

文章编号: 1005-0523(2006)02-0015-04

# BP 神经网络在悬浮桩复合地基沉降预测中的应用

汤梅芳, 王炳龙

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 针对悬浮桩加固深厚层软土地基, 提出了根据前期沉降观测资料进行沉降预测的 BP 神经网络模型. 工程实例验证表明: 该模型预测精度高, 简便易行, 可为今后的悬浮桩复合地基沉降预测和计算提供参考.

**关键词:** BP 神经网络; 沉降预测; 复合地基; 悬浮桩

中图分类号: TU-0

文献标识码: A

## 1 引言

采用粉喷桩加固深厚软土地基, 其桩端通常无法到达硬质土层, 此时桩体悬浮在软土中, 对于这种情况下的复合地基, 其地基沉降量的准确预测成了悬浮桩复合地基设计的关键. 目前依据沉降观测值预测沉降量的方法有多种: 双曲线法、沉降速率法、三点法等, 国内最常采用双曲线法<sup>[1]</sup>. 双曲线是一种纯经验的曲线配合方法, 根据实测沉降曲线的实际形态近似于一条双曲线, 所以采用双曲线来配合后, 通过双曲线外延来推得未知某时刻得沉降量或最终沉降量<sup>[2]</sup>. 其核心思想仍是线性回归<sup>[1]</sup>. 采用悬浮桩复合地基加固软土地基, 将改变地基土的物理性能以及排水固结速度等, 从而改变沉降曲线的形状, 使得地基沉降一时间曲线是非线性的, 因此用线性方法进行预测有其根本的局限性.

人工神经网络是一种由许许多多神经元组成的大规模非线性动态系统, 它具有较强的非线性动态处理能力, 具有大规模并行计算、分区储存、自组织、自适应、自学习等功能, 在不需要知道数据间的分布形式和变量间的关系的情况下, 从积累的工程实例中训练学习知识, 建立各影响因素之间的高度

非线性映射关系, 特别是对残缺不全或模糊随机不确定信息有较强的容错能力, 这些决定了神经网络方法在处理地基沉降预测分析方面具有较好的应用基础<sup>[3]</sup>. 据此, 本文利用人工神经网络较好强的非线性映射能力和强大的学习能力, 提出了基于 BP 神经网络悬浮桩复合地基沉降的预测模型, 较好地克服了现有线性回归预测模型的弊端, 并对某实际悬浮桩复合地基沉降进行了预测分析.

## 2 BP 学习算法<sup>[4]</sup>

BP 网络是误差逆传播(error back-propagation)网络的简称. 它由输入层、隐含层和输出层组成. 图 1 是 3 层 BP 网络结构示意图:

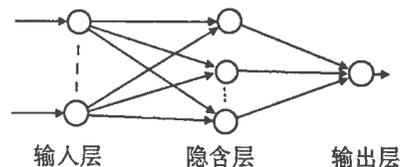


图 1 BP 神经网络模型

BP 网络按有教师学习方式训练, 当一对学习模式提供给网络以后, 其神经元的激活值将从输入层经各中间层向输出层传播, 在输出层的各神经

收稿日期: 2006-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(50078014)资助, 江苏省建设厅项目资助.

作者简介: 汤梅芳(1981-), 女, 江西万载人, 在读硕士研究生.

元输出对应于输入模式的网络响应. 然后按减少希望输出与实际输出误差的原则, 从输出层经中间层, 最后回到输入层逐层修正各连接权. 其学习过程可归结为模式顺传播、误差逆传播、循环记忆训练和学习结果判别 4 个过程, 其步骤为:

(1) 初始化, 给各连接权  $w_{ij}$ 、 $v_{ji}$  及阈值  $\theta_j$ ,  $\gamma_i$   $i=1, 2, \dots, n$   $j=1, 2, \dots, p$   $t=1, 2, \dots, q$   $k=1, 2, \dots, m$  赋予  $(0, 1)$  之间的随机值.

(2) 随机选取一模式对  $A_k = [a_1^k, a_2^k, \dots, a_n^k]$ ,  $Y_k = [y_1^k, y_2^k, \dots, y_q^k]$  提供给网络.

(3) 用输入模式  $A_k = [a_1^k, a_2^k, \dots, a_n^k]$ , 连接权  $w_{ij}$  和阈值  $\theta_j$  计算中间层各神经元的输入  $S_j$  (激活值), 然后用  $S_j$  通过激活函数:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (1)$$

计算中间层各单元的输出生  $b_j$ :

$$b_j = f(S_j) \quad (2)$$

其中  $S_j = \sum_{i=1}^n W_{ij} a_i - \theta_j$ .

(4) 用中间层的输出  $b_j$ , 连接权  $v_{ji}$  和阈值  $\gamma_i$  计算输出层各单元的输入  $l_i$  (激活值), 然后用  $l_i$  通过激活函数计算输出层各单元的响应  $c_i$ :

$$C_i = f(l_i) \quad (3)$$

式中:  $l_i = \sum_{j=1}^p V_{ji} \cdot b_j - \gamma_i$  ( $i=1, 2, \dots, q$ )

(5) 用希望输出模式  $Y_k = [y_1^k, y_2^k, \dots, y_q^k]$ , 网络实际输出层各单元的校正误差  $d_i^k$ :

$$d_i^k = (y_i^k - c_i) \cdot c_i \cdot (1 - c_i) \quad (i=1, 2, \dots, q) \quad (4)$$

(6) 用  $v_{ji}$ ,  $d_i$ ,  $b_j$  计算中间层的校正误差  $e_j^k$ :

$$e_j^k = \left[ \sum_{i=1}^q d_i \cdot V_{ji} \right] \cdot b_j (1 - b_j) \quad (j=1, 2, \dots, p) \quad (5)$$

(7) 用  $d_i^k$ ,  $b_j$ ,  $v_{ji}$  和  $\gamma_i$  计算下一轮的中间层和输出层之间的新连接权:

$$V_{ji}(N+1) = V_{ji}(N) + \alpha \cdot d_i^k \cdot b_j \quad (6)$$

$$\gamma_i(N+1) = \gamma_i(N) + \alpha \cdot d_i^k \quad (7)$$

式中  $N$  为学习次数.

(8) 用  $e_j^k$ ,  $a_i^k$ ,  $w_{ij}$  和  $\theta_j$  计算下一轮的输入层和中间层之间的新连接权:

$$W_{ij}(N+1) = W_{ij}(N) + \beta \cdot e_j^k \cdot a_i^k \quad (8)$$

$$\theta_j(N+1) = \theta_j(N) + \beta \cdot e_j^k \quad (9)$$

(9) 随机选取下一个学习模式对提供给网络返

回到第(3)步, 直至全部  $m$  个模式对训练完.

(10) 重新从  $m$  个学习模式对中随机选取一个模式对返回到第(3)步直至网络全局误差函数  $E$  小于预先设定的值(网络收敛)或学习回数大于预先设定(网络无法收敛)的数值.

(11) 学习结束: 在以上的学习步骤中(3)~(6)为输入学习模式的“顺传播过程”, (7)~(8)为网络误差的“逆传播过程”, (9)和(10)则完成训练和收敛过程.

### 3 沉降预测的 BP 模型

根据人工神经网络理论具体解决沉降预测问题包括以下 4 个步骤:

(1) 根据具体问题建立合适的网络结构, 即确定输入层、隐含层和输出层神经元数目.

(2) 建立学习样本集及期望输出.

(3) 确定样本收敛误差, 训练网络直至其收敛.

(4) 用收敛的网络进行预测.

### 4 模型应用

某工点软土地基采用悬浮桩处理方案, 其路基断面示意图如图 2. 桩长 16 m, 桩径 0.5 m, 桩间距 1.2 m, 梅花形布置. 路基填高 7 m ( $p_0 = 145.44$  kPa), 顶宽 12 m, 底宽 33 m, 边坡斜率 1:1.5. 工点地下水位线在地表以下 1.0 m 处. 图 3 为实测路基中心地表沉降随填土厚度和时间的变化曲线. 路堤从 1996 年 1 月 7 日开始分级填筑到 1996 年 10 月 20 日填筑完毕.

采用 BP 神经网络模型, 根据由填土开始到路堤填筑完成期间的沉降观测资料, 选取学习和训练样本如表 1, 共 41 组数据, 其中前 36 个为模型学习样本, 后 5 个为预测检验样本, 训练过程中, 学习率在 0.01~0.8 之间自适应变化, 样本收敛误差为  $10^{-4}$ . 其预测沉降与实际发生沉降的比较如表 2 所示, BP 网络模型的计算结果误差小, 精度高, 完全可以满足工程实际需要, 从而证明了用 BP 神经网络技术预测悬浮桩复合地基的沉降这一方法的可行性和有效性.

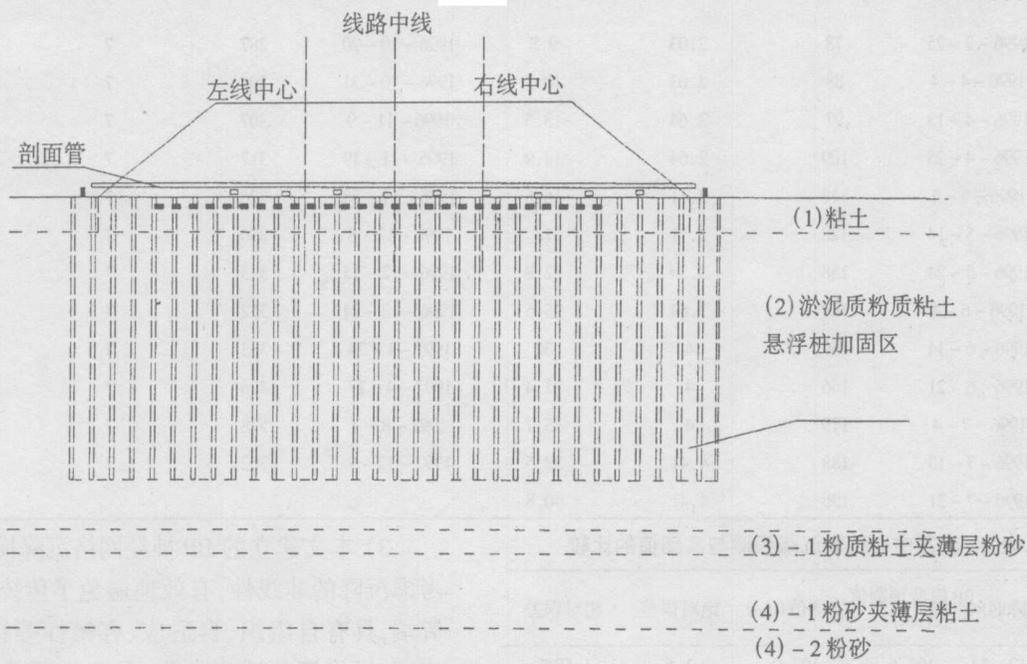


图2 路基断面示意图

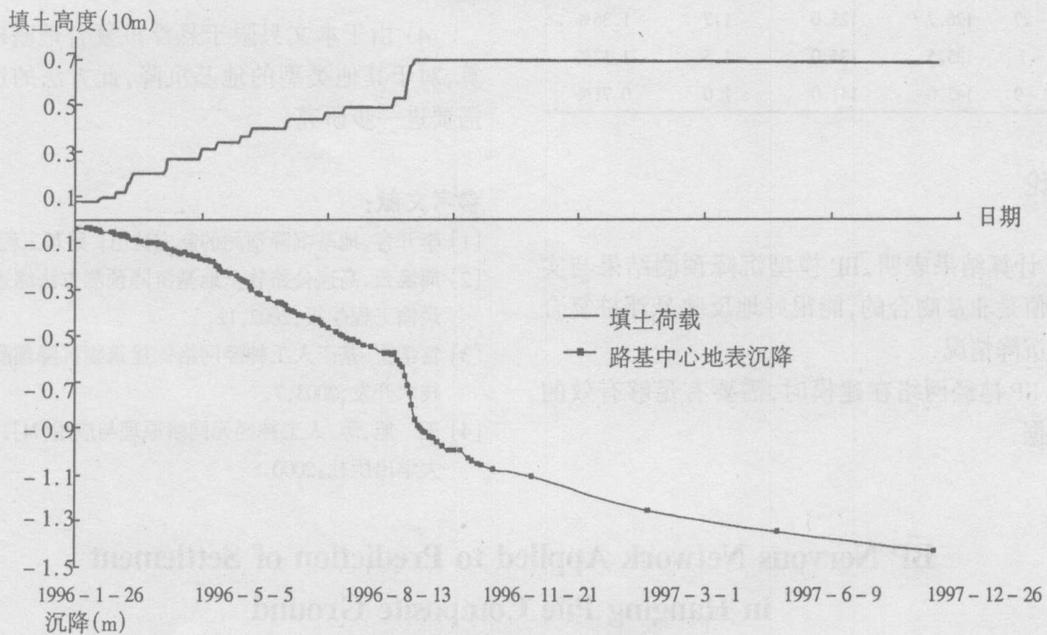


图3 路基中心地表实测沉降曲线

表1 学习和训练样本

日期	时间(天)	路堤填土高度(m)	路基中心地表实测沉降量(cm)	日期	时间(天)	路堤填土高度(m)	路基中心地表实测沉降量(cm)
1996-1-7	0	0.67	0	1996-8-3	209	4.41	43.1
1996-1-8	1	0.67	0	1996-8-10	216	4.71	45.8
1996-1-25	18	0.77	3	1996-8-23	229	4.71	49.9
1996-2-3	27	0.77	3.5	1996-9-1	238	4.92	52.1
1996-2-14	38	0.92	4.9	1996-9-11	248	4.92	54.3
1996-2-25	49	0.96	5.3	1996-9-17	254	4.92	55.1
1996-3-4	57	1.22	6.7	1996-10-2	269	4.92	57.6
1996-3-14	67	2.03	8.7	1996-10-12	279	5.34	63.4

1996-3-25	78	2.03	9.8	1996-10-20	287	7	80.4
1996-4-4	88	2.03	10.7	1996-10-31	298	7	92
1996-4-13	97	2.64	13.5	1996-11-9	307	7	95.6
1996-4-25	109	2.64	14.9	1996-11-19	317	7	99.1
1996-5-4	118	3.11	16.6	1996-11-28	326	7	99.3
1996-5-14	128	3.11	18	1996-12-8	336	7	103.7
1996-5-24	138	3.39	22.8	1996-12-15	343	7	105.5
1996-6-4	149	3.69	25.5	1996-12-24	352	7	107.0
1996-6-14	159	4	30	1997-1-24	383	7	110.0
1996-6-21	166	4	32.4	1997-4-27	476	7	125.0
1996-7-4	179	4	35.7	1997-8-7	578	7	134.0
1996-7-13	188	4.41	38.5	1997-12-9	702	7	141.0
1996-7-21	196	4.41	40.8				

表2 路基中心地表沉降预测与实测值的比较

预测沉降时间	BP 模型预测值 (cm)	实测值(cm)	绝对误差	相对误差
1996-12-24	108.6	107.0	1.6	1.50%
1997-1-24	114.1	110.0	4.1	3.73%
1997-4-27	126.7	125.0	1.7	1.36%
1997-8-7	135.5	134.0	1.5	1.12%
1997-12-9	142.0	141.0	1.0	0.71%

## 5 结论

1) 计算结果表明, BP 模型沉降预测结果与实际沉降值是非常吻合的, 能很好地反映悬浮桩复合地基的沉降情况.

2) BP 神经网络在建模时, 需要有足够有效的训练数据.

3) 本文建立的 BP 神经网络沉降模型能充分地考虑沉降的非线性, 有效地避免了传统方法的许多弊端, 具有自组织、自适应、容错性等特点. 计算精度高, 操作简便适应性强, 具有广阔的工程应用前景.

4) 由于本文只限于悬浮桩复合地基的沉降计算, 对于其他类型的地基沉降, 此方法的适用性还需要进一步研究.

## 参考文献:

- [1] 李开言. 地基沉降预测的新方法[J]. 路基工程, 2003, 3.
- [2] 周焕云. 高速公路软土地基沉降预测方法综述[J]. 交通运输工程学报, 2002, 12.
- [3] 雷学文. 基于人工神经网络的建筑物沉降预测[J]. 建筑技术开发, 2003, 7.
- [4] 王旭, 等. 人工神经网络原理与应用[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2000.

# BP Nervous Network Applied to Prediction of Settlement in Hanging Pile Composite Ground

TANG Mei-fang, WANG Bing-long

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** To solve the technical problem in settlement prediction of hanging pile composite ground, a new settlement prediction model according to the magnitude of the post-construction settlement is presented based on BP nervous network theory in this paper. The calculation results from an engineering example display that this method is more accurate and easier to be operated. It can be a reference to the forecast and calculation of settlement of hanging pile composite ground in the future.

**Key words:** BP nervous network; predicting settlement; composite ground; hanging pile