

基于神经网络的爆破振动速度峰值预报

唐海¹, 石永强², 李海波¹, 李俊如¹, 王晓炜², 蒋鹏灿²

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 中广核工程有限公司, 广东 深圳 518124)

摘要: 以广东岭澳核电站二期工程 20 m 平台和核岛爆破开挖为实例, 运用神经网络原理, 以孔径、孔深、孔距、排距、最小抵抗线、最大单孔药量、最大段药量、堵塞长度、总药量、高程差和爆源距作为影响爆破振动速度的主要因素, 建立 BP 神经网络模型, 对质点爆破振动速度峰值进行预测。分析结果表明, 运用提出的神经网络预测模型精确度明显高于传统的萨道夫斯基公式。

关键词: 岩石力学; BP 神经网络模型; 学习样本; 爆破振动; 预报

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 1 - 3533 - 07

PREDICTION OF PEAK VELOCITY OF BLASTING VIBRATION BASED ON NEURAL NETWORK

TANG Hai¹, SHI Yongqiang², LI Haibo¹, LI Junru¹, WANG Xiaowei², JIANG Pengcan²

(1. *Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;*

2. *China Guangdong Nuclear Power Station Engineering Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518124, China*)

Abstract: Because of the influence of charge parameters and rock properties, it is difficult to accurately predicate the vibration characteristics in the engineering blasting. Based on the 20 meters platform and nuclear island blasting excavation monitoring in the second phase of Ling'ao nuclear power station, Guangdong Province, the artificial neural network is adopted to predict the peak velocity of blasting vibration. In the analysis, the charge hole diameter, distance, and depth, column distance between charge holes, line of least resistance, maximum charge of single hole, maximum charge weight per delay interval, clogging depth of hole, total charge, magnitude of relative altitude and explosive distance are considered to establish the back-propagation neural network model. The prediction results through artificial neural network are more accurate than those of Sadaovsk formula.

Key words: rock mechanics; back-propagation neural network model; study samples; blasting vibration; prediction

1 引言

爆破是矿业、交通以及水电工程中土石开挖的主要施工手段。在爆破开挖过程中, 爆破引起的振动影响临近建筑物安全。准确分析和预报爆破引起的质点振动速度规律进而对爆破设计和施工进行优

化是有效减小爆破振动危害的主要方法。目前, 工程中通常是现场根据现场振动监测结果以萨道夫斯基公式进行回归分析, 然后基于回归分析得到的萨道夫斯基公式预测后续爆破振动速度^[1, 2]。但萨道夫斯基公式中仅考虑装药量、爆源距两个参数, 通常情况下, 其预测爆破振动速度的精度不高, 因为爆破

收稿日期: 2007 - 04 - 28; **修回日期:** 2007 - 06 - 01

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50439030); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412705)

作者简介: 唐海(1973 -), 男, 博士, 1997年毕业于湘潭工学院资源工程系采矿工程专业, 主要从事岩石动力学方面的研究工作。E-mail: tanghai001@21cn.com

振动不仅与爆破设计参数如药量、段间隔时间、爆源距等有关,还与爆破场地的地质条件如地形地貌引起的高程差、岩性和岩体结构等有关^[3-4],爆破振动速度与这些参数和条件之间存在着极其复杂的非线性关系。因此,很难用一个经验公式把这些因素考虑进去。

人工神经网络是近几十年新发展起来的一门交叉学科,具有极强的非线性动态处理能力。人工神经网络方法不事先假设数据或变量之间的服从规律或内在联系,而是直接通过网络之间的权值训练,找出输入与输出变量之间的非线性关系。因此,把现场获取的原始数据输入到训练好的网络,依赖学习到的输入与输出变量之间的非线性关系,进行网络训练,预测输出结果^[5-9]。基于这些认识,近年来,不少学者把神经网络模型应用于爆破振动速度预测,取得了较好的预测效果。例如,蔡德所等^[10-12]把药量和爆源距作为输入量,运用神经网络模型预测爆破振动速度,分析结果表明,网络预测速度的精度高于经验公式预测。夏梦会等^[13]把段药量、爆源距和高程作输入量,建立模糊神经网络模型,对黑山铁矿生产爆破振动进行了预测,其结果与实际值的平均误差仅为5.58%。王进学等^[14-15]把段药量、总药量、段间隔时间、爆源距、高程和爆破持续时间作输入量,建立BP神经网络模型结合工程实例预测爆破振动速度,对比经验公式预测值,研究结果表明,网络模拟值更接近实测值。T. N. Singh和V. Singh^[16]把炮孔直径、炮孔数、爆源水平距离和爆源垂直距离等作为输入量,建立BP神经网络模型预测矿井地面质点振动速度,结果表明网络预测振动速度比传统的回归统计精度高。

输入变量的选取是建立合理神经网络模型的关键。但目前多数学者运用神经网络预测爆破振动速度时未全面考虑影响爆破振动的各种因素,得出的预测结果与实际结果尚有一定的差距。因此,本文结合广东岭澳核电站二期工程20 m平台和核岛爆破开挖,综合考虑了影响爆破振动的各种因素,建立了BP神经网络模型预报爆破振动速度峰值,并与萨道夫斯基公式结果及现场监测结果进行了对比。

2 神经网络模型及应用

人工神经网络(artificial neural network, ANN)是通过模仿大脑神经网络结构和功能而建立的一种

数学模型,它具有高度的非线性,能够进行复杂的逻辑操作和非线性关系实现^[17, 18]。目前运用最广泛的神经网络模型是BP模型,它是基于误差反向传播(error or back-propagation)的多层前向神经网络,可实现输入和输出间的任意非线性映射。

广东岭澳核电站二期工程厂址位于广东省深圳市东南向,处于陆海交汇地带,地形以台地剥蚀地形和堆积地形为主,台地主要由角岩和花岗岩组成。为拓宽二期工程厂区道路和加快核岛施工需要对区内20 m平台及核岛进行爆破开挖。为保证爆破开挖过程中开关站振动速度不超过安全阈值,必须对每次爆破产生的振动速度进行准确的预测。

通过对广东岭澳核电站二期工程20 m平台和核岛爆破开挖现场实测数据,发现用萨道夫斯基公式预测爆破振动速度,虽然方便、简单,但精度不高。人工神经网络具有极强的非线性动态处理能力与爆破振动受多种因素影响具有较大随机性的特性相符合,因此,可运用神经网络模型来预测爆破振动速度。

2.1 网络模型输入变量的确定

岩体爆破开挖伴随着炸药能量的释放和周围岩土介质的运动两个过程,其中爆炸对岩土介质的作用可看作是波动力学过程,可视为应力波在介质中传播和对介质的扰动。因此,爆破振动既涉及炸药与岩土地的相互作用,又牵涉到爆破地震波在地层中的传播,其影响因素可以从两个方面考虑:一是从爆破参数如炸药的种类、网孔参数、孔径、填塞长度、临空面数目、段药量和段间隔时间、测点距离以及总药量等方面考虑;二是从岩体特征如岩石类别、岩体构造、节理裂隙发育程度、岩层风化程度、地下水位以及地形地貌条件等方面考虑。

广东岭澳核电站二期工程20 m平台和核岛爆破开挖,采用的爆破方式是分层台阶爆破,形成的凹凸形地貌成为影响爆破振动的主要因素之一,该影响因数可以用测点与爆源之间的高程差来表示;爆破使用的炸药是同一种乳化炸药,使用的延期雷管系列是固定的,装药分段起爆的模式也相差不大,当总药量和最大段药量确定后,各段之间的间隔时间也就随之确定了,因此,建立网络模型时可不考虑炸药类型和段间隔时间;20 m平台和核岛爆破开挖区域的岩性、岩体结构和地质条件变化极小,神经网络模型中可忽略这些因数的影响。因此,选择

以下 11 个变量作为影响爆破振动速度的主要因素: 孔径(d)、孔深(L)、孔距(a)、排距(b)、最小抵抗线(w)、最大单孔药量(q)、最大段药量(Q)、堵塞长度(s)、总药量(Q_1)、高程差(H)和爆源距(R)。

2.2 预报网络模型的建立

BP 定理认为: 给定任意 $\varepsilon > 0$ 和任意一个从 n 维空间到 m 维空间的 L_2 函数 $f: [0, 1]^n \rightarrow R^m$, 存在一个 3 层 BP 网络, 它可在任意 ε 平方误差精度内逼近 f [18]。从该定理可知, 用 3 层的 BP 网络就可以实现 L_2 函数, 因此, 可以采用 3 层 BP 网络来预报爆破振动速度, 网络结构如图 1 所示。其工作原理见王道平等 [18, 19] 的研究成果。

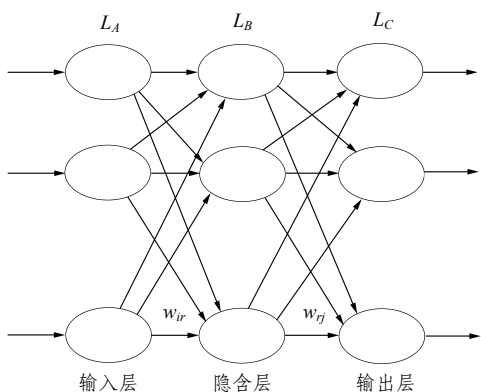


图 1 3 层 BP 神经网络结构

Fig.1 Structure of three-layer back-propagation neural network

结合 20 m 平台爆破和核岛开挖现状, 采用 11 - 23 - 1 的 BP 网络即输入层节点(输入变量即孔径、孔深、孔距排距、最小抵抗线、最大单孔药量、最大段药量、堵塞长度、总药量、高程差和爆源距)为 11 个、隐含层节点为 23 个、输出层节点为 1 个(爆破振动速度峰值), 来预测爆破振动速度。由于标准的 BP 网络一般采用梯度下降反向传播算法, 该算法通常具有收敛速度慢、易陷入局部极小等缺点。本文运用 MATLAB 语言构建的 BP 神经网络, 采用 traingdm(动量梯度下降反向传播算法)训练函数, 动量系数为 $m_c = 0.1$, 均方误差为 mse (网络输出和目标输出之间的均方误差) $= 10^{-4}$ 。该方法有效地克服了常规 BP 学习算法的缺陷。

2.3 20 m 平台爆破振动速度预测

在 20 m 平台大规模爆破前做了几次爆破试验, 用萨道夫斯基公式回归的预测振动速度公式 [20] 如下:

$$V_{\text{垂直}} = 251 \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.732} \quad (1)$$

$$V_{\text{水平}} = 385 \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.908} \quad (2)$$

式中: $V_{\text{垂直}}$, $V_{\text{水平}}$ 分别为质点的垂直向、水平向速度峰值($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)。

在 20 m 平台爆破现场同步监测过程中, 得到了多组数据, 可用这些数据作样本来预测下次振动速度。

表 1 所示为 35 次 20 m 平台实测的数据。用前 25 次实测数据作学习样本, 后 10 次数据作为检验样本, 用训练好的神经网络预测了后 10 次爆破振动速度。同时, 用萨道夫斯基公式(式(1), (2))做了相同的 10 次预测。

2.4 核岛爆破振动速度预测

在核岛爆破开挖中, 用同 20 m 平台一样的神经网络模型预测爆破振动速度。在核岛大规模开挖前进行了几次爆破实验, 用萨道夫斯基公式回归的振动速度公式 [20] 如下:

$$V_{\text{垂直}} = 91 \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.556} \quad (3)$$

$$V_{\text{水平}} = 210 \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.713} \quad (4)$$

表 2 所示为 30 次核岛实测的数据。用前 20 次实测数据作学习样本, 后 10 次数据作为检验样本。同时, 用萨道夫斯基公式(式(3), (4))做了后 10 次爆破预测。

表 3 所示为 20 m 平台实测振动速度与预测振动速度对比, 表 4 所示为核岛实测振动速度与预测振动速度对比。

由表 3, 4 得知, 神经网络预测(简称网络预测)得到的振动速度与实测振动速度的平均误差分别为 7.4%, 9.2%, 萨道夫斯基公式预测(简称萨氏预测)的振动速度与实测振动速度的平均误差分别为 28.3%, 27.8%, 可见用神经网络来预测爆破振动速度比常用的萨道夫斯基公式预测爆破振动速度更准确。

从表 3, 4 还可知, 20 m 平台神经网络模型的

表 1 20 m 平台实测数据
Table 1 Data of 20 m platform by site monitor

组号	<i>d</i> /m	<i>L</i> /m	<i>a</i> /m	<i>b</i> /m	<i>w</i> /m	<i>q</i> /kg	<i>Q_i</i> /kg	<i>s</i> /m	<i>Q</i> /kg	<i>H</i> /m	<i>R</i> /m	最大振动速度 /(cm • s ⁻¹)
1	0.076	7.2	2.5	1.80	1.80	16.8	16.8	2.10	424.0	8.0	333	0.063 8
2	0.076	7.9	2.5	1.80	1.80	19.2	19.2	2.10	643.8	2.0	280	0.078 6
3	0.076	7.4	2.5	1.80	1.80	17.4	17.4	2.20	322.8	1.5	260	0.069 7
4	0.076	8.8	2.5	1.80	1.80	21.0	10.5	2.10	714.0	6.0	222	0.063 6
5	0.076	7.7	2.5	1.80	1.80	18.0	18.0	2.10	751.8	7.0	290	0.080 2
6	0.042	2.5	2.0	0.70	0.70	1.2	1.2	1.20	20.0	0.0	110	0.071 8
7	0.076	8.3	2.5	1.80	1.60	16.2	16.2	2.10	450.6	7.0	271	0.065 3
8	0.076	6.3	1.5	1.80	1.80	13.2	6.6	2.10	345.6	2.0	184	0.090 7
9	0.042	2.0	1.5	0.75	0.75	1.0	1.0	1.00	20.0	0.0	109	0.090 1
10	0.076	6.2	1.5	1.80	1.80	12.6	6.3	2.10	339.6	1.5	170	0.081 5
11	0.076	5.7	1.5	1.80	1.80	9.6	4.8	2.40	339.0	1.5	149	0.079 5
12	0.076	7.5	1.5	1.80	1.80	15.0	7.5	2.35	610.2	1.0	201	0.061 6
13	0.076	7.1	1.5	1.60	1.60	15.6	7.8	2.30	658.2	1.0	179	0.074 9
14	0.076	7.7	1.5	1.60	1.60	16.8	8.4	2.35	411.6	7.0	204	0.060 8
15	0.076	7.6	1.5	1.60	1.60	16.8	16.8	2.35	576.0	7.5	252	0.083 9
16	0.042	2.8	1.5	0.75	0.75	1.2	1.2	1.30	20.4	3.7	116	0.095 3
17	0.076	7.4	1.5	1.80	1.80	16.2	50.4	2.35	493.8	1.0	348	0.084 3
18	0.042	2.2	1.5	0.70	0.70	1.2	1.2	1.00	19.6	3.8	115	0.081 5
19	0.042	2.5	1.5	0.70	0.70	1.0	1.0	1.00	24.0	3.8	115	0.077 8
20	0.042	2.0	1.5	0.80	0.80	0.8	0.8	1.20	27.2	8.0	114	0.051 5
21	0.076	5.2	2.5	1.80	1.80	9.6	4.8	1.80	188.4	6.5	153	0.097 1
22	0.076	5.2	1.5	1.60	1.60	9.6	25.8	1.50	89.4	8.0	362	0.075 9
23	0.042	2.0	1.5	1.00	1.00	0.8	0.8	1.20	23.4	9.0	116	0.089 2
24	0.076	7.6	1.5	1.80	1.80	17.4	60.0	2.25	945.6	8.2	365	0.118 0
25	0.076	8.0	1.6	1.80	1.80	18	9.0	2.35	348.0	6.3	174	0.097 8
26	0.042	2.0	1.5	1.20	1.20	0.6	0.6	1.40	19.8	9.0	114	0.069 8
27	0.042	2.0	1.5	1.50	1.50	0.6	0.6	1.40	26.4	10.0	114	0.074 7
28	0.042	2.0	1.5	1.50	1.50	0.6	0.6	1.40	25.8	11.0	112	0.057 7
29	0.042	2.0	1.5	1.50	1.50	0.6	0.6	1.40	16.8	10.0	119	0.088 5
30	0.076	5.5	1.5	1.80	1.80	10.2	5.1	2.10	274.2	5.3	147	0.082 0
31	0.042	2.0	1.5	1.50	1.50	0.6	0.6	1.40	35.4	5.5	107	0.067 7
32	0.042	2.0	1.5	1.20	1.20	0.6	0.6	1.40	28.2	3.0	103	0.086 3
33	0.076	5.3	1.5	1.60	1.60	9.0	4.5	2.10	269.4	6.3	133	0.088 6
34	0.042	2.0	1.5	1.20	1.20	0.6	0.6	1.40	26.4	9.0	98	0.117 0
35	0.042	2.0	1.5	1.20	1.20	0.6	0.6	1.40	25.2	11.0	113	0.050 7

表 2 核岛实测数据
Table 2 Data of nuclear island by site monitor

组号	d/m	L/m	a/m	b/m	w/m	q/kg	Q_1/kg	s/m	Q/kg	H/m	R/m	最大振动速度 $/(cm \cdot s^{-1})$
1	0.076	6.0	2.5	1.6	1.6	7.8	19.6	1.8	258.6	14.7	325	0.045 2
2	0.076	4.5	2.5	1.6	1.6	8.4	8.4	2.0	138.6	13.2	175	0.089 5
3	0.076	4.8	0.8	1.0	1.0	6.0	28.0	1.0	126.0	14.5	327	0.092 5
4	0.076	3.4	2.5	1.6	1.6	7.8	7.8	2.1	144.0	14.6	183	0.084 2
5	0.076	4.8	2.5	1.6	1.6	9.0	16.8	2.0	263.4	13.3	226	0.126 0
6	0.076	2.6	2.5	1.6	1.6	6.6	6.6	1.4	136.2	15.4	200	0.081 3
7	0.076	4.5	2.5	1.6	1.6	8.4	24.0	2.0	269.4	13.5	255	0.098 6
8	0.076	4.4	2.5	1.6	1.6	8.4	8.4	1.9	159.0	13.5	177	0.084 4
9	0.076	3.8	2.2	1.6	1.6	11.4	31.8	1.8	326.4	12.5	479	0.047 6
10	0.076	6.0	2.5	1.8	1.8	15.0	21.6	1.9	372.0	0.8	244	0.143 0
11	0.076	4.0	2.5	1.6	1.6	7.2	7.2	2.0	117.0	14.0	192	0.069 1
12	0.076	3.0	2.5	1.6	1.6	7.8	7.8	1.6	231.0	15.0	183	0.078 7
13	0.076	4.1	2.5	1.6	1.6	8.4	23.4	1.9	304.2	13.8	292	0.058 0
14	0.076	3.3	2.5	1.6	1.6	7.2	14.4	1.8	181.2	14.2	226	0.078 1
15	0.076	3.5	2.5	1.6	1.6	6.0	20.4	1.8	215.4	14.5	273	0.058 3
16	0.076	4.5	2.5	1.6	1.6	8.4	8.4	2.0	191.4	13.5	195	0.102 0
17	0.076	4.6	2.5	1.6	1.6	9.0	18.0	2.0	317.4	13.5	228	0.088 0
18	0.076	4.0	2.5	1.6	1.6	8.4	20.4	1.8	289.2	14.0	247	0.081 6
19	0.076	4.0	2.5	1.6	1.6	8.4	27.6	2.1	348.6	14.0	314	0.081 2
20	0.076	4.2	2.5	1.6	1.6	7.8	7.8	2.1	173.4	13.7	194	0.089 5
21	0.076	3.3	2.5	1.6	1.6	6.6	22.2	1.8	190.2	14.3	266	0.079 9
22	0.076	4.6	2.5	1.6	1.6	8.4	8.4	2.0	242.4	12.5	202	0.110 0
23	0.076	3.8	2.5	1.6	1.6	6.6	23.4	1.9	236.4	14.3	280	0.110 0
24	0.076	3.4	2.5	1.6	1.6	7.8	14.4	1.8	253.2	14.8	224	0.096 8
25	0.076	4.2	2.5	1.6	1.6	7.8	22.2	1.9	203.4	13.8	262	0.067 5
26	0.076	3.3	2.5	1.8	1.8	7.8	7.8	1.9	216.0	14.7	203	0.098 5
27	0.076	4.0	2.5	1.8	1.8	7.8	21.6	2.0	151.8	14.0	229	0.056 0
28	0.076	4.8	2.5	1.6	1.6	9.6	17.4	2.0	247.8	13.3	250	0.109 0
29	0.076	4.0	2.5	1.6	1.6	9.6	18.0	1.9	242.4	14.0	229	0.090 1
30	0.076	3.5	2.5	1.6	1.6	7.8	30.0	2.0	238.2	14.5	264	0.067 4

表3 20 m 平台实测振动速度与预测振动速度对比
Table 3 Comparison of vibration velocity between site monitor and prediction on 20-meter platform

组号	预测振动速度/(cm · s ⁻¹)		实测振动速度/(cm · s ⁻¹)	网络预测误差/%	萨氏预测误差/%
	网络预测	萨氏预测			
26	0.064 7	0.051 172	0.069 8	7.3	26.7
27	0.069 6	0.051 172	0.074 7	6.8	31.5
28	0.056 7	0.052 765	0.057 7	1.7	8.6
29	0.079 9	0.047 506	0.088 5	9.7	46.3
30	0.069 2	0.113 340	0.082 0	15.6	38.2
31	0.070 8	0.057 108	0.067 7	4.6	15.6
32	0.076 4	0.061 004	0.086 3	11.5	29.3
33	0.087 8	0.125 396	0.088 6	0.9	41.5
34	0.098 6	0.066 495	0.117 0	15.7	43.2
35	0.050 5	0.051 959	0.050 7	0.4	2.5
平均误差				7.4	28.3

表4 核岛实测振动速度与预测振动速度对比
Table 4 Comparison of vibration velocity between site monitor and prediction on nuclear island

组号	预测振动速度/(cm · s ⁻¹)		实测振动速度/(cm · s ⁻¹)	网络预测误差/%	萨氏预测误差/%
	网络预测	萨氏预测			
21	0.074 7	0.076 6	0.079 9	6.5	4.0
22	0.094 0	0.071 1	0.110 0	14.5	35.4
23	0.094 2	0.072 7	0.110 0	14.3	33.9
24	0.083 6	0.079 9	0.096 8	13.6	17.5
25	0.071 4	0.078 4	0.067 5	5.8	16.1
26	0.093 3	0.067 8	0.098 5	5.3	31.2
27	0.056 4	0.095 3	0.056 0	0.7	70.2
28	0.093 9	0.074 4	0.109 0	13.8	31.7
29	0.098 5	0.086 7	0.090 1	9.3	3.8
30	0.072 7	0.090 6	0.067 4	7.9	34.4
平均误差				9.2	27.8

的学习样本为 25 个, 平均误差为 7.4%, 而核岛神经网络模型的学习样本为 20 个, 平均误差为 9.2%。由此可见神经网络模型的学习样本越多, 预测值越接近实测值。

3 结 论

爆破振动受多种因素影响, 准确分析和预报爆破振动速度一直是爆破界关注的重点, 而预测方法的选择常影响预报的精度。由于神经网络模型不需

要建立输入变量与输出结果之间的力学数学关系, 只需通过调整网络间的权值就能建立输入和输出的非线性关系, 就可以使模型较准确地预报输出结果。基于以上认识, 本文用神经网络模型预测爆破振动速度, 并得到以下结论:

(1) 神经网络模型较全面考虑了影响爆破振动的主要因素(孔径、孔深、孔距排距、最小抵抗线、最大单孔药量、最大段药量、堵塞长度、总药量、高程差和爆源距), 其预测的爆破振动速度反映了多种影响因素的综合, 与实际爆破振动速度相符合。

(2) 神经网络模型预测爆破振动速度, 不需要考虑各因素之间的数学物理关系, 运算简单、方便。

(3) 对比萨道夫斯基公式, 神经网络预报爆破振动速度具有误差小、精度高等特性。

(4) 神经网络模型的学习样本越多, 误差越小, 预测值越接近实测值。

参考文献(References):

[1] 张世雄, 杨明亮, 尹家国, 等. 预测爆破波振动强度的经验公式及其在采矿中的应用[J]. 爆破, 2000, 17(3): 13 - 17.(ZHANG Shixiong, YANG Mingliang, YIN Jianguo, et al. An empirical formula of calculating the vibrating intensity of explosive wave and its application to mining[J]. *Blasting*, 2000, 17(3): 13 - 17.(in Chinese))

[2] 张继春, 彭琼芳. 岩体爆破地震波衰减规律的现场试验与分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2001, 20(4): 399 - 401.(ZHANG Jichun, PENG Qiongfang. Field experiment and its analyses of attenuation law for seismic waves resulting from rock blasting[J]. *Journal of Liaoning Technical University(Natural Science)*, 2001, 20(4): 399 - 401.(in Chinese))

[3] 姚 尧. 地震的放大效应与二元回归分析[J]. 爆破, 1992, 9(4): 5 - 8.(YAO Yao. Enlarged effect of blasting vibration and duality regression analyses[J]. *Blasting*, 1992, 9(4): 5 - 8.(in Chinese))

[4] 卢文波, HUSTRULID W. 质点峰值振动速度衰减公式的改进[J]. 工程爆破, 2002, 8(3): 1 - 4.(LU Wenbo, HUSTRULID W. An improvement to the equation for the attenuation of the peak particle velocity[J]. *Engineering Blasting*, 2002, 8(3): 1 - 4.(in Chinese))

[5] 冯夏庭. 岩石可爆性神经网络研究[J]. 爆炸与冲击, 1994, 14(4): 298 - 306.(FENG Xiating. A study on neural network on rock blast ability[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1994, 14(4): 298 - 306.(in Chinese))

[6] 冯夏庭, 王泳嘉, 卢世宗. 边坡稳定性的神经网络估计[J]. 工程地质学报, 1995, 3(4): 54 - 61.(FENG Xiating, WANG Yongjia, LU Shizong. Neural network estimation of slope stability[J]. *Journal of Engineering Geology*, 1995, 3(4): 54 - 61.(in Chinese))

[7] 林鲁生, 冯夏庭, 白世伟, 等. 人工神经网络在边坡滑移预测中

- 的应用[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 508 - 510.(LIN Lusheng, FENG Xiating, BAI Shiwei, et al. Application of artificial neural network to prediction of sliding slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(4): 508 - 510.(in Chinese))
- [8] 冯夏庭, 林韵梅. 基于神经网络的巷道支护决策[J]. 煤炭学报, 1995, 20(1): 34 - 38.(FENG Xiating, LIN Yunmei. Selection of support systems for underground opening in coal mines based on neural network[J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20(1): 34 - 38.(in Chinese))
- [9] 冯夏庭, 王泳嘉, 姚建国. 煤矿顶板矿压显现实时预报的自适应神经网络方法[J]. 煤炭学报, 1995, 20(5): 455 - 460.(FENG Xiating, WANG Yongjia, YAO Jianguo. An adaptive neural network for real-time prediction of rock behavior in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20(5): 455 - 460.(in Chinese))
- [10] 蔡德所, 胡铁松, 张继春. 基于前馈网络的岩体爆破效应预测研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(1): 43 - 49.(CAI Desuo, HU Tiesong, ZHANG Jichun. Forecast research on effect of vibration and damage in rock mass blasting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(1): 43 - 49.(in Chinese))
- [11] 叶洲元, 马建军, 蔡路军, 等. 利用振动监测数据优化预测爆破质点振动速度[J]. 矿业研究与开发, 2003, 23(4): 48 - 51.(YE Zhouyuan, MA Jianjun, CAI Lujun, et al. An optimized calculation of particle vibration velocity by means of the vibration data form blasting monitoring[J]. Mining Research and Development, 2003, 23(4): 48 - 51.(in Chinese))
- [12] 周志华, 张金山, 刘 勤. 基于人工神经网络的爆破振动速度峰值的预报[J]. 包头钢铁学院学报, 2003, 22(1): 8 - 10.(ZHOU Zhihua, ZHANG Jinshan, LIU Qin. The prediction of blasting vibration velocity by neural network[J]. Journal of Baotou University of Iron and Steel Technology, 2003, 22(1): 8 - 10.(in Chinese))
- [13] 夏梦会, 董香山, 张力民, 等. 神经网络模型在爆破振动强度预测中的应用研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2004, 56(3): 25 - 27.(XIA Menghui, DONG Xiangshan, ZHANG Limin, et al. Application research of neural network model for forecasting the intension of blasting vibration[J]. Non-ferrous Metal(Mining), 2004, 56(3): 25 - 27.(in Chinese))
- [14] 王进学, 郭 勇, 曲文峰. 神经网络法预测爆破震动速度初探[J]. 有色矿冶, 2003, 19(1): 13 - 16.(WANG Jinxue, GUO Yong, QU Wenfeng. Preliminary analysis of predicting the velocity of the blasting vibration by neural network[J]. Non-ferrous Mining and Metallurgy, 2003, 19(1): 13 - 16.(in Chinese))
- [15] 徐全军, 张庆明, 恽寿榕. 爆破地震峰值的神经网络预报模型[J]. 北京理工大学学报, 1998, 18(4): 472 - 475.(XU Quanjun, ZHANG Qingming, YUN Shourong. Neural network model for forecasting peak acceleration of blasting vibration[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1998, 18(4): 472 - 475.(in Chinese))
- [16] SINGH T N, SINGH V. An intelligent approach to prediction and control ground vibration in mines[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2005, 23(3): 249 - 262.
- [17] 从 爽. 面向 MATLAB 工具箱的神经网络理论与应用[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1998.(CONG Shuang. Application of neural network theory based on MATLAB toolbox[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1998.(in Chinese))
- [18] 王道平, 张义忠. 故障智能诊断系统的理论与方法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.(WANG Daoping, ZHANG Yizhong. Method and theory of failure intelligence system[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001.(in Chinese))
- [19] 陆伟民. 人工智能技术及应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 1998.(LU Weimin. Application of artificial intelligence technology[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1998.(in Chinese))
- [20] 中国科学院武汉岩土力学研究所. 岭澳核电站二期工程基础负开挖爆破振动监测总结报告[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2005.(Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science. Report on monitoring blasting vibration in the second phrase for Lingao nuclear power station[R]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2005.(in Chinese))