

基于遗传算法的BP神经网络模型在桩孔质量检测中的应用

徐启程¹,叶友林²,孙常春¹

(1. 沈阳建筑大学理学院,辽宁 沈阳 110168;2. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 将改进的神经网络模型应用于钻孔灌注桩桩孔质量的智能化识别,从而减少人为的误判、漏判情况. 方法 将遗传算法与神经网络模型有机地结合起来,建立桩孔质量检测的智能化模型,先利用遗传算法对神经网络的权值和阈值进行优化,再结合训练完成的神经网络模型对桩孔质量进行预测,同时根据现场数据建立三维分析图,通过预测结果与三维分析图的比对来验证模型的准确性. 结果 测试样本的仿真误差为0.005 75,训练样本的仿真误差为0.022 4;5、6号桩孔的预测结果为(0.001 2,0.999 9),(0.002 7,0.005 1),即5号桩质量为合格,6号桩质量为良好. 结论 通过预测结果与三维分析图的比对结果,可以得出基于遗传算法的神经网络模型能够较好地对孔灌注桩进行智能判别.

关键词 桩基检测;遗传算法;神经网络模型;阈值;三维分析模型

中图分类号 TU473.1

文献标志码 A

Application of BP Neural Network Model Based on Genetic Algorithm in Pile Quality Inspection

XU Qicheng¹, YE Youlin², SUN Changchun¹

(1. School of Science, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In this paper, the neural network model based on genetic algorithm is used to realize the intelligent identification of pile hole quality of bored pile, so as to reduce the human misjudgment and omission. This paper adopts the method of combining the genetic algorithm with the neural network model to establish the intelligent model of pile hole quality detection. Firstly, the genetic algorithm is used to optimize the weights and thresholds of the neural network, and then the neural network model is used to predict the quality of the pile hole, and the three-dimensional analysis chart is established according to the field data. The accuracy of the model is verified by the comparison between the prediction result and the three-dimensional analysis. As a result, the simulation error of the test sample is 0.005 75, and the simulation error of the training sample is

收稿日期:2017-05-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51678373)

作者简介:徐启程(1980—),男,副教授,主要从事智能优化算法方面研究.

0.022 41. And the prediction results of No. 5,6 pile are coded as (0.001 2,0.999 9),(0.002 7,0.005 1). According to the result of coding,it can be concluded that No. 5 pile is qualified and No. 6 pile is good. Conclusion:Based on the comparison between the predicted results and the three-dimensional analysis,it can be concluded that the neural network model based on genetic algorithm can intelligently discriminate the pile-piles.

Key words:pile foundation inspection;genetic algorithm;neural network model;threshold value;three-dimensional analysis model

随着我国现代化建设的加快,大型桥梁、高层建筑、海上作业平台等大量兴建,而桩基作为结构主体最基础的部分,其质量的好坏不仅关系到建筑结构的使用年限,更关系到人们的生命财产^[1-4]. 根据现场资料显示,桩孔灌注桩是地下工程中最常见的结构基础,根据现场施工阶段的不同,可以分为成孔和钻孔内灌注混凝土两阶段,而成孔质量的好坏直接影响到桩基的质量. 如何根据现场采集到孔槽的数据去智能化评判孔槽的质量,国内外学者进行了大量的研究^[5-8]. 江幸莲等^[9]提出了一种基于小波分析的桩基低应变检测方法;在此基础上,潘冬子^[10]通过现场测试提出小波分析和神经网络相结合的方法,这些研究多是集中在桩基的承载力方面,对形成问题桩的原因研究相对较少. 基于此,笔者针对钻孔灌注桩在成孔阶段一些质量问题进行分析,通过现场采集的实测数据,来对成孔质量的进行智能化分类,然后根据分类结果来跟实际结果进行对比,对比得出5号桩质量为合格,6号桩质量为良好. 通过实际的三维建模,可以发现在5号桩的10 m左右桩基平面出现了一定程度的错位,这也验证了模拟结果的正确性.

1 基于遗传算法的神经网络算法和模型的建立

1.1 遗传算法

遗传算法是由 Holland 教授提出的随机搜索算法,该算法借鉴了生物界的遗传机制和自然选择的基本思想. 因其在处理传统搜索算法难以解决的优化问题上的优势,又由

于计算机技术的发展,使得该算法在传统优化问题、信号处理、机器学习等领域得到了广泛的应用^[11]. 遗传算法虽然具有全局搜索能力强、自动化程度高等优点,但是也存在一些问题,比如对量级较大的数据处理存在一定的难度,并且要想得到确定的方程解需要对编码进行改进^[12-13]. 基于此,笔者采用 Sheff-field 遗传算法工具箱来进行优化算法设计.

1.2 神经网络

BP 神经网络算法是由 Rumelhart 根据人脑活动提出的一种前馈神经网络模型^[14]. 对于一些常规方法解决效果不佳以及不能用确定的关系去定量表述的系统,神经网络就显现出了它的优越性,该算法不依赖具体公式,而是针对数据的特征来对网络进行训练,因而在地下工程、桥梁抗风试验中得到了广泛的应用^[15-17].

神经网络由输入层、中间层、输出层三部分组成,根据输出结果与实际结果的比较来对权值和阈值进行调整,从而达到反馈调整的目的. 神经网络拓扑结构如图1所示.

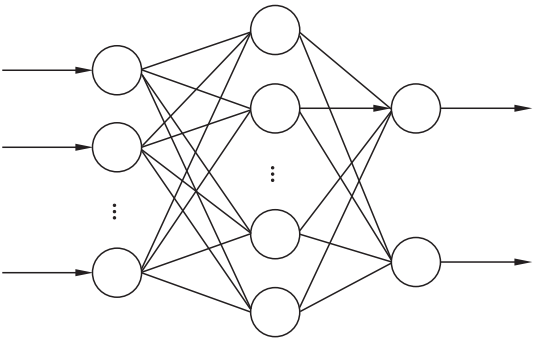


图1 神经网络拓扑结构图

Fig.1 Neural network topology diagram

神经网络的学习大概分为两个阶段:一是输入样本进行网络训练;二是输入测试样本进行预测分析.其学习过程如下.

假设第 n 次学习输出层的第 j 个单元输出 $y_j(n)$ 和期望输出 $d_j(n)$, 它们之间存在误差为

$$e_j(n) = d_j(n) - y_j(n). \quad (1)$$

这样可以得出输入层的瞬时误差值为

$$E(n) = \frac{1}{2} \sum_{j \in c} e_j^2(n). \quad (2)$$

C 代表所有的输出单元,训练样本误差的均值为

$$E_{\text{avg}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N E(n). \quad (3)$$

神经网络训练的目的就是使 E_{avg} 达到最小. 记 $v_j(n) = \sum_{i=0}^P w_{ji}(n) y_i(n)$, P 为单元 j 输入个数, 则 $y_j(n) = \varphi_j(v_j(n))$, 求 $E(n)$ 对 w_{ji} 的梯度为

$$\frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} = \frac{\partial E(n)}{\partial e_j(n)} \frac{\partial e_j(n)}{\partial y_j(n)} \frac{\partial y_j(n)}{\partial v_j(n)} \frac{\partial v_j(n)}{\partial w_{ji}(n)}. \quad (4)$$

其中, $\frac{\partial E(n)}{\partial e_j(n)} = e_j(n)$, $\frac{\partial e_j(n)}{\partial y_j(n)} = -1$, $\frac{\partial y_j(n)}{\partial v_j(n)} = \varphi'_j(v_j(n))$, $\frac{\partial v_j(n)}{\partial w_{ji}(n)} = y_i(n)$.

式(4)则可转变成:

$$\frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} = -e_j(n) \varphi'_j(v_j(n)) y_i(n). \quad (5)$$

权值 w_{ji} 的修正量为

$$\Delta w_{ji}(n) = -\eta \frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} = -\eta \delta_j(n) y_i(n), \quad (6)$$

$$\delta_j(n) = -\frac{\partial E(n)}{\partial e_j(n)} \frac{\partial e_j(n)}{\partial y_j(n)} \frac{\partial y_j(n)}{\partial v_j(n)} = e_j(n) \varphi'_j(v_j(n)). \quad (7)$$

$\delta_j(n)$ 为局部梯度. 通过两种情况分别讨论.

当输出单元 j 为一个单元时

$$\delta_j(n) = (d(n) - y_j(n)) \varphi'_j(v_j(n)). \quad (8)$$

当输出单元 j 为隐单元时

$$\delta_j(n) = \frac{\partial E(n)}{\partial y_j(n)} \varphi'_j(v_j(n)). \quad (9)$$

当 k 为输入单元时, 则

$$E(n) = \frac{1}{2} \sum_{k \in c} e_k^2(n). \quad (10)$$

将 $E(n)$ 对 $y_j(n)$ 求导, 可以得出:

$$\frac{\partial E(n)}{\partial y_j(n)} = \sum_{i=k}^n e_k(n) \frac{\partial e_k(n)}{\partial y_j(n)} = \sum_{i=k}^n e_k(n) \frac{\partial e_k(n)}{\partial v_k(n)} \frac{\partial v_k(n)}{\partial y_j(n)}. \quad (11)$$

由于 $e_k(n) = d_k(n) - y_k(n) = d_k(n) - \varphi_k(v_k(n))$,

所以

$$\frac{\partial e_k(n)}{\partial v_k(n)} = -\varphi'_k(v_k(n)). \quad (12)$$

其中, $v_k(n) = \sum_{j=0}^q w_{kj}(n) y_j(n)$, 表示 k 单元输出端个数.

求导可得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E(n)}{\partial y_j(n)} &= -\sum_{i=k}^n e_k(n) \rho'(v_k(n)) w_{kj}(n) = \\ &= -\sum_{i=k}^n \delta_k(n) w_{kj}(n). \end{aligned} \quad (13)$$

于是,

$$\delta_j(n) = \rho'_j(v_j(n)) \sum_{i=k}^n \delta_k(n) w_{kj}(n). \quad (14)$$

可以总结为

$$\Delta w_{ij} = \eta \cdot \delta_j(n) \cdot y_j(n) \quad (15)$$

式中: Δw_{ij} 为权值修正值; η 为学习步长; $\delta_j(n)$ 为局部梯度; $y_j(n)$ 为单元的输入信号.

通过分析发现,神经网络的网络结构、初始连接权值和阈值的选择对网络训练影响非常大,但是又无法准确获得,针对这些特点可以采用遗传算法对神经网络进行优化.笔者建立的遗传算法模型的流程图如图2所示.

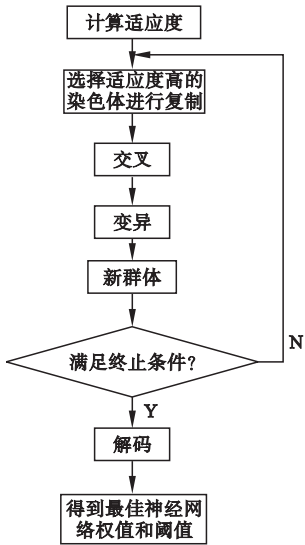


图 2 遗传算法模型的流程图

Fig. 2 Flow chart of genetic algorithm model

2 钻孔灌注桩形成原因分析

钻孔灌注桩是建筑工程中常见的桩基形式之一,它的作用是将上部建筑结构的荷载传递到深层稳定土层中和岩石层上,减少上部建筑结构的均匀沉降^[18-20]. 钻孔灌注桩的施工分为成孔和向钻孔内灌注混凝土两个阶段. 第一阶段的成孔作业是在地下并配合注水完成,因此质量控制难度大,有时复杂的地质条件易引起施工中的失误,最后可能导致成孔直径大小不一,成孔沿重力方向发生倾斜、成孔底部沉渣过厚等问题.

第一阶段成孔质量的好坏直接影响到桩基质量. 如果成孔有缩颈现象,则桩基的侧摩阻力和底部端承力降低;如果有扩径现象产生,则桩基的局部侧摩阻力增大,而其他部分侧摩阻力得不到充分发挥,易导致局部应力集中,发生破坏效应;同时如果成孔孔径偏大,桩基的混凝土灌注量增加,费用提高,造成不必要的浪费. 成孔的孔斜会改变桩基竖向受力的特性,减弱了桩基竖向承载力的有效发挥;同时给周围土层施加了一定程度的剪切力. 因为土的抗剪特性一般较低,成孔孔斜过大容易带来上部建筑结构的安全隐患,

并且还可能造成吊放钢筋笼困难、塌孔、钢筋保护层厚度不足等施工质量问题. 成孔孔径和孔斜是保证钻孔灌注桩施工质量的两项重要指标,因此,在第一阶段钻孔作业完成后,立即进行成孔孔径和孔斜的检测十分必要.

此外,如果成孔底部沉渣过厚,会使桩基桩长减小,降低桩基的竖向承载力,尤其是对以底部端承力为主的桩基,该问题更为突出. 成孔底部沉渣过厚还有可能导致桩基之间产生不均匀沉降,进而带来上部建筑结构的安全隐患. 因此,在第一阶段成孔作业完成并进行第一次清孔后,也应立即进行成孔底部沉渣厚度的检测;甚至在下放钢筋笼,并进行第二次清孔后,还可以再进行一次成孔底部沉渣厚度的检测.

3 工程案例分析

笔者于 2016 年参与上海市某商业楼的桩基施工部分,该工程采用钻孔灌注桩来承载主体结构,该钻孔灌注桩的设计桩径为 850 mm,设计孔深为 17.5 m,现场采用泥浆护臂的施工工艺来进行钻孔,在该桩基成孔后由检测人员采用差动线圈无触点测量法,通过测量臂的位移带动差动线圈产生的感应电位差来测量并记录钻孔检测的数据. 笔者选取了其中比较具有代表性的六组桩径数据进行分析,测得数据如表 1 所示.

由于现场各个孔径有一定的差别,所以需要现场采集的数据进行归一化处理,以便于更加直观地对偏差比较大的桩径进行判断. 笔者结合现行规范和遗传算法的二进制编码原则,根据不同桩径特征来进行编码(见表 2),选取其中 6 组桩径进行计算,现场技术人员由实测数据,最后把前 4 组数据作为训练样本,编码分别为(0,0),(1,0),(0,0),(0,0). 后 2 组数据作为测试样本,它们的二进制编码分别为(0,0),(1,0). 先通过前 4 组数据和编码的结果对系统进行训练,然后把后两组桩径数据输入已经训练好的系

表 1 钻孔灌注桩孔径随深度的变化数据

Table 1 Data of borehole variation with depth of bored pile

深度/m	1 号桩孔径/ mm	2 号桩孔径/ mm	3 号桩孔径/ mm	4 号桩孔径/ mm	5 号桩孔径/ mm	6 号桩孔径/ mm
1.30	869	661	861	1 108	831	666
2.30	866	659	858	871	873	659
3.30	882	667	874	883	853	657
4.30	891	666	883	866	815	650
5.61	866	660	858	870	842	663
6.91	865	665	857	897	857	684
7.23	854	656	847	866	847	672
8.27	894	658	886	881	855	659
9.48	895	651	887	908	837	661
10.68	863	659	855	884	843	659
11.80	869	704	861	882	870	689
12.19	867	687	860	874	845	675
13.40	876	684	869	913	848	648
14.10	868	680	860	926	831	623
15.52	868	657	861	930	836	623
16.96	870	656	862	924	841	623
17.80	870	648	863	923	846	623
18.11	864	655	857	892	846	656
19.06	865	635	857	888	849	657
20.68	866	656	859	887	850	656

表 2 不同情况下孔径的二进制编码

Table 2 Bore coding of aperture in different situations

孔径特征	结果	二进制编码
孔径最小值不小于设计桩径值,平均孔径值不大于设计桩径值的 1.1 倍,孔径最大值 不大于设计桩径值的 1.3 倍,无明显的扩径或坍塌现象	良好	(0,0)
孔径最小值不小于设计桩径值,局部存在明显的扩径或坍塌现象	合格	(0,1)
孔径最小值小于设计桩径值	不合格	(1,0)

统,最后得出编码结果与实测得出的结论进行比较. 如果结果一致,说明该方法的正确性,然后再建立桩孔的三维分析图来对上述的结论进行进一步的验证,并且可以非常直观对检测人员给出的结果进行判断;如果不一致,这也证明了这一方法有待进一步研究.

而对于神经网络部分,输入层神经元个数设为 20,而中间层神经元个数设计为 41,最后的输出层为两列的二进制编码,所以神

经网络的拓扑结构为 20—41—2,对于建立好的三层网络结构,需要预先的估算出权值和阈值的个数,这样便于遗传算法对权值和阈值的优化,避免因遗传算法的参数选取不合适而陷入长时间循环中,这里需要优化的权值个数为 104 个,需要优化的阈值数量为 43 个,进而可以设计出遗传算法的具体参数如表 3 所示.

表3 遗传算法运行参数设定

Table 3 Genetic algorithm operating parameters

种群大小	最大遗传代数	变量的二进制位数	交叉概率	变异概率	代沟
40	50	10	0.7	0.01	0.95

4 结果分析

笔者根据现场测得的数据,先把训练样本输入建立的系统,通过遗传算法对神经网络的权值和阈值进行优化,待训练误差满足要求后,再对测试样本进行分析,最后可以得出五号桩和六号桩的预测二进制编码结果分别为(0.001 2,0.999 9),(0.002 7,0.005 1),

并把预测结果与表2中二进制编码进行比较,可以发现5、6号桩比较接近二进制编码(0,1)、(0,0),而且测试样本的仿真误差为0.005 75,训练样本的仿真误差为0.022 41.所以5号桩为合格桩,6号桩为良好桩.误差变化随遗传代数之间的关系的进化过程和拟合的回归曲线如图3所示.

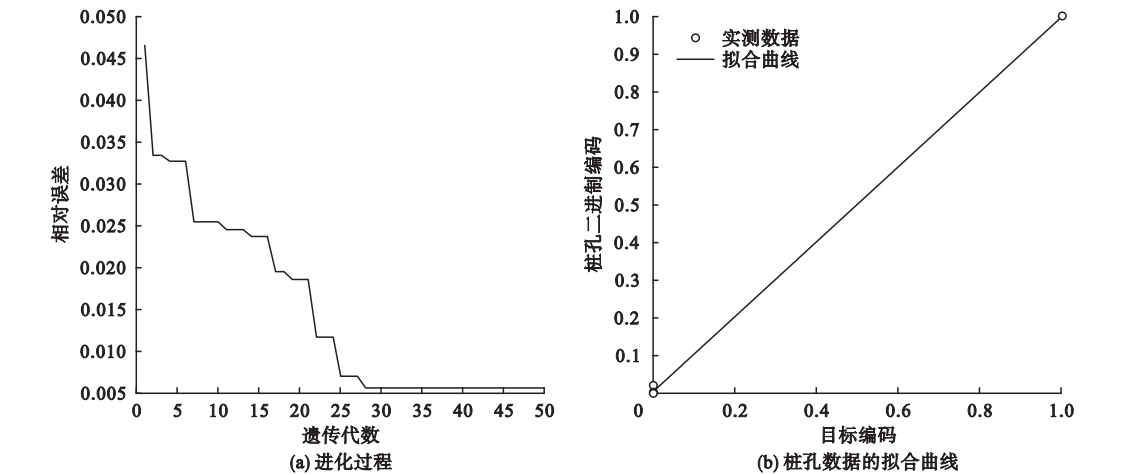


图3 遗传算法优化神经网络模型的结果

Fig. 3 The model results of genetic algorithm to optimize neural network

根据采集的钻孔灌注桩桩孔的方位、臂角度、臂距离随着深度变化采集的数据来建立三维分析模型和孔直径随孔深建立的模型,这样便于做出更为直接分析,从而分析出传统方式由质检人员靠经验分析而带来的误判,并且从侧面也验证了建立的基于遗传算法的神经网络模型正确性.三维分析结果如图4所示.

图4(b)中左边的曲线中蓝线和绿线代表从桩孔的立面测得桩径边缘线随深度的变化曲线,蓝线和绿线中间的红线代表了桩的中心线随深度的变化曲线桩径边缘线随深度的变化曲线;同理,右边三条曲线中的红线代表了桩孔正面测得的桩径边缘线随深度的变

化曲线,中间蓝线代表了桩的中心线随深度的变化曲线桩径边缘线随深度的变化曲线.

从图3可以看出,大概在28代左右时,误差开始趋于稳定,约为0.005 75,从误差值的大小可知模型设置的遗传算法的参数是合理的,由 $R=0.999\ 83$ 可以反映出拟合效果非常好.

从图4建立的三维分析模型,可看出桩孔的桩径和桩的中心线随桩孔深度的变化关系,大约在10 m的位置桩径发生了较小的错位,但是对桩的中心线影响不大,在一定程度上不会影响桩的受力性能,这也从侧面验证了建立模型的正确性.

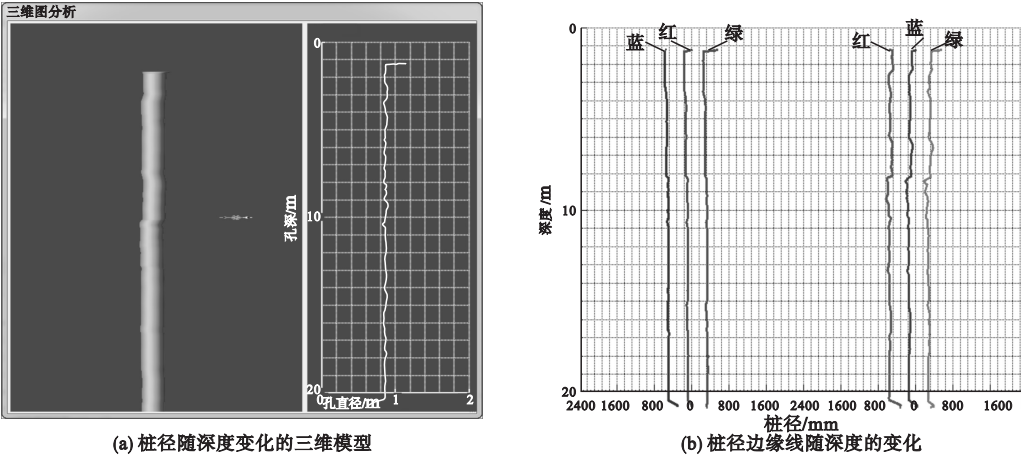


图4 三维分析结果

Fig.4 The results of three-dimensional analysis

5 结 论

- (1)通过预测结果与三维分析图的比对结果,可以得出基于遗传算法的神经网络模型能够较好的对孔灌注桩进行智能判别。
- (2)对不同角度桩径大小的分析可知,用桩径边缘线的中间值代表桩孔的中轴线,中轴线的变化趋势在一定程度上反映了桩基承载能力的大小,从而可以从侧面判定桩的类别,在实际工程中具有重要的指导意义。

参考文献

[1] 张金勇. 市政桥梁桩基施工中反循环钻成孔施工技术 [J]. 城市建设理论研究, 2017 (22):166.
(ZHANG Jinyong. Reverse circulation drilling construction technology in municipal bridge pile foundation construction [J]. Urban construction theory research, 2017(22):166.)

[2] 廖秀宇, 韦猛, 李奉霖. 地质雷达检测桥梁桩基孔底的技术方法及应用 [J]. 路基工程, 2016(4):223-226.
(LIAO Xiuyu, WEI Meng, LI Fenglin. Technical method and application of GPR detection on hole bottom of bridge pile foundation [J]. Subgrade engineering, 2016(4):223-226.)

[3] 王端, 周志军, 吕彦达, 等. 湿陷性黄土中成孔方式对桩基承载力影响试验研究 [J]. 岩土力学, 2015, 36(10):2927-2933.
(WANG Duan, ZHOU Zhijun, Lü Yanda, et al. An experimental study of influence of drilling method on the bearing capacity of pile foundation in collapsible loess area [J]. Rock

and soil mechanics, 2015, 36 (10): 2927 - 2933.)

[4] 宇德忠, 程培峰, 季成, 等. 岛状多年冻土地区桥梁桩基回冻后承载力的静载与动测对比试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34 (增刊1):2845-2853.
(YU Dezhong, CHENG Peifeng, JI Cheng, et al. Static and dynamic contrast test for bearing capacity of refrozen bridge pile foundation in patchy permafrost regions [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2015, 34(S1):2845-2853.)

[5] 王立峰. 盾构施工对桩基的影响及桩基近邻度划分 [J]. 岩土力学, 2014, 35 (增刊2):319-324.
(WANG Lifeng. Shield construction influences on piles and classification of adjacent pile degree [J]. Rock and soil mechanics, 2014, 35 (S2):319-324.)

[6] 李志伟. 软土地基邻近堆载对桥梁桩基偏位的影响研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34 (12):3594-3600.
(LI Zhiwei. Study of influence of surcharge load on lateral displacement of bridge piled foundation in soft ground [J]. Rock and soil mechanics, 2013, 34(12):3594-3600.)

[7] 李永波, 张鸿儒, 全克江, 等. 冻融条件下模型桩基水平动力试验研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33(2):433-438.
(LI Yongbo, ZHANG Hongru, QUAN Ke-jiang, et al. Experimental study of model pile foundations under lateral dynamic load in frozen and thawed soils [J]. Rock and soil mechanics, 2012, 33(2):433-438.)

[8] 章荣军, 郑俊杰, 丁烈云, 等. 成孔切槽引起邻近桩基沉降规律及控制措施 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2011, 39 (4):114-118.

- (ZHANG Rongjun, ZHENG Junjie, DING Lieyun, et al. Additional settlement induced by hole-boring and grooves on an adjacent pile foundation and its control[J]. Journal of hua-zhong university of science and technology (natural science edition), 2011, 39(4): 114 – 118.)
- [9] 江幸莲. 基于小波分析的桩基低应变检测数值模拟及方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
(JIANG Xinglian, The numerical simulation and experimental research on low-strain integrity testing based on wavelet analysis [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.)
- [10] 潘冬子, 章光, 刘世奇, 等. 混凝土梁无损检测新技术及其进展[J]. 公路, 2004(2): 18 – 23.
(PAN Dongzi, ZHANG Guang, LIU Shiqi, et al. New non-destructive testing techniques and their evolution of concrete beams [J]. Highway, 2004(2): 18 – 23.)
- [11] 秦国华, 谢文斌, 王华敏. 基于神经网络与遗传算法的刀具磨损检测与控制[J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1314 – 1321.
(QIN Guohua, XIE Wenbin, WANG Huamin. Detection and control of tool wear based on neural network and genetic algorithm[J]. Optical precision engineering, 2015, 23(5): 1314 – 1321.)
- [12] 金敏, 鲁华祥. 一种遗传算法与粒子群优化的多子群分层混合算法[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(10): 1231 – 1238.
(JIN Min, LU Huaxiang. A multi-subgroup hierarchical hybrid of genetic algorithm and particle swarm optimization[J]. Control theory & applications, 2013, 30(10): 1231 – 1238.)
- [13] 黄慧, 顾波. 改进遗传算法在电网规划中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 64 – 67.
(HUANG Hui, GU bo. Application of improved genetic algorithm in the network planning [J]. Power system protection and control, 2012, 40(22): 64 – 67.)
- [14] 章毅, 郭泉, 王建勇. 大数据分析的神经网络方法[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(1): 9 – 18.
(ZHANG Yi, GUO Quan, WANG Jianyong. Big data analysis using neural networks [J]. Advanced engineering sciences, 2017, 49(1): 9 – 18.)
- [15] 刘智斌, 曾晓勤, 刘惠义. 基于 BP 神经网络的双层启发式强化学习方法[J]. 计算机研究与发展, 2015, 52(3): 579 – 587.
(LIU Zhibin, ZENG Xiaoqin, LIU Huiyi. A heuristic two-layer reinforcement learning algorithm based on BP neural networks[J]. Journal of computer research and development, 2015, 52(3): 579 – 587.)
- [16] 肖迁, 李文华, 李志刚, 等. 基于改进的小波-BP 神经网络的风速和风电功率预测[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 80 – 86.
(XIAO Qian, LI Wenhua, LI Zhigang, et al. Wind speed and power prediction based on improved wavelet-BP neural network[J]. Power system protection and control, 2014, 42(15): 80 – 86.)
- [17] 尹光志, 李铭辉, 李文璞, 等. 基于改进 BP 神经网络的煤体瓦斯渗透率预测模型[J]. 煤炭学报, 2013, 38(7): 1179 – 1184.
(YIN Guangzhi, LI Minghui, LI Wenpu, et al. Model of coal gas permeability prediction based on improved BP neural network [J]. Journal of China coal society, 2013, 38(7): 1179 – 1184.)
- [18] 石振明, 刘璠, 彭铭, 等. 钻孔灌注桩桩底溶洞声呐探测方法及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(1): 177 – 186.
(SHI Zhenming, LIU Liu, PENG Ming, et al. A sonar detection technology for Karst cavities under bored piles and its application [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2016, 35(01): 177 – 186.)
- [19] 王旭, 蒋代军, 刘德仁, 等. 低温多年冻土地基大直径钻孔灌注桩未回冻状态承载性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1807 – 1812.
(WANG Xu, JIANG Daijun, LIU Deren, et al. Experimental study of bearing characteristics of large-diameter cast-in-place bored pile under non-refreezing condition in low-temperature permafrost ground [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2013, 32(9): 1807 – 1812.)
- [20] 王忠福, 刘汉东, 贾金禄, 等. 大直径深长钻孔灌注桩竖向承载力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2663 – 2670.
(WANG Zhongfu, LIU Handong, JIA Jinlu, et al. Experimental study of vertical bearing capacity behavior of large-diameter bored cast-in-situ long piles [J]. Rock and soil mechanics, 2012, 33(9): 2663 – 2670.)