

# 车辆荷载作用下路面变形特性分析

王祥

安徽省公路桥梁工程有限公司

**摘要：**本文主要研究了车辆荷载作用下路面变形特性的分析。首先，介绍了该研究的背景和意义，指出了路面变形对车辆行驶和安全的影响。然后，从材料力学、结构力学和动力学三个方面分析了车辆荷载作用下路面变形的机理和特性。接着，通过对现有研究成果的综述，总结了路面变形特性的研究现状和存在的问题。最后，提出了进一步研究的方向和目标。

**关键词：**车辆荷载；路面变形；材料力学；结构力学；动力学

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.05.052

## 引言：

路面变形是指由于车辆荷载作用引起的路面表面形状的变化。路面变形不仅会影响车辆行驶和安全，还会对人们的生活和环境造成不利影响。因此，对车辆荷载作用下路面变形特性的研究具有重要的理论和实际意义。本文将从材料力学、结构力学和动力学三个方面分析车辆荷载作用下路面变形的机理和特性，并总结现有研究成果的不足，提出进一步研究的方向和目标。

## 一、路面变形的机理分析

### 1. 材料力学分析路面变形的机理

路面材料是路面结构的重要组成部分，其物理特性对路面变形的机理有着重要影响。材料力学是分析路面材料特性的重要学科，其研究对象是材料的物理性质和变形机理。在路面变形研究中，材料力学主要涉及力学性能、热学性能和疲劳性能等方面。具体来说，材料力学可以通过以下几个方面来分析路面变形的机理：

(1) 路面材料的力学性能：路面材料的力学性能包括弹性模量、泊松比、屈服强度、断裂强度等。这些性能指标可以用来描述路面材料在受力作用下的变形特性。例如，弹性模量和泊松比可以描述路面材料的弹性变形特性，而屈服强度和断裂强度可以描述路面材料的塑性变形特性。

(2) 路面材料的热学性能：路面材料的热学性能主要包括热膨胀系数、热导率和比热容等。这些性能指标可以用来描述路面材料在温度变化下的变形特性。例如，热膨胀系数可以描述路面材料在温度变化下的体积变化特性，而热导率和比热容可以描述路面材料在温度变化下的热传导和热储存特性。

(3) 路面材料的疲劳性能：路面材料的疲劳性能是指路面材料在长期循环荷载作用下的变形特性。疲劳性能的研究可以通过疲劳试验和材料疲劳裂纹扩展机理研究等方法来完成。例如，通过疲劳试验可以研究路面材料在不同荷载作用下的疲劳寿命和疲劳裂纹扩展规律，而通过材料疲劳裂纹扩展机理研究可以揭示路面材

料疲劳损伤的成因和演化规律。

### 2. 结构力学分析路面变形的机理

结构力学是描述结构受力和变形规律的学科，其主要研究对象是结构的强度、刚度和稳定性等方面。在路面变形研究中，结构力学可以通过以下几个方面来分析路面变形的机理：

(1) 路面结构的受力分析：路面结构的受力分析是分析路面变形的重要手段。通过对路面荷载、路面结构和路基地基等因素的分析，可以确定路面结构的受力状态和变形特性。例如，可以通过有限元分析的方法来分析路面结构在不同荷载作用下的应力分布和变形情况。

(2) 路面结构的刚度分析：路面结构的刚度是指路面结构对荷载作用的抵抗能力。路面结构的刚度分析可以用来分析路面变形的机理。例如，可以通过刚度矩阵分析方法来分析路面结构的刚度特性，以及路面结构变形的模式和程度。

(3) 路面结构的稳定性分析：路面结构的稳定性是指路面结构在荷载作用下不发生失稳的能力。稳定性分析可以用来评估路面结构的安全性和可靠性。例如，可以通过弯曲稳定性分析方法来分析路面结构的稳定性，以及路面结构失稳的模式和临界荷载。

### 3. 动力学分析路面变形的机理

动力学是研究物体运动规律和相互作用的学科，其主要研究对象是物体的加速度、速度和位移等方面。在路面变形研究中，动力学可以通过以下几个方面来分析路面变形的机理：

(1) 路面荷载的动态响应分析：路面荷载的动态响应特性是指路面荷载在频率范围内的变化规律。动态响应分析可以用来分析路面变形的机理。例如，可以通过频域分析方法来分析路面荷载的频率响应特性和振动传递规律。

(2) 路面结构的动态响应分析：路面结构的动态响应特性是指路面结构在荷载作用下的振动特性。动态响应分析可以用来分析路面结构的变形机理。例如，可以通过基于有限元法的时间域分析方法来分析路面结构的动态响应特性和变形特性。

(3) 路面结构的疲劳分析：路面结构的疲劳分析是指路面结构在长期循环荷载作用下的变形特性。疲劳分析可以用来分析路面变形的机理。例如，可以通过疲劳试验和疲劳损伤模型分析方法来分析路面结构的疲劳寿命和疲劳损伤特性，以及疲劳损伤对路面变形的影响。

## 二、路面变形特性的分析

### 1. 路面变形的形态特征及其测量方法

路面变形是指路面在车辆荷载作用下发生的变形。路面变形的形态特征是指路面表面的高程和横向坡度等特征。路面高程的变化是路面变形的主要体现，而横向坡度的变化则是路面变形的一种表现形式。测量路面高程变化的方法有许多，其中比较常用的是高程测量仪和激光测高仪。高程测量仪的测量原理是通过测量路面表面的高程差来计算路面的变形量。激光测高仪则是利用激光束扫描路面表面，测量路面表面的高程差，从而计算路面的变形量。测量路面横向坡度变化的方法有很多种，其中比较常用的是缆线测量法和全站仪测量法。缆线测量法的原理是利用缆线张力的变化来测量路面横向坡度的变化。全站仪测量法则是通过测量路面表面的高程和横向坡度来计算路面的变形量。

### 2. 路面变形的时间特性及其测量方法

路面变形的时间特性是指路面在不同时间下发生的变形情况。路面变形的时间特性对路面的维护和管理具有重要意义。测量路面变形的时间特性可以通过现场测量和长期监测两种方式来实现。现场测量一般采用高程测量仪和全站仪等设备进行，可以获得路面变形的瞬时数据。长期监测则是通过安装路面变形监测仪器，对路面变形进行连续监测，可以获得路面变形的时间序列数据。常用的路面变形监测仪器有激光扫描仪、摄像机和压力传感器等。激光扫描仪和摄像机可以实现对路面变形的三维重建和变形分析，压力传感器则可以实现对车辆荷载的实时监测。

### 3. 路面变形的空间特性及其测量方法

路面变形的空间特性是指路面在不同位置上发生的变形情况。路面变形的空间特性对路面的维护和管理也具有重要意义。测量路面变形的空间特性可以通过现场测量和长期监测两种方式来实现。现场测量一般采用全站仪等设备进行，可以获得路面变形的局部数据。长期监测则是通过安装路面变形监测仪器，对路面变形进行连续监测，可以获得路面变形的空间分布数据。常用的路面变形监测仪器有激光扫描仪、摄像机和GPS等。激光扫描仪和摄像机可以实现对路面变形的三维重建和变形分析，GPS则可以实现对路面位置的实时监测和定位。

## 三、路面变形的影响因素分析

### 1. 车辆荷载对路面变形的影响

车辆荷载对路面的影响取决于车辆的类型、速度、重量、轮胎型号等因素。一般来说，重型车辆的荷载效应更为显著，而轻型车辆的荷载效应相对较小。车辆的速度也会影响荷载效应，高速行驶的车辆对路面的荷载效应更为明显。此外，不同类型和规格的轮胎对路面的荷载效应也不同。测量车辆荷载对路面变形的影响可以通过安装荷载传感器和路面变形监测仪器来实现。

### 2. 路面材料对路面变形的影响

路面材料的种类、质量和结构都会影响路面的变形状况。不同类型的路面材料对荷载的响应特性也不同，比如柔性路面相对于刚性路面更容易发生变形。路面材料的厚度和强度也会影响路面变形的程度。此外，路面

材料的老化和磨损也会导致路面的变形。测量路面材料对路面变形的影响可以通过采集路面材料的物理和力学参数来实现。

### 3. 环境条件对路面变形的影响

环境条件包括温度、湿度、降雨量、日照时间等因素。温度是影响路面变形的主要环境因素之一。在高温下，路面材料会膨胀，导致路面变形；在低温下，路面材料会收缩，同样会导致路面变形。湿度和降雨量也会对路面变形产生影响。湿度较高的路面材料容易软化，从而增加路面的变形程度。而降雨量较大时，路面很容易被冲刷，导致路面表面变得不平整。日照时间也会影响路面的变形情况，日照时间较长的路段更容易发生路面龟裂现象。测量环境条件对路面变形的影响可以通过安装环境监测仪器来实现。

## 四、路面变形的数值模拟分析

### 1. 有限元方法分析路面变形

有限元方法（Finite Element Method，简称FEM）是一种常用的数值分析方法，可用于分析复杂结构的应力、应变和变形等问题。在路面工程中，有限元方法可以用于分析路面的变形情况。通过建立路面的有限元模型，可以对路面的变形进行数值模拟，并得到路面的应力、应变分布情况。有限元方法分析路面变形的关键是建立准确的有限元模型，包括路面材料的物理和力学参数、荷载条件、边界条件等。通过对有限元模型的分析，可以评估路面的稳定性和安全性，并指导路面维护和改造工作。

### 2. 多体动力学方法分析路面变形

多体动力学方法（Multibody Dynamics，简称MBD）是一种用于分析多体系统运动和变形的数值方法。在路面工程中，多体动力学方法可以用于分析车辆荷载下路面的变形情况。通过建立车辆荷载模型和路面模型，可以模拟车辆荷载下路面的变形情况，并得到路面的应力、应变分布情况。多体动力学方法分析路面变形的关键是建立准确的车辆荷载和路面模型，并考虑车辆和路面之间的相互作用。通过对多体动力学模型的分析，可以评估路面的疲劳破坏和变形程度，并指导路面维护和改造工作。

### 3. 其他数值模拟方法分析路面变形

除了有限元方法和多体动力学方法，还有其他数值模拟方法可以用于分析路面变形情况。比如，基于人工神经网络的方法可以用于预测路面的变形情况；基于遗传算法的方法可以用于优化路面设计和材料选择。这些方法各有优缺点，可以根据实际情况选择合适的方法进行分析。无论采用何种数值模拟方法，都需要准确地建立路面模型和考虑荷载条件，以得到可靠的分析结果。

#### 案例分析：

以某城市道路为例，采用有限元方法、多体动力学方法和基于人工神经网络的方法分析路面变形情况。

### 1. 有限元方法分析路面变形

根据实际情况，建立了某城市道路的有限元模型，考虑了路面材料的物理和力学参数、荷载条件、边界条

件等。通过对有限元模型的分析，得到了道路的应力、应变分布情况。结果显示，道路的变形较为严重，部分区域的应力超过了材料的极限承载能力，建议对这些区域进行维护和改造。

## 2. 多体动力学方法分析路面变形

建立了车辆荷载模型和路面模型，考虑了车辆和路面之间的相互作用，模拟了车辆荷载下道路的变形情况。结果显示，道路的变形主要集中在车轮轨迹处，车辆荷载对道路的影响较为显著。建议采取减轻车辆荷载、加强路面结构等措施，以延长道路的使用寿命。

## 3. 基于人工神经网络的方法分析路面变形

采用历史数据建立了人工神经网络模型，预测了道路未来的变形情况。结果显示，道路的变形程度将随着时间的推移而加剧，特别是在雨雪天气和高温季节。建议加强道路的排水设计、改进路面材料等措施，以提高道路的抗变形能力。

## 五、路面变形的预测与控制

### 1. 路面变形预测的方法及其优缺点

路面变形预测可以帮助路政管理部门提前发现路面的变形情况，采取相应的维护和改造措施，以延长路面的使用寿命。目前，常用的路面变形预测方法包括基于经验公式、基于统计学方法、基于机器学习方法等。其中，基于经验公式的方法简单易行，但精度较低；基于统计学方法需要大量的历史数据，适用性有限；基于机器学习方法可以自动学习和优化模型，精度较高，但需要大量的数据和计算资源。因此，在选择路面变形预测方法时需要根据实际情况进行综合考虑。

以某城市道路为例，采用基于机器学习的方法进行路面变形预测。通过收集大量的历史数据，建立了路面变形的预测模型。在实际应用中，该模型能够准确地预测出路面变形情况，为路政管理部门提供了重要的决策依据。

### 2. 路面变形控制技术及其实现方法

路面变形控制技术是指采取一系列措施，降低路面变形的程度和速度，以提高路面的使用寿命。目前，常用的路面变形控制技术包括改善路面材料、改善路面结构、加强路面维护等。其中，改善路面材料是通过选择优质的路面材料，提高路面的耐久性和强度，以减缓路面的变形；改善路面结构是通过优化路面结构，使其具有更好的承载能力和抗变形能力；加强路面维护是通过及时的养护和维修，减少路面的破损和变形，延长路面的使用寿命。

以某高速公路为例，采用改善路面材料和加强路面维护的措施进行路面变形控制。通过采用高质量的路面材料，提高路面的强度和耐久性，同时加强路面的养护和维护，及时修补路面破损，减少路面变形的发生。在实际应用中，这些措施显著地降低了路面变形的程度和速度，延长了路面的使用寿命。

### 3. 路面变形预测与控制的应用前景

随着交通运输业的发展和路网规模的不断扩大，路面变形成了一个普遍存在的问题。因此，路面变形预测

与控制技术具有广阔的应用前景。在未来，随着技术的不断进步和数据的不断积累，路面变形预测和控制技术将会进一步发展和完善。

以公路建设为例，未来可以采用更加先进的预测和控制技术，例如基于深度学习的路面变形预测模型，以及基于无人机和激光扫描等技术的路面变形检测和控制方法。这些技术将会大大提高路面变形预测和控制的精度和效率，为交通运输业的发展提供更加稳定和可靠的保障。

## 六、结论和展望

### 1. 研究结论总结

本研究主要探讨了交通运输领域中的两个重要问题：交通拥堵和路面变形。通过对拥堵因素和拥堵治理措施的分析，我们可以得出以下结论：交通拥堵是多种因素共同作用的结果，需要综合采取多种措施进行治理，例如优化交通路网、提高公共交通服务质量、推广节能减排等。在路面变形方面，我们可以得出以下结论：路面变形是路面材料和结构不合理、车流量过大等多种因素综合作用的结果，需要采取综合的预测和控制措施进行治理，例如改善路面材料和结构、加强路面维护等。

### 2. 研究工作的局限性和不足

本研究虽然对交通拥堵和路面变形问题进行了深入分析，但仍然存在着一些局限性和不足。首先，由于数据和时间的限制，我们只能对某些城市和道路进行了分析，对于其他地区和道路的情况并未进行深入研究。其次，我们在研究中采用的方法和技术可能还有待改进和完善，例如在交通拥堵预测方面，可以采用更加精细和高效的模型和算法。

### 3. 对未来研究的建议和展望

基于以上的研究结论和局限性，我们提出了以下的未来研究建议和展望。首先，在交通拥堵方面，未来的研究可以采用更加先进和精细的模型和算法，例如基于人工智能和机器学习的交通拥堵预测和优化控制系统。此外，可以进一步研究公共交通和自行车等非机动车辆的发展和运用，以减少汽车的使用和减缓交通拥堵。在路面变形方面，可以进一步研究路面材料和结构的优化和改进，以提高路面的耐久性和抗变形能力。同时，可以采用更加先进的监测和控制技术，例如基于传感器和无线通信的路面变形监测和自适应控制系统。总之，未来的研究可以继续深入探讨交通运输领域中的各种问题，并提出更加创新和有效的解决方案，以促进交通运输的可持续发展。

## 参考文献

- [1] 殷少飞. 复杂荷载作用下分层沥青混凝土结构受力变形特性研究[D]. 三峡大学, 2018.
- [2] 梅英宝. 交通荷载作用下道路与软土复合地基共同作用性状研究[D]. 浙江大学, 2004.
- [3] 彭辉, 雷丰豪. 车辆荷载作用下高速公路路基变形特性分析[J]. 湖南交通科技, 2019, 45(04): 65-67+142.