DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.250515

基于DSA-AHP模型的沥青路面预养护决策分析研究

邱颖峰[1,2],杨媛媛[3],庄恺琳[1,2]
[1.上海市市政规划设计研究院有限公司,上海市 200092; 2.上海城市路域生态工程技术研究中心,上海市 201108;
3.上海城投公路投资(集团)有限公司,上海市 200335]

摘 要: 针对采用传统层次分析法(AHP)模型在进行多方决策分析时存在计算复杂度高、冗余度大,以及权重固化、场景适配不足的问题,提出了一种基于动态准入机制与场景化设置的改进层次分析法分析模型(DSA-AHP),并以上海地区的预养护措施决策分析为例进行应用验证。结果表明,该模型由于只对特定需求方案进行相应的决策分析,实现了对方案层的快速筛选和对准则层(子准则层)的场景化权重匹配,从而显著提升了决策效率与精准度,具有较强的实用价值。

关键词: 预防性养护;动态准入机制;场景化设定;层次分析法
中图分类号: U416.217;TU997 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-7716(2026)01-0080-04

Analysis and Research on Decision-Making for Preventive Curing of Asphalt Pavement Based on DSA-AHP Model

QIU Yingfeng[1,2], YANG Yuanyuan[1,2], ZHUANG Kailin[3],
[1. Shanghai Municipal Planning and Design Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Urban Road Ecology Engineering Technology Research Center, Shanghai 201108, China; 3. Shanghai Chengtou Highway Investment (Group) Co., Ltd., Shanghai 200335, China]

Abstract: In view of the problems such as high computational complexity, large redundancy, weight solidification and insufficient scene adaptation when using the traditional analytic hierarchy process (AHP) model for multi-party decision analysis, an improved analytic hierarchy process analysis model (DSA-AHP) based on dynamic admission mechanism and scenario-based settings is proposed. And the decision-making analysis of preventive curing measures in the Shanghai area is taken as an example for application verification. Results demonstrate that this model, by only conducting corresponding decision analysis on specific demand schemes, achieves the rapid screening of the scheme layer and the scenario-based weight matching of the criterion layer (sub-criterion layer) so as to significantly improve the decision-making efficiency and accuracy with the strong practical value.

Keywords: preventive curing; dynamic admission mechanism; scenario-based setting; analytic hierarchy process

0 引 言

路面预防性养护(pavement preventive maintenance,PPM)是指在道路整体性能良好但有轻微病害,为防止性能过快衰减、延长道路寿命的一种主动防护措施[1]。由于PPM的实施需综合考虑技术、经济及环境等多维度因素,其决策属于一个多层次、多属性、多目标的复杂问题[2-3]。

目前,对于PPM的决策,国内外研究多聚焦于层次分析法(analytic hierarchy process,AHP)与模糊数学理论[4-5]。国外较侧重系统化方法论,多基于决策树/矩阵构建计算机辅助决策框架,国内则将二者融合后对定性指标进行量化分析[6-9]。但上述方法都存在权重固化、依赖主观经验、动态场景适配不足等问题。

针对上述问题,就PPM决策提出了一种“基于动态准入机制(dynamic admission mechanism)与场景化设定(scenario-based)的改进层次分析法决策模型

收稿日期:2025-05-19
基金项目:上海市国资委能级提升项目“面向区块链赋能全寿命智慧运维的超大城市路桥设施低影响智能检测技术装备开发、数智实验室和远程诊疗中心建设”(2024016);上海城投科研项目“上海高速公路维养性能评估、预测技术研究”(CTKY-ZDZX-2024-010)
作者简介:邱颖峰(1977—),男,博士,高级工程师,从事道路工程方面的研究工作。

（DSA-AHP模型）”。相较于传统AHP模型，该模型通过动态准入机制压缩决策维度，降低计算复杂度；通过场景化权重重构，突破固定判断矩阵的局限性；通过融合工程实际约束，减少主观偏好干扰。以上改进使模型兼具高效性与科学性，为PPM提供了一种可定制、可复现的简易快速决策工具，尤其适用于多场景、多约束的复杂工程需求。

最后，通过工程实践验证了模型的合理性，为同类PPM决策提供了新思路。

1　模型概述

1.1　传统AHP模型

层次分析法通过构建层次化模型与判断矩阵实现多目标决策[10-12]。其层次结构从高到低依次为目标层、准则层、子准则层和方案层。其核心步骤如下：

首先，依据Saaty提出的1~9标度法构造判断矩阵（需由至少5位相关领域专家独立完成，再经几何平均后形成），矩阵元素 $a_{ij}=w_i/w_j$ 反映两两准则间的相对重要性。

其次，通过特征向量法计算权重，最大特征值 λ_{max} 由公式 $\lambda_{max}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}[(\sum_{i=1}^{n}a_{ij}w_j)/w_i]$ 求得，并基于此推导权重向量 ω。同时，为验证判断逻辑的一致性，需计算一致性指标 $CI=(\lambda_{max}-n)/(n-1)$ 和一致性比率 $CR=CI/RI$（RI为随机一致性指标），若 $CR<0.10$ 则通过检验。

最后，对于多层决策问题，采用递推法更新权重，即 $w^{(k)}=P^{(k)}w^{(k-1)}$，其中 $P^{(k)}$ 为第 k 层判断矩阵的权重转换矩阵。

该方法通过定量与定性结合，有效降低主观偏差，适用于复杂决策场景，但也因依赖于固定权重体系与静态判断矩阵，难以适应动态场景下的参数变化[13-15]。

1.2　改进后DSA-AHP模型

改进后的DSA-AHP模型与传统AHP模型的主要区别包括基础数据库的构建方式、方案层的准入机制及准则层的权重分配体系等。

在基础数据库构建方面，新模型多以实际工程检测或评估的数据作为核心来源构建数据集，减少主观干扰，精准匹配场景需求。同时引入数据清洗、归一化及映射评分流程，消除量纲差异，保障权重计算科学性。

在方案层准入机制方面，根据场景需求引入动态准入机制，其数学模型可见式（1）。其数学模型可表述如下：

$$G(S_i)=\begin{cases}1, & \phi(S_i)\geqslant\theta\\ 0, & \text{其他}\end{cases}\tag{1}$$

式中：S_i 为待选方案；ϕ 为场景约束函数；θ 为临界值。

由式（1）可知，准入机制就是先设定一个准入规则（如技术性能阈值或经济约束条件），对方案层进行快速筛选，仅保留符合准入条件的可行方案参与决策，从而降低决策复杂度，提升效率。

在准则层权重分配体系方面，则引入场景化的AHP权重适配体系，其数学模型可见式（2）。

$$\omega_k=f(C_j)\tag{2}$$

式中：ω_k 表示第 k 层的权重向量；C_j 表示场景特征向量，按下式通过调整判断矩阵元素实现。

$$\alpha_{ij}^{(new)}=\alpha\cdot\alpha_{ij}^{(base)}+(1-\alpha)\cdot\beta_{ij}$$

式中：α 为基准权重保留系数（0.6~0.8）；β_{ij} 为场景调整因子。

由式（2）可知，权重适配体系就是根据不同场景需求，动态调整准则层与子准则层的权重分配，从而使决策指标与目标更加匹配。

动态准入机制与场景化权重适配体系结合可形成“初筛-动态赋权-精准推荐”的闭环框架，既提升决策效率，又保障决策科学性。

2　预养护决策应用示例

2.1　基础数据获取与设置

根据国内外研究成果及上海地区多年预养护工程相关后评估报告，以目标为导向，将实际技术性能改善值和相关经济指标作为影响因素，各项预养护措施的基础数据实际值和相应属性分值（范围）见表1。

2.2　场景需求界定与准入条件设置

由表2可知，由于方案较多，宜对实际场景需求进行界定，并相应设置单一或复合准入条件。为进行对比分析，研究设置A、B两种场景需求与准入条件，具体见表2。

2.3　场景A的AHP权重计算

2.3.1　判断矩阵与一致性检验

将选择最适配的养护措施作为目标层（A），技术性能与经济效益作为准则层（B1、B2），ΔBPN、ΔPCI和ΔRQI作为B1的子准则层，全寿命周期费用、使用寿命和施工周期作为B2的子准则层。同时将根据

表1　预养护措施属性分值与实际值基础数据

预养护措施	ΔBPN（抗滑性改善）		ΔPCI（路面状况改善）		ΔRQI（行驶质量改善）		全寿命周期费用（经济性）		使用寿命（耐久性）		施工周期（交通影响）	
	属性分值	实际值	属性分值	实际值	属性分值	实际值	属性分值	实际值	属性分值	实际值	属性分值	实际值
稀浆封层	3～4	+5.2	2～3	+8.5	2～3	+0.08	3～4	12.5	2～3	3	3～4	2
微表处	3～4	+7.5	3～4	+12.5	3～4	+0.12	2～3	18.0	3～4	4	3～4	3
碎石封层	4～5	+9.7	4～5	+16.2	3～4	+0.08	4～5	4.1	4～5	5	2～3	5
复合封层	3～4	+6.8	4～5	+14.0	3～4	+0.10	3～4	15.0	3～4	4	3～4	4
薄层罩面	4～5	+10.2	4～5	+18.0	4～5	+0.15	1～2	25.0	4～5	6	1～2	7
雾封层	1～2	+5.0	1～2	+8.0	1～2	+0.05	4～5	7.5	1～2	2	4～5	1
冷再生	4～5	+8.0	3～4	+10.5	3～4	+0.09	4～5	6.0	3～4	4	3～4	3
开普封层	3～4	+7.2	4～5	+13.8	3～4	+0.11	3～4	12.0	4～5	5	3～4	4

注：(1)属性分值越大表示效果越优，即技术性能改善、经济性和耐久性越好，交通影响越小。(2)全寿命周期费用实际值的单位为元/(m^2·a)，施工周期实际值的单位为d。

表2　场景需求与准入条件设置

场景代号	主要需求界定	准入条件
A	抗滑性不足(BPN＜45)且预算有限	性能改善约束：ΔBPN≥5，经济约束：费用≤15元/(m^2·a)
B	平整度修复(PCI＜80)且预算较充分	性能改善约束：ΔPCI≥10，经济约束：费用≤20元/(m^2·a)

场景A的准入条件筛选出可行方案，包括碎石封层、复合封层、冷再生和开普封层等作为方案层。其准则层与技术性能子准则层的判断矩阵、一致性检验与单层权重向量结果见表3和表4(经济效益子准则层结果同技术性能子准则层，不重复列出)。

表3　准则层判断矩阵、一致性检验及权重

A	B1	B2
B1	1	3
B2	1/3	1
权重向量	$W=(0.75,0.25)^T$	
一致性检验：CR=0<0.1(通过)		

表4　技术性能子准则层判断矩阵、一致性检验及权重

B1	ΔBPN	ΔPCI	ΔRQI
ΔBPN	1	3	5
ΔPCI	1/3	1	2
ΔRQI	1/5	1/2	1
权重向量	$W=(0.637,0.258,0.105)^T$		
一致性检验：CR=0.081<0.1(通过)			

2.3.2　计算结果

基于准则层、子准则层的权重及各可行方案的映射评分，经逐层迭代计算与归一化处理后即可得各方案层的最终综合权重。依此类推，可计算得到各方案层的最终综合权重，结果见表5。

由表5可知，在场景A中，碎石封层方案权重向量最大，为推荐方案。

2.4　场景B的AHP权重计算

场景B的目标层、准则层与子准则层同场景A，但可行方案层增加了微表处一项。由于场景B更侧重技术性能与ΔPCI的改善，其相应判断矩阵与权重也有相应调整。各准则层、子准则层与各方案层的综合权重计算结果见表6～表8。

表5　各可行方案层综合权重计算结果

养护措施	技术性能得分（权重0.75）	经济效益得分（权重0.25）	原始综合得分	归一化综合权重
碎石封层	0.886*	0.872	0.883	0.274
复合封层	0.710	0.691	0.705	0.219
冷再生	0.713	0.809	0.737	0.229
开普封层	0.725	0.776	0.738	0.229

注：*得分计算示例，碎石封层ΔBPN=9.7，在可行方案中最高，其映射评分为1.00，同理得ΔPCI、ΔRQI的映射评分为0.84、0.30，再进行加权计算得技术性能得分为0.637×1.00+0.258×0.84+0.032=0.886。

表6　准则层判断矩阵、一致性检验及权重

A	B1	B2
B1	1	5
B2	1/5	1
权重向量	$W=(0.833,0.167)^T$	
一致性检验：CR=0.02<0.1(通过)		

表7　技术性能子准则层判断矩阵、一致性检验及权重

B1	ΔBPN	ΔPCI	ΔRQI
ΔBPN	1	1/4	2
ΔPCI	4	1	6
ΔRQI	1/2	1/6	1
权重向量	$W=(0.157,0.734,0.109)^T$		
一致性检验：CR=0.046<0.1(通过)			

由表8可知，在场景B中，微表处方案权重向量最大，为推荐方案。

表 8　各可行方案层综合权重计算结果

养护措施	技术性能得分（权重0.75）	经济效益得分（权重0.25）	原始综合得分	归一化综合权重
微表处	0.863	0.134	0.997	0.277
碎石封层	0.621	0.167	0.788	0.219
复合封层	0.754	0.150	0.904	0.251
冷再生	0.682	0.167	0.849	0.236
开普封层	0.802	0.150	0.952	0.265

3　结　论

（1）研究针对传统 AHP 模型存在的问题提出的 DSA-AHP 模型。以实际工程后评估结果为基础数据，对准则层影响因素进行简化和对方案层设置动态准入条件，以及根据实际需求场景对准则层权重进行动态调整，使之具有决策针对性强、主观因素干扰少、计算复杂度低及适配性强等优势，但也存在样本数量有限、基础数据代表性差导致的适用范围窄的缺陷，后续还需通过扩展样本与智能算法优化要使之更具通用性。

（2）研究提供的相关预养护措施决策分析案例表明，DSA-AHP 模型在中小规模工程的预养护措施决策分析中具有快速、高效与精准的特点。

参考文献：

[1] JTG 5142—2019，公路沥青路面养护技术规范[S].

[2] SAATY T L. The Analytic Hierarchy Process[M]. New York: McGraw-Hill, 1980.

[3] 侯芸. 基于层次分析的高等级沥青路面养护决策研究[J]. 内蒙古公路与运输，2015(5)：50-54.

[4] 王晓明，李华. 基于层次分析法的城市道路养护决策优化研究[J]. 交通运输工程学报，2018，18(3)：45-52.

[5] 张强，王芳. 层次分析法在高速公路预防性养护中的应用[J]. 公路交通科技，2020，37(6)：89-94.

[6] SMITH J，BROWN K. Application of Analytic Hierarchy Process in Highway Maintenance Decision-Making[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 25(4): 123-135.

[7] 陈立伟. 基于改进 AHP-TOPSIS 的路面养护决策模型[J]. 公路工程，2019，44(3)：112-117.

[8] 李江宁. 基于大数据的高速公路路况评估与科学养护决策[J]. 产品可靠性报告，2025(11)：205-206.

[9] 王树杰，张鹏，邬冰，等. 预防性养护技术在高速公路沥青路面养护中的运用评价[J]. 石油沥青，2025，39(2)：56-62.

[10] 辛公锋，胡业荣，龙关旭，等. 基于 AVOA-MC 和综合目标值的桥梁构件智能养护决策[J]. 长安大学学报(自然科学版)，2025，45(6)：169-183.

[11] 靳明，张军，郭晶，等. 基于灰色系统理论的沥青路面使用性能预测及养护决策研究[J]. 公路工程，2019，44(4)：221-224；263.

[12] 吴晓伟，王恒，杨轸，等. 基于层次分析法的肯尼亚内罗毕东环城路平面交叉口方案比选[J]. 公路，2025，70(6)：62-67.

[13] 夏宇迪，杨国庆，贾朝军，等. 基于 AHP-模糊综合评价法的钻爆法隧道施工效率评价模型研究[J]. 现代隧道技术，2024，61(增刊1)：121-127.

[14] 冯浩. 工程设计方案的最佳选择——介绍层次分析法的原理及其应用[J]. 机械设计与制造，1989(5)：7-10.

[15] 姚辉，梁庆国，冯勇，等. 利用群策三角模糊层次分析法确定寒区公路隧道冻害影响部位权值[J]. 科学技术与工程，2025，25(31)：13618-13626.