

## 项目级高速公路路面养护维修路段选择方法研究

朱欢<sup>1</sup>, 龙景彪<sup>2</sup>, 张凯<sup>2</sup>

(1.贵州交通规划勘察设计研究院股份有限公司, 贵州 贵阳 550000; 2.长沙理工大学, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 根据项目级高速公路路面养护维修特点, 将养护实施效益划分为路面性能提升和预期费用减少两方面, 综合考虑预期病害维修费用与路面状况指数  $PCI$  衰减速率之间的关系, 采用加权偏差平方和最小的方法, 考虑单一路段养护需求迫切性确定路面养护优先次序。

**关键词:** 工程管理; 高速公路; 路面养护; 项目级

**中图分类号:** U415.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2019)03-0173-04

长益(长沙—益阳)高速公路是湖南省交通主干道之一, 承担着重要的客、货运任务, 属于项目级高速公路, 采用复合型沥青路面。随着通车时间的增长, 路面使用性能不断下降。由于项目级路面日常养护维修的规模较小, 投入资金有限, 如何合理、科学地确定路段养护次序, 提高养护维修效益是路面养护管理的重点。

## 1 路面使用性能预测模型

通过对大修改造至今的路况数据进行分析, 长益高速公路路面性能衰变呈反 S 形, 表现为第 1~2 年衰减非常缓慢、第 3~4 年衰减速度增大、第 5 年开始衰减速度小幅下降。根据预测模型需具备的基本条件, 结合该高速公路路面使用性能衰变特点, 比较不同预测模型曲线变化趋势, 选取负指数模型作为其使用性能预测模型, 表达式如下:

$$PPI = PPI_0 \times \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\alpha}{t} \right)^\beta \right] \right\} \quad (1)$$

式中:  $PPI$  为正常路面养护下路况指标,  $PPI_0$  可取 100 或大修后初始值;  $\alpha$ 、 $\beta$  为模型参数, 由历年检测数据回归计算得到;  $t$  为路龄。

## 2 全寿命周期费用一效益分析

全寿命费用分析考虑了养护维修对策初始费用及预期内将产生的费用, 可用于分析投资效益。养护措施效益主要分为两方面: 一是即时效果, 表现为维修后路面使用性能的瞬时提升; 二是全寿命周期效果, 表现为路面使用寿命延长。不同养护维修措施根据其维修方式和特点, 实施后路面性能衰减和病害增长情况等有所差异。

### 2.1 养护对策实施后路面使用性能预测修正模型

常用养护维修措施对路面使用性能衰变曲线的影响见图 1。养护对策实施后路面使用性能衰变曲线的变化与原衰变曲线、养护时机、养护对策的修复效果等有关, 可根据不同养护对策实施后的跟踪观测情况分析其产生的瞬时提高幅度和寿命延长大小, 引入参数  $A$  进行修正, 建立养护对策实施后路面使用性能预测修正模型:

$$PPI = [(100 - PPI_{dt01})A + PPI_{dt01}] \cdot \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\alpha'}{t} \right)^{\beta'} \right] \right\} \quad (2)$$

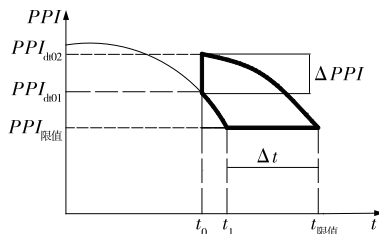


图 1 常用养护维修措施对路面性能影响示意图

参数  $A$  表征养护实施后路面使用性能的瞬时提升效果, 其值根据养护维修对策实施前后路面使用性能的变化情况确定, 取值范围为 0~1。

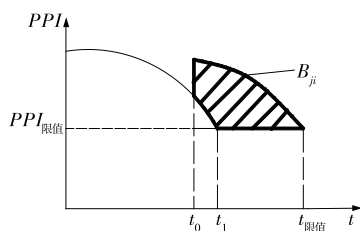
### 2.2 效益计算

如图 2 所示, 在  $t_0$  时刻采用不同维修对策  $J$  时, 对各项路面性能的即时提高分值(瞬时效果)和寿命增长时间(长期效果)均不相同, 所产生的效益也有所区别。费用一效益比计算公式如下:

$$BCR = \frac{\sum B_i}{C} \quad (3)$$

$$B_i = \int_{t_0}^{t_x} [PPI(t_x) - PPI(t_0)] dt \quad (4)$$

式中:  $\sum B_i$  为各项指数累计养护效益;  $C$  为费用和。



$B_{ji}$  为养护措施  $J$  产生的某种效益;  $t_0$  为养护措施  $J$  实施的时间;  $t_{\text{限值}}$  为衰减到限值的时间。

图2 养护维修措施效益计算

图2中,采用养护维修措施前后路面性能衰变曲线与限值所围成的阴影部分的面积表示效益大小,可通过对积分求解得到各项养护效益  $B_i$ ,进而计算得到该项措施的总效益  $\sum B_i$ 。

### 2.3 费用计算

养护措施实施后全寿命周期费用  $C$  主要由两部分构成:一部分为直接费用  $C_1$ ,即采取维修措施一次性投入费用;另一部分为采取某项养护措施后到单项性能指标衰减使用限值这段时间内(取衰减最快指标到限值所需时间)路面小修养护预计投入的费用  $C_t$ ,主要为裂缝、坑槽等的日常修补。预估期内的路面小修工程量主要与本年及上年度路面破损程度相关,即与路面破损率变化值  $\Delta DR$  正相关,  $\Delta DR$  值越低,预计将增加的病害面积  $\Delta A$  越少,所需投入的病害维修费用越少。路面损坏状况指数  $PCI$  与破损率  $DR$ 、路面面积  $A$  的换算关系如下:

$$PCI = 100 - 15DR^{0.412} \quad (5)$$

$$DR = 100 \times \frac{A_t}{A} \quad (6)$$

由式(5)、式(6)可得:

$$A(t) = \frac{A}{100} \times \left( \frac{100 - PCI(t)}{15} \right)^{1/0.412} \quad (7)$$

正常使用情况下,路面病害修补后一般只有2~4年的使用寿命,修补材料逐渐老化和失效,维修量包括新增病害和一定比例的已有病害。取已修补病害的1/3作为新增维修量,得:

$$W_t = 1/3 A_{t-1} + (A_t - A_{t-1}) \quad (8)$$

$$C_t = \sum_{t=t_0}^{t_x} W_t \times D_t \quad (9)$$

式中:  $W_t$  为第  $t$  年的预计维修量;  $A$  为路面面积,一条车道公路取  $3.75 \times 1000 = 3750 \text{ m}^2$ ;  $D$  为病害修补单价。

$C_t$  费用计算如下:

$$C_t = \sum_{t=t_0+1}^{t_x} \frac{A}{100} \times \left[ \left( \frac{100 - PCI(t)}{15} \right)^{1/0.412} - \frac{2}{3} \left( \frac{100 - PCI(t-1)}{15} \right)^{1/0.412} \right] \times D \quad (10)$$

以长益高速公路 K14—K15 路段为例,根据跟踪观测数据得到预测修正模型参数  $\alpha = 18.23$ 、 $\beta = 0.61$ 。根据历年病害平均数量比例(裂缝类:坑槽类 = 0.85:0.15)及维修价格(裂缝类修补按影响宽度 0.2 m 折算,取 75 元/ $\text{m}^2$ ;坑槽类按挖补至基层处修补,取 3000 元/ $\text{m}^2$ )进行计算,结果见表1。

如图3所示,延长期内预计的总费用与累计破损率成线性关系,相隔年度之间破损率差值越大,预计投入维修费用越高,近似呈线性增长,在简化计算过程中可直接建立  $\sum \Delta DR$  与  $\sum C_t$  函数方程,方

表1 费用  $C_t$  与  $PCI(t)$  计算结果

路龄 $t$ /年	$PCI(t)$	$DR_t$	$A_t/\text{m}^2$	$C_t/\text{元}$	$\sum \Delta DR$	$\sum C_t/\text{元}$
1	99.72	0.000 06	0.002 40	1.23	0.000 06	1.23
2	97.87	0.008 74	0.327 76	167.65	0.008 80	168.88
3	95.05	0.067 73	2.539 83	1 193.16	0.076 53	1 360.81
4	91.97	0.219 19	8.219 75	3 354.64	0.295 73	4 547.79
5	88.94	0.477 76	17.915 82	6 392.10	0.773 48	9 746.73

便求得延长期内的总费用。

综上,可同时考虑养护对策全寿命周期内的即时效果和长期效果,计入养护措施的直接费用和延长期内将要产生的费用进行养护维修对策比选,确定最佳养护对策。

### 3 养护路段排序及选择

目前,一般按路面综合评价指数  $PQI$  或单项性

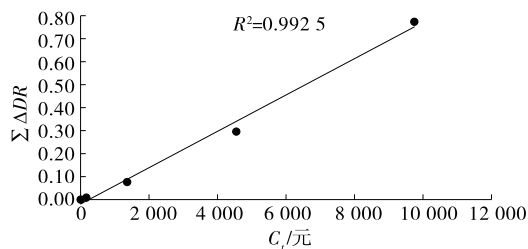


图3 延长期内预计累积费用  $C_t$  与累积  $\Delta DR$  关系曲线

能指数的高低进行养护路段选择。对于通车时间较短、养护水平较高的长益高速公路,其路面性能一般在 85 分及以上,养护预期目标以保持较高服务质量为主,仅以  $PQI$  或单项性能指数的高低来选择养护路段会在一定程度上忽略单一公里段的综合路况养护需求和整体性能提升。因此,应根据各段中各项路面性能值提升迫切性及相对破坏程度的不同进行排序,选择提升效果最大的路段安排养护维修。

### 3.1 多指标的群排序方法

路面性能状况包含  $PCI$ 、路面车辙深度指数  $RDI$ 、路面行驶质量指数  $RQI$ 、路面抗滑指数  $SRI$  4 个指标,可采用加权偏差平方和最小的方法对各车道公里段路面在整个路段系统中的综合情况进行排序。多指标排序结果构成以下矩阵:

$$P = \begin{matrix} & A_1 & A_2 & \cdots & A_m \\ \begin{matrix} D_1 \\ D_2 \\ \cdots \\ D_s \end{matrix} & \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{s1} & r_{s2} & \cdots & r_{sm} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (11)$$

式中: $A_i$  表示第  $i$  车道路段; $r_{ki}$  ( $k=1,2,\cdots,s;i=1,2,\cdots,m$ ) 为  $i$  路段的排序结果; $D_s$  中  $s=(1,2,3,4)$  表示路面性能指标的排序规则,分值越低,则排序越靠前。

若  $u_i$  为路段  $A_i$  在群排序中的最优排序值,加权偏差总平方和应最小,计算式如下:

$$\min Z = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^s w_k (u_i - r_{ki})^2 \quad (12)$$

式中: $w_k$  为第  $k$  项指标的权重值,根据规范, $PCI$ 、 $RDI$ 、 $RQI$ 、 $SRI$  的权重值分别取 0.35、0.15、0.4、0.1,也可根据高速公路各项指标的衰减速率和实际路况需求确定权重。

对式(12)取导,得  $Z$  的极小值点为:

$$U^* = (u_1^*, u_2^*, \cdots, u_m^*)^T =$$

$$\left( \sum_{k=1}^s w_k r_{k1}, \sum_{k=1}^s w_k r_{k2}, \cdots, \sum_{k=1}^s w_k r_{km} \right)^T$$

最优解为:

$$u_i^* = \sum_{k=1}^s w_k r_{ki} \quad (i=1,2,\cdots,m)$$

将各路段按  $u_i$  ( $i=1,2,\cdots,m$ ) 的大小进行排序,得到优化后的群排序结果  $r_g = (r_{g1}, r_{g2}, \cdots, r_{gm})$ 。 $u_i^*$  值越小,则排序越靠前,该段在整个路段系统中养护维修需求越大。

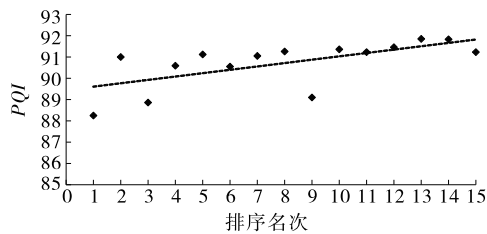
### 3.2 排序结果分析

以长益高速公路主线 K14—K72 路段 2012—2016 年路面检测数据为基础,通过回归计算得到预测模型参数  $\alpha$ 、 $\beta$ ,对下一年度路面使用性能进行预测,并按群排序方法进行排序,排序结果见表 2、图 4 (以排序结果前 15 km 为例)。

由表 2、图 4 可知:同一车道的各单项指标的排序名次在整个路段中有较大区别,表现出该车道各项路面性能之间相对优劣程度;整体上排序名次越

表 2 长益高速公路主线 K14—K72 路段排序结果

桩号	PCI 预测结果		RQI 预测结果		RDI 预测结果		SRI 预测结果		车道	PQI	$u_i$	排序
	分值	排序	分值	排序	分值	排序	分值	排序				
K14—K15	87.12	1	88.14	6	89.25	9	91.15	58	下行	88.25	9.90	1
K58—K59	93.46	14	89.17	14	91.22	32	89.41	33	下行	91.00	18.60	2
K37—K38	88.12	2	87.26	2	91.81	51	93.45	96	下行	88.86	18.75	3
K63—K64	95.10	36	87.77	5	91.15	29	85.26	1	下行	90.59	19.05	4
K17—K18	93.45	13	88.53	7	89.26	10	96.14	111	下行	91.12	19.95	5
K46—K47	92.14	8	90.38	37	90.37	15	85.95	2	上行	90.55	20.05	6
K40—K41	95.62	45	87.60	4	91.10	28	88.84	23	下行	91.05	23.85	7
K53—K54	93.32	12	88.92	9	92.11	56	92.11	77	下行	91.26	23.90	8
K14—K15	96.66	63	83.20	1	87.63	2	88.46	17	上行	89.10	24.45	9
K64—K65	94.18	22	89.39	19	91.63	45	88.93	26	下行	91.36	24.65	10
K64—K65	92.88	11	88.73	8	94.28	100	90.86	51	上行	91.23	27.15	11
K41—K42	93.73	16	88.95	10	94.36	104	89.25	31	上行	91.46	28.30	12
K23—K24	95.31	41	89.34	18	91.35	36	90.56	47	下行	91.85	31.65	13
K53—K54	94.26	23	88.98	11	94.68	111	90.47	44	上行	91.83	33.50	14
K26—K27	91.31	7	90.78	47	88.92	6	96.18	114	下行	91.23	33.55	15

图4 排序名次及其  $P/QI$  值

靠前,  $P/QI$  分值越低。因此, 群排序结果不仅能反映该单一路段在整个系统中的养护迫切程度, 也能反映各单项使用性能的提升需求, 从而保证路面综合状况或单项性能较差的路段单元得到及时维修。

#### 4 养护方案效果分析

根据项目级路面养护规模(以拟养护里程 5 km 为例), 结合回归计算后的路面使用性能预测及修正模型参数值, 以常用沥青路面养护措施(铣刨重铺、微表处、超薄磨耗层等)进行费用—效益比计算, 并按性能修正模型计算处治后路面性能预期值, 按多指标群排序方法和  $P/QI$  分值选择养护路段分别进行费用—效益分析, 其资金需求及预期瞬时提升效果见表 3、表 4。

由表 3、表 4 可知: 在路面养护规模较小时, 根

表3 按群排序结果选择养护路段的养护方案及预期瞬时提升效果

桩号	预期瞬时提升效果					车道	养护措施	BCR	资金需求/万元
	PCI	RQI	RDI	SRI	PQI				
K14—K15	100.00	96.44	94.63	98.23	97.59	下行	超薄磨耗层	1.36	217
K58—K59	100.00	96.75	95.61	97.88	97.83	下行	超薄磨耗层	1.28	
K37—K38	100.00	97.45	99.18	98.69	98.73	下行	微表处	1.27	
K63—K64	100.00	97.55	99.12	97.05	98.59	下行	微表处	1.33	
K17—18	100.00	97.71	98.93	99.23	98.84	下行	微表处	1.40	

表4 按  $P/QI$  分值选择养护路段的养护方案及预期瞬时提升效果

桩号	预期瞬时提升效果					车道	养护措施	BCR	资金需求/万元
	PCI	RQI	RDI	SRI	PQI				
K14—K15	100.00	96.44	94.63	91.15	96.89	下行	超薄磨耗层	1.36	305
K37—K38	100.00	97.45	99.18	98.69	98.73	下行	微表处	1.27	
K14—K15	100.00	98.32	98.76	98.85	99.03	上行	铣刨重铺	0.94	
K46—K47	100.00	97.11	95.18	85.95	96.72	下行	超薄磨耗层	1.12	
K63—K64	100.00	97.55	99.12	97.05	98.59	下行	微表处	1.33	

据路面养护迫切性来选择养护维修路段可较全面地反映路段养护重要程度和迫切性, 整体使用性能提升幅度更明显, 费用—效益比高, 可提高养护资金利用效率, 在项目级路面养护中具有良好应用效果。

#### 5 结论

(1) 基于全寿命周期费用效果分析方法, 考虑路面养护对策的即时效果和长期效果, 分析  $PCI$ 、路面破速率和病害维修量之间的关系, 建立延长期内  $PCI$  与预期费用  $C_i$  计算公式, 可对养护对策实施后的费用和效益进行预估, 为养护对策比选提供依据。

(2) 采用多指标群排序方法选择养护路段, 既能使路面综合状况差的路段得到及时养护, 又能体现单项指标较差路段的养护需求, 整体使用性能提升效果更明显, 适用于项目级路面养护管理。

#### 参考文献:

- [1] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [2] 肖金平, 赵健, 韦慧, 等. 湖南省高速公路路面使用性能衰变模型[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2015, 46(7).
- [3] 刘朝晖, 秦仁杰. 路面养护管理与维修技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [4] 陈梦佳. 江苏省高速公路网级路面养护管理信息系统的研究与开发[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [5] 陈强, 龙晓洪. 高速公路沥青路面养护费用模型的建立与分析[J]. 中外公路, 2009, 29(2).
- [6] 唐莉. 高速公路沥青路面预防性养护费用模型的研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
- [7] 孔祥杰. 沥青路面性能衰变预测及养护维修决策方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2015.