

基于熵权物元分析法路面养护决策研究及工程应用

陈少华¹ 张木旺² 应鹏翔³ 李唯至⁴

1. 武义县交通运输局, 浙江 金华 321000

2. 武义县公路管理中心, 浙江 金华 321000

3. 东阳市公路与运输管理中心, 浙江 金华 321000

4. 河海大学, 江苏 南京 210024

[摘要]路面养护决策的本质就是解决3“W”的问题: 在合适的时间(when)采用合理的养护方案(what)应用于正确的路段(where)。文章选取层次分析法修正后路面使用性能指数、流变次数指数和断裂能指数作为养护决策模型的评价指标, 结合熵权物元法进行养护段落的养护优先级排序, 建立沥青路面使用性能与材料性能相结合的养护决策体系, 并选取某高速浙江段作为工程应用。

[关键词]高速公路; 养护决策; 熵权物元法; 评价指标; 性能耦合

DOI: 10.33142/sca.v9i2.19119

中图分类号: U418.6

文献标识码: A

Research and Engineering Application of Pavement Maintenance Decision Making Based on Entropy Weight Matter Element Analysis Method

CHEN Shaohua¹, ZHANG Muwang², YING Pengxiang³, LI Weizhi⁴

1. Wuyi County Transportation Bureau, Jinhua, Zhejiang, 321000, China

2. Wuyi County Highway Management Center, Jinhua, Zhejiang, 321000, China

3. Dongyang Highway and Transportation Management Center, Jinhua, Zhejiang, 321000, China

4. Hohai University, Nanjing, Jiangsu, 210024, China

Abstract: The essence of road maintenance decision-making is to solve the 3 "W" problem: to adopt a reasonable maintenance plan (what) at the appropriate time (when) and apply it to the correct road section (where). The article selects the modified pavement performance index, rheological frequency index, and fracture energy index of the Analytic Hierarchy Process as the evaluation indicators for the maintenance decision model. Combined with the entropy weight matter element method, the maintenance priority of maintenance sections is sorted, and a maintenance decision system combining asphalt pavement performance and material properties is established. A certain high-speed Zhejiang section is selected as the engineering application.

Keywords: expressway; maintenance decision-making; entropy weight matter element method; evaluation indicators; performance coupling

引言

我国高速公路已逐步从“建养并重”转入“以养为主”阶段, 截至2025年, 全国高速公路养护比例达98%。高速公路长期服役后, 车辙、裂缝等典型病害频发, 且传统养护决策多依赖路面使用性能指数(PQI), 该指数存在权重固化、未考虑材料性能衰减的缺陷, 导致决策科学性不足。路面服役性能是使用性能与材料性能的耦合结果, 使用性能反映路表直观状态, 材料性能决定路面长期稳定性。因此, 本文构建“使用性能+材料性能”的双维度评价体系, 选取针对性指标, 结合熵权物元法建立决策模型, 通过工程实例验证, 为高速公路养护优先级排序提供科学依据。

1 养护决策评价指标选取

评价指标选取遵循贴合实际病害、覆盖核心性能、数据易获取的原则, 结合浙江省高速交通量大、夏季高温、冬季低温的气候特点及典型病害特征, 最终确定4项核心指标。^[1]

1.1 层次分析法修正后的 PQI

PQI 是路表综合性能核心指标, 涵盖破损、平整度、车辙、抗滑四项指标。现行规范 PQI 权重与浙江高速实际不符, 浙江养护重点为车辙和裂缝, 对平整度优先级要求较低。本文采用 AHP 层次分析法, 结合浙江实际重新确定各单项指标权重, 修正后的 PQI 更贴合浙江高速路表服役状态, 规避权重固化带来的决策偏差。

表 1 各项指标所占权重

AHP 层次分析结果	
方案层	权重
RQI	8.794%
PCI	20.153%
RDI	48.034%
SRI	23.019%

1.2 流变次数指数 (Fi)

车辙是浙江高速典型病害,部分路段深度达 13.5mm。传统车辙深度指数 (RDI) 仅反映路表变形,无法体现沥青混合料高温抗变形能力。Fi 依据标准,通过动态蠕变试验获取,表征稳定蠕变与加速蠕变临界点的加载次数,可精准评价高温抗车辙性能,数据可由现场取芯与室内试验便捷得到,弥补了 RDI 的不足。

1.3 临界应变能 (Jc)

浙江高速中温自上而下开裂频发,横缝中约 30% 为疲劳裂缝。路面破损指数 (PCI) 仅统计裂缝数量,无法反映材料抗裂潜力。Jc 通过 25°C 预切缝 SCB 半圆弯曲试验测得,表征混合料中温抗裂扩展能量,试件制备简单、受力贴近路面实际,可有效识别开裂风险,为中温抗裂养护提供依据。

1.4 断裂能指数 (Gf)

冬季低温易产生反射裂缝,PCI 难以区分裂缝成因与材料抗裂差异。Gf 通过 -10°C 不切缝 SCB 试验计算,反映混合料低温断裂耗能,可全面评价低温抗裂性能,适配浙江双层改性沥青路面结构,精准识别抗裂薄弱路段。以上四项指标分别覆盖路表综合性能、高温抗车辙、中温抗裂、低温抗裂四大维度,与传统指标弱相关 ($R^2 < 0.6$),形成互补的综合评价体系,可科学支撑项目级养护决策。

2 高速公路路面养护决策体系建立

2.1 熵权法确定权重

评价指标所占权重在路面养护决策中非常重要,它反映了每个指标在评价的过程中的地位以及起到的影响。本文选用熵权法^[3-4],通过各个数据自身的信息来确定权重的大小。在路面养护决策中运用熵权法来计算每个评价指标权重,计算步骤如下:

(1) 评价指标数据标准化处理

假设有 n 个养护段落和 Fi、Jc、Gf 和 PQI 四个评价指标并且 $i \in [0, n], j \in [0, 4]$, 以此来构建矩阵 $X = \{X_{ij}\}_{n \times 4}$ 。并对指标进行标准化处理:

$$Y = \frac{X_{ij} - \min(X_i)}{\max(X_i) - \min(X_i)} = \{Y_{ab}\} \quad (1)$$

式中: X_{ij} 表示第 i 个路段的第 j 个评价指标的值; Y_{ij} 是 X_{ij} 经过标准化处理后的矩阵。

(2) 求解各个指标的信息熵

第 j 个评价指标的信息熵的计算公式如下:

$$E_j = -\ln(n) \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (2)$$

式中: $p_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^n Y_{abij}}$, 若 $p_{ij} = 0$, 那么定义

$\lim_{p_{ab} \rightarrow 0} p_{ab} \ln p_{ab} = 0$ 。

(3) 确定各指标权重

根据信息熵的计算公式计算出每个信息熵之后,通过信息熵计算各个评价中指标的权重。

$$W_j = \frac{1 - E_j}{n - \sum_{j=1}^n E_j} \quad (3)$$

2.2 路面养护决策模型建立

(1) 物元分析法介绍

可实现不相容问题的相容化处理^[5],融合定性与定量分析。通过熵权法确定指标权重后,以单个养护路段的评价指标构建物元,选取各指标最大值组成最佳养护路段物元,建立关联系数复合物元并加权平均,得到综合关联度,以此进行养护优先级排序。

(2) 熵权物元分析法建立养护决策模型

① 建立单个路段评价指标物元 R

基于一个养护路段的所选 4 个评价指标建立特征指

标集 $C = \{F_i, J_c, G_f, PQI\}$; 将 n 个养护路段组成路段集

合 $P = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ 。用单项指标对于每个路段的进行评价,再将单项评价指标进行规范处理得到 a_i 这个指标遵循越大越优原则,将这些单项评价指标建立物元 R。

② 建立 n 个路段复合物元 R_n

基于 n 个养护路段,就将每个路段的物元 R 组合成 n 个路段的复合物元

③ 建立最佳养护路段物元 R_0

因为 R_n 是按照越大越优原则建立的,所以从 R_n 中选取每个评价指标的特征指标的最大值建立最佳养护路段物元 R_0 。

④ 建立关联系数复合物元 R_{Ln}

根据各个养护路段所构造的复合物元,建立基于关联系数的复合物元 R_{Ln} 。

⑤ 建立综合关联度复合物元 RD_{Ln}

关联系数只能表征各个独立的养护路段和最佳路段在一个评价指标上的关联度,而路段整体和最佳方案的关联程度并不能由关联系数表征。因此,需要根据熵权法得出每个评价指标关联系数的权重进行加权处理,从而能够建立一个综合关联度的复合物元 RD_{Ln} 。

⑥ 基于 RD_{Ln} 进行养护优先级排序

通过熵权物元分析法建立了综合关联度的复合物元 RD_{Ln} , 关联度大小就代表着养护路段路面综合性能的优劣,综合关联度与路面性能呈正相关,关联度越大,路段综合性能越好。所以,在进行路面养护决策时,需要优先养护的是综合关联度最小的路段。

2.3 高速公路路面养护决策方案

建立养护决策模型后,制定配套决策方案,选取流变次数指数 Fi、临界应变能 Jc、断裂能指数 Gf 及路面使用性能指数 PQI 为评价指标,结合路表使用性能对运营影响更直接的特点,先筛选使用性能较差路段,再通过现场取芯评价材料性能确定养护优先级,具体流程如下。

(1) 对于路面行驶质量、破损状况、车辙以及抗滑

性能进行调研分析,选取路面使用性能指数未达标的路段,将其养护优先级提高,并制定相应的养护对策。

(2) 针对使用性能评级未达标的段落,进行现场取芯,进行高温性能和低温抗裂性能试验,分析该路段沥青混合料材料性能,得出表征路面高温性能的评价指标流变指数次数 F_i 、路面中温抗裂性能临界应变能 J_c 和路面低温抗裂性能断裂能指数 G_f 。

(3) 采用熵权法,确定流变指数次数 F_i 、临界应变能 J_c 、断裂能指数 G_f 和路面使用性能指数 PQI 在综合评价中所占权重。

(4) 通过熵权物元分析法建立综合关联度复合物元 RD_{Ln} ,用于养护决策中的养护优先级排序。

3 高速公路沥青路面养护决策工程应用

3.1 工程概况

某高速浙江段路面结构为:4cmSMA-13(上面层)+6cmSUP-20(中面层)+8cmSUP-25(下面层)+38cm水泥稳定碎石(基层)+20cm二灰稳定土(底基层),上中面层采用改性沥青,广泛应用 SMA 和 Superpave 混合料。

3.2 路面使用性能评价

根据某高速管养单位提供的 2021 年路面检测数据整理分析可得该高速 2021 年 PQI 如下表所示:

表 2 2021 年某高速 PQI 指数统计

方向	PQI	PCI	RQI	RDI	SRI
上行方向	95.763	97.15	95.23	95.81	92.97
下行方向	95.959	97.65	95.16	95.67	93.67

3.3 路面材料性能评价

(1) 某高速路面芯样高温性能评价

本节采用动态蠕变试验对所取芯样的整体高温性能进行评价,采用汉堡车辙试验对芯样的分层高温性能进行评价。

① 芯样整体高温性能评价

针对于某高速浙江段沥青路面整体高温性能情况,选取某高速浙江段大修段落内所取路面芯样,进行动态蠕变试验,试验结果如表 3 所示。

表 3 某高速动态蠕变试验结果

序号	方向	桩号	车辙深度 (mm)	流变次数 F_n (次)	流变时应变 ($\mu\epsilon$)	流变次数指数 F_i ($\mu\epsilon/\text{次}$)
1	下行方向	K84+505	12.5	98	30322	309.41
2	下行方向	K81+100	10.5	113	33620	297.5221239
3	下行方向	K56+520	10.7	112	33640	300.3571429
4	上行方向	K50+260	8.06	169	42432	251.08
5	上行方向	K55+500	13.5	134	44045	328.69

② 芯样分层高温性能评价

针对于某高速浙江段沥青路面分层高温性能情况,选取某高速浙江段大修段落内所取路面芯样,进行汉堡车辙试验,试验结果如表 4 所示。

表 4 某高速汉堡车辙试验结果

序号	方向	桩号	面层	汉堡车辙深度 (mm)	车辙深度 (mm)
1	下行方向	K84+505	上面层	1.9	12.5
			中面层	2.3	
			下面层	5.1	
2	下行方向	K81+100	中面层	2.1	10.5
			下面层	3.9	
3	下行方向	K56+520	上面层	2.2	10.7
			中面层	1.7	
			下面层	4.6	
4	上行方向	K50+260	上面层	2.5	8.06
			中面层	1.5	
			下面层	4.3	
5	上行方向	K55+500	中面层	2.3	13.5
			下面层	5.3	

汉堡车辙试验结果可知,某高速上中面层改性沥青段汉堡车辙深度评级以 2 级为主、部分 3 级,下面层基质沥青段评级均为 2 级,高温性能稳定,养护决策需重点关注上中面层。

(2) 某高速路面芯样中温抗裂性能评价

针对于某高速沥青路面中温抗裂性能情况,对大修段落内所取路面芯样,进行预切缝 SCB 半圆弯曲试验,试验结果如表 5 所示。

表 5 某高速 SCB 半圆弯曲试验结果

序号	方向	桩号	面层	临界应变能 (KJ/m^2)	评级
1	下行方向	K84+335	上面层	1.57	A
			中面层	1.62	A
			下面层	1.33	A
2	下行方向	K81+258	上面层	1.29	A
			中面层	1.23	A
			下面层	1.15	A
3	下行方向	K56+520	上面层	1.49	A
			中面层	1.53	A
			下面层	1.36	A
4	上行方向	K50+260	上面层	0.61	A
			中面层	0.63	A
			下面层	0.48	B
5	上行方向	K55+500	上面层	0.56	A
			中面层	0.62	A
			下面层	0.49	B

(3) 某高速路面芯样低温抗裂性能评价

针对于某高速沥青路面低温抗裂性能情况,某高速浙江段大修段落内所取路面芯样,进行不切缝 SCB 半圆弯曲试验,试验结果如表 6 所示。

表 6 某高速不切缝 SCB 半圆弯曲试验结果

序号	方向	桩号	面层	抗弯拉强度 (MPa)	断裂能 (J/m ²)
1	下行方向	K84+335	上面层	5.31	1558.37
			中面层	4.26	1212.28
			下面层	4.44	1242.66
2	下行方向	K81+258	上面层	3.23	1126.14
			中面层	5.09	1233.11
			下面层	3.03	937.19
3	下行方向	K56+520	上面层	2.92	916.45
			中面层	3.45	1268.29
			下面层	2.96	991.54
4	上行方向	K50+260	上面层	4.99	1442.66
			中面层	4.88	1276.31
			下面层	5.02	1421.86
5	上行方向	K55+500	上面层	3.81	1177.46
			中面层	5.31	1764.34
			下面层	3.67	1293.28

由不切缝 SCB 半圆弯曲试验结果可得, 中面层的抗裂性能最好, 其次是上面层, 最终是下面层。

3.4 路面养护决策应用

(1) 评价指标选择

本文在进行养护决策评价时, 将路面使用性能和材料性能相结合, 从路面高温性能、中温抗裂性能、低温抗裂性能和路面使用性能四个方面进行评价, 选择流变指数次数 F_i 、临界应变能 J_c 、断裂能指数 G_f 和层次分析法修正后的路面使用性能指数 PQI 为评价指标。

(2) 评价指标权重分析

本节选用某高速下行方向 K50+000-K51+000、K81+000-K82+000、K84+000-K85+000 和上行方向 K50+000-K51+000、K55+000-K56+000 这五个养护段落, 采用熵权法计算四个评价所占权重。在使用熵权物元法进行养护决策时, 是按照越大越优原则, 临界应变能 J_c 、断裂能指数 G_f 和路面使用性能 PQI 都是越大越好的, 但流变指数次数 F_i 则是越小越好, 所以为了保持评价指标的一致性, 所以对流变指数次数 F_i 进行倒数处理。具体数据如表 7 所示。

表 7 养护段落评价指标数据

编号	评价段落	评价指标			
		1/ F_i	J_c	G_f	PQI
1	下行 K56+000-K57+000	0.003329	1.49	1588.37	90.92
2	下行 K80+000-K81+000	0.003361	1.29	1126.14	91.27
3	下行 K84+000-K85+000	0.003232	1.57	916.00	93.62
4	上行 K50+000-K51+000	0.003983	0.61	1442.66	92.77
5	上行 K55+000-K56+000	0.003042	0.56	1177.46	91.47

①构建养护段落矩阵

以 D_1 至 D_5 代表五个养护段落、 C_1 至 C_4 代表四个评价指标, 建立养护段落矩阵如下:

$$X = \begin{bmatrix} D_1 & C_1 & C_2 & C_3 & C_4 \\ D_2 & 0.00333 & 1.49 & 1588.37 & 90.92 \\ D_3 & 0.00336 & 1.29 & 1126.14 & 91.27 \\ D_4 & 0.00323 & 1.57 & 916.00 & 94.62 \\ D_5 & 0.00398 & 0.61 & 1442.66 & 92.77 \\ D_6 & 0.00304 & 0.56 & 1177.46 & 91.47 \end{bmatrix} \quad (4)$$

②评价指标数据标准化处理

因为每个指标各自的含义都不相同, 评价指标的标准有差异, 指标的数据、单位都不相同, 所以按照公式 (1) 评价指标的进行标准化处理。

③求解各指标信息熵

信息熵是熵权法核心要素, 某个指标的信息熵越大, 其包含的信息量就越小, 在评价时产生的影响就越小, 所占权重也越小, 反之亦然。按照式 (2) 计算四个指标的信息熵。

表 8 评价指标信息熵

评价指标	流变次数指数倒数 1/ F_i	临界应变能 J_c	断裂能 G_f	路面使用性能指数 PQI
信息熵	0.856	0.722	0.718	0.649

④计算各指标权重

根据信息熵的计算公式计算出每个信息熵之后通过公式 (3) 计算各评价中指标的权重。

表 9 评价指标权重

评价指标	流变次数指数倒数 1/ F_i	临界应变能 J_c	断裂能 G_f	路面使用性能指数 PQI
权重	0.13685	0.26358	0.26742	0.33216

(3) 路面养护优先级排序

①建立养护路段复合物元

根据表, 建立起养护路段复合物元 $R_{4 \times 5}$, 如式 (6) 所示。

$$R_{4 \times 5} = \begin{bmatrix} D_1 & D_2 & D_3 & D_4 & D_5 \\ C_1 & 0.00332 & 0.00336 & 0.00323 & 0.00398 & 0.00304 \\ C_2 & 1.49 & 1.29 & 1.57 & 0.61 & 0.56 \\ C_3 & 1588.37 & 1126.14 & 916.00 & 1442.66 & 1177.46 \\ C_4 & 90.92 & 91.27 & 94.62 & 92.77 & 91.47 \end{bmatrix} \quad (5)$$

②养护路段复合物元规范化

由于每个指标各自的含义都不相同, 评价标准有差异, 指标的数据单位都不相同, 所以和熵权法中一样, 采用归一法对复合物元进行规范化处理, 得到修正后的复核物元 $R_{4 \times 5}^*$ 。

③建立最佳路段物元

依据越大越优原则, 建立养护路段的最佳物元。

④建立关联系数复合物元

根据各个养护路段所构造的复合物元,建立基于关联系数的复合物元。

⑤建立综合关联度复合物元

将熵权法所得出的四个评价指标的权重与关联系数的复合物元 R_L 相结合,建立综合关联度的复合物元 RD_L ,如式(7)所示。

$$RD_L = \begin{bmatrix} D_1 & D_2 & D_3 & D_4 & D_5 \\ C & 0.663 & 0.459 & 0.738 & 0.58 & 0.377 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由最终建立的综合关联度复合物元得出养护路段的综合性能排序为: $D_3 > D_1 > D_4 > D_2 > D_5$,养护路段综合性能的优劣与养护优先级的先后呈相反关系,故这些路段的养护优先级排序为 $D_5 > D_2 > D_4 > D_1 > D_3$ 。同时,采用路面使用性能为评价指标进行养护优先级排序,两种决策方法的排序结果如表10所示。

表10 不同决策方法排序结果比较

决策方法	排序结果
基于使用性能养护优先级排序	$D_1 > D_2 > D_5 > D_4 > D_3$
基于熵权物元法养护优先级排序	$D_5 > D_2 > D_4 > D_1 > D_3$

运用熵权法和物元分析法,将路面使用性能和材料性能相结合,对养护路段进行养护优先级排序,养护顺序为 $D_5 > D_2 > D_4 > D_1 > D_3$ 。使用性能好的路段,其路面材料性能不一定好。并且各路段路面使用性能指数PQI之间差距很小,不能真实反映出各路段之间性能的差异,而引入材料指标后各路段之间的差异比较明显,更有利于养护优先级排序^[6],这表明基于使用性能与材料性能相结合的养护决策方法是科学合理的。

4 结论

本文建立基于熵权法与物元分析法的养护决策模型,用于养护优先级排序,并提出融合路面使用性能与材料性能的养护决策方案,以浙江某高速部分路段为对象开展应

用,主要内容如下:

(1) 梳理路面决策评价指标,在使用性能与高低温性能评价基础上,选取经层次分析法修正的路面使用性能指数PQI、流变次数指数Fi、断裂能指数Gf作为养护决策评价指标。

(2) 依托模型制定养护方案,先筛选使用性能较差路段,现场取芯并开展室内力学试验获取指标,再构建熵权物元综合关联度复合物元,其值越大,路面综合性能越好,养护优先级越低。

(3) 以某高速大修5个路段为例,分别采用熵权物元法与仅使用性能指标排序,结果存在,熵权物元法区分度更显著,表明材料性能与使用性能相对独立,二者结合可使养护决策更科学合理。

[参考文献]

- [1]袁大伟,闫亚鹏,曹海波.高速公路沥青路面综合养护决策指标及标准研究[J].公路,2024,69(9):331-336.
 - [2]赵全满,刘朝晖,姚向发,等.基于层次分析法的高速公路沥青路面预防性养护决策模型[J].公路,2023,68(9):381-387.
 - [3]宋文凯,刘尊青,谢海巍,等.基于熵权物元模型的城市道路网沥青路面养护决策研究[J].内蒙古公路与运输,2021(4):4.
 - [4]蒋玮,许庆正,单金焕.基于熵值赋权灰色马尔可夫法的沥青路面使用性能预测[J].中国科技论文,2022,17(6):595-601.
 - [5]李红梅.基于物元模型的网级高速公路沥青路面养护决策研究[D].江苏:东南大学,2017.
 - [6]张盼盼,马锐,权磊,等.基于材料性能演变模型的沥青路面养护决策分析[J].公路交通科技,2022,39(1):1-7.
- 作者简介:陈少华(1993.12—),单位:武义县交通运输局,男,汉族,籍贯:山东安丘,职称:工程师,学历:大学本科,研究方向:道路桥梁。