

基于性能和寿命周期成本的路面预防性养护措施选择

毛学嵩

(广东省高速公路发展股份有限公司佛开分公司, 广东 佛山 528000)

摘要: 为践行《广东省“十四五”干线公路养护管理提升行动方案》, 在归纳总结近年来高速公路沥青路面预防性养护成功经验的基础上, 结合某高速公路沥青路面实际技术状况检测结果, 探索以养护措施性能和寿命周期费用为指标的最佳预防性养护方案的确定方法。研究结果有益于完善全寿命周期效益最优的公路养护科学决策体系, 规范现有高速公路预防性养护措施选择程序, 为高速公路预防性养护方案和施工图设计提供科学依据。

关键词: 沥青路面; 预防性养护; 寿命周期费用; 效益-成本比

中图分类号: U418.6

文献标识码: A

Selection of the Pavement Preventive Maintenance Treatments Based on Performance and Life Cycle Cost

MAO Xuesong

(Guangdong Province Expressway Development Co., Ltd. Fokai Branch, Foshan 528000, Guangdong, China)

Abstract: In order to practice the “Guangdong Province Trunk Highway Maintenance Management Promotion Action Plan within the 14th 5-Year Period”, this paper tries to summarize the successful experiences of highway asphalt pavement preventive maintenance in recent years. Combined with the actual asphalt pavement condition data collected from a highway, this paper explores the method for the best preventive maintenance treatment based on the maintenance treatment performance and life cycle cost. The results of this study are beneficial to improving the scientific decision-making system of highway maintenance with the best whole life cycle benefit, standardizing the selection procedure of the existing expressway preventive maintenance treatment, and providing a scientific basis for the preventive maintenance scheme and construction drawing design of the expressway.

Key words: asphalt pavement; preventive maintenance; life cycle cost; benefit-cost ratio

2022年8月, 广东省人民政府办公厅发布《广东省“十四五”干线公路养护管理提升行动方案》(下称“方案”)^[1]。方案提出, 广东将全面开展四大行动、打造一个品牌, 即开展养护行业治理能力、干线公路技术状况、公路服务品质、养护可持续发展能力等四项提升行动, 促进广东省“十四五”干线公路养护管理取得长足进步, 养护管理工作成效评价进入全国前列, 逐步形成在全国具有影响力和公信力的广东特色公路养护品牌。按照方案, 到2025年全省高速公路

路面技术状况指数(PQI)平均值维持在94以上, 社会公众对高速公路、普通公路养护服务的满意率分别达到90%、88%以上。其中, “干线公路技术状况提升行动”要求全面推行养护科学决策, 加快完善全寿命周期效益最优的干线公路养护科学决策体系, 每年组织一次对全省普通国道路面技术状况全面监测, 科学编制养护工程项目库并按要求实行动态更新, 推动落实公路全寿命周期养护。在此背景下, 开展全寿命周期效益最优的干线公路养护科学决策方法的研究具有

收稿日期: 2023-08-03

作者简介: 毛学嵩, 工程师, 本科, 研究方向为高速公路养护与管理

重要意义。

Galehouse 和 Moulthrop 等最早提出路面保护或保养 (pavement preservation) 以及全寿命周期养护效益最优化的概念, 如图 1 所示^[2]。从图中可以看出, 所谓路面保护的概念就是通过多次预防性养护来延长路面大修或重建的周期, 进而实现全寿命周期养护效益最优化的目标。据 Galehouse 和 Moulthrop 等人的测算, 假定测算周期为 30 年, 采用多次预防性养护可以比两次大修节省费用 30% ~ 40%。

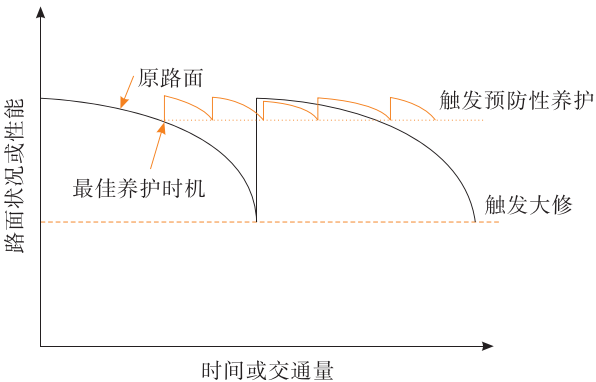


图 1 路面保护的概念

Mandapaka 等人利用寿命周期费用分析 (LCCA) 和加州力学 - 经验设计方法 (CalME), 探讨和选择沥青路面全寿命周期的最佳养护和维修策略。分析选择加州湖县 53 号公路一段长 11.27 km 的 4 车道沥青路面结构, 路面结构的设计寿命为 20 年。应用 CalME 程序分析了路面达到一定破坏程度时 (车辙和开裂), 三种养护维修策略的使用效果: 多次预防性养护 (EPP)、预防性养护加中修 (PPR) 和大修 (R)。研究结论认为, 对于特定的交通和自然环境, 多次预防性养护是寿命周期费用最佳的养护维修策略, 选择合适的预防性养护措施和时机可以有效延长路面结构的使用寿命, 甚至可以达到 80 年^[3]。

自 21 世纪初国内引进路面预防性养护理念以来, 不同部门也相继开展了路面全寿命周期养护策略的研究^[4-5]。高昌结合清连高速公路的路况调查, 开展了水泥混凝土路面全寿命周期养护规划的研究。然而, 受条件的限制, 可用于清连高速公路水泥混凝土路面的有效预防性养护措施不多, 相关研究的理论和实际应用价值也因此受到了限制^[6]。江红以养护公司年度养护预算费用为约束, 以寿命周期内路面使用性能指数 PQI 提升最大为决策目标, 对各路段寿命周期内不同的养护方案组合进行优化求解, 最终确定了有费用

约束和无费用约束下的多路段多年最优方案的求解办法。最后选取某高速公路样本路段进行了寿命周期内的多路段养护决策^[7]。

综上所述, 由于预防性养护理念引进的时间不长, 相关措施不多, 缺乏系统的观测和评价, 前期的研究多偏重于性能模型和方案优化的算法。近年来, 随着预防性养护实践经验的不断积累, 以高性能改性沥青和超薄磨耗层等为代表的“四新技术”的推广应用, 路面预防性养护技术取得了长足的进步^[8-9]。本文试图在归纳总结近年来高速公路沥青路面预防性养护成功经验的基础上, 结合某高速公路沥青路面实际技术状况检测结果, 探讨性能和寿命周期费用指标最佳的预防性养护方案。

1 预防性养护措施、效果以及选择的方法

1.1 预防性养护措施与效果

21 世纪初, 广东省开始引进路面预防性养护理念和相关技术, 并在多条高速公路尝试使用, 取得了良好的技术和经济效果, 有效延长了路面的使用寿命, 降低了寿命周期养护成本。我国公路沥青路面设计规范规定的高速公路沥青路面结构设计使用寿命为 15 年, 广东省几乎所有高速公路沥青路面的实际使用时间都超过了这一设计使用年限。有些高速公路沥青路面结构实际使用时间已经超过 20 年, 依然没有出现结构性损坏的迹象。取得这样的效果, 积极有效的预防性养护功不可没。广东交科检测有限公司结合韶赣高速公路的年度检测, 汇总了常用预防性养护措施与使用效果, 如表 1 所示^[10], 基本代表了广东道路行业现阶段对预防性养护技术的认知状况, 同时也作为本文预防性养护措施选择的依据。

表 1 常用预防性养护措施与使用效果的汇总

预防性养护措施	适用环境	预期寿命/年
裂缝封堵	裂缝的处治	2 ~ 4
含砂雾封层	路面老化/轻微脱粒	3 ~ 5
微表处 (单层)	路面老化/脱粒/轻微车辙/抗滑	3 ~ 6
改性热沥青超薄磨耗层 (≤2.5 cm)		
半开级配	路面老化/脱粒/轻微车辙/抗滑	4 ~ 7
密级配 (高黏弹)	路面老化/脱粒/轻微车辙/抗滑/反射裂缝	4 ~ 8
改性热沥青薄加铺层 (≤4 cm)	路面老化/脱粒/轻微车辙/抗滑/反射裂缝	5 ~ 10
其他措施		

实际上，还有一些预防性养护措施仍处于尝试阶段，如冷再生和热再生，以及开级配超薄磨耗层和裂缝的带状修补技术等，还需要进一步探索和积累经验，本研究尚未纳入考虑。

1.2 预防性养护措施的选择

在特定时间、为特定路面选择适当的预防性养护措施不是一个简单的过程，需要在大量现有

路面信息的基础上，分析路面对预防性养护的需要以及对养护措施的限制。从表 1 也可以看出，对于特定路面通常可能有几种解决方案，每种方案都有各自的优点和缺点。如果把成本和成本效益考虑在内，这个过程就会更加复杂。因此，需要专门的方法或所谓科学的决策。图 2 为一种根据现有路面状况选择适宜预防性养护措施的流程^[3]。

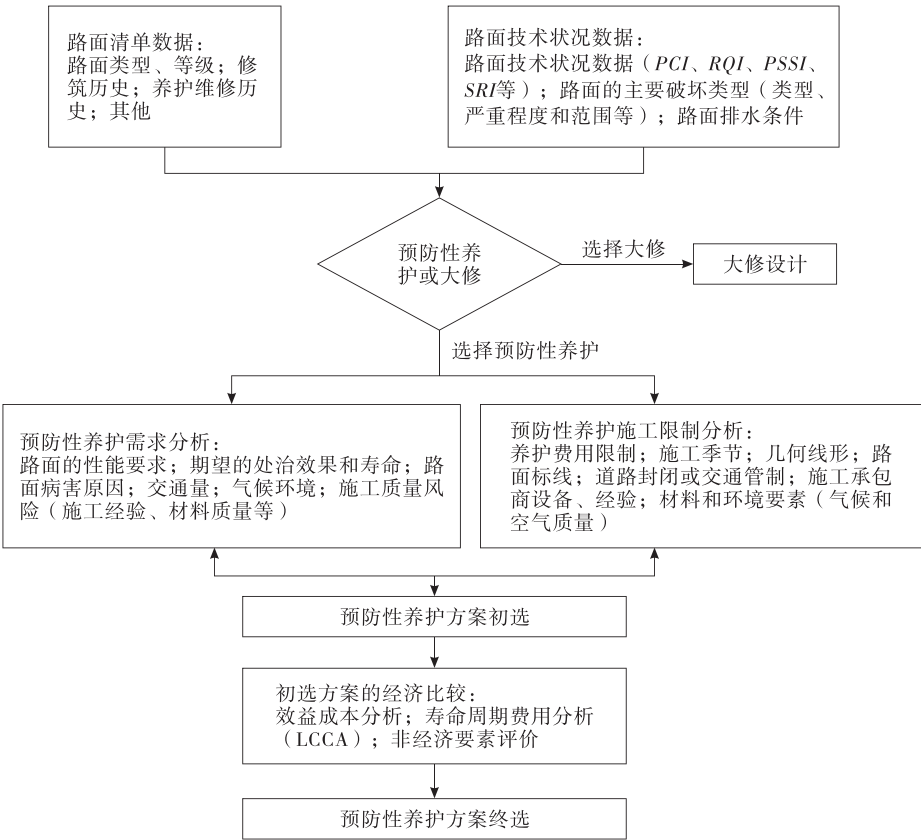


图 2 基于性能和寿命周期养护成本的预防性养护措施选择流程

1.3 预防性养护方案的经济比选

有两种方法常用来进行路面养护方案的经济比选：当量年成本（equivalent annual cost, EAC）和效益 - 成本比（benefit-cost ratio, BCR）^[11-12]。两种方法中，EAC 更加简单，只需要有关成本和性能的基本信息，进行类似性能方案间的短期成本效益分析，例如碎石封层和微表处都具有改善路面表面构造或抗滑的功能。BCR 则需要更多的数据和计算来比较方案间的长期成本效益，适用于评估不同性能方案间的成本效益差异，如裂缝处治和超薄磨耗层间的比选。

1.3.1 当量年成本

当量年成本是俗称“性价比”的倒数。其计算非常简单，即养护措施的单价除以养护措施的预期性能或预期的寿命延长（年），也可用式

(1) 来表示。

$$EAC = \frac{\text{养护措施单价（元/m 或 m}^2\text{）}}{\text{养护措施的预期寿命延长（年）}} \quad (1)$$

习惯上，用两种方法定义养护措施的预期性能或预期的寿命延长（年）：①预防性养护实施的时间到路面性能恢复到处治前水平所经历的时间间隔；②未处治的路面和处治后的路面性能均恶化到某一路面性能水平阈值的时间间隔，如图 3 所示。

1.3.2 效益 - 成本比

BCR 方法实际上是一种将寿命周期效益分析（LCBA）与寿命周期成本分析（LCCA）相结合的方法。该方法首先要定义一个分析周期，如 20 ~ 40 年。然后，根据路面性能的演变规律规划整个寿命周期内的养护或维修工作序列（养护策略），分别计算整个寿命周期养护策略的总效益

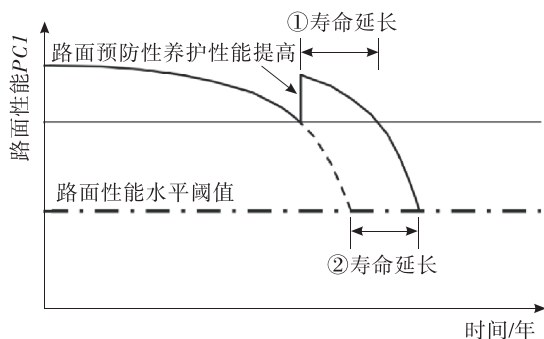


图3 预防性养护措施预期性能的定义和评估方法

($\sum B$) 和成本的净现值 (NPV)，它们的比值称之为该养护策略的效益 - 成本比，如图4所示。对于特定的路段来说，效益成本比最大的养护策略应该就是最佳的养护方案。

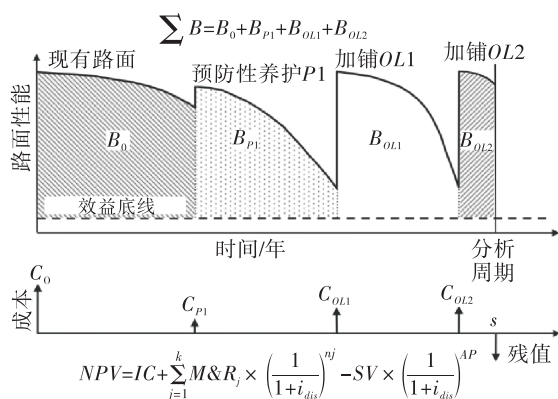


图4 路面养护效益和成本的定义和计算示意图

2 预防性养护措施选择的实例分析

2.1 高速公路沥青路面概况

某高速公路已建成通车8年。近5年，年平均日交通量 (AADT) 超过60 000辆/日，三类以上重车占比超过20%。期中，有近5 km路基段沥青路面（作为本研究的代表性路段）除日常养护外没有进行过预防性养护和维修，路面结构如表2所示。

表2 某高速公路路面结构

沥青面层	4 cm SBS 改性沥青 AC-13
	6 cm SBS 改性沥青 AC-20
	8 cm 重交 70# 沥青 AC-25
基层	18 cm 6% 水稳级配碎石
	18 cm 5% 水稳级配碎石
	20 cm 4% 水稳石屑
	土基

路面技术状况检测结果如表3所示，作为本文的例子，只给出该路段单方向检测数据。从表

中数据可以看出，该路段路面整体状况良好，*PCI* 和 *SRI* 有明显的下降趋势。从 *PCI* 的检测数据和计算结果发现，*PCI* 的衰减主要是裂缝造成的（占比80%以上），且随沥青胶结料的逐渐老化而加剧。鉴于该路段结构承载能力 (*PSSI*) 良好，养护策略应以预防性养护为主。从表1可知，高黏弹超薄磨耗层和改性沥青薄加铺层具有良好的抗反射裂缝的能力以及改善抗滑效果，适用于本项目预防性养护措施。

表3 路面技术状况检测结果（路段平均值）

使用时间/年	<i>PCI</i>	<i>RQI</i>	<i>SRI</i>	<i>PSSI</i>
0	100.0	100.0	100.0	100.0
2	99.5	98.8	95.1	—
4	96.8	98.0	92.6	—
6	94.9	97.1	80.0	96.8
8	91.5	—	—	—

利用表3数据和MatLab软件分别建立了 *PCI* 和 *SRI* 基于 Sigmoid 函数的预测模型^[13]，如图5所示。从图5可以看出，*PCI* 和 *SRI* 即将进入快速衰减的阶段，应尽快开展预防性养护。

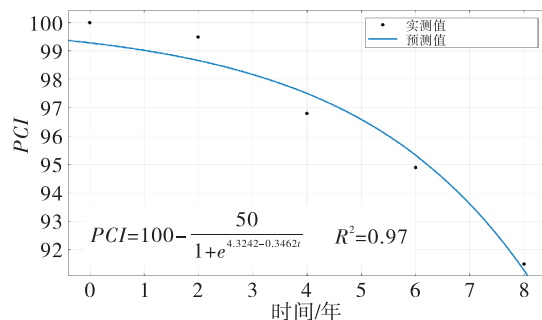
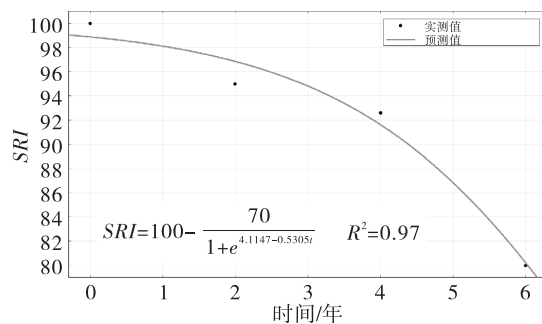
(a) 路面状况指数 *PCI* 预测模型(b) 路面抗滑指数 *SRI* 预测模型

图5 路面性能预测模型

2.2 预防性养护措施的经济评价和比选

本项目采用效益 - 成本比的方法评价和比选两个预防性养护措施的经济性。设定的分析周期为30年，用于费用净现值计算的折现率为3%，

(下转第68页)

- [11]边金宁,张海鹏,陈森,等.基于模糊理论的船舶进水速度计算方法[J].哈尔滨工程大学学报,2021,42(10):1410-1417.
- [12]陈浩,胡基平,王发根,等.珠江口船舶引航风险态势未知测度评估[J].中国航海,2023,46(4):38-45.
- [13]李新宏,付雅倩,刘亚洲,等.基于Copula-BN的海上船舶碰撞风险评估方法[J].中国安全科学学报,2023,33(9):204-213.
- [14]王发根,胡基平,焦喜鑫,等.北极西北航道船舶通航风险分析[J].极地研究,2023,35(2):326-335.
- [15]杨志成.“双预防”机制下的船舶航次安全风险评估和管控[J].中国海事,2023(5):40-42.
- [16]季鑫.基于机器学习的船舶风险评估模型研究[D].舟山:浙江海洋大学,2023.
- [17]王学峰,苏高辉,谢旭阳,等.基于do算子的船舶风险干预及推理方法[J].科学技术与工程,2023,23(12):5332-5339.
- [18]范中洲,严啸,李锦晓.连续弯曲航道的船舶碰撞风险评估方法研究[J].安全与环境学报,2023,23(10):3429-3437.
- [19]邵承谱,朱浩纲,温小飞,等.基于AIS数据的渔业船舶碰撞风险度评估模型[J].上海船舶运输科学研究所学报,2021,44(1):1-5,10.
- [20]胡勤友,戚玉玲,张蓓,等.基于船舶时空轨迹数据的水上输出风险评估[J].交通信息与安全,2020,38(2):143-148.

(上接第14页)

预防性养护触发值为 $PCI = 90$, 其他指标和 BCR 计算结果见表4。从 BCR 计算结果看, 两种预防性养护措施的“性价比”没有本质性的差别, 还要从施工、材料和封路时间等方面做进一步的比选。

表4 预防性养护措施技术经济指标

序号	预防性养护措施	技术要求	预期性能/年	单价/(元/m ²)	BCR结果
1	2cm 高黏弹超薄磨耗层	抗裂/抗滑	4~8	60	0.0636
2	4cm 改性沥青 SMA-13	抗裂/抗滑	5~10	70	0.0709

注: BCR 的计算只考虑了施工的成本, 没有考虑封路影响和用户的成本。

3 结论

本文在归纳总结近年来高速公路沥青路面预防性养护成功经验的基础上, 结合某高速公路沥青路面实际技术状况检测结果, 探索了以养护措施性能和寿命周期费用为指标的最佳预防性养护方案的确定方法。本研究的相关内容有益于完善全寿命周期效益最优的公路养护科学决策体系, 规范现有高速公路预防性养护措施选择程序, 为高速公路预防性养护方案和施工图设计提供科学依据。

参考文献:

- [1]广东省人民政府办公厅关于印发广东省“十四五”干线公路养护管理提升行动方案的通知[EB/OL]. (2022-08-08)[2023-08-03]. https://www.gd.gov.cn/xxts/content/post_3989755.html.
- [2]GALTHOUSE LARRY, MOULTHROP JAMESS, HICKS R G. Principles of Pavement Preservation [J]. TR News, 2003, 228: 4-9.
- [3]MANDAPAKA V, BASHEER I, SAHASI K, et al. Mechanistic-Empirical and Life-Cycle Cost Analysis for Optimizing Flexible Pavement Maintenance and Rehabilitation[J]. Journal of Transportation Engineering, 2012, 138(5): 625-633.
- [4]彭灿. 基于全寿命周期成本的公路预防性养护决策研究[J]. 纳税. 2017(18): 164-164.
- [5]向超. 高速公路沥青路面性能预测模型与预防性养护措施研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [6]高昌. 基于全寿命周期的清连高速公路养护规划研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
- [7]江红. 基于寿命周期的高速公路养护决策优化研究[J]. 公路交通科技(应用技术版). 2019, 15(09): 304-307.
- [8]黄志军, 王端宜, 王显华, 等. 高粘弹改性沥青制备方法 & 混合料性能验证[J]. 石油沥青. 2022, 36(04): 24-30.
- [9]虞将苗, 杨倪坤, 于华洋. 道路高性能沥青超薄磨耗层技术研究与应用现状[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(7): 2287-2298.
- [10]广东交科检测有限公司. 韶赣高速公路 2023 年度路面病害评估与处治咨询报告[R]. 2023.
- [11]WANG G M, MORIAN D, FRITH D. Cost-benefit analysis of thin surface treatments in pavement treatment strategies and cycle maintenance [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 25(8): 1050-1058.
- [12]BABASHAMSI P, YUSOFF N I M. Evaluation of pavement life cycle cost analysis: Review and analysis [J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2016(9): 241-254.
- [13]吴敏, 王端宜, 雷超旭. 沥青路面性能预测模型研究[J]. 广东公路交通, 2009(1): 5-9.