

智慧交通背景下自感知和自愈合路面的发展趋势研究

高楠, 刘卓群, 张金梁, 张茗崴, 鞠达
东南大学成贤学院, 江苏 南京 210088

摘要: 随着全球城市化进程的加速, 交通拥堵、交通事故、环境污染等问题日益突出, 对交通系统的智能化、绿色化提出了迫切需求。本研究旨在探讨在智慧交通背景下, 自感知和自愈合路面技术的发展现状、应用及未来趋势。随着城市化进程的加速, 交通拥堵、安全和环境问题日益突出, 智慧交通作为解决这些问题的重要手段, 其核心是信息的获取、处理和應用。自感知路面与自愈合路面作为智慧交通的重要组成部分, 为实现智能、高效、安全的交通运输体系提供了新的技术路径。

关键词: 智慧交通; 自感知; 自愈合路面; 发展趋势

Research on the Development Trend of Self-sensing and Self-healing Road Surfaces in the Context of Smart Transportation

Gao Nan, Liu Zhuoqun, Zhang Jinliang, Zhang Mingwei, Ju Da
Chengxian College, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210088

Abstract: With the acceleration of global urbanization, issues such as traffic congestion, traffic accidents, and environmental pollution have become increasingly prominent, posing urgent demands for the intelligence and greening of transportation systems. This study aims to explore the current development status, applications, and future trends of self-sensing and self-healing road surface technologies in the context of smart transportation. As urbanization accelerates, traffic congestion, safety, and environmental issues are becoming increasingly prominent. Smart transportation, as an important means of addressing these issues, has information acquisition, processing, and application as its core. Self-sensing and self-healing road surfaces, as crucial components of smart transportation, provide new technical pathways for achieving an intelligent, efficient, and safe transportation system.

Keywords: smart transportation; self-sensing; self-healing road surfaces; development trends

引言

(一) 研究背景

1. 智慧交通的快速发展

近年来, 随着物联网、大数据、人工智能等技术的迅速发展, 智慧交通已成为全球交通行业的发展趋势。智慧交通系统通过集成先进的信息和通信技术, 实现了对交通流的实时监测、预测与优化, 极大地提高了交通效率, 减少了交通事故, 同时也为环境保护和可持续发展提供了新的解决方案。在这一背景下, 路面作为交通基础设施的重要组成部分, 其智能化升级成为智慧交通发展的重要一环^[1]。

2. 路面损坏和维护成本的挑战

传统路面材料和设计在面对日益增长的交通流量和复杂多变的环境条件时, 面临着频繁损坏、维护成本高昂的问题。路面损坏不仅影响行车安全和舒适度, 还增加了交通拥堵的可能性, 对环境和经济造成负面影响^[2]。因此, 探索新型路面材料和技术, 提高路面的耐久性和自修复能力, 成为智慧交通领域的重要研究方向。

将自愈合材料与智能应用传感器结合, 开发设计路面损伤传感器和修复触发元件, 实现智能路面结构与自愈合材料一体化, 使路面具备自感知、自修复的能力。

通过实时监测路面状态和自动修复损伤, 减少因路面问题导致的交通事故。自感知路面能够提供实时交通信息, 帮助交通管理系统做出更快速和准确的决策。自愈合路面减少了人工维护的需求, 降低了长期的维护成本^[3]。

基金项目: 东南大学成贤学院青年教师科研发展基金(项目编号: z0032)。

作者简介:

高楠(2002.11-), 男, 汉族, 山西大同人, 东南大学成贤学院 土木与交通工程学院, 本科, 研究方向为道路工程;
刘卓群(2001.12-), 女, 汉族, 山西孝义人, 东南大学成贤学院 土木与交通工程学院, 本科, 研究方向为道路工程;
张金梁(2003.06-), 男, 汉族, 陕西安康人, 东南大学成贤学院 土木与交通工程学院, 本科, 研究方向为道路工程;
张茗崴(2003.11-), 男, 回族, 江苏徐州人, 东南大学成贤学院 土木与交通工程学院, 本科, 研究方向为道路工程;
鞠达(1988.10-), 女, 汉族, 山东聊城人, 东南大学成贤学院 土木与交通工程学院, 硕士, 讲师, 从事工程造价、道路工程研究。

一、智慧交通与自感知路面

(一) 智慧交通概述

1. 技术发展现状

智慧交通技术的发展正处于快速发展的阶段，云计算、大数据、人工智能（AI）、物联网（IoT）等前沿技术的应用^[4]，正深刻地改变着交通行业的面貌。这些技术不仅加速了经济增长，促进了社会发展，还在双碳目标的引领下，推动智慧交通体系的构建，形成了一个日益成熟的产业链条。

2. 智能交通系统特点

智能交通系统（ITS）是智慧交通的前身，它将人、车、路综合起来考虑，运用信息技术、数据通信传输技术、电子传感技术等，有效集成并应用于交通运输管理体系中，提高了交通运输效率，保障了交通安全，改善了交通环境，提高了能源利用效率。智能交通系统的“智能”特征是其区别于传统交通运输系统的根本^[5]。

智慧交通系统的组成包括应用子系统（如交通信息采集系统、信号灯控制系统等）、交通信息服务中心、指挥控制中心等，这些子系统和中心通过信息技术实现对交通网络的监控、优化和管理，提高交通系统的运行效率和安全性^[6]。

(二) 自感知路面概念

1. 定义和原理

自感知路面是一种新型路面结构，它能够自主感知路面的物理和环境条件，包括但不限于路面的磨损程度、湿度、温度、裂缝、冰冻状态等，从而实时监测路面的健康状况和安全性能。这种技术的应用，旨在提升道路维护的效率、交通安全以及交通管理的智能化水平。

自感知路面是一种集成了智能感知技术的路面系统，能够实时监测和反馈路面状态。传感器的种类和数量根据路面的具体需求和监测目的而定。在一些先进的自感知路面设计中，还采用了智能材料，如导电聚合物、形状记忆合金、纳米复合材料，是材料科学领域的重要突破，它们能够感知外部环境变化并做出响应，具有自适应性、记忆性、传感性和驱动性等智能特性^[7]。

2. 相关技术与应用

自感知路面技术涉及多种传感器技术，如压力传感器、加速度传感器、声音传感器等，以及无线通信技术。

自感知路面技术的发展还包括了路面嵌入式传感器的自供电技术，以及电动汽车动态无线充电技术，这些技术有助于实现车辆在行驶过程中的自充电功能，提高电动汽车的续航能力。

二、自愈合路面技术

(一) 自愈合路面原理

自愈合路面技术的核心在于使用具有自修复能力的材料，这些材料能够在路面出现裂缝或损伤后，通过内部机制自动修复，从而恢复路面的完整性和功能。材料特点和机制主要包括：

微胶囊技术在路面材料中嵌入微胶囊，内含修复剂如聚合物、环氧树脂等，当路面受损时，微胶囊破裂，释放修复剂，与裂缝壁面接触后硬化，修复裂缝。形状记忆合金利用形状记忆合金的特性，当路面温度变化或受到应力时，合金恢复原始形状，促使裂缝闭合。自愈合聚合物某些聚合物材料在受到损伤后，其分子链可以

重新排列，形成新的化学键，自动修复损伤。生物矿化利用微生物在特定条件下产生碳酸钙等矿物，填充裂缝，实现自愈合^[8]。

自愈合路面的工作原理通常包括损伤感知、修复剂释放、损伤修复三个阶段。当路面受到外力作用，出现裂缝时，裂缝会延伸到含有微胶囊的区域。裂缝的形成导致微胶囊破裂，修复剂被释放出来。释放的修复剂在裂缝中扩散，与空气或裂缝壁面的水分、氧气等发生反应，形成固体物质，填充裂缝，完成修复过程。

(二) 自愈合路面分类

表1 自愈合路面的分类及案例表

自愈合技术分类	技术原理	案例	应用环境	优势
微胶囊自愈合	封装修复剂于微胶囊中，裂缝形成时胶囊破裂，释放修复剂。	荷兰代夫特理工大学微胶囊混凝土项目	高应力道路、桥梁	快速修复、成本效益高
生物自愈合	利用微生物或其代谢产物在裂缝处形成沉积。	英国自愈合混凝土项目	低应力环境，如人行道、非主干道	环境友好、可持续
纳米技术自愈合	添加纳米材料，如碳纳米管、石墨烯，提高机械性能和自修复能力。	中国科学院碳纳米管自愈合沥青项目	高性能要求道路	高强度、高韧性
压电材料自愈合	利用压电材料在受力时产生电荷，促进修复过程。	概念阶段，未有广泛应用案例	智能道路监测与修复	能量自给、智能响应
热塑性聚合物自愈合	热塑性聚合物在加热后流动填充裂缝，冷却后恢复性能。	美国德克萨斯州立大学热塑性自愈合沥青项目	温度波动大区域	良好的热可逆性

技术原理微胶囊自愈合：通过在混凝土或沥青中添加含有修复剂的微胶囊，当路面出现裂缝时，微胶囊破裂释放修复剂，促进裂缝的愈合。

生物自愈合：利用微生物或其代谢产物在裂缝处形成沉积，例如某些细菌可以产生碳酸钙，用于填充和修复混凝土中的裂缝。

纳米技术自愈合：在路面材料中加入纳米材料，如碳纳米管、石墨烯等，这些材料可以提高路面的强度和韧性，同时在损伤后促进自我修复。

压电材料自愈合：通过在路面中嵌入压电材料，利用其在受力时产生的电荷，为激活或促进修复过程提供能量。

热塑性聚合物自愈合：热塑性聚合物具有良好的热可逆性，可以在加热后重新流动并填充裂缝，冷却后恢复其原有性能。

微胶囊自愈合：适用于高应力道路和桥梁，能够快速修复裂缝，提高成本效益。

生物自愈合：环境友好，适用于低应力环境，如人行道和非主干道，促进可持续发展。

纳米技术自愈合：适用于对路面性能有高要求的环境，如高性能要求道路，提供高强度和高韧性。

压电材料自愈合：概念阶段，未有广泛应用，但未来可能适用于智能道路监测与修复，实现能量自给和智能响应。

热塑性聚合物自愈合：适用于温度波动大的区域，如季节变化明显的地区，具有良好的热可逆性。

三、智慧交通背景下自感知和自愈合路面的应用

(一) 应用场景

1. 智慧城市中的自感知路面

在智慧城市的发展框架下，自感知路面作为智慧交通的重要

组成部分，正逐步从概念走向实际应用，通过集成传感器网络和智能材料，实时监测路面状况，为城市交通管理、维护和安全提供数据支持。

在中国深圳，自感知路面通过在关键路段部署传感器网络，实时监测路面状况，不仅用于优化交通信号控制，减少交通拥堵，还能够预测和预防路面损坏，实现预防性维护，提高道路使用寿命和行车安全^[9]。

2. 智能交通系统中的自愈合路面

自愈合路面技术作为智能交通系统中的一个重要组成部分，正逐步在实际中得到应用，通过材料科学的创新，实现路面损伤的自动修复，从而延长道路寿命，降低维护成本，提升交通安全和效率。

自愈合路面技术在智能交通系统中的应用，标志着道路维护和管理进入了一个新的时代。通过材料科学的创新，这些技术能够自动检测并修复路面损伤，延长道路寿命，降低维护成本，提升交通安全和效率。随着技术的不断进步和应用的深入，自愈合路面将成为构建智能、绿色、安全交通体系的重要组成部分。

(二) 优势与挑战

1. 优势分析

自愈合路面减少了因路面损坏导致的车辆颠簸和燃油消耗，降低了交通排放，有助于减少温室气体排放，对抗气候变化。自感知路面的环境监测功能，如监测空气质量、温度、湿度等，有助于城市空气质量的管理和环保政策的制定。自感知与自愈合路面技术的融合应用，不仅解决了传统道路维护和管理中的诸多问题，还为智慧城市的可持续发展和智能化建设提供了新的思路 and 解决方案，是智慧城市基础设施建设的重要组成部分^[10]。

2. 技术挑战及解决方案

传感设备在恶劣的路面环境下需要保持稳定工作，提高传感器的耐久性和数据传输的可靠性是关键。解决方案包括使用更先进的封装技术，增强传感器的防护，以及开发更稳定的无线传输协议。自感知和自愈合路面技术的集成需要跨学科合作，实现不同技术之间的兼容和标准化，以促进技术的广泛应用。通过技术创新、跨学科合作以及政策支持，可以逐步解决技术难题，推动自感知和自愈合路面技术在智慧交通领域的广泛应用，为构建更安全、高效、绿色的交通体系做出贡献。

四、发展趋势与展望

(一) 未来发展趋势

1. 技术创新和应用前景

在智慧交通的大背景下，自感知路面和自愈合路面作为智能基础设施的关键组成部分，正引领着道路工程领域的技术革命。这些创新不仅提高了道路的安全性、耐久性和维护效率，还为实现更加智能、绿色和可持续的交通系统提供了可能。

自感知和自愈合路面在智慧交通背景下的应用，不仅推动了道路工程领域的技术创新，还为构建更加智能、安全、绿色和可持续的交通系统提供了坚实的基础。随着相关技术的不断成熟和应用场景的拓展，自感知和自愈合路面的未来发展前景十分广阔。

2. 行业发展方向和挑战

随着技术的多样化，标准化和不同系统之间的兼容性将成为行业发展的关键，需要建立统一的技术标准和数据接口。高成本是限制自感知和自愈合路面技术广泛应用的障碍，如何在提高技术性能的同时降低成本，实现长期的经济效益，是行业面临的挑战。技术的推广需要相关政策和法规的支持，包括对新技术的认证、数据安全与隐私保护等方面的法规制定。通过将自感知和自愈合路面技术与智能交通信号控制、自动驾驶技术等结合，构建一体化的智慧路网系统，实现交通流的优化，提高道路通行效率，减少交通事故。自感知和自愈合路面技术的应用，有助于减少道路维护的能源消耗和碳排放，促进交通系统的绿色转型，符合可持续发展的目标。

(二) 展望

1. 智慧交通与自感知自愈合路面的融合发展

智慧交通系统将自感知自愈合路面技术深度融合，构建更加智能化、可持续的交通基础设施。通过实时监测和智能修复，减少道路维护的频率和成本，提升交通效率，降低环境污染，为公众提供更加安全、便捷的出行体验。

2. 未来研究方向与重点

研究新型智能材料，提升自愈合效率和耐久性，降低修复成本。利用大数据和 AI 技术，实现对路面健康状况的精准预测，优化交通管理策略。推动不同技术的集成与标准化，构建统一的智慧交通生态系统，促进技术的广泛应用和可持续发展。随着技术的不断进步和应用的深入，自感知和自愈合路面将在智慧交通领域发挥越来越重要的作用，为建设智能、绿色、安全的城市交通系统贡献力量。

五、结论

自感知和自愈合路面技术在智慧交通中的应用，标志着交通基础设施建设进入了一个全新的阶段。通过实时监测路面状况，智能预警潜在问题，以及自动修复损伤，这些技术不仅显著提升了道路的维护效率和安全性，还为智能交通系统提供了宝贵的数据支持，优化了交通管理，减少了交通拥堵和环境污染。在智慧城市和智慧交通的发展背景下，自感知和自愈合路面技术的重要性日益凸显，它们不仅是提升道路耐久性和交通效率的关键，也是实现可持续交通和智能城市目标的重要组成部分。

参考文献

- [1] 耿显庆. 藏南地区沥青自愈合性能及其衰变抑制技术研究 [D]. 重庆交通大学, 2023.
- [2] 姜添轶. 微胶囊型自愈合沥青制备与性能研究 [D]. 重庆交通大学, 2023.
- [3] 张伟. 碳纤维沥青混凝土感应加热自愈合行为研究 [D]. 重庆交通大学, 2022.
- [4] 张苏龙, 李华, 王捷. 沥青路面裂缝自愈合微胶囊关键性能试验研究 [J]. 交通世界, 2021, (33): 70-72.
- [5] 郗然. 掺导电材料的 SMA 感应热自愈合特性及其路面抗滑特性早期演变 [D]. 重庆交通大学, 2021.
- [6] 徐衍亮, 朱宏亮, 赵文政, 陈广辉. 自愈合沥青路面施工技术研究 [J]. 交通世界, 2021, (09): 90-91+97.
- [7] 徐锐光. 钠盐侵蚀对沥青自愈合与疲劳特性的影响研究 [D]. 广西大学, 2020.
- [8] 李利强, 任俊颖, 余和德, 等. 导电作用下碳纳米管-碳纤维沥青混合料的自愈合研究 [J]. 功能材料, 2024, 55(1): 1151-1157. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2024.01.020.
- [9] 耿显庆. 藏南地区沥青自愈合性能及其衰变抑制技术研究 [D]. 重庆交通大学, 2023.
- [10] 张翼, 谢政专, 韦宗, 等. 微胶囊改性沥青及混合料自愈合行为分析 [J]. 当代化工, 2023, 52(12): 2819-2824.