

距离判别分析方法在深基坑桩基支护方式 优选中的应用

洪 亮^{1,2}, 宫凤强², 陈 强^{1,3}, 金志仁^{1,2}

(1 湖南城市学院 土木工程学院, 湖南 益阳 413000 2 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083
3 中南林业科技大学 土木工程与力学学院, 湖南 长沙 410004)

摘 要: 根据深基坑桩基支护的特点, 选取了软土天然含水量、重度、内摩擦角、粘结力、渗透系数、基坑的长度、宽度、深度、地下水位和工期状况 10 项具体指标, 借鉴距离判别分析理论, 利用国内大量的深基坑桩基支护实例作为学习样本进行训练, 建立了桩基支护方式优选的距离判别分析模型, 并利用回代估计法对建立的模型进行检验。结果表明: 经过训练后的桩基支护优选模型误判率很低, 判别能力很高。说明距离判别分析方法是解决深基坑桩基支护方式优选问题的一种有效方法, 可以在实际工程中进行推广。

关键词: 深基坑; 桩基支护; 优选; 距离判别分析

中图分类号: TU 473

文献标志码: A

文章编号: 1673-923X(2010)07-0112-06

Application of distance discriminant analysis in supporting pattern optimization of pile foundation of deep foundation pit

HONG Liang^{1,2}, GONG Feng-qiang², CHEN Qiang^{1,3}, JIN Zhi-ren^{1,2}

(1. School of Civil Engineering Hunan City University, Yiyang 413000, Hunan, China 2. School of Resources and Safety Engineering Central South University, Changsha 410083, Hunan, China 3. School of Civil Engineering and Mechanics Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract According to the characteristics of deep foundation pit engineering, 10 main specifications such as natural moisture, gravity, internal friction angle, cohesive force, permeability coefficient, length, width, depth of foundation pit, groundwater level and construction period status were taken into account and a distance discriminant analysis model has been established by training a lot of deep foundation pit real cases. The resubstitution method was also introduced to verify the stability of discriminant analysis model and the ratio of misdiscrimination is lower. The results show that discriminant analysis method provides an efficient way in solving the optimizing problem of supporting plan of pile foundation for deep foundation pit engineering and can be applied into actual engineering.

Key words deep foundation pit; supporting of pile foundation; optimization; distance discriminant analysis

随着国民经济建设的快速发展, 城市建设中地下工程建设日益增多, 随之而来的是基坑的规模愈来愈大。这就对深基坑的设计、施工提出了更高的要求。桩基以其优越的特性在软土地区中得到了广

泛的应用, 但是桩基支护方式的选择大都是依靠经验来确定, 缺乏合理性。特别是在软土地区, 桩基支护方式与软土的物理力学性质有很大的关系, 由于软土地基的复杂性, 很难用确定的数学模型来描述。

收稿日期: 2009-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(50674107); 湖南省建设厅科技计划项目(2005-05); 湖南省重点学科建设项目

作者简介: 洪 亮(1973-), 男, 副教授, 博士, 主要从事岩土工程勘察和地基检测等方面的教学、实践与研究工作

桩基支护方案的优选受众多因素的影响, 在以往的决策中, 往往过多地依赖工程经验和专家会诊, 由于所找专家及其工程经验的局限性和随遇性, 以及每一具体工程的特殊性, 往往难以决策出优化方案; 另一方面大量的工程实践积累了丰富的经验和数据。通过对工程实例的学习, 建立桩基支护方式与其影响因素之间的非线性映射关系, 从而可以对拟建工程提供支持。徐杨清^[1-2]着重从深基坑工程的整体设计思路系统上, 论述了深基坑工程的优化设计原理, 提出了面向问题的深基坑工程设计思想及其工程优化设计的主要途径和方法。神经网络方法也被用于深基坑的相关问题研究中^[3-4]。麻风海等^[5]采用人工神经网络理论, 研究了深基坑软土工程桩基支护方案的优化问题。陈震^[6]以机器学习的新方法——支持向量机为工具, 建立了深基坑桩基支护方式选择的支持向量机模型。虽然很多专家学者对软土桩基支护方案的优选进行了广泛研究, 但是由于影响因素的多样性和复杂性, 该问题还有待更加深入的研究。而在自然科学和社会科学的研究中, 研究对象用某种方法已划分为若干类型, 当得到一个新的样本数据 (通常是多元的), 要确定该样本属于已知类型中的那一类, 这类问题属于判别分析。可以说, 判别分析理论是一种有效的多元数据分析方法, 它能科学的判断得到的样本属于什么类型, 目前该理论已经在土木工程的一些领域得到应用^[7-13]。笔者考虑到判别分析方法的原理和桩基支护方案优选的具体特点, 尝试把判别分析方法运用到该问题的研究当中, 并且取得了良好的效果。

1 距离判别分析方法

1.1 距离判别分析理论

设总体 $G = (X_1, X_2, \dots, X_p)^T$ 是 p 元总体 (考察 p 个指标), 其中样本 $X = (x_1, x_2, \dots, x_p)^T$, 令 $\mu_i = E(X_i)$, $i = 1, 2, \dots, p$ 则总体 G 的均值向量为 $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_p)^T$, 协方差矩阵为 $\Sigma = E[(G - \mu)(G - \mu)^T]$ 。则样本 X 与总体 G 的马氏距离定义如下^[14]:

$$d(X, G) = (X - \mu)^T \Sigma^{-1} (X - \mu)^{\frac{1}{2}}. \quad (1)$$

现在设有 $k(k \geq 2)$ 个 p 元总体, 对其中任意两

个总体 G_m, G_n , 计算 X 到两总体 G_m, G_n 的马氏距离的平方差:

$$\begin{aligned} d^2(X, G_n) - d^2(X, G_m) \\ = -2[W_n(X) - W_m(X)]. \end{aligned} \quad (2)$$

式 (2) 中: $W_m(X) = (\Sigma^{-1} \mu_m)^T X - \frac{1}{2} \mu_m^T \Sigma^{-1} \mu_m$,

$$W_n(X) = (\Sigma^{-1} \mu_n)^T X - \frac{1}{2} \mu_n^T \Sigma^{-1} \mu_n.$$

由此可以推出:

$$\begin{cases} d^2(X, G_n) \geq d^2(X, G_m) \Leftrightarrow W_m(X) \geq W_n(X) \\ d^2(X, G_n) < d^2(X, G_m) \Leftrightarrow W_m(X) < W_n(X). \end{cases} \quad (3)$$

可得到多总体在总体协方差矩阵相等情况下的距离判别准则: 若总体 G_{n_0} 满足

$$W_{n_0}(X) = \max_{1 \leq n \leq k} W_n(X), \quad (4)$$

则判定 $X \in G_{n_0}$ 。

总体的均值向量 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k$ 和协方差矩阵 Σ 未知时, 可利用各总体的学习样本作估计。设来自总体 G_n 的训练样本为 $X_1^{(n)}, X_2^{(n)}, \dots, X_{l_n}^{(n)}$ ($n = 1, 2, \dots, k$; l_n 是总体 G_n 学习样本的个数), 那么总体 G_n 均值向量 μ_n 的无偏估计为:

$$\bar{X}^{(n)} = \frac{1}{l_n} \sum_{i=1}^{l_n} X_i^{(n)}; \quad (5)$$

$$S_n = \frac{1}{l_n - 1} \sum_{i=1}^{l_n} \left[X_i^{(n)} - \bar{X}^{(n)} \right] \left[X_i^{(n)} - \bar{X}^{(n)} \right]^T. \quad (6)$$

则 Σ 的一个联合估计为

$$\begin{aligned} \hat{\Sigma} &= \frac{1}{1-k} \left[(l_1 - 1) S_1 + \dots + (l_k - 1) S_k \right] \\ &= S, \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $l = \sum_{n=1}^k l_{n_0}$

把 $\bar{X}^{(n)}$ 、 S 代替 μ_n 、 Σ 得到 $W_n(X)$ 的估计 $\hat{W}_n(X) = (S^{-1} \bar{X}^{(n)})^T X - \frac{1}{2} \left[\bar{X}^{(n)} \right]^T S^{-1} \bar{X}^{(n)}$ 。这样多总体的判别准则式 (4) 可转换为: 若总体 G_{n_0} 满足

$$\hat{W}_{n_0}(X) = \max_{1 \leq n \leq k} \hat{W}_n(X), \quad (8)$$

则 $X \in G_{n_0}$ 。

1 2 误判率的确定

为检验上述判别准则的判别能力, 可以采用回代估计法计算该准则的误判率。计算步骤^[15]为 将各总体所有的学习样本, 逐个代入式 (8) 的判别准则中判别其归属, 然后可以得到误判样本个数与学习样本总个数的比值, 即误判率的回代估计。

2 桩基支护方式优选的距离判别分析模型

为了使桩基支护方式优选更加具有代表性, 需要利用历史上的大量数据作为学习样本进行训练, 在此以文献 [5] 所提供的大量历史数据为例, 具体说明距离判别分析方法如何在桩基支护方案的优选中如何应用。共有 44 个历史样本, 其中 40 个作为训练样本, 另外 4 个作为预测样本 (见表 1)。涉及钻孔灌注桩、旋喷桩和旋喷灌注混合桩 3 种支护桩型。钻孔灌注桩是在泥浆护壁条件下钻进, 借助泥浆的循环将孔内碎渣排出孔外成孔, 然后清孔, 吊入钢筋笼并利用导管浇注水下混凝土的一类非挤土桩。具有施工无振动、无噪音, 对周围环境影响小, 墙身强度高、刚度大, 支护稳定性好、变形小等特点;

旋喷桩是利用高压经过旋转的喷嘴将水泥浆喷入土层与土体混合形成水泥土加固体, 相互搭接形成排桩, 用来挡土和止水。具有施工设备结构紧凑、体积小、机动性强、占地少、并且施工机具的振动小, 噪音也较低等特点; 旋喷灌注混合桩是采用钻孔灌注桩和旋喷桩联合支护, 利用旋喷桩对钻孔灌注桩进行搭接。除具有两种桩型的共同优点外, 可以解决钻孔灌注桩桩间缝隙水土流失的弊端, 解决止水问题。由于软土的性能十分复杂, 所以输入点确定为 10 个: 包括 X_1 天然含水量 $w, \%$; X_2 重度 $\gamma, (\text{kN} \cdot \text{m})$; X_3 内摩擦角 $\Phi, (^\circ)$; X_4 粘结力 c, kPa ; X_5 渗透系数 $K_v, (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$; X_6 基坑的长度 L, m ; X_7 宽度 B, m ; X_8 深度 H, m ; X_9 地下水位 h, m ; X_{10} 工期状况。输出层根据输出的需要确定为 3 个, 分别对应于钻孔灌注桩 I (即总体 G_1), 旋喷桩 II (即总体 G_2), 旋喷和灌注混合桩 III (即总体 G_3)。判别层为 3 个判别函数 $\hat{W}_i(X)$ 。对历史数据进行分析, 因为有定量和定性指标, 必须对定性指标进行量化。如对工期状况进行量化, 对不同的状况进行了赋值, 状况一般、中等和紧张分别赋值 1、2 和 3 结果如表 2 所示。

表 1 桩基支护优选方案原始数据[†]
Table 1 Original data of optimum schemes of pile foundation supporting

序号	判别指标										实际支护方式
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	
1	23.1	19.4	30.2	20.0	35.20	75.0	52.0	8.2	1.4	一般	灌注桩
2	32.4	19.5	30.5	11.0	142.00	92.1	19.2	9.5	0.9	紧张	混合桩
3	27.0	19.7	29.4	22.5	40.20	125.0	78.0	13.2	3.8	中等	旋喷桩
4	24.0	19.8	31.1	19.0	41.00	125.0	78.0	13.2	3.8	中等	旋喷桩
5	29.4	19.2	30.3	13.0	138.00	92.1	19.2	9.5	0.9	紧张	混合桩
6	22.6	20.1	28.7	19.0	36.40	73.0	62.0	9.2	1.6	一般	灌注桩
7	26.8	19.4	24.9	21.6	3.95	125.0	78.0	13.2	3.8	中等	旋喷桩
8	20.8	20.4	22.5	19.8	31.20	64.0	48.0	7.8	1.2	一般	灌注桩
9	24.9	20.3	31.5	23.0	40.50	73.0	62.0	9.2	1.6	一般	灌注桩
10	29.1	19.5	20.4	31.5	1.26	92.1	19.2	9.5	0.9	紧张	混合桩
11	22.0	19.9	28.7	18.0	34.20	62.0	44.0	7.8	1.1	一般	灌注桩
12	18.9	21.1	26.6	19.0	29.80	77.0	54.0	6.5	1.0	一般	灌注桩
13	20.8	19.7	28.5	17.0	1.64	62.0	44.0	7.8	1.1	一般	灌注桩
14	17.2	21.3	26.6	18.7	35.60	77.0	54.0	6.5	1.0	一般	灌注桩
15	35.2	18.7	32.4	12.1	156.00	90.0	20.5	9.5	0.9	紧张	混合桩
16	16.6	19.9	25.7	18.8	31.40	77.0	54.0	6.5	1.0	一般	灌注桩
17	20.4	20.3	27.9	18.0	1.78	62.0	44.0	7.8	1.1	一般	灌注桩
18	22.4	19.9	30.5	22.0	37.80	75.0	52.0	8.2	1.4	一般	灌注桩
19	26.3	19.5	27.7	23.6	3.98	125.0	78.0	13.2	3.8	中等	旋喷桩
20	20.4	20.5	26.8	19.0	1.90	62.0	44.0	7.8	1.1	一般	灌注桩

续表 1
Continued table 1

序号	判别指标										实际支护方式
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	
21	23.9	20.4	31.4	21.5	40.40	75.0	52.0	8.2	1.4	一般	灌注桩
22	26.3	19.8	31.6	16.0	1.28	92.1	19.2	9.5	0.9	紧张	灌注桩
23	25.6	19.9	34.2	24.1	34.00	73.0	62.0	9.2	1.6	一般	灌注桩
24	27.7	20.0	25.8	23.1	3.87	125.0	78.0	13.2	3.8	中等	旋喷桩
25	21.2	20.5	24.6	20.3	37.80	73.0	62.0	9.2	1.6	一般	灌注桩
26	19.0	20.6	24.9	19.0	32.80	77.0	54.0	6.5	1.0	一般	灌注桩
27	22.4	20.3	26.7	17.8	36.40	77.0	54.0	6.5	1.0	一般	灌注桩
28	26.2	19.7	29.6	22.0	3.28	115.0	70.0	11.3	2.6	中等	旋喷桩
29	27.5	20.2	32.7	23.1	3.56	115.0	70.0	11.3	2.6	中等	旋喷桩
30	24.3	19.9	27.8	21.0	3.56	115.0	70.0	11.3	2.6	中等	旋喷桩
31	35.1	18.5	31.4	22.5	5.25	98.0	56.0	8.4	1.2	一般	灌注桩
32	22.7	20.6	29.7	19.0	37.80	62.0	44.0	7.8	1.1	一般	灌注桩
33	23.0	19.2	31.6	10.5	74.00	115.0	56.0	10.4	0.9	紧张	混合桩
34	25.3	20.0	34.5	8.7	6.50	115.0	56.0	10.4	0.9	一般	混合桩
35	26.8	19.8	28.5	21.6	3.44	115.0	70.0	11.3	2.6	中等	旋喷桩
36	24.4	20.0	36.0	25.3	32.80	73.0	62.0	9.2	1.6	一般	灌注桩
37	29.4	19.5	20.1	32.0	1.28	56.0	34.0	9.7	2.6	一般	混合桩
38	28.1	19.3	17.8	11.1	1.82	50.0	25.0	8.8	3.8	中等	灌注桩
39	31.7	18.7	30.5	4.2	5.44	103.0	56.0	7.8	1.0	一般	灌注桩
40	28.7	19.3	28.5	15.0	1.82	55.0	29.7	9.8	1.6	一般	灌注桩
1*	28.8	19.9	30.5	24.7	5.45	98.0	56.0	8.4	1.2	一般	灌注桩
2*	23.1	20.4	33.4	9.5	78.00	115.0	56.0	10.4	0.9	紧张	混合桩
3*	27.9	19.4	26.9	24.1	3.53	115.0	70.0	11.3	2.6	中等	旋喷桩
4*	34.7	18.7	32.0	5.6	19.80	98.0	56.0	8.4	1.2	一般	灌注桩

†* 为预测样本, 下同。

表 2 距离判别分析模型的学习样本
Table 2 Training samples for the distance discriminant analysis model

序号	判别指标										实际支护方式	距离判别方式
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}		
1	23.1	19.4	30.2	20.0	35.20	75.0	52.0	8.2	1.4	1	I	I
2	32.4	19.5	30.5	11.0	142.00	92.1	19.2	9.5	0.9	3	III	III
3	27.0	19.7	29.4	22.5	40.20	125.0	78.0	13.2	3.8	2	II	II
4	24.0	19.8	31.1	19.0	41.00	125.0	78.0	13.2	3.8	2	II	II
5	29.4	19.2	30.3	13.0	138.00	92.1	19.2	9.5	0.9	3	III	III
6	22.6	20.1	28.7	19.0	36.40	73.0	62.0	9.2	1.6	1	I	I
7	26.8	19.4	24.9	21.6	3.95	125.0	78.0	13.2	3.8	2	II	II
8	20.8	20.4	22.5	19.8	31.20	64.0	48.0	7.8	1.2	1	I	I
9	24.9	20.3	31.5	23.0	40.50	73.0	62.0	9.2	1.6	1	I	I
10	29.1	19.5	20.4	31.5	1.26	92.1	19.2	9.5	0.9	3	III	III
11	22.0	19.9	28.7	18.0	34.20	62.0	44.0	7.8	1.1	1	I	I
12	18.9	21.1	26.6	19.0	29.80	77.0	54.0	6.5	1.0	1	I	I
13	20.8	19.7	28.5	17.0	1.64	62.0	44.0	7.8	1.1	1	I	I
14	17.2	21.3	26.6	18.7	35.60	77.0	54.0	6.5	1.0	1	I	I
15	35.2	18.7	32.4	12.1	156.00	90.0	20.5	9.5	0.9	3	III	III
16	16.6	19.9	25.7	18.8	31.40	77.0	54.0	6.5	1.0	1	I	I
17	20.4	20.3	27.9	18.0	1.78	62.0	44.0	7.8	1.1	1	I	I
18	22.4	19.9	30.5	22.0	37.80	75.0	52.0	8.2	1.4	1	I	I
19	26.3	19.5	27.7	23.6	3.98	125.0	78.0	13.2	3.8	2	II	II
20	20.4	20.5	26.8	19.0	1.90	62.0	44.0	7.8	1.1	1	I	I

续表 2
Continued table 2

序号	判别指标										实际支护方式	距离判别方式
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}		
21	23.9	20.4	31.4	21.5	40.40	75.0	52.0	8.2	1.4	1	I	I
22	26.3	19.8	31.6	16.0	1.28	92.1	19.2	9.5	0.9	3	I	I
23	25.6	19.9	34.2	24.1	34.00	73.0	62.0	9.2	1.6	1	I	III
24	27.7	20.0	25.8	23.1	3.87	125.0	78.0	13.2	3.8	2	II	II
25	21.2	20.5	24.6	20.3	37.80	73.0	62.0	9.2	1.6	1	I	I
26	19.0	20.6	24.9	19.0	32.80	77.0	54.0	6.5	1.0	1	I	I
27	22.4	20.3	26.7	17.8	36.40	77.0	54.0	6.5	1.0	1	I	I
28	26.2	19.7	29.6	22.0	3.28	115.0	70.0	11.3	2.6	2	II	II
29	27.5	20.2	32.7	23.1	3.56	115.0	70.0	11.3	2.6	2	II	II
30	24.3	19.9	27.8	21.0	3.56	115.0	70.0	11.3	2.6	2	II	II
31	35.1	18.5	31.4	22.5	5.25	98.0	56.0	8.4	1.2	1	I	I
32	22.7	20.6	29.7	19.0	37.80	62.0	44.0	7.8	1.1	1	I	I
33	23.0	19.2	31.6	10.5	74.00	115.0	56.0	10.4	0.9	3	III	III
34	25.3	20.0	34.5	8.7	6.50	115.0	56.0	10.4	0.9	1	III	III
35	26.8	19.8	28.5	21.6	3.44	115.0	70.0	11.3	2.6	2	II	II
36	24.4	20.0	36.0	25.3	32.80	73.0	62.0	9.2	1.6	1	I	I
37	29.4	19.5	20.1	32.0	1.28	56.0	34.0	9.7	2.6	1	III	III
38	28.1	19.3	17.8	11.1	1.82	50.0	25.0	8.8	3.8	2	I	I
39	31.7	18.7	30.5	4.2	5.44	103.0	56.0	7.8	1.0	1	I	I
40	28.7	19.3	28.5	15.0	1.82	55.0	29.7	9.8	1.6	1	I	I

利用 40 个量化后的样本, 根据距离判别分析的原理, 建立桩基支护方式优选的距离判别分析模型。以这 3 种支护方式作为 3 个不同的总体, 利用距离判别分析方法进行计算, 得到 3 个判别函数如下:

$$\begin{aligned} \hat{W}_1(X) = & -2196 + 20.89X_1 + 186.38X_2 + \\ & 0.71X_3 - 2.81X_4 - 0.48X_5 - 0.10X_6 + \\ & 2.20X_7 + 5.08X_8 + 14.00X_9 + 48.84X_{10}; \\ \hat{W}_2(X) = & -2376 + 20.78X_1 + 190.52X_2 + \\ & 0.43X_3 - 2.36X_4 - 0.46X_5 + 0.49X_6 + \\ & 2.11X_7 + 7.81X_8 + 21.73X_9 + 50.10X_{10} \\ \hat{W}_3(X) = & -2216 + 20.75X_1 + 186.18X_2 - \\ & 0.30X_3 - 2.48X_4 - 0.36X_5 + 0.31X_6 + \\ & 1.76X_7 + 10.00X_8 + 9.66X_9 + 42.98X_{10} \end{aligned}$$

模型训练好后, 利用回代估计法进行检验, 结果见表 3。由表 3 可以看出, 40 个学习样本中, 只有一个判别错误, 可以看出距离判别分析模型具有很好的判别能力。然后把 4 个预测样本代入该模型, 可以看出 4 个预测样本判别结果全部符合实际状况。合理选择支护形式对深基坑的建设有很重要的作用, 上述实例分析表明, 距离判别分析模型的选择能力强, 识别精度高, 可用到桩基支护方案的优选中,

具有很好的适用性。

表 3 距离判别分析模型的预测样本
Table 3 Forecast samples of distance discriminant analysis model

序号	判别指标					
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
1*	28.8	19.9	30.5	24.7	5.45	98.0
2*	23.1	20.4	33.4	9.50	78.0	115.0
3*	27.9	19.4	26.9	24.1	3.53	115.0
4*	34.7	18.7	32.0	5.60	19.8	98.0

序号	判别指标				实际支护方式	距离判别方式
	X_7	X_8	X_9	X_{10}		
1*	56.0	8.4	1.2	1	I	I
2*	56.0	10.4	0.9	3	III	III
3*	70.0	11.3	2.6	2	II	II
4*	56.0	8.4	1.2	1	I	I

3 结 论

深基坑桩基支护方式的选择是一个复杂的多因素决策问题。本文中基于距离判别分析理论, 建立了深基坑桩基支护方式选择的距离判别分析模型。研究表明, 距离判别分析模型结构固定, 判别能力很强, 为深基坑桩基支护方式的优选提供一条新途径, 并可为建筑行业中的其他类似的问题提供参

考价值。

为了更好地把距离判别分析模型进行应用, 应该从现场获得更多具有代表性的样本, 多方收集桩基支护案例的样本数据, 建立代表性强、数量充足的样本数据库, 进一步提高该模型的选择能力和准确性, 为深基坑桩基支护选择经济、可行的支护形式。

参考文献:

- [1] 徐杨青. 深基坑工程设计的优化原理与途径 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 248- 251
- [2] 徐杨青. 深基坑工程设计方案优化决策与评价模型研究 [J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 844- 848
- [3] Irshad Ahmad M Hesham El Naggar Akhtar Naem Khan Artificial neural network application to estimate kinematic soil pile interaction response parameters [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27(9): 892 - 905
- [4] Jiansen Zhang Ricardo O. Performance-based design and seismic reliability analysis using designed experiments and neural networks [J]. Probabilistic Engineering Mechanics 2004 19(3): 259- 267
- [5] 麻风海, 于晓曦, 杨 帆. BP神经网络在桩基支护方式中的应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(2): 97- 111
- [6] 陈 震. 桩基支护方式选择的新方法 [J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1335- 1337.
- [7] Liu YaChing Chen ChaoShi A new approach for application of rock mass classification on rock slope stability assessment [J]. Engineering Geology 2007, 89(1- 2): 129- 143.
- [8] ZHANG WEI LI X i b i n g GONG Feng-q i a n g Stability classification model of mine lane surrounding rock based on distance discriminant analysis method [J]. Journal of Central South University of Technology, 2008 15(1), 117- 120.
- [9] 宫凤强, 李夕兵. 距离判别分析法在岩体质量等级分类中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 191- 194.
- [10] 宫凤强, 李夕兵. 膨胀土等级分类中的距离判别分析法 [J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 463- 466
- [11] GONG Feng-q i a n g LIX i b i n g ZHANG Wei Overbreak forecast of underground opening by using Bayes discriminant analysis method [J]. Journal of Central South University of Technology, 2008 15(4), 498- 502.
- [12] 金志仁. 基于距离判别分析方法的砂土液化预测模型及应用 [J]. 岩土工程学报, 2008 30(5): 776- 780.
- [13] 王吉亮, 陈剑平, 杨 静. 距离判别分析方法在公路隧道围岩分类中的应用 [J]. 吉林大学学报, 2008 38(6): 999- 1004
- [14] 高惠璇. 应用多元统计分析 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2005
- [15] 范金城, 梅长林. 数据分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2002

[本文编校: 欧阳钦]