

双向八车道连拱隧道围岩力学参数反演分析

崔志盛¹, 金磊², 赵凯¹

(1. 山西平阳高速公路建设管理处, 山西 阳泉 045100; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要:在采用双侧壁导坑法施工的双向八车道特大断面连拱隧道中, 施工步繁多, 临时支护设置的时间长, 隧道全断面的变形量测只能在临时支护拆除后进行。由于全断面变形数据获得较晚, 故较难将其用于围岩力学参数的反演。将有限元计算和 BP 神经网络技术相结合, 并在有限元计算过程中考虑实际的施工步, 建立起所有临时支护拆除之前这一施工状态下导坑的变形量与围岩力学参数之间的非线性映射关系, 并通过对应状态下实测的导坑变形值反演了围岩的力学参数。将反演的结果用于正分析验算, 验证了该方法是可行的。

关键词:隧道工程; 双连拱隧道; 位移反分析; 有限元; BP 神经网络

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2011)05-0065-05

Back Analysis on Mechanical Parameters of Surrounding Rock in a Bi-arch Tunnel with Eight Lanes/CUI Zhi-sheng¹, JIN Lei², ZHAO Kai¹ (1. Office of Pingyang Highway Construction and Management, Yangquan Shanxi 045100, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In a bi-arch tunnel with eight lanes using double-side-drift method, it is the deformation of the drifts rather than the whole tunnel section that is measured due to the restriction from the temporary linings. Only by the time when all the temporary linings are removed can the back analysis be implemented if we choose to use the whole section's deformation data to get the mechanical parameters of surrounding rock, which is time-consuming. This paper discusses a method which involves both FEM and BP neural network to establish a nonlinear mapping relationship between surrounding rock's mechanical parameters and drifts' final deformation rather than the whole section's deformation with construction sequences taking into consideration, followed by a back analysis on the mechanical parameters using the drifts' in-situ monitoring deformation data on the basis of the above relationship. There's a good agreement between the in-situ deformation data and the numerical deformation data achieved from a normal analysis using the back analyzed parameters.

Key words: tunneling engineering; bi-arch tunnel; displacement back analysis; FEM; BP neural network

0 引言

由于岩土介质的复杂性和不可预见性, 岩土材料的物理力学参数的确定一直是该领域的难题。数值计算方法的发展大大提高了各种岩土工程应力、位移和破坏分析的效率, 但是在此之前除了要确定合理的计算模型和本构关系外, 还必须确定合理的输入参数, 否则数值计算的结果会与实际有较大偏差甚至是产生错误的结果。

通过现场实测资料反分析岩土材料参数往往比室内的试验结果更为可靠, 因为室内试验加卸载的过程不可能与岩土体的形成和开挖过程相同, 所得的参数在用于稳定性评价的时候存在应力历史和途径的差别^[1]。结合监控量测, 通过反分析技术获取岩土体的物理力学参数, 进而将其应用于正分析, 评价围岩稳定性和确定合理的开挖支护方案, 并对工程结构进行更准确的安全性评价和分析, 就显得十

分重要。位移反分析是目前岩土工程反分析问题中应用最多的一种方法。在隧道工程中, 它是利用在隧道开挖和支护过程中量测到的围岩位移反演围岩物理力学参数。由于在位移反分析中输入的围岩位移值是围岩支护体系在开挖影响的空间域和时间域中力学变化最直接、最明显、综合性的宏观体现^[2], 因此位移反分析所得的参数从整体上反应了岩体复杂性、施工方法以及隧道工程结构的影响。

位移反分析的求解方法主要可分为 3 类:

(1) 位移逆反分析法, 即直接建立基本控制方程的逆方程, 通过最小二乘解由量测位移反求待定参数。Kavanagh^[3]在有限元的基础上, 给出了根据实测的位移或应变逆反分析岩土材料力学参数的方法; S. Sakurai 和 K. Takeuchi^[4]以有限元计算为基础, 将岩土介质视为线弹性和各向同性材料, 给出了位移逆反分析初始地应力和杨氏模量的计算方法。但是

收稿日期: 2011-01-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(40972178)

作者简介: 崔志盛(1962-), 男(汉族), 山西孟县人, 山西平阳高速公路建设管理处总工程师、高级工程师, 土木工程专业, 从事高速公路建设的工程技术和管理工作, 山西省阳泉市, fzhzk@163.com。

由于量测数据往往具有离散型,计算可能无法收敛。

(2)位移正反分析法,即在可能的上下界范围内,首先给定一个参数的试探值,通过迭代运算和误差函数的优化,求得反演参数的最佳值。贾超等^[5]应用位移正反分析了某隧道围岩力学参数;朱合华等^[6]应用位移正反分析法,用上一个施工步监测的位移反演所需计算参数,并以此作为输入参数用于预测下一个施工步产生的围岩位移。但是对于大型工程而言,计算范围大,节点多,本构关系复杂,计算量巨大,正反分析的迭代过程往往较为耗时^[6]。

(3)基于统计理论考虑先验误差信息的“贝叶斯方法”和“卡曼滤波法”。蒋树屏等采用卡尔曼滤波有限元法^[7],根据量测的位移等数据反演得到了围岩内部剪应变和塑性区的历时变化估计。

将数值计算与BP神经网络技术耦合的位移正反分析法,实质上是采用了位移的正反分析的思路。但是,有别于一般的位移正反分析,该方法是利用BP神经网络强大的学习、存储和计算能力以及较强的容错特性^[8],通过较少的数值计算的结果,建立起位移和待反演参数之间的高度非线性的映射关系,去代替剩余的数值计算,以减少计算量,节约时间。文献[2,9~11]利用该方法反演了围岩的力学参数,但是在数值计算的过程中均未进行详细的施工步模拟;而被用于反演计算的隧道实测变形是与具体的施工状态相对应的。另外,目前鲜有关于采用双侧壁导坑法施工的双向八车道特大断面连拱隧道的围岩力学参数的反演的报导。由于施工步繁多,临时支护设置的时间长,隧道全断面的变形量测只能在临时支护拆除后进行,变形数据获取得较晚,故较难将其用于围岩力学参数的反演。因此,利用临时支护拆除前导坑的最终变形量测数据进行反演,并在数值计算过程中进行详细的施工步模拟,是一项有意义的探索工作。

1 BP神经网络的结构和工作原理

由Rumelhart和McClland^[12]首先提出的BP(Back Propagation)神经网络,是一种按误差逆传播算法训练的多层前馈网络,是目前应用最广泛的神经网络模型之一。BP神经网络模型拓扑结构包括输入层、隐含层和输出层。

Robert Hecht-nielson^[13]证明了对任何在闭区间内的连续函数,都可以用含一个隐含层的BP网络来逼近,因而一个三层的BP网络可以完成任意的 n 维到 m 维的映照。图1是三层BP神经网络的结构

示意图。其中的输入、输出变换层是为了进行归一化处理而添加的两层。

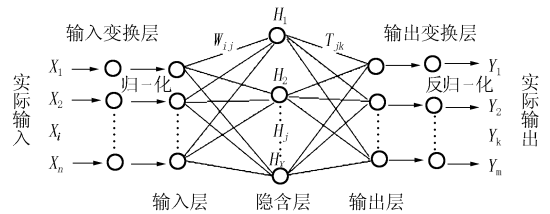


图1 BP神经网络结构示意图

BP网络模型处理信息的基本原理是:输入信号 X_i 通过隐含层节点作用于输出层节点,经过非线性变换,产生输出信号 Y_k 。其过程可表示为:

$$H_j = f\left(\sum_{i=1}^n W_{ij} X_i - \theta_j\right) \quad (1)$$

$$Y_k = f\left(\sum_{j=1}^r T_{jk} H_j - \theta_k\right) \quad (2)$$

式中: X_i ——输入层输入量, $i=1,2,\dots,n$; H_j ——隐含层输出量, $j=1,2,\dots,r$, r 的确定原则见式(5); Y_k ——输出层输出量, $k=1,2,\dots,m$; W_{ij} ——输入层节点与隐含层节点的联接权值; T_{jk} ——隐含层节点与输出层节点的联接权值; θ_i 、 θ_j ——神经单元阈; f ——传递函数。常用的传递函数类型有:Log-sigmoid型函数的输入值可取任意值,输出值在0和1之间; \tan -sigmoid型传递函数的输入值可取任意值,输出值在-1到+1之间;线性传递函数purelin的输入输出值可取任意值。

设第 i 个输入量对应的输出量为 Y_k^i ,将其与期望输出值 t_k^i 之间的偏差的二范数平方的一半作为目标函数,即:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m (Y_k^i - t_k^i)^2 \quad (3)$$

通过调整 W_{ij} 、 T_{jk} 和 θ_i 、 θ_j 的值,使误差沿梯度方向下降,经过反复学习训练,确定与最小误差相对应的网络参数(权值和阈值),训练即告停止。此时经过训练的BP神经网络就能对类似样本的输入信息自行处理,并输出使误差最小的输出信息。

2 围岩力学参数反演

2.1 工程概况

某隧道全长248 m。隧道设计为双向八车道特大断面连拱隧道,单洞宽度为18.2 m。进口洞底标高17.311 m,出口洞底标高18.854 m。单洞标准断面内轮廓面积(路面以上)左洞为143.16 m²,右洞为140.65 m²,含仰拱面积为171.06 m²。隧道中墙采用3层复合式曲中墙,整体开挖跨度39.62 m,高

度 11.84 m。

隧道位于低山丘陵区,地表覆盖薄层残坡积土,进出口基岩风化层较厚,场区植被发育。地形稍起伏,洞身最高点海拔 60.0 m。隧道进出口自然斜坡稳定,天然坡度为 10°~30°。隧道围岩为花岗岩、花岗斑岩,为较硬岩~坚硬岩,局部为闪长玢岩岩脉,隧道区岩石风化较强烈,且受岩脉侵入的影响,岩体较破碎。隧道进出口以 V 级围岩为主,洞身以 III~IV 级为主。

2.2 模型建立

以该隧道位于 V 级围岩中的 Z24+660 断面为例进行围岩力学参数的反演。依据隧道开挖的影响范围,模型尺寸为:上边界至地表自由面;下边界至洞底距离不小于 3 倍洞高;左右边界距洞口距离不小于 6 倍隧道跨度。因此取模型长度为 300 m,模型下边界距隧道底部 40 m,上边界为地表面。

由于隧道围岩应力场复杂,其在施工过程中的破坏形式也具有多样性,如受拉断裂、脆性剪切破坏、塑性破坏等,这些隧道围岩破坏形式一般认为是塑性破坏。因此,在有限元计算中选用理想弹塑性本构模型、德鲁克-普拉格(Drucker-Prager)屈服准则。隧道施工过程通过软件提供的单元“开挖”、“回填”、“复制线性材料”等命令来实现。模型单元采用四节点四边形单元,共划分 6032 个单元。

边界约束条件:采用二维平面应变模型,模型的左、右边界均受到水平方向的位移约束,下部边界受竖向位移约束,地表则为自由边界。模型网格划分情况如图 2、图 3 所示。

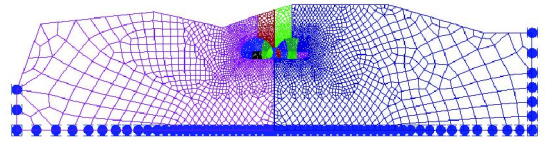


图 2 Z24+660 断面有限元计算模型

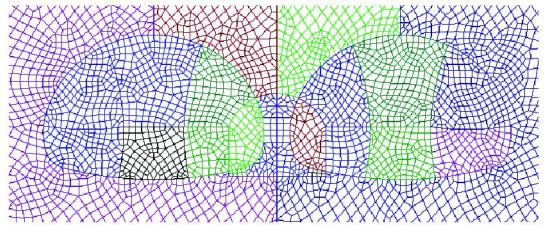


图 3 Z24+660 断面有限元计算模型局部详图

此外,在建模过程中,围岩、中墙采用实体单元模拟;初期支护采用梁单元模拟。

由于只进行围岩力学参数(位移模量 E 、泊松比 μ 、粘聚力 c 、内摩擦角 φ)的反演,因此围岩的物理参数(即重度 γ)按照《罗汉山隧道工程地质勘察报告》选取,V 级围岩重度 $\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$ 。支护结构计算参数见表 1。

表 1 Z24+660 断面支护结构参数表

支护结构	材料类型	弹性模量/GPa	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	截面积/ m^2	惯性矩/(10^{-3} m^4)	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)	泊松比
初期支护	杆单元	25.0	23	0.45	7.600	-	-	-
临时支护	杆单元	29.5	25	0.20	0.670	-	-	-
中导坑、衬砌	杆单元	25.0	23	0.16	0.341	-	-	-
中墙、中墙边角	实体单元	29.5	25	-	-	6.0	55	0.16

2.3 施工过程模拟方案

V 级围岩采用双侧壁导坑法施工。由于在导坑的位移量测过程中不浇注二衬与仰拱,因此模拟开挖与支护的过程分为如下 11 步(见图 4):(1)开挖中导坑,中导坑初期支护、浇筑中墙;(2)开挖左(右)洞外侧导坑上台阶,施作初期支护、临时支护;(3)开挖左(右)洞外侧导坑下台阶,施作初期支护、临时支护;(4)开挖左洞内侧导坑上台阶,施作初期支护、临时支护;(5)开挖左洞内侧导坑下台阶,施作初期支护、临时支护;(6)开挖右洞内侧导坑上台阶,施作初期支护、临时支护;(7)开挖右洞内侧导坑下台阶,施作初期支护、临时支护;(8)开挖左洞中部导坑上台阶,施作初期支护、临时支护;(9)开挖左洞中部导坑下台阶,施作初期支护;(10)开挖

右洞中部导坑上台阶,施作初期支护、临时支护;(11)开挖右洞中部导坑下台阶,施作初期支护。图 4 中加粗的部分表示初期支护或临时支护。

另外,通过正分析试算,确定出应力释放系数为:开挖后至初期支护、临时支护施作前为 0.3,初期支护、临时支护后为 0.7。

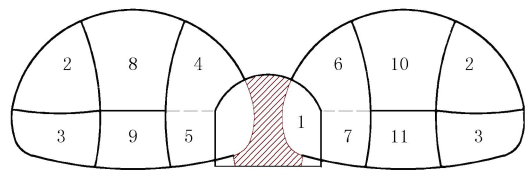


图 4 双侧壁导坑法施工步

限于篇幅,仅给出第 4 步和第 11 步完成后的有限元模型局部详图,见图 5。

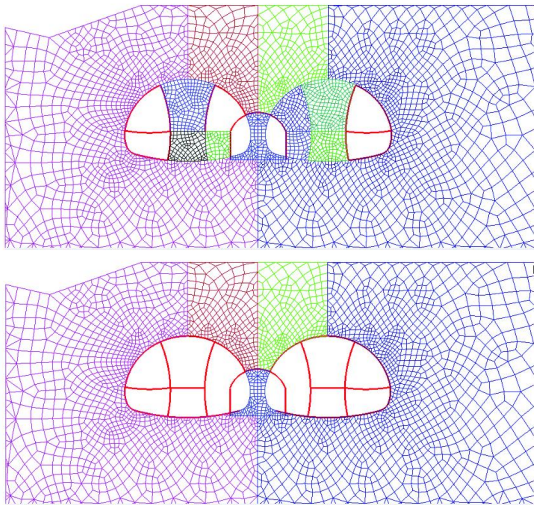


图5 有限元模型局部详图(施工步4、11)

2.4 导坑测点与测线选取

图6、图7是双洞八车道特大断面连拱隧道位移量测的测点与测线的布置情况。考虑到左右洞均为外侧导坑上台阶施工最早,故选择以这两个导坑的拱顶沉降和水平收敛,即 G_1 、 G_3 垂直沉降和 B_1C_1 、 B_3C_3 水平收敛的实测数据进行反演。

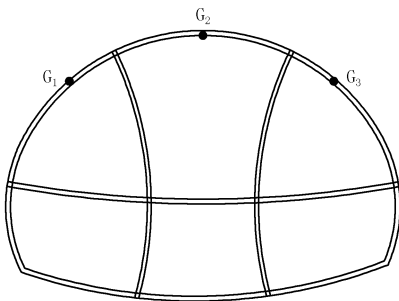


图6 拱顶沉降测点布置图

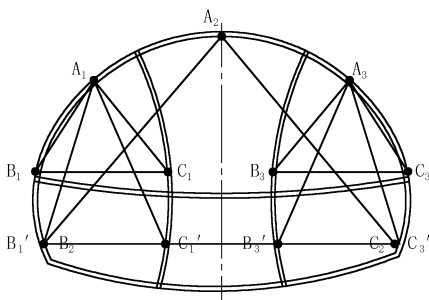


图7 周边收敛测线布置图

2.5 BP神经网络训练样本确定

2.5.1 围岩力学参数取值水平

根据《公路隧道设计规范》(JTG D70-2004)与《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GB 50086-2001)推荐的各级围岩力学参数的取值范围,确定出围岩力学参数取值水平如表2。

表2 V级围岩力学参数取值水平

水平	E/GPa	μ	c/MPa	$\varphi/(\text{°})$
1	1.10	0.35	0.05	20
2	1.40	0.38	0.10	22
3	1.70	0.41	0.15	24
4	2.00	0.44	0.20	26

2.5.2 BP神经网络训练样本

在已知围岩的力学参数取值水平的情况下,结合四因素四水平正交表 $L_{16}(4^4)$ 确定出不同围岩力学参数的组合方式,将其输入建好的模型,可得到不同围岩力学参数组合情况下,第11个施工步完成后相应的导坑位移值,见表3。从而各组围岩力学参数和相应的导坑位移即组成了BP神经网络的训练样本,其中以导坑位移值作为输入样本,围岩力学参数作为输出样本,即可进行神经网络训练。

表3 BP神经网络训练样本

样本序号	围岩力学参数取值水平				左洞		右洞	
	E	μ	c	φ	G_1 点垂	B_1C_1 测线	G_3 点垂	B_3C_3 测线
					直沉降	水平收敛	直沉降	水平收敛
1	1	1	1	1	-3.32	-0.33	-4.98	-0.93
2	3	3	1	3	-2.61	-0.27	-3.65	-0.70
3	4	4	1	4	-2.38	-0.23	-3.23	-0.62
4	2	2	1	2	-2.92	-0.32	-4.20	-0.81
5	2	4	3	1	-2.82	-0.22	-4.02	-0.68
6	4	3	2	1	-2.41	-0.27	-3.30	-0.66
7	3	2	4	1	-2.65	-0.32	-3.72	-0.76
8	1	4	4	3	-3.16	-0.19	-4.66	-0.71
9	4	1	4	2	-2.47	-0.36	-3.43	-0.77
10	1	3	3	2	-3.22	-0.25	-4.77	-0.78
11	2	3	4	4	-2.87	-0.27	-4.11	-0.74
12	2	1	2	3	-2.95	-0.38	-4.28	-0.87
13	3	1	3	4	-2.68	-0.37	-3.79	-0.87
14	3	4	2	2	-2.57	-0.23	-3.57	-0.65
15	4	2	3	3	-2.44	-0.31	-3.36	-0.72
16	1	2	2	4	-3.27	-0.31	-4.88	-0.85
u_{\min}					-3.32	-0.38	-4.98	-0.93
u_{\max}					-2.38	-0.19	-3.23	-0.62

2.6 BP神经网络反演围岩力学参数

神经网络的结构计算参数对最终的训练结果有很大的影响。以表3数值计算的导坑位移值为实际输入,以与之相应的围岩力学参数为实际输出,分别对其进行归一化处理并将处理结果转置后分别作为输入层与输出层,这是因为考虑到BP网络输入层节点数不至于过多以及输出矩阵和输入矩阵应具有相同的列数。其中归一化过程按照下式计算:

$$u' = \frac{u - u_{\min}}{u_{\max} - u_{\min}} \quad (4)$$

式中: u ——各围岩力学参数组合情况下导坑位移

值; u_{min} 、 u_{max} ——分别为各围岩力学参数组合情况下导坑位移最小值、最大值。

经过这样的处理后神经网络输入层、输出层节点单元数均为 4, 每个节点(神经元)为 1×16 的矩阵。采用 newff 函数进行训练, 输入层与隐含层、隐含层与输出层之间的传递用 tansig 函数与 logsig 函数。初步拟定训练的误差精度 $E = 1 \times 10^{-15}$ 。隐含层节点数按照下式确定:

$$r = \sqrt{n + m} + C \quad (5)$$

式中: r ——隐含层节点数, $r \geq \log_2 n$; n 、 m ——分别为输入层与输出层节点数; C ——1 ~ 10 之间的常数。

经过反复调试, 当取隐含层节点数 $n_1 = 13$ 、学习速率 $\eta = 0.4$ 、训练步数 $t = 4000$ 时, 训练的效果较好。训练结束的时候, 共经历了 4000 步运算, 此时训练误差为 5.29×10^{-15} , 符合要求。训练过程的误差曲线见图 8。整个过程借助于 MATLAB7.0 完成。网络训练好以后, 以表 4 中实测的位移值(考虑了 30% 的测前位移损失^[3])为实际输入, 经过归一化后即可反演 V 级围岩的力学参数, 反演结果见表 5。再将反演的结果输入建立的模型进行正分析计算, 则可得导坑位移值, 继而得到其与实测值的相对误差, 见表 4。

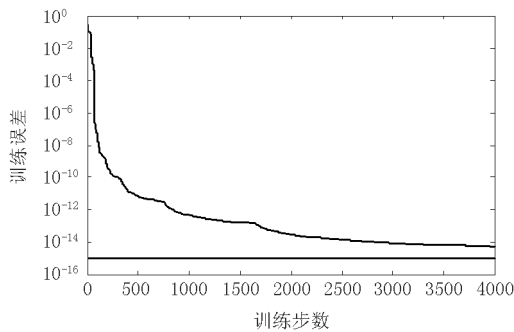


图 8 BP 神经网络训练误差曲线

表 4 导坑位移实测值与模拟值比较表

	左洞		右洞	
	G ₁ 点垂直 沉降/mm	B ₁ C ₁ 测线水 平收敛/mm	G ₃ 点垂直 沉降/mm	B ₃ C ₃ 测线水 平收敛/mm
实测值	-3.13	-0.24	-4.46	-0.66
归一化值	0.20	0.74	0.30	0.85
反演结果用于正 分析后的计算值	-3.16	-0.19	-4.66	-0.71
相对误差/%	0.96	20.83	4.48	7.58
平均相对误差/%	8.46			

表 5 V 级围岩力学参数反演结果

E /GPa	μ	c /MPa	φ /($^{\circ}$)
1.10	0.44	0.20	21.63

由表 4 可知, 将反演的结果用于正分析时收到

了较好的效果, 模拟位移值与实测位移值的平均相对误差为 8.46%。因此反演的结果可以用于数值计算。

3 结语

利用有限元数值计算和 BP 神经网络相结合的位移反分析法, 在有限元计算过程中进行了详细的施工步模拟, 根据双侧壁导坑法施工过程中临时支护拆除前这一施工状态下导坑的变形量测数据, 反演了双向八车道特大断面连拱隧道围岩的力学参数, 并将反演的结果用于数值正分析验算, 验证了反演结果符合实际情况, 其精度能够满足工程要求。因此, 对于施工步复杂、施工时间跨度长的特大断面连拱隧道, 根据导坑的变形量测数据反演围岩的力学参数是可行的, 它克服了由于全断面变形量测数据获取得较晚而难以被用于反演的缺点, 能及时反馈信息, 指导下一步设计和施工。

参考文献:

- [1] 张勇, 张子新, 华安增. 高速公路隧道的围岩位移特性[J]. 中南公路工程, 2001, 26(3): 12-14.
- [2] 李晓红, 靳晓光, 亢会明, 等. 隧道位移智能化反分析及其应用[J]. 地下空间, 2001, 21(4): 299-304.
- [3] Kavanagh K. Experiment versus analysis: Computational techniques for the description of static material response[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1973, 5: 503-515.
- [4] S. Sakurai, K. Takeuchi. Back analysis of measured displacement of tunnels[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1983, 16: 173-180.
- [5] 贾超, 刘宁, 肖树芳. 洞室岩体参数的位移正演反分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 450-454.
- [6] 朱合华, 张晨明, 王建秀, 等. 龙山双连拱隧道动态位移反分析与预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 67-73.
- [7] 蒋树屏, 赵阳. 复杂地质条件下公路隧道围岩监控量测与非确定性反分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3460-3464.
- [8] 樊琨, 刘宇敏, 张艳华. 基于人工神经网络的岩土工程力学参数反分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1998, 26(4): 98-102.
- [9] 郝哲, 万明富, 刘斌, 等. 韩家岭隧道围岩物理力学参数反分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2005, 26(3): 300-303.
- [10] 易小明, 陈卫忠, 李术才, 等. BP 神经网络在分岔隧道位移反分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S2): 3927-3932.
- [11] 王向刚, 李术才, 王刚, 等. 公路隧道位移智能反演与稳定性研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(S1): 322-326.
- [12] Rumelhart D. E., McClelland J. L. Parallel distributed processing[M]. MIT press, Cambridge, 1986.
- [13] Robert Hecht-nielsen. Theory of the back propagation neural network[A]. Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks[C]. IEEE press, 1989. 121-125.