

# 帷幕注浆工程质量模糊综合评价模型

李元松<sup>1</sup>, 吴春华<sup>2</sup>, 段鑫<sup>1</sup>, 李洋<sup>1</sup>, 董开源<sup>2</sup>

1. 武汉工程大学资源土木工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 黄石市矿山安全检测检验所, 湖北 黄石 435000

**摘要:**帷幕注浆工程质量验收指标与工作过程具有模糊性与不确定性, 现有的单因素评价或多因素混合评价都难以给出定量结论, 提出运用模糊综合评价方法。基于模糊决策理论, 尝试将帷幕注浆工程质量的影响因素进行分类并量化, 根据专家经验与影响因子的特点, 选用对应的隶属函数, 应用层次分析法确定权重系数, 建立帷幕注浆工程质量的定量评价模型, 并将该模型用于大冶矿带3个典型岩溶矿床帷幕注浆堵水工程的质量评价与鉴定, 结果与抽水试验和后期运营状态具有高度的一致性。

**关键词:**岩溶矿床; 地下水防治; 帷幕注浆; 工程质量; 评价模型

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2015.08.001

## 0 引言

帷幕注浆堵水方法因其既能有效堵水, 又能保护地下水资源、防止地面塌陷等地质环境灾害, 符合国家安全、环保、可持续发展战略, 应用越来越广泛, 尤其是深埋矿产资源的开发。我国大多数富水岩溶矿床的开采, 均或多或少使用了帷幕注浆技术进行地下涌水的封堵与阻隔<sup>[1-4]</sup>。然而, 帷幕注浆工程具有典型的隐蔽工程特点, 其工程施工质量检查和效果评价一直是困扰工程界的难题, 现有的单因素评价或多因素混合评价都难以给出定量结论<sup>[5-7]</sup>。笔者认为, 工程质量的好坏具有一定的模糊性, 影响工程质量的因素也具有模糊性。模糊数学可以不考虑这些因素的作用过程, 而根据已有工程质量评估的专家经验, 量化各影响因素的权重, 通过模糊运算得出定量评价结果。本文试图应用模糊综合评价理论, 结合多个溶岩矿山帷幕堵水工程质量检测评定实践, 建立帷幕注浆工程质量综合评价模型, 以供类似注浆工程质量检测鉴定时参考。

## 1 模糊综合评价基本理论

### 1.1 基本步骤

**a. 构造影响因素集**  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ , 评语集  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 。对集  $X$  中的因素  $x_i (i=1, 2, \dots, m)$  做单因素评判, 确定  $x_i$  对  $y_j (j=1, 2, \dots, n)$  的隶属度  $r_{ij}$ , 由此得出第  $i$  个因素  $x_i$  的单因素评判集  $r_i = (r_{i1},$

$r_{i2}, \dots, r_{in})$ 。

**b. 确定隶属函数。**根据工程经验, 确定相应的隶属度计算方法及相应公式。

**c. 根据隶属函数构建模糊评判矩阵  $R$ 。**

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

$R$  为论域  $X$  到论域  $Y$  的一个模糊关系,  $r_{ij}$  表示因素对抉择等级  $y_j$  的隶属度。

**d. 确定权重向量  $W$**  主要有层次分析法(AHP)和统计方法<sup>[8-9]</sup>。记为  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ ,  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ ,  $w_i \geq 0$ 。本文采用第一种方法, 根据判断矩阵, 求出  $R$  的最大特征根所对应的特征向量, 即权重向量  $W^{[10]}$ 。

**e. 一致性检验。**由矩阵  $R$  求出的  $W$  是否合理, 还需按式(1)进行随机一致性检验。

$$CR = CI / RI \quad (1)$$

式(1)中:  $CR$  为一致性比率;  $CI$  为一致性指标; 由式(2)计算:

$$CI = \frac{1}{m-1} (\lambda_{\max} - m) \quad (2)$$

其中:  $\lambda_{\max}$  为判断矩阵的最大特征根, 其值按式(3)计算:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{(RA)_i}{a_i} \quad (3)$$

式(3)中,  $m$  为  $R$  的阶数,  $RI$  为  $R$  的平均随机一致性指标, 由随机试验确定,  $RI$  取值见表 1<sup>[11]</sup>.

表 1 层次分析法的平均随机一致性指标值

Table 1 Mean random consistency index of AHP

| $M$  | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $RI$ | 0.58 | 0.90 | 1.12 | 1.24 | 1.32 | 1.41 | 1.45 | 1.49 | 1.51 |

当  $CR < 0.1$  时, 即认为  $R$  的一致性良好, 说明权数分配是合理的; 否则, 就需重构  $R$ , 直至取得一致性为止.

f. 进行模糊综合评判. 考虑权值分配, 则综合评判模型为:

$$\begin{aligned} \underline{B} &= \underline{W} \cdot \underline{R} = \{b_1, b_2, \dots, b_n\} \\ b_j &= (w_1 \otimes r_{1j}) * (w_2 \otimes r_{2j}) * \dots * (w_m \otimes r_{mj}), (j=1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)中  $\otimes$  为模糊“与”运算,  $*$  为模糊“或”运算.  $B$  称为评语集  $Y$  上的模糊子集,  $b_j (j=1, 2, \dots, n)$  为等级对  $y_j$  综合评判所得模糊子集  $B$  的隶属度.

## 1.2 模糊合成运算模型

模糊合成运算理论方法很多, 实际应用经常采用如下几种模型.

### a. $M(\wedge, V)$ 模型.

在模型  $M(\otimes, *)$  中用取小运算  $\wedge$  代替  $\otimes$ , 用取大运算  $V$  代替  $*$ , 则

$$b_j = \bigvee_{i=1}^m (w_i \wedge r_{ij}) = \max [\min (w_1, r_{1j}), \min (w_2, r_{2j}), \dots, \min (w_m, r_{mj})], (j=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

这种模型的特点是运算简单, 不足方面是只考虑了主因素, 忽略次要信息.

### b. $M(\cdot, V)$ 模型.

即用乘法  $\cdot$  代替  $\otimes$ , 用取大运算  $V$  代替  $*$ , 则

$$b_j = \bigvee_{i=1}^m (w_i r_{ij}) = \max (w_1 r_{1j}, w_2 r_{2j}, \dots, w_m r_{mj}), (j=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

这是  $M(\wedge, V)$  模型的改进型, 它与  $M(\wedge, V)$  的区别是用乘法代替“ $\wedge$ ”, 其优点是它兼顾了所有因素, 乘法运算不丢失信息.

### c. $M(\wedge, \otimes)$ 模型.

$$b_j = \otimes_{i=1}^m (w_i \wedge r_{ij}) = \min [1, \sum_{i=1}^m \min (w_i r_{ij})], (j=1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

与  $M(\wedge, V)$  接近, 但比  $M(\wedge, V)$  更为精细, 由此得到的评判结果在一定程度上反映了非主要指标.

### d. $M(\cdot, \oplus)$ 模型.

即用乘法  $\cdot$  代替  $\otimes$ , 用算子  $\oplus$  代替  $*$ , 则

$$b_j = \oplus_{i=1}^m w_i r_{ij} = \min (1, \sum_{i=1}^m w_i r_{ij}), (j=1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

该模型的特点是以权重大小均衡兼顾所有因素, 体现出整体综合特性.

### e. 模型 $V-M(\cdot, +)$

即用普通实数乘法  $\cdot$  代替  $\otimes$ , 用有界算子  $+$  代替  $*$ , 则

$$b_j = \sum_{i=1}^m w_i r_{ij}, (j=1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

运算时  $w_i$  必须归一化. 该模型的特点是既考虑了所有因素的影响, 同时保留了单因素评判的全部信息.

## 2 帷幕工程质量评价模型

### 2.1 评价因子的选择

影响帷幕注浆工程质量的因素众多, 包括水文地质因素、设计因素、注浆材料、施工工艺和施工管理等. 如果不加区分, 问题就变得相当复杂. 只有抓住主要矛盾, 放下次要因素, 问题才得以简化. 据此, 选择工程质量评估中常见且有效的因素作为评价因子:

a. 质量保证资料的完整性. 根据相关质量检验标准, 资料的完整程度分为三个等级, 评定标准:

- 1) 所用材料质量检验结果;
- 2) 材料配比和试验数据;
- 3) 隐蔽工程施工的详细记录;
- 4) 质量控制指标的试验记录及试验报告;
- 5) 施工过程中异常情况记录及其影响分析;
- 6) 发生质量事故, 经处理后, 达到设计要求的

认可证明材料等.

上述 1-6 项完整者为 I 级, 优; 1-2 项不完整者为 II 级, 合格; 缺项或 3 项及以上资料不全者划为 III 级, 不合格.

### b. 帷幕设计参数.

- 1) 帷幕轴线地址;
- 2) 帷幕型式;
- 3) 幕墙厚度;
- 4) 扩散半径;
- 5) 钻孔间距.

上述 1-5 项符合设计要求者为 I 级, 优; 1 项不符合设计要求者为 II 级, 合格; 2 项及以上不符合设计要求者为 III 级, 不合格.

### c. 注浆施工.

单孔质量: 1) 钻孔质量; 2) 注浆材料、配比及浓度变换; 3) 注浆压力; 4) 结束标准. 其中 4 项均符合设计要求者为 I 级; 1 项及以上不符合设计要求者为 II 级.

整体质量: 90% 钻孔质量为 I 级者, 优良, 80%

钻孔质量为 I 级者评为合格,否则不合格。

#### d. 压水试验.

检查孔压水试验:1) 透水率  $\leq 3 \text{ lu}$  为 I 级; 2) 透水率  $3 \sim 5 \text{ lu}$  为 II 级; 3) 透水率  $> 5 \text{ lu}$  为 III 级。

90% 以上的压水段为 I 级者为优良; 80% 压水段为 I 级者, 或 90% 以上压水段为 II 级或以上者为合格, 否则不合格。

e. 钻孔岩芯 R.Q.D 值 R.Q.D 值大于 75% 为 I 级; 50%~75% 为 II 级; 30%~50% 为 III 级; 小于 30% 为 IV 级。

所有检查钻孔 R.Q.D 值, 评为 I 级超过总数 90% 的为优良; 70% 为 I 级者, 或 80% 以上钻孔 R.Q.D 值为 II 级者为合格, 否则不合格。

#### f. 结石体质量.

1) 结石体抗压强度  $\geq 10 \text{ MPa}$  为 I 级, 否则为 II 级; 2) 渗透系数  $\leq 10^{-7} \text{ m/d}$  为 I 级, 否则为 II 级。

90% 结石体为 I 级者判为优良, 80% 结石体为 I 级者判为合格, 否则不合格。

#### g. CT 检测试验.

1) 无大的断层、破碎带未被充填为 I 级; 否则为 II 级。

2) 无大的溶洞、或主径流带未被充填密实者为 I 级; 否则为 II 级。

上述两项均为 I 级者定为 I 级, 优良, 1 项评为 I 级者, 定合格, 否则不合格。

#### h. 抽水试验.

1) 堵水率达到设计要求者定为 I 级, 否则定为 II 级。

2) 抽水试验达到稳定流条件者定为 I 级, 否则定为 II 级。

上述两项均为 I 级者定为 I 级, 优良; 1 项评为 I 级者定为合格, 否则不合格。

#### i. 水位观测.

1) 水位变化无异常者定为 I 级, 否则定为 II 级。

2) 幕内外落差显著者定为 I 级, 否则定为 II 级。

上述两项均为 I 级者定为 I 级, 优; 1 项评为 I 级者定为合格, 否则不合格。

因此, 选取上述 9 种因素作为评价因子, 建立评价因子模糊集合:

$$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9\}$$

工程质量分为优良、合格、不合格 3 个等级, 建立模糊集合:

$$Y = \{y_1, y_2, y_3\}$$

## 2.2 隶属度的确定

对于离散型变量隶属度的取值, 目前还没有普遍认可的确定方法, 主要根据专家经验, 结合工程情况评定, 可参考表 2 取值。

表 2 注浆工程质量相关因素隶属度

Table 2 Membership degree of factors related to grouting

| 评价因子    | 状态类别 | 隶属度 $\mu$ |      |      |
|---------|------|-----------|------|------|
|         |      | 优良        | 合格   | 不合格  |
| 质量      | I    | 0.7       | 0.25 | 0.05 |
| 保证      | II   | 0.2       | 0.6  | 0.2  |
| 资料      | III  | 0.0       | 0.2  | 0.8  |
| 帷幕设计    | I    | 0.3       | 0.7  | 0.0  |
|         | II   | 0.0       | 0.5  | 0.5  |
| 帷幕施工    | I    | 0.5       | 0.45 | 0.05 |
|         | II   | 0.15      | 0.6  | 0.25 |
| 检查孔压水试验 | I    | 0.5       | 0.4  | 0.1  |
|         | II   | 0.2       | 0.4  | 0.4  |
| 结石体质量   | I    | 0.5       | 0.4  | 0.2  |
|         | II   | 0.3       | 0.6  | 0.1  |
| R.Q.D 值 | I    | 0.5       | 0.4  | 0.1  |
|         | II   | 0.4       | 0.5  | 0.1  |
| CT 检测   | III  | 0.1       | 0.3  | 0.6  |
|         | I    | 0.5       | 0.4  | 0.1  |
| 抽水试验    | II   | 0.0       | 0.5  | 0.5  |
|         | I    | 0.4       | 0.45 | 0.15 |
| 水位观测    | II   | 0.0       | 0.5  | 0.5  |
|         | I    | 0.5       | 0.4  | 0.1  |

## 2.3 权重的确定

确定评价因素的权重有多种方法. 由于工程环境的复杂性和模糊性, 用数学模型确定评价因素的权重较为困难, 有时对工程地质、水文条件和帷幕所处的环境地质条件与施工技术条件分析不足而过分地依赖数学模型, 确定的权重可能不尽合理, 相反, 根据专家的经验判断, 其结论更为可靠. 本文评价主要 AHP 法确定权重, 是多位专家的经验判断结合数学模型, 通过运算确定权重, 是一种较为合理、可行的分析方法. 它强调人的思维判断在决策中的作用, 通过一定的模式规范决策思维过程, 适用于定性与定量因素相结合的工程决策问题. 帷幕注浆工程质量评价的层次分析法确定权重的矩阵打分见表 3.

## 2.4 综合评价模型

依据上述模糊综合评价理论, 结合多个帷幕注浆专家的工程经验, 得出如下帷幕注浆工程的评价参数与评价步骤:

表 3 评价因子矩阵打分表  
Table 3 Evaluation factor matrix

| 评价因子    | 资料  | 帷幕设计 | 施工  | 压水  | 结石体质量 | R.Q.D 值 | CT 检测 | 抽水  | 水位观测 | $A_i$ | 一致性检验                  |
|---------|-----|------|-----|-----|-------|---------|-------|-----|------|-------|------------------------|
| 资料      | 1   | 1/5  | 1/8 | 1/7 | 1/2   | 1/4     | 1/3   | 1/9 | 1/6  | 0.023 |                        |
| 帷幕设计    | 5/1 | 1    | 5/8 | 5/7 | 5/2   | 5/4     | 5/3   | 5/9 | 5/6  | 0.112 |                        |
| 施工      | 8/1 | 8/5  | 1   | 8/7 | 8/2   | 8/4     | 8/3   | 8/9 | 8/6  | 0.180 |                        |
| 压水      | 7/1 | 7/5  | 7/8 | 1   | 7/2   | 7/4     | 7/3   | 7/9 | 7/6  | 0.158 | $CI=0.01$              |
| 结石体质量   | 2/1 | 2/5  | 2/8 | 2/7 | 1     | 2/4     | 2/3   | 2/9 | 2/6  | 0.045 | $RI=1.45$              |
| R.Q.D 值 | 4/1 | 4/5  | 4/8 | 4/7 | 4/2   | 1       | 4/3   | 4/9 | 4/6  | 0.089 | $CR=CI/RI=0.0069<0.01$ |
| CT 检测   | 3/1 | 4/5  | 3/8 | 3/7 | 3/2   | 3/4     | 1     | 3/9 | 3/6  | 0.068 | 满足                     |
| 抽水      | 9/1 | 9/5  | 9/8 | 9/7 | 9/2   | 9/4     | 9/3   | 1   | 9/6  | 0.189 |                        |
| 水位观测    | 6/1 | 6/5  | 6/8 | 6/7 | 6/2   | 6/4     | 6/3   | 6/9 | 1    | 0.135 |                        |

- a.评语集={优良,合格,不合格};

b.因子集={资料,帷幕设计,施工质量,压水试验,结石体质量,R.Q.D 值,CT 检测,抽水试验,水位观测};

c.权重集合  $A=\{0.023,0.112,0.180,0.158,0.045,0.089,0.068,0.189,0.135\}$ ;

d.确定因素的隶属度,建立评判矩阵  $R$ ;

e.进行模糊运算,得出评判集  $B=A \cdot R$
- f.根据最大隶属度准则对帷幕注浆工程质量进行模糊综合评判.
- ### 3 工程应用

作者有幸参与了湖北大冶矿带几个典型岩溶矿床帷幕注浆工程质量验收评价,详细信息将另文介绍,收集到的数据按上述方法进行整理,结果如表 4 所示.

表 4 几个典型砂卡岩矿床帷幕注浆工程质量数据

Table 4 Grouting curtain engineering quality information of typical Karst water-filled deposits

| 评价因子 | 资料  | 帷幕设计 | 施工质量 | 压水试验 | 结石体质量 | R.Q.D 值 | CT 检测 | 抽水   | 水位观测 |
|------|-----|------|------|------|-------|---------|-------|------|------|
| 大红山  | I 级 | I 级  | I 级  | I 级  | II 级  | I 级     | II 级  | I 级  | I 级  |
| 鲤泥湖  | I 级 | I 级  | I 级  | I 级  | II 级  | I 级     | II 级  | II 级 | II 级 |
| 大志山  | I 级 | I 级  | II 级 | II 级 | I 级   | II 级    | II 级  | I 级  | I 级  |

根据表 4 和表 2 选取评价因子的隶属度,形成的关系矩阵分别为:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.25 & 0.05 \\ 0.3 & 0.7 & 0.0 \\ 0.50 & 0.45 & 0.05 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 \\ 0.3 & 0.6 & 0.1 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 \\ 0.0 & 0.5 & 0.5 \\ 0.4 & 0.45 & 0.15 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 \end{bmatrix}$$
$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.25 & 0.05 \\ 0.3 & 0.7 & 0.0 \\ 0.5 & 0.45 & 0.05 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 \\ 0.3 & 0.6 & 0.1 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 \\ 0.0 & 0.5 & 0.5 \\ 0.0 & 0.5 & 0.5 \\ 0.0 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.25 & 0.05 \\ 0.3 & 0.7 & 0.0 \\ 0.15 & 0.6 & 0.25 \\ 0.2 & 0.4 & 0.4 \\ 0.4 & 0.5 & 0.1 \\ 0.0 & 0.5 & 0.5 \\ 0.0 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 \end{bmatrix}$$

按上述模型  $V$  计算质量评价集  $B$  分别为:

大红山:  $B_1=(0.419,0.464,0.115)$ ; 鲤泥湖:  $B_2=(0.277,0.487,0.235)$ ; 大志山:  $B_3=(0.288,0.486,0.225)$ .

由最大隶属度准则,可以判断上述 3 个矿山帷幕注浆工程质量均为合格,相对而言,优良+合格的偏移值,大红山矿=0.883,鲤泥湖=0.764,大志山矿=0.774,大红山矿注浆效果更好. 根据后期的生产排水量,3 个矿山的平均帷幕堵水率分别达到 75%,71%和 72.5%,说明采用模糊评价模型能较为客观地反映注浆工程的整体质量和综合效果.

## 4 结 语

a. 模糊综合评价模型既能考虑专家的工程经验,又能通过数学推演给出定量结论,比较适合帷幕注浆工程这类涉及因素众多,难以定量分析的质量验收评价与鉴定问题,3个岩溶矿山大型帷幕注浆工程质量评价鉴定的实践表明,模糊综合评价模型是成功的。

b. 对于工程中经常出现的离散型变量,目前仍没有合适的方法确定其隶属度,专家确定法依赖专家的经验与判断力,需进一步的理论研究。

## 致 谢

感谢大志山矿业公司、鲤泥湖矿业公司、大红山矿业公司及中南基础工程公司提供项目经费支持及宝贵的原始资料!

## 参考文献:

- [1] 高建军,祝瑞勤,徐大宽.岩溶充水矿床帷幕注浆堵水技术研究[J].水文地质工程地质,2007(5):123-127.  
GAO Jianjun,ZHU Ruiqin,XU Dakuan. Re-discussion on plugging technique with curtain grouting in karst water filled ore deposits [J]. Hydrogeology&Engineering Geology, 2007(5):123-127.(in chinese)
- [2] 祝世平,王伏春,曾夏生.大红山矿帷幕注浆治水工程及其评价[J].金属矿山,2007(9):79-83.  
ZHU Shiping, WANG Fuchun, ZENG Xiasheng. Groundwater blockage by grouting curtain in Dahongshan mine and its evaluation[J].Metal Mine,2007(9):79-83.(in Chinese)
- [3] 韩贵雷,于同超,刘殿凤,等. 矿山帷幕注浆方案研究及堵水效果综合分析[J].矿业研究与开发,2010, 30(3):95-98.  
HAN Guilei,YU Tongchao,LIU Dianfeng,et al. Study on curtain grouting scheme and comprehensive analysis on its water plugging effect in zhongguan ironmine [J]. Mining R&D,2010,30(6):95-98.(in Chinese)
- [4] 陈静,王军. 岩溶矿区帷幕注浆截流效果的抽水试验法评价[J].采矿技术,2008,8(6):53-55.  
CHEN Jing, WANG Jun.The effect evaluation of water prevention after curtain grouting engineering in karst mine area using pumping test[J]. Mining Technology, 2008, 8(6): 53-55.(in Chinese)
- [5] 杨米加,陈明雄,贺永年. 注浆理论的研究现状与发展方向[J].岩石力学与工程学报,2001,20(6):839-841.  
YANG Mijia,CHEN Minxiong,HE Yongnian. Current research state of grouting technology and its development direction in future [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2001,20 (6):839-841.(in Chinese)
- [6] 张志沛,刘旭,徐汉民,等. 煤矿采空区注浆工程质量检测的试验研究 [J]. 岩土工程学报,2005, 27 (5): 604-606.  
ZHANG Zhipei, LIU Xu, XU Hanmin. Experimental studies on grouting quality examination of gob of coalmine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27 (5):604-606. (in Chinese)
- [7] 李术才,张霄. 地下工程涌突水注浆止水浆液扩散机制和封堵方法研究 [J]. 岩石力学与工程学报,2011, 30(12): 2378-2395.  
LI Shucui,ZHANG Xiao. Research on mechanism of grout diffusion of dynamic grouting and plugging method in water inrush of underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12): 2378-2395.(in Chinese)
- [8] 张国立,张辉,孔倩.模糊数学基础及应用[M].北京:化学工业出版社,2011:9.  
ZHANG Guli, ZHONG Hui,KONG Qian.Fuzzy mathematics foundation and its application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011:9.(in Chinese)
- [9] 李元松,陈文峰,李新平.基于模糊神经网络的边坡稳定性评价方法[J].武汉理工大学学报,2013, 35(1): 113-118.  
LI Yuansong,CHEN Wenfeng,LI Xinping.Satbility assessment of rock slope based on Fuzzy neural network [J].Journal of Wuhan University of Technology,2013, 35(1):113-118.(in Chinese)
- [10] 吴茂民. 边坡失稳灾害的模糊综合评估技术及其应用[D].福州:福州大学,2005.  
WU Maomin.Fuzzy synthetic assessment on disaster of slope instability and its application [D]. Fuzhou : Fuzhou University,2005.(in Chinese)
- [11] 黄建文,李建林,周宜红.基于 AHP 的模糊评判法在边坡稳定性评价中的应用[J].岩石力学与工程学报,2007,7 (增刊):2627-2632.  
HUANG Jianwen,LI Jianlin,ZHOU Yihong.Application of Fuzzy analysis based on AHP to slope stability evaluation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,7(suopl.):2627-2632.(in Chinese)