

# 基于区间有序加权算子的地铁车站深基坑 支护方案灰色评价

尹小延

(中原工学院 信息商务学院, 河南 郑州 450007)

**摘要:** 地铁车站深基坑支护方案选择的科学合理性直接关系到整个工程的施工安全, 针对传统深基坑支护方案评价方法主观性强、信息不足等问题, 提出基于区间有序加权算子的地铁车站深基坑支护方案灰色评价模型。首先, 从支护方案的安全性、经济性、技术可行性和环境影响 4 个方面系统地构建支护方案评价指标体系。然后, 利用多粒度语言实现评价指标重要度的语言转换, 引入区间有序加权 (IOWA) 算子中正态分布密度函数对指标赋权, 利用  $\theta$  系数对权重做进一步调整, 求得指标权值, 提高赋权的科学性。最后, 考虑支护方案评价指标的不完整性、数据贫乏性, 利用灰色关联拟合出各个方案与最优方案的贴进度, 得出最佳支护方案。将其运用于郑州地铁 1 号线紫荆山车站支护方案的评价, 认为在施工过程中应选择地下连续墙十内支撑的支护方式, 拟合结果与实际情况相符合, 验证了模型的科学性。

**关键词:** 地铁车站深基坑; 支护方案; 评价; IOWA; Gray

地铁成为解决城市交通压力的绿色出行工具, 逐渐得到推广, 车站作为连接的纽带是一项复杂的系统工程, 关于支护方案的选择在现实施工中多数基于半理论半经验的方法。此外, 地铁车站往往设置在人流密集的区域, 尤其是换乘车站, 周边交通甚为繁忙, 临近高层建筑, 对车站深基坑工程开挖支护提出更高要求。支护方案作为深基坑重要的组成部分, 选择的

科学合理性与深基坑施工安全密切相关。故对地铁车站深基坑支护方案作出科学的评价有利于提高基坑施工安全性, 具有重要的现实意义。

关于地铁车站深基坑支护方案的评价, 国内外学者作了大量的研究。Bjerrum 对深基坑支护结构的可靠性作了研究并分析支护方案失效作用机理、不确定性因素; 王梦恕对北京地铁复兴门车站施工工艺作了

## 4 结论

(1) HOG 水泥混凝土路面纹理化技术处理后路面具备良好镶嵌性的波浪形浅纹理, 可明显改善水泥路面的抗滑性能。

(2) 一代纹理化机对未经过铣刨的水泥路面抗滑性能改善效果较为明显; 经过铣刨的水泥路面可采用一代纹理化处理后, 接着采用二代纹理机加密纹理的组合方式, 效果较佳。采用 HOG 纹理化处治后, 可改善水泥路面行驶质量。

(3) HOG 纹理化技术经过多条高速公路应用表

明, 对隧道水泥路面抗滑性能改善明显, 耐久性良好。工程造价低, 经济效益明显。

## 参考文献:

- [1] 杨学良, 杨良, 等. 隧道路面表面抗滑性能的调查与分析[J]. 公路, 2003(12).
- [2] 李浩. 云南省高速公路隧道段交通事故特征调查及分析[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2014(3).
- [3] 张晓华, 张蓉, 周水文, 等. 铣刨工艺提高隧道内水泥混凝土路面抗滑性能应用探讨[J]. 中外公路, 2016(2).
- [4] JTG E60—2008 路基路面现场测试规程[S].
- [5] JTG H20—2007 公路技术状况评定标准[S].

收稿日期: 2018-10-10

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(编号: 16A560026)

作者简介: 尹小延, 女, 硕士, 讲师, Email: 779629409@qq.com

定量探讨,提供了大量的监测数据;郑向红、俞建霖对地铁车站深基坑围护结构和临近周边环境变形进行了模拟;戴佑斌、刘章军基于指标的模糊性运用模糊一致理论对地铁车站深基坑支护方案进行了评价;吴翔天从支护方案的安全、经济、合理 3 个指标出发对支护方案作出了科学的决策;何亚伯采用组合赋权的方式确定指标的权重,构建了基于灰色理论的深基坑支护方案评价模型。

上述学者在地铁车站深基坑支护方案选择时多借助现场实际数据或专家的主观经验,尤其在指标赋权方面存在一致性检验困难的缺陷,同时无法兼顾指标的模糊性和灰色性。鉴于此,论文引入基于正态分布的区间有序加权算子(IOWA)对决策数据重新集结,利用正态分布密度函数求得指标的重要性,以解决指标信息模糊性和专家评价准确度差异性的难题。同时利用  $\theta$  系数处理区间边界权值,计算出最终权重。考虑部分指标信息的缺失,利用灰色理论实现评价指标信息的透明化,构建出基于区间有序加权算子的地铁车站深基坑支护方案灰色评价模型,利用 IOWA 算子求得指标权值,根据灰色关联计算方案与理想方案的贴进度,得出最优方案,以郑州地铁 1 号线紫荆山车站支护方案为例,验证该模型的科学性。

## 1 地铁车站深基坑支护方案评价指标体系的构建及量化

### 1.1 地铁车站深基坑支护方案评价指标的构建

地铁车站深基坑支护方案的选择是一个复杂的系统工程且受众多指标的影响,指标体系构建的全面、系统、科学性直接关系到选择的成败。支护方案的安全性是地铁车站施工首要考虑的目标,主要由支护系统的稳定性、支护结构的强度两个因素决定。考虑地铁车站所处的特殊位置,支护方案必须满足变形控制的要求,以确保周边道路、地下管线和临近建筑物的安全,因此,支护系统的刚度是不可忽略的指标。同时地铁车站作为深基坑工程,施工周期往往较长,需要跨越不同的季节。因此,应当满足不同季节对安全性的要求,特别是雨季,故应考虑支护的有效时间性,要求在整个施工过程支护结构能够保证施工的安全。鉴于地铁车站深基坑工程造价高、施工技术难度大的特征,冯庆高认为支护方案的经济性和技术可行性是不可忽略的重要因素。此外,地铁车站往往位于城市的中心城区,交通繁忙,周边小区众多,桩基施工产生的噪声极

易引起周边居民的投诉且郑州市对扬尘治理工作非常重视,对施工现场的 PM2.5 数值密切关注,故在选择施工方案时应考虑带来的噪声和扬尘治理影响两个指标。参考文献[6]、[8]的研究结果并根据郑州地铁 1 号线紫荆山车站实际施工情况,从支护方案的安全性、经济性、技术可行性、环境影响 4 个方面构建该基坑支护方案一级评价指标,运用层次分析理论对一级指标按照属性不同作进一步细分,构建出如图 1 所示的地铁车站深基坑支护方评价指标体系。

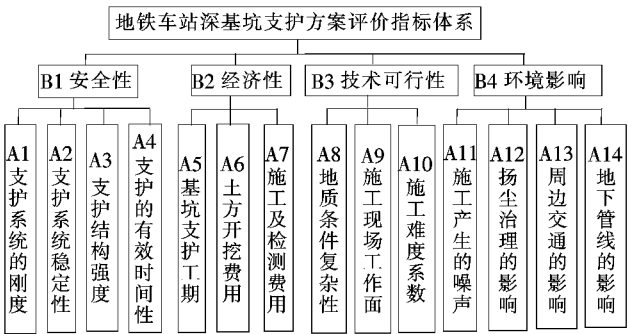


图 1 地铁车站深基坑支护方案评价指标体系

### 1.2 评价指标的量化

根据图 1 构建的评价指标体系易知兼有定性和定量指标,对于两种不同属性的指标采用如下的方式进行处理:

(1) 定性指标包括:A1 支护系统的刚度、A2 支护系统稳定性、A3 支护结构强度、A4 支护的有效时间性、A8 地质条件复杂性、A9 施工现场工作面、A10 施工难度系数、A12 扬尘治理的影响、A13 周边交通的影响、A14 地下管线的影响。对于定性指标利用专家打分投票法作量化处理,通常情况下采用 5 级评定法对指标的重要隶属度进行判别,即{优,较优,一般,较差,差}。为提高决策效率和规避指标属性不同造成难以归一到统一区间的问题,该文采用满分为 1 的打分法,每降低一个等级减 0.25 分,详见表 1,得到定性指标量化后的分值:

$$\epsilon_i = \frac{1 \times N_1 + 0.75 \times N_2 + 0.5 \times N_3 + 0.25 \times N_4 + 0 \times N_5}{N} \tag{1}$$

表 1 指标隶属度及其分值

等级	分值	等级	分值
优	1	较差	0.25
较优	0.75	差	0
一般	0.5		

(2) 定量指标: A5 基坑支护工期、A6 土方开挖费用、A7 施工及监测费用。由于定量指标具有不同的量纲,无法直接进行评价,该文采用等宽度区间法进行量化处理。以基坑支护周期为例(土方开发费用、施工及监测费用等同),取支护周期的最大值  $T_{\max}$  和最小值  $T_{\min}$ ,并将两者的差值划分为 5 个均等的区间,即:

$$L = (T_{\max} - T_{\min}) / 5 \quad (2)$$

则基坑支护周期的区间为:

$$\{[T_{\min}, T_{\min} + L), [T_{\min} + L, T_{\min} + 2L), [T_{\min} + 2L, T_{\min} + 3L), [T_{\min} + 3L, T_{\min} + 4L), [T_{\min} + 4L, T_{\max}]]\}.$$

同理可得其他定量指标的区间值。

## 2 基于区间有序加权算子的地铁车站深基坑支护方案灰色评价模型的构建

### 2.1 基于区间有序加权算子的指标赋权

选择合理的地铁车站深基坑支护方案除构建全面、系统的指标外,更要科学地确定指标权重,传统的赋权方法基本上根据专家的主观判断,不可否认由于专家的心理、经验不同存在认知能力的差异,这种差异性可能导致打分过程出现极值,在一定程度上降低赋权的科学性。此外,评价指标时需考虑专家在不同时刻决策的准确度,常规的赋权方法多数采用固定权值确定指标的重要性,忽略专家评价准确度的差异性,在一定程度上降低赋权的科学性。故该文采用变权的方式对指标进行赋权,即哪个专家评价准确度高则赋予较高的权值。区间有序加权算子(IOWA)通过区间数对定性指标做初步量化,然后对指标信息作集结处理并排序,消除极值的不利影响,运用正态分布密度函数对指标进行赋权,较好地考虑专家对评价指标判断的时变性,实现指标权重的变权处理。同时,为进一步消除区间边界的影响,综合考虑区间边界的权值,引入  $\theta$  系数对权值做进一步的调整,以此求得最终权重。

利用区间有序加权算子计算指标权重的步骤如下:

(1) 设地铁车站深基坑支护方案评价指标数量为  $n$ ,指标集  $A = \{a_i\} = [a_1, a_2, \dots, a_n]$ ,利用区间数  $\bar{u}_{ij} = [u_{ij}^L, u_{ij}^U]$  计算指标  $u_i$  的贡献度模糊评价值,  $u_{ij}^L$  表示专家  $j$  对指标  $i$  模糊评价值的下限,模糊评价值的上限为  $u_{ij}^U$ 。

(2) 设指标  $u_i$  的决策数据为  $\bar{a}_i = [\bar{a}_{i1}, \bar{a}_{i2}, \dots, \bar{a}_{in}]$ ,在文献[15]研究的基础上对决策数据按照从小

到大的顺序重新排序,得到新的数据  $\bar{v}_i = [\bar{b}_{i1}, \bar{b}_{i2}, \dots, \bar{b}_{in}]$ 。

(3) 根据变量的所处位置  $s$ ,运用正态分布函数,对新的数据  $\bar{v}_i$  进行权重计算:

$$P_i = \{p_s\} = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(s-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n s \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{s=1}^n (s - \mu)^2}$$

式中:  $\mu$ 、 $\sigma$  分别为变量在位置  $s$  下的均值、标准差。

(4) 根据计算的权向量  $P_i$  对数据进行加权,从而构建出指标绝对权重区间  $[\omega_i^L, \omega_i^U]$ ,即:

$$\begin{cases} \omega_i^L = \sum_{j=1}^m P_i b_{ij}^L \\ \omega_i^U = \sum_{j=1}^m P_i b_{ij}^U \end{cases} \quad (5)$$

(5) 综合考虑区间上下边界的权重,运用  $\theta$  系数对其进行集结:

$$\omega_i = \theta \omega_i^L + (1 - \theta) \omega_i^U \quad (6)$$

式中:  $\theta$  为下界权重所占组合权重的百分比;  $1 - \theta$  为区间上界权重所占组合权重的百分比。为缩小组合权值与区间上下边界权值的偏差,令  $\theta = 0.5$ 。

(6) 计算指标的相对权重:

$$W_i = \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^m \omega_i} \quad (7)$$

### 2.2 灰色关联评价

在影响地铁车站深基坑支护方案评价的指标中既存在可直接确定的因素(“白色信息”),又有部分无法明确的因素(“灰色信息”)。这类信息的模糊、灰色性导致专家难以作出科学的决策。灰色关联评价作为灰色系统理论重要的分支可以在不完整信息条件下,通过一定的样本数据对随机序列进行分析,寻找出各序列与理想序列的贴近度,掌握因素的特征,进而科学地作出决策。鉴于地铁车站深基坑支护方案评价指标关系复杂、样本数据不足、部分指标信息不完整存在较大的不确定性等特点,导致难以选择合适的方法做出科学的评价,利用灰色关联处理数据的特性能够较好地解决地铁车站深基坑支护方案评价的难题。

#### 2.2.1 确定比较和参考序列

对支护方案比较之前需确定参考序列,设参考序

列为  $H_0 = (h_{01}, h_{02}, \dots, h_{0n})$ , 参考序列的确定可根据评价目标的不同选择最大值或选择最小值, 要保证指标的科学性。比较序列为  $H_i = (H_{iv})_{m \times n} (i = 1, 2, \dots, m; v = 1, 2, \dots, n)$ ,  $n$  为指标数量;  $m$  为待评价的方案。

### 2.2.2 原始数据规范化处理

由于地铁车站深基坑支护方案评价指标具有不同的量纲, 为提高建模质量和评价结果需对原始数据做规范化处理, 消除量纲影响。灰色关联常用的处理方法有初值变换、均值变换、归一变换、区间变换。该文利用区间变换法实现指标的规范化, 见式(8):

$$X_{ik} = \frac{\max H_{ik} - H_{ik}}{\max H_{ik} - \min H_{ik}} (i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

此外, 地铁车站深基坑支护方案评价指标具有双向性, 简单利用式(8)对指标作规范化处理难以反映出不同类别指标对目标的贡献, 利用比重变换法对其作进一步处理, 如式(9)、(10)所示:

正向指标:

$$X_{ik} = \frac{O_{ik}}{\sum_{j=1}^n O_{ik}} \quad (9)$$

反向指标:

$$X_{ik} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{O_{ik}}} \quad (10)$$

最终构建的矩阵为:

$$X = (X_{ik})_{m \times n} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

### 2.2.3 确定指标的灰色关联系数

为了确定最优的比较序列, 需计算每一个比较序列与参考序列的贴近程度, 即灰色关联度系数。经规范化后的参考序列  $X_{0k} = (x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n})$ , 比较序列  $X_{ik} = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) (i = 1, 2, \dots, m)$ 。通过式(12)得出比较序列与参考序列的灰色关联系数  $\epsilon_{ik}$ 。

$$\epsilon_{ik} = \frac{\min_i \min_k |X_{0k} - X_{ik}| + \rho \max_i \max_k |X_{0k} - X_{ik}|}{|X_{0k} - X_{ik}| + \rho \max_i \max_k |X_{0k} - X_{ik}|} \quad (i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

式中:  $\epsilon_{ik}$  为时刻  $k$  下比较序列与参考序列的关联系数, 系数矩阵见式(13)。为降低最大绝对差值过大导

致结果失真, 引入分辨系数  $\rho$ , 以此提高关联系数差异的显著性, 通常情况下取  $\rho = 0.5$ 。

$$E = (\epsilon_{ik})_{m \times n} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \dots & \epsilon_{1n} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \dots & \epsilon_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \epsilon_{m1} & \epsilon_{m2} & \dots & \epsilon_{mn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

### 2.2.4 确定指标的灰色关联度

由于比较序列较多, 信息不集中导致难以对其做单个比较。为提高比较的快捷性将各个比较序列的关联系数归集为一个值, 通过计算关联系数的加权平均值快速实现各比较序列的排序。设  $r_i$  为比较序列与参考序列间的灰色关联度, 利用式(14)计算:

$$r_i(k) = \sum_{k=1}^n \omega_k \epsilon_{ik} (i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n) \quad (14)$$

式中:  $\omega_k = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$  为指标的权重,  $\sum_{k=1}^n \omega_k = 1 (0 \leq \omega_k \leq 1)$ 。  $r_i$  越大表示比较序列越接近参考序列, 即作为最终的选择方案。

## 3 案例实证

紫荆山车站作为郑州地铁1号线重要的换乘车站, 位于紫荆山路与金水路交叉口, 人流量大、交通繁忙。车站分为4层, 开挖深度35 m, 其中地下1层和2层为车站大厅, 地下3层为1号线区域, 地下4层为2号线区域。土层分布情况从上至下依次为杂填土、黏性土、砂性土呈二元结构。由于地下水分分布情况不明朗, 大面积开挖过程易出现流砂安全隐患, 需做好基坑的支护, 保证开挖的安全。现有4种支护方案分别为: A.挂网喷射混凝土+内支撑、B.地下连续墙+内支撑、C.排桩+预应力锚索、D.复合土钉墙+预应力锚索, 运用构建的模型对4种支护方案的选择提供决策。

### 3.1 初始数据规范化处理

由于深基坑支护方案定性指标与定量指标同时存在, 利用式(8)、(9)、(10)对指标做规范化处理, 消除不同量纲的影响, 同时确定最优方案, 见表2。

### 3.2 基于区间有序加权算子指标权重的确定

邀请5个地铁深基坑支护领域的专家, 根据表1采用0~1打分法对指标隶属度重要性进行判断, 为描述指标的模糊性和不确定性, 打分值采用区间的形式。

以一级评价指标为例, 利用区间数打分法对其重要性进行打分, 见表3。

表 2 指标规范化结果

指标	方案 A	方案 B	方案 C	方案 D	最优方案
A1	0.72	0.56	0.65	0.74	0.53
A2	0.68	0.64	0.72	0.66	0.64
A3	0.84	0.53	0.58	0.72	0.53
A4	0.78	0.55	0.58	0.65	0.55
A5	0.72	0.52	0.71	0.68	0.52
A6	0.65	0.75	0.73	0.85	0.85
A7	0.66	0.68	0.65	0.74	0.68
A8	0.72	0.64	0.63	0.54	0.54
A9	0.67	0.65	0.73	0.64	0.62
A10	0.85	0.82	0.86	0.74	0.85
A11	0.80	0.81	0.76	0.67	0.81
A12	0.82	0.78	0.80	0.79	0.82
A13	0.76	0.78	0.87	0.83	0.87
A14	0.57	0.56	0.73	0.75	0.75

以指标 B4 环境影响为例计算权值,首先参考文献[13]对指标 B4 的打分结果按照从小到大的顺序重新排序,得到新的决策数据  $\bar{v}_4$ :

表 3 一级指标决策数据

一级指标	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5
安全性 B1	[0.4 0.5]	[0.3 0.4]	[0.5 0.6]	[0.3 0.5]	[0.4 0.6]
经济性 B2	[0.6 0.8]	[0.5 0.7]	[0.7 0.8]	[0.8 0.9]	[0.6 0.7]
技术可行性 B3	[0.4 0.5]	[0.4 0.6]	[0.5 0.6]	[0.5 0.7]	[0.7 0.8]
环境影响 B4	[0.2 0.3]	[0.3 0.5]	[0.4 0.5]	[0.5 0.6]	[0.2 0.4]

表 4 关联系数

方案	$\epsilon_{i1}$	$\epsilon_{i2}$	$\epsilon_{i3}$	$\epsilon_{i4}$	$\epsilon_{i5}$	$\epsilon_{i6}$	$\epsilon_{i7}$	$\epsilon_{i8}$	$\epsilon_{i9}$	$\epsilon_{i10}$	$\epsilon_{i11}$	$\epsilon_{i12}$	$\epsilon_{i13}$	$\epsilon_{i14}$
A	0.534	0.433	0.100	0.845	0.642	0.504	0.631	0.554	0.721	0.843	0.621	0.575	0.573	0.468
B	0.932	0.753	0.563	0.854	0.639	0.895	1.000	0.602	0.957	1.000	1.000	0.881	0.753	0.683
C	0.392	0.539	0.648	0.899	0.711	0.631	0.811	0.920	0.769	0.812	0.722	0.949	0.563	0.731
D	0.501	0.629	0.913	0.641	0.680	0.898	0.693	0.559	0.834	0.669	0.550	0.649	0.672	0.716

3.3.2 计算灰色关联度

运用式(13)、(14)计算地铁车站深基坑支护方案灰色关联度,以一级指标经济性下的二级指标为例,计算过程如下:

$R_{A2} = \omega_2 * E_{A2} = (0.413 \quad 0.306 \quad 0.281) \cdot$

$\bar{v}_4 = ([0.2 \ 0.3], [0.2 \ 0.4], [0.3 \ 0.5], [0.4 \ 0.5], [0.5 \ 0.6])$ 。

根据式(3)、(4)求得权向量  $P_4$ :

$P_4 = (0.145, 0.234, 0.312, 0.113, 0.196)$

根据式(5)求得区间下界的绝对权重  $\omega_4^L = 0.314$ , 上界绝对权值  $\omega_4^U = 0.414$ , 利用式(6)和  $\theta$  系数对权重重新集结, 取  $\theta = 0.5$ , 得到指标 B4 的绝对权重  $\omega_4 = 0.364$ 。

同理可得指标 B1、B2、B3 的绝对权重:  $\omega_1 = 0.342, \omega_2 = 0.531, \omega_3 = 0.372$ 。利用式(7)对绝对权重作归一化处理得到一级指标权重:  $W = (0.213, 0.33, 0.231, 0.226)$ 。

同理可得二级指标权重:

$\omega_1 = (0.269, 0.261, 0.258, 0.212)$

$\omega_2 = (0.413, 0.306, 0.281)$

$\omega_3 = (0.264, 0.308, 0.428)$

$\omega_4 = (0.135, 0.237, 0.312, 0.316)$

3.3 灰色关联评价

3.3.1 计算关联系数

利用式(12)计算比较序列与参考序列间的关联系数  $\epsilon_{ik}$ , 结果见表 4。

$$\begin{bmatrix} 0.642 & 0.639 & 0.711 & 0.680 \\ 0.504 & 0.895 & 0.631 & 0.898 \\ 0.631 & 1.000 & 0.811 & 0.693 \end{bmatrix} = (0.597 \quad 0.819 \quad 0.715 \quad 0.750)$$

同理可得:

$$R_{A1} = \omega_1 \cdot E_{A1} = (0.462 \quad 0.774 \quad 0.604 \quad 0.670)$$

$$R_{A3} = \omega_3 \cdot E_{A3} = (0.729 \quad 0.882 \quad 0.827 \quad 0.691)$$

$$R_{A4} = \omega_4 \cdot E_{A4} = (0.399 \quad 0.579 \quad 0.498 \quad 0.438)$$

计算评价目标的关联度:

$$r = W \cdot [R_{A1} \quad R_{A2} \quad R_{A3} \quad R_{A4}] = (0.213 \quad 0.330$$

$$0.231 \quad 0.226) \cdot \begin{bmatrix} 0.462 & 0.774 & 0.604 & 0.670 \\ 0.597 & 0.819 & 0.715 & 0.750 \\ 0.729 & 0.882 & 0.827 & 0.691 \\ 0.399 & 0.579 & 0.498 & 0.438 \end{bmatrix} =$$

$$(0.554 \quad 0.770 \quad 0.668 \quad 0.649)$$

通过灰色关联分析计算可知  $r_A = 0.554$ 、 $r_B = 0.770$ 、 $r_C = 0.668$ 、 $r_D = 0.649$ , 即  $r_A < r_D < r_C < r_B$ 。表明在可供选择的4种地铁车站深基坑支护方案中, 方案B: 地下连续墙+内支撑为最佳, 应当选择该方案作为基坑的支护方案。利用区间有序加权算子求得关联度为:  $r'_A = 0.538$ ,  $r'_B = 0.763$ ,  $r'_C = 0.759$ ,  $r'_D = 0.738$ , 即  $r'_A < r'_D < r'_C < r'_B$ 。与没有引入  $\theta$  系数区间有序加权算子得出的结果一致, 从理论上支持了引入  $\theta$  系数后方法的可行性。但是区间有序加权算子得出的结果未能较大程度区分不同方案的差异性, 当出现多种方案时难以为决策者提供有力的决策支撑, 引入  $\theta$  系数后区间有序加权算子则能较好地对方案做区分度处理, 便于决策者做出科学的判断。鉴于紫荆山地铁站位于市中心, 开挖深度大、放坡困难、工期要求紧, 为保证施工过程的安全性和降低噪音, 在实际施工中从支护结构的适用性、安全性两个方面综合考虑, 方案B地下连续墙+内支撑支护方式为最佳, 和其他3种支护方案比较, 该方案前期投入成本较高, 在经济上不占据优势。但在后期, 地下连续墙可作为车站地下室结构的一部分, 极大地提高了支护的利用率, 在一定程度上节约了建设成本, 综合方案的安全性、适用性、经济性等, 该工程采用地下连续墙+内支撑支护方式, 与实际施工情况一致, 验证了模型的科学性。

## 4 结论

(1) 从地铁车站深基坑支护方案的安全性、经济性、技术可行性以及环境影响4个方面系统、科学地构建评价指标体系, 并对郑州地铁1号线紫荆山车站深基坑支护方案进行评价, 认为地下连续墙+内支撑为

最优的支护方案。

(2) 运用区间数有序加权算子(IOWA)并结合  $\theta$  函数对权重作进一步的调整, 极好地消除了专家打分极值性带来的不利影响且实现指标的变权计算, 同时充分考虑决策信息的模糊不确定性, 克服了评价的主观性。根据部分指标的灰色性, 利用灰色关联对不同的方案对比分析, 通过分析比较方案与参考方案的几何关系, 得出最优的支护方案, 保证了决策的合理性。

(3) 通过构建基于有序加权算子的地铁车站深基坑支护方案灰色评价模型, 为地铁车站深基坑支护方案的评价提供一种新的方法, 但缺乏对支护过程中监测和安全管理的研究, 为后续研究提供新的方向点。

## 参考文献:

- [1] 祝磊, 彭建和, 刘金龙. 地铁车站深基坑建设对邻近建筑物安全的影响评估[J]. 中国安全生产科学技术, 2015(12).
- [2] 王曙光. 基坑支护事故处理经验录[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [3] 贺炜, 潘星羽, 张军, 等. 河心洲地铁车站深基坑开挖监测及环境影响分析[J]. 岩土工程学报, 2013(S1).
- [4] 兰守奇, 张庆贺. 基于模糊理论的深基坑施工期风险评估[J]. 岩土工程学报, 2009(4).
- [5] L. Bjerrum, O. Eide. Stability of Struttred Excavation in City[J]. Geotechnique. 1996, 6(1): 32-47.
- [6] 王梦恕. 北京地铁浅埋暗挖施工法[J]. 岩石力学与工程学报, 1989(1).
- [7] 郑向红. 北京地铁深基坑工程对周围环境的影响分析[J]. 铁道标准设计, 2008(12).
- [8] 俞建霖, 夏霄, 张伟, 等. 砂性土地基深基坑工程对周边环境的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2014(S2).
- [9] 戴佑斌, 张尚根, 周早生, 等. 模糊一致矩阵理论在地铁深基坑支护方案优选中的应用[J]. 岩土工程学报, 2005(10).
- [10] 刘章军, 雷进生. 地铁深基坑支护方案优选的模糊概率方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2007(6).
- [11] 吴翔天, 丁烈勇, 周诚, 等. 武汉地铁车站深基坑支护结构选型研究[J]. 土木工程与管理学报, 2011(1).
- [12] 何亚伯, 秦伟, 汪洋. 基于组合赋权和灰色 Euclid 理论的深基坑支护方案优选[J]. 中国安全生产科学技术, 2016(3).
- [13] 刘健, 刘思峰. 属性值为区间数的多属性决策对象排序研究[J]. 中国管理科学, 2010(3).