

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2019.05.013

# 基于寿命周期分析的项目级路面养护决策应用研究

陈文, 黄能, 何若夫, 赵正良

(玉溪市晋红高速公路投资发展有限公司, 云南 玉溪 653199)

**摘要:** 建立了基于养护效益的经济、环境综合决策的项目级寿命周期决策分析方法, 应用于项目级养护工程中评价经济效益、环境效益和综合养护效益最优方案, 在全面统筹分析基础上开展系统性决策, 以提高养护方案的效益以及可持续性。

**关键词:** 寿命周期; 经济性; 环境效益; 养护效益; 养护决策

随着高速路网的逐渐完善, 越来越多的高速公路为保持良好的路面使用性能, 需要开展不同等级的养护工程, 传统养护决策方案仅从道路性能或经济性等单一指标进行评估, 但是传统的决策方法注重经济性的分析, 而忽略了社会及环境效益的考虑。作为道路可持续发展的重要组成要素, 社会、经济、环境三大要素必须尽可能全面覆盖。该文通过建立一种全新的路面养护方案决策方法, 以体现道路的社会属性以及基于寿命周期的可持续发展理念, 同时针对项目级养护工程提出养护指标标准优化方法, 在全面统筹分析基础上开展系统性决策, 以降低寿命周期环境影响及费用, 提高养护方案的效益以及可持续性。

## 1 寿命周期决策体系分析

路面养护方案的决策是一个复杂的多因素多目标

的系统工程, 必须在逻辑分析和综合判断的基础上, 做出科学决策, 全面考核与各个方案相关的基本信息, 在性能效益、环境和费用分析基础上, 基于寿命周期分析理念采用多指标决策体系。由于道路寿命周期费用、环境分析的前提和基础都是路面性能发展趋势的预测, 路面寿命周期决策指标包括效益—环境指标和效益—费用指标两个方面。其中效益—环境指标包括效益—能耗和效益—温室气体排放, 经济性分析部分采用效益—费用指标进行评价。

### (1) 路面养护效益分析

路面性能曲线(图1)下的面积代表了养护措施的效益大小, 综合反映了路面使用性能和使用寿命。效益计算基线为路面性能指标最低可接受水平, 即各分项指标达到中修、大修的触发点或预养护措施的失效点, 对于路面性能指数而言, 其养护效益计算如式(1)所示。

## 参考文献:

- [1] 柴明明, 李明, 齐桂才, 等. 就地热再生沥青路面建设期碳排放分析[J]. 公路交通科技, 2016(10).
- [2] 马登成, 马尉倘, 吕春芬. 沥青路面就地热再生施工工艺及质量控制[J]. 中外公路, 2015(6).
- [3] 张友华, 李新华, 徐莹, 等. 就地热再生施工沥青混合料级配影响性研究[J]. 公路, 2015(5).
- [4] 马登成, 任化杰, 马尉倘. 沥青路面就地热再生混合料级配优化设计[J]. 公路交通科技, 2014(8).
- [5] 杨彦海, 张群, 纪文强. SMA路面就地热再生技术试验研究及性能评价[J]. 中外公路, 2016(4).
- [6] 赵博, 毕连居, 于明明, 等. 改性沥青 SMA 就地热再生混合料路用性能试验研究[J]. 中外公路, 2016(6).
- [7] 卢勇. 就地热再生技术在改性沥青 GAC 罩面层养护工程中的应用[J]. 现代交通技术, 2013(6).
- [8] 徐东, 胡健, 符适. 热再生技术在薄层罩面养护工程中应用效果的探索[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2017(6).
- [9] 符适, 陈坤. 就地热再生处理 ECA10+SMA13 的探索性研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2015(4).
- [10] 徐菲. 浅谈高速公路养护 ECA-10 路面就地热再生路面配合比设计[C]. 江苏省公路学会学术年会论文集, 2015.
- [11] 董强柱, 顾海荣, 张琿, 等. 就地热再生过程中的沥青路面加热功率控制[J]. 中国公路学报, 2016(4).

收稿日期: 2019-03-10

基金项目: 中电建路桥集团有限公司科技项目(编号: LQKY2017-12)

作者简介: 陈文, 男, 大学本科, 工程师. E-mail: 349658269@qq.com

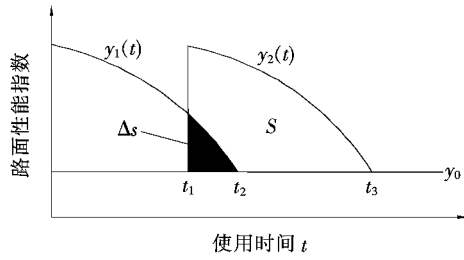


图 1 养护效益计算示意图

$$S = \int_{t_1}^{t_2} [y_2(t) - y_1(t)] dt + \int_{t_2}^{t_3} [y_2(t) - y_0] dt \quad (1)$$

式中:  $S$  为养护措施效益面积;  $y_1(t)$  为原路面性能衰减曲线;  $y_2(t)$  为开展养护活动后路面使用性能衰减曲线;  $y_0$  为路面性能指标最低可接受水平;  $t_1$  为开展养护活动的时间;  $t_2$  为原路面性能衰减至最低可接受水平的时间;  $t_3$  为养护后路面性能指数再次衰减至最低可接受水平的时间。

### (2) 效益—环境指标分析

路面全寿命周期环境效益包括原材料生产运输、混合料拌和运输摊铺以及养护过程中消耗的所有能源。在进行环境影响分析时,需要将各种能源转换为统一的度量方位,同时环境影响分析还包括用户部分,主要是由在运营过程中车辆的油耗及轮耗组成,路面养护工程环境效益所需能耗测算如式(2)所示:

$$E = \sum M_i \cdot e_i + \sum m_i \cdot c_i + \sum F_i \cdot c_i \cdot N_i \cdot \rho \quad (2)$$

式中:  $E$  为沥青路面养护所需能耗(MJ);  $M_i$  为第  $i$  种原材料质量(kg);  $e_i$  为第  $i$  种原材料单位质量生产能耗(MJ/kg);  $m_i$  为第  $i$  种能源消耗质量(kg);  $c_i$  为第  $i$  种能源热值(MJ/kg);  $F_i$  为第  $i$  种车辆的油耗值(MJ/L);  $N_i$  为路段在分析期内交通量;  $\rho$  为燃油密度(kg/L)。

路面养护工程环境效益产生的温室气体测算结果如式(3)所示:

$$G = \sum M_i \cdot g_i + \sum m_i \cdot s_i + \sum F_i \cdot s_i \cdot N_i \cdot \rho \quad (3)$$

式中:  $G$  为温室气体排放量(kg);  $g_i$  为第  $i$  种原材料单位质量温室气体排放量(kg/kg);  $s_i$  为第  $i$  种能源单位质量消耗排放温室气体量(kg/kg)。

因此,路面养护工程效益—环境指标计算如式(4)所示:

$$BER = S/E; BGR = S/G \quad (4)$$

式中:  $BER$  为效益—能耗指标;  $S$  为根据路面性能曲

线计算的效益;  $BGR$  为效益—温室气体排放指标。

### (3) 效益—费用指标分析

根据路面养护寿命周期费用发生情况及分析期,进行寿命周期成本分析时,由于不同的费用投入发生在不同的时间结点,初建费用发生在全寿命周期的初期,大中修费用在寿命中期,而残值发生在寿命结束。考虑到折现率,不能简单地将不同时间费用叠加,若要比较各个方案全寿命周期费用,必须将各个时间费用转换为同一时间点发生的费用,因此,该文采用现值法将不同周期的成本转换为同一时间点,计算得到寿命周期费用现值如式(5)所示:

$$NPV = C_{initial} + \sum_{k=1}^N C_{maint} \left[ \frac{1}{(1+i)^{n_k}} \right] + \sum_{n=1}^N C_{user,n} \left[ \frac{1}{(1+i)^{n_k}} \right] - C_{salvage} \left[ \frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad (5)$$

式中:  $NPV$  为某方案寿命周期费用现值;  $C_{initial}$  为初始新建费用;  $C_{maint}$  为养护费用;  $C_{salvage}$  为残值;  $C_{user,n}$  为第  $n$  年用户费用;  $i$  为折现率。

效益—费用指标是一种常用的经济性分析方法,可表征路面养护寿命周期内所能达到的性价比。在寿命周期费用分析的基础上,效益—费用指标测算如式(6)所示:

$$BCR = S/C \quad (6)$$

式中:  $BCR$  为效益—费用指标;  $S$  为根据路面性能曲线计算的效益;  $C$  为寿命周期费用,其组成根据分析的对象及目的确定,可包括管理者或用户费用部分。

### (4) 养护方案决策分析

养护决策主要包括选择适当的养护时机和适当的养护措施,不同的道路养护时机确定与道路类型、道路使用性能状况、交通量等级、气候、养护条件等相关,为了提高道路养护的效率,实现养护资金、资源、社会效益最优化,该文基于寿命周期分析提出道路养护指标阈值优化决策方法。

养护时机(指标阈值)的优化建立在对路面性能发展趋势以及寿命周期环境、费用的精确测算基础上,通过对各养护标准条件下的效益—能耗  $BER_i$ 、效益—排放  $BGR_i$  以及效益—费用指标  $BCR_i$  的多指标方案决策比选,确定最优的养护指标阈值,不同养护标准条件下的相同指标值按式(7)进行标准化:

$$x' = x / \max \quad (7)$$

式中:  $x'$  为标准化后数值;  $x$  为标准化前数值;  $\max$  为备选方案样本数据中最大值。

可以看出,标准化后数据越大说明其与最优解最

为接近。

养护方案决策综合比选按式(8)进行计算:

$$P_i = BER'_i \cdot w_1 + BGR'_i \cdot w_2 + BCR'_i \cdot w_3 \quad (8)$$

式中:  $P_i$  为第  $i$  种方案综合评价值;  $BER'_i$ 、 $BGR'_i$ 、 $BCR'_i$  分别为第  $i$  种养护标准条件下效益—能耗指标、效益—温室气体排放指标、费用效益指标的标准化值;  $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$  分别为相应的权重值, 采用路面养护方案决策方法中确定的权重值, 分别为 0.14、0.14、0.72。养护方案综合比选决策值越大, 表明该种养护标准条件下综合效益越高。

## 2 项目级路面养护方案分析

某高速公路双向四车道, 里程为 45.943 km, 设计速度 100 km/h, 路基宽 24.5 m。通车运营 13 年以来,

交通量急剧增加, 现阶段路面使用性能及服务功能已不能满足要求, 亟需开展路面大修工程, 以提升路面综合服务水平。同时, 结合交通运输部绿色循环低碳公路主题项目建设要求, 推广节能减排路面技术。

### 2.1 养护历史

根据设计资料可知, 原路面结构为: 4 cm AK—16A+5 cm AC—20I+6 cm AC—25I+1 cm 改性沥青石屑封层+30 cm 二灰碎石+30 cm 石灰土。从建成通车以来, 经过多年的运营, 项目路段路面已有不同程度损坏, 养护管理单位除了应用日常养护措施对路面出现的裂缝、坑槽等轻微病害进行处治外, 还结合预防性养护及矫正性养护措施以维持路面服务水平。

### 2.2 交通量分析

项目路段在路面养护改造前, 交通量属于适中水平, 交通量主要以一类车为主, 其中还包括一部分重载货车, 交通量逐年增长, 历年交通量统计如表 1 所示。

表 1 历年交通量分析

统计年	交通量/(pcu·d <sup>-1</sup> )							当量数/(pcu·d <sup>-1</sup> )
	一类车	二类车	三类车	四类车	五类车	六类车	七类车	
2013	7 069	195	144	52	70	73	60	8 156
2014	8 953	205	147	41	79	77	63	10 079
2015	11 274	215	150	32	89	79	70	12 462
2016	14 216	225	153	25	100	75	68	15 414
2017	17 964	236	156	19	112	77	71	19 219
平均增长/%	26.26	4.89	2.02	-22.25	12.47	1.43	4.45	23.90

由表 1 可知: 随着通车时间的延长, 路段交通压力逐年增大, 一类车增长率最高, 达到 26.26%; 其次为五类车, 平均增长率为 12.47%, 表明项目路段小客车、大型货车及中型货车比例增长较快; 且当量数平均增长率为 23.90%。交通量的增长对路面结构的耐久性能考验较大, 因此, 在项目路养护改造中, 应选择具有较优耐久性能的路面结构和材料。

### 2.3 路面养护方案选择

为创建绿色循环低碳公路示范工程, 提升养护工程的整体绿色循环低碳水平, 使项目路在寿命周期内施工运营能耗及碳排放显著降低、环境效益明显改善, 此次养护方案确定基于寿命周期养护决策方法, 以提高道路养护的效益, 实现养护资金、社会效益及绿色低碳效益资源利用最优化。

对该项目而言, 由于交通量大幅度增加, 中下面层应优先考虑抗车辙性能更佳的材料组合方案, 对于基层, 原路面采用二灰碎石早期强度较高, 同时在运营一

段时间后, 强度还会有小幅增长, 根据目前的检测结果, 现阶段部分路段二灰碎石基层强度仍然较高, 但是仍有部分路段的基层出现破损, 需要进行补强处治。

#### 2.3.1 养护方案 A

为了改善路面使用性能, 延长路面使用寿命, 对路面状况较好路段加铺罩面层, 并对局部路段进行病害处治后加铺罩面层, 罩面层为 4 cm 改性沥青 SMA—13。采用老路局部病害处治后加铺罩面方案路段累计 60.85(半幅) km。

除了路面结构保存较好的路段加铺罩面外, 其余部分均需要将面层、基层全部铣刨后重新铺筑基层及抗车辙性能更优的路面层, 路面结构为 4 cm 改性沥青 SMA—13+6 cm 改性沥青 Sup—20+8 cm 普通沥青 Sup—25+38 cm 抗裂嵌挤水稳碎石, 处治路段累计 31.036(半幅) km。

#### 2.3.2 养护方案 B

为了提升项目路绿色循环低碳示范效应, 提高路

面方案低碳化水平以及废弃资源循环利用率,养护方案 B 铣刨原路面后采用厂拌冷再生、温拌技术、成品湿法橡胶沥青等组合方案,同时针对路面结构强度满足要求路段采用加铺罩面方案。

(1) 厂拌冷再生技术方案

考虑到铣刨重铺方案产生大量的铣刨料,为提高旧料的循环利用效率,此次采用乳化沥青厂拌冷再生技术进行再生利用,该方案将冷再生混合料用于路面结构下面层以及部分路段上基层。厂拌冷再生技术实施范围为路面损坏严重路段下面层以及部分上基层,面层采用温拌技术,能够更好地节能减排,具体方案为 4 cm 温拌 SMA-13 罩面+8 cm 抗车辙结构层+9 cm 冷再生层+15 cm 冷再生层+原 9 cm 二灰碎石基层,累计实施长度约为 25.75(半幅) km。

(2) 成品湿法橡胶沥青混合料方案

成品湿法橡胶沥青的性能优势主要体现在抗裂和耐久性方面,对于裂缝密集的路段,可采用成品橡胶沥青替代 SBS 改性沥青,在原路面裂缝密集段加铺罩面层采用橡胶沥青混合料,具体方案为 4 cm AR-SMA-13+6 cm 改性沥青 Sup-20+9 cm 乳化沥青厂拌冷再生+38 cm 抗裂嵌挤水稳碎石,累计实施路段长度为 4.1(半幅) km。

2.3.3 养护方案 C

针对项目路交通量逐年增加的实际情况,从减少路面车辙方向考虑,该方案采用低标号沥青和连续级配的高模量沥青混合料 EME,相比于常用的混合料而言,具有更高的模量,可显著提高路面结构抗疲劳性能和抗车辙性能,达到增强路面抗疲劳、抗高温性能的目的。高模量混合料主要用于中面层,具体方案为 4 cm 温拌 SMA-13+8 cm 高模量 EME+9 cm 乳化沥青厂拌冷再生+38 cm 抗裂嵌挤水稳碎石,累计实施长度约为 63(半幅) km。

3 项目级寿命周期决策分析

3.1 路面养护方案效益分析

针对项目路段路面结构利用方案提出的 3 种备选养护方案,利用车辙指标作为效益测算对象,根据效益测算公式计算车辙指标性能曲线下面积。针对项目路段拟采用的 3 种不同路面结构形式,根据力学计算结果及路面性能发展数据统计分析,不同养护方案的车辙指标性能发展趋势如图 2 所示。

根据大中修养护标准,当车辙深度指数 RDI 达到

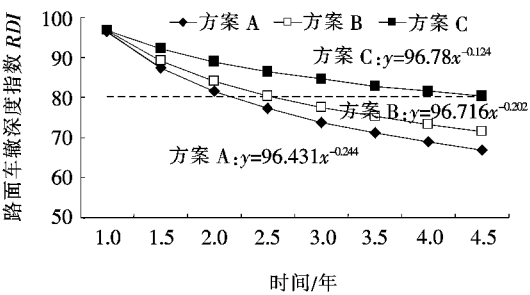


图 2 不同养护方案车辙指标性能发展趋势

80 时即需要养护维修,为了便于对比不同方案的效益差异,均以 RDI 曲线与养护标准为 80 时组成的形状面积作为效益值,按照式(1)对 3 种养护方案的效益进行计算,结果如表 2 所示。

表 2 不同养护方案效益计算结果

方案	达到养护标准时间/年	效益
A	2.15	79.49
B	2.56	91.34
C	4.64	135.96

从表 2 可知:方案 C 达到养护标准年限时间最长,为 4.64 年,养护效益最大为 135.96,由此说明,方案 C 能够更好地缓解路面性能衰减速率,达到抗疲劳和抗车辙性能,相同处治时间下,方案 C 具有较高的养护效益和使用性能。

3.2 效益环境及效益费用分析

(1) 养护方案 A

根据铣刨重铺养护方案及工程量,利用该文建立了沥青路面养护环境效益分析方法,对铣刨重铺方案进行能耗及碳排放测算,测算过程中根据该工程实际设定工程运距,其中原材料运距为 50 km,混合料综合运距为 20 km。由于 3 种方案在用户费用 and 环境影响方面没有明显的差异,因此在分析时暂未考虑用户部分,根据式(2)、(3)能耗及排放测算结果,方案 A 总能耗  $E=190.905$  GJ,相当于 6 521.53 t 标准煤,温室气体排放  $G=20\ 364$  t。

(2) 养护方案 B

根据养护方案 B 的工程量能耗及排放测算结果,该方案总能耗  $E=179.864$  GJ,相当于 6 144.38 t 标准煤,温室气体排放  $G=19\ 661$  t。

(3) 养护方案 C

根据养护方案 C 工程量的能耗及排放测算结果,该方案总能耗  $E=182.55$  GJ,相当于 6 236.13 t 标准煤,温室气体排放  $G=19\ 818$  t。

#### (4) 效益—环境及效益—费用分析

根据环境—效益指标测算方法[式(4)],以及效益—费用指标测算方法[式(5)、(6)],仅考虑路面养护本身的环境影响及费用影响后,不同养护方案的效益—环境及效益—费用 BCR 测算结果如表 3 所示。

表 3 各方案效益—环境及效益—费用测算结果

方案	效益—能耗/ ( $\times 10^{-6} \cdot \text{tce}^{-1}$ )	效益—排放/ ( $\times 10^{-3} \cdot \text{t}^{-1}$ )	效益—费用/ ( $\times 10^{-3} \cdot \text{元}^{-1}$ )
A	1.42	3.90	5.14
B	1.73	4.65	6.00
C	2.54	6.86	8.57

由表 3 可以得出,在相同的养护标准前提下,方案 C 的效益—能耗值、效益—排放值及效益—费用值都最高,表明方案 C 单位能耗及排放所产生的效益最大,节能减排效果最好,资金利用效益最高。

### 3.3 养护方案寿命周期决策分析

采用传统决策方法,仅针对各方案能耗、碳排放以及费用现值进行单一的排序分析,得到各养护方案的单一指标决策分析结果见表 4。

表 4 各养护方案单一指标决策分析结果

方案	能耗/tce	碳排放/t	费用现值/万元
A	6 521.53	20 364.03	15 465.18
B	6 144.38	19 661.49	15 217.15
C	6 236.13	19 817.79	15 872.49

按传统决策方法即费用现值、能耗或碳排放单个指标的最小化原则,方案 B 为各单一指标决策最优方案,但传统决策未考虑寿命周期费用及养护效益对 3 种方案的影响,虽然目前的成本是最低的,道路寿命和生命周期效益并非最优。

因此,根据该文建立的寿命周期决策方法,采用式(7)极大型指标标准化方法对各方案的效益—环境指标及效益—费用指标进行标准化处理,根据决策指标的权重系数,按式(8)进行方案综合评价价值测算,方案 A、B 和 C 的综合评价价值  $P_i$  如表 5 所示。

表 5 各养护方案寿命周期综合评价

方案	效益— 能耗	效益— 排放	效益— 费用	$P_i$
A	0.56	0.57	0.60	0.58
B	0.68	0.68	0.70	0.69
C	1.00	1.00	1.00	1.00

由表 5 可得:方案 C 寿命周期综合效益最高,相

较于传统决策方法单个指标最低的方案 B,可以看出方案 C 的效益—费用值较方案 B 高 30%,效益—能耗值较方案 B 高 32%,效益—排放值高 32%,即在同样的资金投入以及能源消耗条件下,方案 C 基于寿命周期效益的 BCR、BER、BGR 可分别提升 30%、32%和 32%,因此,基于寿命周期分析的综合决策指标分析得到方案 C 养护效益最高,方案综合效益最优。

## 4 结论

基于经济效益和环境效益的寿命周期方法,建立了项目级路面养护方案决策方法,得到如下主要结论:

(1) 建立了项目级寿命周期决策分析方法,不仅包括经济性指标,还将环境影响指标纳入,并结合路面性能发展趋势,形成了基于养护效益的经济、环境综合决策方法。

(2) 结合项目级养护路段,通过将寿命周期综合决策结果与传统单指标决策方法进行对比,结果表明传统单指标决策方法未考虑到不同养护方案之间路面使用性能导致的效益差别,通过寿命周期决策方法评价经济效益、环境效益和综合养护效益最优方案,在全面统筹分析基础上开展系统性决策,以提高养护方案的效益以及可持续性,可为类似工程提供参考。

## 参考文献:

- [1] 潘美津.基于 LCA 的高速公路能耗与碳排放计算方法研究及应用[D].华南理工大学硕士学位论文,2011.
- [2] 董小林,潘望,宋桢,等.基于全寿命周期理论的公路项目环境成本分析[J].中国公路学报,2014(10).
- [3] 朱浩然,蔡海泉,卢勇,等.基于 LCA 的沥青路面养护能耗测算及软件开发[J].交通建设与管理,2014(11).
- [4] 罗启添,游庆龙,刘福顺.道路全寿命周期费用分析概述[J].公路交通科技,2010(9).
- [5] 许国初.道路用户成本分析与应用研究[D].湖南大学硕士学位论文,2008.
- [6] 桑辰,仲艳,许刚,等.多年冻土区沥青路面寿命周期费用分析[J].南京工业大学学报,2007(2).
- [7] 朱罡.高速公路沥青路面路面管理系统分析与开发[D].长沙理工大学硕士学位论文,2008.
- [8] 王佳.高速公路沥青路面使用性能评价与预测决策研究[D].长沙理工大学硕士学位论文,2006.
- [9] 伍祥松.高速公路沥青路面使用性能预测及预防性养护对策研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2013.
- [10] 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].华南理工大学硕士学位论文,2010.