

# 基于模糊数学的长潭高速公路预防性养护方案比选

龙景彪, 赵健, 郭昕, 张凯

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004)

**摘要:** 影响路面预防性养护方案确定的各项因素存在不确定性, 难以量化, 对处治方案的比选造成一定困难。文中将模糊数学分析方法应用于长潭(长沙—湘潭)高速公路路面预防性养护处治方案比选, 通过分析处治方案费用、工期要求、技术及设备条件、环境保护等因素对方案进行模糊选择, 结合项目实际情况确定处治方案并对方案实施效果进行评价。

**关键词:** 工程管理; 高速公路; 预防性养护; 模糊聚类

中图分类号: U415.13

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)05-0153-03

预防性养护是一种延缓路面使用性能衰退和提高路面使用寿命的养护措施, 常见预防性养护措施有超薄磨耗层、微表处、雾封层等。处治方案选择中考虑的因素不同, 结果各异。对于具有较大不确定性的方案比选, 模糊数学分析是一种有效的方法。该文以长潭(长沙—湘潭)高速公路 K1492+788—K1531+000 段为依托工程, 主要考虑路况指标、费用、技术、工期、设备和环境保护等因素, 采用模糊数学方法对路面预防性养护方案进行比选。

## 1 工程概况

长潭高速公路 K1492+788—K1531+000 段长 38.212 km, 路面宽 25.5 m, 路基宽 27.5 m, 设计速度 120 km/h。该路段于 2003 年进行全面大修, 大修改造后交通量上升, 2014 年交通量自然数达到 39 422 辆, 且重载、超载现象较明显。2010 年对该路段进行超薄磨耗层处治, 处治通车几年后, 检测发现路面裂缝类、坑槽、松散类病害分布较广, 其中车辙类病害较明显, 车辙深度达 10.18 mm。随着路面病害的不断增多, 路面性能不断下降, 使用性能指标均值见表 1。

表 1 路面使用性能指标均值

评价指标	分值
路面破损状况评价指标 <i>PCI</i>	93.09
路面行驶质量指数 <i>RQI</i>	92.45
路面车辙深度指数 <i>RDI</i>	82.48
路面抗滑指数 <i>SRI</i>	91.01

根据路况检测数据, 该路段路面性能整体上处于优、良状态; 部分路段性能较差, 路面出现各类病

害, 其中车辙类病害较明显。严重的车辙类病害影响行车安全性和舒适性, 且对路面使用寿命有较大影响, 急需选择一种养护方案进行预防性处治。

## 2 基于模糊聚类分析的方案优化方法

(1) 确定待分类的样本集合  $X = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$ 。该文模糊聚类分析的对象为路面预防性养护方案优选, 样本为常见的预防性养护技术, 分别为雾封层  $X_1$ 、超薄磨耗层  $X_2$ 、稀浆封层  $X_3$ 、碎石封层  $X_4$ 、微表处  $X_5$ 、薄层罩面  $X_6$ 。方案选择中考虑对预防性养护处治施工有较大影响且具代表性的因素, 分别为费用  $a_1$ 、技术  $a_2$ 、工期  $a_3$ 、设备  $a_4$ 、环境保护  $a_5$ 、经验  $a_6$ 。不同处治方案对应各项指标的模糊矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & X_{14} & X_{15} & X_{16} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & X_{24} & X_{25} & X_{26} \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} & X_{34} & X_{35} & X_{36} \\ X_{41} & X_{42} & X_{43} & X_{44} & X_{45} & X_{46} \\ X_{51} & X_{52} & X_{53} & X_{54} & X_{55} & X_{56} \\ X_{61} & X_{62} & X_{63} & X_{64} & X_{65} & X_{66} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $X_{ij}$  表示  $i$  项指标对  $j$  处治方案的影响程度, 影响很大则  $X_{ij}=1$ , 影响较小则  $X_{ij}=0$ 。

(2) 确定指标隶属度。隶属度的确定直接影响方案比选结果。模糊子集的隶属度取值为  $[0, 1]$ 。6 项因素对不同路面处治方案的影响程度不同, 需根据项目的实际情况确定各因素对各项指标的隶属度。采用对专家及工程相关专业人员进行调查的方法确定模糊子集的隶属度, 考虑到专家打分法确定的隶属度具有一定的主观性, 为尽量减少主观性对

模糊选择的影响,所选专家应与工程无利害关系且类型多样,涵盖道路养护、施工、设计、勘察、监理等领域,并剔除最高分和最低分。

(3) 构造模糊相似矩阵。采用绝对指数值计算形式程度  $r_{ij}$  [见式(2)],利用指数法得到模糊相似矩阵  $[R]$  [见式(3)]。

$$r_{ij} = e^{-\sum_{k=1}^6 |X_{ik} - X_{jk}|} \quad (2)$$

$$[R] = [r_{ij}]_{6 \times 6} \quad (3)$$

(4) 模糊分类。通过相似矩阵  $[R]$ ,利用平方法[见式(4)]计算矩阵的传递闭包  $[tR]$ ,若相似矩阵为式(5),则  $[R]^2$  见式(6)。对传递闭包  $[tR]$  作动态聚类分析,对  $\lambda$  截集进行分类。 $X_{ij} > \lambda$  时,  $X_{ij} = 1$ ;  $X_{ij} < \lambda$  时,  $X_{ij} = 0$ 。如此对传递闭包  $[tR]$  中的元素进行赋值,再对赋值结果相同的方案进行分类聚集,进而选择亲疏关系排序靠前的方案,结合实际情况进行方案优化和布置。

$$[R] \rightarrow [R]^2 \rightarrow [R]^4 \rightarrow [tR]^8 \rightarrow [tR] \quad (4)$$

$$[R] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} & r_{16} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} & r_{26} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} & r_{36} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} & r_{45} & r_{46} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} & r_{54} & r_{55} & r_{56} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} & r_{64} & r_{65} & r_{66} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[R]^2 = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:  $c_{ij} = (r_{i1} \cap r_{1j}) \cup (r_{i2} \cap r_{2j}) \cup (r_{i3} \cap r_{3j}) \cup (r_{i4} \cap r_{4j}) \cup (r_{i5} \cap r_{5j}) \cup (r_{i6} \cap r_{6j})$ 。

### 3 长潭高速公路路面预防性养护方案比选

#### 3.1 确定隶属度和模糊矩阵

采用专家调查法,收集工程相关专业人员与专家的意见,对上述6项因素对各预防性养护方案的影响程度进行打分, $i$ 项因素对 $j$ 方案影响很大则  $X_{ij} = 1$ ,反之则  $X_{ij} = 0$ 。按隶属度 = 专家数  $\times$  评分数 / 总人数确定各因素的隶属度。

从路面养护专家库中随机抽取2人,从专业施工、设计、勘察和监理技术人员中随机抽取4人,根据项目实际情况对各因素对雾封层方案  $X_1$  的影响

程度进行评价打分,剔除最高分和最低分后的结果见表2。

表2 雾封层方案各项因素的评分

评分者	各因素的评分					
编号	费用	技术	工期	设备	环境保护	经验
1	1	0.5	0.2	0	0.2	0.1
2	1	0.6	0.2	0	0.1	0.0
3	1	0.4	0.2	0	0.3	0.1
4	1	0.6	0.4	0	0.1	0.1
5	1	0.4	0.2	0	0.1	0.1
6	1	0.5	0.3	0	0.2	0.1
平均值	1	0.5	0.25	0	0.17	0.08

根据表1,雾封层处治措施各因素的隶属度为:

$$X_1 = [1.00 \quad 0.50 \quad 0.25 \quad 0.00 \quad 0.17 \quad 0.08]$$

同理,对其他5种处治方案进行评分和隶属度计算,得模糊矩阵:

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.50 & 0.25 & 0.00 & 0.17 & 0.08 \\ 0.93 & 0.45 & 0.25 & 0.15 & 0.20 & 0.03 \\ 1.00 & 0.47 & 0.28 & 0.17 & 0.15 & 0.08 \\ 0.88 & 0.57 & 0.30 & 0.17 & 0.18 & 0.12 \\ 0.92 & 0.50 & 0.25 & 0.17 & 0.12 & 0.03 \\ 0.85 & 0.53 & 0.33 & 0.15 & 0.23 & 0.08 \end{bmatrix}$$

按式(2)、式(3)计算,得模糊相似矩阵:

$$[R] = [r_{ij}]_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.78 & 0.78 & 0.74 & 0.78 & 0.70 \\ 0.78 & 1.00 & 0.79 & 0.74 & 0.85 & 0.72 \\ 0.78 & 0.79 & 1.00 & 0.74 & 0.79 & 0.74 \\ 0.74 & 0.74 & 0.74 & 1.00 & 0.74 & 0.82 \\ 0.78 & 0.85 & 0.79 & 0.74 & 1.00 & 0.74 \\ 0.70 & 0.72 & 0.74 & 0.82 & 0.74 & 1.00 \end{bmatrix}$$

#### 3.2 模糊分类

按式(4)计算模糊相似矩阵  $[R]$  的传递闭包  $[tR]$ ,并对传递闭包进行动态聚数分析,依次计算出  $[R]^2$ 、 $[R]^4$ 、 $[R]^8$  等,由于  $[R]^8 = [R]^4$ ,所以  $[tR] = [R]^4$ ,得:

$$[t(R)](\lambda) = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.78 & 0.78 & 0.74 & 0.78 & 0.74 \\ 0.78 & 1.00 & 0.79 & 0.74 & 0.85 & 0.74 \\ 0.78 & 0.79 & 1.00 & 0.74 & 0.79 & 0.74 \\ 0.74 & 0.74 & 0.74 & 1.00 & 0.74 & 0.82 \\ 0.78 & 0.85 & 0.79 & 0.74 & 1.00 & 0.74 \\ 0.74 & 0.74 & 0.74 & 0.82 & 0.74 & 1.00 \end{bmatrix}$$

设定置信区间  $\lambda \in [0, 1]$ ,  $\lambda$  按截矩阵进行动态聚类,把  $[tR]$  中的元素按照从大到小的顺序编排,

得  $1 > 0.85 > 0.82 > 0.79 > 0.78 > 0.74$ 。1) 当  $0.82 < \lambda \leq 0.85$  时,  $\lambda$  截矩阵见式(7)。X 分为 5 类, 分别为  $\{X_2, X_5\}, \{X_1\}, \{X_3\}, \{X_4\}, \{X_6\}$ 。2) 当  $0.79 < \lambda \leq 0.82$  时, X 分为 4 类, 分别为  $\{X_2, X_5\}, \{X_4, X_6\}, \{X_1\}, \{X_3\}$ 。3) 当  $0.78 < \lambda \leq 0.79$  时, X 分为 3 类, 分别为  $\{X_2, X_3, X_5\}, \{X_4, X_6\}, \{X_1\}$ 。4) 当  $0.74 < \lambda \leq 0.78$  时, X 分为 2 类, 分别为  $\{X_1, X_2, X_3, X_5\}, \{X_4, X_6\}$ 。5) 当  $0 < \lambda \leq 0.74$  时, X 分为 1 类, 为  $\{X_1, X_2, X_3, X_5, X_4, X_6\}$ 。

$$[t(R)](\lambda) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据聚类分析结果, 6 种预防性养护方案排序依次为超薄磨耗层、微表处、雾封层、稀浆封层、碎石封层、薄层罩面, 其中超薄磨耗层和微表处的优先程度相同。

根据上述模糊数学分析结果, 长潭高速公路 K1492+788—K1531+000 段应优先选择超薄磨耗层或微表处进行处治。这两种养护方案均具有施工速度快、开放交通早及抗滑性能优良的特点。考虑到该路段车辙深度均值为 10.18 mm 且无结构性破坏及长潭高速公路具有超薄磨耗层的施工经验, 优先选择超薄磨耗层进行预防性养护。

#### 4 效果评价

采用超薄磨耗层方案对长潭高速公路 K1492+788—K1531+000 段路面进行处治, 并通过跟踪观测对处治后路面性能指标进行分析, 处治前后路面性能指标对比见图 1。

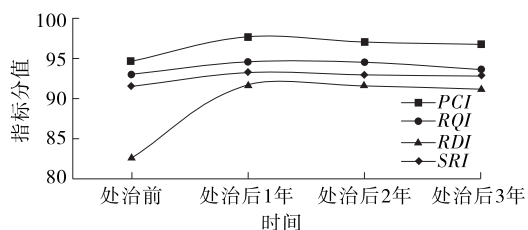


图 1 处治前后路面性能指标对比

由图 1 可以看出: 1) 长潭高速公路 K1492+788—K1531+000 段经超薄磨耗层处治后, 路面性能指标 PCI、RQI、RDI、SRI 均得到提升, 分别提

高 2.92、1.48、8.72、1.64 分, 其中 RDI 提升最多 (8.72 分), 提升幅度为 10.6%。说明对于 10 mm 左右车辙病害路面的处治, 超薄磨耗层为最佳养护方案。2) 超薄磨耗层处治后, 路面使用性能在前 3 年一直保持在较优状态, 且各路面使用性能衰减速率较缓慢。说明超薄磨耗层具有较好的抗滑性能, 对路面平整度的提升明显, 路面行驶舒适度和安全性提高, 可延缓路面的使用寿命。

#### 5 结论

(1) 长潭高速公路 K1492+788—K1531+000 段预防性养护方案排名依次为超薄磨耗层、微表处、雾封层、稀浆封层、碎石封层和薄层罩面, 其中超薄磨耗层和微表处的优先程度相同, 结合该项目实际情况及养护历史, 确定超薄磨耗层为最佳预防性养护方案。

(2) 该路段经超薄磨耗层处治后, 路面性能指标得到大幅提升, 均保持在优良状态。

(3) 对于复杂性和模糊性较大的方案比选, 模糊数学分析是一种有效的方法。但在分析过程中隶属度和样本数据直接影响结果的准确性, 因素选择 and 数据处理需更谨慎。

#### 参考文献:

- [1] 刘国. 用模糊数学方法选择软土地基加固方案[J]. 水文地质工程地质, 2000(4).
- [2] 李娜, 杨帆. 一种模糊集合论的公理化方法[J]. 重庆理工大学学报: 社会科学版, 2017, 31(9).
- [3] 鲁红英, 肖思和, 杨尽. 模糊聚类分析方法在土地整治分区中的应用[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2014, 41(1).
- [4] 马万元, 耿秀丽. 基于概率统计的模糊隶属函数计算研究[J]. 数学理论与应用, 2016, 36(3).
- [5] 苏建辉, 李永才, 窦顺. 基于模糊综合评判法分析某公路边坡稳定性[J]. 路基工程, 2015(5).
- [6] 王磊, 吕璞, 郝培文. 微表处混合料路用性能影响因素[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2014, 34(2).
- [7] 李丽慧. 冷拌冷铺超薄磨耗层设计指标研究[J]. 公路, 2016(2).
- [8] 李亚明. 超薄磨耗层在临长高速公路养护中的应用[J]. 公路与汽运, 2013(2).
- [9] 邓省斌, 王万平. 沥青砼超薄面层在高速公路预防性养护中的应用研究[J]. 公路与汽运, 2012(4).