

# 基于FAHP的高速公路预防性养护方案比选

陆 罡

[上海城投(集团)有限公司,上海市 200020]

**摘要:** 预防性养护是一种改善路面使用性能、延长路面使用寿命、降低全周期养护成本的有效养护措施。预防性养护方案的选择要同时考虑道路管理者的需求和方案的应用效果,具有较大的不确定性。为了科学地选取高速公路预养护方案,基于模糊层次分析法,考虑技术效果、施工可操作性和经济性3个方面的9个因素,以上海两条高速公路工程为依托开展案例分析,为同类型预防性养护方案比选提供参考。

**关键词:** 高速公路;预防性养护;模糊层次分析法;方案比选

中图分类号: U418

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)03-0146-05

## 0 引言

作为现代交通的重要组成部分,高速公路承载着大量的车流量。长期以来,由于日趋增多的重载交通、有限的资金投入,以及司乘人员对交通出行安全与畅通的高要求等,管理部门面临巨大的养护工作压力。仅靠传统的“损坏发生再修复”的养护方式,较难应对养护任务和养护资金需求增大的压力。为了满足路面养护工作的需求,提高资金使用效益,降低全寿命周期成本,越来越多高速公路采用预防性养护来缓解当前的问题<sup>[1]</sup>。

从实践来看,采取预防性养护管理措施,可以在一定程度上阻止病害的进一步发展,延缓路面功能失效时间,有效减少因大修带来的高额养护费用和交通影响等安全问题<sup>[2]</sup>。

常见的预养护方式包括填缝类、封层类、薄层罩面及路面再生等。不同的方案具有不同的养护效果,施工过程产生的影响不一,价格各不相同,道路管理方的需求也不同。例如,对于日常交通流量较大的路段,施工造成的交通影响就更为重要。因此,应该结合道路管理方的实际需求选择合适的预养护方案。

对于高速公路预养护方案比选,目前已经有很多相关研究。李彬<sup>[3]</sup>以辽宁省某高速公路开展案例分析,结合实际预防性养护需求和寿命周期的理念,从经济性角度对比了超薄磨耗层和微表处两种方案

的优劣势。夏国法等<sup>[4]</sup>基于层次分析法,考虑技术、经济、环境等方面因素,构建了预养护方案决策模型。王磊<sup>[5]</sup>采用层次分析法,选用横向力系数、平整度指数、车辙深度及裂缝率构建沥青路面路用性能评价模型,基于路面性能选取适合的预养护方案。龙景彪等<sup>[6]</sup>基于模糊聚类分析方法开展方案优化,方案选择过程中考虑了费用、技术、工期、设备、环境保护、经验等因素。研究证明,模糊数学分析可以有效应对方案比选中复杂性和模糊性较大的问题。

综上,影响高速公路预养护方案选择的因素较多,且不同因素影响程度各异。不同专家学者对各因素的重要性判断标准较难统一,导致在评价过程中各因素的重要性程度具有较强的模糊性。为尽可能保证判断过程中的思维一致性,更合理地选择预防性养护方案,将模糊数学理论与传统的层次分析法相结合,对高速公路沥青路面预防性养护方案进行比选。

## 1 基于FAHP的预防性养护方案比选方法

### 1.1 方法框架

模糊层次分析法(fuzzy analytic hierarchy process, FAHP)可以处理信息不确定、模糊性很强的决策问题<sup>[7]</sup>。在FAHP中,通过将决策问题分解成多个子目标,构建出一个多层次结构模型。然后基于专家判断对各个层次的判断矩阵进行模糊化处理,得到模糊层次结构模型。通过计算出各个层次的权重向量,最终求解出整个层次结构网络中各个决策方案的排序。基于模糊层次分析的预防性养护方案比选方法框架如图1所示。

收稿日期: 2023-10-27

作者简介: 陆罡(1970—),男,本科,高级工程师,从事工程项目管理工作。

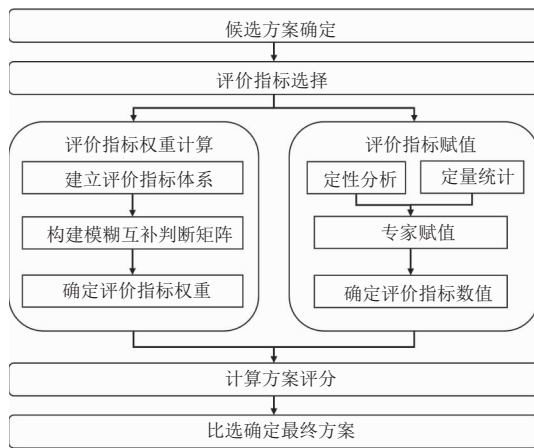


图1 基于FAHP的预防性养护方案比选方法框架

## 1.2 方法实施

### 1.2.1 评价指标体系建立

结合实际情况和文献调研,从技术效果、施工可操作性和经济性3个维度选取9个指标,构建评价指标体系(见表1)。

表1 评价指标体系

指标体系目标层	指标体系一级指标层	指标体系二级指标层
预防性养护最优方案 A1	技术效果 B1	抗滑性能 C1
		平整度 C2
		还原效果 C3
		色差消除 C4
		舒适性 C5
		耐久性 C6
	施工可操作性 B2	施工难易程度 C7
		对交通的影响 C8
	经济性 B3	价格 C9

### 1.2.2 建立判断矩阵

制定专家问卷,并进行调查和采集数据,得出两两比较的专家意见,建立判断矩阵,构建模糊判别矩阵  $A = (a_{ij})_{n \times n}$  表示第  $i$  个评价指标和第  $j$  个评价指标之间的重要性比较关系。对于  $a_{ij}$  一般使用 0.1 ~ 0.9 九标度法赋值,详见表2。当模糊矩阵  $A$  的元素满足  $a_{ij} + a_{ji} = 1$  时,矩阵  $A$  为模糊互补判断矩阵。

表2 判断标度设定

$a_{ij}$ 标度	含义
0.1	因素 $j$ 与因素 $i$ 极端重要
0.3	因素 $j$ 比因素 $i$ 明显重要
0.5	因素 $i$ 与因素 $j$ 同等重要
0.7	因素 $i$ 比因素 $j$ 明显重要
0.9	因素 $i$ 比因素 $j$ 极端重要
0.2, 0.4, 0.6, 0.8	以上相邻判断的中间值

### 1.2.3 计算权重向量

对模糊判断矩阵  $A$  按行求和得到  $r_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ), 通过模糊一致化处理  $r_{ij} = \frac{(r_i - r_j)}{2(n-1)} + 0.5$ , 可以得到模糊一致性矩阵  $R = (r_{ij})_{n \times n}$ , 计算权重值  $W_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} + \frac{n}{2}}{n(n-1)}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ), 得到模糊矩阵的权重向量  $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$ , 该向量满足  $\sum_{i=1}^n W_i = 1$ 。

构造评价指标权重矩阵  $(W_{ij})_{n \times n}$ , 该权重矩阵构造计算表达式为  $W_{ij} = \frac{W_i}{W_i + W_j}$ 。

计算  $(W_{ij})_{n \times n}$  与原模糊评价矩阵之间的相容性, 矩阵相容性  $I(A, B)$  计算公式如下:

$$I(A, B) = \frac{1}{n^2} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n |a_{ij} - b_{ij}|$$

一般认为, 相容性值小于 0.1, 就表示该组数据满足模糊一致性要求。

基于不同专家的评价, 构造多组模糊综合评价矩阵  $\{A_1, A_2, \dots, A_k\}$ , 将满足一致性要求的模糊综合评价矩阵对应的权重向量计算平均值, 得到指标权重向量  $W^*$ 。

### 1.2.4 评价指标赋值

对不同方案通过专家打分法建立评价集  $V = \{V_1, V_2, \dots, V_m\}$ , 通过计算平均值得出各个方案的评价指标值向量  $V_x^*$ 。

### 1.2.5 方案评分计算与方案比选

通过所得到的权重  $W^*$  和相应的评价指标值  $V_x^*$ , 可计算得到各方案最终评分  $S_x = W^* \times V_x^*$ 。

对比不同方案的评分, 选取评分最高的方案作为最终实施方案。

## 2 案例分析

### 2.1 路面调查

为了验证方法的可用性与适用性, 选取两个案例开展案例分析。为了制定更有针对性的预养护处治方案, 根据《公路技术状况评定标准》<sup>[8]</sup>, 对实施范围内的路面状况和各项指标进行进一步调查及分析。根据《沥青路面预防性养护技术规程》<sup>[9]</sup>要求, 公路沥青路面预防性养护的宏观路况标准应符合表3的规定。

《公路沥青路面养护设计规范》<sup>[10]</sup>提出利用路面技术状况数据对评价单元进行评价分析, 详见表4。

表 3 公路沥青路面预防性养护宏观路况标准

路况指标	高速公路
路面损坏状况指数	85 ~ 100
路面行驶质量指数	80 ~ 100
横向力系数	45 ~ 100

当公路路面的各项技术状况指标因使用过程中的自然衰减或遭受外力破坏而不符合技术状况指标时,应采取相应的处治措施,以达到规定的要求。

表 4 高速公路评价单元养护类型划分办法

值域范围				养护类型
路面损坏状况指数	路面行驶质量指数	路面车辙深度指数	路面抗滑性能指数	
≥90	≥90	≥80	<75	预防养护
≥90	≥90	<80	—	修复养护
≥90	85~90	—	—	预防养护
≥90	<85	—	—	修复养护
85~90	≥85	—	—	预防养护
85~90	<85	—	—	修复养护
<85	—	—	—	修复养护

沥青路面技术状况的检测与调查包括路面损坏状况、路面行驶质量、路面车辙、路面抗滑性能等内容。

2.1.1 案例一

对上海 A 高速公路实施范围内的沥青路面状况进行了现场路况调查。结果表明,该路段路况总体良好,主要病害为沥青路面老化、横向裂缝、车辙及小坑槽等。全线技术指标情况见表 5 至表 8。

表 5 A 高速路面损坏状况指数分析结果

车道序号	路面损坏状况指数等级百分比 /%				
	优≥92	良[80,92)	中[70,80)	次[60,70)	差<60
1 车道	100	0	0	0	0
2 车道	100	0	0	0	0
3 车道	94.5	5.5	0	0	0
4 车道	83.5	16.5	0	0	0

表 6 A 高速路面行驶质量指数分析结果

车道序号	路面行驶质量指数等级百分比 /%				
	优≥90	良[80,90)	中[70,80)	次[60,70)	差<60
1 车道	100	0	0	0	0
2 车道	100	0	0	0	0
3 车道	94.5	5.5	0	0	0
4 车道	83.5	16.5	0	0	0

2.1.2 案例二

对上海 B 高速公路实施范围内的沥青路面状况

表 7 A 高速路面车辙深度指数分析结果

车道序号	路面车辙深度指数等级百分比 /%				
	优≥90	良[80,90)	中[70,80)	次[60,70)	差<60
1 车道	94.5	5.5	0	0	0
2 车道	100	0	0	0	0
3 车道	94.5	5.5	0	0	0
4 车道	83.5	16.5	0	0	0

表 8 A 高速路面抗滑性能指数分析结果

车道序号	路面抗滑性能指数等级百分比 /%				
	优≥90	良[80,90)	中[70,80)	次[60,70)	差<60
1 车道	100	0	0	0	0
2 车道	100	0	0	0	0
3 车道	94.5	5.5	0	0	0
4 车道	83.5	16.5	0	0	0

进行了现场路况调查。结果表明,随着运营年限的增加,交通荷载逐年递增,沥青路面、桥面自然老化,部分沥青面层表面出现老化、松散、横向裂缝、车辙、小坑槽及修补等病害,技术指标情况见表 9 至表 12。

表 9 B 高速路面损坏状况指数分析结果

车道序号	路面损坏状况指数等级百分比 /%				
	优≥90	良[80,90)	中[70,80)	次[60,70)	差<60
1 车道	100	0	0	0	0
2 车道	100	0	0	0	0
3 车道	100	0	0	0	0

表 10 B 高速路面行驶质量指数分析结果

车道序号	路面行驶质量指数等级百分比 /%				
	优≥90	良[80,90)	中[70,80)	次[60,70)	差<60
1 车道	100	0	0	0	0
2 车道	100	0	0	0	0
3 车道	94.6	5.4	0	0	0

表 11 B 高速路面车辙深度指数分析结果

车道序号	路面车辙深度指数等级百分比 /%				
	优≥90	良[80,90)	中[70,80)	次[60,70)	差<60
1 车道	100	0	0	0	0
2 车道	100	0	0	0	0
3 车道	76.4	23.6	0	0	0

表 12 B 高速路面抗滑性能指数分析结果

车道序号	路面抗滑性能指数等级百分比 /%				
	优≥90	良[80,90)	中[70,80)	次[60,70)	差<60
1 车道	100	0	0	0	0
2 车道	100	0	0	0	0
3 车道	100	0	0	0	0

### 2.1.3 小结

两个案例所涉道路情况优良, 全线各评价指标均满足沥青路面预防性养护宏观路况标准。为避免道路进入快速损坏期, 通过针对性工程技术措施的实施, 在改善道路服务水平的同时, 还可节省后继养护维修投入。基于此目的, 预防性养护的实施是非常必要且迫切的。

## 2.2 预防性养护方案比选

### 2.2.1 候选方案确定

结合两个路段具体情况, 对当前的预防性技术措施进行了调研与分析。选取3个候选方案——微表处、超薄罩面和沥青还原处治, 对上述各项技术进行初步综合分析, 详见表13。

表13 预防性养护方案综合比较分析

评价指标	微表处	超薄罩面	沥青还原处治
抗滑性能	良好	良好	早期防滑性略有衰减, 后期相同
平整度	略低于原路面	略优于原路面	同原路面
还原效果	无, 主要发挥密封路面保护路面的作用	将旧沥青面层铣刨, 无还原效果	有
色差消除	可消除, 且维持时间较长	可消除, 且维持时间较长	可消除, 且维持时间较长
舒适性	车内噪声大, 行车舒适性欠佳	优于原路面	基本不改变
耐久性 /a	约3	约4	约3
施工难易程度	简单	需铣刨加罩, 操作控制难度略高	简单
对交通的影响	小	一般	小
价格 / (元·m <sup>-2</sup> )	30	105	40

### 2.2.2 评价指标值获取

邀请行业专家对技术效果、施工可操作性与经济性3个方面评价指标进行打分, 分值范围设置为0~1。分值越高, 代表该方案在本项指标中越优。3个方案各评价指标值结果见表14。

表14 预防性养护方案综合赋值

评价指标	微表处		超薄罩面		沥青还原处治	
	案例一	案例二	案例一	案例二	案例一	案例二
抗滑性能	0.72	0.74	0.75	0.8	0.61	0.67
平整度	0.26	0.31	0.91	0.93	0.64	0.7
还原效果	0	0	0	0	0.72	0.76
色差消除	0.92	0.95	0.9	0.94	0.83	0.86
舒适性	0.5	0.55	0.94	0.95	0.66	0.72
耐久性	0.78	0.8	0.89	0.92	0.69	0.73
施工难易程度	0.81	0.8	0.67	0.68	0.94	0.93
对交通的影响	0.88	0.84	0.76	0.72	0.95	0.93
价格	0.92	0.93	0.58	0.56	0.81	0.75

根据表14结果可知, 对于案例二所涉道路的技术效果评价指标赋值略高于案例一所涉道路, 对于各预防性养护方案的评分整体略低于案例一。考虑案例二所涉道路路面状况优于案例一所涉道路, 专家认为各方案对于方案二的技术效果提升更好。

### 2.2.3 评价指标权重计算

针对案例一的评价指标权重见表15。

表15 案例一评价指标权重

目标	一级指标层 B 权值	二级指标层 C 权值
预防性养护方案比选	技术效果 B1 (0.608)	抗滑性能 C1(0.142 0)
		平整度 C2(0.116 4)
		还原效果 C3(0.136 8)
		色差消除 C4(0.081 2)
		舒适性 C5(0.060 8)
		耐久性 C6(0.070 8)
施工可操作性 B2 (0.150)	施工难易程度 C7(0.082 8)	对交通的影响 C8(0.067 2)
		经济性 B3(0.242)

针对案例二的评价指标权重见表16。

表16 案例二评价指标权重

目标	一级指标层 B 权值	二级指标层 C 权值
预防性养护方案比选	技术效果 B1 (0.547)	抗滑性能 C1(0.113 5)
		平整度 C2(0.108 3)
		还原效果 C3(0.116 4)
		色差消除 C4(0.078 5)
		舒适性 C5(0.058 2)
		耐久性 C6(0.072 1)
施工可操作性 B2 (0.136)	施工难易程度 C7(0.073 7)	对交通的影响 C8(0.062 3)
		经济性 B3(0.317)

根据两个案例的权重结果来看, 最重要的都是技术效果指标、经济性指标权重较大, 比较符合高速公路管养实际情况, 即在保证养护效果的情况下, 尽量提高资金使用效益。由于两个案例所涉道路的基础技术状况不同, 评价指标权值有明显差异。例如, 案例二中技术效果评价指标权重明显低于案例一, 而案例二中经济性评价指标权重明显高于案例一。

### 2.2.4 方案比选

结合各方案的评价指标值与各评价指标权重进行计算, 得到3种方案的综合评分情况, 详见表17。

根据表17可知, 对于两个案例所涉道路, 评分

表 17 预防性养护方案综合评分

方案	评分	
	案例一	案例二
微表处	0.641 7	0.687 9
超薄罩面	0.652 6	0.659 4
沥青还原处治	0.753 7	0.766 6

最高的都是沥青还原处治方案,主要原因是该方案还原效果较好。对于微表处和超薄罩面两个方案,在案例一中超薄罩面评分更高,而在案例二中微表处评分更高。考虑是由于案例二所涉道路的路面状况优于案例一所涉道路,两个方案都可以起到较好的提升路面状况的效果,因此经济性的影响更大。

### 3 结 语

沥青路面预防性养护方案选择是复杂的,主观性和不确定性较大。本文提出了基于 FAHP 的高速公路沥青路面预防性养护方案比选方法,以 FAHP 为基础,结合专家打分,从技术效果、施工可操作性、经济性 3 个方面对预防性养护方案开展评价,使预防养护方案的选择兼具科学性和适用性,尽可能降低主观性和不确定性的影响,避免了定量分析对于数据的高要求。本文通过选择两段高速公路开展案例

分析来验证方法可行性,在案例分析中发现,评价结果受道路路面情况现状影响明显,方案选择结果可有效回应养护需求,方案选择结果与设计推荐方案一致。结果表明,该方法可用于公路沥青路面预防性养护比选,可为类似工程提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 苏鹏.高速公路沥青路面预防性养护策略模型研究[C]//中国公路学会养护与管理分会,招商局重庆交通科研设计院有限公司,重庆万桥交通科技发展有限公司.中国公路学会养护与管理分会第九届学术年会论文集.山西省交通规划勘察设计院,2019:5.
- [2] 戴振宇,韦学健.典型预防性养护措施长期使用性能研究[J].上海公路,2022(2):23-25,165.
- [3] 李彬.基于寿命周期的预防性养护方案比选分析[J].北方交通,2011(5):56-59.
- [4] 夏国法,叶尔丰,王飞.基于层次分析法的高速公路预养护方案决策[C]//江苏省公路学会学术年会论文集(2015年),2015:229-234.
- [5] 王磊.基于路用性能指标的高等级公路沥青路面预养护方案研究[J].山西交通科技,2022(1):53-55.
- [6] 龙景彪,赵健,郭昕等.基于模糊数学的长潭高速公路预防性养护方案比选[J].公路与汽运,2018(5):153-155.
- [7] 吕跃进.基于模糊一致矩阵的模糊层次分析法的排序[J].模糊系统与数学,2002(2):79-85.
- [8] JTG 5210—2018,公路技术状况评定标准[S].
- [9] DG/TJ 08-2176—2015,沥青路面预防性养护技术规程[S].
- [10] JTG 5421—2018,公路沥青路面养护设计规范[S].

(上接第 139 页)

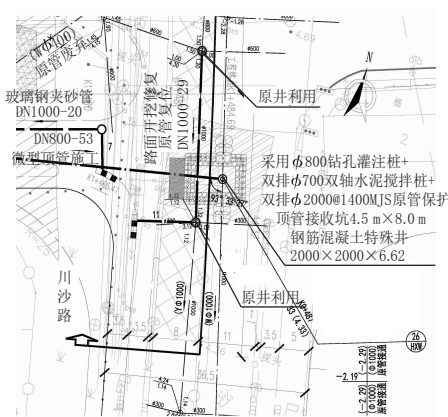


图 7 新建 DN800 污水管道与现状 φ1 000 污水管道接通方案

道路下管线云集,情况复杂,且整段管道埋深较大,导致本工程污水管道设计过程中需充分考虑各种影响。通过多方案的比选,最终推荐了经济合理的设计方案。

市政管道是城市的“生命线”。随着城市的飞速发展,排列在道路下的各类市政管线错综复杂,在排水管道的设计过程中难免会遇到管线交叉、新老管道衔接等问题,需设计人员多分析,多论证,不断积累经验,针对实际情况,考虑各种可行方案,择优选取。