

文章编号:1671-8879(2011)03-0007-06

沥青路面最佳预防性养护时机决策模型

王笑风^{1,2}

(1. 长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室,陕西 西安 710064;

2. 河南省交通规划勘察设计院有限责任公司,河南 郑州 450052)

摘要:为了确定沥青路面预防性养护的最佳养护时机,结合预防性养护措施的特点,分析养护措施实施前后路面性能的衰变特性,定义预防性养护综合效益,确定评价指标的权重,制定合理分析周期,同时采用费用分析法建立了最佳养护时机决策模型。算例计算结果表明:通过对路面评价指标加权计算综合效益,能够突出各项评价指标的作用,客观反映养护对象的特点;根据决策模型建立的 4 个决策指标(综合效益值、等额年费用值、效益指数和路面服务寿命变化量),可以形成 5 个决策原则(费用最小原则、最大综合效益原则、最大单位费用效益原则、最长服务年限原则和综合平衡原则),能够同时满足不同决策者的需求,而决策精度取则决于反映路面性能变化数据的完善程度。

关键词:道路工程;高速公路沥青路面;预防性养护;最佳养护时机;决策模型

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

Model to decide optimal timing of asphalt pavement preventive maintenance

WANG Xiao-feng^{1,2}

(1. Key Laboratory for Highway Construction Technology and Equipment of Ministry of Education,

Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Henan Provincial Communications

Planning, Survey & Design Institute Co Ltd, Zhengzhou 450052, Henan, China)

Abstract: In order to decide the optimal timing of the asphalt pavement preventive maintenance, a decision model was developed. Through analysis the change of pavement performance after the maintenance treatment application, the model defined the pavement composite benefit, decided the analysis period and set up the four decision making indexes. An application example shows that the model can reflect the roles of various pavement performance indexes, objectively describe the characteristics of maintenance object; based on the four decision indexes (the composite benefit value, the equal annual cost, the benefit index, and the expected extension of life), the five decision principles can be formed, they are the minimum cost principle, the maximum composite benefit principle, the maximum unit cost benefit principle, the longest service term principle and the comprehensive balance principle; these principles may meet the needs of different decision makers, and the decision precision lies on the data of pavement performance. 9 tabs, 6 figs, 6 refs.

收稿日期:2010-06-10

基金项目:河南省交通科技重点项目(2009D102)

作者简介:王笑风(1974-),男,河南新乡人,河南省交通规划勘察设计院有限责任公司高级工程师,长安大学博士后,

E-mail:xfyd315@sohu.com.

Key words: road engineering; asphalt pavement of expressway; preventive maintenance; the optimal timing of maintenance; decision model

0 引言

高速公路半刚性基层沥青路面预防性养护是一项系统工程,其核心是建立一个有效的决策系统,解决在一定的路段、一定的时间、采取一定的养护措施的沥青路面预防性养护问题。文献[1-4]从路面评价、路面性能建模等方面展开深入研究,根据各种预防性养护措施的技术特点、适用范围,结合路面实际状况,选择合理的养护措施。对路面实施预防性养护,必须针对具体养护措施,研究其最佳实施时间。为此,本文在费用效益分析方法的基础上,结合路面性能单项指标的变化定义预防性养护的效益值;同时考虑定养护措施的技术特点,建立预防性养护最佳养护时机决策模型。决策模型中的路面单项性能评价指标采用文献[1]定义的5个单项指标:行驶质量指数、路面抗滑系数、路面车辙深度、路面裂缝率和路面修补率^[5-6]。

1 基于路面单项评价的养护效益分析

根据路面单项性能指标随路龄的变化规律,可以分为2类:性能指标随路龄递减和性能指标随路龄递增。文献[1]定义的5个单项指标中,行驶质量指数和路面抗滑系数属于前者,另外3个单项路面破损指标则随着路龄逐渐增大。对于随路龄递减的路面性能指标,在分析期内以实施一次预防性养护措施为例,未实施和实施预防性养护措施的路面性能曲线变化如图1、图2所示;适合于随路龄递增的路面性能曲线变化如图3、图4所示。图1~图4中, t 为时间,单位为年。

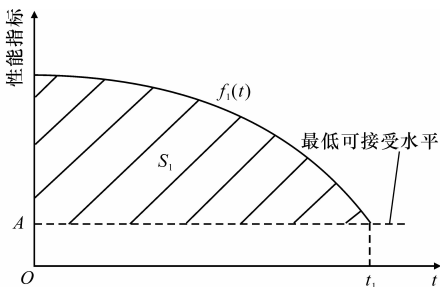


图1 未实施预防性养护前随路龄递减的路面性能曲线
分析图1~图4,可以得到以下算式

$$S_1 = \int_0^{t_1} [f_1(t) - A] dt \text{ 或 } S_1 = \int_0^{t_1} [A - f_1(t)] dt \quad (1)$$

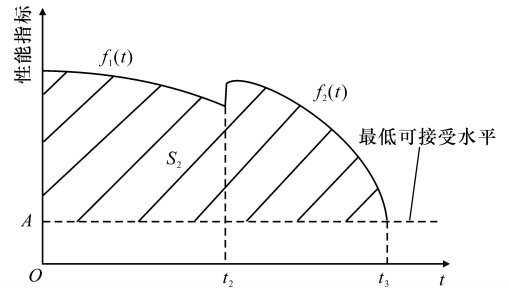


图2 实施预防性养护后随路龄递减的路面性能曲线

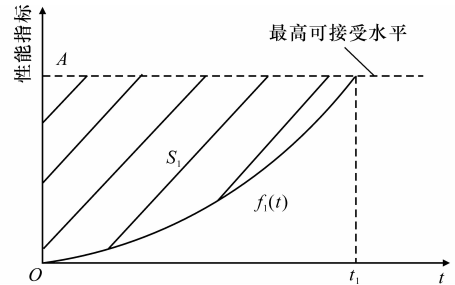


图3 未实施预防性养护前随路龄递增的路面性能曲线

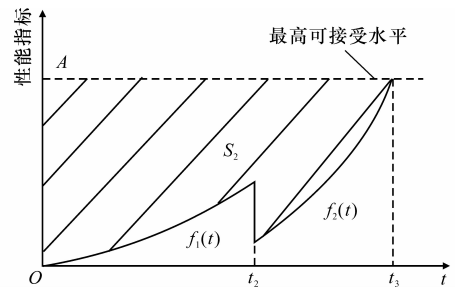


图4 实施预防性养护后随路龄递增的路面性能曲线

$$S_2 = \int_0^{t_2} [f_1(t) - A] dt + \int_{t_2}^{t_3} [f_2(t) - A] dt \quad \text{或}$$

$$S_2 = \int_0^{t_2} [A - f_1(t)] dt + \int_{t_2}^{t_3} [A - f_2(t)] dt \quad (2)$$

式中: S_1 为未实施预防性养护措施的路面性能曲线下部(上部)斜线部分的面积; $f_1(t)$ 为未实施预防性养护的路面性能曲线函数; A 为路面最低(最高)可接受水平; t_1 为未实施预防性养护路面性能下降到最低(最高)可接受水平的时间; S_2 为实施预防性养护措施后路面性能曲线下部(上部)斜线部分面积; $f_2(t)$ 为实施某种养护措施后路面性能曲线函数; t_2 为实施预防性养护的时间; t_3 为实施某种预防性养护措施后路面性能下降到最低(最高)可接受水平的时间。

根据式(1)、式(2),可得到由于实施了养护措施而导致的性能曲线面积变化量,记为 S_c ($S_c =$

$S_2 - S_1$), 表示在 t_2 时间实施某种预防性养护措施获得的绝对效益。

2 基于分项性能指标的综合效益评价

根据前面建立的基于性能指标的养护效益的计算方法, 可以针对 5 个单项路面评价指标, 分别求出由于某时刻实施了某种养护措施相应增加的绝对效益值。为了确定该预防性养护措施的最佳养护时机, 应该计算出不同时间各分项性能指标能够增加的绝对效益, 并进行效益值比较。但对于各分项指标的比较结果, 并不能确定最佳效益值, 必须对各分项指标的效益值进行综合分析。由于不同评价指标量纲不同, 所以必须将绝对效益值量纲一化。

为此, 定义 E 为相对效益, 并令

$$E = \frac{S_c}{S_1}$$

在进行综合效益分析的时候, 按 5 个单项指标计算出的相对效益, 对最后的决策结果起的作用是不同的, 因此必须进行加权处理。综合以上分析, 对于一种预防性养护措施, 在 j 时刻实施能够获得的综合效益计算式为

$$V_{TE_j} = \sum_{i=1}^5 k_i E_{ij} \quad (3)$$

式中: V_{TE_j} 为在 j 时刻实施某种预防性养护措施能够获得的综合效益; E_{ij} 为在 j 时刻实施某种预防性养护第 i 个性能指标对应的相对效益值; k_i 为第 i 个性能指标对应的相对效益值的权重, 且 $\sum_{i=1}^5 k_i = 1$; $i = 1, 2, 3, 4, 5$ (分别表示平整度、抗滑系数、车辙、裂缝率和修补率 5 个指标)。

2.1 确定分析期

在进行综合效益计算时, 由于各分项指标达到最高(或最低)可接受水平的不同, 因此必须确定一个合理的分析期, 使综合效益的计算具有统一的标准。

$$T_a^j = \min_{1 \leq i \leq 5} \{t_i^j\}$$

式中: T_a^j 为在 j 时刻实施某种预防性养护措施的分析期; t_i^j 为在 j 时刻实施某种预防性养护措施后第 i 个性能指标达到可接受水平的不同。

在计算各分项指标的 S_1 时, 如果出现 $t_1 > T_a^j$, 则令 $t_1 = T_a^j$ 。

路面实施预防性养护的目的是, 为了提高服务能力, 同时尽可能地延长路面服务寿命。因此, 需要计算因实施了预防性养护措施导致的路面服务年限

的变化。首先确定未实施预防性养护措施的路面服务寿命 T_n , 根据前面分析, 则有

$$T_n = \min_{1 \leq i \leq 5} \{t_i\}$$

式中: T_n 为未实施预防性养护措施的路面服务寿命; t_i 为未实施预防性养护措施第 i 个路面性能指标达到可接受水平的不同。

所以在 j 时刻实施预防性养护措施后, 路面服务寿命变化 (ΔT^j) 为

$$\Delta T^j = T_a^j - T_n$$

2.2 分项指标权重分析

在利用式(3)进行养护综合效益分析时, 需要确定 5 个分项指标的权重。在进行养护综合效益分析时, 计算结果表示, 由于对路面实施某种预防性养护措施, 导致 5 个分项指标的综合改善情况。确定权重的过程主要分为 2 个步骤。

(1) 确定分项指标的个数, 即确定权重为 0 的性能指标。为确定分项指标的个数, 必须首先对既定的预防性养护措施进行技术分析, 分析其技术特点和适用范围; 然后在此基础上确定分项指标的个数。例如, 对于石屑封层技术, 其处理路面车辙的能力相当有限, 几乎可以忽略, 在计算其综合效益的时候, 只考虑除车辙指标以外的其他 4 个分项指标, 因此路面车辙指标对应的权重为 0。

(2) 确定非 0 权重性能指标的权重。在确定非 0 权重性能指标的权重时, 通过专家咨询, 采用逐对比较法确定。将几个单项指标两两逐对比较, 由专家判断确定各指标的相对重要性。若前 1 个指标比后 1 个重要, 则前者得 1 分, 后者得 0 分, 若二者相当, 则各得 0.5 分; 累计各指标的得分, 并进行正则化计算, 求得分指标权重系数向量 $k = \{k_1, k_2, k_3, k_4, k_5\}$ 。确定分项指标权重时, 需要在分析选定的预防性养护措施技术特点的同时, 还要充分考虑到地区差别、气候条件以及交通状况等因素。

3 费用分析

本文费用分析采用等额年费用法, 把分析期内不同时间支出的费用, 转换成每年等额支出的费用; 而对每年等额支出的费用, 则不用转换; 其他费用必须依照等额支付资金恢复系数, 按贴现率和分析期进行转换。但首先要按式(4) 把其折算成现值, 即

$$V_{PWC} = \frac{C}{(1+d)^n} \quad (4)$$

式中: V_{PWC} 为分析期内所涉费用现值; C 为分析期内第 n 年发生的费用; d 为折现率。

然后需要按照式(5),把分析期内的总费用现值转换成等额年费用,即

$$V_{AC_j} = \frac{d(1+d)^{T'_a}}{(1+d)^{T'_a} - 1} \sum V_{PWC_j} \quad (5)$$

式中: V_{AC_j} 为在 j 时间实施某种预防性养护措施后的等额年费用值; $\sum V_{PWC_j}$ 为在 j 时间实施某种预防性养护措施对应的费用总值; T'_a 为在 j 时间实施某种预防性养护措施的分析期。

4 养护时机的决策指标

通过前面分析,得到综合相对效益和等额年费用 2 个指标。利用这 2 个指标计算单位费用的效益值,用 V_{BC_j} 表示效益费用比值,即

$$V_{BC_j} = \frac{V_{TE_j}}{V_{AC_j}}$$

式中: V_{BC_j} 为在 j 时间实施某种预防性养护措施的单位费用效益。

为了使比较变得更加直观,利用效益费用比值定义效益指数 V_{EI_j} 为其对应的效益费用比值除以所有方案获得的效益费用比值中的最大值,即

$$V_{EI_j} = \frac{V_{EC_j}}{\max\{V_{EC}\}}$$

式中: V_{EI_j} 为在 j 时间实施某种预防性养护措施获得的效益指数。

综合前面分析,可以形成 4 个决策指标:综合效益值、等额年费用值、效益指数和路面服务寿命变化量。根据这 4 个决策指标可制定不同的决策原则。

(1) 费用最小原则。只考虑费用,在其他条件相同的情况下,选择年费用最小的方案为经济方案。

(2) 最大综合效益原则。从路面服务能力出发考虑养护效益,利用计算出的综合效益值,选择综合效益最大的方案为最佳方案。

(3) 最大单位费用效益原则。利用计算出的等额年费用值和效益指数,比较各方案单位费用所能产生的效益,选择最大单位费用效益的方案。

(4) 最长服务年限原则。比较路面服务寿命的变化量 ΔT 进行决策,选择最大延长路面服务寿命的方案。

(5) 综合平衡原则。综合考虑 4 个决策指标,努力寻求综合最优。

总之,4 个决策指标从不同的侧面反映了决策者的需求。综合效益值反映了路面的服务能力,等额年费用值从养护费用的角度反映了资金的消耗,效益指数从效益费用比的角度定义了单位费用所能产

生的路面综合服务能力,路面服务寿命变化量反映了路面服务时间的长短。决策者可以根据自己的需要采取相应的决策原则,最后形成最佳养护时机决策步骤如图 5 所示。

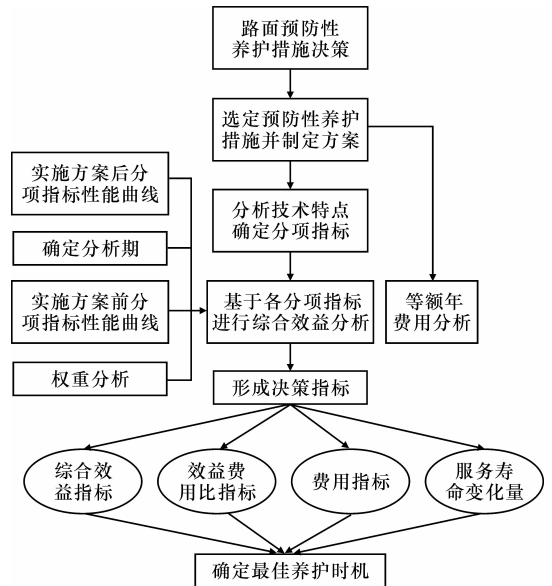


图 5 确定一种预防性养护措施的养护时机决策步骤

5 算例分析

5.1 算例 1

为了分析决策方法的可行性,本文利用某高速公路有限的路面检测数据对决策方法进行检验。针对路龄分别为 4、6、8 年时实施罩面养护等 3 种方案进行分析。该高速公路于 2005 年进行了一次罩面,因此以罩面技术作为分析对象。根据罩面技术的特点,应该采用 5 个分析指标进行综合分析,因为无法得到修补率的数据,所以只进行了 4 个指标的综合分析。通过对 2005 年 5 个路段各项指标的分析,可以得到未实施罩面的 4 个路面性能指标的回归方程,见表 1。由于没有不同时间实施罩面的统计数据,所以无法建立相应的路面性能衰变方程,而只有假设不同时间实施罩面后路面性能衰变方程保持不变。于是,利用 2005 年以后的检测数据,回归得到需要的路面性能衰变方程,见下页表 2。根据路面 4 个指标的检测数据,确定综合效益分析中 4 个指标的权重取值,见下页表 3。

表 1 未实施罩面措施的各分项路面性能指标衰变回归方程

分项指标名称	衰变回归方程	备注
行驶质量指数 V_{RQI}	$V_{RQI} = 10 - 0.87t^{0.1058}$	t 为路龄
路面抗滑摆值 V_{BPN}	$V_{BPN} = 49.76 - 1.46t$	
裂缝率 C_k	$C_k = 0.3863t$	
车辙深度 D_r	$D_r = 0.692t + 1.8$	

表 2 实施罩面措施后的路面性能衰变回归方程

分项指标名称	衰变回归方程	备注
行驶质量指数	$V_{RQI} = 10 - 0.732t'^{0.0089}$	t' 为实施 养护措施 后的时间
路面抗滑摆值	$V_{BPN} = 49.3 - 1.48t'$	
裂缝率	$C_k = 1.5969t'$	
车辙深度	$D_r = 3.4599e^{0.1336t'}$	

表 3 分项指标权重取值

名称	行驶质量指数	抗滑系数	裂缝率	车辙深度
权重 k	0.1	0.3	0.3	0.3

在确定路面各性能指标的衰变方程后, 还需要确定另外一些分析参数。这些参数包括: 各分项指标对应的最低(最高)可接受水平、相关费用的参数, 具体取值见表 4。

表 4 相关计算参数取值

参数	可接受水平	参数	取值
行驶质量指数	7	养护罩面费用单价(未考虑用户费用等其他费用)/(元·(km·车道) ⁻¹)	281 250
路面抗滑摆值	37		
裂缝率 / %	5	折现率 / %	10
车辙深度 / mm	10		

根据建立的回归方程和设定的参数, 计算得到 3 种方案的路面各单项指标所对应的效益值, 见表 5; 最后得到所有决策指标的计算结果, 见表 6。

表 5 各单项指标相对效益值

实施时间 / 年	行驶质量指数	抗滑系数	裂缝率	车辙深度
4	0.065 1	0.299 7	-0.031 8	0.100 1
6	0.057 2	0.445 3	0.051 2	0.179 1
8	0.051 1	0.536 5	0.120 8	0.255 5

表 6 决策指标计算结果

实施时间 / 年	综合效益	等额年费用 / 元	效益指数	服务寿命变化量 / 年
4	0.116 9	39 067.27	21.560 2	-1.6
6	0.208 4	27 375.64	54.853 1	0.4
8	0.279 0	20 097.88	100	2.4

表 6 中 4 个决策指标的计算结果均显示: 3 个方案中处置实施时间越晚, 越能够得到良好的综合效益, 等额年费用最低, 效益指数最大, 获得的额外服务寿命越长。但事实上, 这是不符合工程实际的。造成这种计算结果的原因是, 对于不同方案采用了统一的路面性能衰变方程, 没有体现路面性能在不同的处置时间对应着不同衰变方程的事实。由此可见, 综合效益分析的精度主要取决于所采用的路面性能衰变方程的准确程度。

5.2 算例 2

对于一种预防性养护措施, 不同的实施时间, 路面性能变化应该是不同的。也就是说, 路面实施预防

性养护措施后, 其性能变化在一定程度上取决于原来路面性能的状况。由于缺乏必要的路面检测数据, 无法得到相关的路面性能函数, 故不能对具体某条路做真实的决策分析。

为了更好地说明问题, 算例 2 是在假设条件下进行的。文献[1]认为: 实施养护措施时, 路面性能状况越好, 则对路面性能改善的幅度越小, 但能够更好地降低路面性能的衰变速率; 而当路面性能状况较差时, 则路面性能改善幅度大, 但对于降低性能衰变速率的效果变差。在此结论的基础上, 对所需分析方程进行必要的假设。为了方便分析, 只计算 1 个路面综合性能指标, 假设一条路在没有实施预防性养护和在不同时间实施微表处技术后, 路况指数衰变方程见表 7; 其他相关参数的设定值见表 8; 不同处置时间的路况指数衰变曲线如图 6 所示。

表 7 路况指数衰变方程

实施时间 / 年	路况指数 V_{PCI} 衰变方程	备注
未实施	$V_{PCI} = 100 (1 - \text{EXP}(-(10.2/t)^{0.89}))$	t 为路龄
3	$V_{PCI} = 100 (1 - \text{EXP}(-(12.1/t')^{0.98}))$	t' 为实施 养护措施 后的时间
4	$V_{PCI} = 100 (1 - \text{EXP}(-(11.4/t')^{0.94}))$	
6	$V_{PCI} = 100 (1 - \text{EXP}(-(6.6/t')^{0.86}))$	
8	$V_{PCI} = 100 (1 - \text{EXP}(-(6.3/t')^{0.57}))$	

表 8 相关参数设定值

参数	V_{PCI} 最低可接受水平	费用 / (元·(km·车道) ⁻¹)	折现率
取值	70	140 625	10%

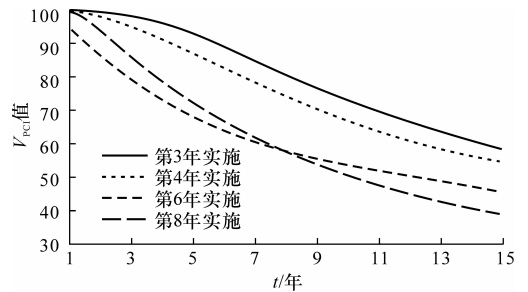


图 6 不同处置时间后的路况指数衰变曲线

根据建立的路况指数衰变方程和设定的参数值计算 4 个决策指标, 计算结果见表 9。

表 9 决策指标计算结果

实施时间 / 年	综合效益	等额年费用 / 元	效益指数	服务寿命变化量 / 年
3	0.287 1	14 816.45	53.823 7	4.9
4	0.449 9	12 824.91	97.448 8	6.3
6	0.433 3	12 038.34	100	3.1
8	0.312 1	9 422.98	92.000 4	4.3

计算结果表明: 在第 3 年实施养护措施获得的综合效益最小, 等额年费用最大, 效益指数最小。这

说明,如果选择在第3年执行微表处方案显得太早,会造成浪费。而选择在第4年进行微表处方案,能够获得2项指标最优,能满足最大综合效益原则和最长服务年限原则,即综合效益最大,路面服务寿命的增加值最大。如果选择在第6年进行微表处方案,效益指数最大,能满足最大单位费用效益原则,即单位费用获取的效益最多,但获得的路面服务寿命延长量最小。实施养护措施时间越晚,则满足最小等额年费用原则,但综合其他计算结果,在第8年实施微表处方案仅获得1项指标最优。服务寿命变化量的计算结果显示,选择在第8年实施养护方案,获得的服务寿命延长量大于在第6年实施方案获得值,表面看似有悖实际。但由图6可知,除了在第6年执行养护措施所选方案外,其他3种方案实施后的路面性能衰变曲线变化趋势大体相同;在第6年实施方案后,路面性能曲线前期衰变比在第8年实施方案后路面性能曲线前期衰变下降快,即前一种方案比后一种方案能更快地达到路况指数最低可接受水平,因此,在路面服务寿命变化量的计算结果上出现上述情况。实际上,在具体决策中很难使某一个方案的各项决策指标都达到最优,但是可以根据实际需要有侧重地选择养护方案。总之,在此算例中选择在第4年进行预防性养护是所列举方案中最佳的决策。

根据决策方法的计算过程可知,所有有关效益的计算结果无不与路面性能衰变表达式函数相关,说明准确地表达路面性能衰变规律至关重要。因此,成功决策的前提就是必须具有充足的路面性能检测数据和可靠的预测模型,以便得到用来分析路面性能指标的函数。

6 结 语

(1)最佳预防性养护时机决策模型通过综合效益和费用分析,形成了4个决策指标:综合效益值、等额年费用值、效益指数和路面服务寿命变化量;根据这4个决策指标形成了费用最小原则、最大综合效益原则、最大单位费用效益原则、最长服务年限原则和综合平衡原则;决策者可以根据需要,采用相应的决策原则。

(2)决策模型基于路面分项性能指标,定义了由于实施预防性养护措施获得的路面综合效益;根据分析期内实施预防性养护前后路面性能指标曲线面

积的变化,计算出各分项指标对应的效益值,然后对分项指标的效益值进行加权计算得到综合效益;通过分项指标加权计算综合效益,能够突出某项指标的作用,更加客观真实地反映养护对象的特点。

(3)根据算例分析可知,综合效益分析的精度主要取决于所描述的路面性能曲线的准确程度;成功决策的前提必须具有足够的路面性能检测数据和可靠的预测模型,以便得到路面性能指标函数。

参考文献:

References:

- [1] 王笑风. 高速公路半刚性基层沥青路面预防性养护体系研究[D]. 西安:长安大学,2007.
- [2] 张占军,王笑风. 沥青路面使用性能的双参数修正预测模型[J]. 交通运输工程学报,2007,7(5):54-57.
ZHANG Zhan-jun, WANG Xiao-feng. Service performance prediction model of asphalt pavement with two corrected parameters[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2007,7(5):54-57.
- [3] 胡忠录,李应强. 沥青路面养护快速化探讨[J]. 筑路机械与施工机械化,2008,25(9):50-52.
HU Zhong-lu, LI Ying-qiang. Discuss on rapid maintenance of asphalt pavement[J]. Road Machinery & Construction Mechanization,2009,25(9):50-52.
- [4] 聂涛. 国省干线公路沥青路面预防性养护技术与施工机械[J]. 筑路机械与施工机械化,2008,25(9):55-58.
NIE Tao. Preventative maintenance technology and construction machinery of asphalt pavement for trunk roads[J]. Road Machinery & Construction Mechanization,2009,25(9):55-58.
- [5] 王朝辉,王丽君,白军华,等. 基于时段的沥青路面预防性养护时机与对策一体优化研究[J]. 中国公路学报,2010,23(5):27-34.
WANG Chao-hui, WANG Li-jun, BAI Jun-hua, et al. Research on integration optimization of asphalt pavement preventative maintenance timing and countermeasures during period[J]. China Journal of Highway and Transport,2010,23(5):27-34.
- [6] 雷宇,陈团结,赵明,等. 路面预防性养护规划应用实例[J]. 中外公路,2010,30(6):27-33.
LEI Yu, CHEN Tuan-jie, ZHAO Ming, et al. Planning application examples of pavement preventative maintenance[J]. Journal of China & Foreign Highway,2010,30(6):27-33.