

# 熵度量法在地下工程围岩稳定性分级中的应用\*

严 薇, 林 娴, 周朝长

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:** 围岩稳定性受众多因素制约, 其分类属于非确定性决策问题。本文将风险评价理论及信息论中的熵和熵权的概念应用于地下工程的风险评价中, 提出了围岩稳定性的风险评价分级方法。根据岩体力学现有的研究资料和国家规范, 建立了影响围岩稳定性的因素指标体系, 确定了各因素指标在不同稳定性下对应的标准数和规格化数, 提出了熵度量法围岩稳定性安全评价结果 R 对应的分级表, 以实现对围岩安全性的综合评价。最后利用实际工程数据对此方法进行了分析验证。

**关键词:** 地下工程; 熵度量法; 风险评价

**中图分类号:** TU457 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006 - 7329 (2007) 01 - 0075 - 03

## Application of Entropy Measurement to Stability of Rock in Underground Engineering

YAN Wei, L N Xian, ZHOU Chao - zhang

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** The rocks stability is restricted by a lot of factors. Its classification belongs to non - detem inacy decision - making problem. The risk evaluation theory and Entropy & Entropy Weight concept were applied to underground engineering risk assessment. The classification method of risk assessment in the underground engineering is presented. According to now available research information and national standards of rock mechanics, a system of factors affecting the rocks stability, every factor's standard number and normalized number under different stability states are studied. An R - classification form of risk assessment is proposed by using entropy method for the overall evaluation of rocks stability. Finally, the actual engineering data were used to verify the method.

**Keywords:** underground engineering; entropy measurement; risk assessment

地下工程由于具有隐蔽性、复杂性和不确定性等特点, 施工过程中会遇到很多困难。在地下巷道开挖中, 围岩稳定性的分级为支护设计和施工管理提供科学依据。因此, 对围岩稳定性进行科学的分级在实际工程应用中有着重要的意义。围岩的稳定性受众多因素制约, 对其分级亦属于一个综合因素的非确定性决策问题, 传统的数学方法很难对其进行一个准确的分级。如果从系统安全的角度加以评价, 采用“风险性评价”的方法, 能较好地解决这一问题。

风险分析可以显示分析对象的风险度, 增强决策的针对性, 其常见的方法是用目标函数概率分布的数字特征对风险进行量化描述。传统的风险度量法采用评价指标的均值、方差及其概率分布函数描述风险, 随

机性大, 不具有唯一性和全面性, 仅为大概估计。基于熵度量法的评价指标权重的确定, 考虑了各评价指标综合效应对权重的影响, 以此建立的风险评价方法, 使得决策更趋于可靠。且结果仅为一个数值, 较为直观。故本文尝试采用熵作为不确定性的度量, 引入地下工程风险分析中, 对围岩稳定性进行分级。

### 1 熵度量法的概念<sup>[6]</sup>

#### 1.1 基本概念

Shannon (1948) 提出了熵 (Entropy) 的概念, 其代表着关于“不确定性”的一种度量, 之后 Jaynes (1957) 提出了描述这种不确定性的数学方法即极大熵原理。

熵就是系统不确定性的度量, 可用熵度量风险:

\* 收稿日期: 2006 - 08 - 10

基金项目: 重庆市建委“重庆地区深基坑支护结构施工安全方法体系研究”(城科字 2005 第 (21) 号)

作者简介: 严薇 (1964 - ), 女, 贵州遵义人, 副教授, 博士, 主要从事工程项目管理研究。

对于连续型随机变量：

$$R = - \int \ln[f_i(x)] JdF(x) \quad (1)$$

对于离散型随机变量：

$$R = - \sum_{j=1}^n [ \ln P(x_{ij}) ] JP(x_{ij}) \quad (2)$$

式中： $R$  为由熵度量的风险值， $x$  为随机变量， $F$  和  $P$  分别为连续型随机变量和离散型随机变量的概率， $f$  为连续型随机变量的概率密度函数。

在有  $m$  个评价指标， $n$  个被评价对象的评估问题中，简称  $(m, n)$  评价问题，第  $i$  个评价指标的熵定义为：

$$H_i = - k \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}, i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

式中： $f_{ij} = r_{ij} / \sum_{j=1}^n r_{ij}$ ； $k = \frac{1}{\ln n}$ 。并假定，当  $f_{ij} = 0$  时， $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$ 。也可以选择  $k$  使得  $0 < H_i < 1$ ，这种标准化在进行比较时是必要的。

在  $(m, n)$  评价问题中，第  $i$  个指标的熵权定义为：

$$w_i = (1 - H_i) / (m - \sum_{i=1}^m H_i) \quad (4)$$

### 1.2 熵度量法的概念

熵度量法主要基于以下思路：进行多指标评价时，首先由专家调查法或检查表法确定各个指标可能熵  $H$  和熵权  $w_i$ ，进而求出风险矩阵  $R$ ，建立风险分析的熵度量模型。

在  $(m, n)$  评价问题中，评价问题的风险值可按下式计算：

$$R = \sum_{i=1}^m w_i H_i \quad (5)$$

式中： $w_i$  为第  $i$  个评价指标对评价对象的熵权， $w_i$  的归一数。 $H_i$  为第  $i$  个评价指标的熵， $m$  为评价指标个数。

## 2 熵度量法在地下工程围岩稳定性分级中的应用

### 2.1 围岩稳定性影响因素<sup>[1~5,7]</sup>

结合现行常见的分类标准，本文将地下工程的围岩稳定性划分为 5 个等级，即稳定性好（）、基本稳定（）、稳定性差（）、不稳定（）、极不稳定（）。

影响岩体稳定性的因素主要有：岩体本身的力学性质、岩体结构特征、开挖过程中的一些人为因素和地下水、岩体的风化程度等。由于这些因素对围岩稳定性的影响程度不同，综合许多研究资料，并结合《水电地下工程分类研究报告》和相关的国家规范，选取以下 6 个主要因素来划分围岩等级，将 6 个基本影响因素具体化后，制成单因素指标（见表 1）。

表 1 围岩质量的单因素指标

项 目		稳定性好 ( )	基本稳定 ( )	稳定性差 ( )	不稳定 ( )	极不稳定 ( )
体积节理 数 $J_v$ / (条/ $m^3$ )	标准数	0~3	3~10	10~20	20~30	>30
	规格化数	1~0.900	0.900~0.666	0.666~0.333	0.333~0	0
单轴饱和 抗压强度 $R$ /MPa	标准数	200~120	120~60	60~30	30~15	<15
	规格化数	1~0.60	0.60~0.30	0.30~0.15	0.15~0.075	0.075~0
完整性 系 数 $K_v$	标准数	1~0.75	0.75~0.45	0.45~0.30	0.30~0.20	<0.20
	规格化数	1~0.75	0.75~0.45	0.45~0.30	0.30~0.20	0.20~0
结构面强 度系数 $K_f$	标准数	1~0.80	0.80~0.60	0.60~0.40	0.40~0.20	<0.20
	规格化数	1~0.80	0.80~0.60	0.60~0.40	0.40~0.20	<0.20
地下水 情况	标准数	0~2.0	2.0~5.0	5.0~6.7	6.7~7.7	7.7~8.0
	规格化数	1~0.75	0.75~0.375	0.375~0.163	0.163~0.375	0.375~0
围岩强度 应力比 $S$	标准数	8~4	4~3	3~2	2~1	<1
	规格化数	1~0.5	0.5~0.375	0.375~0.25	0.25~0.125	0.125~0

### 2.2 围岩稳定性分级的熵度量法

运用熵度量法对围岩的等级进行评价时，根据经验或者系统分析的结果，把评价项目及周围环境潜在危险综合起来，进行检查和评定。因为在不同的项目环境中，各个指标对项目的影响程度不同。故在评价时，各指标采用“1分制”评分，并按照各因素对总体安全评价的重要程度，分别赋予权重系数（对各指标的权重系数做归一化处理）。按各评价指标所得的分值，分别乘以各自的权重系数并求和，就可以得到围岩安全评价的结果值，即：

$$R = \sum_{i=1}^m w_i H_i \quad (6)$$

式中：（1） $H_i$  的分值可以由实际工程数据对应表 1 中的规格化数按线性插值法直接确定， $0 < H_i < 1$ 。（2）由公式（4）可得出熵权  $w_i$ ，式中

$$w_i = \frac{1 - H_i}{\sum_{i=1}^m (1 - H_i)} \quad (6)$$

计算出围岩稳定性安全评价结果值  $R$  后，对比地下工程围岩的安全等级表 2，可得出所求围岩稳定性等级。

表 2 围岩稳定性评价安全等级表

$R$ 值	1~0.8	0.8~0.65	0.45~0.65	0.2~0.45	0~0.2
安全等级	稳定性好	基本稳定	稳定性差	不稳定	极不稳定

## 3 工程应用实例<sup>[8]</sup>

以黄河大柳树电站导流洞稳定性分析为例，坝址位于 F3 和 F7 断层之间，两断层在坝址部位相距 1.5 km，坝址区发育有大柳树倒转背斜，两岸基岩裸露，基

层底层主要为寒屋系中统变质砂岩夹板岩或千枚板岩。地层产状 NE60 ~ 80SE < 40 ~ < 70,左岸褶皱发育段倾向北西。岩体中断层、挤压带、节理、裂缝等构造形迹发育。岩石强度高,岩体完整性较差,以碎裂结构、镶嵌碎裂结构和层状结构为主。根据资料,洞室内各分类参数见表 3。

表 3 导流洞围岩工程分类指标

参数	$J_v / (\text{条} / \text{m}^3)$	$R / \text{MPa}$	$K_v$	$K_f$	*	$S$
指标	18	139.10	0.449	0.56	4.27	33.99
$H_i$	0.40	0.696	0.449	0.56	0.466	1.0
$i$	0.247	0.304	0.227	0.181	0.210	0.0
$j$	0.211	0.260	0.194	0.155	0.180	0.0

以  $J$  为例,对熵度量法中各项进行说明。

1)  $J$  的实测值为 18;  $J$  的标准值为 0 时,该分项的规格化数为 1,  $J$  的标准值大于 30 时,该分项的规格化数为 0。由线性插值得,当  $J = 18$  时的规格化数为 0.40,即  $J$  的熵  $H_j = 0.4$ 。

2)  $J$  的规格化数为 0.40,带入式 (4) 可以求出权重值  $w_j = 0.247$ 。

3) 将  $J$  的权重根据式 (6) 做归一化处理,得到围岩的各评价因素的权重向量  $w_j = 0.211$ 。

类似地,可以求出其余 5 个评价因素,如表 3 所示。

根据式 (5)  $R = \sum_{i=1}^m w_i H_i$ , 计算出该导流洞围岩安全评价结果值  $R = 0.523$ 。根据表 2,危险等级划分为级,属于稳定性差的岩体,安全性一般。评价结果与文献一致。

## 4 结论

1) 熵度量法可以有效的反映各个风险因素对于围岩稳定性的综合效应,且基于模糊数学理论的评价指标权重的确定方法,比不考虑权重或者等权重的评价结果更安全,是一种可以信赖、值得推广的方法。

2) 尽管围岩的稳定性受多种因素制约,难以准确预测,但是如果能够逐一掌握各个影响因素与围岩稳定的关系,就不难使用风险评价等方法对其风险性作出初步估计,从而达到为围岩分级,为实际工程服务的功效。

## 参考文献:

- [1] 毛儒. 隧道工程风险评估 [J] 隧道建设, 2003, 23 (2): 1 - 3.
- [2] 陶晓南. 隧道工程中的风险及其分担 [J] 铁道建筑, 2001, (10): 39 - 41.
- [3] 陈龙, 黄宏伟. 城市软土盾构隧道施工对环境影响风险分析与评估 [J] 现代隧道工程, 2004: 364 - 369.
- [4] 钟登华, 张建设. 隧洞施工通风系统事故树分析 [J] 工业安全与环境, 2002, 28 (6): 42 - 45.
- [5] 黄宏伟, 陈桂香. 风险管理在降低地铁造价中的作用 [J] 现代隧道技术, 2003, 40 (5): 1 - 6.
- [6] 李俊伟, 黄宏伟. 熵度量法在地下工程风险分析中的应用初探 [J] 地下空间与工程学报, 2005, 1 (6): 925 - 928.
- [7] 张少夏, 黄宏伟. 影响隧道施工工期的风险分析 [J] 地下空间与工程学报, 2005, 1 (6): 935 - 939.
- [8] 杨志和, 王永生. 黄河大柳树水利枢纽工程地下洞群围岩稳定性 [J] 水利电力工程设计, 2002, 21 (2): 25 - 28.