

文章编号: 1000-7598 (2010) 11-3651-05

基于 PSO-PP 的围岩稳定性评价

徐 飞^{1,2}, 徐卫亚², 温 森², 刘造保², 赵延喜²

(1. 海南省公路勘察设计院, 海口 570206; 2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 南京 210098)

摘 要: 围岩的稳定性评价是一个复杂的不确定系统问题。结合投影寻踪方法、粒子群算法和逻辑斯谛曲线函数, 建立了围岩稳定性评价的粒子群优化投影寻踪 (projection pursuit based on particle swarm optimization, PSO-PP) 模型。该模型一方面采用粒子群算法优化投影指标函数及逻辑斯谛曲线函数参数, 确保了模型的准确性; 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, 实例分析结果与实际状态完全一致, 表明该模型在围岩稳定性评价中的可行性和有效性。

关 键 词: 围岩; 粒子群优化; 投影寻踪; 稳定性; 评价; 逻辑斯谛曲线

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Projection pursuit based on particle swarm optimization for evaluation of surrounding rock stability

XU Fei^{1,2}, XU Wei-ya², WEN Sen², LIU Zao-bao², ZHAO Yan-xi²

(1. Highway Survey and Design Institute, Haikou 570206, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Evaluation of surrounding rock stability is a complex system problem of uncertainty. Based on the projection pursuit (PP), the particle swarm optimization (PSO) and the logistic curve function (LCF), a new model for evaluation of surrounding rock 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 so as to ensure the accuracy of the parameters used in the model; on the other hand, the nonlinear relationship between projection values and experiential grades is established according to LCF. The test result of the model indicates there is a very good precision. In this study, the evaluation result obtained by applying the model developed here to an underground project is well consistent with the real situation. It is shown that the model here is feasible and effective in evaluating surrounding rock stability.

Key words: surrounding rock; particle swarm optimization; projection pursuit; stability; evaluation; logistic curve

1 引 言

围岩的稳定性评价受诸多因素的控制与影响, 且由于各因素具有多样性、可变性、不确定性等特点, 使围岩评价问题成为一个复杂的不确定系统问题^[1]。考虑到影响围岩稳定性的各单项指标的评价结果常常不相容, 直接利用围岩分类标准进行等级评价缺乏实用性, 学者们相继提出了模糊综合评价法^[2]、物元可拓方法^[3]、神经网络法^[4]、灰关联分析法^[5]等多种围岩综合评价方法。但上述方法大多存在缺陷, 例如, 模糊综合评价法对相邻两类的差异

难以区分; 物元可拓方法在计算关联度时容易遗漏重要的约束条件, 导致计算结果与实际情况差异较大; 神经网络方法是基于大样本的学习算法, 对学习样本的要求过高。为此, 笔者尝试将投影寻踪算法 (projection pursuit, PP)、粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 和逻辑斯谛曲线函数 (logistic curve function, LCF) 相结合, 提出了围岩稳定性综合评价的粒子群优化投影寻踪模型 (projection pursuit based on particle swarm optimization, PSO-PP)。本文详细介绍 PSO-PP 的原理和流程后, 将其应用到某地下工程进行实例研究。

收稿日期: 2009-06-26

基金项目: 国家科技支撑计划 (No. 2008BAB29801); 江苏省普通高校研究生科研创新计划 (No. CX09B-158Z)。

第一作者简介: 徐飞, 男, 1983 年生, 博士研究生, 主要从事高边坡的监控及评价研究。E-mail: xfawy@hhu.edu.cn

2 粒子群优化投影寻踪模型

2.1 投影寻踪算法

投影寻踪^[6-7]产生于 20 世纪 70 年代,是统计学、应用数学和计算机技术的交叉学科。投影寻踪是用于分析处理高维非正态、非线性数据的一种探索性分析方法。它的基本思想是将高维数据通过计算机技术投影到低维(1~3 维)子空间,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,并通过最优化投影指标函数来寻求最优投影值,最后根据该投影值来分析原高维数据的结构特征,或利用投影值与系统输出之间的散点关系图构造数学模型来预测系统的输出。

2.2 粒子群优化算法

粒子群算法^[8]是进化算法的一个重要分支,采用速度-位置搜索模型,每个粒子代表解空间的一个候选解,通过定义一个适应值函数来衡量每个粒子解的优劣程度。 $v_i = \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{im}\}$ 和 $x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}\}$ 分别为粒子 i 在 n 维空间的速度和位置。粒子群算法通过迭代寻求最优解,首先初始化为一群随机的粒子,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 $g = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ 来更新自己的速度和位置。粒子速度和位置的更新公式为

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

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

式中: c_1 、 c_2 为学习因子; r_1 、 r_2 为均匀分布在 (0, 1) 之间的随机数; w 为惯性权重系数; k 为第 k 次迭代; v_{id}^k 、 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 、 g_d^k 分别为第 k 次迭代粒子 i 个体最好位置和群体最好位置的第 d 维分量, $d=1, 2, \dots, n$ 。

2.3 粒子群优化投影寻踪

围岩稳定性评价的 PSO-PP 建模流程:

(1) 构造投影数据

根据围岩稳定性评价标准产生用于围岩稳定性评价的原始数据,包括围岩评价指标 x_{ij}^* ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$) 以及对应的经验等级 y_i ($i=1, 2, \dots, n$), 其中, n 、 m 分别为围岩样本的个数和评价指标数。设定围岩稳定性强弱准则为: 围岩的稳定性随围岩的等级递减, 1 级最稳定, N 级最不稳定。按式 (3) 将 x_{ij}^* 进行归一化处理为 x_{ij} , 从而消除量纲的影响。

$$x_{ij} = (x_{ij}^* - x_{j\min}) / (x_{j\max} - x_{j\min}), \quad \left. \begin{matrix} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m) \end{matrix} \right\} \quad (3)$$

式中: $x_{j\max}$ 、 $x_{j\min}$ 分别为第 j 个评价指标的最大值、最小值。

(2) 计算投影值

将 x_{ij} 投影到 $a = (a_1, a_2, \dots, a_m)$ 上, 得到投影值:

$$z_i = \sum_{j=1}^m a_j x_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

(3) 建立投影指标函数

在进行综合投影时, 要求 z_i 能尽可能大地提取 x_{ij} 中的变异信息, 即同时要求 z_i 的标准差 $S(a)$ 和其局部密度 $D(a)$ 尽可能达到最大。因此, 取投影指标函数 $Q(a)$ 为

$$Q(a) = S(a)D(a) \quad (5)$$

其中:

$$S(a) = \left[\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z}_a)^2 / n \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$D(a) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (R - r_{ij}) f(R - r_{ij}) \quad (7)$$

式中: $\bar{z}_a$ 为 a 上的平均投影值; $r_{ij} = |z_i - z_j|$ 为样本的距离; R 为密度窗宽, 运算中可在 $\max(r_{ij}) + m/2 \leq R \leq 2m$ 中取值。单位阶跃函数为

$$f(R - r_{ij}) = \begin{cases} 1, & (R > r_{ij}) \\ 0, & (R \leq r_{ij}) \end{cases} \quad (8)$$

(4) 优化投影指标函数

$Q(a)$ 随着 a 的变化而变化, 可通过求解式 (9) 的最优化问题平确定最佳投影方向。

$$\left. \begin{matrix} \max Q(a) = S(a)D(a) \\ \text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^m a_j^2 = 1 \end{matrix} \right\} \quad (9)$$

对于上述的非线性优化问题, 本文采用粒子群算法进行全局寻优, 具体步骤如下:

①粒子群初始参数的设置。该设置包括群体规模、粒子维数、粒子搜索范围、迭代次数、惯性权重系数、学习因子等。

②根据式 (5) 计算粒子的适应值, 并与自身的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。

③对每个粒子自身最优位置的适应值与群体

最优位置的适应值进行比较, 若优于群体最优位置的适应值, 则将其位置取代原群体最优位置。

④判断终止条件, 如不满足, 则按式 (1)、(2) 更新粒子位置, 然后返回步骤②, 否则, 结束并输出粒子群的最优位置。

⑤建立围岩稳定性综合评价数学模型

将由步骤④求出的最佳投影方向 a^* 代入式 (4), 得到样本 i 的投影值 z_i^* , 根据 z_i^* 与 y_i 的散点关系图建立数学模型。相关研究表明^[9-10], 用逻辑斯谛曲线 (LCF) 来模拟 z_i^* 与 y_i 之间的关系效果较好, 即

$$y_i^* = N / (1 + e^{c(1) - c(2) \cdot z_i^*}) \quad (10)$$

式中: y_i^* 为样本 i 围岩等级的计算值; N 为围岩稳定性分级数; $c(1)$ 、 $c(2)$ 为待定参数, 通过最小化式 (11) 确定。

$$\min F(c(1), c(2)) = \sum_{i=1}^n (y_i^* - y_i)^2 \quad (11)$$

对于式 (11) 的优化, 本文同样采用粒子群算法, 具体过程参考步骤④。

3 基于 PSO-PP 的围岩稳定性评价

3.1 评价指标选取及分级标准的确定

通过查阅规范和文献^[1, 11-13], 选取了岩体质量指标 D 、单轴抗压强度 R_c 、岩体完整性指数 K_v 、地下水渗水量 W 和节理状况 J 共 5 个因素作为围岩评价指标。根据围岩的 5 级稳定性体系^[14], 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), 各指标的分类标准列于表 1。考虑到 PSO-PP 计算值为连续的实数, 设定围岩稳定性的分级阈值见表 2。

表 1 围岩稳定性评价指标分类标准

Table 1 Classification standard for the discrimination indices of surrounding rock stability

级别	D	R_c /MPa	K_v	W /($L \cdot (\min 10 \text{ m})^{-1}$)	J
I	0~0.10	200~300	0.75~1.00	0~5	9~10
II	0.10~0.25	100~200	0.55~0.75	5~10	7~9
III	0.25~0.40	50~100	0.30~0.55	10~25	4~7
IV	0.40~0.60	25~50	0.15~0.30	25~125	2~4
V	0.60~1.00	0~25	0~0.15	125~250	0~2

表 2 PSO-PP 分级阈值

Table 2 Classification threshold value of PSO-PP

围岩等级	I	II	III	IV	V
PSO-PP 计算值	[0, 1.5)	[1.5, 2.5)	[2.5, 3.5)	[3.5, 4.5)	[4.5, 5]

3.2 PSO-PP 可靠度测试

在表 1 的各等级的取值范围内随机的产生 5 个样本 x_{ij}^* 及其对应等级 y_i 组成样本集, 共计 25 个样本。将 x_{ij}^* 归一化为 x_{ij} ($i=1 \sim 25; j=1 \sim 5$)。基于 VS.NET2008 编写了 PSO-PP 程序, 由程序计算可以得到最大投影指标函数值 $Q(a^*)=9.179$; $c(1)=-0.5539$, $c(2)=1.9990$, 最佳投影方向为 $a^*=(0.6809, -0.3622, -0.4455, 0.4347, -0.1421)$ 。投影方向中各个分量的符号表示相应评价指标与围岩稳定性级别对应关系, 正号表示该指标与围岩稳定性级别成正比, 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: 粒子群规模为 30, 粒子维数为 5, 学习因子 $c_1=c_2=2$, 惯性权重系数 w 从 0.95 随迭代次数均匀减至 0.40, 迭代次数 350。

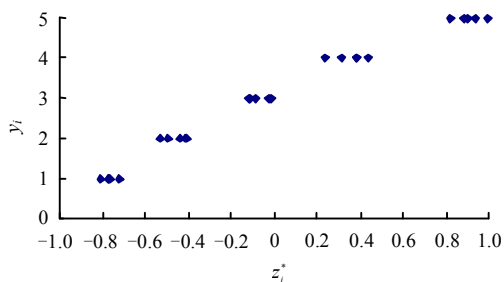


图 1 投影值 z_i^* 与经验等级 y_i 的散点图

Fig.1 Scatter dots of projection values and experiential grades

利用式 (10) 来描述如图 1 所示的最佳投影值 z_i^* 与经验等级 y_i 之间的散点关系, 得到围岩稳定性评价数学模型:

$$y_i^* = 5 / (1 + e^{-0.5539 - 1.999 \cdot z_i^*}) \quad (12)$$

由式 (12) 计算的等级与各随机样本经验等级的误差分析见表 3。由表可知, 76% 的样本计算误差绝对值在 0.200 以内, 全部样本的等级分类均准确无误。由此可见, PSO-PP 的计算值是可靠的, 它较好地描述了评价指标的数值差异对判别结果的影响^[9]。

表 3 样本经验等级与 PSO-PP 计算值的误差分析

Table 3 Error analysis result between experiential grades and PSO-PP values

绝对误差值 (级) 落在下列区间的百分比/%					平均绝对误差	平均相对误差/%
[0, 0.1]	[0, 0.2]	[0, 0.3]	[0, 0.4]	[0, 0.5]		
44	76	88	96	100	0.132	4.98

3.3 工程实例

应用 PSO-PP 对辽宁某地下工程^[3]中的围岩进行评价及对比分析,指标实测值及评价结果见表 4。由表可知,样本 2 稳定性级别属于较稳定(II),样本 1、3~5 介于稳定(I)和较稳定(II)之间,其中样本 4 偏向于稳定(I),样本 1、3、5 偏向较稳定(II)。PSO-PP 的评价结果与可拓方法及模糊可

变集方法结果完全吻合,表明利用 PSO-PP 对围岩稳定性进行综合评价是可行的。另外,按照事先设定的强弱准则,利用 PSO-PP 还可以根据投影值对同等级围岩的稳定性进行排序。在预先设定围岩稳定性越差级别越高的强弱准则下,各样本围岩稳定性排序由高至低为:样本 4>样本 3>样本 1>样本 5>样本 2。

表 4 围岩稳定性评价结果及对比
Table 4 Result comparison between PSO-PP and other models for surrounding rock stability evaluation

围岩样本编号	评价指标					围岩评价等级			
	D	R_c /MPa	K_v	W /($L \cdot (\min \cdot 10\text{ m})^{-1}$)	J	PSO-PP		可拓方法 ^[3]	模糊可变集方法 ^[15]
						计算值	相应等级		
1	0.12	185.5	0.89	6	8	1.641	II	II	II
2	0.27	176.4	0.80	8	7	2.043	II	II	II
3	0.08	158.2	0.94	6	7	1.636	II	II	II
4	0.04	201.1	0.97	5	9	1.376	I	I	I
5	0.24	181.9	0.92	9	8	1.825	II	II	II

4 结 论

(1) 采用粒子群算法优化投影指标函数和逻辑斯谛曲线函数参数,并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,提出了围岩稳定性评价的 PSO-PP。

(2) PSO-PP 的计算结果精确,各样本的计算误差绝对值小于 0.5,经验等级判断完全正确,实例分析结果与可拓方法和模糊可变集方法保持一致。

(3) 由最佳投影方向 a^* 可得围岩评价指标中对围岩等级的影响从大到小为: $D > K_v > W > R_c > J$ 。

(4) 根据模型的计算值和设定的强弱准则,可以对处于同一级别围岩的稳定性强弱进行比较。

(5) 粒子群算法优越的搜索性能确保了评价结果的可靠性和客观性。

参 考 文 献

[1] 汪明武,李丽,金菊良. 围岩稳定性集对分析——可变模糊集综合评价模型[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 941—944.
WANG Ming-wu, LI Li, JIN Ju-liang. Set pair analysis-Variable fuzzy set model for evaluation of stability of surrounding rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 941—944.

[2] 陆兆溱,王京,吕亚平. 模糊模式识别法在围岩稳定性分类中的应用[J]. 河海大学学报, 1991, 19(6): 97—101.
LU Zhao-zhen, WANG Jing, LÜ Ya-ping. Direct method of fuzzy pattern recognition and its application to stability

classification of surrounding rock[J]. Journal of Hohai University, 1991, 19(6): 97—101.

[3] 连建发,慎乃齐,张杰坤. 基于可拓方法的地下工程围岩评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1450—1453.
LIAN Jian-fa, SHEN Nai-qi, ZHANG Jie-kun. Research on surrounding rock evaluation of underground engineering based on extension method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(9): 1450—1453.

[4] 杨朝辉,刘浩吾. 地下工程围岩稳定性分类的人工神经网络模型[J]. 四川联合大学学报(工程科学版), 1999, 3(4): 66—72.
YANG Chao-hui, LIU Hao-wu. Artificial neural network model for the stability classification of adjoining rock of underground construction[J]. Journal of Sichuan Union University (Engineering Science Edition), 1999, 3(4): 66—72.

[5] 冯玉国. 灰色优化理论模型在地下工程围岩稳定性分类中的应用[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(3): 62—66.
FENG Yu-guo. Application of grey optimal theory model in the stability classification of adjoining rock of underground construction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(3): 62—66.

[6] FRIEDMAN J H, TURKEY J W. A projection pursuit algorithm for exploratory data analysis[J]. IEEE Transactions on Computer, 1974, 23(9): 881—890.

- [7] 李祚泳. 投影寻踪技术及其应用进展[J]. 自然杂志, 1997, 19(4): 224—227.
LI Zuo-yong. Projection pursuit technology (PPT) and its progress of application[J]. *Nature Magazine*, 1997, 19(4): 224—227.
- [8] SHI Y H, EBERHART R C. Parameter selection in particle swarm optimization[C]//Proceedings of sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. Nagoya, Japan: [s. n.], 1995: 66—73.
- [9] 金菊良, 魏一鸣, 丁晶. 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 evaluation of water quality[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(4): 431—434.
- [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.
- [11] 连建发, 慎乃齐, 张杰坤. 分形理论在岩体质量评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增刊): 1695—1698.
LIAN Jian-fa, SHEN Nai-qi, ZHANG Jie-kun. Application research on fractal theory in rockmass quality evaluation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(Supp.): 1695—1698.
- [12] 刘沐宇, 李新平. 可拓识别方法在巷道围岩分类中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(增刊): 1295—1297.
LIU Mu-yu, LI Xin-ping. Application of extension assessment method to stability classification of surrounding rock of roadway[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1999, 18(Supp.): 1295—1297.
- [13] 胡宝清. 可拓评价方法在围岩稳定性分类中的应用[J]. 水利学报, 2000, 44(2): 66—70.
HU Bao-qing. Application of extension assessment method to stability classification of surrounding rocks[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, 44(2): 66—70.
- [14] 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—25.
WANG Guang-yue, LIU Jian. Fuzzy matter-element method for analysis of surrounding rock stability[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, (5): 20—25.
- [15] 陈守煜, 韩晓军. 围岩稳定性评价的模糊可变集合工程方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1857—1861.
CHEN Shou-yu, HAN Xiao-jun. Engineering method of variable fuzzy set for assessment of surrounding rock stability[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(9): 1857—1861.

上接第3644

- [7] 杨光华. 地基沉降计算的新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 679—686.
YANG Guang-hua. New computation method for soil foundation settlement[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(4): 679—686.
- [8] 杨光华. 地基非线性沉降计算的原状土切线模量法[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1927—1931.
YANG Guang-hua. Nonlinear settlement computation of the soil foundation with the undisturbed soil tangent modulus method[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(11): 1927—1931.
- [9] 张士林. 大降雨强度下雨水入渗规律研究[J]. 岩土工程学报, 2003, (5): 281—285.
ZHANG Shi-lin. The research of infiltrating regulation under rainstorm[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2003, (5): 281—285.
- [10] 王协群, 谢妮, 邹维列, 等. 降雨条件下不同土质路基边坡吸力与入渗特性[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(1): 23—28.
WANG Xie-qun, XIE Ni, ZOU Wei-lie, et al. Characteristics of matrix suction and infiltration of slope of subgrade filled with different soil under artificial rainfall[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2010, 32(1): 23—28.