

基于物元分析法的高速公路沥青路面结构方案优化研究

易克勤

(湖南华昱规划设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410076)

摘要: 分析高速公路沥青路面结构方案选取的影响因素,从经济合理性、实用可靠性、环保协调性及施工便捷性等四方面构建高速公路沥青路面结构方案评价指标体系,利用物元分析法构建高速公路沥青路面结构方案优化模型,并应用实例验证模型的科学与可行性。

关键词: 公路;高速公路;沥青路面;路面结构;物元分析法;优化模型

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2020)02-0056-06

日益增长的交通需求及自然环境的复杂多变,导致高速公路沥青路面损坏越来越严重,严重降低了高速公路使用寿命和服务质量,选择经济合理、施工便捷、环保可行、实用可靠的沥青路面结构成为高速公路建设中的重中之重。该文采用物元分析法对高速公路沥青路面结构进行优化研究。

1 高速公路沥青路面结构评价指标体系

通过分析沥青路面结构的设计、施工特点,识别影响沥青路面结构方案选择的因素,从技术、经济、施工便捷性及环境保护四方面对这些因素进行分类、归纳,构建高速公路沥青路面结构方案评价指标体系。该评价指标体系以经济合理性、实用可靠性、环保协调性、施工便捷性 4 个因素作为准则层,对准则层因素进行划分,得到指标层。其中:经济合理性因素包括工程造价、后期维护和养护费、投资收益;实用可靠性因素包括抗裂性、抗车辙性、重载适应性、行车安全舒适性;环境协调性因素包括对周边自然环境的影响、对周围居民生活环境的影响;施工便捷性因素包括施工难易程度、类似工程成功率和施工工期(见图 1)。

2 评价模型的物元分析法

物元分析法是将数理统计学、系统分析与逻辑思维学有机结合的综合性学科。其利用关键因素对所选择事件进行细化,即将关键因素特征 C 、事物 N 、量值 V 作为描述该事件的基本元,并将其进行组合形成该事件的物元合集 $R=(N \ C \ V)$ 。

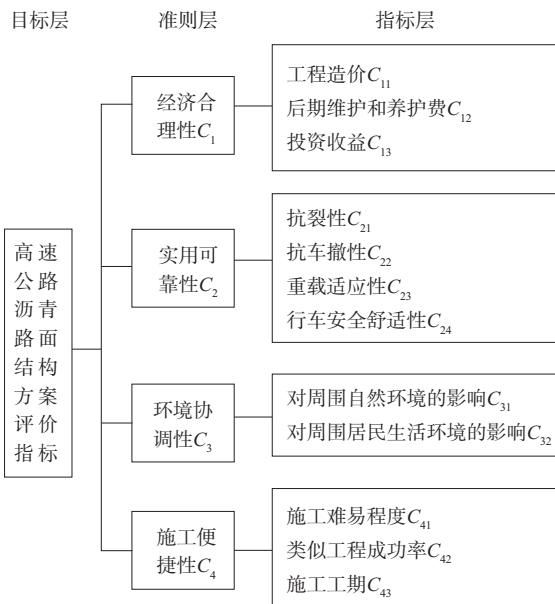


图 1 高速公路沥青路面结构方案评价指标体系

2.1 确定评价指标的权重

采用九标度法确定高速公路沥青路面结构评价指标的权重。

(1) 构建判断矩阵。根据确定的目标,从相关专家库随机抽取专家,根据表 1 所示评判标准对评价指标的重要性程度进行两两比较,构建判断矩阵 $A=(a_{ij})_{m \times m}$:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \cdots & a_{mm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

(2) 确定权重向量。先采用和积法对判断矩阵 A 进行归一化处理[见式(2)],得到标准矩阵 B ;再

按行求和并进行归一化处理,得到特征向量 $W = (W_1, W_2, \dots, W_m)^T$, 其中 W_i 按式(3)计算;最后对所得向量的一致性进行检验。

表 1 判断矩阵的评判标准

| 标度值 | 相对应的含义 |
|------------|------------|
| 1 | 两要素同样重要 |
| 3 | 前者比后者稍微重要 |
| 5 | 前者比后者明显重要 |
| 7 | 前者比后者非常重要 |
| 9 | 前者比后者极为重要 |
| 2, 4, 6, 8 | 上述相邻判断的中间值 |

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}} \quad (i, j = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

$$W_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m b_{ij} \quad (i, j = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

2.2 评价指标赋值

从专家库中挑选专家对所有备选方案进行评价、打分,分制为 0~10,实现高速公路沥青路面结构评价指标的数值化。

2.3 确定经典域和节域

(1) 确定级域 N 和评价因素 C 。根据高速公路沥青路面结构方案的实际情况将其划分成不同等级, $N = \{N_{01}, N_{02}, \dots, N_{0n}\}$, 其中 n 为划分的等级数。评价因素集 C 是高速公路沥青路面结构优化模型的评价指标, $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$, 其中 m 为评价指标的个数。

(2) 确定经典域。优化模型的经典域为:

$$R_{0j} = (N_{0j}, C_{0j}, V_{0j}) = \begin{bmatrix} N_{0j} & c_1 & v_{0j1} \\ & \dots & \dots \\ & c_m & v_{0jm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{0j} & c_1 & (a_{0j1}, b_{0j1}) \\ 0 & \dots & \dots \\ 0 & c_m & (a_{0jm}, b_{0jm}) \end{bmatrix} \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

式中: R_{0j} 为物元; N_{0j} 为第 j 个等级; $V_{0jk} = (a_{0jk}, b_{0jk})$ ($k=1, 2, \dots, m$), 为第 k 个评价指标 C_k 的取值范围, 即经典域。

(3) 确定节域。优化模型的节域为:

$$R_p = (N, C, V_p) = \begin{bmatrix} N & c_1 & v_{p1} \\ & \dots & \dots \\ & c_m & v_{pm} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} N_{0j} & c_1 & (a_{p1}, b_{p1}) \\ & \dots & \dots \\ & c_m & (a_{pm}, b_{pm}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: R_p 为优化模型指标可行取值范围的物元; N 为优化模型的全体等级; $V_{pk} = (a_{pk}, b_{pk})$ ($k=1, 2, \dots, m$), 为 N 中指标 C_k 的可行取值范围, 即节域。

2.4 建立关联函数

选择常用的初等关联函数计算各指标 C_k 关于评价等级的关联函数, $V_k \in [a_{0jk}, b_{0jk}]$ 时按式(6)计算, $V_k \notin [a_{0jk}, b_{0jk}]$ 时按式(7)计算。

$$K_j(V_k) = \frac{-\rho(V_k, V_{0jk})}{|V_{0jk}|} \quad (j=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

$$K_j(V_k) = \begin{cases} \frac{\rho(N_k, V_{0jk})}{\rho(V_k, V_{pk}) - \rho(V_k, V_{0jk})} & \rho(V_k, V_{pk}) \neq \rho(V_k, V_{0jk}) \\ \rho(V_k, V_{0jk}) - 1 & \rho(V_k, V_{pk}) = \rho(V_k, V_{0jk}) \end{cases} \quad (j=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

式中: $\rho(V_k, V_{0jk}) = |V_k - 1/2(a_{0jk} + b_{0jk})| - 1/2 \times (b_{0jk} - a_{0jk})$; $\rho(V_k, V_{pk}) = |V_k - 1/2(a_{pk} + b_{pk})| - 1/2(b_{pk} - a_{pk})$ 。

2.5 综合评价

(1) 确定关联度。关联度反映所有评价指标符合各评价等级的程度。评价对象 N 关于优化模型评价等级 j 的关联度 $K_j(N)$ 为:

$$K_j(N) = \sum_{i=1}^m W_i K_j(V_i) \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

式中: W_i 为评价对象 N 中 i 项指标的权重系数; $K_j(V_i)$ 为关联函数。

若 $K_j = \max_{1 \leq j \leq n} K_j(N) > 0$, 则优化模型评价等级为 j 级。

(2) 计算评价等级的特征值。级别特征值 j^* 按式(9)计算, 其值越小, 评价等级越高。

$$J^* = \frac{\sum_{j=1}^m j^* K_j(N)}{\sum_{j=1}^m \bar{K}_j(N)} \quad (9)$$

式中: $\bar{K}_j(N)$ 为归一化处理的指标关联度, 按式(10)计算。

$$\bar{K}_j(N) = \frac{K_j(N) - \min_j K_j(N)}{\max_j K_j(N) - \min_j K_j(N)} \quad (10)$$

3 高速公路沥青路面结构优化模型的实证

选择新疆 G30 高速公路吐鲁番至小草湖段沥青路面工程为研究对象,该项目全长 106.62 km。

东西走向,起于吐峪沟附近,终于小草湖互通立交处,途经鄯善县、吐鲁番市、托克逊县 3 个县市,地形开阔,地势变化较小。根据项目实际情况提出表 2 所示路面结构备选方案。

表 2 新疆 G30 高速公路吐鲁番至小草湖段沥青路面备选方案

| 方案编号 | 路面结构设计方案 | 造价/(元·m ⁻²) | 优点 | 缺点 |
|------|--|-------------------------|--|--|
| 方案 A | 5 cm 中粒式 SBS 改性沥青砼上面层(AC-16C)+6 cm 中粒式 SBS 改性沥青砼中面层(AC-20C)+8 cm 粗粒式沥青砼下面层(AC-25C)+下封层+34 cm 水泥稳定砂砾基层+15 cm 天然砂砾底基层 | 290.89 | 可提高沥青混合料抗车辙及低温开裂的能力;SBS 改性沥青为工厂化生产,产品质量易控制 | 工程造价较高;动稳定度比抗车辙剂小 |
| 方案 B | 5 cm 中粒式 SBS 改性沥青砼上面层(AC-16C)+6 cm 中粒式沥青砼(A-70 [#] 沥青掺加抗车辙剂)中面层(AC-20C)+8 cm 粗粒式沥青砼下面层(AC-25C)+下封层+34 cm 水泥稳定砂砾基层+15 cm 天然砂砾底基层 | 280.63 | 能提高沥青混合料抗车辙能力;造价低于 SBS 改性沥青 | 市场上抗车辙剂类型多样,质量不易控制 |
| 方案 C | 5 cm 中粒式 SBS 改性沥青砼上面层(AC-16C)+6 cm 中粒式沥青砼(A-50 [#] 沥青)中面层(AC-20C)+8 cm 粗粒式沥青砼下面层(AC-25C)+下封层+34 cm 水泥稳定砂砾基层+15 cm 天然砂砾底基层 | 275.35 | 50 [#] 沥青的造价低 | 50 [#] 沥青的低温抗开裂性能差;动稳定度比 SBS 改性沥青及抗车辙剂小 |
| 方案 D | 5 cm 中粒式 SBS 改性沥青砼上面层(AC-16C)+8 cm 粗粒式 SBS 改性沥青砼下面层(AC-25C)+36 cm 水泥稳定砂砾基层+18 cm 水泥天然砂砾底基层 | 232.60 | 造价低;路面薄,抗车辙性能好 | 路面使用舒适性降低;路面厚度小,抗疲劳能力差;后期养护工作量及费用较大 |

采用物元优化模型对该项目沥青路面结构方案进行优选。步骤如下:

(1) 评价指标权重确定。以经济合理性指标为例,采用层次分析法进行分析,得出判断矩阵和权重(见表 3)。同理,确定所有指标的权重,结果见表 4。

(2) 评价指标数值化。由专家对所有指标进行打分,结果见表 5。

表 3 经济合理性指标的判断矩阵和权重

| C_{1j} | C_{11} | C_{12} | C_{13} | 权重 W |
|----------|----------|----------|----------|--------|
| C_{11} | 1.00 | 4 | 0.5 | 0.334 |
| C_{12} | 0.25 | 1 | 0.2 | 0.098 |
| C_{13} | 2.00 | 5 | 1.0 | 0.568 |

注:最大特征根 $\lambda_{\max}=3.024$,一致性指标 $CI=0.012$,一致性比率 $CR=0.021<0.10$,满足一致性要求。

表 4 高速公路沥青路面结构优化方案评价指标的权重

| 准则层 | 权重 | 指标层 | 相对权重 | 绝对权重 |
|-------------|-------|-------------------|-------|-------|
| 经济合理性 C_1 | 0.313 | 工程造价 C_{11} | 0.334 | 0.105 |
| | | 后期维护与养护费 C_{12} | 0.098 | 0.031 |
| | | 投资收益 C_{13} | 0.568 | 0.178 |
| 实用可靠性 C_2 | 0.497 | 抗裂性 C_{21} | 0.227 | 0.113 |
| | | 抗车辙性 C_{22} | 0.123 | 0.061 |
| | | 重载适应性 C_{23} | 0.227 | 0.113 |
| | | 行车安全舒适性 C_{24} | 0.423 | 0.210 |

续表 4

| 准则层 | 权重 | 指标层 | 相对权重 | 绝对权重 |
|-------------|-------|-----------------------|-------|-------|
| 环境协调性 C_3 | 0.069 | 对周围自然环境的影响 C_{31} | 0.667 | 0.046 |
| | | 对周围居民生活环境的影响 C_{32} | 0.333 | 0.023 |
| 施工便捷性 C_4 | 0.121 | 施工难易程度 C_{41} | 0.334 | 0.040 |
| | | 类似工程成功率 C_{42} | 0.098 | 0.012 |
| | | 施工工期 C_{43} | 0.568 | 0.069 |

表 5 高速公路沥青路面结构优化方案评价指标取值

| 指标层 | 各方案的分值 | | | |
|---------------------------|--------|------|------|------|
| | 方案 A | 方案 B | 方案 C | 方案 D |
| 工程造价 C_{11} | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 后期维护与养护费 C_{12} | 9 | 8 | 7 | 6 |
| 投资收益 C_{13} | 8 | 8 | 7 | 7 |
| 抗裂性 C_{21} | 8 | 7 | 5 | 6 |
| 抗车辙性 C_{22} | 8 | 8 | 7 | 8 |
| 重载适应性 C_{23} | 7 | 7 | 7 | 6 |
| 行车安全舒适性 C_{24} | 7 | 7 | 7 | 5 |
| 对周围自然环境的 影响 C_{31} | 7 | 7 | 7 | 6 |
| 对周围居民生活环 境的影响 C_{32} | 7 | 7 | 7 | 6 |
| 施工难易程度 C_{41} | 8 | 6 | 7 | 7 |
| 类似工程成功率 C_{42} | 8 | 7 | 6 | 8 |
| 施工工期 C_{43} | 8 | 7 | 7 | 8 |

$$R_p = \begin{bmatrix} N_0 & C_{11} & (0,10) \\ & C_{12} & (0,10) \\ & C_{13} & (0,10) \\ & C_{21} & (0,10) \\ & C_{22} & (0,10) \\ & C_{23} & (0,10) \\ & C_{24} & (0,10) \\ & C_{31} & (0,10) \\ & C_{32} & (0,10) \\ & C_{41} & (0,10) \\ & C_{42} & (0,10) \\ & C_{43} & (0,10) \end{bmatrix}$$

(3) 确定经典域与节域。将高速公路沥青路面结构方案分为好、良好、一般、差、很差 5 个等级,即 $N=\{1,2,3,4,5\}$,其值域分别为(8,10)、(6,8)、(4,6)、(2,4)、(0,2)。按式(4)、式(5)计算,得经典域与节域分别为:

$$R_0 = \begin{bmatrix} N_0 & N_{01} & N_{02} & N_{03} & N_{04} & N_{05} \\ C_{11} & (8,10) & (6,8) & (4,6) & (2,4) & (0,2) \\ C_{12} & (8,10) & (6,8) & (4,6) & (2,4) & (0,2) \\ C_{13} & (8,10) & (6,8) & (4,6) & (2,4) & (0,2) \\ C_{21} & (8,10) & (6,8) & (4,6) & (2,4) & (0,2) \\ C_{22} & (8,10) & (6,8) & (4,6) & (2,4) & (0,2) \\ C_{23} & (8,10) & (6,8) & (4,6) & (2,4) & (0,2) \\ C_{24} & (8,10) & (6,8) & (4,6) & (2,4) & (0,2) \\ C_{31} & (8,10) & (6,8) & (4,6) & (2,4) & (0,2) \\ C_{32} & (8,10) & (6,8) & (4,6) & (2,4) & (0,2) \\ C_{41} & (8,10) & (6,8) & (4,6) & (2,4) & (0,2) \\ C_{42} & (8,10) & (6,8) & (4,6) & (2,4) & (0,2) \\ C_{43} & (8,10) & (6,8) & (4,6) & (2,4) & (0,2) \end{bmatrix}$$

(4) 计算各方案评价指标的关联度。按式(6)、式(7)计算各方案评价指标的关联度,以方案 A 为例,计算结果见表 6。

表 6 方案 A 的评价指标关于各评价等级的关联度

| 评价指标 | 方案 A 的关联度 | | | | |
|-------------------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 工程造价 C_{11} | -0.333 | 0.000 | 0.000 | -0.333 | -0.500 |
| 后期维护与 养护费 C_{12} | 0.500 | -0.500 | -0.750 | -0.833 | -0.875 |
| 投资收益 C_{13} | 0.000 | 0.000 | -0.500 | -0.667 | -0.750 |
| 抗裂性 C_{21} | 0.000 | 0.000 | -0.500 | -0.667 | -0.750 |
| 抗车辙性 C_{22} | 0.000 | 0.000 | -0.500 | -0.667 | -0.750 |
| 重载适应性 C_{23} | -0.250 | 0.500 | -0.250 | -0.500 | -0.250 |
| 行车安全 舒适性 C_{24} | -0.250 | 0.500 | -0.250 | -0.500 | -0.250 |
| 对周围自然环 境的影响 C_{31} | -0.250 | 0.500 | -0.250 | -0.500 | -0.250 |
| 对周围居民 生活环境的 影响 C_{32} | -0.250 | 0.500 | -0.250 | -0.500 | -0.250 |

续表 6

| 评价指标 | 方案 A 的关联度 | | | | |
|------------------|-----------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 施工难易程度 C_{41} | 0.000 | 0.000 | -0.500 | -0.667 | -0.750 |
| 类似工程成功率 C_{42} | 0.000 | 0.000 | -0.500 | -0.667 | -0.750 |
| 施工工期 C_{43} | 0.000 | 0.000 | -0.500 | -0.667 | -0.750 |

(5) 各方案的关联度。按式(8)计算各方案关于各评价等级的关联度,以方案 A 为例,计算结果见表 7。

表 7 方案 A 的等级关联度

| 评价等级 | 关联度 | 评价等级 | 关联度 |
|------|--------|------|--------|
| 1 | -0.117 | 4 | -0.572 |
| 2 | 0.181 | 5 | -0.532 |
| 3 | -0.358 | | |

(6) 计算评价等级的特征值 J^* ,进行综合评价。

表 9 优选路面结构方案使用性能监测结果

| 桩号 | 路面分项指标 | | | | | PQI | 评定结果 |
|-------------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|------|
| | PCI | RQI | RDI | SRI | $PSSI$ | | |
| K3451—K3452 | 90.2 | 90.3 | 89.6 | 99.0 | 93.78 | 90.2 | 优 |
| K3452—K3453 | 90.5 | 90.5 | 90.1 | 99.3 | 98.92 | 91.3 | 优 |
| K3453—K3454 | 90.9 | 91.6 | 90.3 | 99.2 | 93.47 | 90.7 | 优 |
| K3454—K3455 | 90.9 | 90.6 | 90.5 | 98.7 | 99.22 | 90.2 | 优 |
| K3455—K3456 | 90.5 | 90.8 | 89.1 | 98.4 | 92.74 | 90.5 | 优 |
| K3456—K3457 | 90.9 | 90.4 | 90.8 | 98.7 | 99.73 | 92.4 | 优 |
| K3457—K3458 | 89.9 | 88.9 | 90.8 | 98.7 | 98.62 | 93.3 | 优 |
| K3458—K3459 | 90.4 | 88.9 | 90.4 | 99.1 | 98.61 | 90.9 | 优 |
| K3459—K3460 | 89.7 | 90.3 | 88.5 | 98.3 | 95.45 | 90.9 | 优 |
| K3460—K3461 | 90.3 | 90.1 | 88.2 | 98.6 | 94.89 | 90.3 | 优 |
| K3461—K3462 | 90.5 | 90.0 | 88.4 | 99.2 | 97.60 | 90.9 | 优 |
| K3462—K3463 | 91.5 | 90.3 | 90.8 | 99.0 | 98.02 | 90.9 | 优 |
| K3463—K3464 | 91.5 | 91.1 | 90.5 | 98.5 | 98.64 | 93.2 | 优 |
| K3464—K3465 | 91.2 | 90.5 | 90.7 | 98.7 | 99.14 | 90.0 | 优 |
| K3465—K3466 | 90.9 | 88.9 | 90.7 | 98.6 | 99.64 | 90.9 | 优 |
| K3466—K3467 | 90.4 | 90.6 | 90.6 | 99.3 | 92.82 | 90.8 | 优 |
| K3467—K3468 | 90.2 | 90.6 | 90.8 | 99.3 | 93.31 | 90.2 | 优 |

评价指标值 >90 ,则路面使用性能为优;指标值为 $80\sim 90$,路面使用性能为良。从表 9 可看出:采用路面结构方案 A,各路段的路面指标均为优、良,其中 PCI 指标为优的占 88%, RQI 指标为优

以方案 A 为例,按式(10)归一化处理后的指标关联度见表 8。按式(9)计算方案 A 评价等级的特征值,得 $J_A^*=1.917$ 。同理可得方案 B、C、D 评价等级的特征值,分别为 $J_B^*=2.193$ 、 $J_C^*=2.334$ 、 $J_D^*=2.156$ 。据此判断沥青路面方案 A 的评价等级最高。

表 8 方案 A 的归一化处理指标关联度

| 评价等级 | 关联度 | 评价等级 | 关联度 |
|------|-------|------|-------|
| 1 | 0.604 | 4 | 0.000 |
| 2 | 1.000 | 5 | 0.053 |
| 3 | 0.284 | | |

4 优选方案的使用性能监测

为验证优化模型的合理性,从路面损坏状况指数 PCI 、路面行驶质量指数 RQI 、路面车辙状况指数 RDI 、路面抗滑性能指数 SRI 、路面结构强度指数 $PSSI$ 方面对所选优化方案 A 进行使用性能监测,计算路面性能综合评价指标 PQI ,结果见表 9。

的占 82%, RDI 指标为优的占 71%, SRI 、 $PSSI$ 指标全为优,且综合性指标 PQI 全为优。说明方案 A 即为最优方案,所构建的路面结构方案评选模型合理。

5 结语

通过物元分析法构建高速公路沥青路面结构方案优化模型,并应用于新疆 G30 吐鲁番至小草湖段沥青路面结构方案优化,优选出方案 A,即 5 cm 中粒式 SBS 改性沥青砼上面层(AC-16C)+6 cm 中粒式 SBS 改性沥青砼中面层(AC-20C)+8 cm 粗粒式沥青砼下面层(AC-25C)+下封层+34 cm 水泥稳定砂砾基层+15 cm 天然砂砾底基层。使用性能监测结果表明,该路面结构的性能综合评价指标为优,优化模型合理、可行。

参考文献:

- [1] 郑健龙.基于结构层寿命递增的耐久性沥青路面设计新思想[J].中国公路学报,2014,27(1).
- [2] Gao J H.Maximum shearing stress analysis of asphalt pavement structure[J].Advanced Materials Research, 2014,919.
- [3] 张永安.浅谈物元模型在工程投资方案选择中的应用[J].经济师,2009(7).
- [4] Zhang L J.Dynamic response of asphalt pavement on semi-rigid base due to heavy load [J]. Applied Mechanics & Materials,2013,405~408.
- [5] 新疆维吾尔自治区交通规划勘测设计研究院.高速公路 G30 吐鲁番至小草湖段公路建设工程可行性研究报告[R].乌鲁木齐:新疆维吾尔自治区交通规划勘测设计研究院,2015.

- [6] 周琳.模糊数学在立交匝道线形优化设计中的应用[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2007,26(5).
- [7] 赵艳纳.基于正交试验的沥青路面结构优化组合分析[J].公路与汽运,2016(1).
- [8] 汪航,袁振洲.基于熵权的物元分析法在路网可靠性评价中的应用[J].公路与汽运,2016(1).
- [9] 俞竞伟,钱红萍,施维成,等.基于模糊隶属度函数的高速公路沥青路面结构方案优选[J].公路交通技术,2010(6).
- [10] 杨检.基于物元分析模型的高速公路路线方案优化研究[D].长沙:长沙理工大学,2017.
- [11] 姜立辉.基于物元理论的沥青路面综合评价方法研究[J].公路交通科技:应用技术版,2015(11).
- [12] 李红梅.基于物元模型的网级高速公路沥青路面养护决策研究[D].南京:东南大学,2017.
- [13] 刘宏.广东省高速公路沥青路面结构使用性能调查与分析[D].广州:华南理工大学,2016.
- [14] 曹慎敏.基于物元分析的高速公路沥青路面网级养护决策研究[D].西安:长安大学,2018.
- [15] 周岚.高速公路沥青路面使用性能评价及预测研究[D].南京:东南大学,2015.
- [16] 孙立军.沥青路面结构行为理论[M].上海:同济大学出版社,2003.
- [17] 陈璟.山西重载交通沥青路面结构与材料研究[D].西安:长安大学,2012.
- [18] 白冰.高速公路沥青路面轴载分析及疲劳寿命预测研究[D].长沙:长沙理工大学,2017.

收稿日期:2019-11-09

(上接第 35 页)

- 析[J].清华大学学报:自然科学版,2008,48(5).
- [10] 张萍,邓能静,蒋瑶瑶.居民非工作活动和出行的结构方程建模[J].同济大学学报:自然科学版,2017,45(9).
- [11] 程龙,陈学武.基于结构方程的城市低收入通勤者活动—出行行为模型[J].东南大学学报:自然科学版,2015,45(5).
- [12] 曹小曙,林强.基于结构方程模型的广州城市社区居民出行行为[J].地理学报,2011,66(2).
- [13] Han Y,Li W,Wei S,et al.Research on passenger's travel mode choice behavior waiting at bus station based on SEM-Logit integration model[J].Sustainability,2018,10.
- [14] 尹静.北京市居民出行方式选择意向研究[D].北京:北京交通大学,2012.

- [15] Ingvardson J B,Nielsen O A.The relationship between norms,satisfaction and public transport use:A comparison across six European cities using structural equation modeling[J].Transportation Research Part A:Policy & Practice,2019,126.
- [16] 严海,王熙蕊,梁文博,等.基于结构方程模型的通勤交通方式选择[J].北京工业大学学报,2015,41(4).
- [17] 奴尔加马力·安尼瓦,王令飞,艾力·斯木吐拉.乌鲁木齐市居民定制公交出行意愿及影响因素研究[J].公路与汽运,2019(3).
- [18] 雷子霄.大城市居民客运交通方式选择行为研究[D].西安:西安建筑科技大学,2017.

收稿日期:2019-10-15