

文章编号: 1000-7598-(2006) 01-0159-04

圆弧破坏边坡反演设计的 ANN 方法与 ANFIS 方法的比较研究

张志军^{1,2}, 熊正为², 丁德馨², 毕忠伟^{1,2}

(1.中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083; 2.南华大学 建筑工程与资源环境学院, 湖南 衡阳 421001)

摘 要: 圆弧破坏边坡反演设计方法, 是根据边坡的岩土力学参数及边坡高度, 在确保安全系数满足要求的前提下, 对圆弧破坏边坡的边坡角进行设计的一种新方法。建立圆弧破坏边坡反演设计方法的关键, 就是要对大量稳定圆弧破坏边坡实例加以集成, 以建立从 $\{\gamma, c, \phi, H, F\}$ 到 $\{\varphi_f\}$ 的映射。文中收集了大量稳定圆弧破坏边坡实例, 采用 ANN 和 ANFIS 对其进行了集成, 分别建立了圆弧破坏边坡反演设计的 ANN 方法和 ANFIS 方法, 进而又采用圆弧破坏边坡实例对两者的反演结果进行了比较。结果表明, ANFIS 更适合于用来建立圆弧破坏边坡反演设计方法。

关 键 词: 人工神经网络; 自适应神经模糊推理系统; 圆弧破坏边坡; 反演设计

中图分类号: TU 413.6⁺2; TU 457

文献标识码: A

A comparative study of ANN-based and ANFIS-based approaches for inverse design of circular failure slopes

ZHANG Zhi-jun^{1,2}, XIONG Zheng-wei², DING De-xin², BI Zhong-wei^{1,2}

(1.School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Architecture Resources & Environment Engineering, Nanhua University, Hengyang 421001, China)

Abstract: The inverse design method for circular failure slope is a new kind of design approach for designing the slope angle of the circular failure slope based on its geotechnical parameters and height and the prescribed factor of safety. The key procedure for establishing the method is to integrate a large number of cases of stable circular failure slopes and to establish the mapping from $\{\gamma, c, \phi, H, F\}$ to $\{\varphi_f\}$. This paper accumulated quite a few cases of circular failure slopes. ANN and ANFIS were used to integrate these cases and ANN-based and ANFIS-based approaches were established, respectively, for the inverse design of circular failure slope. Furthermore, the two approaches were used to design the slope angles of several cases and a comparison was conducted on the inverse design results. The research results have shown that ANFIS is more adequate to establish the ANFIS-based approach for the inverse design of circular failure slope.

Key words: artificial neural networks; adaptive neuro-fuzzy inference system; circular failure slope; inverse design

1 引 言

圆弧破坏边坡的合理设计, 对保持其稳定性起着至关重要的作用^[1~3]。通常, 设计圆弧破坏边坡的目标是要合理确定该边坡的高度 H 与坡角 φ_f 。但在实际设计时, 受地形地质条件的限制, 边坡高度是不能随意变更的, 因此, 设计圆弧破坏边坡的关键是合理确定其边坡角 φ_f 。

设计边坡角有正演方法和反演方法两种。正演方法先假定边坡角为某一数值, 再根据边坡岩土力学参数和边坡高度, 采用条分法或其他方法对其安全系数进行计算, 若安全系数不满足要求, 则减小边坡角, 再进行计算, 直至其安全系数满足要求为止, 此时所对应的边坡角即为正演设计的边坡角。

反演方法则须先收集大量稳定圆弧破坏边坡实例, 然后采用某种智能方法对其进行集成, 建立边

收稿日期: 2004-10-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.50274043); 湖南省自然科学基金重点资助项目(No.01JJY1004); 湖南省教育厅重点资助项目(No.01A015)。

通讯作者: 丁德馨, 男, 1958 年生, 博士, 教授, 博导, 主要研究方向为岩土工程灾害预测与控制。通讯地址: 湖南衡阳南华大学校办; 邮编: 421001;

联系电话: 0734-8281326, E-mail: dingdx@nhu.edu.cn

作者简介: 张志军, 男, 1978 年生, 博士生, 主要研究方向为岩土工程灾害预测与控制。联系电话: 13975466725, E-mail: zzzj181@163.com

坡岩土力学参数、边坡高度、边坡安全系数所构成的数据集 $\{\gamma, c, \phi, H, F\}$ 与边坡角所构成的数据集 $\{\phi_f\}$ 之间的映射关系^[4], 然后应用该映射关系, 在确保安全系数满足要求的条件下, 直接对圆弧破坏边坡的边坡角进行反演设计。

已有研究表明, 人工神经网络(ANN)^[5, 6]和自适应神经模糊推理系统(ANFIS)^[7]都可用来建立这种映射关系, 从而建立相应的圆弧破坏边坡反演设计方法。但由于 ANN 和 ANFIS 各具优缺点, 因此, 有必要对两者进行比较研究, 以确定哪种方法更适合于用来建立这种反演设计方法。

基于此, 本文收集了 24 个稳定圆弧破坏边坡实例, 采用 ANN 和 ANFIS 对其中 21 个实例进行了集成, 分别建立了圆弧破坏边坡反演设计的 ANN 方法和 ANFIS 方法, 最后用这两种方法对余下 3 例进行了反演设计, 并将反演设计结果进行了比较。结果表明, ANFIS 更适合于用来建立圆弧破坏边坡反演设计方法。

2 反演设计问题的数学描述

这里应用集合论给出圆弧破坏边坡反演设计问题的数学描述。

圆弧破坏边坡涉及的所有参数构成了参数集 Φ 。建立在这个参数集 Φ 上的抽象空间就构成了边坡的状态空间, 记为 $\vee \Phi$ 。状态空间 $\vee \Phi$ 可分为 3

个子空间: 一个是由边坡坡体的重度 γ 、内聚力 c 、内摩擦角 ϕ 和坡高 H 所组成的状态参数空间 $\vee m$; 另一个是由边坡的设计坡角 ϕ_f 所组成的状态参数空间 $\vee u$; 还有一个是由边坡的安全系数 F 所组成的状态参数空间 $\vee f$ 。三者记作:

$$\left. \begin{aligned} \vee m &= \{m | m = \{\gamma, c, \phi, H\}, m \in \Phi\} \\ \vee u &= \{u | u = \{\phi_f\}, u \in \Phi\} \\ \vee f &= \{f | f = \{F\}, f \in \Phi\} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

现行圆弧破坏边坡设计方法研究的是从 $\vee m$ 和 $\vee u$ 到 $\vee f$ 的映射关系, 即:

$$\vee m + \vee u \rightarrow \vee f \quad (2)$$

而反演设计方法研究的则是从 $\vee m$ 和 $\vee f$ 到 $\vee u$ 的映射关系, 即:

$$\vee m + \vee f \rightarrow \vee u \quad (3)$$

3 反演设计 ANN 方法和 ANFIS 方法的建立

3.1 ANN 方法的建立

建立圆弧破坏边坡反演设计的 ANN 方法, 步骤如下:

(1) 收集大量稳定的圆弧破坏边坡实例。由于反演设计的目标是要设计稳定的边坡, 因此, 本文收集了 24 个稳定的圆弧破坏边坡的实例^[8, 9], 其参数列于表 1。

表 1 圆弧破坏边坡实例
Table 1 Cases of circular failure slopes

编号	岩石重度 $\gamma / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	内聚力 c / kPa	内摩擦角 $\phi / (^{\circ})$	边坡高度 H / m	安全系数 F	边坡角 $\phi_f / (^{\circ})$	边坡稳定状态
1	25.00	120.00	45.00	120.0	1.300	53.00	稳定
2	18.84	14.36	25.00	30.5	1.875	20.00	稳定
3	18.84	57.46	20.00	30.5	2.045	20.00	稳定
4	28.44	39.42	35.00	100.0	1.780	35.00	稳定
5	28.44	39.23	38.00	100.0	1.990	35.00	稳定
6	27.30	31.50	29.70	135.0	1.245	41.00	稳定
7	27.30	16.80	28.00	90.5	1.252	50.00	稳定
8	27.30	26.00	31.00	92.0	1.246	50.00	稳定
9	27.30	10.00	39.00	511.0	1.434	41.00	稳定
10	27.30	10.00	39.00	470.0	1.418	40.00	稳定
11	25.00	46.00	35.00	443.0	1.280	47.00	稳定
12	25.00	46.00	35.00	435.0	1.370	44.00	稳定
13	25.00	46.00	35.00	432.0	1.230	46.00	稳定
14	26.00	150.00	45.00	200.0	1.200	30.00	稳定
15	22.40	10.00	35.00	10.0	2.000	30.00	稳定
16	21.40	10.00	30.34	20.0	1.700	30.00	稳定
17	12.00	0.00	30.00	4.0	1.460	45.00	稳定
18	12.00	0.00	30.00	4.0	1.440	45.00	稳定
19	25.00	46.00	35.00	284.0	1.340	50.00	稳定
20	25.00	48.00	40.00	330.0	1.490	49.00	稳定
21	25.00	55.00	36.00	299.0	1.520	45.50	稳定
22	25.00	46.00	36.00	299.0	1.550	44.50	稳定
23	27.30	10.00	39.00	480.0	1.450	40.00	稳定
24	25.00	46.00	35.00	393.0	1.310	46.00	稳定

(2) 将表 1 中前 21 个实例的各参数进行标准化处理(即将各参数变换到 0.2~0.8 的范围内),按反演设计模式组成训练数据对。即将各实例中坡体的重度 γ 、内聚力 c 、内摩擦角 ϕ 、边坡高度 H 和安全系数 F 作为 ANN 模型的输入,所对应的边坡角 φ_f 作为 ANN 模型的输出。

(3) 采用 Levenberg-Marquardt 优化规则的 BP 算法^[7]对输入 ANN 的训练数据对进行训练。模型输入层到隐含层间采用正切 S 型函数(Tansig),而隐含层到输出层间则采用线性输出函数(Purelin),训练过程中取误差平方和作为误差函数,当误差平方和小于 10^{-4} 时即停止训练。在多次训练中,比较训练情况得出,结构为 5-11-1 的 3 层 BP 网络较好,它的结构如图 1 所示。训练经过 58 次后停止,误差为 0.000 080 669 5,训练过程中误差变化情况如图 2 所示。此时,从 (γ, c, ϕ, H, F) 到 φ_f 的映射,即可用来对圆弧破坏边坡进行反演设计。

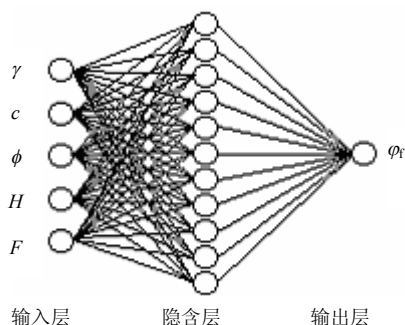


图 1 圆弧破坏边坡反演设计 ANN 模型

Fig. 1 The architecture of ANN for inverse design of circular failure slopes

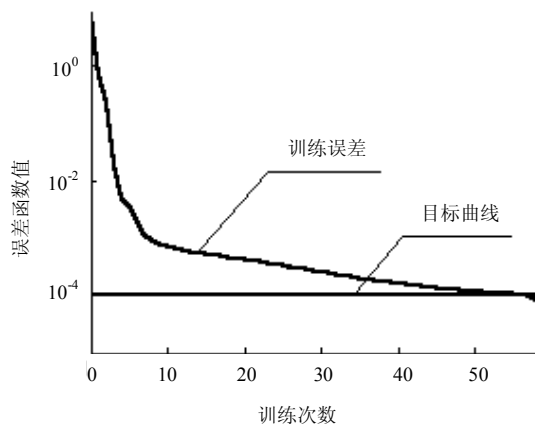


图 2 网络训练过程中误差变化情况

Fig. 2 Error variation during training of the network

3.2 ANFIS 方法的建立

ANFIS 是用 ANN 来实现模糊系统的模糊化、

模糊推理和反模糊化 3 个基本过程的一类新型自适应网络。它利用 ANN 的学习机制自动地从输入输出数据中提取规则,使得它既具有 ANN 的自适应学习功能,又具有模糊控制描述和处理模糊信息、进行判断和做出决策的功能。两者的不同之处在于 ANN 用权值来描述系统,而 ANFIS 则用自适应推理所得出的模糊语言规则来描述系统。因此,后者使系统朝向自适应、自学习的发展方向。

建立圆弧破坏边坡反演设计的 ANFIS 方法,步骤如下:

(1) 采用减法聚类方法^[10-12]建立模型结构,在各训练参数之值取为缺省值时,模型的每个输入变量被自动赋予 12 个 Gauss 型隶属函数,其结构如图 3 所示。

(2) 利用建立 ANN 方法时所采用的训练数据对,采用混合学习算法^[10-12]对网络进行训练。当训练自动停止后结束训练,训练总次数为 11 次,训练数据最小均方根差为 0.000 019 59。训练过程中误差变化情况如图 4 所示。此时,从 (γ, c, ϕ, H, F) 到 φ_f 的映射,即可用来对圆弧破坏边坡进行反演设计。

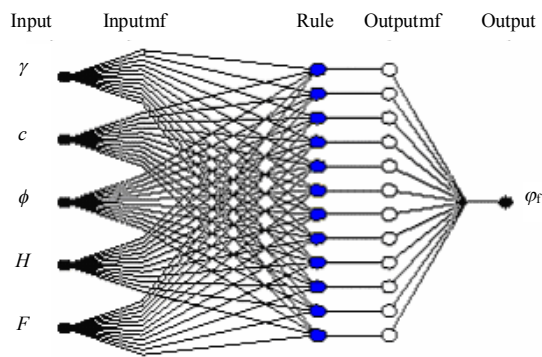


图 3 圆弧破坏边坡反演设计 ANFIS 的结构

Fig.3 The architecture of ANFIS for inverse design of circular failure slopes

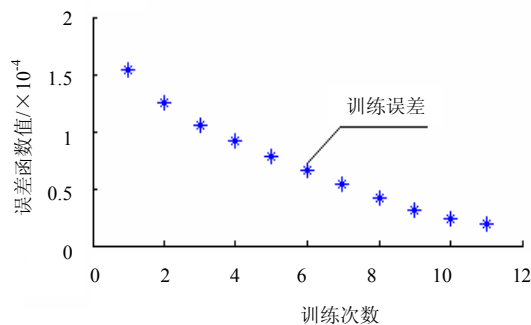


图 4 结构训练过程中误差变化情况

Fig. 4 Error variation during training of the ANFIS

4 ANN 方法与 ANFIS 方法的比较

为了对 ANN 方法与 ANFIS 方法比较, 取 3 个实际边坡, 用 ANN 方法与 ANFIS 方法对其进行反演设计。3 个实际边坡的有关各参数及使用状况列于表 2。

表 2 3 个实际边坡的有关参数及使用状况
Table 2 The parameters and state in use of three cases of circular failure slopes

编号	岩石重度 γ / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	内聚力 c / kPa	内摩擦角 ϕ / $(^\circ)$	边坡高度 H / m	安全系数 F	边坡角 ϕ_i / $(^\circ)$	边坡稳定状态
22	25.00	46.00	36.00	299.0	1.550	44.50	稳定
23	27.30	10.00	39.00	480.0	1.450	40.00	稳定
24	25.00	46.00	35.00	393.0	1.310	46.00	稳定

将上述 3 例实际边坡的各参数进行标准化处理, 按反演设计要求将各例的坡体的 γ 、 c 、 ϕ 、 H 、 F 分别输入已训练好的 ANN 模型和 ANFIS 模型。模型的输出即为反演设计结果。两种方法的反演设计结果列于表 3。

表 3 ANN 方法和 ANFIS 方法的反演设计结果
Table 3 Comparison between inversion results by ANFIS and ANN

边坡实例编号	实际坡角 / $(^\circ)$	ANN 方法的反演设计结果		ANFIS 方法的反演设计结果	
		反演设计坡角 / $(^\circ)$	相对误差 / %	反演设计坡角 / $(^\circ)$	相对误差 / %
22	44.5	45.4639	2.17	44.7404	0.54
23	40	40.4985	1.25	40.2485	0.62
24	46	47.3724	2.98	46.1597	0.35

从表 3 可以看出, ANN 方法的精度虽然也能满足要求, 但仍远不如 ANFIS。因此, ANFIS 更适于用来建立圆弧破坏边坡反演设计方法。

5 结 论

(1) 圆弧破坏边坡反演设计的 ANFIS 方法减少了原始纯反向传播算法搜索空间的维数, 所以其收敛速度非常快, 约是 ANN 方法的 5 倍之多。ANFIS 方法不仅收敛速度快, 而且重新训练仍能得到相同的结果。而 ANN 方法则不但训练次数多, 而且重新训练多次也得不到相同的结果。

(2) 圆弧破坏边坡反演设计的 ANFIS 方法表现出了很强的推广预测能力, 在本文事例中, 其求解精度要比 ANN 方法高出 1~7 倍。

(3) 综合考虑 ANN 和 ANFIS 的收敛速度、训练结果的可重复性以及推广预测能力, 均表明

ANFIS 更适合于用来建立圆弧破坏边坡反演设计方法。

参 考 文 献

- [1] 许东俊, 任伟中, 任清平. 永平铜矿岩质边坡中的滑坡整治[J]. 岩土力学, 1994, 15(1): 1—10.
XU Dong-jun, REN Wei-zhong, REN Qing-ping. Harnessing of landslide for the rock slope in Yongping Copper Mine[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1994, 15(1): 1—10.
- [2] 张发明, 刘汉龙, 赵维炳. 预应力锚索加固岩质边坡的设计实例[J]. 岩土力学, 2000, 21(2): 176—179.
ZHANG Fa-ming, LIU Han-long, ZHAOWei-bing. Design practice of reinforcing rock slope with prestressed cables[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2000, 21(2): 176—179.
- [3] 沈强, 陈从新. 高速公路失稳高边坡动态设计[J]. 岩土力学, 2003, 24(Supp.): 283—286
SHEN Qiang, CHEN Cong-xin. Dynamic design for unstable high slope along expressway[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(Supp.): 283—286.
- [4] 丁德馨, 张志军, 王卫华. 圆弧滑动边坡智能化反演设计方法研究[J]. 南华大学学报(理工版), 2002, 16(4): 1—4.
DING De-xin, ZHANG Zhi-jun, WANG Wei-hua. Studies of intelligence-based inverse design method for circular sliding slopes[J]. *Journal of Nanhua University (Science & Engineering)*, 2002, 16(4): 1—4.
- [5] 丁德馨. 弹塑性位移反分析的智能化方法及其在地下工程中的应用[D]. 上海: 同济大学, 2000.
Ding De-xin. Studies of Intelligence-Based Methods for Elasto-Plastic Displacement Back Analysis Problem and Their Application in Underground Excavation[D]. Shanghai: Tongji University, 2000.
- [6] 张乃尧, 阎平凡. 神经网络与模糊控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [7] 张智星, 孙春在, (日)水谷英二著, 张平安, 高春华译. 神经-模糊和软计算[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.
- [8] 冯夏庭. 智能岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
FENG Xia-ting. Introduction to the Intelligence for Rock Mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [9] N K Sah, P R Sheorey, L N Upadhyaya. Maximum likelihood estimation of slope stability[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1994, 31(1): 47—53.
- [10] 胡守仁. 神经网络应用技术[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1993.
- [11] 吴晓莉, 林哲辉. MATLAB 辅助模糊系统设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
- [12] 闻新, 周露, 李东江, 等编著. MATLAB 模糊逻辑工具箱的分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.