

基于 PPR-TOPSIS 分析法的沥青混凝土配合比方案优选

杨志豪^{1,2},何建新^{1,2},李志华³,杨武^{1,2},卢建南^{1,2}

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院,新疆 乌鲁木齐 830052;
2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830052;
3. 新疆绿翔建设工程集团有限责任公司,新疆 额敏 834601)

摘要:针对沥青混凝土配合比设计方案优选过程易受主观因素影响导致结果不确定和最优方案选择难的问题,以乔拉布拉沥青混凝土心墙工程配合比设计为例,将配合比评价指标的综合效益作为目标,提出了投影寻踪回归(PPR)建模技术与基于熵权的 TOPSIS 综合评价法相结合的配合比优选方法(PPR-TOPSIS 分析法)。结果表明:构建的沥青混凝土评价指标 PPR 模型计算精度高,合格率达 93.1%,平均相对误差为 2.01%,可对不同因素水平组合的配合比方案的评价指标进行精确预测;利用 PPR-TOPSIS 分析法得到的最优配合比方案试验结果满足规范标准,相较传统的设计方法减少了人为主观因素影响并实现了全试验因素水平组合的方案寻优及定量评价,得到的配合比方案更为合理。

关键词: 沥青混凝土;配合比方案优选;PPR 建模技术;TOPSIS 评价法

中图分类号:TV431⁺.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)02-0082-07

Scheme optimization of mix proportion for asphalt concrete based on PPR-TOPSIS analysis//YANG Zhihao^{1,2}, HE Jianxin^{1,2}, LI Zhihua³, YANG Wu^{1,2}, LU Jiannan^{1,2} (1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, China; 3. Xinjiang Lyuxiang Construction Engineering Group Co., Ltd., Emin 834601, China)

Abstract: Aiming at the uncertainty in the results of the scheming optimization process influenced by subjective factors and the problem of optimal scheme selection during asphalt concrete mix designing, taking the mix design of the Qiaolabula asphalt concrete core wall project as an example, the projection pursuit regression (PPR) modelling technique combined with the TOPSIS comprehensive evaluation method based on entropy weights (PPR-TOPSIS analysis method) was proposed for the comprehensive benefits of the mix evaluation indexes. The results show that the established PPR model for asphalt concrete evaluation indexes is highly accurate in calculation, with a pass rate of 93.1% and an average relative error of 2.01%, which can accurately predict the evaluation indexes of the mix ratio schemes with different combinations of factor levels. The test results of the best mix ratio scheme analyzed by the PPR-TOPSIS comprehensive evaluation method can satisfy the specification criteria. Compared with the traditional design method, the influence of human subjective factors can be reduced and the solution search and quantitative evaluation of the combination of all test factors can be realized by the proposed method, and the obtained ratio solution is more reasonable.

Key words: asphalt concrete; optimization of mix proportion; PPR technique; TOPSIS evaluation method

沥青混凝土心墙坝拥有诸多优点,在土石坝的选型中占据重要地位^[1],目前全世界已建设了 200 多座沥青混凝土心墙坝,具有很大的发展潜力^[2]。沥青混凝土心墙作为坝体的防渗结构,保证其安全稳定是沥青混凝土配合比设计的核心内容之一。科学、合理的配合比设计及优选方法对于提高沥青混

凝土配合比设计结果的可靠性具有重要意义。沥青混凝土的配合比设计方法是配合比方案优选的关键。传统的设计方法是通过设计正交试验,对评价指标进行极差、方差分析,选出评价指标达最优时的因素水平组合^[3-4],该方法试验量较少,优选结果较为理想,但无法探寻各影响因素相互作用的

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金(2021D01A100);新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室研究项目(ZDSYS-YJS-2021-03)
作者简介:杨志豪(1997—),男,硕士研究生,主要从事沥青混凝土材料配合比设计及静力特性研究。E-mail:1198196930@qq.com
通信作者:何建新(1973—),男,副教授,硕士,主要从事沥青混凝土材料防渗性能及力学特性研究。E-mail:604690896@qq.com

平衡点,也无法对评价指标值进行有效预测。全试验设计方法能够得到各配合比方案的真实观测值,对于揭示各因素对评价指标的影响规律及对比分析优选配合比参数更具可靠性,但试验量显著增多^[5-6]。随着新型建模技术的发展^[7],基于正交试验设计,投影寻踪回归建模技术在胶凝材料的配合比优选和设计参数的单因素分析方面的应用逐渐被开发出来^[8-10]。此方法能够有效挖掘高维数据的内部特征,并通过仿真计算实现试验范围内不同因素水平对应的计算指标的预测,预测结果精度较高^[11],在沥青混凝土配合比设计方面有较大的应用潜力。

沥青混凝土配合比方案的优选实际上就是多目标决策问题,优选过程涉及的评价指标较多,如孔隙率、劈裂位移^[5,12]、马歇尔稳定度、流值、孔隙率^[4,13]及劈裂强度^[3,14]。然而上述试验设计方法针对单一目标的方案优选有显著优势,当涉及多目标决策时,配合比方案的优选过程受人为主观因素影响强烈,优选结果难以直接判断且因人而异,可能会偏离理想解。传统的优劣解距离评价方法(TOPSIS 评价法)是多目标决策分析评价中应用较为广泛的方法^[15],通过测算各配合比方案与“正理想解”和“负理想解”的接近程度对其进行排序,具有易操作、结果可靠等优点,为沥青混凝土配合比方案的定量评价提供了理论依据。

本文以乔拉布拉水库沥青混凝土心墙的配合比设计为例,采用 PPR 建模技术对正交试验结果进行分析,构建试验因素与评价指标的计算模型(PPR 模型),并对全因素水平组合的配合比方案的评价指标进行仿真计算,再结合基于熵权的 TOPSIS 综合评价法对方案评价指标的综合效益进行计算,优选出配合比方案并验证该方案的可行性和本文方法的先进性。

1 试验方案设计

1.1 工程概况及原材料

乔拉布拉水库位于新疆额敏河流域中段北部的额敏县境内,工程区多年平均温度为 5.9℃,地震基本烈度为Ⅶ度。大坝采用碾压式沥青混凝土心墙与灌浆帷幕联合防渗结构,最大坝高 81.5m,工程等别为Ⅳ等。室内沥青混凝土配合比试验所用骨料由工程区碱性料场提供,沥青采用库车 90 号 A 级道路石油沥青,填料由破碎后的骨料经磨细后筛分所得,各项原材料的技术指标经检验均满足 SL501—2010《土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范》要求。

1.2 评价指标及试验方法

用于土石坝心墙结构的沥青混凝土,需要具备较高的强度、良好的防渗性能和较强的适应变形能力^[5,13]。根据伦聚斌等^[3-5,12-14]对沥青混凝土配合比设计的研究成果,本文选取马歇尔稳定度及流值、孔隙率和劈裂抗拉强度作为沥青混凝土配合比的优选评价指标,其中马歇尔稳定度和劈裂抗拉强度为强度指标,马歇尔流值为变形指标,孔隙率为防渗指标,前两种指标为正指标,最后一种指标为负指标。上述评价指标相较渗透系数、黏聚力、内摩擦角、抗弯强度和弯拉应变等指标,在反映沥青混凝土工程性能的同时,所涉及的试验更快捷更易操作,而且在心墙铺筑过程中还便于施工质量的检验。

根据选定的 4 个评价指标,按 DL/T5362—2018《水工沥青混凝土试验规程》规定的试验方法,制备沥青混凝土马歇尔标准试件(∅101.6 mm×63.5 mm),测定各评价指标的试验值,最终结果取 3 次平行试验的平均值。马歇尔试验温度取 40℃,劈裂抗拉试验温度取 10℃,加载速率均为 50 mm/min。

1.3 试验方案与试验结果

水工沥青混凝土配合比设计包括矿料级配的设计和沥青用量的选择。矿料级配设计主要依据丁朴荣^[16]提出的计算公式(式(1)),本文骨料最大粒径为 19 mm,在此情况下,配合比设计就是选择合理的级配指数、填料用量和沥青用量。根据姜春萌等^[9]在 PPR 建模方面的研究成果可知,由应用均匀正交思想选择的建模样本所建立的 PPR 模型的建模效果较为理想,因此本文将级配指数、填料用量和沥青用量作为 3 个因素,设计正交试验表进行配合比试验。根据 SL501—2010《土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范》中推荐的碾压式沥青混凝土心墙配合比设计参数范围,再结合设计要求及新疆多个沥青混凝土心墙配合比使用经验,本文拟定级配指数分别为 0.36、0.39 和 0.42,填料用量分别为 11%、13% 和 15%,由于沥青用量对沥青混凝土性能的影响显著,拟定沥青用量 B 分别为 6.3%、6.6%、6.9% 和 7.2%。

$$P_i = F + (100 - F) \frac{d_i^r - 0.075^r}{D_{\max}^r - 0.075^r} \quad (1)$$

式中: P_i 为孔径 d_i 筛的通过率; F 为粒径小于 0.075 mm 的填料的用量; $D_{\max}$ 为骨料最大粒径; d_i 为某一筛孔尺寸; r 为级配指数。

综上所述,选用 3 因素混合水平共计 12 个试验方案的正交试验表安排试验,同时为验证 PPR 模型的稳定性,还需增设一些试验方案^[11],最终试验方案与试验结果见表 1。

表1 试验方案与试验结果

方案 编号	级配 指数	填料 用量/%	沥青 用量/%	孔隙率/ %	稳定度/ kN	流值/ mm	劈裂抗拉 强度/MPa
1	0.36	11	6.3	1.32	9.74	4.86	0.656
2	0.42	13	6.3	1.42	9.56	4.98	0.624
3	0.39	15	6.3	1.32	9.38	5.54	0.670
4	0.42	11	6.6	1.33	10.41	5.93	0.594
5	0.39	13	6.6	1.41	9.18	6.09	0.560
6	0.36	15	6.6	1.31	7.77	6.74	0.602
7	0.39	11	6.9	1.23	9.69	6.35	0.542
8	0.36	13	6.9	1.19	8.28	6.16	0.534
9	0.42	15	6.9	1.14	7.58	6.71	0.562
10	0.36	11	7.2	1.08	8.73	6.44	0.506
11	0.42	13	7.2	1.18	7.53	6.82	0.494
12	0.39	15	7.2	1.14	7.43	7.26	0.478
13	0.36	12	6.5	1.25	9.76	5.26	0.582
14	0.42	14	6.5	1.27	8.95	5.55	0.595
15	0.39	12	6.7	1.26	9.45	5.86	0.546
16	0.36	14	6.7	1.22	8.44	6.15	0.576
17	0.39	12	7.0	1.19	8.75	6.34	0.490
18	0.42	14	7.0	1.15	8.21	6.48	0.498

注:编号1~12为本文正交试验设计的试验方案;编号13~18为验证PPR模型稳定性和计算精度而增设的试验方案。

2 PPR 建模及仿真计算

2.1 基本原理

PPR 是一种将高维数据进行降维以极小化投影结果与实测结果的偏差为准则,找寻有效反映数据结构特征的投影来分析描述高维数据的探索性数据分析(exploratory data analysis, EDA)方法^[7]。设 $(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ 是一组随机变量,其中 $\mathbf{Y}$ 是 Q 维随机变量, $\mathbf{X}$ 是 P 维随机变量,PPR 建模技术即根据观测结果采用一系列岭函数对投影方向上的 $\mathbf{X}$ 随机变量进行加权平均来逼近回归函数 $F(\mathbf{x})$:

$$F(\mathbf{x}) = E(y_i | x_1, x_2, \dots, x_P) = \bar{y}_i + \sum_{j=1}^M \beta_j f_j(\sum_{k=1}^P \alpha_{jk} x_k) \quad (2)$$

式中: x_k 为第 k 个自变量($k=1, 2, \dots, P$); y_i 为第 i 个因变量($i=1, 2, \dots, Q$); $\bar{y}_i$ 为第 i 个因变量 n 次观测结果的均值; f_j 为第 j 个岭函数,且满足 $E(f_j) = 0$, $E(f_j^2) = 1$; M 为探寻的岭函数上限数量; β_j 为第 j 个岭函数的权重; α_{jk} 为第 j 个投影方向上第 k 个分量。

PPR 实现过程中以满足式(3)极小化准则为约

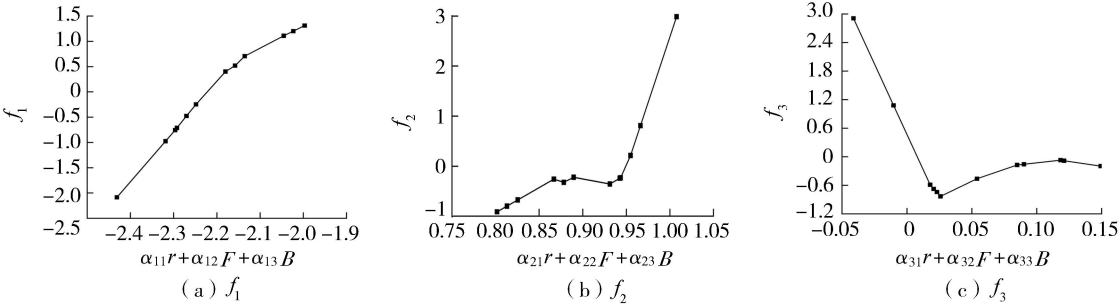


图1 PPR 模型岭函数

束,对上述参数进行分层分组迭代交替优化,最终估计出各岭函数及其权重,以及 $\mathbf{X}$ 的投影方向。PPR 建模技术的具体实现步骤见文献[9]。

$$\min L = \sum_{i=1}^Q w_i E[(y_i - Ey_i) - \sum_{j=1}^{M_u} \beta_{ij} f_j(\sum_{k=1}^P \alpha_{jk} x_k)]^2 \quad (3)$$

式中: M_u 为最优岭函数个数; w_i 为因变量权重。其他物理量含义见文献[9]。

2.2 建模过程

将配合比设计参数 r 、 F 、 B 作为自变量,4个评价指标作为因变量,取表1中前12个方案作为建模样本,采用编制的PPR计算机程序进行建模计算,并采用后6个方案来分析模型的稳定性。以稳定度指标为例,经计算模型投影参数分别为: $P=3, Q=4, S=0.5, M=5, M_u=3$ 。其中, S 为光滑系数,决定了模型灵敏度,取值范围为 $0 < S < 1$, S 值越小模型越灵敏,以Gong等^[10]提出的精度一致检验法准则为依据,取模型计算值与实测值相对误差小于或等于5%为合格率判定标准,在模型具有较好的稳定性条件下,试算确定其具体取值; M 和 M_u 决定了模型找寻数据内部特征的精细程度。

建模计算过程中求得的模型投影方向见式(4),模型的岭函数如图1所示,各岭函数权重分别为0.8078、0.5878、0.4848。将式(4)、图1所示的岭函数和各岭函数权重代入式(2),得到稳定度的计算模型,同理可求得沥青混凝土其他评价指标的计算模型。除此之外,建模计算过程中还可以求出各影响因素对不同评价指标的相对权重,见表2。

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.08061 & -0.00978 & -0.99670 \\ -0.08736 & -0.01215 & 0.99610 \\ -0.01385 & -0.00663 & 0.99989 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 α_1 、 α_2 、 α_3 分别为 f_1 、 f_2 、 f_3 岭函数条件下稳定度的投影方向。

由表2可得,沥青用量对各评价指标的影响程度最大,采用极差分析法对表1中的试验结果进行

表2 各评价指标影响因素的相对权重

评价指标	影响因素权重		
	填料用量	级配指数	沥青用量
稳定度	0.767	0.380	1.000
流值	0.376	0.408	1.000
孔隙率	0.229	0.127	1.000
劈裂抗拉强度	0.359	0.151	1.000

分析可以得到相同的结论,进一步验证了上述结论的可靠性。

2.3 PPR 模型精度分析

将试验方案中的建模和检验样本代入 PPR 模型中对各评价指标进行计算并与实测值比较,来分析模型的计算精度,限于篇幅,将所得结果标准化处理后绘于图 2 中。由图 2 可得,所有指标建模和检验样本的计算值与实测值偏差均较小,以 5% 相对误差为标准,合格率为 93.1%,平均相对误差为 2.01%,表明本文建立的 PPR 模型对各评价指标均有较高的计算精度,能够较精确地预测不同因素水平组合的配合比方案的评价指标值,再结合表 2 所得结果,证明了 PPR 建模技术在试验数据内部结构特征挖掘方面的优势。

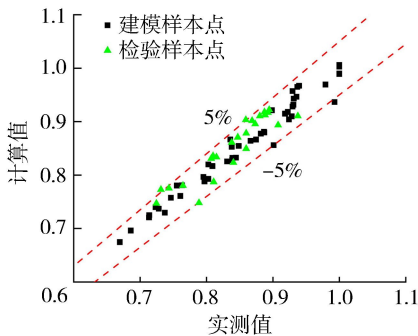


图2 PPR 模型精度分析

3 配合比方案优选

3.1 基于熵权的 TOPSIS 综合评价法

传统的 TOPSIS 评价法主要采用主观赋权法给评价指标定权,但该方法受人为主观因素影响可能会造成评价结果与实际情况出现偏差^[17]。与主观赋权法相比,熵值赋权法能够基于评价指标的原始信息求得权重,避免了人为主观因素的干扰,降低了评价指标的权重误差,使评价结果与实际情况更契合^[18]。因此,本文采用熵值赋权法给各评价指标定权。基于熵权的 TOPSIS 综合评价法步骤如下^[15,17]:

步骤 1 建立初始评价指标矩阵:假设有 V 项评价指标和 N 个评价方案,构成初始数据指标矩阵 $\mathbf{X}=(x_{ij})_{N \times V}$,其中 x_{ij} 为第 $i(i=1,2,\cdots,N)$ 个评价方案对应的第 $j(j=1,2,\cdots,V)$ 项指标值。

步骤 2 计算初始指标值占比。将指标值 x_{ij} 除

以对应列各行元素之和 $\sum_{i=1}^N x_{ij}$,得到处理后的指标值 r_{ij} 。

步骤 3 计算各指标的信息熵 E_j 和信息效用值 d_j :

$$E_j=-\frac{1}{\ln N} \sum_{i=1}^N\left(r_{ij} \ln r_{ij}\right) \quad(5)$$

$$d_j=1-E_j \quad(6)$$

步骤 4 计算各指标的权重。将信息效用值 d_j

除以信息效用值总和 $\sum_{j=1}^V d_j$,得到各指标权重 w_j 。

步骤 5 规范化初始矩阵。将指标值 x_{ij} 与指标矩阵最小指标值的差除以指标矩阵的极差,得到正指标规范化矩阵 G^+ ;将指标矩阵最大指标值与指标值 x_{ij} 的差除以指标矩阵的极差,得到负指标规范化矩阵 G^- 。

步骤 6 构造加权矩阵。将 G^+ 和 G^- 分别与对应的指标权重相乘再组合,得到加权矩阵 G^* 。

步骤 7 寻找各指标最优、最劣解,建立正理想解向量 G^{*+} 和负理想解向量 G^{*-} :

$$\left\{\begin{array}{l} G_{ij}^{*+}=\max G_{ij}^{*} \\ G_{ij}^{*-}=\min G_{ij}^{*} \end{array}\right. \quad(7)$$

步骤 8 计算第 i 个评价方案与正、负理想解的距离 $D_i^+、D_i^-$:

$$D_i^+=\sqrt{\sum_{j=1}^V\left(G_{ij}^{*}-G_{ij}^{*+}\right)^2} \quad(8)$$

$$D_i^-=\sqrt{\sum_{j=1}^V\left(G_{ij}^{*}-G_{ij}^{*-}\right)^2} \quad(9)$$

式中 $G_{ij}^{*+}、G_{ij}^{*-}$ 分别为第 i 个评价方案对应的指标最优解和最劣解。

步骤 9 计算各方案的相对接近度:

$$C_i=\frac{D_i^-}{D_i^-+D_i^+} \quad\left(0 \leq C_i \leq 1\right) \quad(10)$$

步骤 10 方案优选。方案的相对接近度越大,则综合得分越高,该方案越接近最理想方案。

3.2 沥青混凝土配合比方案优选

在试验设计的 18 个配合比方案的基础上,再考虑其他因素水平组合,构成全因素水平组合,共计 36 个配合比方案,将其代入 PPR 模型对各评价指标进行仿真计算,计算结果如图 3 所示。根据基于熵权的 TOPSIS 综合评价法,求得孔隙率、流值、稳定度及劈裂抗拉强度的权重分别为 0.152、0.272、0.294 和 0.281,并计算得出各配合比方案对应的综合得分,如图 4 所示。

由图 3 可知,方案 9 稳定度最优,劈裂抗拉强度

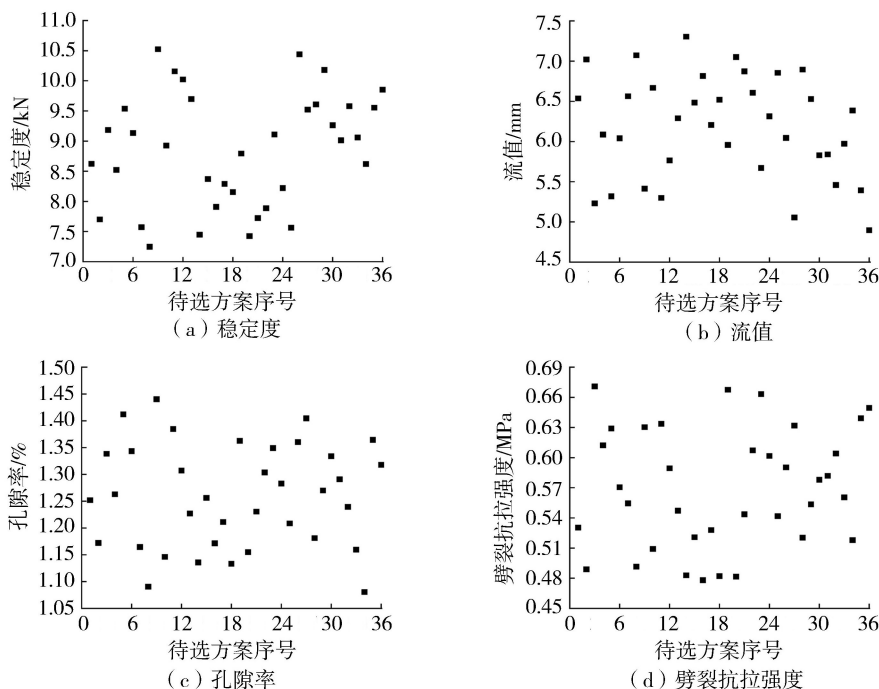


图3 待选方案评价指标

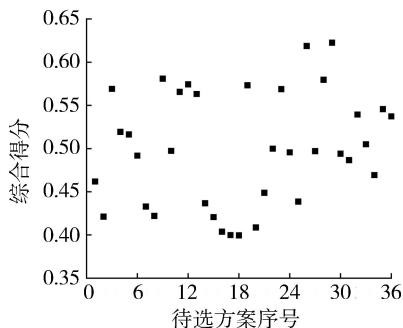


图4 待选方案综合得分

处于中上水平,但孔隙率最大,流值处于低水平;方案3劈裂抗拉强度最优,但稳定性和流值均小于方案9;方案34孔隙率最优,而其他指标均劣于方案15;方案14流值最优,而其他指标均劣于方案34。由此可得,追求单一指标最优并不能保证其他指标处于较优水平,甚至会使其处于低水平,因此,配合比优选时应考虑所有指标的综合效益。根据图4结果,选择得分最高的29号方案为本文最优配合比方案,该方案级配指数为0.42,填料用量为11%,沥青用量为6.9%,所对应的稳定性、流值、孔隙率、劈裂抗拉强度指标理论值分别为10.08 kN、6.53 mm、1.27%和0.553 MPa。经试验验证,该配合比方案的稳定性、流值、劈裂抗拉强度、孔隙率分别为10.22 kN、6.33 mm、0.549 MPa和1.25%。试验结果与理论计算结果相比,误差均在3.5%以内。

为验证本文方法的先进性,采用传统正交试验设计方法进行配合比的优选,通过对表1前12个试验方案进行极差、方差分析,确定7号配合比为最优

配合比,该配合比的稳定性、流值、孔隙率、劈裂抗拉强度分别为9.69 kN、6.35 mm、1.23%和0.542 MPa。对比分析本文方法和传统方法的优选结果可得,本文方法优选出的配合比所对应的沥青混凝土性能总体上要优于传统方法,这主要是因为本文方法实现了全因素水平组合配合比方案的评价指标的精确预测和以综合效益为目标的配合比方案的全局寻优。此外,相比传统方法,本文方法将配合比优选多目标决策问题转化为综合性能最优的单目标寻优问题,实现了对各配合比方案的客观评价,避免了优选结果受决策者经验水平影响而存在差异的问题。

3.2 配合比验证

根据优选出的配合比配制沥青混凝土,并按DL/T 5362—2018《水工沥青混凝土试验规程》规定的试验方法测定其性能,得出其孔隙率为1.25%、渗透系数为 6.93×10^{-9} 、水稳定系数为0.95、抗弯强度为2 130 kPa、弯拉应变为2.669%、黏聚力为405 kPa、内摩擦角为 30.1° ,均满足SL 501—2010《土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范》要求,表明该配合比可应用于工程建设中。

4 讨论

现有的配合比设计方法针对单一评价指标的方案寻优有显著优势^[3-6],而实际工程中多为多评价指标的配合比方案优选,上述方法优选过程需要人为干预且依赖于决策者对配合比设计的经验水平,可能导致优选结果偏离理想解。本文采用PPR建模技术建立了沥青混凝土评价指标计算模型,并与基

于熵权的 TOPSIS 综合评价法相结合对全因素水平组合的配合比方案中的评价指标的综合效益进行了定量评价,由此得到的配合比方案更加客观、合理。将 PPR 建模技术应用于沥青混凝土配合比设计中,与传统设计方法相比试验量相对较小,且实现了不同配合比方案评价指标的精确预测,可用于探究各因素与评价指标的变化规律及对评价指标值进行针对性的调控。采用 TOPSIS 评价法并借助熵权将配合比优选多目标决策问题转化为综合性能最优的单目标寻优问题,解决了优选结果受限于决策者经验水平而存在差异的问题。依据本文评价结果并结合相关文献^[5,12-13]可知,以综合效益为目标进行配合比方案的优选不管从客观理论计算还是人为主观判断都是可行且契合实际的。但本文提出的方法(PPR-TOPSIS 分析法)目前仅适用于碾压式沥青混凝土心墙的配合比优选,针对浇筑式沥青混凝土心墙,尚需考虑分离度及施工黏度指标,并进一步验证方法的合理性。

此外,室内试验设计的配合比在实际工程中能充分发挥作用的前提是保证施工过程中配合比组成成分及比例的一致性。而实际心墙工程的施工,相比室内试验无论是称量方面还是立模成型方面精细度都有较大的偏差,导致施工现场与室内试验的沥青混凝土的指标值存在差异,可能出现较大的劣化。因此,在未来研究中,建议采用数理统计手段对多个心墙工程钻取的芯样组成成分的偏差情况进行统计分析,并以此为依据在配合比优选时将待选配合比方案和与之对应的带有偏差的配合比视为一组,进行配合比方案组的优选,由此得到的方案综合考虑了室内试验与施工应用的情况,更贴近实际情况。

5 结 论

a. 提出了 PPR 建模技术与基于熵权的 TOPSIS 综合评价法相结合的沥青混凝土配合比优选方法。与传统配合比设计方法相比,PPR-TOPSIS 分析法减少了人为主观因素影响,实现了全因素水平组合的方案寻优和以综合效益为目标的配合比方案的定量评价,优选的方案更为合理,可为设计人员提供决策支持。

b. 采用 PPR 建模技术,在正交试验设计的基础上,建立沥青混凝土配合比设计参数与各评价指标的 PPR 计算模型,所得模型具有较高的计算精度,以 5% 相对误差为标准,检验合格率为 93.1%,平均相对误差为 2.01%,能够对试验范围内配合比方案的评价指标进行精确预测,为沥青混凝土性能指标的调控提供了有效的技术手段。

c. 将 PPR-TOPSIS 分析法应用于新疆乔拉布拉水库心墙工程的沥青混凝土配合比方案优选中,通过仿真计算、对比评价,最终确定出最优配合比方案:级配指数 0.42,填料用量 11%,沥青用量 6.9%,经力学性能检验该方案的试验结果满足规范要求,可用于工程建设中。

参考文献:

[1] 李江,柳莹,何建新.新疆碾压式沥青混凝土心墙坝筑坝技术进展[J]. 水利水电科技进展,2019,39(1):82-89. (LI Jiang, LIU Ying, HE Jianxin. Advances in construction technologies of roller compacted asphalt concrete core wall dams in Xinjiang[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(1):82-89. (in Chinese))

[2] 党发宁,高俊,任劼,等.200m 级超高沥青混凝土心墙堆石坝的受力可行性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(增刊2):3690-3700. (DANG Faning, GAO Jun, REN Jie, et al. Research on mechanical feasibility of 200m ultra-high asphalt concrete core rockfill dams[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019,38(Sup2):3690-3700. (in Chinese))

[3] 伦聚斌,何建新,王怀义.粗骨料超径率对心墙沥青混凝土力学性能的影响分析[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(1):169-173. (LUN Jubin, HE Jianxin, WANG Huaiyi. The effects of oversized coarse aggregate rate on mechanical properties of asphalt concrete core wall[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2017, 28(1):169-173. (in Chinese))

[4] 全卫超,何建新,王怀义.砾石骨料破碎对心墙沥青混凝土的性能影响分析[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(1):175-179. (TONG Weichao, HE Jianxin, WANG Huaiyi. Analysis of influence of gravel aggregate broken on performance of asphalt concrete core wall[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2016,27(1):175-179. (in Chinese))

[5] 张应波,王为标,兰晓,等.土石坝沥青混凝土心墙酸性砂砾石料的适用性研究[J]. 水利学报,2012,43(4):460-466. (ZHANG Yingbo, WANG Weibiao, LAN Xiao, et al. Research on the suitability of acidic gravels for asphalt core of embankment dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012,43(4):460-466. (in Chinese))

[6] 余华英,韩守都.配合比参数对水工沥青混凝土防渗性能影响的试验研究[J]. 水资源与水工程学报,2010,21(5):145-148. (YU Huaying, HAN Shoudou. Experiment on the influence of parameters of mix proportion on the anti-seepage of hydraulic asphaltic concrete[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2010,21(5):145-148. (in Chinese))

[7] 郑祖国,何建新,宫经伟,等.复杂系统的投影寻踪回归

- 无假定建模技术及应用实例[M].北京:中国水利水电出版社,2019:82-102.
- [8] 闫林,何建新,杨海华.富胶凝砂砾石材料抗压及抗冻性能研究[J].水资源与水工程学报,2019,30(1):197-202. (YAN Lin, HE Jianxin, YANG Haihua. Research on the anti-compression and anti-freeze properties of the cemented sand and gravel material[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2019, 30(1): 197-202. (in Chinese))
- [9] 姜春萌,宫经伟,唐新军,等.基于PPR的低热水泥胶凝体系综合性能优化方法[J].建筑材料学报,2019,22(3):333-340. (JIANG Chunmeng, GONG Jingwei, TANG Xinjun, et al. Optimization method of comprehensive properties of low heat cement cementitious system based on projection pursuit regression[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(3): 333-340. (in Chinese))
- [10] GONG J W, JIANG C M, TANG X J, et al. Optimization of mixture proportions in ternary low-heat Portland cement-based cementitious systems with mortar blends based on projection pursuit regression [J]. Construction and Building Materials, 2020, 238: 117666.
- [11] 宫经伟,陈瑞,曹国举,等.基于PPR无假定建模的混凝土导热系数计算模型[J].建筑材料学报,2020,23(4):948-954. (GONG Jingwei, CHEN Rui, CAO Guojun, et al. Model of thermal conductivity for concrete based on projection pursuit regression non-hypothetical modeling technology [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(4): 948-954. (in Chinese))
- [12] 王晓奇.水工沥青混凝土配合比的优化及施工质量控制研究[D].西安:西安理工大学,2017:31-38.
- [13] 张伟,黄斌,张本蛟.水工室温沥青混凝土工程特性试验研究[J].水利学报,2015,46(增刊1):27-33. (ZHANG Wei, HUANG Bin, ZHANG Benjiao. Experimental study on engineering characteristics of hydraulic room-temperature asphalt concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(Sup1): 27-33. (in Chinese))
- [14] 何建新.碾压式沥青混凝土心墙坝新技术研究与实践[M].郑州:黄河水利出版社,2020:126-131.
- [15] 朱洁,冯建刚,高玉琴,等.基于BWM-CRITIC-TOPSIS的幸福河湖综合评价模型[J].水利水电科技进展,2022,42(6):8-14. (ZHU Jie, FENG Jiangang, GAO Yuqin, et al. Comprehensive evaluation model for happy rivers and lakes based on BWM-CRITIC-TOPSIS [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(6): 8-14. (in Chinese))
- [16] 丁朴荣.水工沥青混凝土材料选择与配合比设计[M].北京:水利电力出版社,1990:152-161.
- [17] 鲁春阳,文枫,杨庆媛,等.基于改进TOPSIS法的城市土地利用绩效评价及障碍因子诊断:以重庆市为例[J].资源科学,2011,33(3):535-541. (LU Chunyang, WENG Feng, YANG Qiangyuan, et al. An evaluation of urban land use performance based on the improved TOPSIS method and diagnosis of its obstacle indicators: a case study of Chongqing [J]. Resources Science, 2011, 33(3): 535-541. (in Chinese))
- [18] 李灿,张凤荣,朱泰峰,等.基于熵权TOPSIS模型的土地利用绩效评价及关联分析[J].农业工程学报,2013,29(5):217-227. (LI Can, ZHANG Fengrong, ZHU Taifeng, et al. Evaluation and correlation analysis of land use performance based on entropy-weight TOPSIS method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(5): 217-227. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-04-23 编辑:骆超)

(上接第62页)

- [10] 高素坤,齐磊,吕明亮,等.太阳能微动力组合式一体化污水处理设备在农村地区的应用[J].山东农业大学学报(自然科学版),2017,48(5):678-684. (GAO Sukun, QI Lei, LYU Mingliang, et al. Application of solar micro power modular integrated sewage water treatment equipment in rural areas [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2017, 48(5): 678-684. (in Chinese))
- [11] 严伊竣,王春艳,刘毅,等.社区化粪池污水能量转化估算与分析研究[J].中国环境科学,2023,43(1):143-152. (YAN Yijun, WANG Chunyan, LIU Yi, et al. Estimation and analysis of embodied energy conversion in community septic tank [J]. China Environmental Science, 2023, 43(1): 143-152. (in Chinese))
- [12] 黄川,王里奥,宋珍霞,等.有效微生物和多功能复合微生物制剂生物强化提高化粪池粪便污泥减量效率研究[J].环境工程学报,2010,4(7):1636-1642. (HUANG Chuan, WANG Li'ao, SONG Zhenxia, et al. Study on septic tank nightsoil sludge reduction by bioaugmentation of EM and MCMP [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(7): 1636-1642. (in Chinese))
- [13] 张宇航,沈玉君,王惠惠,等.农村厕所粪污无害化处理技术研究进展[J].农业资源与环境学报,2022,39(2):230-238. (ZHANG Yuhang, SHEN Yujun, WANG Huihui, et al. A study on the harmless treatment technology of night soil in rural toilets [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022, 39(2): 230-238. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-05-02 编辑:俞云利)