

# 基于 LCA 理论的路面建养期生态效益量化分析

罗秋苑<sup>1,2</sup>, 王家主<sup>1,2</sup>, 马子嵘<sup>1,2</sup>

(1. 福建省交通科研院所有限公司 福州市 350004; 2. 近海公路建设与养护新材料技术应用交通运输行业研发中心 福州市 350004)

**摘要:** 为了量化与对比分析常规沥青路面、水泥路面和水泥路面加铺超薄磨耗层的生态效益,基于生命周期评价理论(LCA),结合施工定额法与碳排放因子法计算了 3 种路面类型在建养期所产生的资源消耗、能源消耗和碳排放。结果表明:(1)相比常规水泥路面,新建沥青路面每年可降低 4.64% 的能耗和 73.67% 的碳排放;(2)加铺单层超薄磨耗层在设计使用寿命内所产生的资源消耗、能耗以及碳排放均比沥青路面降低了 83% 以上;(3)原材料生产与拌和运输是公路建设期碳排放的主要来源,是低碳公路建设重点关注领域。因此,相较于水泥路面,沥青路面可大幅度降低碳排放,生态效益显著。而在旧水泥路面上加铺超薄磨耗层可有效实现沥青路面施工的低碳化、绿色化。

**关键词:** 道路工程; 生态效益; 生命周期评价; 能耗; 碳排放

水泥路面与沥青路面作为我国公路的主要路面组成结构,在公路建设、养护期间会产生大量资源、能源消耗,是交通运输碳排放重点之一。在兴起的路面“白改黑”时代下,超薄磨耗层技术因其厚度薄、资源消耗少,也成为常用的新型低碳经济的公路建设方案之一<sup>[1]</sup>。然而,如何使得道路在使用寿命内达到最小化能耗和碳排放俨然成为公路方案比选的难题。近年来,多位学者基于全生命周期理论对不同路面类型的能耗以及 CO<sub>2</sub> 排放进行分析,表明应加强重视对路面使用阶段与养护阶段中随时间积累的环境影响因素<sup>[2]</sup>。孟祥晨<sup>[3]</sup>等基于工程建设拌和阶段的实际调研,通过回归分析法量化沥青路面建设期拌和阶段能耗与碳排放。陈云<sup>[4]</sup>等提出了沥青路面建设过程中能耗与碳排放的计算方法,将沥青路面建设期分为 5 个阶段,建立了能耗和碳排放的理论预估模型。宋庄庄<sup>[5]</sup>等以某已建高速公路的典型沥青路面为基础,针对使用阶段的 4 个不同养护阈值,分别对沥青路面 LCA 各个阶段进行能耗及排放评估。李慧<sup>[6]</sup>等以多个案例的公路物料及能源平均值为代表,运用生命周期评价法对其全生命周期各阶段的碳排放进行测算,并对评估结果进行敏感性分析。

由此可见,现有研究主要集中于以沥青路面为

研究对象,缺乏对水泥路面以及加铺超薄磨耗层的生态效益量化分析,难以直观体现出三者的生态效益对比。因此,本研究将基于全生命周期评价理论(LCA)对水泥路面、沥青路面以及水泥路面加铺超薄磨耗层等 3 种路面类型进行生态效益对比分析,通过量化资源消耗、能源消耗以及碳排放来体现三者的节能减排效益,为绿色交通建设提供有利依据,有利于交通相关部门整体把控绿色公路建设方案。

## 1 基本假定

### 1.1 LCA 计算流程

在公路全生命周期中,沥青路面的材料生产阶段、建设阶段以及养护维修阶段对环境产生的影响最大<sup>[3-5]</sup>。而水泥约有 92% 的碳排放来自生料煅烧时的矿物分解和工厂生产能耗<sup>[7]</sup>。因此,本文只考虑环境影响较为显著且与路面直接相关的材料生产、建设和养护阶段,对于施工造成的交通拥堵、道路照明所产生的能源消耗等不予以考虑。其中,路面养护工程主要考虑预防性养护以及日常养护,不考虑大中修和特殊养护。具体生态效益模型分析框架见图 1。

### 1.2 功能单元

为统一对比条件,本文选取的功能单元为国内

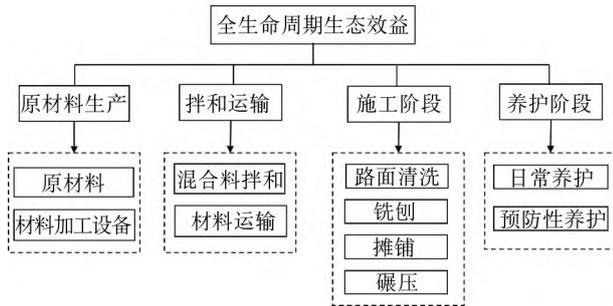


图1 路面 LCA 生态效益量化边界条件的界定

某典型 1 km 新建双向两车道二级公路路面,设计速度 40 km/h,路面宽度 10.5 m,且 3 种路面结构底基层、基层组成均为 20 cm5%水泥稳定碎石基层+20 cm5%水泥稳定碎石基层,面层结构如表 1 所示。假定原材料运输距离为 10 km,混合料运输距离为 5 km。具体能耗计算单元采用 1 km 路面结构耗费的能量,单位为 MJ/单元。排放单元则采用 1 km 相应路面结构在建造、养护时所排放的 CO<sub>2</sub>,单位为 kgCO<sub>2</sub>e/单元。

表 1 路面面层结构

序号	类型	厚度/cm	设计使用寿命/年
1	水泥混凝土面层	25	20
2	水泥面层加铺超薄沥青磨耗层	25+2	12
3	沥青混凝土面层	AC-13	4
		AC-20	6
		AC-25	8

## 2 生态效益测算模型

路面面层建设主要包括改性沥青、石油沥青、集料、水泥、碎石、砂、水等原材料。而施工的能耗、碳排放主要发生在各种机械设备和运输车辆上。因此,根据《公路工程机械台班费用定额》、《公路工程预算定额》及工程应用经验给定各面层的毛体积密度、油石比以及原材料含量占比如下。

(1)沥青混凝土面层:AC-13 的密度为 2.36 t/m<sup>3</sup>,油石比 5.2%;AC-20 的密度为 2.37 t/m<sup>3</sup>,油石比 4.9%;AC-25 的密度为 2.377 t/m<sup>3</sup>,油石比 4.0%。

(2)超薄沥青磨耗层:毛体积密度 2.5 t/m<sup>3</sup>,油石比 5.8%,集料含量 94.5%。

(3)水泥混凝土面层:毛体积密度 2.36 t/m<sup>3</sup>,水泥含量 19.2%,砂含量 21.3%,碎石含量 52.2%,水含量 7.3%

(4)喷洒型极薄沥青磨耗层:毛体积密度 2.5 t/m<sup>3</sup>,改性乳化沥青含量 17%,集料含量 83%。

本文采用定额法和碳排放因子法对路面建养期的车辆运输、施工机械等能源消耗、碳排放进行量化分析。

### 2.1 资源消耗计算

路面面层各原材料质量可分别根据式(1)、式(2)、式(3)计算得出:

$$q_{ag_i} = 1000 \times 10.5 \times T_i \times \rho_i / (1 + OAC_i) \quad (1)$$

$$q_{ap_i} = q_{ag_i} \times OAC_i \quad (2)$$

$$q_{j,k} = 1000 \times 10.5 \times T_j \times \rho_j \times P_{j,k} \quad (3)$$

式中: $q_{ag_i}$ 为第*i*类沥青面层的集料质量,t; $q_{ap_i}$ 为第*i*类沥青面层的沥青质量,t; $q_{j,k}$ 为第*j*路面的*k*类材料质量,t; $P_{j,k}$ 为第*j*类路面的*k*类材料占比; $T$ 为面层厚度,m; $\rho$ 为面层毛体积密度,t/m<sup>3</sup>; $OAC$ 为沥青面层的油石比; $i$ 为沥青路面面层类型; $j$ 为除沥青混凝土面层外的其余路面面层; $k$ 为原材料种类。

### 2.2 能耗计算

能耗主要集中在原材料物化阶段和施工阶段,使用的能源类型包括重油、柴油、汽油以及电力。结合欧洲沥青协会发布的沥青耗能因子、瑞典环境研究所的集料能耗因子、《中国能源统计年鉴》以及多篇文献中收集的材料、燃料热值作为能耗量化清单,如表 2、表 3 所示。结合式(4)、式(5)和机械定额法计算路面面层能耗热值。

$$EC_r = \sum q_r f_r \quad (4)$$

$$EC_m = \sum e_m n_m f_m \quad (5)$$

式中: $EC$ 为能源消耗量,MJ/单元; $q_r$ 为原材料质量,t; $f_r$ 为原材料加工能耗因子; $e_m$ 为每台班机械设备燃料消耗量,kg; $n_m$ 为机械设备台班数; $f_m$ 为机械能耗因子。

表 2 原材料生产加工阶段能耗量化清单

原材料类别	能耗
石油沥青/(MJ/t)	4 900
改性沥青/(MJ/t)	5 412.2
集料/(MJ/t)	37.33
碎石/(MJ/t)	35.4
砂砾/(MJ/t)	35.93
水泥/(MJ/t)	2 440
水/(MJ/m <sup>3</sup> )	10

表 3 机械能耗量化清单

燃料类别	能耗
重油/(MJ/kg)	40.4
柴油/(MJ/kg)	43
汽油/(MJ/kg)	44.3
电力/(MJ/(kW·h))	36

### 2.3 碳排放计算

结合政府间气候变化专门委员会(IPCC)的碳排放因子数据库与前人研究,本文综合整理得到碳排放量化清单如表 4 所示。采用碳排放因子法计算碳排放量:

$$CE_r = \sum q_r f_{c,r} \quad (6)$$

$$CE_m = \sum e_m n_m f_{c,m} \quad (7)$$

式中:  $CE$  为碳排放量,  $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{单元}$ ;  $f_{c,r}$  为原材料碳排放因子;  $f_{c,m}$  为机械碳排放因子。

表 4 材料、燃料碳排放量化清单

材料、燃料类型	单位碳排放
石油沥青/( $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ )	400.7
改性沥青/( $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ )	318.8
水泥/( $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ )	810.7
集料/( $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ )	2.5
碎石/( $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ )	3.87
砂砾/( $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ )	15.9
重油/( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	3.06
柴油/( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	3.12
汽油/( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	3.01
电力/( $\text{kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ )	0.93

## 3 不同路面生态效益量化分析

### 3.1 建设期生态效益

根据式(1)~式(3)以及不同路面参数,计算并对比 3 种路面类型的资源消耗质量分布情况及当量大小如图 2 所示。分析可知沥青路面资源消耗主要来源于集料,占到 95.64%。而其余 2 种路面的资源消耗则主要来源于碎石,分别占 48.12% 和 52.20%。其中,加铺超薄沥青磨耗层所需材料资源质量最高,其主要原因是来源于水泥路面建设,单层超薄沥青磨耗层所需资源仅占 7.81%。从资源总消耗质量考虑,沥青路面在建设期比水泥路面节约了 27.67% 的资源使用。

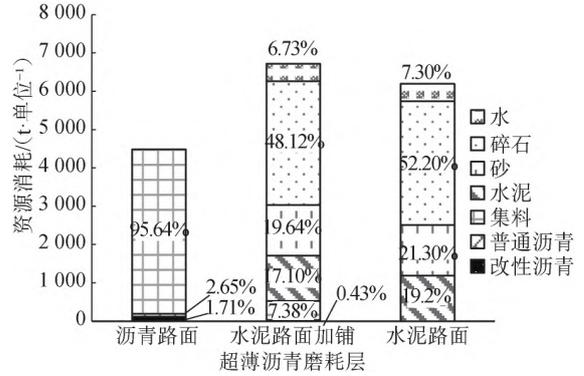


图 2 不同路面类型建设期资源消耗

按施工工艺流程将建设期分为 3 个主要阶段: 原材料生产—材料拌和运输—施工阶段。由式(4)~式(7)可得出建设期能耗与碳排放如图 3、图 4 所示。结果表明,在建设期中水泥路面加铺超薄磨耗层的能耗与碳排放均为最高,与水泥路面相比分别增长约 15.04%、2.96%;沥青路面具有明显的节能减排效果,相较于水泥路面能耗和碳排放减少了分别为 41.12%、86.71%。

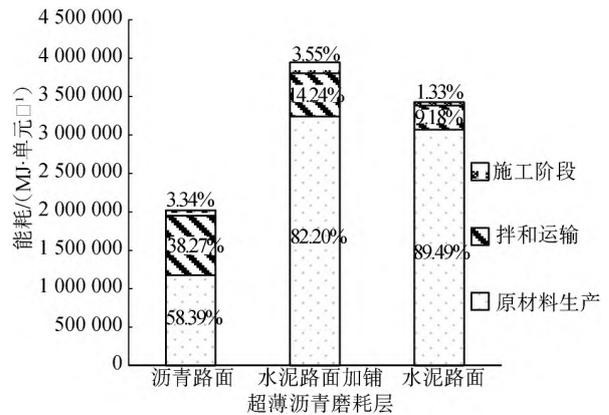


图 3 不同路面类型建设期能源消耗

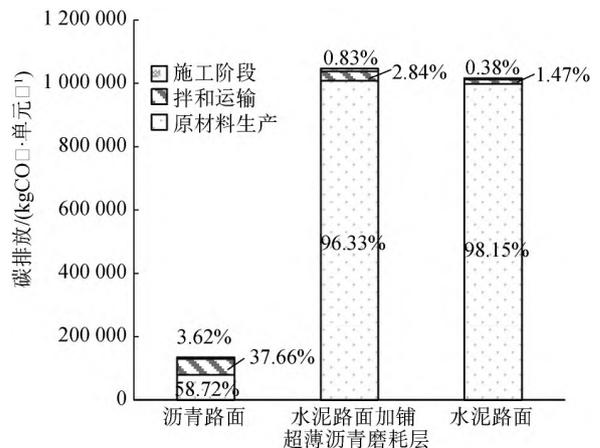


图 4 不同路面类型建设期碳排放

从施工工艺各个环节的能耗及碳排放占比分析可知,原材料生产是路面产生能耗和碳排放的主要来源,占比均达到了 50% 以上,且水泥混凝土材料生产阶段所产生的当量碳排放量和能耗远高于沥青混合料。施工阶段占比较少可忽略不计。受施工工艺特点和高能耗拌和设备影响,拌和运输阶段的生态效益位于第二。其中,沥青混合料拌和的能耗、碳排放分别是水泥拌和的 2.5 倍和 3.4 倍,而单层超薄磨耗层由于原材料较少,产生的能耗与碳排放远低于沥青路面。

### 3.2 养护期生态效益

表 5 养护期各路面的生态效益

生态效益/单元	沥青路面		水泥路面加铺超薄磨耗层		水泥路面	
	日常养护	预防性养护	日常养护	预防性养护	日常养护	预防性养护
资源消耗/t	—	315.00	—	315.00	—	630.00
能耗/MJ	133 114.75	445 640.49	133 114.75	445 640.49	219 821.83	891 280.98
碳排放/kgCO <sub>2</sub> e	9 371.73	27 175.48	9 371.73	27 175.48	15 469.83	54 350.96
年均资源消耗/t	26.25		26.25		31.50	
年均能耗/MJ	48 229.60		48 229.60		55 555.14	
年均碳排放/kgCO <sub>2</sub> e	3 045.60		3 045.60		3 491.04	

$$RC_{\text{养护}} = q_e n_{\text{pre}} / Y \quad (8)$$

$$EC_{\text{养护}} = (EC_{dn_d} + EC_{pre n_{pre}}) / Y \quad (9)$$

$$CE_{\text{养护}} = (CE_{dn_d} + CE_{pre n_{pre}}) / Y \quad (10)$$

式中:  $RC_{\text{养护}}$ 、 $EC_{\text{养护}}$ 、 $CE_{\text{养护}}$  分别是年均养护期间资源消耗、能源消耗以及碳排放,单位分别为 t/单元、MJ/单元、kgCO<sub>2</sub>e/单元;  $q_e$  为超薄磨耗层资源消耗质量, t;  $n$  为设计使用寿命内养护次数;  $Y$  为路面设计使用寿命;  $d$  为日常养护;  $pre$  为预防性养护。

由表 5 可知,因在设计使用寿命期间水泥路面加铺沥青磨耗层与沥青路面采用相同的养护措施,所以养护期的生态效益一致。二者与水泥路面相比

本文以路面寿命为分析期,假定日常年份进行小修养护,预防性养护每隔 4 年进行一次。其中,日常养护包含路面清扫、病害修复等,资源消耗较少可忽略不计;预防性养护采用原路面直接加铺 0.6 cm 的极薄磨耗层。该磨耗层资源消耗由原材料含量占比、毛体积密度以及式(3)计算所得。各路面单次养护所产生的能耗、碳排放由施工机械清单、量化清单和式(4)~式(7)计算可得。

结合路面设计使用寿命,每年因养护所产生的生态效益可由式(8)~式(10)计算,结果如表 5 所示。

每年均减少了 16.67% 的资源消耗,13.19% 的能耗以及 12.76% 的碳排放。一是因为水泥路面设计使用寿命较长,所需预防性养护次数较多;二是水泥路面在前 3 年主要采用水泥路面日常养护措施,在加铺极薄磨耗层后改为沥青路面日常养护措施,造成机械能耗和碳排放增多。

### 3.3 年均生态效益对比

将各路面在建设、养护所产生的生态效益相加,并除以相对应的设计使用寿命,可得到 3 种路面的年均生态效益,结果如表 6 所示。其中,加铺超薄磨耗层的总生态效益按 20 年水泥路面、12 年单层超薄磨耗层以及 12 年养护期之和计算。

表 6 不同路面建养期所产生的年均生态效益对比

年均生态效益	沥青路面	水泥路面加铺超薄磨耗层	水泥路面	单层超薄磨耗层
资源消耗/(t·年 <sup>-1</sup> )	399.67	379.75	341.25	38.50
能耗/(MJ·年 <sup>-1</sup> )	216 482.94	262 671.00	227 010.24	35 660.76
碳排放/(kgCO <sub>2</sub> e·年 <sup>-1</sup> )	14 304.70	56 383.25	54 319.93	2 063.32

由表 6 可知,从设计使用寿命角度分析,与水泥路面相比,沥青路面每年资源消耗增长了 17.12%,但能源消耗和碳排放分别降低了 4.64%、73.67%。

而单层超薄磨耗层比常规沥青路面在建养期减少了 90.37% 的资源消耗、83.52% 的能耗以及 85.58% 的碳排放,当应用于水泥路面“白加黑”工程时较加

铺常规沥青路面更具有生态效益。

#### 4 结语

针对现有公路在建养时造成的生态问题,本文结合 LCA 理论,以水泥路面、水泥路面加铺超薄沥青磨耗层和沥青路面为对比案例,通过量化和对比分析 3 种路面类型在建养期的资源消耗、能源消耗以及碳排放,为路面低碳化研究和绿色公路建设方案比选提供了进一步的参考依据。

(1)与水泥路面相比,常规沥青路面在建养期间虽然资源消耗较多,但是能有效降低生态环境影响,每年大约可减少 4.64% 的能耗与 73.67% 的碳排放。

(2)与常规沥青路面相比,单层超薄磨耗层能降低 83% 以上的生态影响。因此,采用加铺超薄磨耗层来提升水泥路面路用性能比常规“白加黑”方案更加绿色低碳,也更符合国家绿色交通建设理念。

(3)通过对比不同阶段的能耗与碳排放占比,可以明显发现原材料生产与拌和运输阶段产生的环境影响最大,从节能减排角度考虑,应重点寻找低碳施工技术、低碳材料等来降低原材料生产及加工过程的能耗与碳排放,如温拌沥青技术、冷拌冷铺等。

然而,本文研究范围仅界定于路面建设期和养护期,未涉及路面拆除、回收阶段,后续将进一步拓

展研究范围,形成完整的路面全生命周期量化与评价体系。

#### 参考文献:

- [1] 陈希周,骆根法,李仕锦,等.考虑经济成本的低交通量农村旧水泥路面超薄磨耗层加铺技术及应用[J].上海公路,2021,(3):6-10+152.
- [2] 何亮,李冠男,张军辉,等.路面全寿命周期能耗与 CO<sub>2</sub> 排放分析研究进展[J].长安大学学报:自然科学版,2018,38(4):10-20.
- [3] 孟祥晨,李源渊.沥青路面建设期拌和阶段能耗与碳排放量化研究[J].公路工程,2022,47(5):94-101.
- [4] 陈云,纪小平,周泽洪.沥青路面施工能耗与碳排放评价[J].公路,2019,64(6):260-265.
- [5] 宋庄庄,朱洪洲.沥青路面全寿命周期节能减排策略案例研究[J].中外公路,2020,40(5):36-42.
- [6] 李慧,彭夏清,张静晓.公路生命周期碳排放评估及其敏感性分析[J].公路工程,2021,46(2):132-138.
- [7] 俞海勇,杨辉,张贺,等.水泥生命周期碳排放研究[J].四川建材,2017,43(1):1-3.
- [8] 王家主,杨龙清.基于环氧复合沥青的嵌固抗滑极薄磨耗封层性能研究[J].福建交通科技,2020,(1):1-5+9.
- [9] 华春丽,李俊峰,洪盛祥.极薄磨耗层在水泥桥面“白改黑”工程中的应用研究[J].现代交通技术,2021,18(4):26-3.

## Quantitative Analysis of Eco-efficiency During Pavement Construction and Maintenance Period Based on LCA Theory

LUO Qiu-yuan<sup>1,2</sup>, WANG Jia-zhu<sup>1,2</sup>, MA Zi-rong<sup>1,2</sup>

(1. Fujian Provincial Transportation Research Institute Co. Ltd, Fuzhou 350004, China;

2. Research and Development Center of Transport Industry of New Materials,

Technologies Application for Highway Construction and Maintenance of Offshore Areas, Fuzhou 350004, China)

**Abstract:** To quantify and compare the eco-efficiency of normal asphalt pavement, cement pavement and cement pavement with ultra-thin wearing layer, the resource consumption, energy consumption and carbon emissions generated by the three pavement types during the construction and maintenance period are calculated based on the life-cycle assessment system (LCA) and combining the construction quota method and the carbon emission factor method in the paper. The results show that: (1) compared with conventional concrete pavements, new asphalt pavements can reduce energy consumption by 4.64% and carbon emissions by 73.67% per year; (2) the resource consumption, energy consumption and carbon emission generated by adding single-layer ultra-thin wearing layer in the design life are reduced by more than 83% compared with asphalt pavement; (3) raw material production and mixing transportation are the

# 车联网环境下交叉路口车辆入队与轨迹规划

李香芹<sup>1</sup>, 曹青松<sup>1</sup>, 易星<sup>2</sup>

(1. 江西科技学院 人工智能学院 南昌市 330098; 2. 江西科技学院 协同创新中心 南昌市 330098)

**摘要:** 针对车联网环境下的十字交叉路口车辆换道进入主路的交通场景,重点考虑交叉路口次路车右转弯加入主路车辆的情形,根据交叉路口车辆的行驶特征,建立次路车入队运动学模型和主路车队控制模型。对比分析主路车队采用不变间距控制策略和变间距控制策略,在给定初始条件下,分别获得车队给次路车预留间隙过程中车队车辆的位移和速度变化曲线。采用四阶贝塞尔曲线得到次路入队车辆在交叉路口的可行轨迹区域,并进行轨迹规划,以使入队车辆安全平稳入队。最后以 5 辆车队为例,利用 MATLAB 软件仿真分析主路车队在次路车辆入队过程的速度、位移的变化特点,并规划次路车的进入主路的轨迹路径。结果表明:主路车队采用变间距控制策略更有利于次路车安全平稳入队,次路车最佳入队位置与其速度、轨迹和初始位置有关。研究结果可为提高交叉路口通行效率和交通安全提供参考。

**关键词:** 交通流仿真; 智能车辆队列; 车联网车辆; 交叉路口; 入队控制; 轨迹规划

车联网技术的发展为车辆队列自动化控制提供了可靠基础,车辆队列自动化控制极大地简化了交通控制的复杂程度,是一种有效的提高交通安全、减轻道路拥堵、优化道路交通资源的重要控制手段,有望被广泛应用于智能交通领域<sup>[1-2]</sup>。

目前车辆队列控制研究引起了学者们的广泛关注,其研究主要侧重于车辆队列行驶的安全性和稳定性<sup>[3]</sup>。如朱政泽等<sup>[4]</sup>建立了车辆队列纵向控制模型,提出了解决通信丢包、乱序问题,提高了车队行驶稳定性。王靖瑶等<sup>[5]</sup>以智能电动汽车纵向队列稳定性为研究对象,考虑在通信延迟、外部干扰和参数不确定性情形下,提出了一种分布式自适应鲁棒控制方法。Desjardins 等<sup>[6]</sup>提出一种基于机器学习技术的协同自适应巡航控制器设计方法,使用

强化学习方法来确保前方车辆的纵向跟随稳定性。Ploeg 等<sup>[7]</sup>提出了基于分布式自适应鲁棒控制器的协同自适应控制模式,以车头间距、车辆速度、加速度等性能参数对比分析了前车跟随策略和领队车一前车跟随策略。杨泽宇等<sup>[8]</sup>建立了车队纵向动力学模型,考虑了通信拓扑、车队车辆间距及间距误差,提出了一种车队车辆纵向避撞性的分布式鲁棒控制方法,保证了车队的严格避撞性。陈文韬等<sup>[9]</sup>以乘用车队为例,建立车辆队列碰撞模型,仿真分析车辆队列在不同速度下的碰撞严重程度影响因素,分析了车辆长度、质量等车辆参数及车辆队列间距、规模等车队因素对碰撞严重程度的影响。上述研究大多假设车队车辆数量是固定的,以研究车队纵向跟随控制的稳定性和安全性研究为主,而没有考虑车

基金项目:国家自然科学基金,项目编号 51765021;江西省科技厅重点研发项目,项目编号 20181BBE50012;江西省教学改革项目,项目编号 JXJG-22-24-1、JXJG-21-24-11

收稿日期:2023-06-07

main sources of carbon emissions during highway construction, and are the key areas of low-carbon highway construction. As a result, new asphalt pavements are more ecologically efficient than concrete pavements and can significantly reduce carbon emissions. The addition of ultra-thin wear layer on the old concrete pavement can effectively realize the low-carbon asphalt pavement construction and reduce pavement consumables.

**Key words:** road engineering; eco-efficiency; life-cycle assessment; energy consumption; carbon emissions