

地下围岩稳定分级的灰色关联优化模型

李俊宏¹,何淑媛¹,袁文秀²

(1. 河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098;2. 江苏省水利工程规划办公室,江苏 南京 210029)

摘要 根据灰色关联分析原理,从多维空间概念出发,将距离平方和最小扩展为广义加权距离最小,通过求条件极值建立了地下工程围岩稳定分级的灰色关联优化模型,并应用于工程实例中。计算结果表明,地下围岩稳定分级的灰色关联优化模型正确可靠,具有一定的实际使用价值。

关键词 灰色关联 优化模型 地下工程 围岩稳定分级 灰关联度

中图分类号 :TU457 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2007)06-0021-03

Grey correlation optimal model for stability classification of underground adjoining rocks//LI Jun-hong¹, HE Shu-yuan¹, YUAN Wen-xiu² (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Provincial Water Conservancy Engineering Planning Office, Nanjing 210029, China)

Abstract :According to the principle of grey correlation analysis and multi-dimension spatial concept, a grey correlation optimal model for stability classification of adjoining rocks was established through the extension of minimum distance square to generalized minimum weighted distance. The application of the model to practical projects shows that the model is correct and reliable, and it is of certain value of practical use.

Key words :grey correlation ; optimal model ; underground engineering ; stability classification of adjoining rock ; grey correlation degree

地下工程围岩稳定性评判的准确性关系到工程投资的合理性及后期运行的安全性,而围岩稳定性影响因素甚多,如岩性、岩体构造、岩体结构、水文地质条件、地应力水平以及洞室的空间几何关系等。到目前为止,国内外就水利水电工程的岩体分级已有数十种。尤其是模糊数学方法^[1-3],为解决围岩稳定性这类受多因素控制的模式判别问题提供了有力工具,是一种可行的方法。但用模糊数学方法分级时,必须建立隶属函数和权函数,由于隶属函数和权函数的建立具有一定的主观随意性和信息丢失或放大的现象,并且由隶属函数构造的判断矩阵必须尽可能地反映地质、试验及工程条件的岩体力学参数,因此,用模糊数学方法分级具有一定的局限性。为此,从信息论角度出发,将地下工程围岩看作是一个灰色系统,按照多维空间概念,将距离平方和最小扩展为广义加权距离最小,通过求条件极值建立灰色关联优化模型,弱化人为主观因素的影响。

1 灰色关联优化模型及算法

1.1 灰色关联优化模型

设有 m 个影响因素的 n 个样本组成参考矩阵:

$$X = (x_{ij}) \tag{1}$$

式中: x_{ij} 为样本 j 对指标 i 的特征值; $i = 1, 2, \cdots, m$;
 $j = 1, 2, \cdots, n$ 。

设 n 个样本依据 m 个指标按 c 个类别进行分级,其各类别组成的比较矩阵为

$$S = (s_{ih}) \tag{2}$$

式中: s_{ih} 为类别 h 对指标 i 的规格化数; $h = 1, 2, \cdots, c$;
 $i = 1, 2, \cdots, m$ 。

样本 j 与类别 h 之间的第 i 个分级指标的绝对差为

$$\Delta_{hj}(i) = |x_{ij} - s_{ih}| \tag{3}$$

则 x_{ij} 与 s_{ih} 第 i 个分级指标的近似程度用关联系数来表示^[4-5]:

$$\xi_{ij}(x_{ij}, s_{ih}) = \frac{\min_h \min_i \Delta_{hj}(i) + \rho \max_h \max_i \Delta_{hj}(i)}{\Delta_{hj}(i) + \rho \max_h \max_i \Delta_{hj}(i)} \tag{4}$$

式中: $\min_h \min_i \Delta_{hj}(i) = \min_h \{ \min_i \{ \Delta_{hj}(1), \Delta_{hj}(2), \cdots, \Delta_{hj}(m) \} \}$ 为两级最小差;
 $\max_h \max_i \Delta_{hj}(i) = \max_h \{ \max_i \{ \Delta_{hj}(1), \Delta_{hj}(2), \cdots, \Delta_{hj}(m) \} \}$ 为两级最大差;
 $\rho (0 < \rho < 1)$ 为分辨系数,一般 $\rho = 0.5$ 时具有较高的

分辨率。

考虑到不同指标对分级的影响不同,引入指标权重向量:

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_m) = (w_i) \quad \sum_{i=1}^m w_i = 1 \tag{5}$$

则样本 j 与类别 h 的关联度矩阵为

$$R = (r_{hj}(x_{ij}, s_{ih})) = \left(\sum_{i=1}^m w_i \xi_{ij}(x_{ij}, s_{ih}) \right) \tag{6}$$

灰关联度根据序列曲线几何形状的相似程度来判断曲线联系是否紧密,曲线越接近,相应序列之间的灰关联度就越大,反之就越小。从多维空间概念出发,灰关联度又可以理解为各比较数列的点与参考数列确定的点之间的相对空间距离(灰关联度越大,相对空间距离就越小,反之亦然),将相对空间距离扩展为广义加权距离,广义加权距离越小,灰关联度就越大,只要求得最小的广义加权距离,就能找到最大灰关联度。

以样本 j 与类别 h 间的差异程度 u_{hj} 为权的加权距离:

$$d(x_{ij}, s_{ih}) = u_{hj} \sqrt[p]{\sum_{i=1}^m [w_i \xi_{ij}(x_{ij}, s_{ih})]^p} \quad \sum_{h=1}^c u_{hj} = 1 \tag{7}$$

式中 p 为距离参数, $p=1$ 为海明距离, $p=2$ 为欧式距离。

通过最优化求解,可得到灰色关联优化理论模型^[6]:

$$u_{hj} = \frac{1}{\sum_{k=1}^c \sqrt[p]{\left[\frac{\sum_{i=1}^m [w_i \xi_{ij}(x_{ij}, s_{ih})]^p}{\sum_{i=1}^m [w_i \xi_{ij}(x_{ij}, s_{ik})]^p} \right]^2}} \tag{8}$$

1.2 计算步骤

a. 确定样本 j 对指标 i 的参考矩阵 $X = (x_{ij})$, 以及 m 个指标按 c 个类别的比较矩阵 $S = (s_{ih})$ 和指标权重向量 W 。

b. 矩阵初始化处理。在灰关联分析中,各因素的量纲往往不同,数量级相差可能很大,为此需要对原始数据进行初始化处理,使之在数量上比较接近,这样分析更加合理,误差较小。初始化一般有两种方法:归一化处理和均匀化处理。

归一化处理:

$$x_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_j(x_{ij})}$$

$$s_{ih} = \frac{s_{ih}}{\max_j(x_{ij})}$$

均匀化处理:

$$x_{ij} = \frac{nx_{ij}}{\sum_{j=1}^n (x_{ij})} \quad s_{ih} = \frac{ns_{ih}}{\sum_{j=1}^n (x_{ij})}$$

c. 按式(3)计算样本与类别之间的绝对差矩阵。

d. 按式(6)计算样本与类别之间的关联度矩阵

$$R = (r_{hj}(x_{ij}, s_{ih}))。$$

e. 按式(8)计算样本与类别之间的差异程度矩

阵 $U = (u_{hj}), h = 1, 2, \dots, c, j = 1, 2, \dots, n$ 。对第 j 种样本来讲, $\min_{h=1, 2, \dots, c} \{u_{hj}\}$ 即是最优解。

2 工程实例

某地下洞室围岩根据地质勘测和工程施工资料,取单轴抗压强度、岩石质量指标 RQD 、结构面强度系数、每 10 m 长的涌水量、岩体强度应力比和最大地震烈度 6 项指标作为分级的主要考虑因素。其中,结构面强度系数用来描述岩壁强度的大小,岩体强度应力比反映初始地应力对围岩稳定的影响,岩体强度应力比按式(9)确定:

$$S_m = \frac{\sigma_R}{\sigma_{\max}} \tag{9}$$

式中: σ_R 为岩块单轴抗压强度; $\sigma_{\max}$ 为垂直洞轴平面内的最大天然主应力。

具体的分级标准和分级指标值分别见表 1 和表 2。

表 1 围岩稳定性分级标准

类 别	单轴抗压强度/MPa	$RQD/\%$	结构面强度系数	每 10 m 长的涌水量/(L·min ⁻¹)	岩体强度应力比	最大地震烈度/度
I	> 225	90 ~ 100	1 ~ 0.8	< 0.1	8 ~ 4	< 3
II	112 ~ 225	75 ~ 90	0.8 ~ 0.6	0.1 ~ 10	4 ~ 3	3 ~ 5
III	56 ~ 112	50 ~ 75	0.6 ~ 0.4	10 ~ 25	3 ~ 2	5 ~ 7
IV	23 ~ 56	25 ~ 50	0.4 ~ 0.2	25 ~ 125	2 ~ 1	7 ~ 8
V	< 23	< 25	< 0.2	> 125	< 1	> 8

表 2 围岩稳定性分级指标值

类 别	单轴抗压强度/MPa	$RQD/\%$	结构面强度系数	每 10 m 长的涌水量/(L·min ⁻¹)	岩体强度应力比	最大地震烈度/度
1	155	82	0.35	20	2	6
2	140	68	0.35	20	2	6
3	40	40	0.35	20	2	6
4	155	87	0.50	10	3	6
5	140	76	0.50	10	3	6
6	155	76	0.50	10	3	6
7	140	72	0.50	10	3	6
8	86	51	0.50	10	3	6
9	40	52	0.50	10	3	6
10	140	68	0.30	20	2	6
11	80	28	0.30	20	2	6
12	40	51	0.30	20	2	6

将岩体稳定性分级指标值组成参考矩阵 $X = (x_{ij})$, 围岩稳定性分级标准值组成比较矩阵 $S =$

(s_{ih}) ,对原始矩阵进行均匀化处理,形成新的参考矩阵 $X = (x_{ij})$ 和比较矩阵 $S = (s_{ih})$:

$$S = \begin{bmatrix} 2.309 & 1.482 & 0.739 & 0.347 & 0.123 \\ 1.638 & 1.422 & 1.078 & 0.647 & 0.216 \\ 1.989 & 1.364 & 0.852 & 0.568 & 0.227 \\ 1.800 & 1.400 & 1.000 & 0.600 & 0.200 \\ 2.143 & 1.250 & 0.893 & 0.536 & 0.179 \\ 0.268 & 0.714 & 1.071 & 1.339 & 1.607 \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} 1.363 & 1.231 & 0.352 & 1.363 & 1.231 & 1.363 & 1.231 & 0.756 & 0.352 & 1.231 & 0.704 & 0.352 \\ 1.414 & 1.172 & 0.690 & 1.500 & 1.310 & 1.310 & 1.241 & 0.879 & 0.897 & 1.172 & 0.483 & 0.879 \\ 0.700 & 0.700 & 0.700 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 0.600 & 0.600 & 0.600 \\ 0.322 & 0.322 & 0.322 & 0.161 & 0.161 & 0.161 & 0.161 & 0.161 & 0.161 & 0.322 & 0.322 & 0.322 \\ 0.714 & 0.714 & 0.714 & 1.071 & 1.071 & 1.071 & 1.071 & 1.071 & 1.071 & 0.714 & 0.714 & 0.714 \\ 1.071 & 1.071 & 1.071 & 1.071 & 1.071 & 1.071 & 1.071 & 1.071 & 1.071 & 1.071 & 1.071 & 1.071 \end{bmatrix}$$

权重按照层次分析法确定,即首先根据经验,同时借鉴已有的相关研究成果^[7-8]初步确定出评价因素间的相对重要性,然后再征求相关专家的意见和意见,调整、确定出评价因素间的相对重要性,对其进行标度,在此基础上构建判断矩阵,利用方根法求出判断矩阵的最大特征值和其对应的单位特征向量(即权向量),最后对判断矩阵进行一致性检验,检验权重是否合理,若不合理则调整判断矩阵,直到具有满意的一致性为止,具有满意一致性的判断矩阵所确定的权向量就是所求权重。权重向量为 $W = (0.40, 0.25, 0.10, 0.10, 0.10, 0.05)$,分辨系数 $\rho = 0.5$ 。大量计算表明, ρ 的不同取值不影响最后的分级结果,取 $\rho = 1$,按式(3)~(8)进行计算,得到样本与类别之间的关联度矩阵 R 和差异程度矩阵 U 。对第 j 种样本来讲, $\min u_{hj} (h = 1, 2, \cdots, c)$ 即是最优解,在差异程度矩阵 U 中用 $\underline{u}$ 来表示,围岩稳定性分级结果见表 3。为比较灰色关联优化模型的分级结果,将模糊综合评判分级的结果也列于表 3。从表 3 可以看出,两种方法的分级结果是完全一致的,说明了灰色关联优化模型的正确性。

$$R = \begin{bmatrix} 0.693 & 0.655 & 0.558 & 0.736 & 0.701 & 0.714 & 0.694 & 0.628 & 0.606 & 0.653 & 0.564 & 0.569 \\ 0.891 & 0.830 & 0.672 & 0.918 & 0.888 & 0.914 & 0.879 & 0.771 & 0.732 & 0.827 & 0.690 & 0.684 \\ 0.812 & 0.860 & 0.841 & 0.821 & 0.859 & 0.841 & 0.868 & 0.952 & 0.882 & 0.856 & 0.889 & 0.858 \\ 0.699 & 0.731 & 0.932 & 0.670 & 0.697 & 0.684 & 0.702 & 0.798 & 0.875 & 0.738 & 0.847 & 0.912 \\ 0.584 & 0.608 & 0.761 & 0.570 & 0.591 & 0.580 & 0.595 & 0.669 & 0.730 & 0.612 & 0.729 & 0.748 \end{bmatrix}$$
$$U = \begin{bmatrix} 0.211 & 0.240 & 0.330 & 0.188 & 0.212 & 0.203 & 0.217 & 0.278 & 0.301 & 0.243 & 0.321 & 0.323 \\ 0.128 & 0.150 & 0.228 & 0.121 & 0.132 & 0.124 & 0.136 & 0.184 & 0.206 & 0.151 & 0.215 & 0.223 \\ 0.154 & 0.139 & 0.145 & 0.151 & 0.141 & 0.146 & 0.139 & 0.121 & 0.142 & 0.141 & 0.129 & 0.142 \\ 0.208 & 0.193 & 0.118 & 0.227 & 0.215 & 0.221 & 0.212 & 0.172 & 0.144 & 0.190 & 0.142 & 0.126 \\ 0.298 & 0.278 & 0.178 & 0.313 & 0.299 & 0.307 & 0.296 & 0.245 & 0.207 & 0.276 & 0.192 & 0.187 \end{bmatrix}$$

表 3 围岩稳定性分级结果

序号	灰色关联优化模型分级	模糊综合评判分级	序号	灰色关联优化模型分级	模糊综合评判分级
1	II	II	7	II	II
2	III	III	8	III	III
3	IV	IV	9	III	III
4	II	II	10	III	III
5	II	II	11	III	III
6	II	II	12	IV	IV

3 结 论

灰关联度根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密,曲线越接近,相应序列之间的灰关联度就越大,从多维空间概念出发,将相对空间距离扩展为广义加权距离,通过求条件极值建立灰色关联优化模型,并应用于地下工程围岩稳定分级中,计算结果表明模型正确可靠,具有广泛的应用前景。

参考文献:

[1] 邵中勇,冯德顺.公路隧洞围岩稳定性模糊评判方法[J].武汉理工大学学报 交通科学与工程版,2004,28(5):771-774.
[2] 韩爱果,聂德新.某电站地下厂房围岩质量综合分级[J].地质灾害与环境保护,2002,13(2):75-78.
[3] 苏永华,赵明华,刘晓明.岩体分类的多元相对模糊评判法[J].岩石力学与工程学报,2006,25(5):1049-1055.
[4] 邓聚龙.灰色系统理论教程[M].武汉:华中理工大学出版社,1990.
[5] 鲍学英,唐勇军.基于灰色关联分析的施工方案优选研究[J].建筑管理现代化,2006(2):37-39.
[6] 冯玉国.灰色优化理论模型在地下工程围岩稳定性分级中的应用[J].岩土工程学报,1996,18(3):62-66.
[7] 王广月,刘健.围岩稳定性的模糊物元评价方法[J].水利学报,2004(5):20-24.
[8] 许传华,任青文.地下工程围岩稳定性的模糊综合评判法[J].岩石力学与工程学报,2004,23(11):1852-1855.

(收稿日期 2006-10-08 编辑 骆超)

·简讯·

韩国青松抽水蓄能电站竣工投产

位于韩国庆尚北道青松郡的青松抽水蓄能电站有 2 台机组,装机容量为 60 万 kW。该电站的特点是实施远距离遥控操作,操作系统设在庆尚北道的另一座抽水蓄能电站——三浪津抽水蓄能电站内,两者相距约 130 km,从而大幅度降低了运营成本。青松抽水蓄能电站是目前世界上最大的远程遥控抽水蓄能电站,该电站由韩国西部发电公司修建,2000 年 9 月开工,现已建成投产。

(吴 高供稿)