

基于 PSO-PP 的边坡稳定性评价

徐 飞¹, 徐卫亚², 刘造保², 刘 康³

(1. 海南省公路勘察设计院, 海南 海口 570206; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;
3. 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 边坡的稳定性评价是一个复杂的不确定系统问题。结合投影寻踪算法、粒子群优化算法和逻辑斯谛曲线函数, 建立了边坡稳定性评价的粒子群优化投影寻踪模型(PSO-PP)。该模型一方面利用粒子群算法(PSO)优化投影指标函数及逻辑斯谛曲线函数参数, 确保了模型参数的准确性; 另一方面利用逻辑斯谛曲线函数建立投影值与经验等级之间的非线性关系。模型的测试结果显示了良好的精度。将该模型应用到雅砻江锦屏一级水电站左岸边坡的稳定性分析中, 实例分析结果与实际状态吻合较好, 表明该模型在边坡稳定性评价中的可行性和有效性。

关键词: 边坡; 稳定性; 投影寻踪; 粒子群; 逻辑斯谛曲线

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)11-1708-06

作者简介: 徐 飞(1983-), 男, 浙江衢州人, 博士, 从事岩土工程稳定性评价研究。E-mail: 496258148@qq.com。

Slope stability evaluation based on PSO-PP

XU Fei¹, XU Wei-ya², LIU Zao-bao², LIU Kang³

(1. Hainan Highway Survey and Design Institute, Haikou 570206, China; 2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Institute of CHECC, Chengdu 610072, China)

Abstract: Evaluation of slope stability is a complex system problem with uncertainties. Based on the projection pursuit (pp), the particle swarm optimization (PSO) and the logistic curve function (LCF), a new model for evaluation of slope stability is developed, which is referred as projection pursuit based on particle swarm optimization (PSO-PP). The model, on the one hand, uses PSO to optimize the projection index function and the parameters of LCF. Thus it will ensure the accuracy of the parameters used in the model. On the other hand, the nonlinear relationship between projection values and empirical grades is established according to LCF. The test results show that the proposed model has good precision. In this study, the evaluation results obtained by applying the developed model to Jinping I Hydropower station on the Yalong River are well consistent with the practical situation. It indicates that the model is feasible and effective in the evaluation of slope stability.

Key words: slope; stability; projection pursuit; particle swarm optimization; logistic curve function

0 引言

边坡的稳定性受到内外多种因素的影响, 且各因素具有模糊性、随机性及可变性等特征, 因此边坡的稳定性评价是一个复杂的不确定系统问题。传统的边坡稳定评价方法有定性分析和定量计算两种。定量计算法的基本思想是将复杂地质情况抽象为数值模型, 通过选择适当的边坡岩土体及结构面参数, 并利用其内在的物理力学关系得到定量的图形化结果。在定量计算中, 由于边界条件往往难以确定, 而给定的岩土体参数也常带有极大的模糊性, 因此其计算结果很难真实的描述边坡的稳定状态。定性分析法是在工程地质勘测的基础上, 通过分析已变形边坡的成因及演化规律来预测待研究边坡的稳定状态及可能的发展趋势, 其实质是将在边坡稳定状态及影响因子等方面积

累的经验应用到类似边坡的稳定性分析中去。定性分析法需要对已有边坡实例和待研究边坡都进行深入的调查分析, 通过类比来判断待研究边坡的稳定状态, 而以往的实施过程一般是由人工完成的, 主观性强且效率低下。新兴统计理论和计算机技术的快速发展为充分利用已有边坡工程经验提供了前提和基础。

近年来, 随着新兴的智能统计学习理论引入到岩土工程领域, 涌现出了一些新的边坡稳定性评价方法, 如灰色聚类评价法^[1]、人工神经网络法^[2-3]、支持向量机分类法^[4-5]等。上述方法从不同侧面反映了边坡稳定状态与其影响因素间的不确定性关系, 然而这些方法

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2008BAB29801); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CX09B-158Z)

收稿日期: 2010-09-21

都存在着一定的缺陷, 如人工神经网络对样本的需求量较大, 而搜集大量边坡稳定状态明确且具有代表性的样本实例是异常困难的。为此, 本文尝试将投影寻踪算法(Projection Pursuit, PP)、粒子群优化算法(Particles Swarm Optimization, PSO)和逻辑斯谛曲线函数(Logistic Curve Function, LCF)相结合, 提出了边坡稳定性评价的粒子群优化投影寻踪模型(Projection Pursuit based on Particle Swarm Optimization, PSO-PP)。在详细介绍模型的原理、算法及步骤后, 本文将其应用到工程实例中进行验证。

1 粒子群优化投影寻踪模型(PSO-PP)

1.1 投影寻踪技术

投影寻踪^[6](PP)技术是用来分析和处理非正态、非线性高维数据的一种探索性分析方法, 其基本思想是将高维数据通过计算机技术投影到低维子空间上, 对于投影到的构形利用投影指标函数来评价投影揭示某种结构的可能性, 并通过极小化投影指标函数来寻求最优的投影值, 最后根据该投影值来分析原高维数据的结构及特征, 或利用投影值与系统输出值之间的散点关系图构造回归模型来对系统进行预测。

1.2 粒子群算法

粒子群算法^[7](PSO)是智能算法的一个重要分支, PSO 采用速度–位置搜索模型, 各粒子代表解空间中的一个候选解, 通过定义适应值函数来评价各粒子的优劣程度。设 $v_i = \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in}\}$ 和 $x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}\}$ 分别表示粒子 i 在 n 维解空间中的速度和位置。PSO 通过迭代寻求最优解: 首先随机的将各粒子初始化, 然后通过动态跟踪个体极值 $f_i = \{f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{in}\}$ 和全局极值 $g = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ 来更新自身的速度和位置。

粒子速度和位置的更新公式如下:

$$v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1r_1(f_{id}^k - x_{id}^k) + c_2r_2(g_d^k - x_{id}^k), \quad (1)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1}. \quad (2)$$

式中 c_1, c_2 为学习因子; r_1, r_2 为(0,1)之间的随机数; w 为惯性权重系数; k 表示当前迭代次数; v_{id}^k 和 x_{id}^k 分别为第 k 次迭代粒子 i 速度向量和位置向量的第 d 维分量; f_{id}^k 和 g_d^k 分别为第 k 次迭代粒子 i 个体最优位置和群体最优位置的第 d 维分量, $d = 1, 2, \dots, n$ 。

1.3 逻辑斯谛曲线

逻辑斯谛曲线分为缓慢增加、快速增加和趋于稳定三部分, 可分别反映事物的发生、发展和成熟生命周期规律, 故又称为生长曲线。逻辑斯谛曲线的数学方程为

$$x(t) = K / (1 + e^{a-rt}). \quad (3)$$

式中 $x(t)$ 为 t 时刻的预测值; K 为预测值的饱和上

限; r 为增长率; a 为积分常数。

1.4 边坡稳定性评价的 PSO-PP 模型

边坡稳定性评价的 PSO-PP 建模流程如下:

(1) 构造投影数据。根据边坡稳定性评价指标构造用于边坡稳定评价的样本集 (x_{ij}^*, y_i) ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$), x_{ij}^* 和 y_i 分别为评价指标及对应的经验等级, n 和 m 分别为样本的个数和评价指标数。设定边坡稳定性强弱准则为: 边坡稳定性随边坡的等级数递减, 1 级最稳定, N 级最不稳定。建立边坡等级评价的 PSO-PP 模型就是建立 x_{ij}^* 和 y_i 之间的非线性关系。为消除量纲的影响, 将 x_{ij}^* 按下式标准化处理为 x_{ij} :

$$x_{ij} = (x_{ij}^* - Ex_j) / Sx_j \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m), \quad (4)$$

式中, Ex_j 和 Sx_j 分别为第 j 个评价指标的数学期望和标准差。

(2) 计算投影值。设向量 $\bar{a} = (a_1, a_2, \dots, a_m)$ 为投影方向, PSO-PP 就是把 m 维评价指标 x_{ij} 投影到 \bar{a} 上, 得到投影值 z_i :

$$z_i = \sum_{j=1}^m a_j x_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m), \quad (5)$$

(3) 建立投影指标函数。在综合投影时, 要求投影值 z_i 应尽可能的提取评价指标 x_{ij} 的变异信息, 即要求 z_i 的标准差 S_z 尽可能大; 同时要求 z_i 的局部密度 D_z 达到最大^[8]。因此, 构造投影指标函数 $Q(a)$ 为

$$Q(a) = S_z D_z. \quad (6)$$

其中, S_z 为 z_i 的标准差:

$$S_z = [\sum_{i=1}^n (z_i - E_z)^2 / n]^{1/2}, \quad (7)$$

D_z 为 z_i 的局部密度:

$$D_z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (R - r_{ij}) f(R - r_{ij}). \quad (8)$$

式中 E_z 为 \bar{a} 上投影值的数学期望; $r_{ij} = |z_i - z_j|$ 为样本距离; R 为密度窗宽, 计算中一般可取为 $(\max(r_{ij}) + m/2) \leq R \leq 2m$; 单位阶跃函数为

$$f(R - r_{ij}) = \begin{cases} 1 & R > r_{ij} \\ 0 & R \leq r_{ij} \end{cases}. \quad (9)$$

(4) 优化投影指标函数。投影指标函数 $Q(a)$ 随着 \bar{a} 的变化而变化, 不同的 \bar{a} 反映的数据结构特征亦不相同, 而最佳的投影方向 \bar{a} 即为最可能揭示高维数据某种结构特征的投影方向。可通过求解如式 (10) 所示的最优化问题确定最佳投影方向:

$$\begin{cases} \max Q(a) = S_z D_z \\ \text{S.t. } \sum_{j=1}^m a_j^2 = 1 \end{cases}. \quad (10)$$

上式的求解用常规方法较为困难，采用 PSO 对其进行求解，步骤如下：

设置 PSO 初始参数。包括粒子个数和维数、搜索区间、迭代数、学习因子和惯性权重系数等。

据式(6)计算粒子适应值，并与自身最优位置适应值进行比较，若优于自身最优位置适应值，则将其位置取代原最优位置。

比较各个粒子自身最优位置适应值与群体最优位置的适应值，若优于群体最优位置适应值，则将其位置取代原群体最优位置。

进行终止条件判断，如不满足，按式(1)和式(2)更新粒子位置，并返回步骤，否则结束并输出粒子群的最优位置，即最优解。

(5) 建立 PSO-PP 回归模型。设由步骤 4 求得的最佳投影方向为 \bar{a}^* ，将其回代式(5)即得样本 i 的最佳投影值 z_i^* ，根据 z_i^* 与 y_i 的散点图建立相应的数学模型。相关研究表明^[9-10]，用逻辑斯谛曲线来描述 z_i^* 与 y_i 之间的关系较合适，即

$$y_i^* = \frac{N}{1 + e^{a - rz_i^*}} \quad (11)$$

式中 y_i^* 为样本 i 边坡等级的计算值； N 为边坡稳定性分级数，亦即该曲线的上限值； a 和 r 为逻辑斯谛曲线函数的积分常数和增产率参数，通过如下最小化问题确定：

$$\min F(a, r) = \sum_{i=1}^n (y_i^* - y_i)^2 \quad (12)$$

对于上式的优化，本文同样采用 PSO，具体过程参考步骤 4。

2 模型测试及工程应用研究

2.1 评价指标的选择及边坡等级的确定

影响边坡稳定性的因素十分复杂，其中最主要的因素为岩土体类型及性质特征、地质结构、水文地质条件。此外，还有地表水、大气水的作用、地震及人类工程活动等因素。迄今为止，边坡稳定评价指标的确定尚无通用的准则可寻，现行的做法通常是依靠地质专家和工程师的经验根据实际情况进行选择。由于评价指标选择的合理与否直接关系到最终结果的可信程度，因此在选择评价指标时应遵循系统性、代表性、层次性、存异性、易获取、易量化等 6 项原则。

基于上述 6 项原则并考虑待研究边坡的实际，从地形地貌特征、岩体特性和监测状态等 3 个方面选取了边坡高度 H 、边坡坡角 ϕ 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、岩石质量指标 RQD、岩体完整性系数 K_v 、边坡变形速率 v 、锚固力增长的锚索比例 P 等 8 个因素作为边

坡稳定性的评价指标。

通过查阅相关文献^[11-14]，并参照边坡的 5 级稳定性体系，将其稳定性级别分为稳定(I)、较稳定(II)、基本稳定(III)、不稳定(IV)、极不稳定(V)，各指标分类标准列于表 1。考虑到 PSO-PP 计算值为连续的实数，且在等级分类区间端点值附近存在着一定的误差，而 PSO-PP 的输出值在某一阈值范围内，故采用“四舍五入”的规则，并且规定若某一边坡等级介于某两类之间，阈值取其平均值。设定边坡稳定性的分级阈值见表 2。

表 1 边坡稳定性评价指标分级标准

Table 1 Classification standards for discrimination indices of slope stability

评价指标	稳定(I)	较稳定(II)	基本稳定(III)	不稳定(IV)	极不稳定(V)
H/m	0~30	30~45	45~60	60~80	>80
$\phi/(^\circ)$	0~20	20~35	35~45	45~60	>60
c/MPa	>0.22	0.22~0.12	0.12~0.08	0.08~0.05	0.05~0
$\varphi/(^\circ)$	>37	37~29	29~21	21~13	13~0
RQD	>90	90~75	75~50	50~25	25~0
K_v	1~0.75	0.75~0.55	0.55~0.35	0.35~0.15	0.15~0
$v/(mm \cdot m^{-1})$	0~2	2~3	3~5	5~8	>8
$P/\%$	0~8	8~15	15~20	20~25	>25

表 2 PSO-PP 分级阈值

Table 2 Classification threshold value of PSO-PP

边坡等级	I	II	III	IV	V
PSO-PP 计算值	<1.50	1.50~2.50	2.50~3.50	3.50~4.50	>4.50

2.2 PSO-PP 精度测试

从表 1 的各级别区间内随机产生 25 个样本 x_{ij}^* ($i=1, 2, \dots, 25; j=1, \dots, 8$) 及对应经验等级 y_i ($i=1, 2, \dots, 25$) 共同组成样本系列(如表 3 所示)，并将 x_{ij}^* 归一化处理为 x_{ij} 。基于 VS.NET2008 编写了 PSO-PP 程序，计算可得最大投影指标函数值为 $Q(\bar{a}^*)=1.7497$ ；逻辑斯谛曲线参数为 $a=-0.0982$, $r=1.9997$ ；最佳投影方向为 $\bar{a}^*=(0.096, 0.136, -0.328, -0.165, -0.332, -0.170, 0.734, 0.401)$ 。投影方向中各分量的符号表示相应评价指标与边坡稳定性级别对应关系：正号表示该指标与边坡稳定级别成正比，负号则恰好相反。各分量的绝对值大小则反映了评价指标对评价结果的影响程度：其值越大，影响越大。PSO 的参数设置为：粒子数 25，粒子维数 8，学习因子 2.00，惯性权重系数从 0.95 随迭代次数均匀减小至 0.4，迭代次数 500。

图 1 为最佳投影值 z_i^* 与经验等级 y_i 的散点图，由图可知该散点关系与逻辑斯谛曲线相近，故借用式(11)描述 z_i^* 与 y_i 之间的关系，可得边坡稳定性评价的回归模型：

$$y_i^* = \frac{5}{1 + e^{-0.0982 - 1.9997 \cdot z_i^*}} \quad (13)$$

表 3 边坡等级经验值与计算值的对比结果

Table 3 Comparison between empirical and PSO-PP values for slope stability grades

序号	评价指标							投影值	PSO-PP			边坡等级			
	H /m	ϕ /(°)	c /MPa	φ /(°)	RQD	K_v	V /(mm·m ⁻¹)		经验值	计算值	等级	相对误差/%	计算值	等级	相对误差/%
1	17.24	16.03	0.31	41.39	98.08	0.76	1.56	2.74	-0.722	1	I	3.30	1.081	I	8.12
2	13.36	13.84	0.27	44.93	95.48	0.78	0.86	5.32	-0.721	1	I	3.50	1.087	I	8.70
3	7.44	16.71	0.28	43.12	91.23	0.92	0.20	7.15	-0.759	1	I	2.60	1.108	I	10.81
4	22.65	7.27	0.31	42.02	93.68	0.99	0.86	6.80	-0.756	1	I	2.20	0.918	I	8.17
5	16.02	13.83	0.29	44.24	92.88	0.86	0.47	5.89	-0.763	1	I	3.30	1.104	I	10.45
6	42.73	23.42	0.21	30.84	82.32	0.61	2.73	10.34	-0.281	2	II	3.45	2.103	II	5.13
7	42.82	24.61	0.21	31.25	81.45	0.59	2.90	12.41	-0.236	2	II	1.95	2.132	II	6.58
8	31.44	30.41	0.21	30.29	82.03	0.67	2.71	10.18	-0.292	2	II	4.80	2.082	II	4.08
9	36.33	34.79	0.18	35.34	85.80	0.62	2.99	8.68	-0.270	2	II	2.10	1.919	II	4.06
10	30.76	23.88	0.16	36.85	89.09	0.72	2.38	12.16	-0.304	2	II	6.25	1.782	II	10.91
11	49.18	39.40	0.10	27.36	70.78	0.38	3.66	18.98	0.138	3	III	1.27	2.492	II	16.95
12	48.98	36.85	0.10	28.12	52.48	0.39	4.02	18.06	0.210	3	III	4.43	3.206	III	6.87
13	48.66	39.71	0.10	27.65	68.65	0.42	4.38	16.58	0.164	3	III	0.80	2.934	III	2.18
14	58.26	42.87	0.10	22.78	61.70	0.35	4.20	16.12	0.206	3	III	4.10	3.175	III	5.82
15	56.21	44.51	0.11	26.68	60.52	0.55	3.47	19.24	0.141	3	III	1.03	3.024	III	0.80
16	75.69	54.08	0.07	16.91	43.02	0.17	6.07	22.05	0.610	4	IV	1.40	3.995	IV	0.13
17	76.78	55.89	0.06	19.41	48.57	0.24	7.96	21.65	0.717	4	IV	2.77	4.027	IV	0.68
18	62.87	46.68	0.08	16.49	40.51	0.18	7.76	23.68	0.729	4	IV	3.20	4.153	IV	3.83
19	76.42	58.41	0.05	14.83	43.70	0.30	5.63	24.78	0.618	4	IV	1.05	3.903	IV	2.43
20	67.72	45.44	0.07	17.48	41.96	0.29	7.05	20.10	0.614	4	IV	1.23	3.486	III	12.85
21	64.87	57.06	0.06	19.88	40.59	0.31	6.28	24.82	0.635	4	IV	0.38	3.696	IV	7.60
22	97.77	74.96	0.00	0.38	1.90	0.04	9.59	28.94	1.306	5	V	2.24	4.895	V	2.09
23	89.53	63.57	0.03	0.92	1.62	0.12	9.29	29.88	1.225	5	V	4.66	4.769	V	4.63
24	88.50	63.36	0.00	2.61	4.19	0.15	9.76	27.65	1.236	5	V	3.12	4.781	V	4.38
25	88.23	73.08	0.02	4.39	10.72	0.05	9.95	29.31	1.264	5	V	4.14	4.859	V	2.81

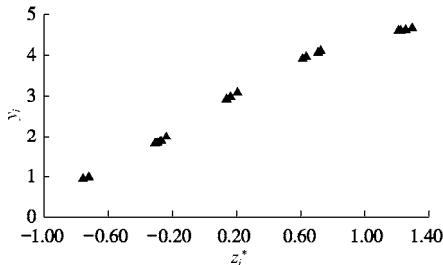
图 1 最佳投影值 z_i^* 与经验等级 y_i 的散点图

Fig. 1 Scatter diagram of best projection values and empirical grades of slope stability

由 PSO-PP 的计算值与各样本经验等级的比较见图 2 和表 3。由表 3 知, 88% 的样本的绝对误差小于 0.15, 96% 的样本的相对误差小于 5%, 样本的等级分类完全正确(见表 4)。由此可见, PSO-PP 的计算值是可靠的, 它能准确的刻画各评价因子数值的差异对边坡稳定等级的影响^[9]。

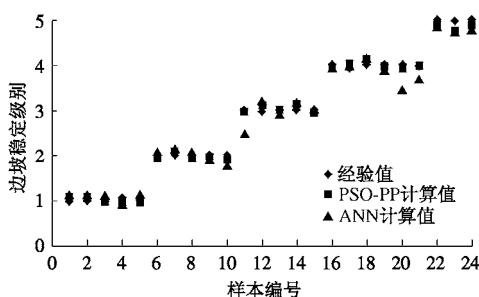


图 2 边坡样本经验值与计算值的对比

Fig. 2 Comparison between empirical and calculated values

表 4 样本经验等级与 PSO-PP 计算值的误差分析

Table 4 Error analysis results between experiential grades and PSO-PP values

绝对误差落在下列区间的百分比/%				平均绝对误差	平均相对误差/%
[0,0.05]	[0,0.1]	[0,0.2]	[0,0.3]	对误差	误差/%
52	64	92	100	0.08	2.77

为了说明 PSO-PP 的准确性和优越性, 本文将其与 ANN 进行了对比分析。利用上述 25 个样本作为 ANN 的学习样本集, 构造 8-16-1 的 3 层网络结构, 预测结果见图 2 和表 3。由表 3 可知, PSO-PP 的平均相对误差和等级误判率均优于 ANN, 相对误差小于 5% 的样本比例 PSO-PP 为 96%, ANN 为 48%; 相对误差小于 10% 样本比例 PSO-PP 为 100%, ANN 为 80%; PSO-PP 的最大相对误差 6.25%, 最大绝对误差 0.233。

PSO-PP 利用随机生成的样本进行边坡稳定性评价, 其主观性有一定程度的增加, 但其适用范围却被大大地扩大了: PSO-PP 无需拘泥于样本实例的指标与待评价边坡指标严格一致。且从评价结果上看, 其所增加的主观性仍在可接受之范围内。

2.3 工程应用

雅砻江锦屏一级水电站左岸边坡包括 CII 标左岸 1885 m 坝顶高程以上边坡(包含缆机平台边坡)和 CIII 标左岸大坝拱肩槽边坡, 总开挖高度约 530 m, CII 标边坡每 30 m 设一级 3 m 宽的马道, 开挖坡比为 1 : 0.5。由于 CIII 标监测仪器埋设不久, 缺乏确信可

靠的监测指标供采集，故仅对左岸 CII 标 1885m 坝顶高程以上边坡进行稳定等级评价。考虑到左岸缆机平台以上边坡分三区独立开挖的施工方式及各区边坡的相对独立性，将边坡沿水流方向分成 I、II、III 等 3 个子边坡进行稳定等级评价（如图 3 所示）。下面以 I 区边坡为例说明基于 PSO-PP 边坡稳定评价的过程。

I 区边坡位于左岸边坡开挖 I 区，其坡高 90 m，由开挖破比 1:0.5 可得坡角 63.5°。从左岸边坡变形及稳定性分析专题报告^[15]和左岸边坡工程安全监测分析报告^[16]中摘录相关参数，I 区边坡的各相关参数为：坡高 90 m，坡角 63.43°，黏聚力 0.07 MPa，内摩擦角 22.8°，RQD 为 89，岩体完整性指标 0.78，深部变形速率 0.32 mm/m，锚固力增大锚索比例 7%。由 PSO-PP 得到投影值为 -0.265，从而得边坡等级计算值为 1.97，由表 2 可知，该边坡稳定性介于稳定(I)与较稳定(II)之间，判别为 II 级。同理，可得其它边坡的稳定等级判别见表 5。判别结果与三维极限平衡计算结果一致^[15]。在预先设定“边坡稳定性越好，等级数越低”的强弱准则下，各区边坡稳定性排序由高至低为：II 区边坡、I 区边坡、III 区边坡。

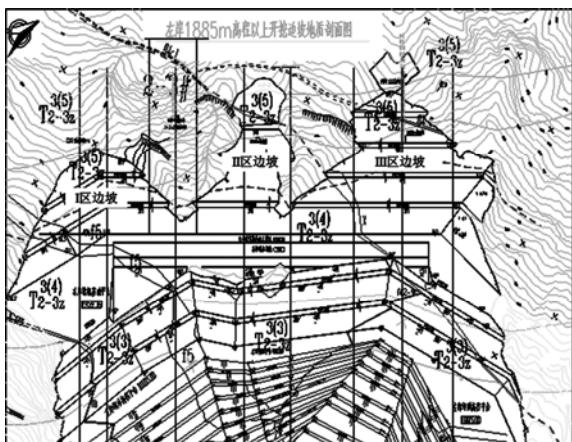


图 3 雅砻江锦屏一级水电站左岸边坡地质剖面图

Fig. 3 Geological profile of left bank slope of Jinping I Hydropower Station on Yalong River

表 5 雅砻江锦屏一级水电站左岸边坡等级判别表

Table 5 Grade discrimination of left bank slope of Jinping I Hydropower Station on Yalong River

边坡序号	投影值	PSO-PP 计算值	等级判别
I 区	-0.265	1.97	II
II 区	-0.311	1.86	II
III 区	-0.235	2.04	II

3 结论

(1) 将投影寻踪技术、粒子群算法和逻辑斯谛曲线相结合，利用粒子群算法对投影指标函数及逻辑斯

谛函数参数进行全局寻优，采用逻辑斯谛函数描述投影值与经验等级之间的散点关系，建立了边坡稳定评价的粒子群优化投影寻踪模型(PSO-PP)。模型的准确性检验结果及工程实例研究表明，利用 PSO-PP 进行边坡等级评价是可靠的，为边坡稳定性评价提供了一条新的途径。

(2) 利用 PSO 卓越的寻优能力，确保了投影方向和逻辑斯谛曲线参数的准确性，从而保证了 PSO-PP 评价结果的可靠性和客观性。

(3) 根据 PSO-PP 的计算值和预先设定的边坡稳定性强弱准则，可对处于同一等级边坡的稳定性进行比较，从而使分析结果更为精确。同时根据最佳投影方向向量还可对边坡稳定影响因素的作用大小进行排序。

(4) 影响边坡稳定性的因素很多，评价指标的选取尚缺统一的理论指导，本文根据工程实际情况选取八个评价指标进行边坡稳定评价尚处于初步尝试。针对不同的工程如何合理的选择评价指标，当评价指标增多即模型优化维数增加时模型参数的优化问题，以及评价指标合理性、相关性和敏感性的研究都是下一步工作的重点。

参考文献：

- [1] 谢全敏, 朱瑞庚. 岩体边坡稳定性灰色聚类空间预测方法[J]. 金属矿山, 1997(6): 1—5. (XIE Quan-min, ZHU Rui-geng. The grey classification together method for space prediction of the stability of rock mass slope[J]. Metal Mine, 1997(6):1—5. (in Chinese))
- [2] 徐卫亚, 谢守益. 边坡稳定分析评价的概率神经网络方法[J]. 勘察科学技术, 1999(3): 19—21. (XU Wei-ya, XIE Shou-ji. Slope stability analysis and evaluation with probabilistic artificial neural network method[J]. Site Investigation Science and Technology, 1999(3): 19—21. (in Chinese))
- [3] 冯夏庭, 王泳嘉, 卢世宗. 边坡稳定性的神经网络估计[J]. 工程地质学报, 1995, 3(4): 54—61. (FENG Xia-ting, WANG Yong-jia, LU Shi-zong. Neural network estimation of slope stability[J]. Journal of Engineering Geology, 1995, 3(4): 54—61. (in Chinese))
- [4] 赵洪波, 冯夏庭. 支持向量机函数拟合在边坡稳定性估计中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 241—245. (ZHAO Hong-bo, FENG Xia-ting. Application of support vector machines function fitting in slope stability evaluation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 241—245. (in Chinese))

- [5] 罗战友, 杨晓军, 龚晓南. 基于支持向量机的边坡稳定性预测模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 145 – 148.
(LUO Zhan-you, YANG Xiao-jun, GONG Xiao-nan. Support vector machine model in slope stability evaluation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 145 – 148. (in Chinese))
- [6] FRIEDMAN J H, TUKEY J W. A projection pursuit algorithm for exploratory data analysis[J]. IEEE Trans Comput, 1974, 23(9): 881 – 890.
- [7] EBERHART R C, KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory[C]// Proceedings of Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. Nagoya, Japan, 1995: 66 – 73.
- [8] 任若恩, 王惠文. 多元统计数据分析—理论、方法、实例[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. (REN Ruo-en, WANG Hui-wen. Multivariate statistical data analysis—theory, methods and examples[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. (in Chinese))
- [9] 金菊良, 魏一鸣, 丁 瑄. 水质综合评价的投影寻踪模型[J]. 环境科学学报, 2001, 21(4): 431 – 434. (JIN Ju-liang, WEI Yi-ming, DING Jing. Projection pursuit model for comprehensive of water quality[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2001, 21(4): 431 – 434. (in Chinese))
- [10] 杨晓华, 杨志峰, 沈珍瑶, 等. 水资源可再生能力评价的遗传投影寻踪方法[J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 73 – 76. (YANG Xiao-hua, YANG Zhi-feng, SHEN Zhen-yao, et al. Genetic projection pursuit method for evaluating water resources reproducible ability[J]. Advances in Water Science, 2001, 15(1): 73 – 76. (in Chinese))
- [11] 袁宝远, 杨志法, 刘大安, 等. 边坡不稳定先兆分析系统[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 166 – 169. (YUAN Bao-yuan, YANG Zhi-fa, LIU Da-an, et al. Slope instability indication analysis system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(2): 166 – 169. (in Chinese))
- [12] 谈小龙, 徐卫亚, 梁桂兰. 可拓方法在岩石边坡整体安全评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2503 – 2509. (TAN Xiao-long, XU Wei-ya, LIANG Gui-lan. Application of extenics method to comprehensive safety evaluation of rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2503 – 2509. (in Chinese))
- [13] 刘端伶, 谭国焕, 李启光, 等. 岩石边坡稳定性和 Fuzzy 综合评判法[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 170 – 175. (LIU Duan-ling, TAN Guo-huan, LI Qi-guang, et al. The stability of rock slope and fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(2): 170 – 175. (in Chinese))
- [14] 张晓辉, 王 辉, 戴富初, 等. 基于关系矩阵和模糊集合的斜坡稳定性综合评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 346 – 351. (ZHANG Xiao-hui, WANG Hui, DAI Fu-chu, et al. Comprehensive evaluation of slope stability using interaction matrix and fuzzy sets[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 346 – 351. (in Chinese))
- [15] 周 钟, 巩满福, 向相宇, 等. 雅砻江锦屏一级水电站大坝左岸边坡变形及稳定性分析专题报告[R]. 成都: 中水顾问集团成都勘测设计研究院, 2008. (ZHOU Zhong, GONG Man-fu, XIANG Xiang-yu, et al. The special report of deformation and stability analysis of left bank slope of Yalong river Jingping I site hydropower plant[R]. Chengdu: Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Institute of CHECC, 2008. (in Chinese))
- [16] 徐卫亚, 张金龙, 徐 飞, 等. 雅砻江锦屏一级水电站大坝左岸边坡安全监控分析报告[R]. 南京: 河海大学, 2009. (XU Wei-ya, ZHANG Jin-long, XU Fei, et al. The report of safety monitoring analysis of left bank slope of Yalong river Jingping I site hydropower plant[R]. Nanjing: Hohai University, 2009. (in Chinese))