

基于静电吸附的轮胎磨损颗粒物捕集装置的设计与仿真研究

陈航*, 王凯*, 喻梅凌

杭州电子科技大学信息工程学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2025年5月30日; 录用日期: 2025年7月2日; 发布日期: 2025年7月10日

摘要

文章针对轮胎磨损颗粒这一重要的非尾气排放污染源, 设计了一种小型化、可贴合车架的轮胎磨损颗粒捕集装置。研究通过理论分析、结构创新、参数优化和数值仿真, 构建了适用于不同车型的新型捕集装置, 以及建立了性能可视化平台。本新型捕集装置体积小、重量轻、易于安装在不同车型上。此外, 通过仿真研究了车型、车速、电场强度、湿度等因素对捕集效率的影响, 并针对轿车车型讨论了装置的最佳安装位置。

关键词

轮胎磨损颗粒物, 静电吸附, 捕集效率

Design and Simulation Study of an Electrostatic Adsorption-Based Tire Wear Particle Collection Device

Hang Chen*, Kai Wang*, Meiling Yu

Information Engineering College, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou Zhejiang

Received: May 30th, 2025; accepted: Jul. 2nd, 2025; published: Jul. 10th, 2025

Abstract

This study addresses tire wear particles (TWPs), a significant non-exhaust emission pollutant, by designing a miniaturized, frame-mounted tire wear particle capture device. Through theoretical

*共同第一作者。

文章引用: 陈航, 王凯, 喻梅凌. 基于静电吸附的轮胎磨损颗粒物捕集装置的设计与仿真研究[J]. 应用物理, 2025, 15(7): 681-691. DOI: 10.12677/app.2025.157073

analysis, structural innovation, parameter optimization, and numerical simulation, the research develops a novel capture system adaptable to diverse vehicle models and establishes a performance visualization platform. The newly designed capture device is characterized by its compact size, lightweight construction, and ease of installation across various vehicle types. Furthermore, this work investigates the influence of vehicle type, speed, electric field intensity, and humidity on capture efficiency via simulation. For sedan-class vehicles, the optimal installation positions of the device are specifically analyzed to maximize performance.

Keywords

Tire Wear Particles, Electrostatic Adsorption, Capture Efficiency

Copyright © 2025 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

机动车非尾气排放源已成为城市颗粒物污染的关键贡献者, 其中轮胎磨损颗粒物因其持久性、迁移性及潜在生态毒性受到广泛关注[1]。全球每年约产生 600 万吨轮胎磨损颗粒物, 其中 80%以上通过大气沉降或径流进入水体和土壤系统, 构成微塑料污染的重要来源[1]。这些颗粒物主要包含橡胶聚合物、炭黑、无机填料(如二氧化硅)及添加剂(如硫化物、多环芳烃), 其毒性组分可通过食物链富集对人类健康产生慢性危害[2]。轮胎磨损颗粒物的生成机制涵盖轮胎-路面摩擦作用、橡胶分子链断裂、表面材料剥离及花纹块磨损等过程, 产生的颗粒物粒径呈多峰分布(0.1~500 μm), 其中亚微米级颗粒可长期悬浮并随气流扩散, 加剧环境污染的广域性。

随着电动汽车保有量持续增长(其高扭矩特性加剧轮胎磨损), 轮胎磨损颗粒物的管控需求日益迫切。然而, 传统污染控制技术聚焦于尾气排放, 对非尾气颗粒物缺乏有效解决方案。当前轮胎磨损颗粒物捕集技术研究主要采用静电吸附原理, 通过车载装置实现原位捕获。关于轮胎磨损颗粒物的捕集装置研究目前主要集中在理论和实验室阶段, 主要研究内容包括颗粒物的生成与扩散机理研究[3]、捕集机制创新研究[4]、原型装置的设计与开发[5]。在原型装置的设计与开发中, 需要系统平衡环境适应性、工程可行性和捕集效率三大维度。开发能适应各种车型和路况、易于安装、具有高捕集效率的捕集装置是开发者的主要目标。

本文设计了一种基于静电吸附原理的小型化车架贴合式轮胎磨损颗粒物捕集装置, 核心创新包括:

1) 三层梯度叠加电极系统: 通过优化极板拓扑结构与电势分布, 增强对多尺度颗粒的吸附能力; 2) 仿生涡流导向结构: 依据车底气流场特征设计的导流鳍片, 提升颗粒物输运效率; 3) 模块化集成设计: 实现装置与不同车型底盘的快速适配安装。本研究通过建立 Python 仿真平台模拟验证了装置在各种工况下的捕集效能, 并量化分析了车型参数、安装位置及环境变量对捕集效率的影响规律, 为下一步产品的实现提供了完整的技术方案, 包括结构设计、参数优化和性能评估。

2. 技术原理

轮胎颗粒物捕集装置基于静电吸附原理, 通过在颗粒散射路径上设置带有正电荷的收集极板, 利用静电引力将带负电荷的颗粒吸附到收集极板上, 从而实现颗粒的捕集。因此在颗粒物捕集装置的设计中必须考虑颗粒物的产生模型、散射路径以及影响颗粒物运动的因素。

2.1. 颗粒产生模型

颗粒产生率可表示为:

$$R_p = F_r \cdot v \cdot f(L, T, S, R)$$

其中 R_p 为颗粒产生率(mg/s), F_r 为释放因子(mg/km), v 为车速(km/h), $f(L, T, S, R)$ 为修正函数, 受载重、轮胎类型、路面状况和行驶状态影响[4]。

颗粒尺寸分布可用正态分布描述:

$$f(d) = \frac{1}{d\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln d - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

其中 d 为颗粒直径(μm), μ 为分布参数, σ 为分布宽度参数, 不同车型参数不同。

2.2. 颗粒运动方程

颗粒在空气中的运动可用牛顿第二定律描述[6]:

$$m \frac{dv}{dt} = F_g + F_d + F_{\text{flow}} + F_e$$

其中 m 为颗粒质量, v 为颗粒速度, F_g 重力(Gravitational Force), 通常表示为:

$$F_g = mg$$

其中 g 是重力加速度。

F_d 阻力(Drag Force), 通常是空气阻力或流体阻力, 其大小一般表示为:

$$F_d = -\frac{1}{2} \rho v^2 C_d A$$

其中 ρ 是流体密度, C_d 是阻力系数, A 是迎风面积, 负号表示方向与速度相反。

F_{flow} 流体力(Flow Force), 可能是由于流体运动(如水流或气流)对物体施加的力, 具体形式取决于问题背景。 F_e 外力(External Force), 可能是其他未明确说明的外部作用力, 如电场力、推力等。

2.3. 颗粒物捕集效率定义

捕集效率定义为被捕集颗粒数量与总颗粒数量的比值:

$$\eta = \frac{N_{\text{captured}}}{N_{\text{total}}}$$

对于不同尺寸的颗粒, 捕集效率可分别计算:

$$\eta_i = \frac{N_{\text{captured},i}}{N_{\text{total},i}}$$

其中 i 表示颗粒尺寸类别(小、中、大)。

总体捕集效率为各尺寸颗粒捕集效率的加权平均:

$$\eta_{\text{total}} = \sum_i w_i \eta_i$$

其中 w_i 为各尺寸颗粒的权重, 由颗粒尺寸分布决定。

3. 小型贴合车架捕集装置设计

基于静电吸附原理, 本文设计的捕集装置的结构图见图 1。

1) 外观设计: 新型捕集装置体积大幅缩小, 尺寸仅为 $15\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高); 重量小于等于 500 g 。可以通过磁性吸附、卡扣固定、粘贴固定和绑带固定方便快捷地安装在不同车型上。工作原理图见图 2。

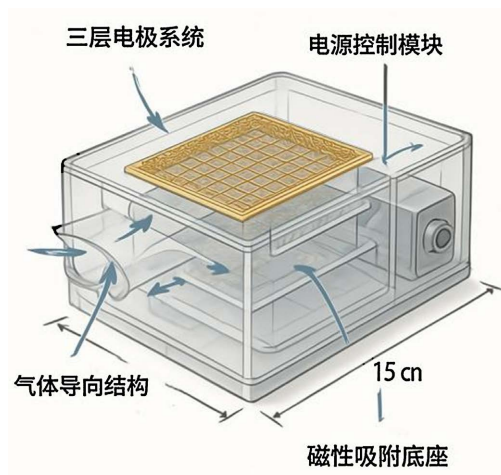


Figure 1. Structural diagram of the compact frame-mounted tire wear particles collection device

图 1. 小型贴合车架轮胎磨损物颗粒捕集装置结构图



Figure 2. Working principle diagram of the compact frame-mounted tire wear particles collection device

图 2. 小型贴合车架轮胎磨损物颗粒捕集装置工作原理图

2) 电极设计: 采用三层叠加式电极设计, 第一层(外层)为大间距网格电极, 捕集大颗粒($>20\text{ }\mu\text{m}$); 第二层(中层)为中间距网格电极, 捕集中等颗粒($5\sim 20\text{ }\mu\text{m}$); 第三层(内层)为小间距网格电极, 捕集小颗粒($<5\text{ }\mu\text{m}$)。电极材质为铝合金网格, 表面镀银; 电极间距可根据车型自动调节($1\sim 5\text{ mm}$); 电场强度为 $3\sim 8\text{ kV/cm}$, 可根据车速自动调节。电极形状采用弧形设计, 增大有效捕集面积。电场分布梯度设计, 由外向内电场强度逐渐增加; 在电极边缘设置微型尖端, 边缘电晕增强, 利用电晕放电增强局部电场。

3) 气流导向系统设计: 采用仿生学设计的气流导向结构, 入口导流罩, 鲨鱼鳃状设计, 增大气流捕获面积; 内部导流板: 蜂窝状结构, 减少气流阻力, 增加颗粒接触机会; 涡流发生器, 在关键位置设置微型涡流发生器, 延长颗粒在电场中的停留时间; 出口扩散段, 渐扩式设计, 减少气流阻力。

4) 电源与控制系统: 输入电压为 12 V DC (车载电源), 输出电压 $0\sim 8\text{ kV}$ 可调节, 最大输出电流 1.2

mA, 功率消耗小于等于 10 W, 保护功能有过压、过流、短路保护控制系统; 微处理器有低功耗 ARM 处理器; 传感器有车速传感器、湿度传感器、温度传感器、电流传感器; 控制算法为模糊控制, 根据环境参数和车速自动调节电场强度; 通信接口为蓝牙 5.0, 与手机 APP 连接, 监控捕集效率和装置状态。

4. 仿真研究

本文基于 Python 开发仿真平台, 模拟轮胎磨损物捕集装置的工作情况。仿真平台集成了颗粒散射模型、捕集装置模型和性能可视化模块。在仿真模拟中, 为简化模型并确保其实用性, 做出以下假设: 颗粒在产生后立即进入散射阶段, 不考虑颗粒在轮胎表面的滞留; 颗粒的初始速度与轮胎表面速度相关, 方向与轮胎表面切线方向一致; 颗粒在空气中的运动受重力、空气阻力和环境气流的影响; 颗粒之间的相互作用可忽略不计; 颗粒的电荷特性在散射过程中保持稳定; 环境气流可简化为车辆周围的流场模型。仿真平台可以实现以下功能: 1) 颗粒散射模拟: 模拟不同车型、不同车速下轮胎磨损颗粒的散射路径。2) 捕集过程模拟: 模拟颗粒在电场作用下的运动轨迹和捕集过程。3) 参数敏感性分析: 分析电场强度、气流速度、湿度等参数对捕集效率的影响。4) 性能可视化: 生成各种性能指标的可视化图表。

4.1. 仿真模型参数设置

1) 颗粒物参数

轮胎磨损颗粒的物理特性对捕集装置设计至关重要。通过文献调研和实验分析, 总结了轮胎磨损颗粒的主要物理特性[7] [8], 见表 1。

Table 1. Data on the main physical properties of tire wear particles
表 1. 轮胎磨损物颗粒的主要物理性质数据

特性	数值范围	影响因素
尺寸	0.1~100 μm	车型、车速、路面状况
形状	不规则、片状、球状	轮胎材质、磨损方式
密度	1.8~2.2 g/cm^3	轮胎成分、添加剂
电荷	主要为负电荷	摩擦过程、环境湿度

轮胎磨损颗粒呈多峰分布(0.1~500 μm), 主体为 10~100 μm 的颗粒。车型间差异主要体现在粗颗粒占比(货车 > 轿车), 因此捕集装置需覆盖全谱系, 并依据车辆底盘布局和典型工况优化捕集效率。

2) 颗粒产生率与散射特性

不同车型的颗粒产生率(释放因子)差异显著: 轿车约 91 $\text{mg}\cdot\text{km}^{-1}$, SUV 约 150~200 $\text{mg}\cdot\text{km}^{-1}$, 货车约 1023 $\text{mg}\cdot\text{km}^{-1}$ [9] [10]。颗粒散射特性也存在明显差异: 轿车散射高度较低, 主要集中在地面附近 0.1~0.5 m 范围内; SUV 散射高度中等, 可达地面以上 0.2~0.8 m; 货车散射高度较高, 可达地面以上 0.3~1.2 m [11] [12]。这些差异对捕集装置的安装位置和结构设计有直接影响。

3) 颗粒电荷特性

轮胎磨损颗粒在产生过程中由于摩擦作用会带有一定的静电荷, 主要为负电荷。颗粒的电荷量与其尺寸、材质和环境条件有关[12]。小颗粒(<5 μm)电荷密度较高, 但总电荷量较小; 中颗粒(5~20 μm)电荷密度中等, 总电荷量中等; 大颗粒(>20 μm)电荷密度较低, 但总电荷量较大[13]。

4) 环境湿度

轮胎磨损颗粒在环境湿度对颗粒电荷有显著影响, 湿度增加会导致电荷泄漏, 降低静电吸附效果。这一特性对捕集装置的电极设计和工作参数有重要影响。

仿真过程中的模型参数与仿真流程来自参考文献[8] [10] [12]。

4.2. 仿真研究结果

在轮胎磨损颗粒物收集装置的设计中, 最重要的评价标准是捕集效率。本文通过仿真研究, 讨论了车型、车速、颗粒物大小等不同因素对捕集效率的影响, 为轮胎颗粒物收集装置的设计、安装提供指导。

1) 不同车型和车速下的捕集效率

在电场强度 5 kV/cm , 湿度 50% 、温度 25°C 的情况下, 本文比较了三种车型(轿车、SUV、货车)分别在城市路段交通高峰缓速(36 km/h)、城市快速道中速(72 km/h)和高速公路高速(108 km/h)这三种情况下的捕集效率, 仿真结果见图 3。从图中可以看出, 相同速度下新型捕集装置的捕集效率随着车型的增大而降低, 在轿车上的捕集效率最高, 在缓速时可达 68% , 高速时 59% , 而在货车上的捕集效率最低, 缓速时为 59% , 高速时为 45% 。

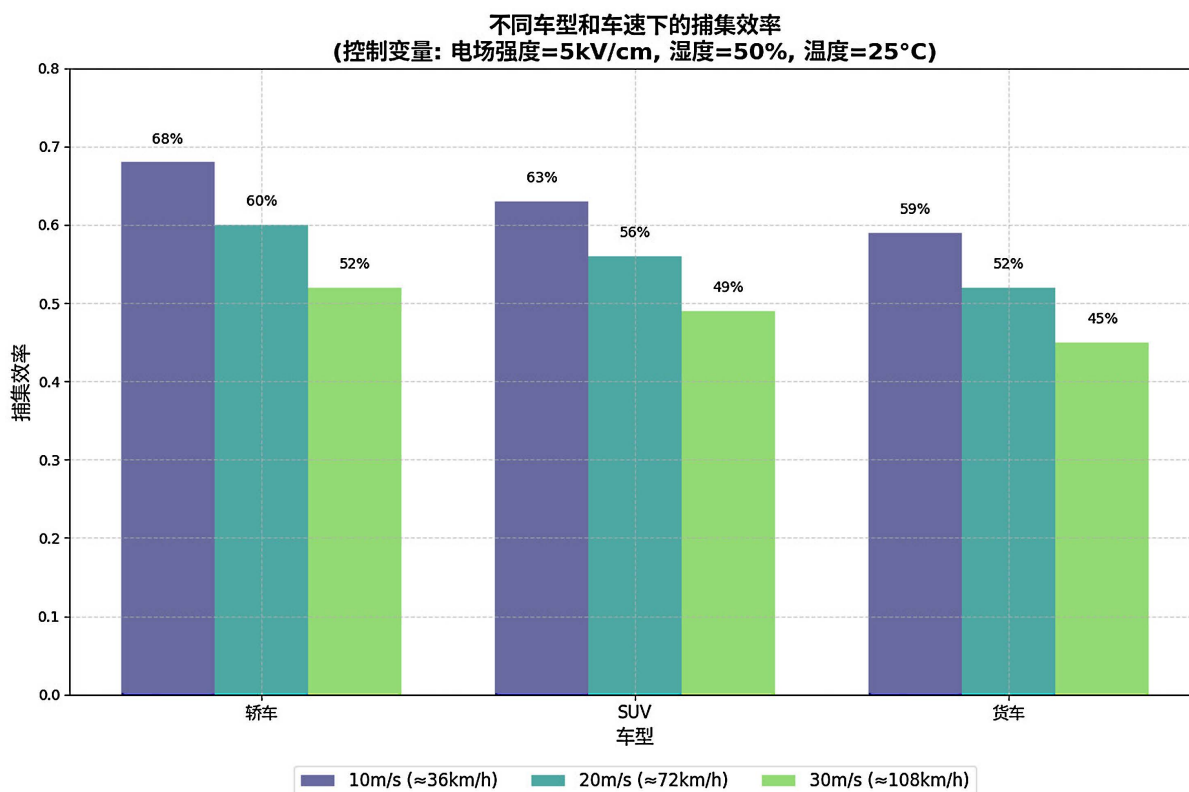


Figure 3. Capture efficiency under different vehicle types and speeds

图 3. 不同车型和车速下的捕集效率

2) 不同尺寸颗粒物的捕集效率

汽车磨损颗粒物大小与车型、车速、路况都有关系, 有研究给出对人体危害比较大的颗粒物尺寸主要为 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 以下的不同尺寸的颗粒物, 在相同车速下, 运动的轨迹不同, 因此静电捕集装置对不同尺寸颗粒物的捕集效率会有差异。本文研究了轿车在 36 km/h 速度下, 当环境湿度为 50% 、电场强度为 5 kV/cm 时, 新型捕集装置对小颗粒物($<5\text{ }\mu\text{m}$)、中颗粒物($5\sim 20\text{ }\mu\text{m}$)和大颗粒物($>20\text{ }\mu\text{m}$)的捕集效率, 见

图 4。

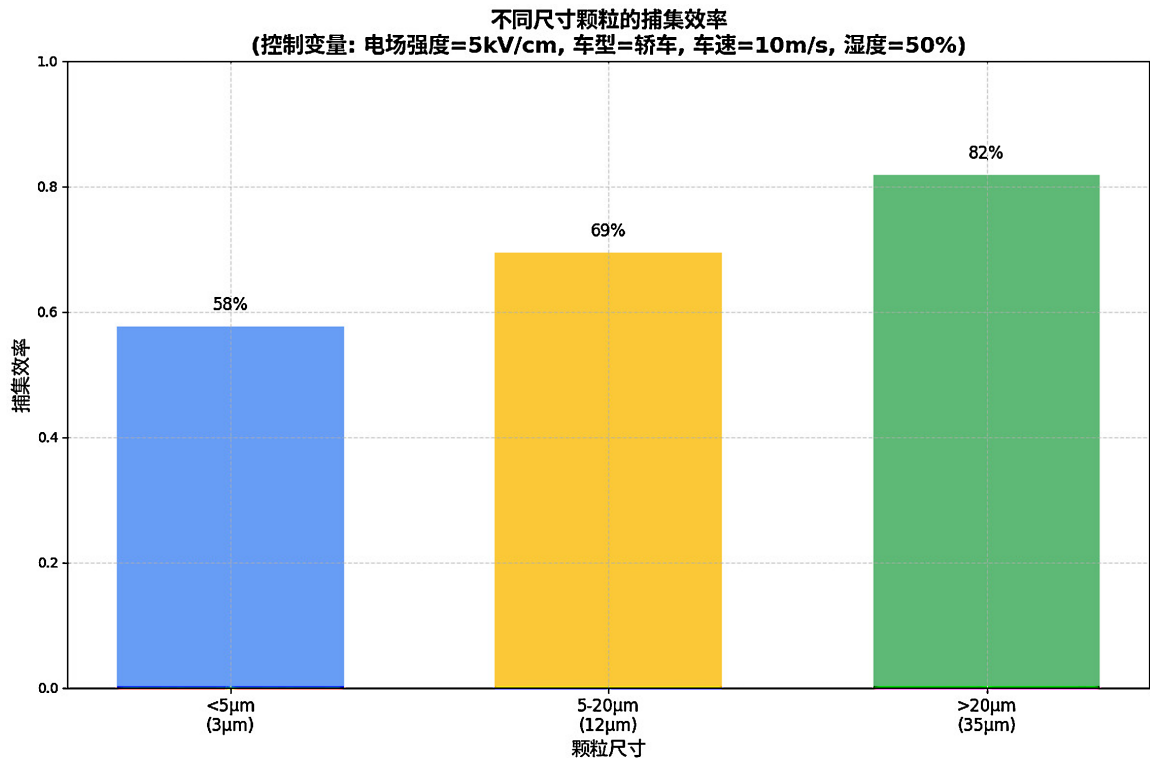


Figure 4. Capture efficiency of different particle sizes
图 4. 不同尺寸颗粒的捕集效率

从图 4 中可以看出, 新型捕集装置对各种尺寸颗粒均有良好的捕集效果。捕集效率随颗粒尺寸增大而提高, 这主要是由于大颗粒带有更多电荷, 受电场作用更显著。

3) 电场强度对捕集效率的影响

电场强度是影响捕集效率的关键参数[8], 其影响如图 5 所示。

从图 5 中可以看出, 捕集效率随电场强度增加而提高, 但在 5~8 kV/cm 范围内趋于稳定, 这一范围可视为最佳工作区域。过高的电场强度不仅不会显著提高捕集效率, 还会增加能耗和安全风险。这一结果为新型静电捕集装置的电场强度设计提供了科学依据。

4) 车速对捕集效率的影响

车速是影响捕集效率的另一个重要参数, 其影响如图 6 所示。

从图 6 中可以看出, 捕集效率随车速增加而降低, 这主要是由于高速下气流对颗粒的携带作用增强, 减弱了电场的捕集效果。在 0~40 m/s (约 0~144 km/h) 范围内, 捕集效率保持在较高水平, 可视为高效工作区域。这一结果表明, 新型装置即使在高速行驶状态下也能保持 65% 以上的捕集效率, 装置的设计具有有效性。

5) 环境湿度对捕集效率的影响

环境湿度对捕集效率有显著影响, 其影响如图 7 所示。

从图 7 中可以看出, 捕集效率随湿度增加而降低, 这主要是由于高湿度环境下颗粒电荷容易泄漏, 减弱了静电吸附效果。在 0~50% 的相对湿度范围内, 捕集效率保持在较高水平, 可视为高效工作区域。这一结果为新型装置在不同气候条件下的应用提供了指导。

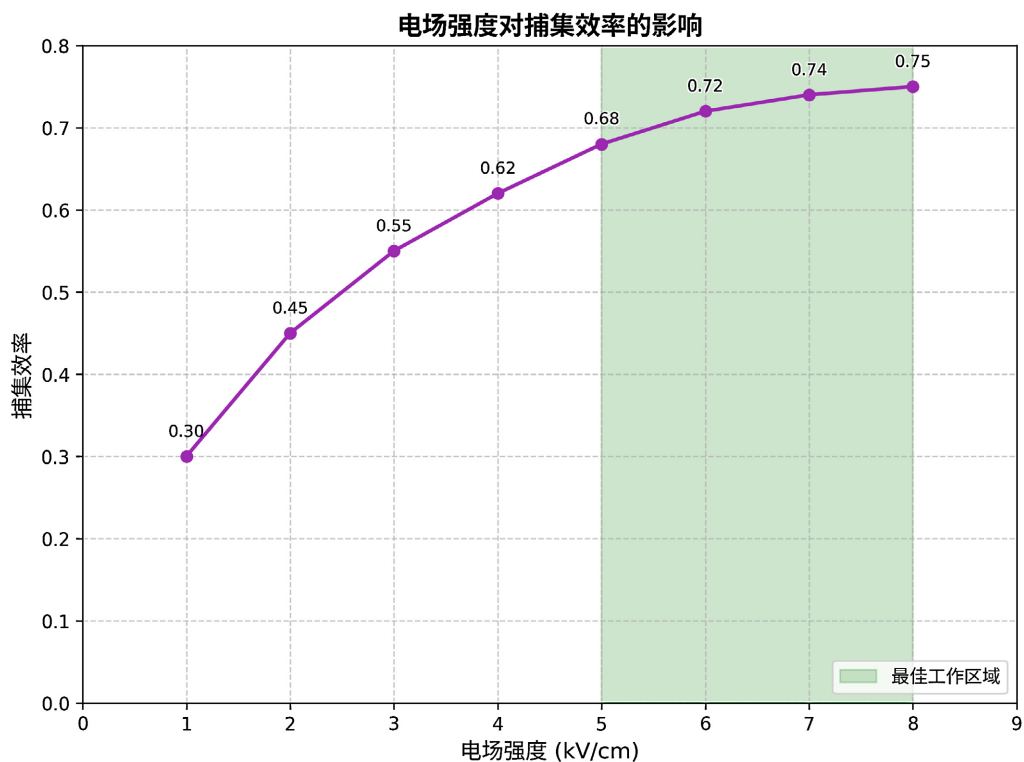


Figure 5. Relationship between electric field strength and capture efficiency

图 5. 电场强度与捕集效率的关系图

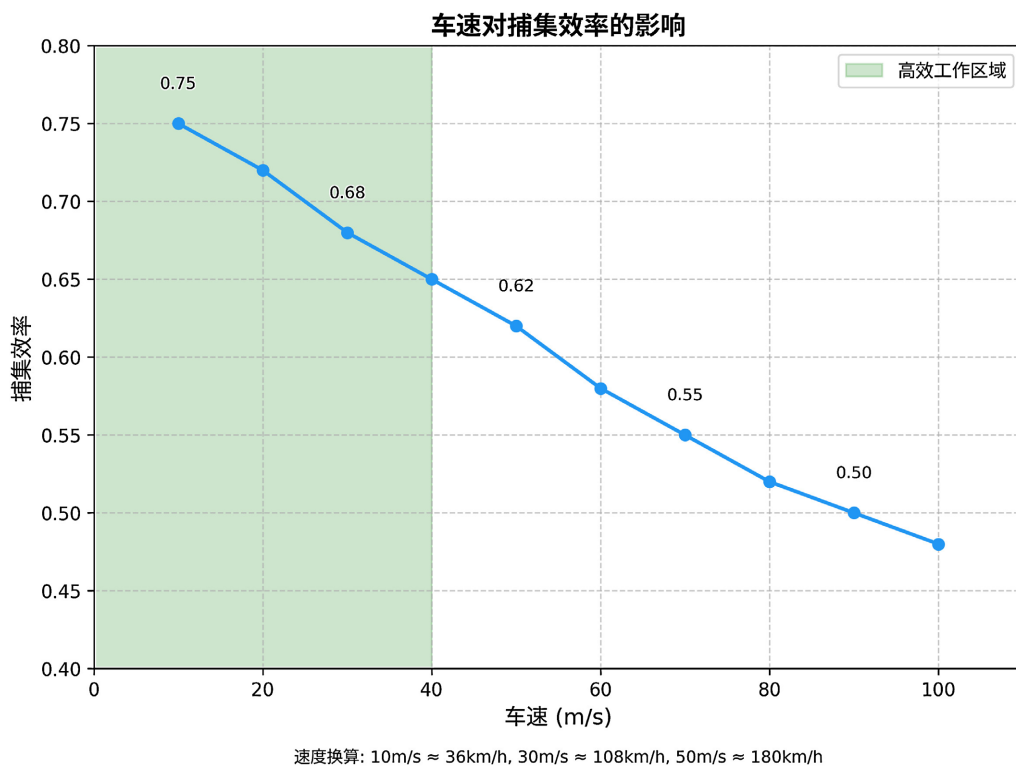


Figure 6. The influence of vehicle speed on the capture efficiency

图 6. 车速对捕集效率影响

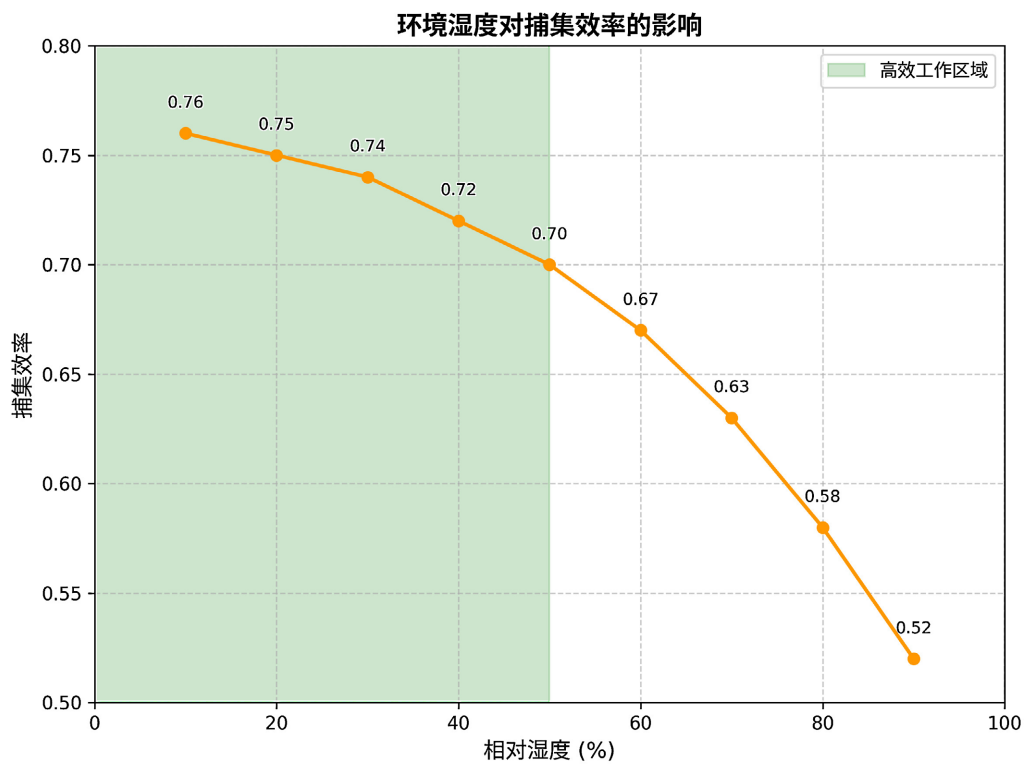


Figure 7. Relationship between ambient humidity and capture efficiency
图 7. 环境湿度和捕集效率的关系图

6) 安装位置对捕集效率的影响

由于轮胎磨损颗粒物的分布不均匀，因此捕集装置的安装位置对捕集效率有很大影响。本文以小轿车为例建立车辆底盘模型，底盘距离地面 12 cm，两前轮间距 1.6 m，前后轮距离 2.7 m。在车底盘上以四个轮子分布的中点为坐标原点建立直角坐标系，沿车身前后方向为 Y 轴，向前为正方向；沿车身左右方向为 X 轴，向右为正方向，具体坐标见图 8。在四个车轮附近放置捕集装置，在湿度 50%、车速 36 km/h、电场强度 6 kV/cm 的条件下，仿真模拟得到捕集效率的区域分布图如图 8 所示。

从图 8 中可以看出，在此坐标下，为得到最高的捕集效率，捕集装置在底盘上的最佳安装位置对于左侧轮胎分别为(-800, 760) mm、(-800, -840) mm，捕集效率最高为 71%。对于右侧轮胎，最佳安装位置的坐标为(800, 740) mm、(800, -860) mm，捕集效率最高为 79%。这一位置与颗粒的主要散射路径相匹配，能够捕获最多的颗粒。左右轮的最佳捕集位置关于 Y 轴并不对称且前后轮捕集效率不同，这主要是由于车身结构对气流的非对称影响，以及排气系统位置对气流的局部扰动和底盘下方组件分布的不均匀性造成的。本文的仿真结果为新型装置的安装提供了精确指导。

5. 结论

本研究针对轮胎磨损颗粒物污染控制的技术瓶颈，设计并优化了一种基于静电吸附原理的小型化车架贴合式捕集装置。通过理论建模、结构创新与多物理场景仿真，得出以下结论：本装置体积小(15 cm × 10 cm × 5 cm)、重量轻(≤500 g)，在最佳安装位置(车轮散射路径匹配点)捕集效率达 79%(轿车缓速工况)。创新的三层梯度叠加电极系统(极板间距 1~5 mm 自适应调节，电场强度 3~8 kV/cm)与仿生涡流导向结构协同作用，实现对多尺度轮胎磨损颗粒物(0.1~500 μm)的全谱系捕集。仿真研究发现捕集效率随电场强度(5~8 kV/cm)、湿度(<50% RH)及车速(<144 km/h)呈现非线性响应，确立 5 kV/cm、湿度 < 50%、车速 <

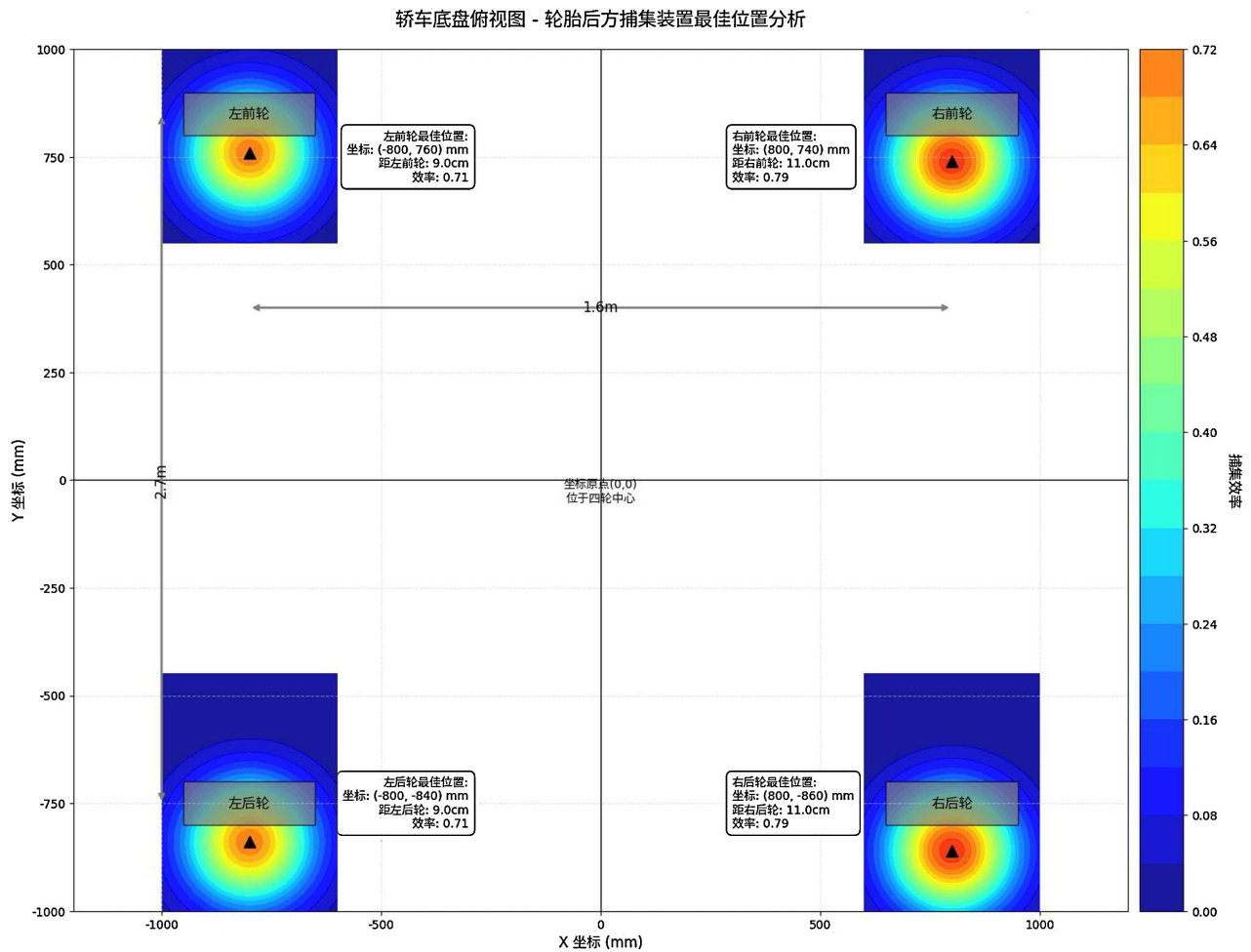


Figure 8. Relationship between the installation location of the device and the capture efficiency

图 8. 装置安装位置和捕集效率关系图

40 m/s 为高效工作区间(效率 > 65%)。本研究通过建立仿真平台,对捕集效率和关键参数进行了可视化分析,为装置的优化设计和实际应用提供了理论支持。研究成果为减少轮胎磨损颗粒污染提供了实用的技术解决方案,具有重要的环境保护意义和应用价值。

基金项目

本文受浙江省“十四五”第二批本科教学改革项目(JGBA2024751)和浙江省大学生创新创业训练项目(S202413279024)的资助。

参考文献

- [1] 刘鸿玮, 袁语欣, 曹天池, 等. 轮胎磨损颗粒的关键环境行为及其影响机制[J]. 化学进展, 2025, 37(1): 103-111.
- [2] 吴锡, 周慧晶. 低碳背景下碳纳米管复合橡胶轮胎颗粒物磨损影响因素分析[J]. 中国轮胎资源综合利用, 2025(4): 84-86.
- [3] 卢轩, 黄海波, 张涛, 等. 汽车轮胎磨损颗粒物扩散特性的数值模拟研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2019, 32(1): 44-51.
- [4] 董家楠. 基于 FLUENT 的汽车轮胎磨损颗粒物散射轨迹及捕集研究[D]: [硕士学位论文]. 宁波: 宁波大学, 2020.
- [5] 刘奥辉, 崔传金, 孙洁, 等. 汽车轮胎磨损颗粒物收集装置研究进展[J]. 专用汽车, 2023(9): 86-88.

-
- [6] 轩闪闪, 黄海波, 刘金朋, 等. 基于解析方法的轮胎磨损颗粒物运动轨迹分析[J]. 中国机械工程, 2017, 28(8): 1002-1007.
 - [7] 李泓锦. 汽车轮胎磨损微颗粒播散规律及捕集装置研究[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2024.
 - [8] Spanheimer, V. and Katrakova-Krüger, D. (2022) Analysis of Tire Wear Airstrip Particles (TWAP). *Scientific Reports*, **12**, Article No. 15841. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19986-9>
 - [9] 韩全康, 陈宏飞, 祖雷, 等. 轻型汽车轮胎磨损颗粒物排放特征及影响因素[J]. 中国环境科学, 2024, 44(11): 6018-6024.
 - [10] Park, I., Kim, H. and Lee, S. (2018) Characteristics of Tire Wear Particles Generated in a Laboratory Simulation of Tire/Road Contact Conditions. *Journal of Aerosol Science*, **124**, 30-40. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2018.07.005>
 - [11] 黄海波, 杜龙飞, 任睿, 等. 大客车轮胎磨损颗粒物散射及其对呼吸健康的风险研究[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(2): 723-731.
 - [12] Mennekes, D. and Nowack, B. (2022) Tire Wear Particle Emissions: Measurement Data Where Are You? *Science of the Total Environment*, **830**, Article ID: 154655. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154655>
 - [13] 程骏. 不同路面条件下汽车轮胎磨损颗粒的微观特性和释放量: 装置模拟和实际环境测量[D]: [硕士学位论文]. 广州: 暨南大学, 2023.