

交通噪声渗流力学相关研究进展

李轶然, 冉德钦*

山东省交通科学研究院, 山东 济南

收稿日期: 2022年9月25日; 录用日期: 2022年10月25日; 发布日期: 2022年11月3日

摘要

公路的建设和运营不可避免地要改变周围地形和生态环境, 其中噪声是诸多生态环境因子之一。噪声对沿线人群和环境的影响严重。渗流力学分析思想是对交通噪声进行控制和优化的一种有效手段。本文回顾了近年来交通噪声渗流力学相关研究进展, 可为交通规划、城市建设、政府决策等方面提供理论依据。

关键词

交通噪声, 渗流力学, 研究进展

Research Progress on Seepage Mechanics of Traffic Noise

Yiran Li, Deqin Ran*

Shandong Transportation Institute, Jinan Shandong

Received: Sep. 25th, 2022; accepted: Oct. 25th, 2022; published: Nov. 3rd, 2022

Abstract

The construction and operation of highways will inevitably change the surrounding terrain and ecological environment, in which noise is one of many ecological environmental factors. The noise has a serious impact on the population and environment along the line. The idea of seepage mechanics analysis is an effective means to control and optimize traffic noise. This paper reviews the research progress of traffic noise seepage mechanics in recent years, which can provide a theoretical basis for traffic planning, urban construction, government decision-making and so on.

*通讯作者。

Keywords

Traffic Noise, Seepage Mechanics, Research Progress

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

公路是专供汽车分向、分车道行驶并全部控制出入的多车道公路, 建设规模大、投资多。现代公路除了快速、安全、舒适的高标准外, 还要求公路具有美化环境的作用, 使之与周围环境相协调[1]。但公路的建设和运营不可避免地要改变周围地形和生态环境, 其中噪声是诸多生态环境因子之一。通过建立交通流的流体力学模型的动态分析, 进行交通噪声分析旨在为城市区域环境综合治理、城市规划与建设、政府决策提供理论依据[2]。空气无处不在, 汽车与空气接触, 会产生复杂的空气动力学问题, 包括空气阻力, 气动噪声等。这些都会对汽车的运行产生很大问题, 影响运行的安全稳定与舒适性。随着工业社会的发展, 噪声问题逐步显现, 人们对此也越来越关注, 而气动噪声就是其中一个大方向。汽车在快速行进过程中空气流与汽车会发生相互作用, 汽车表面附近的空气不停受到压缩与膨胀的作用, 再加上汽车表面本身复杂的形状, 使得气流与车身之间产生相互作用, 同时气流在车身表面附近处于比较剧烈的流动状态, 生成复杂的气流流场, 最终诱发出噪声。气动噪声的产生跟空气气流有关, 主要涉及流体力学和声学两个专业领域, 属于这两个领域相结合的一门学科[3]。气动噪声一直是一个重大的课题方向, 长久以来围绕气动噪声的问题, 很多学者都做了不少相关研究。对于气动噪声问题的分析研究主要包含到以下几类方法: 理论研究、试验方法和数值模拟方法。经过广大学者的不懈努力, 目前已经建立了相对完整的气动噪声理论体系。千百年来许多经典力学学科已经历了漫长的发展历史, 其中就包括流体力学。1952年流体力学大师莱特希尔首次将空气动力学与声学二者结合起来, 他直接从流体方程出发推导出描述流体运动与声波关系的方程也就是 Lighthill 方程, 该方程是气动声学的根本方程, 建立了流场中的参数如流体速度压力等与声波之间的联系, 从此建立了一门新的科学分支即气动声学[4]。

在气动声学理论和数值计算理论不断完善的基础上, 再加上迅速发展的计算机技术, 使得人们能够借助数值模拟的方法研究气动声学问题。近几十年来发展起来的计算流体力学(CFD), 也即数值模拟方法在流体力学中的应用, 已经可以相对准确地模拟流体运动, 这为气动声学的数值计算打下了基础[5]。

2. 公路交通噪声现状

交通流量的噪声主要由动力噪声和轮胎噪声两部分构成。车辆动力噪声主要指动力系统辐射的噪声[6]。发动机系统是主要噪声源, 包括进气噪声、排气噪声、冷却风扇噪声、燃烧噪声及传动机械噪声等。动力噪声的强度主要取决于发动机的转速, 与车速有直接关系, 噪声强度随车速增大而增强。此外, 车辆爬坡时, 随着路面纵坡加大, 动力噪声也加大[7]。轮胎噪声的大小与轮胎花纹构造、路面特性及车速有关, 且主要取决于车速, 其强度随车速的增大而增大[8]。

总体来说, 公路交通噪声主要与以下因素有关:

1) 车辆组成种类: 不同公路上交通组成是不同的, 但在一定时期, 某一公路其交通组成相对固定。相对比较而言, 交通组成中大型载重车、柴油车比重较大, 由于其发动机的噪声及车身振动噪声大, 则

对两侧噪声污染也最严重。

2) 行车速度: 车辆的行驶速度越快, 噪声越大, 研究表明当车速超过 50 km/h 时, 轮胎噪声就成为交通噪声的主要组成部分。可见目前高速公路上交通噪声的主要来源于轮胎与路面的噪声。

3) 路面结构: 由于轮胎噪声直接与路面有关, 可见路面结构与噪声关系密切, 由于路面结构的空隙率以及表面纹理、摩擦系数等和车辆轮胎花纹的不同组合就会产生不同声级的噪声。

4) 路堤高度: 由于我国高速公路一般为高填路基, 在填方路段, 周围越空旷, 车辆噪声传播的距离越远。

5) 车辆鸣笛: 车辆过多使用喇叭, 特别是高音喇叭, 可使噪声声级升高 7~10 dB [9]。

从心理声学的角度来说, 噪声一般是指不恰当或者不舒服的听觉刺激[10]。人们长期接触噪声会引起听力损伤, 导致噪声性耳聋和爆发性耳聋, 在噪声长期作用下会导致中枢神经功能性障碍, 表现为头痛、头晕、失眠等植物性神经衰弱症候群, 同时会对人体的神经系统、心血管系统、内分泌系统、消化系统以及视觉、智力等都有不同程度的影响[11]。有人对在噪声达 95 dB(A)的环境中工作的 202 人进行过调查, 头晕的占 39%, 失眠的占 32%, 头痛的占 27%, 胃痛的占 27%, 心慌的占 27%, 记忆力衰退的占 27%, 心烦的占 22%, 食欲不佳的占 18%, 高血压的占 12% [12]。

有调查表明, 高速公路两侧 200~300 m 范围内形成的噪声污染带和汽车尾气形成的大气污染可造成公路两侧森林动物习性发生改变, 如鸣鸟的性别比、年龄比发生变化, 繁殖率下降等等[13]。机械结构在特强噪声的频率交变负载的反复作用下, 材料结构发生疲劳, 甚至断裂[14]。当噪声级超过 140 dB 时, 强烈的噪声对轻型建筑物开始起破坏作用, 如门窗损坏、墙面开裂等[15]。噪声还直接影响到周围土地的价值, 有资料表明交通噪声每升高 1dB, 那么土地的价格就会下降 0.08%~1.26%之间, 平均降低 0.9%左右[16]。

高速公路交通噪声主要由稳态噪声和偶发强噪声组成, 其中路侧稳态噪声范围在 76.3~84.2 dB(A), 而偶发强噪声可达到 110 dB(A)左右, 甚至更高(车辆爆胎产生的强噪声) [17]。在近年来的环境污染纠纷中, 公路交通噪声污染事件呈现出逐年上升的趋势, 已占到各类环境纠纷事件的 60%以上[18]。

3. 车内噪声

潘国俊[19]通过对汽车车内噪声的控制效果进行的数值建模、预测和分析评估, 有效地缩短了新车型的研发周期。统计能量分析方法(SEA)可以对高频噪声进行有效地分析, 探讨了应用统计能量分析对车内噪声进行预测, 并实现对车内噪声的优化和改进。文章以乘用车为研究对象, 建立了乘用车的 SEA 模型, 根据 SEA 建模的基本原则和假设, 划分了子系统。并确定了模型中各结构子系统的材料及物理属性, 计算了各个子系统的模态密度、内损耗因子以及子系统间的耦合损耗因子。然后通过 CFD 仿真计算得到风噪激励, 并同发动机舱辐射激励输入到 SEA 模型中, 完成 SEA 模型的建立。然后使用 AutoSEA 软件对车内噪声进行了仿真分析, 并将仿真结果与实车试验测量结果进行对比, 验证了所建模型的有效性。接着对 SEA 模型中结构子系统的划分进行了简化, 将简化后的模型进行车内噪声仿真, 并将仿真值与原模型的仿真值进行比较, 结果表明结构子系统的划分相对于声腔子系统的划分, 对 SEA 模型预测精度的影响更大, 并且声腔子系统的划分则要保证驾驶员头部声腔为一独立子系统, 才能保证预测精准。采用不同面密度的声学包装材料对车内噪声进行预测, 结果表明不能单一通过提高隔声材料面密度来降低车内噪声, 此严重违背了轻量化的原则。最后对车内噪声进行贡献量分析, 有针对性地提出声学包装改进方案, 并采用正交试验优化设计方法确定了乘用车的声学包装最优设计方案, 验证了最优方案对车内噪声的改善效果, 达到了降低车内噪声, 并使车内声学包装总质量降低的目的。

鉴于随着后视镜、A 柱、天窗等部位的气动噪声源得到有效控制, 汽车车底高速气流对车内噪声的

影响逐渐凸显, 戴志腾等[20]对汽车底部高速气流引起的车内噪声进行研究。首先, 应用 CFD 和有限元分析(FEA)相结合的方法计算实车模型车体高速气流引起的车内气动噪声, 结果表明, 声压激励的传递效率明显高于湍流压力激励, 车内噪声随频率升高先增后减, 主要集中于 100 至 300 Hz 的中低频段。接着, 引入模态声传递向量方法(MATV), 基于实车模型进行仿真, 并与试验和 FEA 计算结果对比, 结果表明, 与试验结果很好吻合, 而其计算效率比 FEA 提升了 96%。最后, 基于 MATV 方法分别计算了实车模型添加发动机底护板和气坝后车内同一监测点的噪声, 总声压级分别降低了 2.8 和 1 dB。

有效预测高速车内风噪声, 为解决汽车风噪问题提供便捷途径。邹锐等[21]运用 CFD 与声学 FEA 相结合的方法对高速车内风噪声进行仿真研究, 基于某现有车型, 运用基于模态的声振耦合响应分析方法计算驾驶员左耳处声压级大小, 对比道路试验结果, 研究此仿真方法的可行性与有效性。运用单向弹簧单元对侧窗玻璃加以约束, 分析不同刚度系数 k 对玻璃结构模态及仿真结果的影响, 找到较为有效的 k 值大小, 提高仿真精度。

汽车高速行驶的过程中, 速度超过 100 km/h 时, 气动噪声对车内噪声环境的贡献起主导作用, 凸显出气动声源的研究与控制的重要性。刘海军等[22]采用试验与数值计算相结合的方法研究了轮罩区域的气动噪声与车内噪声环境的相关性, 推导出了轮罩区域气动噪声的频率公式的修正系数与风速的关系, 得到轮罩区域气动噪声对前排乘客舒适性影响较小, 对后排乘客位的舒适性影响较大的结论。初步获得了轮罩区域气动噪声的控制技术, 该技术一定程度上抑制了轮罩区域的气动噪声, 改善了车内的噪声环境, 提高了车内的声品质。

4. 发动机噪声

消声器作为一种消声降噪的设备, 广泛使用在汽车的进、排气通道中, 通过管道及弯头附着的吸声衬层或其他声阻抗不连续的降噪器件, 使得管道内的噪声得到有效衰减。在消声器的设计中, 必须在满足降低噪声的基础上, 尽可能地减小排气阻力。实际情况下, 消声器结构复杂, 使用过程中会因排气阻力的增加而导致发动机功率出现一定程度的下降。傅湘雨[23]在对消声器进行流体性能分析的基础上, 优化了消声器的结构, 减小了排气阻力, 且不影响发动机正常运作的功率。对管道声学进行了介绍, 推导了消声器的声场方程, 同时基于有限体积法, 概括了文中流体力学的计算, 为仿真的边界条件设定了基本依据。然后根据消声单元内部的气流速度场、温度场和压力场的分布, 对三种典型结构消声器展开研究和分析, 基于各自结构的流场分布特点对特定入口流速的内部流场进行仿真分析。通过对三种典型的消声器结构的研究分析, 得出了三种结构下的仿真结果和各自的规律。以复合结构的抗性消声器为研究对象, 通过对流场的仿真分析研究了内部结构对气流速度场的影响, 对不同长度的通道, 提出了消声器设计参数的选择方法, 并设计了正交实验进行仿真。在原来的基础上提出了对消声器的三维模型进行改进优化, 发现经改进的消声器的空气动力、声学性能有了极大的改善。消声器的声学性能和空气动力性能是主要的评价指标, 分析了模拟后的结果, 找出了不同参数的最佳组合, 并给出具体实验方案。此设计过程能较大地提高消声器的设计效率, 并具有较高的经济性, 为后续的研究提供了可靠的参考。

作为降低和控制车辆排气噪声的一种有效手段, 消声器在发动机排气系统中得到了广泛的应用。当前消声器的设计理论, 一般都是基于平面波假设, 并忽略了气流再生噪声的影响。实际上消声器都是在有气流通过的情况下工作的, 必然存在气流再生噪声, 有时气流再生噪声甚至很大, 在消声器中的声传播也往往存在非平面波模式, 这些实际因素导致现在消声器的设计计算结果与实际消声效果往往相差悬殊。因此, 潘甫生[24]对消声器在考虑再生噪声等实际因素下的设计技术进行研究。作为认识气流再生噪声的基础, 首先对喷管引起的喷射噪声进行了数值分析和试验研究。通过计算流体力学方法计算出了喷射流的速度场分布和湍流动能分布, 使用计算空气声学的方法, 得到了喷射噪声的频谱特性。通过声强

法分别对直口喷管、直线渐开喷管和圆形喷管的喷射噪声的声功率进行了测量, 结果表明三种喷管喷射噪声的声功率大小差别不大, 但指向性有很大的差别, 圆形渐开喷管喷射噪声更易于发散辐射。通过研究喷射噪声强度与离管口距离的关系并结合湍流动能分布得出, 喷射噪声是由势核周围的气流混合区剪切层内的湍化气流引起的。针对消声器气流再生噪声问题, 通过试验研究了两种气流速度下不同插入管方式的单扩张腔消声器的气流再生噪声, 分析其频谱表明, 气流再生噪声的峰值频率随着进口管和出口管间距的缩小而略有升高。当进、出口插入管距离较近且气流速度较高时, 产生了一个能量很大的啸叫声。通过分析插入管方式对气流再生噪声声功率的影响, 总结得出不同的插入管方式, 气流再生噪声随插入深度的变化趋势不同。对比了两种气流速度下气流再生噪声声功率, 结果表明, 随着气流速度的增加各种插入管方式的单扩张腔消声器的气流再生噪声都有所增加, 但增加的幅度有很大的差别, 说明不同的插入管方式的消声器气流再生噪声对气流速度的敏感程度不一样。探讨了消声器气流再生噪声的数值计算方法, 基于气动噪声理论, 通过声学分析方法计算出了消声器出口处的气流再生噪声声功率, 与实验测得声功率趋势吻合。最后以某抗性多腔消声器为研究对象, 着重分析了其空气动力性能。根据气流再生噪声研究得出的结论, 针对消声器的空气动力性能方面的设计缺陷, 对消声器结构进行了改进。结果表明, 结构改进降低了消声器内部的气流速度、湍流动能和压力损失, 明显降低了消声器的气流再生噪声。

5. 其他情况

陈丽文[25]利用流体力学与噪声理论建立了交通流和交通噪声数学模型及其定解条件。根据路段实际情况, 在一维交通流的交通状态下, 通过数值模拟与实测结果比较, 其模拟结果基本符合现实的交通状况。通过计算得到的车速以及统计得到的各种车型的比例, 求得网格各点的声功率级, 由此确定网格对应点的 Leq 、 $L10$ 、 $L50$ 和 $L90$ 的瞬时值, 解决了从交通流模型到噪声计算的顺利转接, 实现了动态交通模拟。利用 VB 编制了界面友好的计算程序, 实现了交通噪声计算的程序化。

王毅刚等[26]以某款实车为研究对象, 结合风洞试验、计算流体力学和 SEA 方法, 获取该车在 140 km/h 下的外部脉动压力和声场输入, 建立较为准确的 SEA 模型, 探索车外空气脉动及其产生的气动噪声向车内的传播特性。研究表明, 车内气动噪声主要来自于车窗、前后风挡; 车外脉动压力远大于声场, 但声场主导中频偏高频车内噪声, 脉动压力在中频偏低频作用明显; 风挡向车内的声能传播, 主要以车外空气脉动激发的振动传递为主。

侯锁军和杜艳霞[27]针对某轻型客车排气噪声较大的问题, 采用 Meehel 模型与 Sysnoise 软件相结合的方法获得排气消声器的传递损失, 并经试验验证, 确定问题在于 500~600 Hz 频段内消声器传递损失较小。为此, 对该车消声器进行了改进, 并采用计算流体力学软件对改进前后消声器压力损失进行了对比, 实车验证结果表明改进措施有效解决了该车排气噪声较大的问题。

李天匀和唐山[28]把车流模拟为流动的线噪声源, 利用流体动力学理论建立交通流模型。提出的特征线算法解决了差分格式对初始条件和流速速度等的制约, 以及信号灯控制下的流场分布和噪声预报问题。计算结果与有关实测数据的对比表明本文方法是准确可靠的。

毛竹君[29]以气动噪声分析为手段, 针对 205/50R16 子午线轮胎, 建立了具有横向花纹沟槽的有限元模型, 利用 Abaqus 有限元软件, 进行瞬态滚动分析, 得到单个横沟的体积变化, 将其导入流体软件 Fluent 中, 利用计算流体力学方法, 分析泵吸过程中沟槽内部及其附近的流场变化情况, 根据 Lighthill 声学类比理论预测出了泵吸噪声, 结合试验从频率变化趋势的角度, 验证了模型的正确性。该方法可以应用于不同花纹形式的泵吸噪声大小的对比, 可以辅助轮胎低噪声花纹的设计。为了更进一步解释流场与声场之间的关系, 基于涡声理论验证了流场涡量变化与噪声之间的关系, 通过建立迎风、逆风走向的横向花

纹沟槽 CFD 模型, 分析泵吸过程中涡量变化特性及噪声大小, 对比试验结果, 确立了以引入外部来流干扰沟槽内部流场为手段的降噪思路。为了使轮胎其他性能不受影响, 针对横向花纹沟槽建立了能够引入外部来流能量尺寸较小的旁支管结构, 降低了流场中的涡量变化, 实现了降低噪声的目的。利用外部来流扰动内部流场的手段, 不仅可以减少对轮胎花纹几何上改变带来的其他性能的改变, 同时其降噪的效果也十分明显, 对于实际工程中降低轮胎泵吸噪声具有重要的意义。

6. 结论

交通噪声严重影响和干扰道路两侧一定范围内的居民、学校和沿线各单位的正常工作和生活秩序, 降低人们的生活质量。利用渗流力学研究交通噪声具有重要意义, 但现在相关研究还有欠缺。比如在计算比较复杂的交通情况时, 可以将动量方程及能量方程引入交通流模型, 由于动量方程中包括压力梯度、摩擦阻力等项, 能使同一密度下对应的流速和流量可以有很多种变化, 同时考虑匝道的出流和入流情况, 能够更好地模拟各种复杂道路条件和混合交通情况。

基金项目

山东省交通运输厅科技计划(2020B24); 京台高速公路齐河至济南段改扩建工程科技示范项目《高速公路穿越城市地带声敏感区噪声综合防治技术研究》。

参考文献

- [1] 付珊珊. 甘孜州山区生态公路建设技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [2] 邵国良, 严俊, 邵天芬. 基于流体力学模型的城市交通流噪声分析[J]. 船海工程, 2001(S2): 114-116.
- [3] 马瑞轩, 王益民, 张树海, 等. 旋涡声散射特性的尺度效应数值研究[J]. 物理学报, 2021, 70(10): 184-193.
- [4] 黄娟, 何洪, 杨伟超, 等. 海拔对铁路隧道内瞬变压力及车厢内乘坐舒适性的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(3): 608-615.
- [5] 白泽升, 王孟鸿, 王世方. 平稳风荷载的数值模拟及 CFD 应用[J]. 建筑结构, 2021, 51(S2): 248-252.
- [6] 孟浩东. 中小功率柴油发动机振声源识别技术研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [7] 李清雯. 有水路面行车产生的流体动力噪声数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2020.
- [8] 余雄鹰, 闵福江, 文伟, 等. 轮胎/路面噪声的结构传递路径分析[J]. 汽车工程, 2013, 35(11): 1030-1034.
- [9] 张学丘. 车辆驾驶室结构噪声分析与控制的研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [10] 张伟, 蒋伟康. 基于心理声学分析的车内异常噪声辨识[J]. 汽车工程, 2003, 25(6): 603-605, 648.
- [11] 王润兰, 刘树峰, 程苏璇. 职业性噪声聋防护措施存在的问题及对策[J]. 疾病监测与控制, 2013, 7(7): 443-444.
- [12] 阎瑞雪, 夏杰, 张荣, 等. 某轴承生产企业噪声作业工人对噪声危害和防护知识认知情况[J]. 中国职业医学, 2019, 46(4): 497-500.
- [13] 付正军. 关于高速公路噪声污染原因与其治理分析[J]. 资源节约与环保, 2016(3): 82-83.
- [14] 黄世平. 电源噪声干扰对电子仪器设备的危害分析及对策[J]. 电子技术与软件工程, 2019(7): 101-103.
- [15] 刘剑强. 绿色建筑周边交通噪声对室内噪声级的影响分析[J]. 智能建筑与智慧城市, 2019(1): 59-60, 65.
- [16] 闫昊. 城市轨道交通对土地价值的影响及其效益返还模式研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [17] 陈松妹. 城市道路噪声环境影响及污染防治对策分析[J]. 华东科技: 学术版, 2017(4): 338.
- [18] 殷丽萍, 王开德, 王剑敏. 基于生态环境治理预警系统的城市环境噪声污染监测技术的探讨[J]. 皮革制作与环保科技, 2022, 3(4): 74-76.
- [19] 潘国俊. 乘用车车内高频噪声的统计能量法建模分析与改进[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [20] 戴志腾, 汪怡平, 苏楚奇, 等. 基于 MATV 的车底高速气流引起的车内噪声计算[J]. 汽车工程, 2022, 44(2): 290-297.

-
- [21] 邹锐, 张祥东, 史晨路. 基于有限元法的车内风噪声预测研究[J]. 汽车实用技术, 2021, 46(18): 104-108.
- [22] 刘海军, 孙富强, 吴杨. 某 SUV 轮罩区域气动噪声试验研究[J]. 声学技术, 2021, 40(2): 234-239.
- [23] 傅湘雨. 某发动机排气消声器的结构优化设计[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2018.
- [24] 潘甫生. 内燃机排气消声器设计技术研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [25] 陈丽文. 城市交通噪声分析及其系统研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2006.
- [26] 王毅刚, 张婕, 俞悟周, 等. 基于统计能量法的汽车风噪传播特性分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(12): 1696-1704.
- [27] 侯锁军, 杜艳霞. 基于整车噪声控制的消声器分析与改进[J]. 汽车工程, 2013, 35(10): 944-948, 954.
- [28] 李天匀, 唐山. 交通流噪声分析的流体力学特征线算法[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2001, 29(7): 92-94.
- [29] 毛竹君. 轮胎泵吸噪声计算方法及其降噪的研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2012.