

人工神经网络模型在均匀设计试验数据处理中的应用

顾强生¹ 施 斌¹ 周红兵²

(1. 南京大学地球科学系, 江苏 南京 210093; 2. 盐城市水利局, 江苏 盐城 224008)

摘要 针对均匀设计方法在材料多因素试验中数据离散性大的问题, 提出采用人工神经网络模型对均匀设计试验数据进行处理, 建立了试验因素与结果之间的 BP 模型. 实际应用证明该方法不仅可大大减少试验工作量, 又可克服试验数据离散性大的问题, 并能得出满足工程要求的最优配方.

关键词 神经网络模型 均匀设计理论 试验数理处理

中图分类号: TU502 文献标识码: A 文章编号: 1000-1980(2001)02-0083-04

某大型挡潮闸建于 1966 年, 竣工运行后闸室均产生不同程度的不均匀沉陷. 其原因主要是左侧混凝土岸墙及其上下游浆砌石翼墙地基应力远大于通航孔地基应力(前者约为后者的 3 倍)以及持力土层比较松软. 在充分考虑各种受力条件下, 试图从减轻上部边荷载来解决不均匀沉降问题. 经多方案比选, 拟采用泡沫轻质材料作为挡墙后的填料.

泡沫轻质材料是由水泥、泡沫剂、砂(或粉煤灰)和水组成的, 此外加少量膨润土可使气孔封闭且均匀. 它用于土工填筑材料时主要有两个设计指标, 即抗压强度和湿容重. 一般来说, 强度越大, 湿容重也越大. 但是大多数工程要求轻质材料的湿容重较小, 强度较大. 试验的目的就是要寻求满足工程要求的最优配比. 由于各种因素对强度和湿容重的影响比较复杂, 且具有交叉影响, 因此, 配方优化需要进行大量的试验, 而采用均匀设计理论可大大减少试验工作量. 对离散性较大的试验数据的处理, 简单地用回归方法精度很差, 难以准确地反映各因素与强度的关系. 而人工神经网络模型具有很强的非线性映射能力, 对试验数据进行处理, 可以得到各组分对其强度的影响关系, 并可寻求最优配方. 实际应用达到了预期目的, 取得了显著的经济效益和社会效益.

1 人工神经网络模型的基本原理

由表 1 可看出, 12 组初选配比的试验结果隐含了轻质材料的原材料比例与其性能指标之间的定性关系

表 1 轻质材料均匀设计试验成果

Table 1 Experimental results of lightweight material

编号	水泥 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	土 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	砂 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	砂灰比	泡沫 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	湿密度 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	含气量 /%	抗压强度 /MPa
1	150	5.0	419	174	2.8	1.9	0.75	0.62	0.213
2	154	7.5	532	185	3.5	1.5	0.88	0.56	0.202
3	260	6.5	476	218	1.8	1.9	0.96	0.52	0.886
4	220	8.5	541	203	2.5	1.1	0.97	0.52	0.839
5	152	2.9	457	167	3.0	1.5	0.78	0.61	0.310
6	239	7.4	414	182	1.7	1.8	0.84	0.58	0.580
7	216	3.1	486	183	2.3	1.3	0.89	0.57	0.672
8	380	9.7	447	231	1.2	1.6	1.07	0.48	1.970
9	263	2.9	438	178	1.7	2.0	0.88	0.57	0.819
10	200	4.2	421	177	2.1	1.3	0.80	0.60	0.440
11	367	3.1	441	230	1.2	1.8	1.04	0.49	1.649
12	295	5.1	477	196	1.6	1.1	0.97	0.53	1.132

系.由于各因素之间的交叉影响,使得试验因素与其结果之间具有较强的离散性,因此,不适合用多元回归或逐步回归方法进行统计分析.

近年来广泛用于各个领域的BP人工神经网络技术具有很强的非线性映射能力,它通过网络内部权值的调整来拟合系统的输入输出关系,即只根据输入输出数据来建立模型.网络的统计信息储存在连接权矩阵内,故可以反映十分复杂的非线性关系,网络的输出端点个数不限,因而很适合于多因变量、多自变量统计中的建模.

如图1所示,典型的BP模型网络由3种类型的神经元组成^[1]接收外界刺激信息的输入层单元 O_i 、传递并处理信息的隐蔽单元 O_j 和输出响应信息的输出单元 O_k .图1中的输出 O_k 可以写为

$$O_k = f(e_k) = [1 + \exp(-e_k)]^{-1} \quad (1)$$

此处 $e_k = \sum_j B_j V_{jk} + \theta_k$, $B_j = 1/[1 + \exp(-g_j)]$, $g_j = \sum_i A_i W_{ij} + \gamma_j$, W, V 是连接权值, θ, γ 为阈值, A_i 则为输入单元的值.通过这样一系列的加权和交换,输入的信息即可在输出节点得到响应.可见权值是决定映射能力的关键, BP模型采取误差反向传播算法,即通过误差在各节点的传播来修正各连接权值.

设输入网络一组训练样本 A_i ,得到网络输出 O_k ,将此网络输出与样本的理想输出 t_k 相比较,其输出层的校正误差可以写为

$$d_k = (t_k - O_k) f'(e_k) \quad (2)$$

中间层各单元的校正误差为

$$b_j = (\sum_k V_{jk} d_k) f'(g_j) \quad (3)$$

于是可由下列式子计算调整量:

$$\Delta V_{jk} = \alpha d_k B_j \quad \Delta \theta_k = \alpha d_k \quad \Delta W_{ij} = \beta b_j A_i \quad \Delta \gamma_j = \beta B_j \quad (4)$$

其中 $0 < \alpha, \beta < 1$ 为学习系数.

这样,就可以修正输出单元相连接的那些权值,对其它权值的调整则需要将误差从输出层单元向输入层单元方向传播,然后再用相同的方法修正权值.通过多个样本的反复训练并朝减少偏差的方向修改权值,最后可得到满意的结果.

2 BP模型处理试验数据实例

2.1 轻质材料的配比试验设计方法及其试验结果

进行配方试验,必须进行试验设计.好的试验设计方法,可以只做少量的试验,又能概括全面,起到事半功倍的效果,而差的试验设计方法往往会造成人力、物力、财力的浪费.均匀设计方法是一种先进的试验设计方法,特别适合于多因素多水平的试验设计.例如,当试验中的 S 个因素且每个因素有 q 个水平时,若做全面试验共有 q^S 种组合,正交试验法是从这些组合中挑 q^2 个点,而均匀设计方法是利用数论中的一致分布理论选取 q 个点,并且只进行 q 次试验.对于泡沫轻质材料,其因素有4个,即为它的组成成分——水泥、膨润土、砂和泡沫剂,所加水量的多少按照满足稠度(即泡沫与水泥砂浆进行搅拌达到稳定时的泡沫水泥砂浆的稠度)要求时的含水量,水量可不作为一个因素来考虑,以减少因素数,使问题简化.一般试验的水平数至少应为因素数的3倍,故取水平数为12.若做全面试验需做20736次试验,若用正交试验设计需做144次试验,而按均匀设计法只需做12次试验.根据均匀设计表^[2]U*(12)的使用方法进行配比试验,得出的试验成果见表1.可见均匀设计法可大大节省试验工作量.采用先进的试验设计方法就必须有相应的试验处理手段,才能获得最优配方.回归方法是适合于单因变量的统计方法,对于多自变量多因变量模型已不适合,而神经网络是解决这一问题的最佳途径.

2.2 用BP模型处理试验数据

用神经网络处理试验数据分为两个阶段,第1阶段是监督学习,第2阶段是无监督学习.监督学习是网

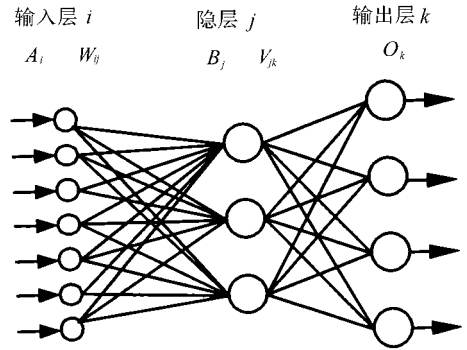


图1 BP模型3种单元类型

Fig.1 Three thpes of BP model

络通过已知输入模式进行训练,将材料的 4 个组分含量和湿容重作为输入单元,试验得出的结果抗压强度作为输出单元,采用 3 层网络,即输入层单元数为 5,输出层的单元数为 1,隐层单元数根据“试错法”^[3]确定,首先给定较小初始隐单元数,构成一个结构较小的 BP 网络,进行训练,如果训练次数很多或者在规定的训练次数内没有满足收敛条件,停止训练,逐渐增加隐单元数形成新的网络重新训练,经试算,隐单元数为 4 时训练效果较好,此时网络的结构为 5-4-1.按照下述规范化方法把训练样本数据规范到[0,1]区间,效果较好.即

$$X_i^p = \frac{x_i^p}{x_{i\max} + x_{i\min}}$$
$$T_j^p = \frac{t_j^p}{t_{j\max} + t_{j\min}}$$

$i = 1, 2, \dots, n$

$j = 1, 2, \dots, m$

(5)

(6)

式中: x_i^p, t_j^p ——试验资料的第 p 个实验样本的第 i 个输入值和第 j 个期望输出值; X_i^p, T_j^p ——规范化后第 p 个样本的第 i 个输入值和第 j 个期望输出值; $x_{i\max}, x_{i\min}$ ——样本的第 i 个输入的最大和最小值; n ——输入单元数; $t_{j\max}, t_{j\min}$ ——样本中第 j 个期望输出的最大和最小值; m ——输出单元数.

首先,用规范化的数据对网络进行训练,训练速度取 0.6,收敛精度为 0.1,网络训练 6 000 次达到精度要求.训练结果的相对误差小于 10%,基本上满足精度要求.无监督学习即是根据需要假设任意配比,用训练好的网络模型预测其强度值.为了获得某种组分对强度的影响规律,因此可固定其它组分,改变其中某一组分的含量.膨胀土只起泡沫的分散和封闭作用,对强度有所降低,为分析问题方便起见,只考虑某一种含量时的情况.

如果知道湿容重、水灰比、砂灰比,便可确定出配比.图 2 和图 3 是根据神经网络模型计算出的砂灰比与强度的关系以及强度和湿容重的关系, X, Y 坐标为规范化值.假设岩土工程填方的强度指标为 650 kPa,湿容重小于 0.91 g/cm^3 ,其规范化值分别为 0.3 和 0.5.由图 2 和图 3 可以看出,满足强度条件的砂灰比范围较大,且随着砂灰比的增大湿容重也增大.由图 3 知,湿容重小于 0.5 时砂灰比小于 0.5.比如当强度 0.3 时,湿容重 0.41,砂灰比 0.3;湿容重 0.5 时,砂灰比 0.5.根据式(5)(6)将其规范化值换算为真值,分别为:湿容重 0.75,砂灰比 1.41;湿容重 0.9,砂灰比 2.35.水灰比的大小与砂灰比有关,一般砂灰比越大水灰比越小,可通过试验确定.当湿容重为 0.75 时,砂灰比为 1.41,水灰比为 0.65;当湿容重为 0.91 时,砂灰比为 2.35,水灰比为 0.62.经换算,前者水泥含量为 245 kg/m^3 ,砂含量 345 kg/m^3 ;后者水泥含量为 235 kg/m^3 ,砂含量 552 kg/m^3 .泡沫剂量可视湿容重的大小来确定.如果要求湿容重较小,可取前者为最优配比,若湿容重无严格要求,可取后者为最优配比,因水泥含量少,可节省投资.因此,视工程设计指标要求,都能利用以上方法得出其满足设计指标的配比.

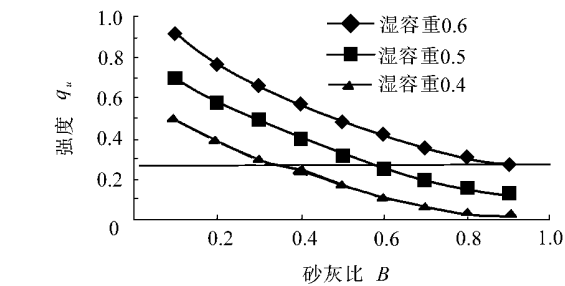


图 2 砂灰比与强度的关系
Fig.2 The relation between B and q_u

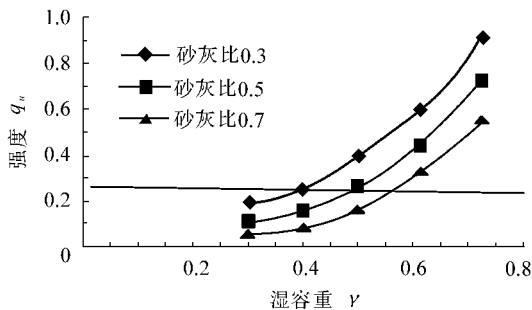


图 3 强度与湿容重的关系
Fig.3 The relation between q_u and γ

3 结 论

用人工神经网络 BP 模型处理泡沫轻质材料的均匀设计配方试验数据,可以利用训练好的模型,得出任意组分与强度之间的关系,从而可快捷地寻找满足工程设计指标要求的最优配比.试验采用均匀设计方法和人工神经网络模型处理试验数据,可以节省人力、物力、财力,且是一种行之有效的方法.

参考文献：

- [1] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表 [M]. 北京: 科学出版社, 1994. 35 ~ 72.
- [2] 张立明. 人工神经网络模型及其应用 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 1993. 105 ~ 130.
- [3] Raman H, Sunilkumar N. Multivariate modeling of water resources time series using artificial neural networks [J]. Hydrological Sciences Journal, 1995, 40(2): 145 ~ 163.

Application of Neural Network Model to Analysis of Experimental Data from Uniform Design Theory

GU Qiang-sheng¹, SHI Bin¹, ZHOU Hong-bing²

(1. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. Water Resources Bureau of Yancheng, Yancheng, Jiangsu Province 224008, China)

Abstract In consideration of data scatter in the uniform design method used in multi-factor experiment of material, it is proposed that the neural network model be used in the analysis of experimental data from the uniform design method. A BP model of factor and result is set up. Application shows that the method is effective and it can reduce the work load of experiment. And the method has solved the problem of experimental data scatter, besides, it can yield the optimum mix proportion of the material.

Key words neural network model; uniform design theory; experimental data analysis

中国学术期刊(光盘版)入编期刊 书生之家中华期刊网入编期刊

河海大学学报(哲学社会科学版)征订启事

(季刊 16开 96页 刊号:ISSN1008-3316 CN32-1521/C)

• 本刊以马列主义、毛泽东思想和邓小平理论为指导,坚持实事求是的思想路线,贯彻“双百”方针,弘扬时代主旋律,理论联系实际,为社会主义物质文明与精神文明建设服务。

• 本刊为哲学与社会科学类学术期刊,主要刊登哲学、政治学、文学、史学、语言学、法学、社会学、心理学、经济学、管理学、高等教育学等社会科学方面的研究成果、学术论文、综述等学术性文章。本刊可供上述有关专业的研究人员、管理人员和大专院校师生阅读与参考。

• 本刊由河海大学主办,每季末出版,国内外公开发行,每期定价 5 元,每期邮费 1 元,全年订费 24 元。欢迎广大读者订阅或直接与编辑部联系。联系地址:南京市西康路 1 号《河海大学学报(哲学社会科学版)》编辑部 邮政编码 210098。