

基于全寿命分析的高速公路抗车辙养护方案 比选

陈晨¹, 孙元媚², 刚子璇³, 肖玉帅³

¹山东高速集团有限公司, 山东 济南

²山东省交通运输厅工程建设事务中心, 山东 济南

³山东大学, 山东 济南

收稿日期: 2022年3月14日; 录用日期: 2022年5月4日; 发布日期: 2022年5月11日

摘要

为确定最佳的高速公路抗车辙养护方案, 本文在研究中将路面划分为超车道和行车道, 综合比较路面车辙和PCI值两个指标, 最终确定了高速公路各养护方案的养护时机。同时本文采用全寿命周期分析方法, 对比了四种养护方案的费用效率比, 结果表明中面层采用复合改性沥青混合料作为抗车辙养护材料时, 其路用性能最佳且在全寿命周期内费用也最低, 性价比优异, 可为路面抗车辙养护决策提供参考。

关键词

高速公路, 抗车辙, 全寿命周期分析法, 路面养护

Comparison and Selection of Anti-Rutting Maintenance Schemes of Expressway Based on Life Cycle Analysis

Chen Chen¹, Yuanmei Sun², Zixuan Gang³, Yushuai Xiao³

¹Shandong Hi-SPEED Maintenance Group Co., Ltd., Jinan Shandong

²Engineering Construction Affairs Center of Shandong Provincial Department of Transportation, Jinan Shandong

³Shandong University, Jinan Shandong

Received: Mar. 14th, 2022; accepted: May 4th, 2022; published: May 11th, 2022

Abstract

In order to determine the best anti-rutting maintenance scheme of the expressway, this paper divides the road surface into passing lanes and driving lanes in the study, comprehensively com-

compares the two indicators of road ruts and PCI values, and finally determines the maintenance timing of each maintenance scheme of the expressway. At the same time, the whole life cycle analysis method is used in this paper, the cost-efficiency ratio of the four maintenance schemes is compared, and the results show that when the middle surface layer adopts the composite modified asphalt mixture as the anti-rutting maintenance material, its road performance is the best and the cost is also the lowest in the whole life cycle, and the cost performance is excellent, which can provide a reference for the road surface anti-rutting maintenance decision.

Keywords

Highway, Anti-Rutting, Life Cycle Analysis, Pavement Maintenance

Copyright © 2022 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

目前高速公路在国民经济中扮演的角色越来越重要,但在路面服役过程中,由于温度、空气、雨水、紫外线以及荷载等综合作用,路面不可避免地会发生车辙病害,严重影响路面服役性能,因此需要及时对沥青路面进行维修养护,保证其处于较佳的服役状态。

在前期研究中利用基于废旧塑料的抗车辙剂和废旧轮胎的再生品橡胶粉进行复合改性,将得到的抗车辙路面材料应用于中面层后可以极大地减低路面车辙病害[1]。但是由于项目经费的约束,沥青路面的养护时机与方案设计是影响项目经济效益最大化的重要一环。

因此构建科学、合理的预防性养护决策模型,对保证路面使用性能,提高资金有效使用率有着重要意义。国内外开展了大量关于路面养护的研究工作。美国相继启动路面长期性能研究计划、NCHRPP14-14和NCHRPREPORT533等项目对路面养护的时机进行研究。孙立军找出路面养护决策模型的不足,构建基于多路用指标的养护决策模型。姚玉玲利用灰色关联度法为每个路用指标赋权,从而构建综合决策指标。但上述研究均为从全寿命周期(LCCA)的角度进行分析,LCCA法经过20多年的发展,开始被道路领域所接纳。其通过考虑项目的初始投入以及未来的其他费用,最终获得长期费用最佳的方案,作为养护方案比选的有效工具[2]。

本文以某高速公路养护工程为例,此高速公路路面损坏严重,车辙问题突出。根据前期研究发现,车辙主要产生在中面层[3],因此拟通过对中面层采用不同养护技术,以全寿命分析法比较不同方案的费效比,优选最佳处置措施,从而为路面养护决策提供参考。

2. 全寿命分析方法

学者们对新建道路的全寿命分析方法的研究成果颇丰,但鉴于本文的研究对象为道路的养护工程,同时为使计算更具针对性,因此在计算过程中主要考虑措施费用和用户费用。

2.1. 措施费用

按照当年的材料,人力等费用情况,计算每次养护方案实施时的终值,进而换算得到现值,各养护方案的等值费用计算方法如式1所示:

$$\text{measure_cost} = A \times h \times L \times W \times N / (1 + 6\%)^t \quad (1)$$

式中 $measure_cost$: 措施费用; A : 面层单价(元/m²); h : 面层厚度(cm); L : 面层长度(m); W : 面层宽度(m); N : 车道数; t : 分析期内第 t 年。

2.2. 用户费用

用户费用主要包括燃料消耗、轮胎磨耗以及保修材料等资源消耗的费用, 其受车辆特性、交通特性等影响[4], 同时本文以小汽车为标准, 建立各单项费用与 IRI 之间的关系如式 2:

$$\begin{cases} FL = a + b \times IRI \\ TC = NT(0.01165 + 0.001781 IRI) \\ PC = e \cdot k \cdot \exp(f \cdot IRI)CKM^{Kp} \end{cases} \quad (2)$$

式中: FL : 百公里油耗(L/100km); IRI : 国际平整度指数。TC: 每千车公里所消耗的当量新轮胎数; PC : 维修费用。

根据当地的经济情况, 本规划中燃油的单价取为 6.86 元/L, 小汽车新轮胎的单价取为 400 元/个, 新车单价取为 15 万元/辆。因此该研究中每 km 公路用户费用可用下式 3 计算得到:

$$UC = AADT \times \left(6.86 \times \frac{FL}{100} + \frac{TC}{100} + 150000 \times \frac{PC}{1000} \right) \quad (3)$$

由于用户费用的各组成部分均与 IRI 有关, 因此用户费用的计算只需知道 IRI 的值。结合现有研究, 建立路面养护方案的用户费用与路况指数 PCI 的关系如式 4:

$$\begin{cases} IRI = 2 - 5.6 \times (\lg 0.2 + \lg PCI) \\ user_cost_i = \int_{t_i}^{t_{i+1}} [IRI(t)] dt \end{cases} \quad (4)$$

式中 $user_cost_i$: 第 i 种养护方案的用户费用; t_i : 第 i 种养护方案的实施时间; t_{i+1} : 第 $i+1$ 种预防性养护措施实施的时间; $[IRI(t)]$: 实施预防性养护措施后 t 时刻用户费用值。

因此养护技术方案的总费用现值的计算如式 5 所示:

$$C_i = (MC_i + UC_i) / (1 + 6\%)^t \quad (5)$$

3. 路面养护技术方案

以路面结构、交通量、路面养护现状为划分依据, 将高速划分不同的养护单元, 同时本文提出四种中面层养护技术方案, 对每个养护单元的不同养护方案进行全寿命周期的经济效益分析。

3.1. 路面养护技术

1) 路面养护单元

在确定养护单元时, 根据该高速公路各车道在交通量上的差异, 将路面为超车道和行车道两个养护单元, 如表 1 所示。

Table 1. Division of maintenance units

表 1. 养护单元的划分

养护单元编号	养护单元
1	上行超车道
2	上行行车道

2) 养护技术

结合国内的技术现状和项目组前期的研究成果, 本文提出以下四种养护技术进行分析, 详见表 2。

Table 2. Four middle surface maintenance technologies

表 2. 四种中面层养护技术

方案编号	方案一	方案二	方案三	方案四
抗车辙 养护技术	基质沥青	SBS 改性沥青	0.3% 抗车辙剂	15%橡胶粉 + 0.3%再生 PE

3.2. 养护技术方案

1) 基于车辙指标的养护时机

结合前期所建立的基于温度场 - 轴载的车辙预估模型, 在不同中面层养护方案下, 将预测路面车辙发展到 15 mm 的时刻作为此方案下的预估养护时机, 其具体流程如图 1:

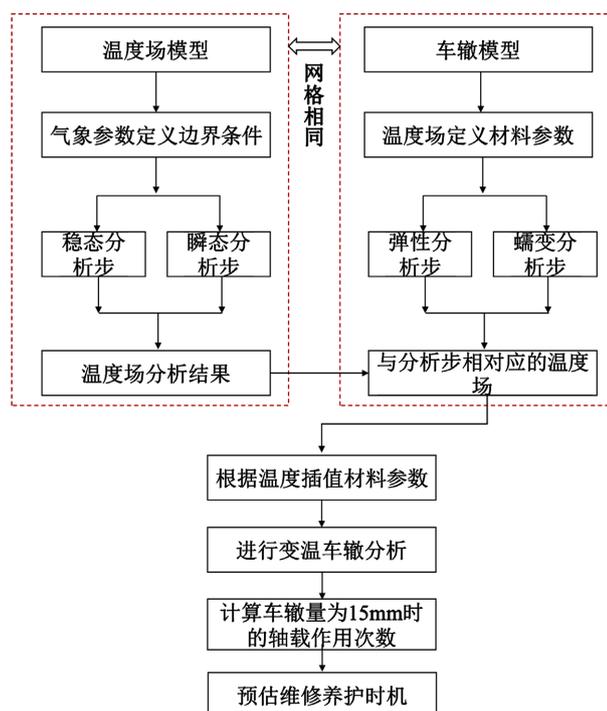


Figure 1. Maintenance time determined based on rutting estimation

图 1. 基于车辙预估确定的养护时机

同时以 15 年为分析期, 利用车辙预估模型可得到的四养护方案达到 15 mm 车辙量的预期寿命, 如表 3 所示。

车辙预估模型输入参数为交通轴载, 因超车道的标准轴载作用次数比行车道少, 故超车道在各种养护方案下以车辙控制的预期寿命比行车道长, 达到十年以上的预期寿命。

2) 基于 PCI 指标的养护时机

本文还结合路面 PCI 指标对路面维修后的预估使用寿命进行分析。采用孙立军教授的 PCI 衰变预测

模型[5]，如式 6 所示，建立 PCI 随轴载作用次数的变化规律，预估下一次路面养护维修时机。

Table 3. Life expectancy of 15 mm rutting amount as the standard
表 3. 以 15 mm 车辙量为标准的预期寿命

中面层养护技术	超车道	行车道
基质沥青	9~10	4~5
SBS 改性沥青	13~14	6~7
0.3%抗车辙剂	13~14	7~8
复合改性沥青	13~14	6~7

$$\begin{cases} PCI = PCI_0 \left\{ 1 - \exp \left[- (A/n)^B \right] \right\} \\ A = \lambda \left\{ 1 - \exp \left[- (\eta/l_0)^\zeta \right] \right\} \\ \lambda = a_1 \cdot h^{b_1} \cdot ESAL^{c_1} \\ \eta = a_2 \cdot h^{b_2} \cdot ESAL^{c_2} \\ \zeta = a_3 \cdot h^{b_3} \cdot ESAL^{c_3} \\ B = a_4 \cdot h^{b_4} \cdot ESAL^{c_4} \cdot l_0^d \end{cases} \quad (6)$$

式中：PCI₀：路面使用性能指标初始值，一般为 100；n：路龄；A，B：模型参数；h：新建路面面层厚度(cm)；ESAL：标准轴次/天/车道；l₀：初始弯沉(0.01 mm)；λ、η、ζ、a、b、c、d：回归系数。

本研究中路面 PCI 指标用路面弯沉值表征，PCI 衰变模型中的初始弯沉值参数 l₀，采用下式 7 得到四种养护方案的计算弯沉值如图 2 所示：

$$l_0 = 1000 \frac{2p\delta}{E_1} \alpha_c F \quad (7)$$

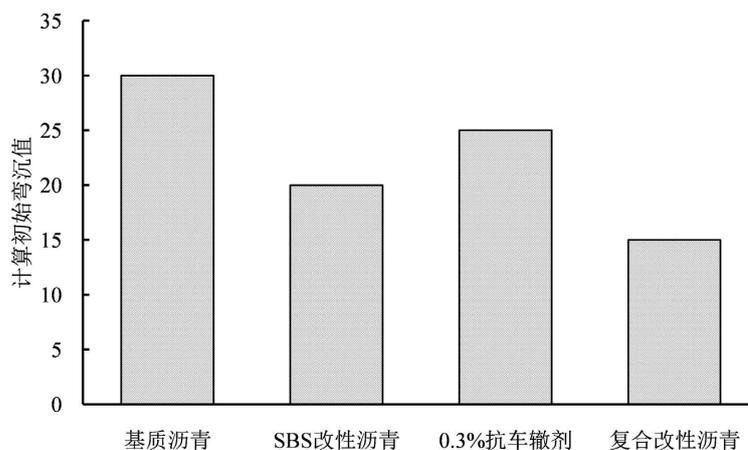


Figure 2. Calculated initial deflection value of four maintenance schemes
图 2. 四种养护方案的计算初始弯沉值

同时根据该高速公路的交通量数据和路面检测历史数据，确定上式中的参数如表 4 所示。

Table 4. PCI model parameters of different maintenance units**表 4.** 不同养护单元的 PCI 模型参数

养护技术类型	超车道		行车道	
	A	B	A	B
基质沥青	9.787	0.973	6.672	0.975
SBS 改性沥青	11.818	1.042	7.909	1.043
0.3%抗车辙剂	10.642	1.001	7.187	1.003
复合改性沥青	12.605	1.072	8.408	1.073

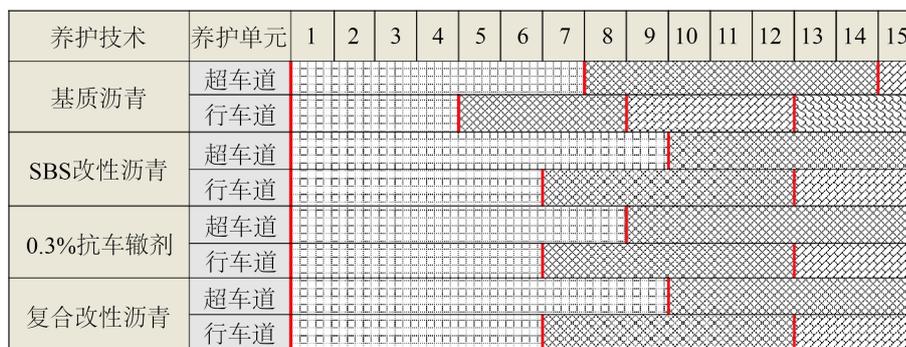
将表中的 A 、 B 值带入 PCI 模型中，可预测四种路面养护方案下路面结构 PCI 指标的变化情况，以 $PCI = 70$ 作为控制阈值，确定基于 PCI 指标的路面预估维修时机，见表 5。

Table 5. Estimated maintenance time of pavement based on PCI index**表 5.** 基于 PCI 指标的路面预估维修时机

养护技术类型	超车道	行车道
基质沥青	7~8	4~5
SBS 改性沥青	9~10	5~6
0.3%抗车辙剂	8~9	5~6
复合改性沥青	9~10	6~7

3) 综合车辙和 PCI 指标的养护时机

本文最终确定养护时机是以 $PCI = 70$ 、车辙量 = 15 mm 为控制阈值，当两种指标下的养护时机有交集时取该值，无交集时取最小年份，得到各养护单元在养护方案下的预期养护时机见图 3。



注：红杠代表养护时机。

Figure 3. Curing time of each curing unit**图 3.** 各养护单元的养护时机

3.3. 高速公路养护方案比选

本文通过对比不同养护方案的施工效果和费用成本，基于全寿命分析法，优选最佳养护方案。以下对四个养护单元逐个分析。

1) 效果评价

本文以15年为分析期,对各养护方案按照确定的维修时机进行实施,根据上述确定的PCI预测模型,即可得到路面PCI在15年内的变化,如图4,图5。

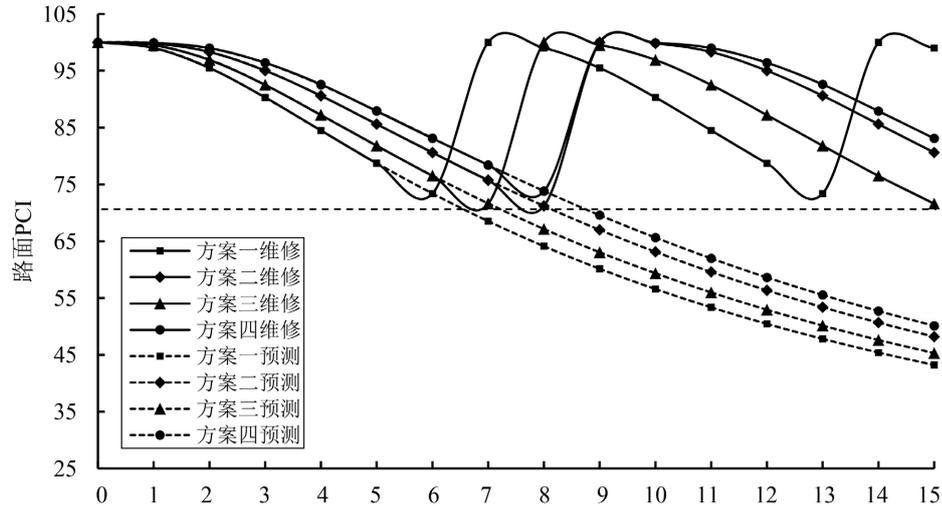


Figure 4. PCI prediction of overtaking lane under four maintenance schemes

图4. 四种养护方案下超车车道 PCI 预测

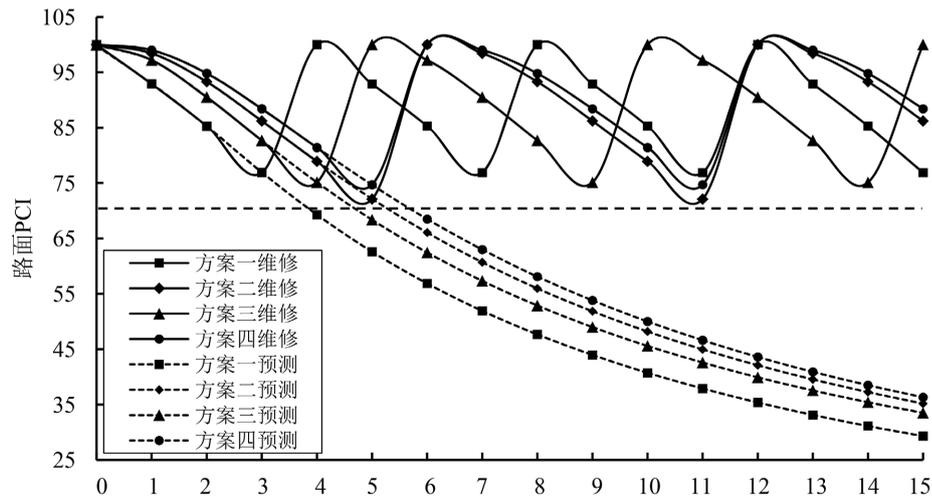


Figure 5. PCI prediction of down lane under four maintenance schemes

图5. 四种养护方案下行车道 PCI 预测

上图中虚线表示各种养护方案只实施一次时 PCI 的预测曲线,可以看出同一年内 PCI 指标排序为方案四 > 方案二 > 方案三 > 方案一,这表明对路面的抗车辙养护技术中,用复合改性沥青混合料作为中面层后路面的路用性能得到很大提高,而采用基质沥青效果最差。

若在每个养护时机处实施养护,则方案一需要两次,而方案二、三和四只需要实施一次,并且在15年的分析期限内,方案一和四能够保证较高水平的 PCI 状态进行运行,因而需要进行费用效益分析,以比选最佳养护方案。

2) 费用估算

本文在费用计算过程中,对于面层铣刨费用进行忽略,只根据各养护方案在材料和施工过程的差异进行费用计算。基于前述 LCCA 的计算方法,得到四种养护方案在 15 年内的初始维修费用、总维修费用、总用户费用,采用 6%折现率,得到分析期内用户总费用,如图 6,图 7 所示。

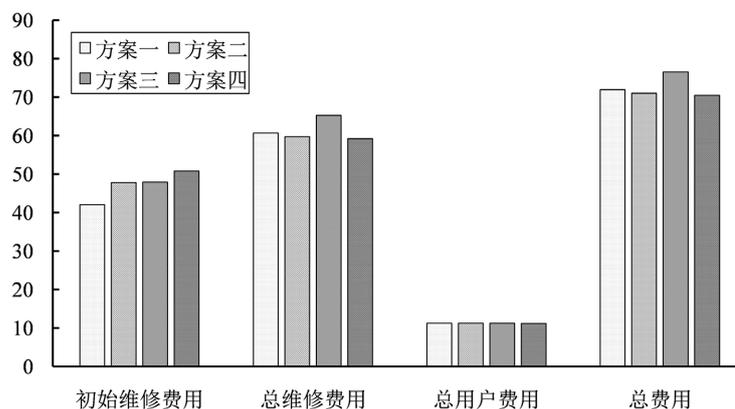


Figure 6. Cost of overtaking lane in the whole life cycle (yuan/m²)

图 6. 超车道在全寿命周期内的费用(元/m²)

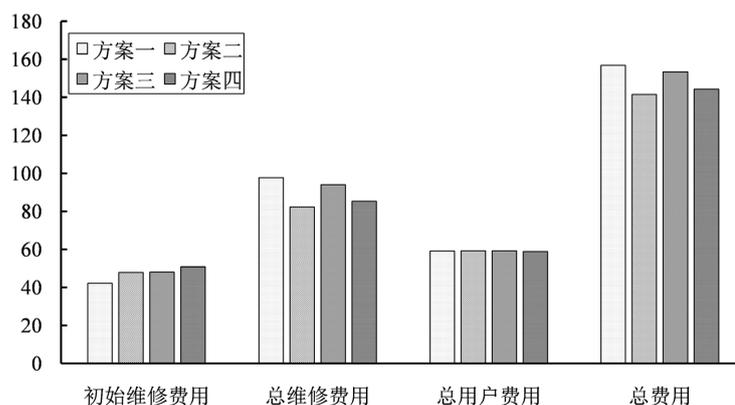


Figure 7. Cost of carriageway in the whole life cycle (yuan/m²)

图 7. 行车道在全寿命周期内的费用(元/m²)

3) 方案比选

本文通过计算分析期内的费用效益比来评价各养护方案,其中计算结果如表 6 所示:

Table 6. Cost benefit table of four maintenance schemes

表 6. 四种养护方案费用效益表

中面层养护技术	基质沥青		SBS 改性沥青		0.3%抗车辙剂		复合改性沥青	
	超车道	行车道	超车道	行车道	超车道	行车道	超车道	行车道
分析期内总费用元/m ²	71.924	156.86	71.009	141.53	76.561	153.31	70.444	144.23
分析期内平均 PCI	89.54	88.78	89.67	89.26	90.045	89.10	91.105	90.70
分析期内费效比	0.803	1.767	0.79	1.586	0.850	1.721	0.773	1.590

从表可以看出,应用复合改性沥青混合料做中面层后路面的平均 PCI 最大,路用性能较为优异。

可以发现四种养护方案的总费用相差较大,对于同类车道的养护方案来说,方案一和方案三的费效比较高,且其在 15 年的期限内,所需维修的次数过多,施工期间对会显著影响高速公路的通行能力,故综上所述不推荐方案一和三。方案二和四的费效比较低,表明其单位 PCI 指标所需的全寿命周期成本较低,同时两者在超车道的使用寿命均为 9 年,行车道为 6 年,在 15 年的分析期内所需的重修次数较少,对交通的影响较小,故推荐采用其作为中面层抗车辙养护技术。进一步优选方案二和四,利用前述的温度场-轴载的车辙预估模型,可以得出方案四在全寿命周期内的车辙量明显小于方案二,且方案四的 PCI 指标也大于方案二,故本文最终推荐方案四作为高速公路中面层抗车辙养护技术。

4. 结论

本章结合某高速公路抗车辙养护工程,将路面划分为超车道和行车道,采用全寿命周期分析方法,对比了四种养护方案的费效比,并推荐了养护方案,得到主要结论如下:

- 1) 本文采用基于路面变温度场与实测轴载谱的车辙预估模型和路面 PCI 预测模型得到沥青路面的车辙和 PCI 指标,为路面性能预测提供参考。
- 2) 综合路面车辙指标和 PCI 值,确定了高速公路养护方案的养护时机,可以较为有效地指导路面用户决策。
- 3) 路面养护方案的实施时机应随车道类型而异,文中超车道在 15 年的分析期内所需维修次数明显少于行车道。
- 4) 基于全寿命分析法比较四种中面层养护方案的费效比,结果表明中面层的抗车辙养护材料采用复合改性沥青混合料时,路用性能最佳且在全寿命周期内费用也最低,性价比优异。

参考文献

- [1] 李辉,丁婷婷,刘胜杰,韩海龙,吕天宇,张永强,孙建秀,田野,刘伟,吕鑫. 基于复合改性的沥青路面耐久性与抗车辙性能研究[J]. 土木工程, 2021, 10(12): 1272-1280. <https://doi.org/10.12677/HJCE.2021.1012140>
- [2] 张明,卢超. 基于全寿命周期经济效益分析的沥青路面加铺方案研究[J]. 现代交通技术, 2018, 15(6): 12-15.
- [3] 张征宇,刘林林,卢勇. 高速公路沥青路面车辙发展规律及影响因素分析[J]. 交通科技, 2021(3): 36-40.
- [4] 岳松. 高速公路全社会寿命周期成本计算模型[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [5] 董瑞琨,孙立军,彭勇,张永兴. 基于沥青路面功能性能的预防性养护时机指标[J]. 地下空间与工程学报, 2005(2): 292-295.