

人工神经网络在巷道爆破中的应用研究

单仁亮, 汪学清, 高文蛟, 程先锋, 王俊德, 陈茂喜

(中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 应用人工神经网络模型, 分析装药量、炮眼数量等爆破参数对巷道掘进循环进尺的影响。通过对实验结果的分析, 得到如下结论: (1) 提出单位炸药循环进尺和单位炮眼循环进尺的概念, 这 2 个概念可为巷道爆破设计的优劣提供评判标准。(2) 当炮眼数量足够时, 单位炸药进尺随循环装药量的增加而降低, 最后趋于一个稳定值, 也就是装药过多会浪费炸药。(3) 在相同装药量情况下, 随着循环炮眼长度的增加, 单位炸药循环进尺将得到提高, 但装药量越高这种提高幅度会相对越小。(4) 当装药量足够时, 单位炮眼循环进尺随循环炮眼长度的增加而降低, 最后趋于一个稳定值, 也就是炮眼过密或过长会浪费炮眼。(5) 在循环炮眼长度一定的情况下, 增加循环装药量, 单位炮眼进尺将得到提高, 但提高的幅度随着循环炮眼长度的增加而相对地减小。

关键词: 爆破工程; 人工神经网络; 巷道爆破; 单位炸药循环进尺; 单位炮眼循环进尺

中图分类号: TP 391; TD 235

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 1 - 3322 - 07

APPLICATION RESEARCH OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS TO TUNNEL BLASTING

SHAN Renliang, WANG Xueqing, GAO Wenjiao, CHENG Xianfeng, WANG Junde, CHEN Maoxi

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: With the artificial neural networks(ANN) model, the paper analyzes the influence of the blasting parameters including explosive charge, blastholes on tunnel circulation measurement. The analytical results are advisable and as follows: (1) The concepts of tunnel circulation measurement of one-kilogram explosive and tunnel circulation measurement of one-meter length of blasthole are put forward. They provide a certain standard for the judgment whether a tunnel blast design is acceptable or unacceptable. (2) When there are enough blastholes, circulation measurement of one-kilogram explosive decrease when circulation charge increases till to a steady value. That is to say some explosives will be wasted if too much is used in a cycle. (3) Circulation measurement of one-kilogram explosive rises with the increases of circulation length of blastholes when circulation charge keeps to the same, but the enhance extent relatively becomes small with circulation charge increases. (4) When the circulation explosive charge is enough, circulation measurement of one-meter length of blasthole decreases with circulation length of blastholes increasing till to a steady value. (5) Circulation measurement of one-meter blasthole goes up with the increases of circulation explosive charge when circulation length of blastholes keeps the same, but the enhancement extent relatively becomes small with the increase of circulation blasthole length.

Key words: blasting engineering; artificial neural networks(ANN); tunnel blasting; circulation measurement of one-kilogram explosive; circulation measurement of one-meter length of blasthole

收稿日期: 2007 - 04 - 19; **修回日期:** 2007 - 05 - 19

作者简介: 单仁亮(1964 -), 男, 博士, 1987 年毕业于中国矿业学院矿山建设工程专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: srl@cumt.edu.cn

1 引言

在岩巷掘进中, 钻眼爆破仍是目前国内外大量使用的破岩方法之一, 合理确定岩石爆破参数, 是取得良好爆破效果和加快掘进速度的重要措施。影响岩巷掘进爆破效果的爆破参数很多, 如炮眼布置, 炮孔深度和角度, 炸药性能、炸药装药量及装药方式、起爆方式, 工作面的大小、形状及岩石性质等。其中, 工作面炮眼数量直接影响到凿岩工作量和爆破效果; 工作面装药量也和爆破效果、工人劳动强度及爆破成本密切相关。炮眼数量和装药量都直接与循环进尺密不可分, 循环进尺又严格控制整个工程的工期。此外, 一旦得到循环进尺, 就可以进一步计算出循环实岩体积、循环炸药消耗、炸药单耗及全断面的炮眼利用率等爆破参数。因此, 优化炮眼数量和装药量来提高循环进尺显得尤为重要。但到目前为止, 循环进尺和炮眼数量、装药量之间的关系均是建立在定性、经验及实验的基础之上, 这样不便计算、比较、推广和传播。而目前比较成熟的人工神经网络以其高度非线性映射、自组织结构、高度并行处理和不需预先建模等优点为解决上述问题提供了可能, 它为人们解决实际问题提供了一个崭新的手段。本文应用神经网络模型, 对循环进尺和炮眼数量、装药量之间的关系进行了分析和研究, 得到了一些指导性结论。研究表明, 该方法是可行的和有效的。

2 神经网络概述及问题的提出

神经网络理论^[1~3]是 20 世纪 80 年代后期迅速发展起来的一个前沿研究领域。神经网络是由大量神经元广泛互连而成的, 反映了人脑功能的基本特性, 网络的信息处理是由神经元之间的相互作用来实现的, 知识与信息的存贮表现为网络元件互连间分布式的物理联系, 学习与识别决定于各神经元连接权系的动态演化过程。神经网络的主要特征为网络的全局使用、大规模并行分布处理、高度的容错性、鲁棒性及学习联想能力。同时, 神经网络还具有可塑性和冗余性特点, 前者主要反映在神经元之间连接强度的可变性; 后者则是指网络中某个神经元的失效并不会影响整个网络的工作性能。

近年来, 许多研究和工程技术人员对神经网络在岩土工程等方面的应用进行了研究和探索。葛宏伟等^[4]指出神经网络以其连续时间、非线性、网络的全局作用、大规模并行分布处理及高度的鲁棒性和学习联想能力, 为解决岩石力学问题提供了一种有力的工具, 尤其在解决关于岩体力学非线性关系、参数识别、预测等方面的问题表现出了巨大的潜力。常斌和李宁^[5]研究并分析了对网络收敛性能有重要影响的非线性系数的取值方法及规律, 由此提高了 BP 网络在具体工程应用中的实用性。姚建国^[6]指出神经网络在岩土力学与工程应用中的主要局限性及克服局限性的对策。李守巨等^[7]建立了基于神经网络的爆炸冲击荷载参数识别方法, 其计算结果表明, 该方法具有良好的鲁棒性和抗观测噪声能力。吕培印等^[8]将神经网络应用于边坡稳定性分析中, 研究表明该方法是可行和有效的。刘海涛等^[10]成功地将神经网络应用于石油测井资料岩性识别中。王建雷和陈国华^[11]介绍了桥梁损伤智能诊断中常用的 BP 神经网络模型的结构及其国内外的主要研究成果, 指出了 BP 神经网络的一些缺陷, 并提出了相应的改进方法。林毅生等^[12]通过对以往人工智能在桥梁工程中的应用研究与分析, 提出了桥梁工程中全寿命信息流的模型。曹国金等^[13]提出用神经网络识别地下工程围岩力学参数, 构造了识别围岩力学参数的 BP 神经网络模型, 研究表明其模型具有较高的识别精度, 提出的方法在工程实际中有较高的应用价值。

在岩巷掘进中, 由于工作面的大小、形状及岩石性质、炸药性能和装药条件、人为因素等影响, 确定循环进尺是一个非常复杂的工作。宗琦和谢长亮^[4]介绍了现有炮眼数目的理论和经验计算公式, 并对较公认的循环药量炮眼平均分配法进行了分析, 提出了较为合理的确定炮眼数量的方法。但完全根据公式计算确定工作面炮眼数目却往往不太切合实际。

贾广辉等^[15]应用理论, 根据理论分析和实验室模型实验得出的基本结论, 从炮眼孔径、炮眼布置方式、起爆时差等方面入手在现场大量探索性工业实验的基础上, 针对含煤矸石的复杂薄煤层, 提出了一套高效可行的爆破参数, 改进了过去的生产工艺, 提高了施工速度与质量, 实现了薄煤层高产增

效。黄小红^[16]通过改进炮孔布置形式和选择合理的炮孔深度，以减少炮孔数目，降低爆破成本，进而提高了斜井掘进的效率。吴德义和王爱兰^[17]分析了地基与基础开挖时在使岩石得到充分破碎和无抛掷的基础上确定爆破参数应考虑的因素，特别是单位耗药量计算应考虑的眼眼布置因素，通过理论分析和工程实践，得到应当采用宽孔距小抵抗的爆破参数的合理结论。小抵抗不仅可以使岩石得到充分破碎，而且可以减少炮孔数量和装药量，使爆破成本最低。上述文献均没有直接给出炮眼数量、装药量与循环进尺的关系，而循环进尺的确定，直接影响到施工工期、炮眼利用率、炸药消耗及爆破成本等。

人工神经网络作为一种信息处理技术，是通过自身的学习机制来完成数据处理的，网络的特性是由网络的拓扑结构、结点特性、学习或训练的规则所确定的。它能够充分利用样本信息，对不同的样本逐一进行训练从而获得均衡的收敛权值，这些权值即代表了网络中内含的映射关系。

本文以现场采集到的爆破参数作为训练样本对人工神经网络进行训练。经过成功训练的人工神经网络用于分析循环进尺与炮眼数量、装药量之间的关系，取得了良好的效果。

3 人工神经网络设计

根据羊场湾煤矿 2#副斜井工程地质条件及所设计的爆破参数进行人工神经网络设计。

3.1 工程地质条件

羊场湾煤矿 2#副斜井井筒施工范围内构造较简单，为一单斜构造，煤岩层产状总体上为 130°∠8°~12°。揭露的岩性主要为第四系风化积砂表土、泥岩、砂质泥岩、粉砂岩、细砂岩、粗砂岩，岩石的普氏系数 $f = 4\sim 6$ 。其中一巷道断面的炮眼布置情况如图 1 所示。采集到的一组爆破参数实验数据如表 1 所示。

3.2 神经网络设计

将掏槽眼、辅助眼、周边眼及底眼、岩石普氏系数、岩巷断面积等参数作为输入参数，将循环进尺作为输出参数进行神经网络训练，因此网络设计为多输入(输入参数个数 $R = 18$)、单输出的神经网络。

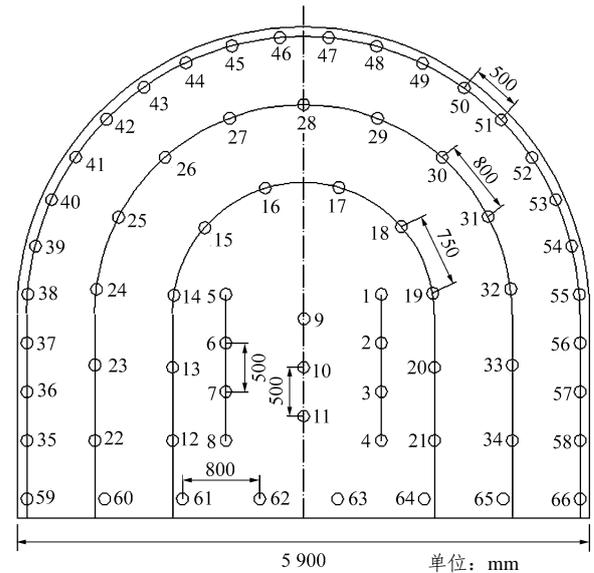


图 1 炮眼布置图

Fig.1 Layout of blastholes

基于 Kolmogorov 三层神经网络映射存在定理^[18]，对于本文研究的问题，采用输入参数个数 $R = 18$ ，隐层单元个数为 $2R + 1 = 37$ 和输出单元个数为 1，隐层传递函数为 Sigmoid 型函数及输出层传递函数为 Purelin 型函数的 3 层神经网络模型(见图 2)。

4 实验结果与分析

4.1 定义

(1) 单位炸药循环进尺，即单位重量的炸药对循环进尺的贡献，用循环进尺与炸药消耗量之比来表示：

$$E_d = L/Q \tag{1}$$

式中： E_d 为单位炸药循环进尺(m/kg)， L 为循环进尺(m)， Q 为装药量(kg)。

(2) 单位炮眼循环进尺，即单位长度的炮眼对循环进尺的贡献，用循环进尺与每循环所有炮眼长度的和之比来表示：

$$E_h = L / \sum_{i=1}^n l_i \tag{2}$$

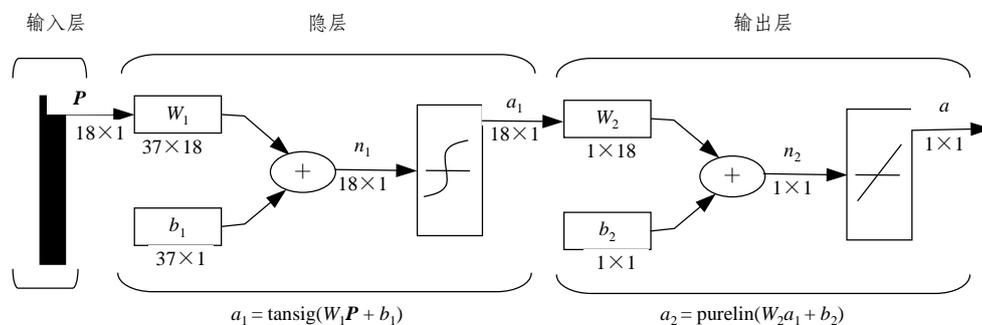
式中： E_h 为单位炮眼循环进尺(m/m)， l_i 为第 i 个炮眼深度(m)， n 为炮眼数量(个)。

4.2 实验结果与分析

通过人工神经网络的仿真实验，发现掏槽眼、辅助眼、底眼及周边眼对循环进尺有类似的结果，

表 1 爆破参数
Table 1 Blasting parameters

| 试验 序号 | 掏槽眼 | | | | 辅助眼 | | | | 周边眼 | | | | 底眼 | | | | 普氏 系数 | 岩巷断 面积 /m ² | 循环 进尺 /m |
|----------|------------|----------|------------|------------|------------|----------|------------|------------|------------|----------|------------|------------|------------|----------|------------|------------|----------|------------------------------|----------------|
| | 炮眼数 量/个 | 眼深 /m | 装药量 /kg | 填塞长 度/m | | | |
| 1 | 16 | 2.8 | 27.72 | 0.15 | 68 | 2.8 | 68.87 | 0.15 | 20 | 2.8 | 6.0 | 0.15 | 10 | 2.8 | 12.87 | 0.15 | 5 | 34.06 | 2.00 |
| 2 | 16 | 2.3 | 15.84 | 0.15 | 44 | 2.8 | 53.49 | 0.15 | 19 | 2.8 | 5.7 | 0.15 | 8 | 2.8 | 10.59 | 0.15 | 5 | 26.05 | 2.20 |
| 3 | 8 | 2.8 | 17.04 | 0.40 | 23 | 2.8 | 41.40 | 0.40 | 21 | 2.8 | 6.3 | 0.30 | 14 | 2.8 | 29.82 | 0.40 | 5 | 26.05 | 2.25 |
| 4 | 11 | 2.8 | 18.48 | 0.40 | 26 | 2.8 | 46.80 | 0.40 | 24 | 2.8 | 7.2 | 0.30 | 8 | 2.8 | 15.84 | 0.40 | 5 | 26.05 | 2.15 |
| 5 | 11 | 2.8 | 18.48 | 0.40 | 23 | 2.8 | 41.40 | 0.40 | 24 | 2.8 | 7.2 | 0.30 | 8 | 2.8 | 15.84 | 0.40 | 5 | 26.05 | 2.30 |
| 6 | 12 | 2.8 | 20.61 | 0.40 | 33 | 2.8 | 59.40 | 0.40 | 24 | 2.8 | 7.2 | 0.30 | 10 | 2.8 | 21.30 | 0.40 | 5 | 26.05 | 2.60 |



P —输入矢量; W_1, W_2 —权重; b_1, b_2 —偏差; $n_1 = W_1 P + b_1$; $n_2 = W_2 a_1 + b_2$; a_1 —隐层输出; a —网络输出

图 2 所用的人工神经网络拓扑结构

Fig.2 ANN's topology employed in study

因此下面仅介绍对掏槽眼的研究结果。

(1) 炮眼数量与循环进尺的关系分析

从图 3 中可以看出, 对于一定的装药量, 均存在一个最优炮眼数量(对于一定的装药量, 有一个炮眼数量能使循环进尺达到最大值); 也就是说, 对于一定的装药量, 为了提高循环进尺, 只是一味地增加炮眼数量并不能有利于循环进尺的提高, 反而会降低循环进尺, 而增加炮眼数量, 又会增加施工作业时间, 浪费人力、物力和财力。出现这种情况的原因是因为, 当炮眼数量过少时, 装药过于集中于少数炮眼, 装药的抵抗将减小, 并且堵塞的长度会降低, 不少炸药的能量主要被用于孔口岩石的破碎和抛掷。当炮眼数目过多时, 各炮眼的平均装药量就会很少, 在目前的装药技术条件下, 装药将会被装至孔底, 结果是期望被爆破的岩石设计的单位炸药消耗虽然没有变化, 但抵抗显著增加了, 从而

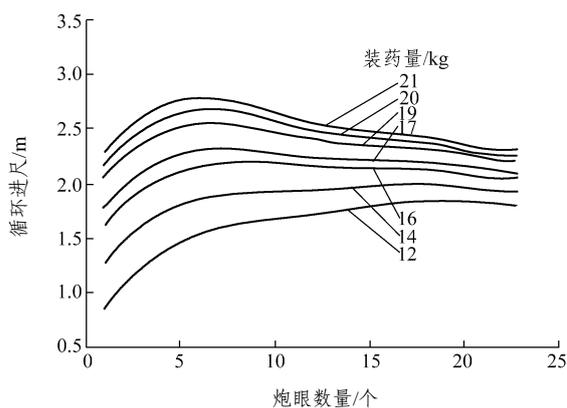


图 3 炮眼数量与循环进尺的关系曲线

Fig.3 Relation curves between the number of blastholes and circulation measurement

影响了循环进尺。

从图 3 中还可以看出, 随着装药量的增加, 最

优炮眼数量有减少的趋势。可以从反面来考虑这个问题，即随着药量的增加，如果再增加炮眼数量，则更加剧了炮眼之间的相互影响，可能会产生过破碎，降低炸药的爆破效果，从而影响到循环进尺。因此，提高炸药装药量，则应该适当减少炮眼数量。

(2) 装药量与循环进尺的关系分析

从图 4 中可以看出，对于一定的炮眼数量，则存在一个最优装药量，也就是对于一定的炮眼数量，存在一个炸药的装药量能使得循环进尺达到最大值，并且随着炮眼数量的增加，最优装药量有增加的趋势。这说明，对于一定的炮眼数量，只是一味地增加炸药的装药量并不能有利于循环进尺的提高，反而会降低循环进尺，而增加装药量，还会相应地增加装药时间，从而增加工程成本。

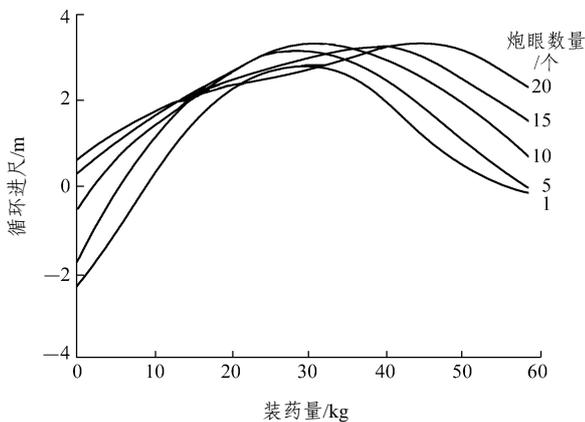


图 4 装药量与循环进尺的关系曲线

Fig.4 Relation curves between explosive charge and circulation measurement

出现这种情况的原因是因为，由于炮眼数量没有增多，仅增加炸药的装药量，并没有增加炮眼底部的装药量，仅仅是增加了炮眼顶部的装药量，因而使部分炸药只是起到了类似炮泥的作用，甚至影响了底部炸药的性能，进而影响了循环进尺。

在图 4 中，出现了循环进尺为负的情况，这表示太少的炮眼和太少的装药量，根本对岩石产生不了破坏，因而也就不会有进尺可言。

(3) 装药量与单位炸药循环进尺的关系分析

在炮眼数量较少的情况下，当炸药的装药量低于某一个值时，则不能破碎岩石，即所谓的“爆不动”的现象，也就没有循环进尺，所以出现了图 5 所示的单位炸药循环进尺为负的情况。此外，一旦

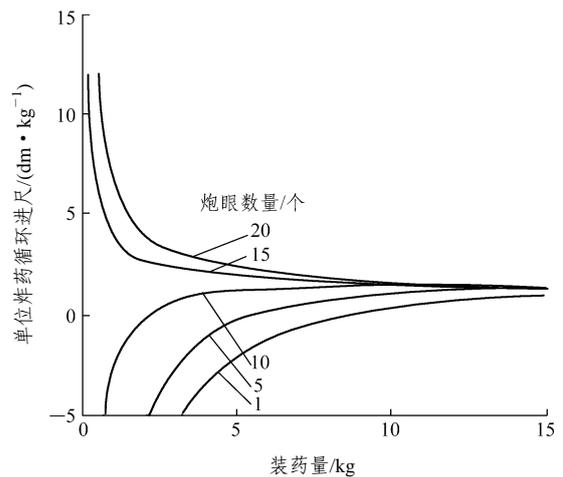


图 5 装药量与单位炸药循环进尺的关系曲线

Fig.5 Relation curves between explosive charge and circulation measurement of one-kilogram explosive

达到一定的装药量，则爆破发生，也就有了循环进尺，所以会出现图 5 中的突变。

图 4 表明，当装药量小于最优装药量时，增加炸药装的药量，可以相应地增加循环进尺。但由图 5 可知：① 当炮眼数量足够时，单位炸药循环进尺随装药量的增加而降低，最后趋于一个稳定值，也就是装药量过多会浪费炸药。② 在相同装药量情况下，随着炮眼数量的增加，单位炸药循环进尺将得到提高，但装药量越高这种提高幅度会越小。因此，仅从炸药的经济效益来考虑，小循环、小药量要比大循环、大药量具有优越的炸药利用率，但此时的炮眼利用率并不一定最高。当然，岩巷掘进是一个复杂的工程，各种因素要综合考虑，比如工期紧张的情况，循环进尺是首先要考虑的因素。

(4) 炮眼数量与单位炮眼循环进尺的关系分析

从图 6 可以看出：① 当装药量足够时，单位炮眼循环进尺随循环炮眼长度的增加而降低，最后趋于一个稳定值，也就是炮眼过密或过长会浪费炮眼。② 在循环炮眼长度一定的情况下，增加装药量，单位炮眼循环进尺将得到提高，但提高的幅度随着循环炮眼长度的增加而减小。

(5) 实际工作面最优的掏槽参数

从前面的分析可以提炼出的本工作面最优的掏槽眼参数为：炮眼数量为 6 个，炸药的装药量为 21 kg，则此时的循环进尺为 2.78 m，炮眼利用率可达 99.3%。表 2 给出了部分炮眼数量、装药量与循环进尺的关系。

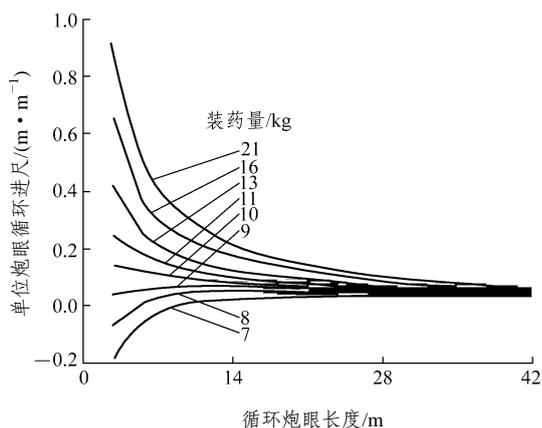


图 6 循环炮眼长度与单位炮眼循环进尺的关系曲线

Fig.6 Relation curves between the number of blastholes and unit length blasthole measurement

表 2 炮眼数量、装药量与循环进尺的关系

Table 2 Relation between blasthole 's number, charge and measurement

| 炮眼数量/个 | 循环进尺/m | |
|--------|--------|--------|
| | 20 kg* | 21 kg* |
| 6 | 2.67 | 2.78 |
| 7 | 2.66 | 2.77 |
| 8 | 2.64 | 2.73 |
| 9 | 2.60 | 2.69 |
| 10 | 2.55 | 2.64 |

注：“*”为装药量。

5 结 论

岩巷掘进循环进尺受岩石性质、爆破参数等多种因素的影响, 这些因素存在着非常复杂的映射关系, 很难建立纯粹的数学模型。而神经网络以其高度非线性映射、自组织结构、高度并行处理和不需预先建模等优点为解决这些复杂的关系提供了可能, 把神经网络模型应用于炮眼数量和装药量的优化, 是本文一个极其富有意义的尝试。

(1) 提出了单位炸药循环进尺和单位炮眼循环进尺概念, 这 2 个概念为巷道爆破方案的优劣提供了评判标准。

(2) 当炮眼数量足够时, 单位炸药循环进尺随炸药量的增加而降低, 最后趋于一个稳定值, 也就是装药过多会浪费炸药。

(3) 在相同装药量情况下, 随着炮眼数量的增加, 单位炸药循环进尺将得到提高, 但装药量越高这种提高幅度会越小。

(4) 当装药量足够时, 单位炮眼循环进尺随循环炮眼长度的增加而降低, 最后趋于一个稳定值, 也就是炮眼过密或过长会浪费炮眼。

(5) 在循环炮眼长度一定的情况下, 增加装药量, 单位炮眼循环进尺将得到提高, 但提高的幅度随着循环炮眼长度的增加而相对减小。

这些最优参数的给出, 为爆破设计提供了有价值的参考, 能够有效地指导爆破参数设计和爆破工程实践。当然, 爆破设计是一个需要综合考虑多种因素的复杂工作, 神经网络为其提供了一种新的研究和设计方法, 因而这里面尚待研究的问题还很多。

参考文献(References):

[1] BARMANN F, BIEGLER-K F. On a class of efficient learning algorithms for neural networks[J]. Neural Networks, 1992, 5(1): 36 - 47.

[2] FUNAHASHI K, NAKAMURA Y. Approximation of dynamical systems by continuous time recurrent neural networks[J]. Neural Networks, 1993, 6(6): 801 - 806.

[3] 李仁璞, 王正欧. 一种结构自适应的神经网络特征选择方法[J]. 计算机研究与发展, 2002, 39(12): 1 613 - 1 617.(LI Renpu, WANG Zheng'ou. A method of characteristic selection for structure self-adapting ANN[J]. Journal of Computer Research and Development, 2002, 39(12): 1 613 - 1 617.(in Chinese))

[4] 葛宏伟, 梁艳春, 刘 玮, 等. 神经网络与遗传算法在岩石力学中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1 542 - 1 550.(GE Hongwei, LIANG Yanchun, LIU Wei, et al. Applications of artificial neural networks and genetic algorithms to rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(9): 1 542 - 1 550.(in Chinese))

[5] 常 斌, 李 宁. 前馈逆传播算法优化及其在岩土工程中的应用[J]. 岩土工程技术, 2002, (5): 249 - 251, 264.(CHANG Bin, LI Ning. Optimization of BP arithmetic and its application to geotechnical engineering[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2002, (5): 249 - 251, 264.(in Chinese))

[6] 姚建国. 神经网络在岩土力学与工程中应用的局限性及对策[C]// 第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2004: 212 - 216.(YAO Jianguo. Research on how to

- overcome the limitations of artificial neural network in applications of geomechanics and engineering[C]// Proceedings of the 8th National Conference on Rock Mechanics and Engineering Science. [S. l.]: [s. n.], 2004: 212 - 216.(in Chinese)
- [7] 李守巨, 刘迎曦, 何翔, 等. 基于人工神经网络的爆炸冲击荷载参数识别方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1 870 - 1 873.(LI Shouju, LIU Yingxi, HE Xiang, et al. Identification with artificial neural network of load parameters from underground explosion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1 870 - 1 873.(in Chinese))
- [8] 吕培印. 人工神经网络方法在海州矿边坡不稳定区圈定中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1 490 - 1 493.(LU Peiyin. Application of artificial neural network method to determination of instability zone of slope in Haizhou mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1 490 - 1 493.(in Chinese))
- [9] 夏元友, 熊海丰. 边坡稳定性影响因素敏感性人工神经网络分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2 703 - 2 707.(XIA Yuanyou, XIONG Haifeng. Sensibility analysis of slope stability based on artificial neural network[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2 703 - 2 707.(in Chinese))
- [10] 刘海涛, 周志华, 尹旭日, 等. 神经网络在测井资料岩性识别中的应用研究[J]. 模式识别与人工智能, 2000, 13(2): 227 - 229.(LIU Haitao, ZHOU Zhihua, YIN Xuri, et al. Research on neural network in lithology identification from well logs[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2000, 13(2): 227 - 229.(in Chinese))
- [11] 王建雷, 陈国华. 人工神经网络在桥梁损伤智能诊断中的应用[J]. 建筑技术开发, 2004, 31(11): 89 - 91.(WANG Jianlei, CHEN Guohua. Application of artificial neural networks to bridge damage intelligent detection[J]. Building Technique Development, 2004, 31(11): 89 - 91.(in Chinese))
- [12] 林毅生, 陈宝永, 李乃才. 桥梁工程中的人工智能[J]. 黑龙江交通科技, 2001, (4): 43 - 46.(LIN Yisheng, CHEN Baoyong, LI Naicai. Artificial intelligence in bridge engineering[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2001, (4): 43 - 46.(in Chinese))
- [13] 曹国金, 杨威, 沈辉. 人工神经网络在隧洞工程应用[J]. 电力勘测, 2001, (4): 36 - 39.(CAO Guojin, YANG Wei, SHEN Hui. The application of artificial neural networks to the tunnel engineering[J]. Electric Power Reconnaissance, 2001, (4): 36 - 39.(in Chinese))
- [14] 宗琦, 谢长亮. 关于岩巷掘进工作面炮眼布置数目的确定[J]. 煤矿爆破, 2000, (4): 4 - 6.(ZONG Qi, XIE Changliang. A determination of blasthole number for rock tunnel working face[J]. Coal Mine Blasting, 2000, (4): 4 - 6.(in Chinese))
- [15] 贾广辉, 倪庆均, 孙强. 含煤矸石薄煤层炮采面爆破参数的优化实验[J]. 煤炭科学技术, 2004, 32(12): 61 - 63.(JIA Guanghui, NI Qingjun, SUN Qiang. Test on blasting parameter optimization of coal blasting mining face in thin seam with partings[J]. Coal Science and Technology, 2004, 32(12): 61 - 63.(in Chinese))
- [16] 黄小红. 合理确定凿岩爆破参数提高斜井掘进效率的实践[J]. 采矿技术, 2005, 5(4): 52 - 53.(HUANG Xiaohong. A practice of increasing tunneling efficiency of slope shaft by reasonable determination of blasting parameters of rock drilling[J]. Mining Technology, 2005, 5(4): 52 - 53.(in Chinese))
- [17] 吴德义, 王爱兰. 地基及基础开挖的爆破参数确定[J]. 煤矿爆破, 1999, (3): 18 - 19.(WU Deyi, WANG Ailan. A determination of blasting parameters of ground sill's and base's opening[J]. Coal Mine Blasting, 1999, (3): 18 - 19.(in Chinese))
- [18] 胡德文. 多层神经网络逼近精度研究[C]// 首届中国神经网络学术大会论文集. [S. l.]: [s. n.], 1990: 115 - 118.(HU Dewen. Research on approximation precision for multilayer artificial networks[C]// Proceedings of the 1st China Conference on Neural Network. [S. l.]: [s. n.], 1990: 115 - 118.(in Chinese))