

# 基于组合赋权—改进云模型的边坡稳定性评价方法

崔涛<sup>1</sup>, 郑淑芬<sup>2\*</sup>

(1.湖南华罡规划设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410076; 2.湖南有色金属职业技术学院)

**摘要:** 针对边坡稳定性评价过程中的随机性和模糊性,改进传统云模型和引入主客观组合赋权法,开发了基于组合赋权—改进云模型的边坡稳定性评价方法。首先选取坡度、黏聚力、岩体基本质量指标、日最大降雨量等8个评价因子,将边坡稳定性分为4个等级,从而构建评价因子等级划分标准,然后应用改进的云模型得到每个评价因子隶属于每个稳定性等级的确定度,接着利用层次分析法和熵权法综合得出评价因子的权重,最后对每个因子的确定度进行加权平均,得到边坡隶属于4个等级的综合确定度,根据确定度最大原则,判定边坡稳定性级别。以湖南省某改扩建公路边坡评价为例,应用该文提出的方法进行评价,取得了良好的效果。

**关键词:** 边坡工程; 稳定性评价; 组合赋权法; 云模型

## 1 引言

中国经济社会快速发展,基础设施建设如火如荼,但是在建设和使用中不断有边坡失稳灾害的发生,造成严重的生命财产损失,因此,在进行公路等基础设施建设、边坡设计和边坡加固处理之前,迫切需要快速估计边坡的稳定性。

开发一种边坡稳定性评价方法极具挑战性,因为

评价过程涉及许多几何和物理变量,充满不确定性,同时还要求快速、准确,这些都增加了边坡稳定性评价的难度。然而可靠和准确的边坡稳定性评价可以识别滑坡易发区域,确定适当的支护结构,因此,许多研究人员已经尝试开发估算边坡稳定性的方法,其主要可分为理论分析法、数值模拟法和基于人工智能(AI)的方法。理论分析法主要为极限平衡法,仅适用于具有简单几何形状和小区域的边坡;数值模拟法在理论上更加现实和严谨,随着商用有限元软件的快速迭代取得

前,该系统已经应用于超过10 000 km的各等级公路设计中,反响良好。该方法能有效保证设计数据和图表的一致性,也保证了横断面设计图及相关成果的正确性。

## 5 结语

基于错误消息和提醒消息管理功能的横断面设计方法,是公路横断面计算机辅助设计中的一个重要创新和进步。随着JSL—路线专家系统的推广和应用,该方法更加广泛应用于工程设计中。通过软件系统自动化的消息管理功能,减少了人工参与的工作量,消除

了由于人工操作产生的疏忽和错误,保证了横断面设计成果的正确性,提高了横断面设计图及相关设计成果的文件质量。

## 参考文献:

- [1] 武汉金思路科技发展有限公司.JSL—路线专家系统用户手册[Z],2014.
- [2] 唐韦其.基于自定义实体技术的公路路基横断面设计[D].中南大学硕士学位论文,2009.
- [3] 李东.基于图论的道路横断面设计研究与软件开发[D].华中科技大学硕士学位论文,2011.
- [4] 西安经天交通工程技术研究所.纬地道路交通CAD系统v6.0教程[Z],2015.

收稿日期:2019-05-19(修改稿)

作者简介:崔涛,男,硕士,工程师.E-mail:278361160@qq.com

\*通信作者:郑淑芬,女,硕士,讲师.E-mail:309958931@qq.com

了相当大的进步,但主要缺点是其输入参数需要使用原位测量进行反分析,这在许多情况下是不可行的;近年来,人工智能(AI)技术用于区域边坡分析并取得了大量成果。例如,将物元理论与关联函数结合的可拓模型;D-S 证据理论结合正态隶属度,支持向量机,BP 神经网络的耦合模型;距离判别赋权模型;实现定性概念与定量数据集转换并在处理不确定性问题上具有强大优势的云模型。

基于以上研究现状,该文选取边坡坡高、坡度、黏聚力、内摩擦角、岩体基本质量指标、岩体结构特征、日最大降雨量和工程活动影响度 8 个因子用于边坡稳定性评价,采用主客观组合赋权法确定各因子的综合权重;针对边坡评价过程中的不确定性,对传统云模型进行改进,修正云模型的 3 个数字特征的计算公式,将正向正态云模型的边缘部分由正态分布改进为确定度恒等于 1 的均匀分布,更加准确地描述实际情况,采用改进云模型解决稳定性评价中的不确定性,从而建立起基于主客观组合赋权—改进云模型的边坡稳定性评价方法。最后,将该方法应用于某改扩建公路的边坡稳定性分析,以验证该方法的应用效果。

## 2 云模型理论

云模型是实现用语言值表示的某个定性概念与其定量表示之间双向转换的认知模型,以反映自然语言中概念的不确定性,其相关定义如下:

设  $U$  为一个用精确数值表示的定量论域, $C$  为  $U$  上的一个定性概念,若定量值  $x \in U$ ,且  $x$  为定性概念  $C$  的一次随机实现, $x$  对  $C$  的确定度  $\mu(x) \in [0, 1]$  为有稳定倾向的随机数:

$$\mu: U \rightarrow [0, 1], \forall x \in U, x \rightarrow \mu(x) \quad (1)$$

则  $x$  在论域  $U$  上的分布称为云,每一个  $x$  称为一个云滴。

云模型用期望  $Ex$ 、熵  $En$ 、超熵  $He$  3 个数字特征来整体表征定性概念  $C$ ,期望  $Ex$  是云滴在论域  $U$  上分布的数学期望;熵  $En$  是定性概念的不确定性度量,一方面反映云滴的离散程度;另一方面决定论域空间中可被概念接受的云滴的确定度;超熵  $He$  是熵的不确定度量。

正向正态云是一种基于正态分布最常用的云模型,实现从用数字特征表示的定性概念到定量数据集的转换,其相关定义如下:

设  $C(Ex, En, He)$  为  $U$  上的定性概念,若定量值

$x(x \in U)$  为定性概念  $C$  的一次随机实现,  $x \sim N[Ex, (En')^2]$ ;其中,  $En' \sim N(En, He^2)$ ;进而,  $x$  对  $C$  的确定度满足:

$$\mu(x) = \exp\left[-\frac{(x - Ex)^2}{2(En')^2}\right] \quad (2)$$

则  $x$  在论域  $U$  上的分布称为正态云。云的实质是定量数据集,实现对定性概念的定量描述。

正向正态云发生器算法如下:

输入: 3 个数字特征  $(Ex, En, He)$ , 生成云滴的个数  $N$ 。

输出:  $\text{drop}(x_i, \mu_i), i = 1, 2, \dots, N$ 。

算法步骤:

(1) 产生一个期望值为  $En$ , 方差为  $He^2$  的正态随机数  $En'_i$ 。

(2) 产生一个期望值为  $Ex$ , 方差为  $(En'_i)^2$  的正态随机数  $x_i$ 。

(3) 计算  $\mu_i(x) = \exp\left[-\frac{(x_i - Ex)^2}{2(En'_i)^2}\right]$ 。

(4) 令  $\text{drop}(x_i, \mu_i)$  为一个云滴,它是该云表示的定性概念在数量上的一次具体实现,其中  $x_i$  为定性概念在论域中该次对应的数值,  $\mu_i$  为  $x_i$  属于这个定性概念的程度量度。

(5) 重复步骤(1)到(4),直到产生  $N$  个云滴为止。

根据上述算法可生成如图 1 所示的正态云模型,该云模型的期望  $Ex$  取 27.5,熵  $En$  取 2.123,超熵  $He$  取 0.1,云滴个数  $N$  取 10 000。

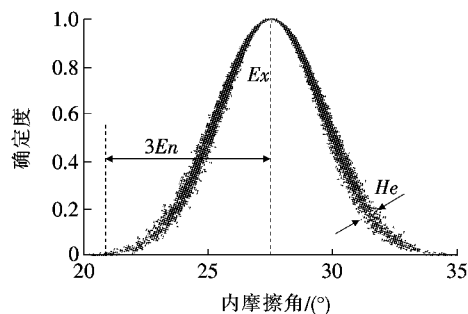


图 1 定性概念内摩擦角为 27.5° 左右的云模型

## 3 基于改进云模型边坡稳定性评价

### 3.1 边坡稳定性评价因子及其等级划分标准

边坡评价因子的选取及其稳定性等级划分标准是评价过程的重要组成部分,对最后的评价结果影响极大。该文根据边坡方面的研究文献,选取边坡坡高、坡度、黏聚力、内摩擦角、岩体基本质量指标、岩体结构特

征、日最大降雨量和工程活动影响度 8 个因子用于边坡稳定性评价,并将稳定性等级划分为 4 级,依次为Ⅰ级低度危险、Ⅱ级中度危险、Ⅲ级高度危险和Ⅳ级极度危险。具体的等级划分标准见表 1。

3.2 云模型数字特征确定及云生成

云模型用 3 个数字特征期望  $Ex$ 、熵  $En$ 、超熵  $He$  来表征定性概念,在确定了评价因子等级划分标准之后,生成与定性概念相对应的云还需要确定这 3 个数字特征。该文参考相关文献,并作进一步改进,按下述方法确定边坡评价因子某一等级下的数字特征:

$$Ex = (C_{\min} + C_{\max}) / 2 \tag{3}$$

式中: $C_{\min}$ 、 $C_{\max}$  分别为对应等级区间的上下限边界值,对于单边界限的情况,如  $(-\infty, C_{\max}]$  或  $[C_{\min}, +\infty)$ ,依据指标实测值的上、下限确定缺省边界。

在  $Ex$  确定之后,熵  $En$  的确定可由式(2)推导得

出,因为式(2)中的  $En' \sim N(En, He^2)$  且  $He$  的值较小,所以  $En'$  可由  $En$  替代,又因为当某一评价因子的值为某一等级区间的上下限边界值时,该评价因子同时隶属相邻等级,即对相邻等级的确定度都为 0.5,所以得到下式:

$$\mu(C_{\max}) = \exp\left[-\frac{(C_{\max} - Ex)^2}{2 En^2}\right] = 0.5 \tag{4}$$

代入  $Ex$  化简得到:

$$En = (C_{\max} - C_{\min}) / 2.355 \tag{5}$$

超熵  $He$  可以将指标值  $x$  的随机性约束弱化为某种“泛正态分布”,是熵  $En$  的不确定性度量,所以可以根据  $En$  的大小给  $He$  取一个合适的常数, $En$  值大者对应较大的  $He$  值,一般  $0.01 \leq He \leq 0.1$ 。

根据表 1 和上述计算方法,可得各评价因子隶属各等级稳定性云模型的数字特征,具体见表 2。

表 1 评价因子等级划分标准

稳定性等级	边坡坡高/m	边坡坡度/(°)	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	岩体基本质量指标/MPa	岩体结构特征/MPa	日最大降雨量/mm	工程活动影响度
Ⅰ(低度危险)	<30	<30	>0.12	>30	>500	>75	0~40	0~0.25
Ⅱ(中度危险)	30~45	30~45	0.12~0.08	30~25	500~400	75~50	40~80	0.25~0.50
Ⅲ(高度危险)	45~60	45~60	0.08~0.05	25~20	400~300	50~30	80~120	0.50~0.75
Ⅳ(极度危险)	>60	>60	<0.05	<20	<300	<30	120~160	0.75~1

表 2 评价因子隶属各等级稳定性云模型的数字特征

评价因子	Ⅰ(低度危险)	Ⅱ(中度危险)	Ⅲ(高度危险)	Ⅳ(极度危险)
边坡坡高	(22.5,6.369,0.06)	(37.5,6.369,0.06)	(52.5,6.369,0.06)	(67.5,6.369,0.06)
边坡坡度	(22.5,6.369,0.06)	(37.5,6.369,0.06)	(52.5,6.369,0.06)	(67.5,6.369,0.06)
黏聚力	(0.160,0.034,0.01)	(0.100,0.017,0.01)	(0.065,0.013,0.01)	(0.025,0.021,0.01)
内摩擦角	(32.5,2.123,0.05)	(27.5,2.123,0.05)	(22.5,2.123,0.05)	(17.5,2.123,0.05)
岩体基本质量指标	(550,42.463,0.1)	(450,42.463,0.1)	(350,42.463,0.1)	(250,42.463,0.1)
岩体结构特征	(85.0,8.493,0.07)	(62.5,10.616,0.07)	(40.0,8.493,0.07)	(20.0,8.493,0.07)
日最大降雨量	(20,16.985,0.08)	(60,16.985,0.08)	(100,16.985,0.08)	(140,16.985,0.08)
工程活动影响度	(0.125,0.106,0.02)	(0.375,0.106,0.02)	(0.625,0.106,0.02)	(0.875,0.106,0.02)

根据表 2 利用正向正态云发生器算法生成各评价因子隶属各等级稳定性的云模型,传统的云模型算法没有探讨在评价因子取值范围两端时的分布情况。根据云模型的定义可知取值范围两端的分布为恒等于 1 的均匀分布,以表示当评价因子的值取最小或最大时,评价因子隶属于最低或最高等级的确定度为 1。

生成各个评价因子隶属于各个稳定性等级的正态云,如图 2 所示。

3.3 确定度计算

某一边坡隶属于各稳定性等级的确定度为综合确定度,由各评价因子隶属于各稳定性等级的确定度加权平均得出,因此在计算综合确定度之前先计算评价因子的确定度。计算公式由式(2)推出:

$$\mu_{ij} = \exp\left[-\frac{(x_i - Ex_{ij})^2}{2 (En'_{ij})^2}\right], (i=1,2,\dots,8; j=1,2,\dots,4) \tag{6}$$

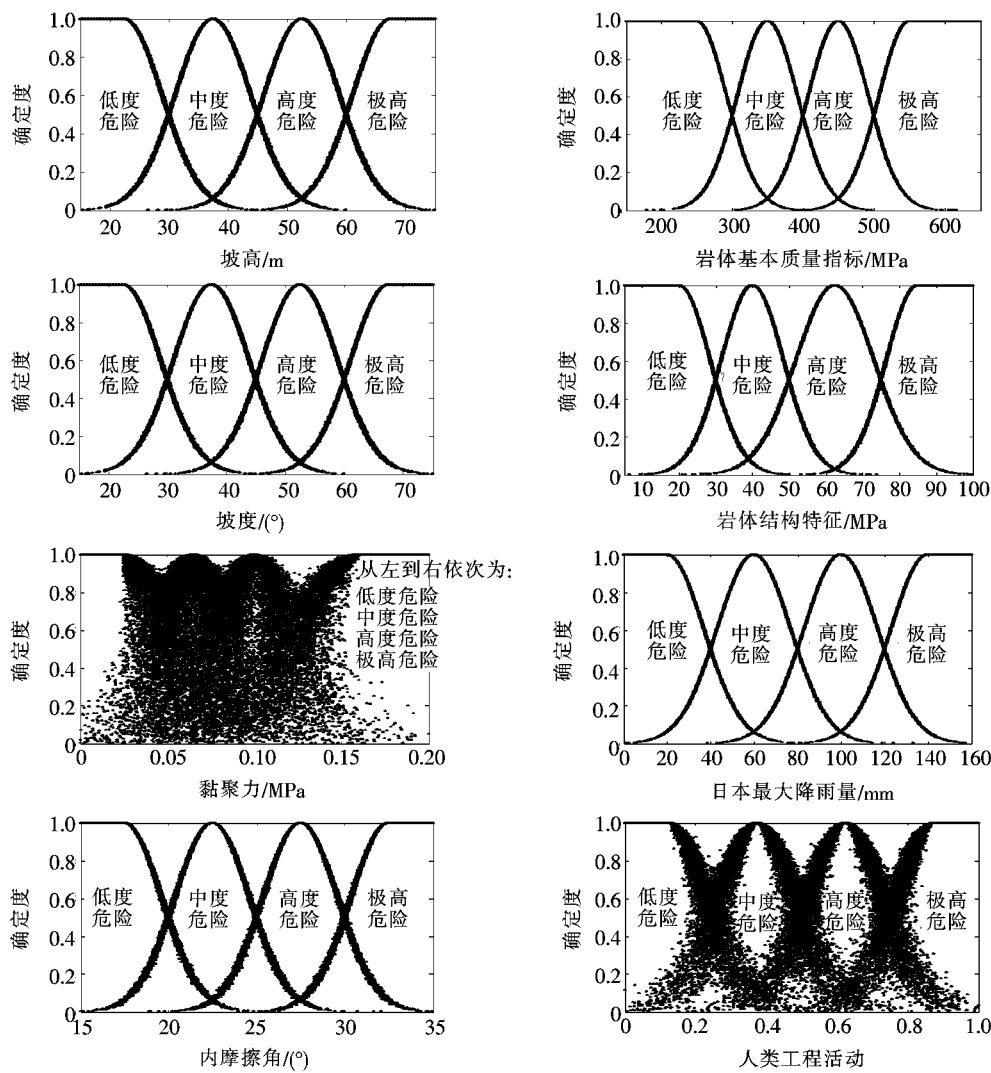


图 2 各评价因子隶属于各个稳定性等级的正态云

式中： $\mu_{ij}$  为第  $i$  个因子隶属于第  $j$  级稳定性的确定度； $x_i$  为第  $i$  个因子的实测值； $Ex_{ij}$  为对应的期望值； $En'_{ij}$  为生成的随机数，且  $En'_{ij} \sim N(Ex_{ij}, He_{ij}^2)$ ，所以  $\mu_{ij}$  为代入大量的  $En'_{ij}$  计算取平均值得到。

3.4 主客观组合赋权法确定评价因子权重

权重的计算方法主要分两大类：主观赋权法和客观赋权法。由于边坡评价因子既有客观实测值又有主观判定值，所以采用主客观组合赋权法最合适，主观赋权法为层次分析法，客观赋权法为熵权法。

该文选取 8 个评价因子，层次分析法用向量  $\eta$  代表每个因子  $c_i$  ( $i=1,2,\dots,8$ ) 的主观权重，详见文献 [17]，该文不再赘述。熵权法用向量  $\delta$  代表每个因子的客观权重，详见文献 [18]。该文采用的主客观赋权组合方法如下：

$$w_i = \frac{\eta_i \times \delta_i}{\sum_{i=1}^8 (\eta_i \times \delta_i)}, (i=1,2,\dots,8) \tag{7}$$

由此可得 8 个评价因子的权重如表 3 所示。

表 3 评价因子权重

边坡坡高	边坡坡度	黏聚力	内摩擦角	岩体基本质量指标	岩体结构特征	日最大降雨量	工程活动影响度
0.070 0	0.074 0	0.125 0	0.121 0	0.116 0	0.153 0	0.195 0	0.146 0

3.5 计算综合确定度并判定边坡等级

在  $w_i$  确定之后，代入因子值可以确定  $\mu_{ij}$ ，至此

可用加权平均由式 (8) 得出某一边坡隶属于 4 个等级的综合确定度，根据综合确定度最大原则判定边坡的

稳定性级别。

$$\mu_j = \sum_{i=1}^8 w_i \mu_{ij}, (j=1,2,\cdots,4)$$
 (8)

4 工程应用

石门县壶瓶山至大京竹公路(壶大公路)地处湖南省最北部湘鄂边境上,由于其地理位置偏远,该公路至今尚未完全拉通,在湘鄂交界处为断头路,已拉通路段仅为四级和等外级,大部分仍为砂石路,路基宽 4~6 m,路面宽 3.5~5 m,局部仅 2 m,且濒临悬崖峭壁,无安全设施。壶大公路改扩建项目起于石门县壶瓶山镇,经江坪至湘鄂两省交界处的土峰垭止,在土峰垭接湖北五峰已建成的三级公路。该项目公路全长 37.873 km,路线总体呈南北走向。改扩建过程中,由于工程地质不良、坡顶堆载和降雨等因素,2018 年 4 月 13 日,K16+640~K16+700 段边坡发生滑坡(图 3)。尽

管滑坡后坡体处于暂时的稳定状态,但由于该地区雨水充沛,坡体在暴雨的不利条件下有重新滑动的迹象。因此,有必要对公路边坡进行稳定性评价,以采取相应的措施保障安全。

根据改扩建项目《壶大公路 K21+340~K21+425 段滑坡详细勘察报告》得到边坡稳定性评价因子实测数据,见表 4。利用该文建立的模型评价壶大公路边坡的稳定性,将表 4 中的数据代入式(6),得到每个评价因子隶属各稳定级别的确定度,计算结果见表 5。然后结合表 3 的评价因子权重,对表 5 的确定度进行加权平均,得到该边坡隶属于各稳定级别的综合确定度,评价结果见表 6。

由表 6 可知:该边坡属于 I 级低度危险的确定度为 0.005 6,II 级中度危险的确定度为 0.116 2,III 级高度危险确定度为 0.373 8,IV 级极度危险确定度为 0.543 9,所以判定该边坡的稳定性等级为极度危险,这与实际情况相符合。

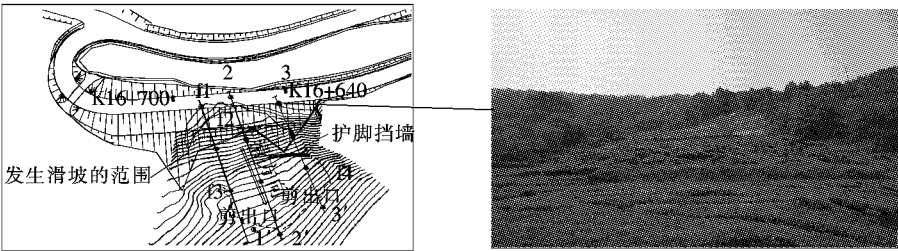


图 3 滑坡全景图

表 4 稳定性评价因子实测值

边坡坡高/m	边坡坡度/(°)	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	岩体基本质量指标/MPa	岩体结构特征/MPa	日最大降雨量/mm	工程活动影响度
37	45	0.007 7	22.5	273.28	28	120.7	0.8

表 5 评价因子隶属各稳定级别的确定度

稳定性等级	边坡坡高	边坡坡度	黏聚力	内摩擦角	岩体基本质量指标	岩体结构特征	日最大降雨量	工程活动影响度	综合确定度
I	0.075 0	0.002 0	0.001 9	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.005 6
II	0.996 9	0.500 0	0.003 9	0.062 5	0.000 2	0.005 1	0.001 7	0.001 9	0.116 2
III	0.051 8	0.500 0	0.023 7	1.000 0	0.195 5	0.368 5	0.475 8	0.256 2	0.373 8
IV	0.000 0	0.002 0	1.000 0	0.062 6	0.860 5	0.641 6	0.524 3	0.759 7	0.543 9

表 6 边坡稳定性评价结果

综合确定度				该文评价结果	实际等级
$\mu_1$ (I 级)	$\mu_2$ (II 级)	$\mu_3$ (III 级)	$\mu_4$ (IV 级)		
0.005 6	0.116 2	0.373 8	0.543 9	IV	IV

## 5 结论

(1) 综合考虑边坡评价中的几何和物理变量,合理地选取了边坡坡高、坡度、黏聚力、内摩擦角、岩体基本质量指标、岩体结构特征、日最大降雨量和工程活动影响度共 8 个因子用于边坡稳定性评价,并将边坡稳定性分为 4 个等级,建立了评价因子等级划分标准。基于主客观组合赋权理论,采用层次分析法和熵权法综合得出评价因子的权重,合理可行。

(2) 针对边坡稳定性评价过程中的不确定性,即模糊性和随机性,采用擅长于处理不确定性,实现定性概念与定量数据转换的不确定人工智能方法——云模型,进行稳定性评价。该文改进了传统云模型,一是将云模型在论域边缘的分布修正为确定度为定值 1 的均匀分布,以满足实际要求;二是根据当某一评价因子的值为某一等级区间的上下限边界值时,该评价因子同时隶属相邻等级的情况,修正了云模型数字特征熵  $En$  的计算公式,以求最终的评价结果更准确。

(3) 建立了基于主客观组合赋权—改进云模型的边坡稳定性评价方法,将该方法应用于湖南某改扩建公路的边坡稳定评价,取得了良好的效果,证明了该文方法的适用性和有效性。

### 参考文献:

- [1] 赵尚毅,郑颖人,邓卫东.用有限元强度折减法进行节理岩质边坡稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2003(2).
- [2] 夏元友,李梅.边坡稳定性评价方法研究及发展趋势[J].岩石力学与工程学报,2002(7).
- [3] 郑颖人,赵尚毅,邓楚键,等.有限元极限分析法发展及其在岩土工程中的应用[J].中国工程科学,2006(12).
- [4] 刘立平,姜德义,郑硕才,等.边坡稳定性分析方法的最新进展[J].重庆大学学报(自然科学版),2000(3).
- [5] 孙川.边坡稳定性数值分析方法研究进展[C].北京力学会第 20 届学术年会论文集,2014.
- [6] 王德洋.基于可靠度理论的边坡稳定性研究进展[C].中国地质学会工程地质专业委员会 2016 年全国工程地质学术年会论文集,2016.
- [7] 黄发明.基于 3S 和人工智能的滑坡位移预测与易发性评价[D].中国地质大学博士学位论文,2017.
- [8] 肖勃,朱禄宏,郭云开,等.山区高速公路顺向高边坡变形预测模型研究[J].中外公路,2018(5).
- [9] 王彪龙,孟凡利,曾超,等.基于自然选择策略的 PSO-BP 神经网络的滑坡可靠性评价方法[J].中外公路,2019(3).
- [10] 李志强,杨涛,王亚平,等.边坡稳定性动态辨识及工程应用[J].中外公路,2018(5).
- [11] 徐金国,戴兴国,闫泽正.D-S 证据理论—正态隶属度的岩土边坡稳定性评价[J/OL].黄金科学技术:1-8[2019-01-12].
- [12] 江婷,沈振中,徐力群,等.基于支持向量机—小波神经网络的边坡位移时序预测模型[J].武汉大学学报(工学版),2017(2).
- [13] 徐哲,胡焕校,邓超.K-means 聚类神经网络在边坡稳定性评价中的应用探究[J].水资源与水工程学报,2017(3).
- [14] 张彪,戴兴国.基于有限区间云模型和距离判别赋权的岩体质量分类模型[J].水文地质工程地质,2017(5).
- [15] 张军,陈征宙,刘登峰.基于云模型的岩质边坡稳定性评估研究[J].水文地质工程地质,2014(6).
- [16] 杨文东,杨栋,谢全敏.基于云模型的边坡风险评估方法及其应用[J].华中科技大学学报(自然科学版),2018(4).
- [17] 李德毅,杜鹑.不确定性人工智能[M].2 版.北京:国防工业出版社,2014.
- [18] 黄润秋.20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J].岩石力学与工程学报,2007(3).
- [19] 王新民,康虔,秦健春,等.层次分析法——可拓学模型在岩质边坡稳定性安全评价中的应用[J].中南大学学报(自然科学版),2013(6).
- [20] 程启月.评测指标权重确定的结构熵权法[J].系统工程理论与实践,2010(7).