

基于熵权物元可拓模型的复工高速公路路基质量评价

马 静^{*1} 刘敦文¹ 鞠加元² 王培森²

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083; 2. 中交一公局第二工程有限公司, 苏州 215101)

摘 要:为准确有效地对复工高速公路路基质量进行评价,在传统物元可拓分析模型的基础上,建立了复工高速公路路基质量评价的熵权物元可拓模型,通过熵权理论确定权重,避免确定指标权重的主观随意性,并用该方法对洪萍高速公路中 K18 + 700、K18 + 885 两个里程段路基进行质量评价。研究结果表明:路基质量评价结果与现场实际情况一致,且该方法科学合理,为类似研究提供了一条新的技术途径。

关键词:复工高速公路;路基质量;物元可拓模型;熵权;质量评价

中图分类号: TU470 文献标识码: A doi:10.16507/j.issn.1006-6055.2016.05.022

Evaluation on Subgrade Quality of Rebuilding Highway Based on Entropy-weight and Matter-element Extension Model

MA Jing^{*,1} LIU Dunwen¹ JU Jiayuan² WANG Peisen²

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083;
2. NO.2 Engineering Co., Ltd. of CCCC First Highway Engineering Co., Ltd., Suzhou 215101)

Abstract: In order to evaluate the subgrade quality of rebuilding highway accurately and reasonably, an entropy-weight and matter-element extension model was established on the basis of traditional matter-element extension model. The weights were determined by entropy-weight theory, which avoided non-determinacy and optional randomness resulted from subjective opinions. This model was applied to evaluate the Hong Ping highway subgrade in K18 + 700 and K18 + 885 paragraph miles. The results showed that the evaluation result was consistent with the actual situation, which proved that the entropy-weight and matter-element extension is scientific and reasonable; furthermore, it can provide an effective method for the similar research.

Key words: rebuilding highway; subgrade quality; matter-element extension model; entropy-weight; quality evaluation

1 引言

高速公路复工建设往往伴随着高速公路新建, 耗费巨大的经费、时间、人力资源, 阻碍区域发展。而复工高速公路路基工程质量的好坏直接关系到整条线路的通行运营, 做好复工高速公路路基质量安全研究对我国公路交通发展和实际生产具有重要的理论意义和实际应用价值。

目前关于路基的研究主要有: 文献[1]以长沙绕城高速为研究对象, 应用 ANSYS 建立半填半挖路基模型, 得到了交通荷载下的动力响应, 推算出合理的路基厚度、路基模量及路基荷载; 文献[2]根据高速公路路基填筑规定, 研究了干湿循环作用下红粘土路基不同开裂形式裂缝发展变化过程, 并发现了小裂缝、大裂缝、小块、裂块路基开裂的发展规律; 文献[3]通过引入非线性模糊矩阵合成算子、区间数

学理论和区间数向量矩阵的相对优势度分析方法, 运用区间模糊评判分析方法分析了岩溶区公路路基的稳定性; 文献[4]基于路基路面多层粘弹性体系, 建立了柔性路基 3D 有限元模型, 研究路基在动态荷载作用下的响应, 得出了柔性路基在动荷载作用下的疲劳损伤机理。然而鲜有学者对复工高速公路路基质量进行研究。

实际上, 复工高速公路路基经长时停工后会出现杂草丛生、边坡冲刷严重、路基积水翻浆、挖方边坡常年受雨水冲刷、坍塌失稳等病害, 对其进行评价分析时需要考虑众多复杂因素。评价复工前路基质量能够充分利用原有工程基础, 减少工程成本, 保证施工质量, 为复工提供经济、优化的方案。针对目前有关复工高速公路路基质量研究较少的状况, 本文从路基既有结构和既有结构附属物两个方面对复工高速公路路基质量进行分析, 构建了复工高速公路路基质量熵权物元可拓模型, 并通过对比本文方法与现场实际情况的一致程度, 验证该方法在复工高速公路路基质量评价中的有效性。

2016-01-07 收稿, 2016-04-07 接受, 2016-10-25 网络发表
* 通讯作者, E-mail: 1357654487@qq.com

2 熵权物元可拓模型的建立

物元可拓理论是蔡文于 1983 年将物元理论与可拓理论相结合而形成的,其横跨哲学、数学与工程应用,是从定性与定量两方面来研究解决问题的一种形式化工具^[5]。而熵权法的基本思路是根据指标变异性的 大小来确定客观权重,评价结果主要依据客观资料,几乎不受主观因素的影响,可以在很大程度上避免人为因素的干扰。

建立熵权物元可拓模型的基本步骤如下^[6,7]:

1) 确定经典域 R_j 。若复工高速公路路基质量等级为 m 级,影响路基质量的因素有 n 个,则经典域 R_j 为

$$R_j = \begin{bmatrix} P_j & C_1 & v_{j1} \\ & C_2 & v_{j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & v_{jn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_j & C_1 & (a_{j1}, b_{j1}) \\ & C_2 & (a_{j2}, b_{j2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (a_{jn}, b_{jn}) \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中, P_j 表示复工高速公路评价的第 j 级($j=1,2,\cdots,m$); C_i 表示路基复工前评价的第 k 个评价指标($k=1,2,\cdots,n$); $v_{jk}(a_{jk},b_{jk})$ 是高速公路风险评价等级 P_j 关于 C_k 的量值域。

2) 确定节域 R_p 。根据各评价指标 C_i 在整个评价体系中的取值可得到其节域 R_p :

$$R_p = \begin{bmatrix} P & C_1 & v_{p1} \\ & C_2 & v_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & v_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & C_1 & (a_{p1}, b_{p1}) \\ & C_2 & (a_{p2}, b_{p2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (a_{pn}, b_{pn}) \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中, P 为复工高速公路路基风险等级的全体; v_{pk} 为 P 关于评价指标 C_k 的取值范围($k=1,2,\cdots,n$)。

3) 确定待评物元。将所收集与分析的评价指标数据用物元表示,则待评物元 R 为

$$R_i = (P_i, C_i, v_{ik}) = \begin{bmatrix} P_i & C_1 & v_{i1} \\ & C_2 & v_{i2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & v_{in} \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中, P_i 为待评路基风险等级; v_{ik} 为 P_i 关于评价指标 C_k 的具体量值。

4) 无量纲化处理。为解决物元可拓法中特征值超出节域范围与评价指标量纲不同的问题,引入线性无量纲法,具体方法如下:

$$v_{ik} = \begin{cases} \frac{v_{ik} - v_k^{\min}}{v_k^{\max} - v_k^{\min}}, & \text{要求越小越好的指标} \\ \frac{v_k^{\max} - v_{ik}}{v_k^{\max} - v_k^{\min}}, & \text{要求越大越好的指标} \end{cases} \tag{4}$$

式中, v_{ik} 表示无量纲化之后的第 k 个评价指标; $v_k^{\max}$ 与 $v_k^{\min}$ 分别表示第 k 个评价指标节域的最大值与最小值。

5) 确定复工高速公路路基质量等级评价指标的关联度

复工高速公路各评价指标初等关联函数值与所对应的权重值是用来确定可拓关联度的,则待评物元 v_{ik} 第 j 等级的初等关联函数为

$$K_j(v_{ik}) = \begin{cases} \frac{\rho(v_{ik}, v_{jk})}{\rho(v_{ik}, v_{pk}) - \rho(v_{ik}, v_{jk})}, & v_{ik} \notin v_{jk} \\ \frac{-\rho(v_{ik}, v_{jk})}{|v_{jk}|}, & v_{ik} \in v_{jk} \end{cases} \tag{5}$$

式中,

$$\rho(v_{ik}, v_{dk}) = \left| v_{ik} - \frac{1}{2}(a_{dk} + b_{dk}) \right| - \frac{1}{2}(b_{dk} - a_{dk}) \tag{6}$$

6) 应用熵权法确定各评价指标的权重

①根据上述分析并结合式(5)和式(6)的计算结果,构建判断矩阵

$$R = [r_{ji}]_{m \times n} \tag{7}$$

($j=1,2,3,\cdots,m; i=1,2,3,\cdots,n$)

②求各指标的信息熵

$$E_i = -1/\ln m \sum_{j=1}^m p_{ji} \ln p_{ji} \tag{8}$$

其中,

$$p_{ji} = (r_{ji} + 1) / \sum_{j=1}^m (r_{ji} + 1) \tag{9}$$

③计算各指标因素的熵权 w_i

$$w_i = \frac{1 - E_i}{n - \sum_{i=1}^n E_i} \text{ 且 } \sum_{i=1}^n w_i = 1 \tag{10}$$

7) 确定待评指标评价等级 j 的可拓关联度
待评路基质量安全风险评价等级 j 的可拓关联度为

$$K_j(p) = \sum_{k=1}^n \alpha_k K_j(v_{ik}) \tag{11}$$

式中, α_k 为第 k 个路基质量安全风险评价指标在整个评价指标中所占的权重值; $K_j(v_{ik})$ 为待评物元 v_{ik}

在第 j 等级下第 k 个评价指标的初等关联函数值。

8) 确定路基质量安全等级

根据关联度最大关联原则,待评物元等级是由评价指标可拓关联度的最大值决定,则路基质量安全风险评价等级为

$$K_{j_0}(p) = \max_{j=1}^m K_j(p)$$

(12)

3 实例应用

3.1 复工高速公路路基质量评价指标体系的构建

根据有关标准规范及现场实际情况,从路基的既有结构和附属物两者出发建立复工高速公路路基质量安全评价指标体系,体系指标结合了路基现场病害特征、病变严重程度以及出现病害范围等情况,如图 1 所示。根据相关标准^[8,9]将复工高速公路路

基质量等级划分为 5 级:优(Ⅰ)、良(Ⅱ)、中(Ⅲ)、次(Ⅳ)、差(Ⅴ),各评价指标分级标准见表 1。

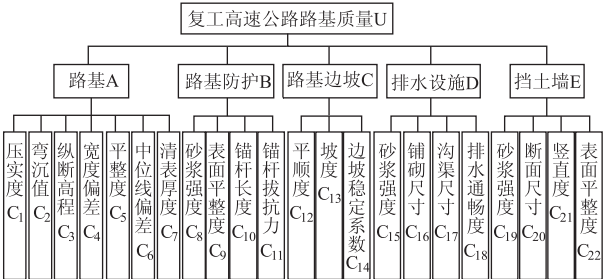


图 1 复工高速公路路基质量评价指标体系

3.2 经典域 R 和节域 R_p 的确定

1) 确定经典域。根据表 1,将Ⅰ~Ⅴ级评价指标经无量纲化处理后的数据作为经典域,形成 5 个待评矩阵,分别用 $R_1 \sim R_5$ 表示。

表 1 复工高速公路路基质量指标分级标准

级别	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁
Ⅰ	(98,100]	(0,20]	[0,5]	[0,50]	[0,5]	[0,15]	(0.97,1]	(0.98,1]	[0,5]	(0.92,1]	(0.9,1]
Ⅱ	(96,98]	(20,45]	(5,10]	(50,100]	(5,15]	(15,25]	(0.9,0.97]	(0.95,0.98]	(5,20]	(0.85,0.92]	(0.85,0.9]
Ⅲ	(94,96]	(45,70]	(10,20]	(100,150]	(15,20]	(25,35]	(0.8,0.9]	(0.93,0.95]	(20,30]	(0.75,0.85]	(0.75,0.85)
Ⅳ	(93,94]	(70,100]	(20,30]	(150,250]	(20,30]	(35,45]	(0.7,0.8]	(0.85,0.93]	(30,50]	(0.6,0.75]	(0.6,0.75]
Ⅴ	[0,93]	>100	>30	>250	>30	>50	[0,0.7]	[0,0.85]	>50	[0,0.6]	[0,0.6]

级别	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆	C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉	C ₂₀	C ₂₁	C ₂₂
Ⅰ	[0,5]	[0,0.5]	>1.35	(0.98,1]	[0,20]	[0,5]	(0.9,1]	(0.98,1]	[0,3]	[0,0.5]	[0,5]
Ⅱ	(5,20]	(0.5,1.0]	(1.3-1.35]	(0.95,0.98]	(20,50]	(5,10]	(0.85,0.9]	(0.95,0.98]	(3,5]	(0.5,1.0]	(5,8]
Ⅲ	(20,30]	(1.0-2.0]	(1.25-1.3]	(0.93,0.95]	(50,80]	(10,15]	(0.75,0.85]	(0.93,0.95]	(5,7]	(1.0,2.0]	(8,10]
Ⅳ	(30,50]	(2.0,3.0]	(1.1-1.25]	(0.85,0.93]	(80,100]	(15-20]	(0.5,0.75]	(0.85,0.93]	(7,10]	(2.0,3.0]	(10,15]
Ⅴ	>50	>3	[0-1.1]	[0,0.85]	>100	>20	[0,0.5]	[0,0.85]	>10	>3	>15

$$R_1 = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 \\ C_1 & (0.98,1) & (0.96,0.98) & (0.94,0.96) & (0.93,0.94) & (0,0.93) \\ C_2 & (0,0.2) & (0.2,0.45) & (0.45,0.7) & (0.7,0.8) & (0.8,1) \\ C_3 & (0,0.16) & (0.16,0.32) & (0.32,0.64) & (0.64,0.96) & (0.96,1) \\ C_4 & (0,0.2) & (0.2,0.4) & (0.4,0.6) & (0.6,0.8) & (0.8,1) \\ C_5 & (0,0.16) & (0.16,0.64) & (0.64,0.8) & (0.8,0.96) & (0.96,1) \\ C_6 & (0,0.3) & (0.3,0.5) & (0.5,0.7) & (0.7,0.9) & (0.9,1) \\ C_7 & (0.97,1) & (0.9,0.97) & (0.8,0.9) & (0.7,0.8) & (0,0.7) \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 \\ C_8 & (0.98,1) & (0.95,0.98) & (0.93,0.95) & (0.85,0.93) & (0,0.85) \\ C_9 & (0,0.1) & (0.1,0.4) & (0.4,0.6) & (0.6,0.8) & (0.8,1) \\ C_{10} & (0.92,1) & (0.85,0.92) & (0.75,0.85) & (0.6,0.75) & (0,0.6) \\ C_{11} & (0.9,1) & (0.85,0.9) & (0.75,0.85) & (0.6,0.75) & (0,0.6) \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 \\ C_{12} & (0,0.1) & (0.1,0.4) & (0.4,0.6) & (0.6,0.8) & (0.8,1) \\ C_{13} & (0,0.16) & (0.16,0.32) & (0.32,0.64) & (0.64,0.96) & (0.96,1) \\ C_{14} & (0.95,1) & (0.9,0.95) & (0.85,0.9) & (0.7,0.85) & (0,0.7) \end{bmatrix}$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} & P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 \\ C_{15} & (0.98,1) & (0.95,0.98) & (0.93,0.95) & (0.85,0.93) & (0,0.85) \\ C_{16} & (0,0.2) & (0.2,0.5) & (0.5,0.8) & (0.8,0.9) & (0.9,1) \\ C_{17} & (0,0.25) & (0.25,0.5) & (0.5,0.75) & (0.75,0.9) & (0.9,1) \\ C_{18} & (0.9,1) & (0.85,0.9) & (0.75,0.85) & (0.5,0.75) & (0,0.5) \end{bmatrix}$$
$$R_5 = \begin{bmatrix} & P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 \\ C_{19} & (0.98,1) & (0.95,0.98) & (0.93,0.95) & (0.85,0.93) & (0,0.85) \\ C_{20} & (0,0.3) & (0.3,0.5) & (0.5,0.7) & (0.7,0.8) & (0.8,1) \\ C_{21} & (0,0.16) & (0.16,0.32) & (0.32,0.64) & (0.64,0.96) & (0.96,1) \\ C_{22} & (0,0.33) & (0.33,0.53) & (0.53,0.67) & (0.67,0.91) & (0.91,1) \end{bmatrix}$$

2)确定节域。复工高速公路路基质量等级的节域 R_p 为

$$R_p = \begin{bmatrix} P \\ C_1 & (0,1) \\ C_2 & (0,1) \\ C_3 & (0,1) \\ \vdots & (0,1) \\ C_{22} & (0,1) \end{bmatrix}$$

3.3 待评物元的确定

萍洪高速公路已停工 7 年之久,长时间停工、环境影响和人为破坏等对项目已施工工程造成了非常大的影响。路基大部分路段已经施工,停工后由于

部分填筑路基及开挖路堑长时间暴露在自然环境中,受雨水冲刷及人为活动(在边坡上肆意开挖取土、路基上随意倾倒垃圾、水毁冲沟等)的影响,路基呈现诸多病害。选取其中两个里程段 K18 + 700、K18 + 885 进行分析,各里程段路基评价指标实际取值及其标准量化值见表 2。

3.4 评价指标关于质量等级的关联度计算

以 K18 + 700 里程段为例,根据式(5)和式(6),计算各评价指标关于质量等级的关联度(见表 3)。根据式(8)~(11)求得各指标的权重(表 4)。根据式(12)及表 3、表 4,可求出复工高速公路 K18 + 700 段路基质量等级可拓关联度,同理可得 K18 + 885 段路基质量(表 5)。

表 2 复工高速公路路基质量指标取值及其量化值

		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁
K18 + 700	实际值	95	85	4.2	13	5	9.5	0.68	7.2	+2	0.72	0.9
	量化值	0.95	0.75	0.134	0.052	0.16	0.19	0.68	0.96	0.04	0.72	0.9
K18 + 885	实际值	93	90	5.6	13	3	7.3	0.54	7.4	-3	0.83	0.86
	量化值	0.93	0.767	0.18	0.052	0.1	0.15	0.54	0.98	0.06	0.83	0.86
		C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆	C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉	C ₂₀	C ₂₁	C ₂₂
K18 + 700	实际值	+4	1	1.2	7.3	12	4	0.8	7.4	2.5	0.3	+3
	量化值	0.08	0.32	0.8	0.97	0.12	0.2	0.8	0.987	0.25	0.1	0.198
K18 + 885	实际值	+6	0.67	1.3	6.8	22	3.2	0.75	7.5	1.3	1.16	-2
	量化值	0.12	0.214	0.9	0.91	0.22	0.16	0.75	1	0.13	0.69	0.132

表 3 K18 + 700 段各指标对 5 个质量等级的关联度

等级	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁
I	-0.375	-0.688	0.163	0.26	0	0.367	-0.475	-0.333	0.75	-0.417	0
II	-0.125	-0.545	-0.163	-0.74	0	-0.367	-0.407	0.333	-0.6	-0.317	0
III	0.5	-0.167	-0.581	-0.87	-0.75	-0.62	-0.273	-0.2	-0.9	-0.097	-0.333
IV	-0.0625	0.5	-0.791	-0.913	-0.8	-0.85	-0.06	-0.42	-0.933	0.2	-0.6
V	-0.25	-0.167	-0.851	-0.935	-0.833	-0.789	0.03	-0.733	-0.95	-0.3	-0.7
等级	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆	C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉	C ₂₀	C ₂₁	C ₂₂
I	0.2	-0.5	-0.428	-0.25	0.4	0.2	-0.333	0.15	0.167	0.375	0.4
II	-0.2	0	-0.333	0.333	-0.4	-0.2	-0.2	-0.35	-0.167	-0.375	-0.4
III	-0.8	0	-0.2	-0.4	-0.76	-0.6	0.333	-0.74	-0.5	-0.688	-0.626
IV	-0.867	-0.583	0.333	-0.57	-0.85	-0.6	-0.2	-0.783	-0.643	-0.844	-0.704
V	-0.9	-0.98	-0.333	-0.286	-0.87	-0.778	-0.6	-0.913	-0.688	-0.896	-0.802

表 4 K18 + 700 段各指标熵权

指标	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁
权重	0.064	0.065	0.048	0.021	0.043	0.048	0.069	0.057	0.001	0.033	0.018
指标	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆	C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉	C ₂₀	C ₂₁	C ₂₂
权重	0.036	0.042	0.066	0.059	0.034	0.055	0.061	0.044	0.042	0.042	0.052

表 5 复工高速公路路基质量状况可拓关联度

里程段	等级					最大可拓 关联度	现场实际情况
	I	II	III	IV	V		
K18 + 700	-0.105	-0.209	-0.346	-0.412	-0.594	-0.105	路基无任何明显缺陷
K18 + 885	-0.204	-0.189	-0.235	-0.352	-0.423	-0.189	排水设施出现轻微堵塞

根据最大关联度原则可知,K18 + 700 里程段路基最大可拓关联度为 -0.105,路基质量等级为 I 级,路基处于优的状态;K18 + 885 里程段路基最大可拓关联度为 -0.189,路基质量等级为 II 级,路基处于良好状态。通过与现场实际情况进行对比,发现该方法评价结果准确合理,与现场实际情况一致,并消除了人为因素的影响,权重取值更加客观。

4 结论

本文将传统物元可拓理论和熵权法相结合,建立了复工高速公路路基质量熵权物元可拓模型,并根据关联度最大识别原则确定路基质量等级,为复工高速公路路基修复提供重要依据。该方法采用熵权法确定指标权重,权重取值更加客观,减少了人为因素对指标因子权重分配的任意性,从而使评价结果更加准确。

将该模型用于分析复工高速公路 K18 + 700、K18 + 885 两个里程段路基质量,将结果与现场实际情况进行比较,验证了该方法的可行性,从而为复工

高速公路路基质量评价提供了一条新的技术途径。

参考文献

[1]李正明,郭鑫,张思远. 动载作用下高速公路半填半挖路基动力响应[J]. 公路工程,2014,39(1):126-130.

[2]吴胜军,刘龙武,王桂尧. 红粘土路基裂缝开展规律室内试验研究[J]. 中外公路,2011,31(1):22-24.

[3]张永杰,曹文贵,赵明华,等. 岩溶区公路路基稳定性的区间模糊评判分析方法[J]. 岩土工程学报,2011,33(1):38-44.

[4]张秀成,王义重,傅旭东. 不同应力路径下某高速公路路基黏性土湿化变形试验研究[J]. 岩土力学,2010,31(6):1791-1796.

[5]蔡文,杨春燕,林伟初. 可拓工程方法[M]. 北京:科学出版社,2000.

[6]朱必勇. 基于熵权物元可拓模型的采空区危险等级评价[J]. 中国安全生产科学技术,2014,10(11):180-186.

[7]温欣欣,郑育毅,张江山. 基于熵权物元可拓模型的福州市环境综合质量评价[J]. 安全与环境工程,2011,18(1):29-32.

[8]JTG F80/1-2012,公路工程质量检验评定标准[S]. 北京:人民交通出版社,2012.

[9]JTG F10-2006,公路路基施工技术规范[S]. 北京:人民交通出版社,2006.