

基于熵权-TOPSIS的BRT沥青路面方案评价研究

徐伟¹, 肖春¹, 钱治杭², 李旭彪²

(1. 中恒工程设计院有限公司, 四川 成都 610017; 2. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 在ABAQUS有限元软件分别对SMA+AC路面、双层SMA路面、半柔性路面以及环氧沥青路面共4种抗车辙性能较高的路面组合结构应力、应变分析的结果基础上,以成都市BRT为例,同时增加沥青混合料的动稳定度和经济造价两个附加因素构建针对BRT路面评估的TOPSIS多目标评价方法,以沥青路面沥青混合料层层底拉应变、下基层层底拉应力、路基顶压应变、沥青混合料的动稳定度、单位造价5个指标实现对SMA+AC路面、双层SMA路面、半柔性路面以及环氧沥青路面4种路面结构组合方案进行评价,并获得BRT沥青路面结构推荐方案,可为BRT项目的沥青路面类型选择提供决策依据。

关键词: BRT; 沥青路面; ABAQUS; TOPSIS; 评价方法

中图分类号: U416.217

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)05-0249-04

Research on Evaluation of BRT Asphalt Pavement Scheme Based on Entropy Weight - TOPSIS

XU Wei¹, XIAO Chun¹, QIAN Zhihang², LI Xubiao²

(1. Zhongheng Engineering Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China; 2. Northwest Design and Research Institute of China Municipal Engineering Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract: On the basis of using ABAQUS finite element software to analyze the stress and strain of four pavement composite structures with high anti-rutting performance, such as SMA+AC pavement, double-layer SMA pavement, semi-flexible pavement and epoxy asphalt pavement, taking Chengdu BRT as an example, a TOPSIS multi-objective evaluation method for BRT pavement evaluation is built by adding two additional factors of dynamic stability and economic cost of asphalt mixture. Five indexes of bottom tensile strain of asphalt mixture layer, bottom tensile stress of lower base layer, top compressive strain of roadbed, dynamic stability of asphalt mixture and unit cost of the asphalt pavement are used to evaluate four pavement structure composite schemes of SMA+AC pavement, double-layer SMA pavement, semi-flexible pavement and epoxy asphalt pavement. And the recommended schemes of BRT asphalt pavement structure is obtained, which can provide decision-making basis for the selection of asphalt pavement types in BRT projects.

Keywords: BRT; asphalt pavement; ABAQUS; TOPSIS; evaluation method

0 引言

近年来,BRT站点沥青路面病害引起的乘坐舒适度和安全性降低,引发了社会的普遍关注和重点研究。BRT站点路面受到重轴载、大轴重、低速、频繁启停以及高温等不利因素带来的车辙、拥包等病害,亟待对BRT沥青路面方案采用科学并有针对性的综合评价方法。

我国规范^[1]上虽明确规定用动稳定度来表征沥青混合料抵抗车辙性能指标,但从车辙产生的机理

考虑,沥青混合料动稳定度也能表征其抗剪切推移能力,因此在对路面结构方案进行评价时,可引入车辙试验动稳定度作为评价沥青混合料抗剪切性能的一个因素^[2-3]。

为选择性能可靠、耐久性好、抗车辙能力强同时又兼顾经济性的路面结构组合方案,本文基于不同的单因素指标建立一种对路面结构类型的综合评价方法。基于ABAQUS有限元软件数值分析,确定以沥青混合料层层底拉应变、无机结合料稳定层层底拉应力和路基顶面竖向压应变三个设计控制指标作为评价的主要考虑因素,同时增加沥青混合料的动稳定度和经济造价两个附加因素,在此基础上采用TOPSIS方法对BRT站点沥青路面结构方案进行综合评价。

收稿日期: 2024-03-22

作者简介: 徐伟(1986—),男,硕士,高级工程师,从事城市交通规划、设计工作。

1 TOPSIS理论及模型的建立

1.1 TOPSIS理论及方法

TOPSIS方法是基于有限方案的一种多目标决策分析方法,其利用函数的单调增减特性,最大限度对目标统筹评测序列^[5]。其基本思路是借助评价对象与最佳优劣解的距离并对评价对象的计算结果进行排序,对比评价结果距离最优解与最劣解的距离大小筛选出评价指标中靠近最优而远离最劣的方案^[6]。TOPSIS方法评价流程见图1。

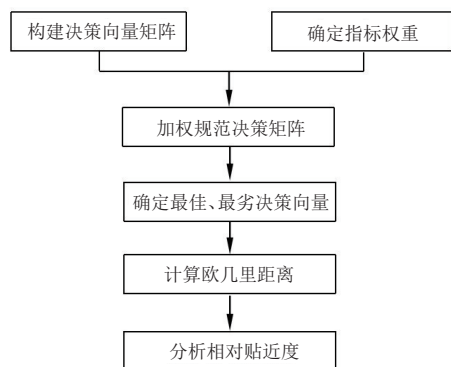


图1 TOPSIS方法评价流程图

1.2 TOPSIS模型的建立

(1) 构建决策向量矩阵

首先假设需要决策事件为 K ,构造决策矩阵 R' 。被评价的方案有 m 个,每个方案有 n 个的评价指标。则决策矩阵 R' 可以写成一个原始数据矩阵,其次由于各指标单位与量纲不同,为了便于指标之间的比较,应对 n 个决策向量进行归一化处理。按照决策向量为高优指标或低优指标进行归一化,得到每个向量的平方和为1。

$$K = \{R' | r'_{ij}, i \in 1, 2, \dots, m, j \in 1, 2, \dots, n\} \quad (1)$$

(2) 加权规范决策矩阵

确定各指标的权重是根据决策者对各评价指标的关注程度、可靠度以及作用大小来设定的,实现决策者对各决策方案满意程度的综合评价,权重体现了决策者对客观信息中指标的评价作用大小和决策者对主观权重指标的偏好。

$$A_{ij} = \omega_j \times r'_{ij} \quad (2)$$

式中: ω_j 为第 j 个评价指标的权重,若各指标的评价等级相同,则权重均设置为1。

(3) 确定最佳、最劣决策向量

得到加权规范化决策矩阵,然后用“理想点”方法进行择优排序。得到最优正理想点元素组合而成的最佳决策向量 A^+ ;最差非理想点元素组合而成的

最劣决策向量 A^- ,其关系表达式为式(3):

$$\begin{cases} A^+ = (A_{\max,1}, A_{\max,2}, \dots, A_{\max,n}) \\ A^- = (A_{\min,1}, A_{\min,2}, \dots, A_{\min,n}) \end{cases} \quad (3)$$

(4) 计算欧几里距离

采用 n 维欧几里距离度量事件 R' 中的 n 个评价对象,即加权归一化后的 n 个决策向量,根据式(4)最佳决策向量与最劣决策向量之间的距离 D_i^+ 及 D_i^- 。

$$\begin{cases} D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (A_{\max,j} - A_{ij})^2} \\ D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (A_{\min,j} - A_{ij})^2} \end{cases} \quad (4)$$

(5) 分析相对贴近度

计算第 i 个评价指标与最优向量之间的相对贴近度 C_i , $0 \leq C_i \leq 1$,其值 $C_i \rightarrow 1$ (越趋近于1)表明评价对象越优。最后按 C_i 的大小对方案进行择优排序, C_i 越大则表明该方案与最佳方案最为贴近^[6]。计算公式见式(5):

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}, i \in 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

2 路面结构组合方案综合评价

以水泥稳定碎石基层沥青路面为例建立计算模型(见图2),选用三维直角坐标系,在数值分析过程中,对模型的网格划分处理,对车辆轮胎荷载作用位置进行加密处理。材料力学参数按照现行规范选取^[1]。

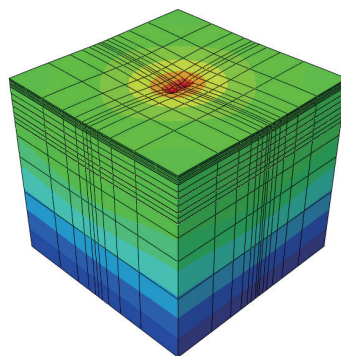


图2 Abaqus计算模型图

根据ABAQUS有限元软件数值分析得到的标准轴载100 kN下SMA+AC路面、双层SMA路面、半柔性路面以及环氧沥青路面的沥青路面沥青混合料层层底拉应变、下基层层底拉应力、路基顶压应变3个设计控制指标的计算值,通过文献调查^[2]确定了沥青混合料的动稳定度并通过市场询价确定了工程造价指标(见表1)。最终确定出TOPSIS综合评价的原始指标参数,并得到事件 K 的原始数据矩阵 R' 和归一化决策向量矩阵 R ,见式(6)、式(7)。

表 1 BRT 站点路面性能指标表^[7]

路面结构	沥青混合料层层底拉应变/(10 ⁻⁶)	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	下基层层底拉应力/MPa	路基顶压应变/(10 ⁻⁵)	工程造价/(元·m ⁻²)
SMA+AC 路面	7.467	7 435	0.034 2	2.729	200+200×0.3×3
双层 SMA 路面	7.221	9 695	0.034 5	2.700	320+320×0.3×3
半柔性路面	6.536	15 452	0.035 0	2.627	500
环氧沥青路面	5.165	30 000	0.036 1	2.373	1 800

大量工程实践表明,SMA 路面结构的养护费用一般为其成本的 30%,5 a 养护一次,按照全寿命周期的原则,沥青混凝土路面设计使用年限为 15 a,相应的工程造价指标应该将重复计入成本。

$$\begin{pmatrix} 7.467 & 435 & 0.034\ 2 & 2.729 & 380 \\ 7.221 & 9695 & 0.034\ 5 & 2.700 & 608 \\ 6.536 & 15\ 452 & 0.035\ 0 & 2.627 & 500 \\ 5.165 & 30\ 000 & 0.036\ 1 & 2.373 & 1\ 800 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} 0.427\ 8 & 0.207\ 2 & 0.510\ 9 & 0.475\ 4 & 0.704\ 9 \\ 0.442\ 4 & 0.270\ 1 & 0.506\ 5 & 0.480\ 5 & 0.440\ 5 \\ 0.488\ 7 & 0.430\ 5 & 0.499\ 3 & 0.494\ 0 & 0.535\ 7 \\ 0.618\ 4 & 0.835\ 9 & 0.482\ 9 & 0.546\ 9 & 0.148\ 8 \end{pmatrix} \quad (7)$$

(1)计算最优、最劣向量

本文认为沥青混合料层层底拉应变、下基层层底拉应力、路基顶压应变、沥青混合料的动稳定度以及工程造价同等重要,各项指标的权重系数均取 1。因此,根据式(3)代入计算得 TOPSIS 决策向量矩阵 R 与加权规范矩阵 A 相同,然后根据加权规范矩阵 A 求出最优向量 A^+ 和最劣向量 A^- 。

$$\begin{cases} A^+ = (0.618\ 4\ 0.835\ 9\ 0.510\ 9\ 0.546\ 9\ 0.704\ 9) \\ A^- = (0.427\ 8\ 0.207\ 2\ 0.482\ 9\ 0.475\ 4\ 0.148\ 8) \end{cases}$$

(2)求解贴近度

在求得各决策向量后,按照式(4)计算其与最佳向量和最劣向量的欧几里距离 D_i^+ 及 D_i^- ,并根据式(5)计算出各决策向量与最佳向量之间的贴近度 C_i ,并进行排序。计算结果见表 2。

表 2 路面结构性能与最优向量的贴近度

路面结构	D_i^+	D_i^-	贴近度 C_i	排序
SMA+AC 路面	0.660 9	0.556 8	0.457 2	3
双层 SMA 路面	0.652 2	0.299 8	0.314 9	4
半柔性路面	0.461 2	0.451 6	0.494 7	2
环氧沥青路面	0.556 8	0.660 9	0.542 8	1

3 针对不同路面方案分析

根据贴近度 C_i 排序可知环氧沥青路面在沥青混合料层层底拉应变、下基层层底拉应力、路基顶压应变、沥青混合料的动稳定度 4 个指标的比较中与最佳向量贴近度最大。为了直观评价各指标与最佳向量之间的关系,依据决策向量 R 以及最优向量 A^+ 和

最劣向量 A^- ,进一步比较分析各指标与最优向量之间的差异,沥青混合料层层底拉应变、下基层层底拉应力、路基顶压应变、沥青混合料的动稳定度以及工程造价的分析结果见图 3 至图 6。

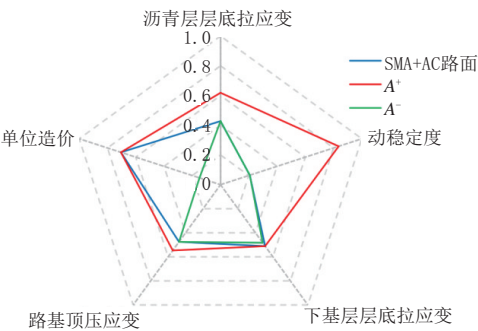


图 3 SMA+AC 路面综合评价

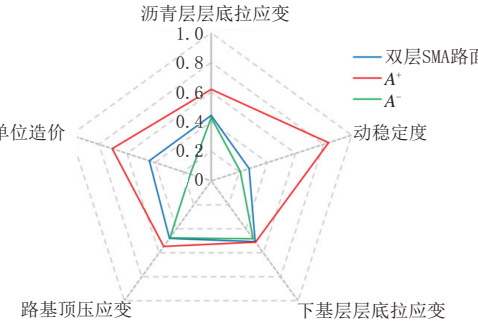


图 4 双层 SMA 路面综合评价

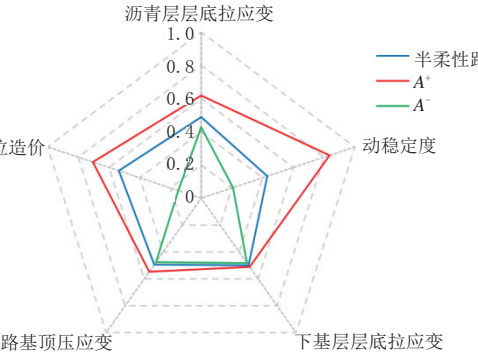


图 5 半柔性路面综合评价

由图 3 可以得出,SMA+AC 路面结构在单位造价方面接近最优向量 A^+ 具有突出的优势,但在动稳定度、沥青混合料层层底拉应变、路基顶压应变三方面接近最劣向量 A^- ,劣势明显,下基层层底拉应力方面最优向量 A^+ 和最劣向量 A^- 的差异幅度不大,因此虽然下基层层底拉应力靠近最优向量 A^+ ,但优势不明显。

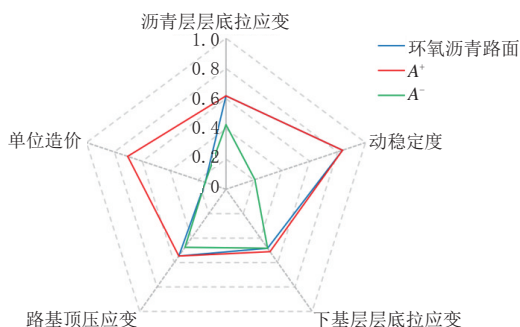


图6 环氧沥青路面综合评价

图4表明,双层SMA路面结构在下基层层底拉应力方面靠近最优向量 A^+ ,但最优向量 A^+ 和最劣向量 A^- 的差异幅度不大,因此虽然下基层层底拉应力靠近最优向量 A^+ ,但优势不明显。动稳定度、沥青混合料层层底拉应变、路基顶压应变三方面接近最劣向量 A^- ,劣势明显,在单位造价方面位于最优向量 A^+ 与最劣向量 A^- 之间,优势和劣势均不明显。综合评价在优势排序中第4,是4种路面结构方案中最差的。

由图5可以得出,半柔性路面结构在下基层层底拉应力、动稳定度、沥青混合料层层底拉应变、路基顶压应变四方面均位于最优向量 A^+ 与最劣向量 A^- 中间附近,更贴近最劣向量 A^- ,但这4个指标较为均衡,单位造价指标更靠近最优向量 A^+ ,但优势不明显。目前在灌注浆液工艺还不成熟,有待进一步优化施工工艺保证路面性能。

由图6可以得出,环氧沥青路面结构在动稳定度、沥青混合料层层底拉应变、路基顶压应变三方面接近最优向量 A^+ ,并占有绝对的优势,该三方面也是沥青混合料性能评价的关键指标,其表现优异。但在单位造价与下基层层底拉接近最劣向量 A^- ,劣势突出,其中在单位造价方面的劣势在很大程度上限制了环氧沥青路面在路面工程上的应用,综合评价在优势排序中第1,是4种路面结构方案中最佳的,

推荐在经济条件较好的城市使用。

4 结 语

本文采用TOPSIS方法,综合考虑沥青混合料层层底拉应变、下基层层底拉应力、路基顶压应变、沥青混合料动稳定度和单位造价5个指标,对BRT站点路面结构方案进行了评价,并优选出在性能上满足BRT站点路面运营特点的路面结构方案,得出以下主要结论。

(1)基于TOPSIS评价方法,结合BRT站点路面抗车辙、拥包,耐久性及行车舒适等方面的要求,环氧沥青路面在动稳定度、沥青混合料层层底拉应变、路基顶压应变三方面优势明显,可显著提高沥青混合料的路用性能,因此推荐环氧沥青路面可作为BRT站点的路面结构方案。

(2)在4种路面结构中,SMA+AC路面虽然在动稳定度、沥青混合料层层底拉应变、路基顶压应变优势不明显,但在单位造价方面优势突出,优于普通(AC结构)沥青混凝土路面结构,因此可考虑在BRT一般路段和不频繁启停的区段使用。

参考文献:

- [1] JTG D50—2017,公路沥青路面设计规范[S].
- [2] 朱逸凡.高温重载下沥青混合料高温稳定性能研究及应用[D].南京:东南大学,2019.
- [3] 高立鑫.BRT停车段沥青路面抗剪切推移特性研究[D].西安:长安大学,2009.
- [4] 林家琛.BRT公交车制动状态下沥青路面结构受力行为研究[D].兰州:兰州交通大学,2020.
- [5] 袁蔚.基于熵权-TOPSIS的市政工程质量缺陷综合评价[D].兰州:兰州交通大学,2020.
- [6] 张秋美.公路隧道水泥混凝土路面抗滑性能及降噪技术研究[D].西安:长安大学,2017.
- [7] 徐伟.基于病害成因分析的BRT站点沥青路面结构组合优化与评价[D].长沙:西南交通大学,2022.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadfloodbridge@163.com

