

基于自适应神经元模糊推理系统的 岩质边坡稳定性评价方法

郭瑞清^{1, 2}, 木合塔尔·扎日², 刘新喜³

(1. 中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 新疆大学 资源与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046;
3. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 模糊理论在岩质边坡稳定性评价中存在的知识获取和自适应能力较低等方面不足, 而神经网络在模糊推理方面欠缺, 因此, 提出基于自适应神经元模糊推理系统的边坡稳定性评价方法。通过模型结构的建立、模型训练和测试, 得到可用于边坡稳定性评价的基于自适应神经元模糊推理系统模型。测试结果表明, 该模型计算结果与边坡实际稳定系数十分接近, 对边坡稳定性的预测结果也与实际相符。与基于神经网络方法的计算结果比较, 该方法在建模简便程度及计算精度等方面明显具有优势。

关键词: 边坡工程; 自适应神经元模糊推理系统; 岩质边坡; 稳定性评价

中图分类号: P 642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)增 1 - 2785 - 05

STABILITY EVALUATION METHOD OF ROCK MASS SLOPE BASED ON ADAPTIVE NEURAL-NET WORK BASED FUZZY INTERFERENCE SYSTEM

GUO Ruiqing^{1, 2}, Muhtar ZARI², LIU Xinxi³

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;
2. College of Resources and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China;
3. Institute of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract: By establishing model structure, training and testing, the adaptive neural-net work-based fuzzy interference system model is obtained to evaluate the stability of slope. The testing results show that the calculation by the model almost reaches the practical stability factor of the slope, and the prediction is also coincident with the practical situation. The comparison with the neural network shows that the new model has the advantage of simplicity and high accuracy.

Key words: slope engineering; adaptive neural-net work based fuzzy interference system(ANFIS); rock slope; stability evaluation

1 引言

边坡稳定性评价方法经历了从确定性到非确定性、从线性到非线性的过程。由于边坡稳定受

多种因素的综合影响, 各影响因素不但具有不确定性, 且与边坡稳定性之间呈非线性关系, 这就导致了确定性及线性分析方法难以准确对边坡的稳定性做出评价。为弥补确定性方法的不足, 作为一种非确定性和非线性方法, 基于模糊理论和神经网络的

收稿日期: 2005 - 11 - 03; **修回日期:** 2005 - 12 - 06

作者简介: 郭瑞清(1964 -), 男, 1984 年毕业于长春地质学校矿产普查与勘探专业, 现为高级工程师、博士研究生, 主要从事岩体力学方面的研究工作。E-mail: guoruqing@xju.edu.cn

边坡稳定性评价方法有了长足的发展。贺少辉和李中林^[1]通过建立边坡工程性能指标“安全时效性及适用性”的隶属函数，将模糊概率测度理论用于边坡工程模糊可靠度研究，建立了边坡工程模糊可靠度数学模型，研究了开挖过程这一因素的模糊性对边坡稳定性的影响；汪益敏^[2]在考虑影响边坡稳定性因素的模糊性基础上，采用多指标因素模糊评价方法，对边坡岩体稳定质量进行了多级模糊综合评价研究；李彰明^[3]在对实测资料进行分析的基础上通过构造关联因素边界值矩阵建立了边坡稳定性分析的模糊综合评价模型；G. Habibagahi 和 M. Meidari^[4]则利用模糊集理论重点分析了岩石边坡中节理几何模糊性对边坡稳定性的影响等；夏元友等^[5、6]基于人工神经网络的非线性映射功能，用 RBF 神经网络模型进行边坡稳定性影响因素敏感性分析，给出了敏感性分析的具体算法；冯夏庭等^[7]提出了边坡稳定性的神经网络估计方法；包惠明和胡长顺^[8]在综合分析岩质路堑边坡变形破坏模式的基础上，提出评价岩体边坡工程稳定性的指标并提出了基于 ANN 下路堑边坡稳定性评价的方法等。在上述方法中，基于模糊理论方法存在着知识获取和自适应能力较低等方面不足，而神经网络方法又存在模糊推理方面的不足，自适应神经元模糊推理系统(adaptive neural-net work-based fuzzy inference system, ANFIS)既能集两种方法之所长，又能克服各自的不足。本文将 ANFIS 用于边坡稳定性评价，计算结果表明，该方法用于岩质边坡的稳定性评价取得较好的成果，比较而言也明显优于神经网络方法。

2 ANFIS 原理

由于非线性过程的普遍性，基于传统数学工具的建模方法描述某些复杂的非线性过程十分困难。而模糊逻辑系统不依赖对象的精确数学分析，仅从专家的经验知识和推理过程中以 If-Then 规则集建立模糊模型，并以此为基础设计模糊系统。但这种传统的模糊系统不能自动地将专家的知识经验转化为推理规则库，且缺乏有效的方法来改进隶属函数以减少输出误差和提高性能指标。R. Jang 提出的 ANFIS 有效地解决了这一问题^[9]，它是一种将模糊逻辑和神经网络有机结合的新型的模糊推理系统结构，并能自动产生 If-Then 规则，且可采用反向传播算法和最小二乘法的混合算法调整前提参数和结论

参数。ANFIS 中最常用的是 Takagi 和 Sugeno 于 1985 年提出的 Sugeno 模型，其典型模糊推理规则为

$$z = f(x, y) \quad (x=A, y=B) \quad (1)$$

式中：A 和 B 为作为前提的模糊数， $z=f(x, y)$ 为结论中的精确数。通常 $z=f(x, y)$ 为 x 和 y 的多项式。

不失一般性，现只考察 $f(x, y)$ 为一阶多项式、二输入和单输出的情况，此时称为二规则一阶 Sugeno 模糊推理系统。其结构如图 1 所示，推理规则如下：

$$f_1 = p_1x+q_1y+r_1 \quad (x=A_1, y=B_1) \quad (2)$$

$$f_2 = p_2x+q_2y+r_2 \quad (x=A_2, y=B_2) \quad (3)$$

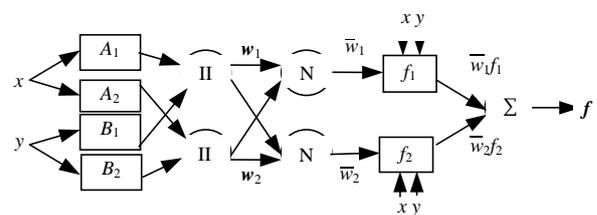


图 1 ANFIS 结构图

Fig.1 Structure of ANFIS

图 1 中：x, y 为输入向量，权重 w_1 和 w_2 通常由前提中的隶属函数 μ 值乘积得来，输出 f 为各规则输出的加权平均， \bar{w}_1 和 \bar{w}_2 为各权重在总权重中的比例。该自适应网络是一个多层前馈网络，其中的方形节点需要进行参数学习。参数学习可以采用梯度下降法，但为避免该方法速度较慢且易陷入局部最小，常采用梯度下降法与最小二乘法的混合算法。

该模型结构^[10]描述如下：

第 1 层：计算输入的模糊隶属度。节点 i 具有输出函数：

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) \quad (4)$$

式中： x 为节点 i 的输入； O_i^1 为 A_i 的隶属函数值，表示 x 属于 A_i 的程度， A_i 为模糊集； $\mu_{A_i}(x)$ 为隶属函数， $\mu_{A_i}(x) \in [0, 1]$ 定义为

$$\mu_{A_i}(x) = \exp \left[- \left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right] \quad (5)$$

或

$$\mu_{A_i}(x) = \exp \left[1 + \left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right]^{-b_i} \quad (6)$$

式中： a_i, b_i, c_i 为前提参数，决定隶属函数的形状。事实上，第 1 层的输出为输入变量的隶属度值。

第2层: 计算每条规则的可信度, 即模糊推理的“and”运算。其定义方式有多种, 常用的为求积运算, 其输出为

$$w_i = \mu A_i(x) \times \mu B_i(y) \quad (i=1, 2) \quad (7)$$

式中: “ \times ”为任何满足 T 规范的“and”算子。

第3层: 计算可信度的归一化值, 定义为

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad (i=1, 2) \quad (8)$$

式中: \bar{w}_i 为第3层的输出。

第4层: 计算每一条规则的输出, 第 i 个节点具有输出:

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i + r_i) \quad (9)$$

式中: p_i, q_i, r_i 均为结论参数。

第5层: 计算总输出, 定义为

$$O_i^5 = \sum_{i=1}^2 \bar{w}_i f_i = f \quad (10)$$

模型采用的混合学习算法描述如下:

给定前提参数后, ANFIS 的输出可表示成结论参数的线性组合:

$$f = \sum_{i=1}^2 \bar{w}_i f_i = \bar{w}_1 f_1 + \bar{w}_2 f_2 = \mathbf{A}\mathbf{X} \quad (11)$$

其中,

$$\mathbf{X} = \{p_1, q_1, r_1, p_2, q_2, r_2\}^T$$

若已有 P 输入输出数据对, 且给定前提参数, 则矩阵 $\mathbf{A}, \mathbf{X}, \mathbf{f}$ 维数为 $P \times 6, 6 \times 1$ 和 $P \times 1$ 。一般情况下, 样本个数远远大于未知参数的个数, 使用最小二乘法可得到均方误差最小 $\min\{\|\mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{f}\|\}$ 意义下结论向量最佳估计 \mathbf{X}^* , 即 $\mathbf{X}^* = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{f}$ 。

将式(11)得到的结论参数进行误差计算, 采用前馈神经网络中的BP算法, 将误差从输出端反向传播到输入端, 由梯度下降法修正前提参数, 从而调整隶属函数的形状。

3 岩质边坡稳定评价指标体系确定

岩质边坡的稳定性是多种影响因素共同作用的结果, 综合考虑各影响因素特征和内在联系, 将其归纳为5种综合因素: 边坡岩体质量、边坡结构、坡高、坡角及工程因素^[8]。

3.1 边坡岩体质量系数(SRQC)

边坡岩体质量综合反映了岩体结构完整性、岩

石强度、结构面发育特征以及地下水效应等岩体的基本地质属性, 是综合反映边坡岩体稳定性的综合指标。根据 Bieniawski 提出的岩体基本质量评价系统 RMR 值得出:

$$SRQC = RMR/100 \quad (12)$$

式中: RMR 为岩体基本质量。

3.2 边坡结构系数(SSC)

岩体结构面和结构面的组合以及与边坡面的组合关系是边坡岩体变形破坏的最主要因素。根据 SMR 分类系统中有关指标的修正^[7], 综合确定路堑岩体边坡结构的系数为

$$SSC = S_1 S_2 S_3 / 60 \quad (13)$$

式中: S_1 为与结构面(线)的走向关系, S_2 为结构面(线)倾角的影响, S_3 为边坡角与结构面倾角的相互关系。

3.3 坡高系数(SHC)

高边坡岩体的稳定性与岩体本身的自稳高度有密切的关系, 岩体自稳高度值本身就反映了岩体质量的优劣。据统计得出修正后的坡高系数为

$$SHC = 0.57 + 33.8/H \quad (14)$$

式中: H 为边坡高度。

3.4 坡角系数(SCC)

岩质边坡的稳定性与岩体优势结构面内摩擦角及坡角有密切的关系, 因二者对稳定性影响方向相反, 故可将二者的比值作为一个综合因素加以考虑。确定坡角系数 SCC 为

$$SCC = 1 - \varphi/\alpha \quad (15)$$

式中: φ 为边坡岩体优势结构面的内摩擦角, α 为边坡坡角。

3.5 工程因素影响系数(EFEC)

工程因素主要考虑爆破方式和坡形, 工程因素影响系数(EFEC)为爆破方式影响系数和坡形影响系数之和。

爆破方式影响系数(K_b)取值为: 自然边坡时取 1.00, 周边预爆时取 0.75, 常规爆破时取 0.50, 光面爆破时取 0.20, 缺陷爆破时取 0.00。

坡形(边坡台阶的宽高比)影响系数(K_s)取值为: 坡形为 0.75 时, 影响系数取 1.00; 坡形为 0.50 时, 影响系数取 0.75; 坡形为 0.30 时, 影响系数取 0.50; 坡形为 0.20 时, 影响系数取 0.20; 坡形为 0.10 时,

影响系数取 0.00。

工程因素对边坡工程稳定性的综合影响系数为

$$EFEC = K_e + K_s$$

4 ANFIS 应用实例

应用 ANFIS 评价边坡稳定性主要有以下几个步骤：根据 ANFIS 原理建立结构模型；用训练样本对已建立的模型进行训练使其满足给定的误差要求；用测试样本对已训练的模型进行检验，以评价模型的可靠性；用已经通过测试的模型对边坡稳定性评价进行预测。为与神经网络方法比较，本文的训练样本和测试样本选自包惠明和胡长顺^[8]的相关研究。

4.1 模型结构建立及训练

以指标体系中的 5 项指标为输入项和实际稳定系数为输出项，建立 5 个输入和 1 个输出的 ANFIS 模型，见图 2。将训练样本输入该模型对其进行训练，训练 50 次模型误差为 6.014×10^{-5} ，训练样本及输出结果见表 1。

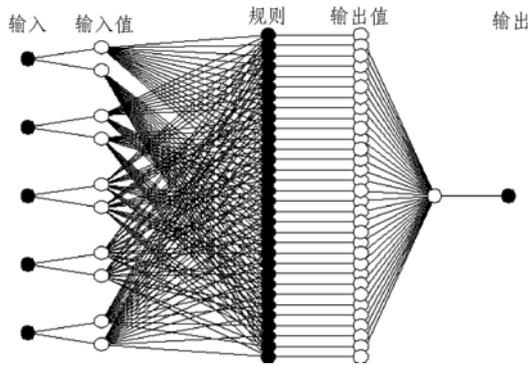


图 2 ANFIS 模型结构

Fig.2 Structure of ANFIS model

4.2 模型测试

将 3 个测试样本输入训练后的 ANFIS 模型，得到模型的输出结果，见表 1。由计算结果可知，ANFIS 模型的输出结果与边坡实际稳定性系数值相差很小，平均误差为 0.064，基于 ANN 测试样本平均误差为 0.112。

4.3 边坡稳定性预测

应用 ANFIS 模型对三峡库区开县新南加站高边坡稳定性进行预测。该高边坡为切向岩质坡，坡面走向 159° ，倾向 249° ，坡角 $53^\circ \sim 58^\circ$ ，整体上北陡南缓，坡长 62 m，坡高 20.7~34.3 m。岩层产状范围 $(330^\circ \sim 350^\circ) \angle (50^\circ \sim 53^\circ)$ ，边坡内发育 2 组

表 1 ANFIS 模型训练样本

Table 1 Training samples of ANFIS model

序号	SRQC	SSC	SCC	SHC	EFEC	实际稳定系数	输出稳定系数
1	0.473	0.500	0.025	0.640	1.10	1.45	1.449
2	0.710	0.013	0.191	0.683	0.95	1.55	1.550
3	0.350	0.023	0.196	0.662	0.80	1.20	1.201
4	0.510	0.083	0.300	0.689	0.40	1.34	1.340
5	0.477	0.023	0.257	0.686	1.35	1.15	1.150
6	0.419	0.126	0.200	1.246	1.50	0.96	0.960
7	0.378	0.213	0.200	1.246	1.50	0.83	0.830
8	0.470	0.012	0.217	1.133	1.75	0.98	0.980
9	0.755	0.072	0.276	0.820	1.10	1.25	1.250
10	0.530	0.023	0.025	0.642	1.10	1.35	1.350
11	0.357	0.077	1.000	1.305	0.25	0.75	0.750
12	0.471	0.077	0.218	0.687	0.70	1.23	1.231
13	1.00	0.000	0.914	0.768	0.70	0.95	0.950
14	0.530	0.023	0.914	0.763	0.20	1.15	1.150
15	0.710	0.013	0.857	0.549	0.20	1.05	1.049
16	0.477	0.023	0.800	1.237	0.30	1.10	1.100
17	0.419	0.120	0.728	0.367	1.00	1.05	1.050
18	0.350	0.023	0.847	0.678	1.25	1.00	1.000
19	0.700	0.058	0.914	1.138	0.70	1.79	1.790
20	0.900	0.700	1.000	1.056	0.60	1.69	1.690

主要结构面，J1 产状范围 $(195^\circ \sim 225^\circ) \angle (30^\circ \sim 45^\circ)$ ；J2 产状范围 $(245^\circ \sim 260^\circ) \angle (65^\circ \sim 85^\circ)$ 。高边坡形成时采用常规爆破方法。实地勘察该边坡定性评价为基本稳定。

由边坡的具体情况确定 5 项评价指标的值(表 2)，经计算得该边坡稳定系数为 1.076，与实际情况相符。

表 2 ANFIS 模型及神经网络(ANN)方法测试样本计算结果
Table 2 Results of test samples based on ANFIS and ANN method

样本序 类型号	SRQC	SSC	SCC	SHC	EFEC	实际 稳定 系数	ANFIS 输出 值	ANFIS 误差	ANN 输出 值	ANN 误差
1	0.349	0.023	0.222	0.908	1.35	0.95	1.096	0.146	1.133	0.183
2	0.413	0.099	0.225	0.682	1.10	1.16	1.187	0.027	1.132	0.028
3	0.700	0.070	0.440	0.913	1.10	1.21	1.190	0.020	1.335	0.125
预测 样本	1	0.358	0.068	0.273	1.570	1.25	1.076		1.018	

5 结 论

基于 ANFIS 的评价模型能较好地表达边坡稳定性指标与稳定性的非线性映射关系, 是一种合理可行的非线性边坡稳定性评价方法, 该方法建模简单且省去了复杂的机制分析。与基于神经网络(ANN)方法计算结果相比, 该方法的计算结果更接近边坡的实际情况。

参考文献(References):

- [1] 贺少辉, 李中林. 边坡工程模糊可靠度研究[J]. 南方冶金学院学报, 1994, 15(1): 1 - 9.(He Shaohui, Li Zhonglin. Research on the fuzzy reliability of slope engineering[J]. Journal of Southern Institute of Metallurgy, 1994, 15(1): 1 - 9.(in Chinese))
- [2] 汪益敏. 边坡岩体稳定质量的模糊评价[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 1997, 15(4): 110 - 115.(Wang Yimin. Fuzzy evaluation of the stability quality of the slope rock mass[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science), 1997, 15(4): 110 - 115.(in Chinese))
- [3] 李彰明. 模糊分析在边坡稳定性评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 16(5): 90 - 95.(Li Zhangming. Application of fuzzy analysis to slope stability evaluation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 16(5): 90 - 95.(in Chinese))
- [4] Habibagahi G, Meidari M. Reliability of slope stability analysis evaluated using fuzzy set approach[A]. In: Proc. of the 5th Int. Conf. on Civil Eng.[C]. [s. l.]: Ferdowsi University, 2000. 29 - 36.
- [5] 夏元友, 熊海丰. 边坡稳定性影响因素敏感性神经网络分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2 703 - 2 707.(Xia Yuanyou, Xiong Haifeng. Sensibiliy analysis of slope stability based on artificial neural network[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2 703 - 2 707.(in Chinese))
- [6] 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, 21(7): 1 087 - 1 091.(Xia Yuanyou, Li Meibian. Evaluation method research on slope stability and its developing trend[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 1 087 - 1 091.(in Chinese))
- [7] 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 Xiating, Wang Yongjia, Lu Shizong. NN evaluation of slope stability[J]. Journal of Engineering Geology, 1995, 3(4): 54 - 61.(in Chinese))
- [8] 包惠明, 胡长顺. 基于 ANN 下的岩质路堑深边坡稳定性评价[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(3): 53 - 56.(Bao Huiming, Hu Changshun. Stability evaluation of depth cutting slope in rock mass base on artificial neural network[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(3): 53 - 56.(in Chinese))
- [9] Romana M. SMR classification[A]. In: Proceedings of the 7th International Congressing Rock Mechanics, International Society for Rock Mechanics (ISRM)[C]. [s. l.]: [s. n.], 1992. 78 - 84.(in Chinese))
- [10] 楼顺天, 胡昌华, 张伟, 等. 基于 MATLAB 的系统分析与设计——模糊系统[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.(Lou Shuntian, Hu Changhua, Zhang Wei. Systems Analysis and Design—Fuzzy System Based on MATLAB[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2001.(in Chinese))