

# 泥化夹层错动带残余强度的 人工神经网络<sup>①</sup>

冯夏庭 王泳嘉

(东北大学采矿系, 沈阳 110006)

**摘要** 应用人工神经网络理论, 采用对实例样本的学习方法, 建立了泥化夹层错动带残余强度与其各种影响因素之间的内在联系—高度非线性的网络映射。用学到的知识(网络映射)预测新的泥化夹层错动带的残余强度, 获得了较高的精度。实际的应用表明, 与传统的方法相比, 神经网络方法有其许多优点, 为预测泥化夹层错动带的残余强度提供了一条新的更强有力的途径。

**关键词** 泥化夹层 残余强度 网络非线性映射 人工神经网络

泥化夹层是指坚硬岩层中所夹有的结构疏松、粒间连接弱的完全泥化的夹层。它的强度在构造错动和地下水的作用下已降低至残余强度或接近残余强度值。70年代以来, 国内外对泥化夹层的残余强度进行了大量的试验研究, 提出了一些预测残余强度的经验公式。目前, 引用较多的有 Kenney 1967年提出的公式<sup>[1]</sup>:

$$\varphi = \frac{46.4}{0.446I_p} \quad (1)$$

式中  $I_p$ —塑性指数。

和 Kanji 1974年提出的公式<sup>[2]</sup>:

$$\varphi = 453.1[W_L^{0.85}] \quad (2)$$

式中  $W_L$ —液限。

我国李青云、王幼麟通过理论分析和计算机逐步回归分析的方法, 筛出影响泥化夹层错动带残余强度的主要因素即比表面  $B$  和胶结含量  $C$ , 并建立了经验公式<sup>[3]</sup>:

$$f_r = \begin{cases} \frac{1}{0.513 - 162.04/B} & (3) \\ 0.745 - 0.072 \ln B + 0.000858C & (4) \\ 0.832 - 0.0884 \ln B & (5) \end{cases}$$

$$f_r = \operatorname{tg} \varphi \quad (6)$$

其中 (3)式适用于粘土岩类泥化夹层; (4)式适用于灰岩类页岩、泥灰岩类泥化夹层; (5)

式适用于灰岩类页岩、泥灰岩类泥化夹层。

经验公式的建立通常需要对泥化夹层数据分布形式或残余强度与影响因素的函数关系做一假定, 在统计意义下成立。这种方法在变量存在定性描述, 关系十分复杂或未知的情况下应用起来非常困难。本文应用近几年来迅速发展起来的人工神经网络理论<sup>[4,5]</sup>, 采用机器学习的方法<sup>[6]</sup>建立泥化夹层的残余强度与其各种影响因素之间的非线性关系, 然后进行推广, 预测新的泥化夹层的残余强度。

## 1 人工神经网络原理

人工神经网络是人脑神经网络的结构模拟, 是一种非线性动力学系统, 它具有自学习、自组织、高容错性、并行处理、分布式知识存储、非线性动态处理等优点<sup>[4,5]</sup>。多层前馈神经网络由分层的神经元组成, 如图1所示。各层神经元彼此以层间连接强度相连, 下层为输入层, 用于接受输入信息, 上层为输出层, 用于信息的输出, 中间层为隐含层, 层内神经元彼此独立。人工神经网络对泥化夹层的

<sup>①</sup> 国家八·五重点攻关项目, 辽宁省自然科学基金资助项目 收稿日期: 1994-03-08; 修回日期: 1995-04-11

残余强度与其各种影响因素之间的关系是通过实例样本的学习来实现的。通过对大量的实例样本的学习，网络用尝试方法来不断减小错误和修正权值和阈值，从而掌握蕴含于样本集中的难以用解析形式表达的知识，网络通过权值的调整来记下所学过的样本并掌握各种影响因素与残余强度之间的关系。

设有  $p$  个泥化夹层样本集  $(x_1, d_1), (x_2, d_2), \dots, (x_p, d_p)$ ，输入矢量  $x$  的期望输出矢量  $d = F(x)$  有：

$$F: R^n \rightarrow R^m$$

$x_i$  是  $R^n$  中的一个点  $(x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i)$ ， $d_i$  是  $R^m$  中的一个点。在时间  $k$ ，有样本对  $(x_k, d_k)$ 。网络学习的过程是不断地调整网络的连接权值，以找到一个网络  $N: R^n \rightarrow R^m$ ，使  $N$  与  $F$  最佳逼近。

## 2 粘土类泥化夹层残余强度

粘土类泥化夹层是地下工程岩体和边坡工程岩体中常见的一种软弱夹层。该类泥化夹层以非胶型结构连接为主，其残余强度较低。有关研究表明<sup>3)</sup>，影响粘土类泥化夹层残余强度的主要因素为比表面  $B$ 、液限  $W_L$ 、塑性指数  $I_p$ 、粘粒含量  $P$ 。采用神经网络方法，就是将这些影响因素作为变量用网络的输入节点表

达，粘土类泥化夹层的残余强度  $f_r$  由网络的输出节点表达，隐含层数和各层隐含节点数由文献[7]讨论的方法确定。粘土类泥化夹层神经网络的结构为  $4 \rightarrow 10 \rightarrow 6 \rightarrow 1$ ，如图 2 所示。

用 58 个粘土类泥化夹层样本实验数据训练网络，在经过 12 159 次学习循环后，网络实际输出的  $f_r$  值与期望值之间的平均误差达到 0.000 025。学习过程中，学习率  $\eta_k$  从 0.72 逐渐减小到 0.43，冲量系数  $\alpha_k$  从 0.70 逐渐减小到 0.40，获得了网络的最佳收敛速度。网络学得的粘土类泥化夹层的残余强度  $f_r$  与粘粒含量  $P$ 、液限  $W_L$ 、决塑性指数  $I_p$ 、比表面  $B$  的非线性映射关系分布到网络的连接权值矩阵(表 1)和节点阈值向量  $\theta$  上。

$$\theta = [0, 0, 0, 0, -1.5920, -0.0787, 1.2427, 2.7545, -3.7115, -2.2145, 0.5763, -0.2876, -0.1263, -2.8805, 1.4990, -0.0955, 0.2848, 0.3730, -0.5641, -2.1170, 3.8585]^T$$

用学得的知识对未让网络学习过的样本进行预报，其结果列于表 2 中，同时列出了公式(1)~(3)的预测结果。由该表可知，无论是学习过的样本还是未学习过的样本，神经网络的预测结果比其它方法都好。

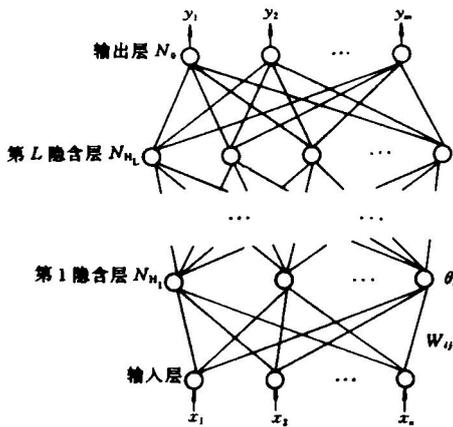


图 1 多层前馈神经网络

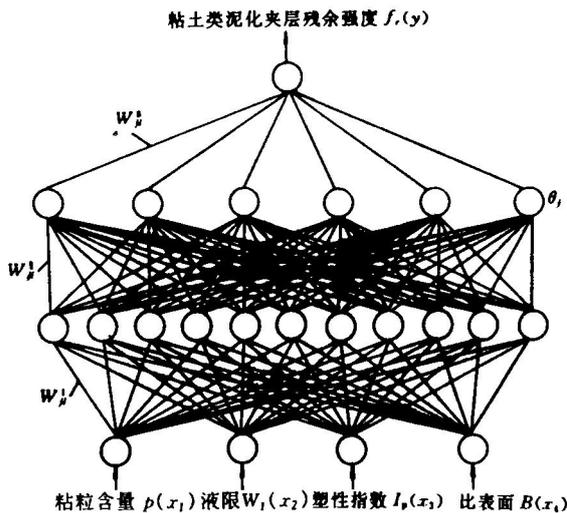


图 2 粘土类泥化夹层神经网络结构

### 3 页岩和泥灰岩类泥化夹层残余强度

页岩、泥灰岩类泥化夹层含有碳酸盐为主的胶结物使部分粒团胶结起来，增强了结构连接的牢固程度。所以该类泥化夹层的残余强度普遍较高。不仅粘粒含量  $P$ 、塑性指数  $I_p$ 、液限  $W_L$ 、比表面  $B$  对其残余强度有影响，而且碳酸盐的含量也有影响。因此，该类泥化夹层错动带的残余强度预测神经网络的输入节点增至 5 个。采用自适应的方法确实网络结构为  $5 \rightarrow 6 \rightarrow 5 \rightarrow 1$ ，如图 3 所示。

用于网络学习的有 41 个样本，表 3 列出

了其中的 11 个样本数据。在对其进行 1835 次学习循环之后，网络的系统平均误差可以达到 0.000 099。学得的知识同样分布到网络的连接权值矩阵和节点的阈值向量上。

用 4 个未经网络学习过的样本来检验网络的预测能力，相对误差均在 5% 以下(表 3)。与其它方法相对，神经网络方法具有较高的预测精度。

### 4 结论

(1) 基于神经网络的方法不需事先假定泥化夹层的残余强度  $f_r$  与其影响因素之间的函数关系，通过对实例样本的学习即可找出其之

表 1 粘土岩类泥化夹层残余强度预测神经元连接权值矩阵

$W_{\mu}^j$		输入节点					
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$		
第二 隐含层 节点 编号	1	-1.8343	-0.3028	-1.5735	-2.4678		
	2	-0.2604	-0.1516	-0.2201	2.2617		
	3	-1.6283	-1.0132	-0.0566	-0.0937		
	4	2.9056	-0.7907	-2.2723	3.9449		
	5	0.5403	-1.7045	-0.5051	-4.6975		
	6	-2.3725	-0.1680	1.8639	-2.2643		
	7	-0.6879	0.4143	-0.4588	1.1393		
	8	-0.3524	1.4215	-1.6127	-0.1090		
	9	0.6909	-1.1257	0.7219	0.5045		
	10	1.4197	-1.6420	-0.3899	-2.6402		
$W_{\mu}^j$		第二隐含层节点编号					
		1	2	3	4	5	6
第一 隐含层 节点 编号	1	0.5533	0.8511	-1.0840	1.6353	-0.6860	1.5516
	2	0.1811	-0.1575	0.0219	0.7603	1.0068	-0.9480
	3	2.0068	0.2235	-0.2069	0.2406	-0.8017	0.3988
	4	1.4795	0.3885	-0.6599	-1.1716	-1.3708	-4.5221
	5	-3.2202	0.8556	0.1657	2.1436	0.1374	3.1960
	6	-0.2697	0.0132	0.5622	0.0118	0.0661	3.4980
	7	1.2305	0.4039	-0.1079	0.3593	0.1060	-0.04369
	8	0.2072	0.8562	-1.1282	0.2645	-1.14834	0.9440
	9	-0.7506	-0.2086	0.8539	0.2302	0.9224	-1.1158
	10	-3.3696	-0.7089	0.2074	1.0967	-0.5322	1.7719
$W_{\mu}^j$		第二隐含层节点编号					
		1	2	3	4	5	6
输出层 节点 Y		-2.1594	0.7182	-0.7212	-1.3868	-1.0433	3.1728

表2 粘土岩类泥化夹层残余强度实测值与预测值

泥化夹层 样本 编号	粘粒 含量 p/%	液限 W <sub>L</sub> /%	塑性 指数 I <sub>p</sub> /%	比表面 B /m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup>	残余强度实测值与预测值比较						
					f <sub>r</sub> 实测值	用公式 (1)预测	用公式 (2)预测	用公式 (3)预测	用神经网络预测		
									预测值	绝对误差	相对误差
1	56	33	16	101	0.21	0.24	0.43	0.27	0.209 904	0.000 096	0.000 451
2	48	35	23	157	0.24	0.20	0.41	0.23	0.239 181	0.000 813	0.003 398
3	59	64	29	618	0.19	0.18	0.24	0.20	0.189 076	0.000 924	0.004 865
4	29	33	13	93.6	0.25	0.27	0.43	0.28	0.249 462	0.000 538	0.002 154
5	25	22	11	58.4	0.38	0.29	0.64	0.39	0.379 530	0.000 470	0.001 236
6	31	60	28	66	0.384	0.186	0.25	0.35	0.382 999	0.001 001	0.002 607
7	66	42	21	159.82	0.213	0.212	0.34	0.233	0.211 638	0.001 362	0.002 607
8	61	74	36	398.1	0.213	0.166	0.21	0.294	0.210 806	0.002 194	0.019 302
9	51	92	46	511.3	0.213	0.149	0.17	0.20	0.210 749	0.002 251	0.010 567
10	63	58	29	290.55	0.213	0.183	0.26	0.210	0.211 638	0.001 362	0.006 396
11	56	98	50	619.27	0.194	0.143	0.16	0.198	0.192 631	0.001 369	0.006 359
12	68	27	12	64.65	0.325	0.275	0.52	0.356	0.324 703	0.000 297	0.000 915
13	67	35	16	108.12	0.231	0.164	0.23	0.230	0.230 220	0.000 780	0.003 376
14	36	65	37	169	0.231	0.164	0.23	0.230	0.230 145	0.000 855	0.003 700
15	51	62	28	681	0.20	0.19	0.24	0.20	0.200 339	0.000 339	0.001 693
16	58	40	17	146	0.25	0.23	0.36	0.24	0.250 448	0.000 448	0.001 950
17	55	67	27	688	0.21	0.19	0.23	0.20	0.209 634	0.000 366	0.001 741
18	41	69	37	238.65	0.213	0.164	0.22	0.216	0.212 140	0.000 860	0.004 038
19	46	78	42	379.4	0.204	0.157	0.20	0.205	0.203 068	0.000 932	0.004 569
20	54	54	27	203	0.24	0.19	0.27	0.22	0.251 040	0.011 040	0.046 002
21	51	86	45	496.5	0.194	0.15	0.18	0.201	0.201 446	0.007 446	0.038 381
23	35	26	10	34	0.46	0.30	0.54	0.45	0.467 891	0.007 891	0.017 154

表3 页岩、泥灰岩类泥化夹层残余强度测值与预测值

泥化夹层 样本 编号	粘粒 含量 p/%	液限 W <sub>L</sub> /%	塑性 指数 I <sub>p</sub> /%	比表面 B /m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup>	碳酸岩 含量 C /%	残余强度实测值与预测值比较						
						f <sub>r</sub> 实测值	用公式 (1)预测	用公式 (2)预测	用公式 (3)预测	用公式 (5)预测	用神经网络预测	
											预测值	绝对误差
1	53	31	12	75	26.99	0.45	0.28	0.46	0.45	0.45	0.449 978	0.000 022
2	47	23	8	74	81.44	0.51	0.33	0.61	0.45	0.45	0.509 706	0.000 294
3	52	44	22	138	31.26	0.37	0.21	0.33	0.41	0.39	0.371 703	0.001 703
4	60	34	16	202	9.06	0.40	0.24	0.42	0.36	0.36	0.399 412	0.000 588
5	34	20	6	31	23.03	0.52	0.38	0.71	0.44	0.44	0.520 223	0.000 223
6	49	30	15	65	16.2	0.38	0.25	0.47	0.45	0.56	0.380 587	0.000 587
7	38	18	9	58	15.7	0.45	0.32	0.81	0.46	0.4	0.450 076	0.000 076
8	35	26	10	34	35.5	0.54	0.30	0.54	0.52	0.52	0.536 652	0.003 348
9	43	27	11	55	12.14	0.53	0.29	0.52	0.46	0.48	0.530 159	0.000 159
10	51	28	10	36.39	36.39	0.51	0.30	0.50	0.51	0.51	0.509 998	0.000 002
11	52	24	8	61	18.44	0.46	0.33	0.59	0.46	0.46	0.459 814	0.000 186
12	36	27	14	76	8.82	0.39	0.27	0.52	0.44	0.45	0.390 520	0.000 520
13	42	22	7	41	50.31	0.42	0.36	0.64	0.52	0.50	0.422 152	0.002 152
14	54	25	10	73	28.99	0.43	0.30	0.56	0.46	0.45	0.430 056	0.000 056
15	59	32	15	94	29.41	0.40	0.25	0.44	0.44	0.43	0.299 622	0.000 378

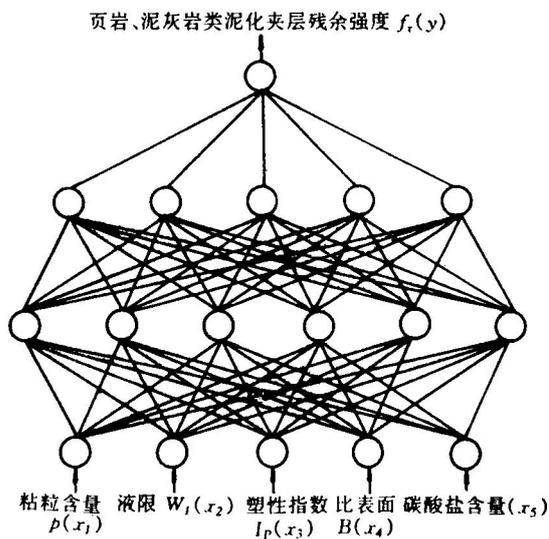


图3 页岩、泥灰岩类泥化夹层网络的结构

间的内在联系。这种做法可以避免因苦于找不到合适的方程而不得不采用简化处理的方法所带来的缺陷,在变量之间的关系复杂到事先难以正确估计的场合,本文的方法就更显示出了极大的优越性。

(2) 泥化夹层的残余强度与其粘粒含量  $P$ 、液限  $W_l$ 、塑性指数  $I_p$ 、比表面  $B$  和碳酸盐

含量  $C$  之间的关系不是用确定性的函数方程表达,而是用网络的连接权值矩阵和节点阈值向量分布来表达。这种分布表达不会因某个输入变量的数据缺省或数据含有噪声而影响到残余强度  $f_r$  的正确预测。

(3) 钙镁质碳酸盐的分布、晶性等目前难以定量的因素可以在泥化夹层残余强度的预测过程中作为变量加以输入,这是传统的预测方法难以做到的。

(4) 实际的应用表明,神经网络方法具有较高的预报精度。

#### 参考文献

- 1 Kenney T C. In: Proc Geotech, Conference OSLO, 1967.
- 2 Kanji M K. Geotechnique, 1974, 24(4): 7-12.
- 3 李青云, 王幼麟. 见: 第二次全国岩石力学与工程学术会议论文集. 北京: 知识出版社, 1989.
- 4 Rumelhart D E. Parallel Distributed Processing: Exploration in the Microstructure of Cognition. Carbrige, MIT Press, 1986.
- 5 Lippman R P. IEEE ASSP, 1987, 4(22): 4-22.
- 6 Michalski R S. Morgan Kaufmann Publishing Inc. 1986.
- 7 冯夏庭, 张奇志, 林韵梅. 东北工学院学报, 1993, 14(S1): 163-166.