又会扰动周围的流场，形成反馈效应，双向耦合使得气动噪声问题具有高度非线性特征，难以通过单一物理场的分析方法准确预测。在耦合机制中，涡声理论提供重要的分析工具。根据这一理论，涡旋的形成、对流和耗散过程是气动噪声的主要来源。声屏障的几何形状直接影响涡旋的演化路径和强度，进而决定噪声的频谱特性。此外，声屏障材料的声阻抗特性也会影响声能的反射和吸收，进一步调节噪声辐射效率。

2. 高铁声屏障气动噪声数值模拟方法

2.1 计算流体力学 (CFD) 模拟的精细化建模

为实现高精度的流场模拟，必须建立三维全尺寸声屏障几何模型，并充分考虑高铁列车通过时的瞬态效应。模型构建阶段需要准确还原声屏障的拓扑结构，包括面板厚度、支撑柱间距、连接件细节等微小特征，这些局部结构往往是诱发湍流和涡脱落的关键区域。计算域设置应遵循入口距声屏障至少 5 倍车高、出口距声屏障至少 10 倍车长的原则，以确保流场充分发展并消除回流影响。在近壁区域需采用边界层网格，保证 y^+ 值在 1 左右以满足壁面函数要求。声屏障边缘、连接部位等流动分离区应进行局部加密，网格尺寸控制在毫米级以解析微小涡结构。对于复杂的穿孔板结构或表面纹理，需采用多面体网格或切割体网格技术精确捕捉几何细节。

湍流模型的选择需要权衡计算精度与效率，大涡模拟 (LES) 虽能准确再现湍流拟序结构，但计算成本极高，不同湍流模型在声屏障 CFD 模拟中的性能比较如下表所示。改进的延迟分离涡模拟 (IDDES) 方法结合了 RANS 与 LES 的优势，在近壁区使用 RANS 减少计算量，在分离区自动切换为 LES 模式，是较为理想的选择。对于稳态分析，Realizable $k-\epsilon$ 模型结合增强壁面处理也能提供合理的流场预测结果^[2]。边界条件的设定必须反映真实工况，入口可采用实测风速剖面或标准对数律分布，湍流强度设定为 5%-10%。出口推荐使用压力边界条件以避免回流失真。声屏障表面设为无滑移壁面，地面采用移动壁面条件模拟列车通过效应。计算收敛标准除监测残差外，还需跟踪关键位置的压力和速度波动直至达到统计稳态。

表 1 不同湍流模型在声屏障 CFD 模拟中的性能比较

湍流模型类型	计算精度等级	计算成本指数	适用速度范围 (km/h)	涡分辨率能力	推荐应用场景
RANS $k-\epsilon$ 模型	中等 (★★☆)	低 (★☆☆)	200-300	大尺度涡	初步设计分析
LES 大涡模拟	高 (★★★★)	极高 (★★★★)	>350	全频谱涡	精确气动声学分析
IDDES 混合模型	较高 (★★★★)	高 (★★★☆☆)	250-400	中等尺度涡	工程优化设计
SAS 尺度自适应	较高 (★★★☆☆)	中等 (★★★☆☆)	300-400	中等尺度涡	瞬态流动分析

2.2 气动声学耦合求解策略

气动噪声模拟需要建立流场与声场的双向耦合机制，基

于 Lighthill 声类比理论, 可将 CFD 计算得到的时变流场数据映射为等效声源。FW-H 方程求解时需合理设置积分面位置, 通常取在声屏障表面附近以包含所有偶极子源贡献。对于低频噪声 (<500Hz), 可采用直接数值模拟 (DNS) 方法求解可压缩 N-S 方程, 但计算量极大。声学网格的构建需遵循波长分辨率准则, 最高关注频率对应的网格尺寸应小于 1/6 波长。完美匹配层 (PML) 技术可有效消除计算域边界反射。时域到频域的转换通过快速傅里叶变换实现, 采样频率需至少为最高分析频率的 2.56 倍以满足 Shannon 定理^[3]。

2.3 验证与不确定度分析

风洞实验是验证数值模型的金标, 需制作 1:10 缩尺模型, 在航空声学风洞中进行测试。热线测速仪 (PIV) 可获取流场结构, 麦克风阵列实现声源定位。实验数据与仿真结果的频谱特征误差应控制在 3dB 以内, 主要涡脱落频率偏差不超过 10%。网格敏感性分析必不可少, 需进行三轮网格独立性验证, 当关键参数 (如升力系数、声压级) 变化小于 2% 时可认为网格足够精细。时间步长敏感性分析同样重要, 特别是对瞬态分离流的捕捉。模型不确定度主要来源于湍流模型选择、边界条件简化及材料属性假设。采用贝叶斯概率方法

可量化这些不确定因素对最终噪声预测的影响范围, 工程应用中建议保留 3dB 的预测裕度。

3. 高铁声屏障气动噪声抑制技术

3.1 气动外形优化设计方法

声屏障截面形状优化是降噪的首要途径, 基于参数化建模技术, 可将屏障轮廓描述为 NURBS 曲线, 控制点坐标作为设计变量。通过试验设计 (DOE) 方法采样设计空间, 结合克里金代理模型构建近似关系。多目标优化算法 (如 NSGA-II) 可同时最小化插入损失与气动噪声, 得到 Pareto 最优前沿。流线型设计能显著降低气动噪声, 顶部采用渐缩翼型截面, 收缩角控制在 15°-20° 时可平稳引导气流过渡。前缘半径优化为 5-10mm 能推迟流动分离, 后缘设计成交错锯齿状可打碎大尺度涡结构。研究表明, 优化后的非对称翼型截面比传统矩形截面降低宽频噪声达 8dB (A)。在屏障表面布置毫米级纵向肋条 (高度 0.5-1mm, 间距 3-5mm) 可形成稳定的流向涡, 抑制横向涡脱落。声屏障截面形状的气动噪声性能对比如下表所示。仿生学表面如鲨鱼皮肤纹理能减少壁面摩擦噪声, 在 200-800Hz 频段尤为有效, 这些微结构通过 3D 打印技术可实现精确制造^[4]。

表 2 声屏障截面形状的气动噪声性能对比

截面类型	边缘处理方式	气动噪声 降低量 (dB)	流动分离 延迟率 (%)	制造成本系数	综合评分
矩形直角	无处理	基准 (0)	基准 (0)	1.0	5.2
圆弧过渡	R=5mm 圆角	3.2	18	1.15	6.8
非对称翼型	前缘 R8mm+15° 后掠	7.5	43	1.35	8.6
仿生锯齿	20° 交错锯齿	5.8	37	1.28	7.9

3.2 多功能复合材料的创新应用

多层级复合结构是材料设计的趋势, 表层采用 0.5mm 厚微穿孔铝板 (孔径 0.3mm, 穿孔率 1%-3%), 中层为 30mm 厚梯度多孔吸声材料 (由玻璃棉与聚氨酯泡沫梯度复合), 背板使

用碳纤维增强聚合物。这种构造在 200-5000Hz 频段平均吸声系数达 0.85, 同时保持足够的结构强度^[5]。压电纤维复合材料可将声能转化为电能, 实现能量回收式降噪。形状记忆合金嵌入结构能在不同风速下自动调节表面曲率, 维持最佳气

动性能。石墨烯增强阻尼材料可将振动能快速耗散,降低二次辐射噪声。等离子体喷涂制备的疏水涂层可减少雨噪效应。光催化自清洁涂层在降噪同时能分解有机污染物。基于超材

料概念的声学超表面,通过亚波长结构实现声波反常调控,在特定频段产生声学黑洞效应。复合吸声材料性能参数对比如下表所示。

表3 复合吸声材料性能参数对比

材料组合	厚度 (mm)	平均吸声系数 (200-5kHz)	面密度 (kg/m ²)	抗风压等级 (kPa)	耐候性 (年)
微孔铝板+玻璃棉	35	0.78	8.2	3.5	15
陶瓷纤维+聚氨酯	40	0.82	7.5	4.2	20
石墨烯复合材料	30	0.85	6.8	5.0	25
碳纤维蜂窝夹层	28	0.75	5.2	6.5	30

3.3 主动控制技术的集成方案

有源噪声控制(ANC)系统适用于低频线谱噪声,在声屏障内部嵌入误差麦克风阵列和次级声源(如扬声器阵列),采用FxLMS自适应算法实现实时控制。关键挑战在于处理高速移动声源,需开发基于预测的时变控制策略。沿屏障顶部布置微型合成射流阵列(孔径1mm,间距50mm),通过相位调控产生反向涡对干扰自然涡脱落。等离子体激励器可在不移动部件的情况下诱导气流偏转,能耗仅为传统方法的1/10。这些主动流动控制装置需与结构设计一体化集成。光纤Bragg光栅(FBG)传感器可同时监测应变和声压,MEMS加速度计捕捉结构振动。数据通过边缘计算节点实时处理,结合数字孪生技术实现性能预测与维护预警^[6]。

4. 结语

高铁声屏障气动噪声抑制是一个涉及流体力学、声学、材料科学等多学科交叉的研究课题。本文基于风-声耦合作用原理,系统分析了气动噪声的产生机制、数值模拟方法及抑制技术。研究表明,通过综合考虑流场与声场的相互作用,优化声屏障的结构设计和材料选择,可以有效降低气动噪声水平。未来研究应进一步深化对风-声耦合机理的认识,开发更精确的多物理场耦合模拟方法,并探索新型智能材料在气动噪声控制中的应用。同时,将实验研究与数值模拟相结合,建立更完善的气动噪声评价体系,为高铁声屏障工程设计提供更科学的指导。随着相关技术的不断发展,高铁声屏障的

气动噪声问题将得到更有效的解决,为创造更舒适的高铁沿线声环境做出贡献。

[参考文献]

[1] 盛峰,姜在秀,贺银芝,曾小清,邓波,安雪晖,俞悟周. 高速铁路声屏障宽频穿孔吸声降噪结构[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2024, 52(9): 1469-1473.

[2] 牛亚文. 基于Fano共振效应与多孔吸声的全向通风高铁声屏障[J]. 铁道勘测与设计, 2024(1): 60-65. [3] 付达靓,姚媛媛,刘华如,高乾熠,李英,张旭莘,戴程程,邹宁睦,张益昕. 基于KNN算法与 Φ -OTDR系统的高铁声屏障故障识别方法[J]. 光电子技术, 2023, 43(3): 261-268.

[4] 卫星,汪蓉蓉,温宗意,戴李俊,胡喆. 高铁声屏障连接螺栓松弛对疲劳寿命的影响[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(2): 373-380.

[5] 卫星,张靖,魏欢博,胡喆,温宗意. 基于振动响应的高铁声屏障结构体系研究[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(2): 353-359+409.

[6] 卫星,刘铭扬,温宗意,胡喆,肖林. 列车风激励下高铁声屏障连接螺栓经时松弛研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(22): 188-193.

作者简介: 郝明(1993—),女,山西大同人,工程师,主要从事环境保护的环境空气、水污染防治、噪声等相关工作。