

DOI:10.11918/202207019

沥青混合料目标配合比级配优选的灰度模型评价法

程郅策¹, 纪伦¹, 郭宏斌², 郝晟^{1,3}, 谭忆秋¹

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 吉林省路桥工程(集团)有限公司, 长春 130062;
3. 天津市政工程设计研究总院有限公司, 天津 300392)

摘要: 沥青混合料目标配合比级配组成设计时有多种选择, 存在如何获得最优级配的问题, 这关乎配合比设计的质量, 直接影响铺面质量和路面的服役寿命, 为此需要一种科学方法进行级配优选。基于优选理论, 分析混合料性能指标特征, 构建非定量指标、常规定量指标及路用性能指标3层次优选指标体系; 设计3组典型级配, 开展典型性能试验和分析, 得到各评价指标值; 采用德尔斐专家调查法进行隶属度、盲度分析和总体认识度指标赋权; 采用灰度模型理论, 对评价指标进行归一化处理, 对各指标进行关联度分析, 逐级对灰度模型体系进行综合评价和排序, 根据排序结果最终选出最优的目标配合比级配。研究中, 提出了灰度模型分析法的指标体系和流程, 并讨论了方法中分辨系数的取值对优选结果的影响。结果表明: 该方法可系统全面分析级配组成对应的性能指标体系, 可筛选出符合路用性能指标的最优特征, 可为沥青混合料目标配合比设计的级配优选提供一种有效技术方法。

关键词: 沥青混合料; 目标配合比; 级配优选; 灰度模型; 关联度

中图分类号: U415 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2024)07-0011-08

Grey model evaluation method for gradation optimization of asphalt mixture gradation

CHENG Zhice¹, JI Lun¹, GUO Hongbin², HAO Shen^{1,3}, TAN Yiqiu¹

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;
2. Jilin Road and Bridge Engineering (Group) Co., Ltd., Changchun 130062, China;
3. Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute, Tianjin 300392, China)

Abstract: There are multiple choices in the design of the target mix proportion and gradation composition of asphalt mixtures, and there is a problem of how to obtain the optimal gradation, which is related to the quality of mix proportion design and directly affects the pavement quality and service life of the pavement. Therefore, a scientific method is needed for gradation optimization. Based on the optimization theory, analyze the characteristics of mixed material performance indicators, and construct a three-level optimization index system consisting of non quantitative indicators, conventional quantitative indicators, and road performance indicators. Design three sets of typical gradation, conduct typical performance tests and analysis, and obtain the values of each evaluation index. Using Delphi expert survey method for membership degree, blind degree analysis, and overall understanding index weighting. Using grayscale model theory, the evaluation indicators are normalized, and the correlation degree of each indicator is analyzed. The grayscale model system is comprehensively evaluated and ranked step by step, and the optimal target mix ratio grading is ultimately selected based on the ranking results. In the study, the indicator system and process of the grayscale model analysis method were proposed, and the influence of the resolution coefficient values in the method on the optimization results was discussed. Research has shown that this method can systematically and comprehensively analyze the performance index system corresponding to the gradation composition, screen out the optimal characteristics that meet the road performance indicators, and provide an effective technical approach for the gradation optimization of asphalt mixture target mix design.

Keywords: asphalt mixture; target mix proportion; gradation optimization; gray model; relevancy

在实际工程应用中, 沥青混合料进行目标配合比设计时, 要求设计的目标配合比的合成级配曲线

根据《公路沥青路面施工技术规范》^[1]和《公路沥青路面设计规范》^[2]等相关标准进行计算绘制, 总结

收稿日期: 2022-07-06; 录用日期: 2022-08-18; 网络首发日期: 2024-06-21

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20240620.1300.004>

基金项目: 国家自然科学基金(U20A20315); 国家重点研发计划(2016YFE0202400)

作者简介: 程郅策(1998—), 男, 硕士研究生; 纪伦(1973—), 男, 副教授, 硕士生导师; 谭忆秋(1968—), 女, 教授, 博士生导师

通信作者: 纪伦, jilun@hit.edu.cn

来看即通过计算得到的单种集料在混合料中的比例求得并绘制出合成级配曲线,要求该合成级配在目标级配曲线及规范要求的上下限内即可。而通常满足这一要求的合成级配曲线往往是有多条的,选择不同的合成级配曲线进行施工,沥青混合料的性能、质量都是存在差别的,因此,如何通过科学的分析方法对级配的优劣进行评价,以优选出最优级配,是沥青混合料工程行业需要解决的问题^[3-4]。

目前,一些学者针对不同种类的沥青混合料,或不同环境下生产的沥青混合料开展了目标级配优选的工作,但尚没有一个分析方法能系统且科学地对级配优选进行优劣评价^[5],在选择最优级配的问题上经常会有分歧,通常由工程师结合自己的经验和工程项目的要求以及现场实际情况进行调整,甚至在实际的工程中经常忽视跳过了这一步骤,只合成一条在规范要求上下限之间的级配,将其作为目标级配,这样既不具备科学性,也极有可能降低混合料的路用性能,甚至影响施工质量控制^[6-7]。本文采用灰度模型分析方法,全面纳入影响沥青混合料的各项要素,进行目标配合比级配优选,选择一个兼备性能和经济的最佳级配,可为配合比设计和施工质量控制提供参考。

1 研究方法

1.1 灰度模型

灰度模型是灰色关联度模型的简称,是用于探究影响因素之间关联性的一种模型,目前在多个领域均有广泛的应用^[8-11]。该模型方法的主要原理核心是影响因素的时间序列曲线,这些曲线之间存在一定的相似点,通过判断相似程度进而分析因素之间的关联性。分析步骤^[12-14]如下:1)确定参考数列(决定系统行为的数据序列)和比较数列(影响系统行为的数据序列);2)为方便不同量纲数据之间的计算比较,对数据进行无量纲处理;3)计算参考数列和比较数列的灰色系数 $\xi(X_i)$;4)求关联度 r_i ,并将关联度排序。

1.2 权重确定方法

1.2.1 熵值法确定权重原理

熵值法^[15-17]是一种客观赋权的方法,其原理主要根据各评价指标的离散程度大小进行赋权,对于评价值的离散程度越大的指标,对其赋予的权重越大,评价值的离散程度越小的指标,其权重越小。该方法适用于对评价指标没有主观的赋权需求,仅根据评价值的离散程度进行客观的赋权。

主要流程:首先根据各指标的关联系数值,计算指标值 x ,进而计算熵值 e 表示各个指标的决策信息,再计算各指标的效用值 d ,亦即各指标的偏差

度,偏差度越大,该指标价值越大,权重也就越大。再利用熵测度确定各指标的权重因子,即为各指标的权重。

1.2.2 结构熵权法确定权重原理

结构熵权法是一种将定性分析与定量分析相结合确定指标权重的方法,由程启月在 2010 年首次提出^[18],将主观赋权的专家调查法与熵理论对典型排序结构的不确定性分析方法相结合,可以对指标进行科学合理的评价。

主要流程:首先通过传统的专家调查法搜集专家意见,对各指标的重要程度进行排序,建立指标重要性矩阵,后通过隶属函数计算,将矩阵转化为隶属度矩阵,计算各指标的平均认识度与盲度,进而获得各指标的总认识度,通过对总认识度进行归一化处理,即得到各指标的综合评价权重。

其中在传统的专家调查法中,根据任务及目标选择具有代表性的专家是重点,选择的专家要精通相关专业领域,知识面广泛,经验丰富且思路开阔,有创造性和洞察力,除了要相关领域的学术权威,还应有从事生产一线工作的专家。专家组的选择应结合评价内容合理选择,一般包括技术专家、企业管理者、行业管理者和经济专家等。在专家选择之外,专家调查法还应该坚持三大原则:匿名性原则、反馈性原则和收敛性原则。

1.3 灰度模型级配优选法的分析流程

结合灰度模型分析方法,沥青混合料级配优选整体分析流程见图 1。

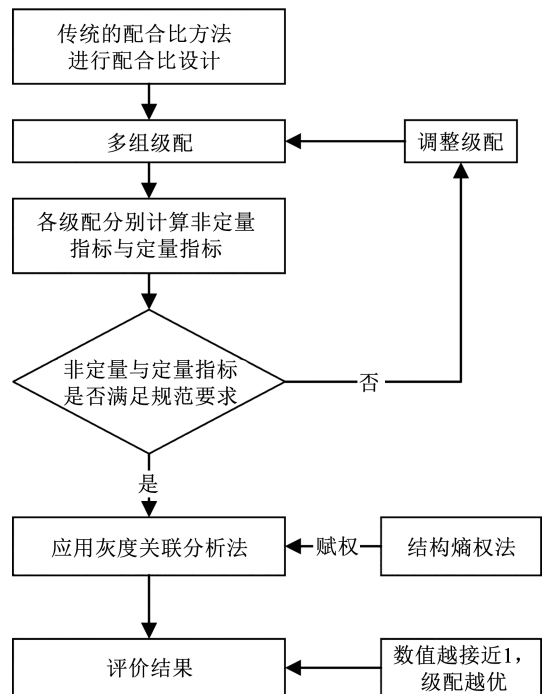


图 1 级配优选分析流程

Fig. 1 Analysis process of grading optimization

1.4 灰度模型级配优选法的指标体系

参考《公路沥青路面施工技术规范》^[1]中的规定对目标配合比进行设计检验的相关指标,将级配优选评价指标分为3类^[19-20],分别为非定量检验指标、常规定量检验指标及路用性能定量指标。非定量检验指标包括流值、空隙率与沥青饱和度,这些指标在规范中给出了范围,但并不能确定这些指标的定量最优值,因此,只需要检验非定量指标的检测值是否符合规范要求,作为级配优选的前提标准。

将最佳沥青用量、矿料间隙率与马歇尔稳定度

作为常规定量检验指标,最佳沥青用量在规范中没有给出要求,但最佳沥青用量越低,生产费用就越低;规范给出了矿料间隙率的下限,因此,可认为矿料间隙率越大,指标越优;马歇尔稳定度作为常规指标,也是稳定度值越大,指标越优^[21]。

路用性能指标选择施工技术规范要求的实验指标值,除渗水系数外,其他指标均为值越大,指标越优。具体的级配优选评价指标参照高速公路改性沥青混合料要求,选择见表1。

表1 级配优选评价指标体系

Tab. 1 Index system of grading optimization evaluation

一级指标	二级指标	评价内容	规范要求
非定量检验指标	流值	沥青混合料试件受压达破坏点时的垂直变形量	20~40(0.1 mm)
	空隙率	空隙体积占沥青混合料总体积的百分数	3%~6%
	沥青饱和度	压实沥青混合料试件中沥青实体体积占矿料骨架实体以外的空间体积的百分数	65%~75%
常规定量检验指标	最佳沥青用量	通过OAC法确定配合比设计的最佳沥青用量	—
	矿料间隙率	矿料以外的体积占试件总体积百分数	>12%
	马歇尔稳定度	对标准击实的试件在温度和加荷速度等条件下施压测出的稳定度	≥8 kN
路用性能定量指标	残留稳定度	浸水马歇尔试验指标,表征混合料水稳定性	≥85%
	冻融劈裂强度比	冻融劈裂试验,表征混合料水稳定性	≥80%
	动稳定度	车辙试验,表征混合料高温稳定性	≥2 400次/min
	弯曲破坏应变	低温弯曲试验,表征混合料的低温抗裂性能	≥3 000
	渗水系数	表征混合料的抗渗性能	≤120 mL/min

根据选择的上述指标,进行沥青混合料目标配合比设计级配优选示例分析。

2 沥青混合料的初选级配组成设计与评价指标分析

2.1 初选级配组成设计

本次试验选用AC-20沥青混合料,各规格集料及筛分结果见表2。根据筛分结果依据《沥青路面施工及验收规范》^[22]进行混合料组成设计,在工程设计级配范围内设计供优选的1~3组不同的矿料级配,本次分析采用试算法进行设计,假定混合料中某粒径的颗粒是由某种优势粒径的集料组成,在其他集料中无该颗粒,进而根据各集料的主要粒径来试算各集料的大致比例,并对比例进行调整以符合规范要求,最终配出本次分析的3组合成级配。同时对3组合成级配进行非定量与定量指标检验,要求其符合规范要求,对不符合规范的配合比进行修正,直至均符合要求为止。配合比设计结果见表3、4,合成级配曲线如图2所示。

表2 各规格集料筛分结果

Tab. 2 Screening results of aggregates of various specifications

集料尺寸规格	粒径/mm	通过率/%
15~25 mm	26.5	100
	19.0	82.3
	16.0	25.1
	13.2	0.3
	9.5	0.0
10~<15 mm	16.0	99.2
	13.2	67.9
	9.5	3.0
	4.75	0.4
5~<10 mm	9.5	99.7
	4.75	13.7
	2.36	2.3
0~<5 mm	4.75	100
	2.36	76.5
	1.18	54.3
	0.6	35.4
	0.3	26.5
	0.15	18.9
	0.075	13.9
矿粉	0.3	100
	0.15	93.4
	0.075	78.9

表 3 混合料组成设计结果

Tab.3 Design results of mixture composition

集料尺寸规格	配合比设计结果/%		
	配合比 1	配合比 2	配合比 3
15 ~ 25 mm	29	24	20
10 ~ < 15 mm	12	17	21
5 ~ < 10 mm	10	18	22
0 ~ < 5 mm	41	35	31
矿粉	8	6	6

表 4 合成级配通过率

Tab.4 Pass rate of composite grading

筛孔/mm	合成级配通过率/%		
	级配 1	级配 2	级配 3
26.5	100	100	100
19.0	94.9	95.8	96.5
16.0	78.2	81.9	84.9
13.2	67.2	70.6	73.3
9.5	59.3	59.5	59.6
4.75	50.4	43.5	40.1
2.36	39.6	33.3	30.3
1.18	30.5	25.5	23.4
0.6	22.8	18.9	17.6
0.3	13.9	10.0	8.7
0.15	10.2	6.9	5.9
0.075	7.0	4.3	3.5

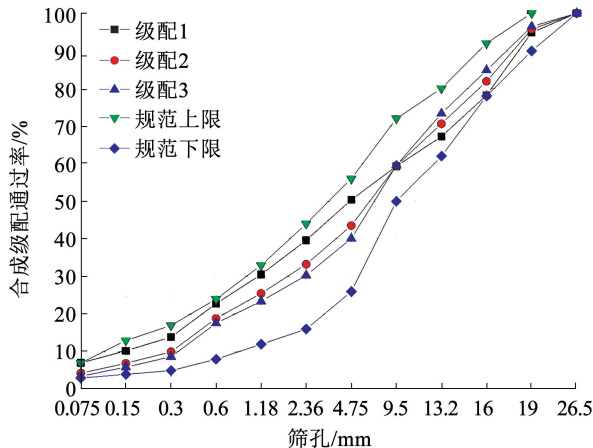


图 2 3 组合成级配曲线

Fig.2 Three composite grading curve

2.2 评价指标分析

在 3 组合成级配的基础上,使用《沥青路面施工及验收规范》^[22] 推荐的方法计算最佳沥青用量,级配 1、2、3 对应的最佳沥青用量分别是 4.9%, 4.5% 及 4.8%。再根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》^[23] 对 3 组目标级配进行非定量指标检

验,结果见表 5;并进行定量指标检验,其中分为常规指标检验和路用性能指标检验,检验结果见表 6、7。

表 5 非定量指标检验结果

Tab.5 Results of non quantitative index test

合成级配及要求	流值(0.1 mm)	空隙率/%	沥青饱和度/%
级配 1	29.2	4.4	67.6
级配 2	32.1	4.3	70.2
级配 3	23.5	4.7	69.4
规范要求	20 ~ 40	3 ~ 6	65 ~ 75

表 6 定量指标(常规指标)检验结果

Tab.6 Results of quantitative index (conventional index) test

合成级配及要求	最佳沥青用量/%	矿料间隙率/%	马歇尔稳定度/kN
级配 1	4.9	13.6	10.26
级配 2	4.5	14.1	9.34
级配 3	4.8	16.3	11.42
规范要求	—	>12	≥8

表 7 定量指标(路用性能指标)检验结果

Tab.7 Results of quantitative index (way-use performance index) test

合成级配及规范要求	残留稳定度/%	冻融劈裂强度比/%	动稳定度/(次·min ⁻¹)	低温弯曲破坏应变	渗水系数/(mL·min ⁻¹)
级配 1	91.9	87.7	3 330.5	3 125	28.1
级配 2	87.3	83.6	3 577.8	3 256	27.6
级配 3	89.1	88.2	3 428.3	3 218	30.8
规范要求	≥85	≥80	≥2 400	≥3 000	≤120

由表 5 ~ 7 可知,以上 3 组合成级配的非定量与定量指标均符合规范要求,可进行后续的级配优选工作。

3 基于灰度模型的目标配合比级配优选

对上述得到的 3 组目标配合比进行基于灰度关联分析的级配优选。进行级配优选所参考的指标主要为定量指标,即存在最优值的指标。按以下步骤进行。

3.1 评价指标归一化

对各定量检验指标进行归一化处理,归一化公式为

$$a_j(k) = \frac{x_j(k) - \min x_j(k)}{\max x_j - \min x_j(k)}, j = 0, \dots, n \quad (1)$$

可得各定量指标的归一化数值见表 8、9。

表8 定量检验指标(常规指标)归一化数值

Tab.8 Normalized value of quantitative inspection (conventional index) index

合成级配	归一化数值		
	最佳沥青用量	矿料间隙率	马歇尔稳定度
级配1	1	0	0.442
级配2	0	0.185	0
级配3	0.750	1	1

表9 定量检验指标(路用性能指标)归一化数值

Tab.9 Normalized value of quantitative inspection (way-use performance index) index

合成级配	归一化数值				
	残留稳定度	冻融劈裂强度比	动稳定度	低温弯曲破坏应变	渗水系数
级配1	1	0.891	0	0	0.156
级配2	0	0	1	1	0
级配3	0.391	1	0.395	0.710	1

3.2 二级指标综合评价

首先对常规与路用性能定量指标下的二级指标分别进行综合评价,令一级指标为 $A^i, i=1,2,\dots,5$, 二级指标为 $A^{ij}, j=1,2,\dots,n_i$, 处理过程如下。“常规定量指标”与“路用性能定量指标”下的二级指标可用矩阵分别表示为

$$D^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.750 \\ 0 & 0.185 & 1 \\ 0.442 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.391 \\ 0.891 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0.395 \\ 0 & 1 & 0.710 \\ 0.156 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由于各指标均为定量指标,取级配1、级配2、级配3各指标的最优值作为参考的最优指标,其中最佳沥青用量与渗水系数的最小值为最优指标,其他指标以最大值为最优指标,即

$$D_g^1 = [0, 1, 1]^T, D_g^2 = [1, 1, 1, 1, 0]^T$$

计算关联系数,确定评判矩阵。参考数据与比较数据之间的关联分析是在对单个指标分析基础上进行的,单个指标的关联程度也就是关联系数。一般以最优指标集 $D_g^i = [d_1^i, d_2^i, \dots, d_n^i]^T$ 为参考依据, $D_s^i = [d_{1s}^i, d_{2s}^i, \dots, d_{ns}^i]^T$ 为被比较数据,那么第 s 个级配的第 j 个指标与参考指标集的第 j 个指标的关联系数 ξ_{js}^i 的计算公式为

$$\xi_{js}^i = \frac{\min |d_k^i - d_{ks}^i| + \rho \max |d_k^i - d_{ks}^i|}{|d_j^i - d_{js}^i| + \rho \max |d_k^i - d_{ks}^i|} \quad (2)$$

对于常规定量的二级指标, $i=1,2,3, j=1,2,3, s=1,2,3$; 对于路用性能定量的二级指标, $i=1,2,3,$

$j=1,2,3,4,5, s=1,2,3,4,5; \rho$ 为分辨系数,取值为 $0 < \rho < 1$, 一般取 $\rho = 0.5$ 。从而获得各指标间的关联系数 ξ_{js}^i , 形成了评判矩阵 $F^i = (\xi_{js}^i)_{n_i \times 3}$ 。

分别将常规定量指标与路用性能定量指标 $D^1、D^2$ 转化为评判矩阵 $F^1、F^2$, 即

$$F^1 = \begin{bmatrix} 0.333 & 1 & 0.400 \\ 0.333 & 0.380 & 1 \\ 0.473 & 0.333 & 1 \end{bmatrix}$$

$$F^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0.333 & 0.451 \\ 0.821 & 0.333 & 1 \\ 0.333 & 1 & 0.453 \\ 0.333 & 1 & 0.633 \\ 0.762 & 1 & 0.333 \end{bmatrix}$$

在评价过程中也需考虑指标的权重,因此,计算各一级指标下的二级指标权重。为了更加科学合理地进行评价,本文考虑使用将定性分析与定量分析结合的结构熵权法。计算分析步骤如下。

3.2.1 收集专家意见,建立指标重要性序列阵

参照传统的德尔斐专家调查法,按照要求向定量具有较高学术权威性的专家进行问卷调查,分别针对常规定量指标和路用性能指标下的二级指标给出自己的意见排序并打分。打分规则:专家如果认为某二级指标是“第一考虑”则打1分;如果认为是“第二选择”,则打2分,依次类推,直到每一指标都被打分结束。此次调查中邀请7位专家进行问卷调查,得到表10、11的结果。

表10 常规定量指标的重要性排列

Tab.10 Importance ranking of conventional quantitative indicators

专家	专家打分		
	最佳沥青用量	矿料间隙率	马歇尔稳定度
专家1	2	3	1
专家2	1	3	2
专家3	1	3	2
专家4	3	2	1
专家5	3	2	1
专家6	1	3	2
专家7	3	2	1

表11 路用性能定量指标的重要性排列

Tab.11 Importance ranking of quantitative indicators of road performance

专家	专家打分				
	残留稳定度	冻融劈裂强度比	动稳定度	低温弯曲破坏应变	渗水系数
专家1	2	3	1	4	5
专家2	5	1	4	2	3
专家3	3	5	1	2	4
专家4	3	4	1	2	5
专家5	4	1	2	3	5
专家6	5	4	3	1	2
专家7	1	2	4	5	3

常规定量指标和路用性能定量指标下的二级指标分别有 3 个和 5 个,因此,可以转换为一个 7×3 矩阵和一个 7×5 矩阵,得到指标重要性序列矩阵 A^1, A^2 :

$$A^1 = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 1 \\ 1 & 3 & 2 \\ 1 & 3 & 2 \\ 3 & 2 & 1 \\ 3 & 2 & 1 \\ 1 & 3 & 2 \\ 3 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A^2 = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 1 & 4 & 5 \\ 5 & 1 & 4 & 2 & 3 \\ 3 & 5 & 1 & 2 & 4 \\ 3 & 4 & 1 & 2 & 5 \\ 4 & 1 & 2 & 3 & 5 \\ 5 & 4 & 3 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 4 & 5 & 3 \end{bmatrix}$$

3.2.2 计算隶属度

给出将排序转化的隶属函数为

$$\delta(G) = \frac{\ln(m-l)}{\ln(m-1)} \quad (3)$$

式中: $G = A_{ij}, l = \{1, 2, 3, \dots, j, j+1\}, j$ 为指标总数, $m = j+2$ 。

$\delta(G)$ 是一个变量,如果某一指标的 $\delta(G)$ 越接近 1,表明越重要。因此,依照公式分别计算出常规定量指标以及路用性能指标的隶属度,设 $c_{ij} = \delta(G)$ 为 A_{ij} 的隶属度,可以得到以下两个隶属度矩阵:

$$C^1 = \begin{bmatrix} 0.79 & 0.50 & 1 \\ 1 & 0.50 & 0.79 \\ 1 & 0.50 & 0.79 \\ 0.50 & 0.79 & 1 \\ 0.50 & 0.79 & 1 \\ 1 & 0.50 & 0.79 \\ 0.50 & 0.79 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C^2 = \begin{bmatrix} 0.90 & 0.77 & 1.00 & 0.61 & 0.39 \\ 0.39 & 1 & 0.61 & 0.90 & 0.77 \\ 0.77 & 0.39 & 1 & 0.90 & 0.61 \\ 0.77 & 0.61 & 1 & 0.90 & 0.39 \\ 0.61 & 1.00 & 0.90 & 0.77 & 0.39 \\ 0.39 & 0.61 & 0.77 & 1.00 & 0.90 \\ 1 & 0.90 & 0.61 & 0.39 & 0.77 \end{bmatrix}$$

3.2.3 盲度分析和总体认识度计算

1) 定义一个专家对各二级指标的平均认识度为 c_j , 计算公式为

$$c_j = (c_{1j} + c_{2j} + c_{3j} + \dots) / k \quad (4)$$

式中 k 为专家个数。在此次调查中, $k = 7$ 。由此计算

出两组指标的平均认识度分别为 $c_j^1 = [0.756, 0.625, 0.911], c_j^2 = [0.690, 0.755, 0.843, 0.781, 0.603]$ 。

2) 定义一个专家由于认知产生的不确定性造成的“盲度”为 B_j , 计算公式为

$$B_j = \{ [\max(c_{1j}, c_{2j}, c_{3j}, \dots, c_{kj}) - c_j] + [\min(c_{1j}, c_{2j}, c_{3j}, \dots, c_{kj}) - c_j] \} / 2 \quad (5)$$

根据式(5), 可以计算出 $B_j^1 = [-0.006, 0.021, -0.015], B_j^2 = [0.003, 0.062, -0.036, -0.088, 0.040]$ 。

3) 计算 7 位专家对两组指标的总认识度为 x_j , 计算公式为

$$x_j = c_j(1 - B_j) \quad (6)$$

两组指标的总认识度分别为 $x_j^1 = [0.7606, 0.6122, 0.9247], x_j^2 = [0.6883, 0.7082, 0.8729, 0.8500, 0.5787]$ 。

3.2.4 归一化处理

对总认识度 x_j^1 及 x_j^2 归一化处理后得到各二级指标的权重 α_j^1, α_j^2 , 可视化二级指标的权重如图 3、4 所示。

$$\alpha_j^1 = [0.3310, 0.2665, 0.4025]^T$$

$$\alpha_j^2 = [0.1861, 0.1915, 0.2261, 0.2298, 0.1565]^T$$

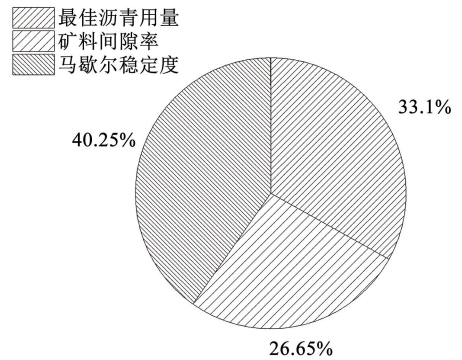


图 3 常规定量指标权重分配结果
Fig. 3 Weight allocation results of conventional quantitative indicators

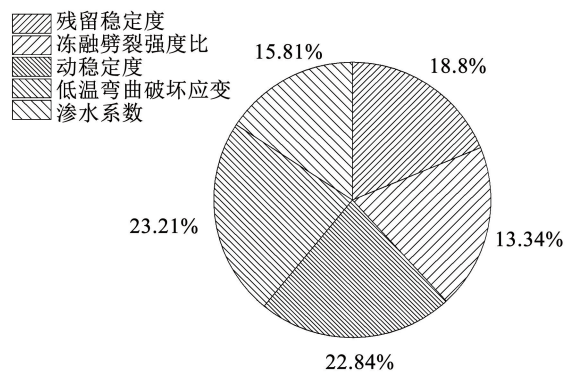


图 4 路用性能定量指标权重分配结果
Fig. 4 Weight distribution results of quantitative indicators of road performance

计算常规定量指标与路用性能定量指标的评价结果矩阵:

$$\mathbf{R}^1 = (\alpha_j^1)^T \mathbf{F}^1 = (0.389, 0.566, 0.801)^T$$

$$\mathbf{R}^2 = (\alpha_j^2)^T \mathbf{F}^2 = (0.618, 0.748, 0.587)^T$$

由此得到了二级指标的综合评价结果,由结果可知对于常规定量指标,级配3为最优级配;对于路用性能定量指标,级配2为最优级配。

3.3 一级指标综合评价

根据上文得到的二级指标的综合评价结果,构建一级指标评判矩阵 \mathbf{B} 与其权重向量 \mathbf{W} 。由 $\mathbf{R}^1, \mathbf{R}^2$ 组成中间层评价矩阵 \mathbf{R} :

$$\mathbf{R} = [\mathbf{R}^1, \mathbf{R}^2]^T = \begin{bmatrix} 0.389 & 0.566 & 0.801 \\ 0.618 & 0.748 & 0.587 \end{bmatrix}$$

可见,最优指标集 $\mathbf{R}_g = (0.801, 0.748)^T$ 。

根据关联系数计算公式(5),计算可得评判矩阵 $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0.333 & 0.467 & 1.000 \\ 0.382 & 1.000 & 0.333 \end{bmatrix}$,考虑采用熵值法确定一级指标权重,计算步骤如下。

1) 计算指标值 x_{jk} , 计算公式为

$$x_{jk} = \frac{d_{jk}}{\sum_{k=1}^q d_{jk}} \quad (7)$$

将指标值 x_{jk} 以矩阵形式表示,得到一级指标的计算结果为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 0.185 & 0.259 & 0.556 \\ 0.223 & 0.583 & 0.194 \end{bmatrix}$$

2) 计算熵值 e_j , 各指标决策信息可表示为

$$e_j = -\lambda \sum_{k=1}^q x_{jk} \ln x_{jk} \quad (8)$$

式中: $\lambda = \frac{1}{\ln q}$, q 为评价级配的数量,本文中 $q = 2$, 计算得到一级指标的熵值为 $\mathbf{e} = (1.426, 1.396)^T$ 。

3) 计算各指标的效用值 d_j , 也就是指标的偏差度,偏差度越大,该指标价值越大,权重也就越大。

$$d_j = |1 - e_j|, j = 1, 2, \dots, n_i \quad (9)$$

计算得到一级指标的效用值为 $\mathbf{d} = (0.426, 0.396)^T$ 。

4) 计算权重因子,得到权重。第 j 个指标的权重因子表示为

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{k=1}^{n_i} d_k} \quad (10)$$

计算得到一级指标权重 $\mathbf{W} = (0.518, 0.482)^T$ 。

一级指标可视化权重如图5所示。对级配优选进行综合评价,评价结果为

$$\mathbf{M} = \mathbf{W}^T \mathbf{B} = (0.244, 0.724, 0.679)$$

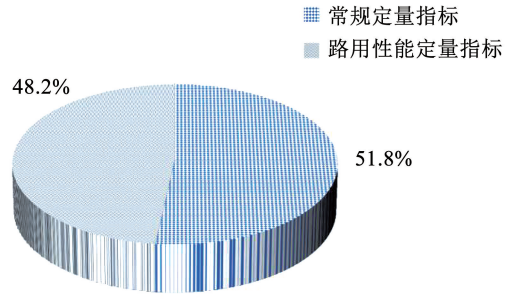


图5 一级指标权重分配结果

Fig. 5 Weight distribution results of primary indicators

图6评价结果显示,对于目标级配1、2、3,根据构建的评价指标体系的最终优选评价结果为级配2 > 级配3 > 级配1。目标级配2为最优级配,其对应的目标配合比为最优的配合比较配组成设计结果,即15~25 mm、10~<15 mm、5~<10 mm、0~<5 mm、矿粉的配合比分别为24%、17%、18%、35%、6%。

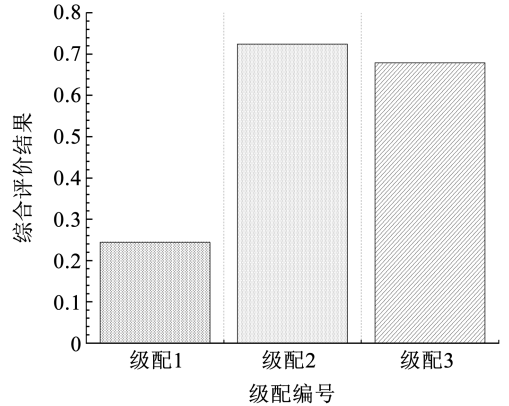


图6 各级配综合评价结果

Fig. 6 Comprehensive evaluation results of distribution at all levels

3.4 分辨系数取值对级配优选评价结果的影响

在进行关联系数的公式计算时,涉及到分辨系数 ρ 的取值,为探究该系数的取值对级配优选最终评价结果的影响,对分辨系数 ρ 的值以0.2的间隔计算各优选级配的综合评价结果,如图7所示。

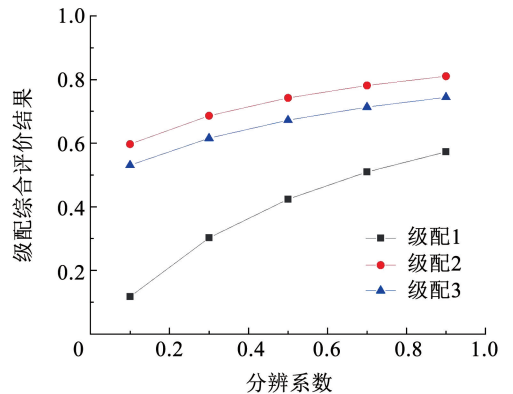


图7 分辨系数对级配优选评价结果的影响

Fig. 7 Influence of resolution coefficient on grading optimization evaluation results

由图 7 可以看出,分辨系数的取值并不会影响级配优选的优劣排序,但会影响各优选级配之间的评价结果之间的差异,分辨系数越小,各级配间的差值越大,越能体现各级配间的优劣关系。 $\rho = 0.1$ 和 $\rho = 0.9$ 时,最优和最劣的两个级配的综合评价差值分别为 0.480、0.238。

从整体呈现的规律也可以看出,级配 2 与级配 3 的差值较小,且随分辨系数的波动较小,级配 1 与级配 2、级配 3 的差值较大,随分辨系数的波动也较大,因此,可认为级配 2 与级配 3 的综合评价没有显著差异,两者与级配 1 的综合评价有较大差异。

4 结 论

采用灰度模型理论和赋权方法,构建指标体系和分析步骤,提出分析流程,对沥青混合料配合比设计的级配优选问题进行分析,提出了方法体系,结合示例进行分析论证,具体得出以下结论:

1) 采用灰度模型分析理论通过分析 3 组目标级配的指标数据列与最优值数据列的关联程度可以对级配作出评价并优选。

2) 运用灰度模型理论,建立了目标配合比级配优选评价体系,基于分析结果所体现出来的最优配合比,表现出了综合性能的优越性,证明了基于灰度模型的沥青混合料目标配合比级配优选评价方法的科学性。

3) 沥青混合料目标配合比级配的灰度模型优选评价方法确定权重时通过各性能指标的包含信息量大小进行,将确定权重出现较多的主观因素问题有效避开且并不损失原始指标信息,是一种客观真实的确定方法。

4) 考虑了沥青混合料生产过程中的多项指标,模拟了工程中的复杂性,为沥青混合料目标配合比设计的级配优选提供了一种新的评价方法。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国交通部. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005
Ministry of Communications of the People's Republic of China. Technical specifications for construction of highway asphalt pavements: JTG F40—2004[S]. Beijing: China Communications Press, 2005
- [2] 中华人民共和国交通运输部. 公路沥青路面设计规范: JTG D50—2006[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway asphalt pavement: JTG D50—2006[S]. Beijing: China Communications Press, 2006
- [3] 田林, 王龙, 王德印. 粉煤灰级配碎石的施工和易性及其评价指标[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(9): 70
TIAN Long, WANG Long, WANG Deyin. Working performance and
- evaluation index of fly-ash graded aggregates[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(9): 70
- [4] 周卫峰. 基于 GTM 的沥青混合料配合比设计方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2006
ZHOU Weifeng. Study of design methodology for asphalt mixture based on GTM[D]. Xi'an: Chang'an University, 2006
- [5] 蒋正武, 徐春普, 张盛. 多目标性能需求的 C50 混凝土配合比优化设计方法[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(4): 499
JIANG Zhengwu, XU Chunpu, ZHANG Sheng. Optimization design method of mix proportion for C50 concrete of multi-purpose performance requirements[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(4): 499
- [6] 何亮, 詹程阳, 吕松涛, 等. 钢渣沥青混合料应用现状[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(2): 15
HE Liang, ZHAN Chengyang, LÜ Songtao, et al. Application status of steel slag asphalt mixture[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(2): 15. DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2020.02.002
- [7] 赵晶, 李晓民, 宋学富. 耐碱玻璃纤维混凝土的配合比设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(6): 766
ZHAO Jing, LI Xiaomin, SONG Xuefu. Mix design of alkali-resistance glass fiber concrete[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(6): 766
- [8] 周思民. 厂拌热再生沥青混合料质量控制与应用技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2021
ZHOU Simin. Study on quality control and application technology of hot recycling asphalt mixture[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021. DOI:10.26976/d.cnki.gchau.2021.000551
- [9] 邓聚龙. 灰色预测模型 GM(1,1) 的三种性质——灰色预测控制的优化结构与优化信息量问题[J]. 华中工学院学报, 1987(5): 3
DENG Julong. Three properties of grey prediction model GM(1, 1)—optimal structure and optimal information quantity of grey prediction control[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1987(5): 3. DOI:10.13245/j.hust.1987.05.001
- [10] TAN Xuerui, DENG Julong. Grey relational analysis: a new statistical method of multifactorial analysis in medicine[J]. Journal of Xi'an Medical University, 1997, 9(1): 59
- [11] 郭颖慧. HTPB 固体推进剂老化特性宏观-微观相关性研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018
GUO Yinghui. Research on the correlation of macro-micro aging characteristics of HTPB solid propellant[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018. DOI:10.26948/d.cnki.gbjlu.2018.001769
- [12] 周国强, 陈彩虹, 薛轶, 等. 基于灰色关联度分析的森林景观类型环境耦合度研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(2): 219
ZHOU Guoqiang, CHEN Caihong, XUE Yi, et al. Coupling degree of forest landscape type environment based on gray relational grade analysis[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(2): 219
- [13] 刘思峰, 蔡华, 杨英杰, 等. 灰色关联分析模型研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(8): 2041
LIU Sifeng, CAI Hua, YANG Yingjie, et al. Advance in grey incidence analysis modelling[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2013, 33(8): 2041
- [14] 张赞. 基于大数据的智慧旅游系统设计与实现[D]. 沈阳: 东北大学, 2016
ZHANG Zan. Design and implementation of wisdom tourism system based on big data[D]. Shenyang: Northeastern University, 2016