

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.03.029

岩溶地质下露天深孔爆破飞石飞散距离的预测

王振毅¹,李静¹,钱至桥²,肖强¹

(1. 浙江省高能爆破工程有限公司,杭州 311500;2. 贵州大学,贵阳 550002)

摘要: 飞石是露天矿爆破作业中最危险的事件之一,目前爆破飞石的飞散距离主要通过几种经验公式预测,由于不同工程地质情况、爆破类型和参数的差异性很大,此类经验模型准确率不高,各种参数的权重关系未知是经验模型不准确的主要原因。目前使用人工智能等新方法预测爆破飞石飞散距离具有一定可操作性,由于贵阳清镇市樱桃井水泥用石灰岩矿山在爆破作业过程中发生了飞石飞散距离超出预期,造成周边受保护建筑物损坏的情况,研究人员利用人工神经网络、结合岩石性质、爆破方式和爆破设计参数,对该矿山爆破作业中的爆破参数、岩石性质和飞石飞散距离等参数进行了统计和分析。通过122个爆破试验数据训练了7个不同的神经网络建模,其中一个三层前馈-反向传播神经网络均方根误差最小,该网络由16个隐神经元组成,包含9个输入参数和1个输出参数;经对比,该网络模型的预测结果与实测数据平均相对误差在3.31%以内,具有指导意义。对该网络建模的敏感性分析,发现可爆性指数、延期时间、单段装药量、孔径、孔深、溶洞是对爆破飞石飞散距离影响最大的参数。

关键词: 工程爆破;溶洞;飞石飞散距离;人工神经网络

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)03-0199-05

Prediction of Flyrock distance in Open-pit Deep Hole Blasting under Karst Geology

WANG zhen-yi¹, LI Jing¹, QIAN Zhi-qiao², Xiao-qiang¹

(1. Zhejiang Gaoneng Blasting Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311500, China;
2. School of Mining, Guizhou University, Guiyang 550002, China)

Abstract: Flyrock is one of the most hazardous events in open-pit mine blasting operations. At present, the flying distance of flyrock is mainly predicted by several empirical formulas. However, due to the great difference between different engineering, blasting types and parameters, the accuracy of this kind of empirical model is not high. Besides, the unknown weight relationship of various parameters is the main reason for the inaccuracy of the empirical model. To solve this problem, artificial intelligence and other new methods can be used to predict the flying distance of flyrock. During the blasting operation of Yingtaojing limestone mine in Qingzhen city, Guiyang, flying stones were scattered far beyond expectations, resulting in the damage of surrounding protected buildings. In this paper, an attempt is made to predict and control flyrock in blasting operation of this mine using artificial neural network method. Based on 122 blasting test data, 7 different neural networks are trained to model. Among them, a three-layer feedforward back-propagation neural network has the lowest root mean square error, which was composed of 16 hidden neurons, including 9 input parameters and 1 output parameter. By comparison, the average relative error between the predicted results and the measured data is within 3.31%, which has guiding significance. The sensitivity analysis of the model shows that the parameters that have the greatest influence on the distance of blasting flyrock are explosiveness index, delay time, charge per delay, hole diameter, hole depth and karst cave.

Key words: engineering blasting; karst cave; flyrock distance; neural network

飞石是爆破作业对周边环境的一种有害效应,其飞散距离和块度受可控和不可控参数的影响^[1],可控参数可以通过装药、起爆工艺改变;而不可控参数主要包括岩土和地质固有参数,无法控制和调整^[2]。可控参数主要可控参数有:延迟时间、堵塞、钻孔位置和单耗、单孔装药量;而不可控参数主要为不良的地质和岩土条件,特别是爆破孔上部和自由面方向松散岩石、溶洞的存在,以及相邻炮孔之间溶洞导致炮孔连通从而增加单段药量^[3]。由于爆破作业中飞石的各种相关参数以及整个过程的复杂性,目前现有的经验方法的预测性能并不准确^[3]。而且部分参数量化困难,现有经验方法无法预测复杂地质,特别是岩溶地质情况下实际的飞石的飞散距离^[4]。

人工神经网络(ANN)是最有能力的人工智能子系统之一^[5],能够在复杂情况下获得精确解。在本次研究中,结合多次采集的实测爆破参数和相关数据,利用人工神经网络训练,开发了一个模型,用于预测和控制贵阳清镇市樱桃井水泥用石灰岩矿山爆破作业产生的飞石。

1 人工神经网络训练方法

在人工神经网络方法中,相关参数的相互关系是通过使用实际现场采集的数据库进行反馈分析得出的,数据库越大,模型结果越精确。ANN是一系列层(输入隐藏输出),由简单且完全连接的处理元素组成,称为神经元,它具有自适应过程和学习过程;其能根据网络训练样本的数据寻找系统输入和输出的定量表达关系,从而完成系统预测,输入训练样本的数量取决于待解决问题的性质和复杂性。人工神经网络中内部层通常与外部世界没有连接,因此被称为隐层^[6],隐层神经元负责在网络输入和输出之间进行适当的干预;一般情况下,对于复杂的问题,一个或两个隐藏层就足够了,但是在这方面没有理论上的限制。

反向传播网络由于其强大的特性而逐渐得到广泛应用。它们被认为是复杂条件下最受欢迎、最有效、最易于学习的模型,适用于使用监督学习技术训练多层前馈网络^[7,8]。在训练阶段,调整连接权重以减少输出误差。参数的学习速度和权重对训练过程有显著影响。学习率的较大值(0和1之间的典型值)会导致更快地学习,但权重可能会有较大波

动;另一方面,如果权重过低会导致学习缓慢,收敛到极值所需的时间会更长^[9]。

2 工程概况

贵阳市清镇市樱桃井水泥用石灰岩矿山位于清镇市站街镇林歹村,矿区为一近南北向的长方形,面积约 0.492 km²。矿区中心地理坐标东经 106°21'55",北纬 26°42'51"。该矿山为露天矿山,开采标高为 1386.3 ~ 1213.5 m,采用露天深孔爆破开采、自卸矿用车辆运输的方式。该矿区域内主要为中风化石灰岩,岩溶发育丰富、多溶洞;爆区周边环境情况:矿区西侧边界距水泥厂房 107 m,距 35 kV 高压线路 310 m,南侧距砖混结构村民用房最近 212 m,北侧和西侧均为山体;如图 1 所示。

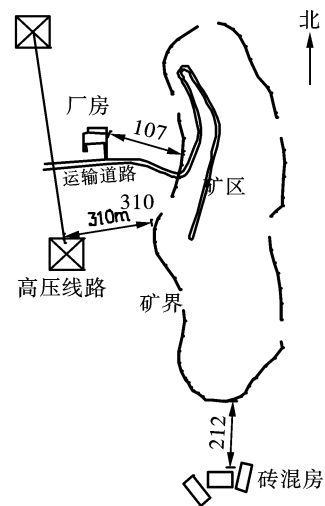


图 1 矿区周边环境情况(单位:m)

Fig. 1 Surrounding environment of blasting area(unit:m)

该矿山目前采用孔径 115 mm 和 140 mm 的深孔爆破,台阶高度 10 ~ 15 m、孔深 11 ~ 16.5 m、炮孔倾斜角 90°,单孔装药量 57 ~ 169 kg,堵塞 3.5 ~ 5.0 m,孔距 4 ~ 6.5 m、排距 3.5 ~ 5 m、底盘抵抗线为 4 ~ 5.5 m,民爆器材选用混装铵油炸药、 ϕ 70 mm 乳化炸药和数码电子雷管、逐孔微差起爆网路,孔间延期时间 30 ~ 80 ms。2020 年 10 月某日,在该矿山岩溶发育区进行的深孔爆破中飞石飞散超过 250 m,砸坏水泥厂房外墙和供气管道,造成设备的损坏。为分析事故原因、准确估算飞石飞散距离,该矿山进行了一系列数据采集和监测工作。

3 输入和输出参数

本工程研究人员进行了为期 6 个月的数据收集和测量,同时使用该矿山实际爆破参数,编制了一个包含 122 个数据集的数据库。用于神经网络建模的

收稿日期:2022-06-04

作者简介:王振毅(1984-),男,高级工程师、硕士研究生,主要从事工程爆破安全管理研究和应用,(E-mail)158553731@qq.com。

输入和输出参数及其各自的符号和实际范围见表 1。已选择一些最重要的可控或不可控参数作为输入,但该建模中未考虑其他变化较小或不存在变化的影响参数^[10],如岩石密度^[11]。

表 1 神经网络建模的输入输出参数表
Table 1 Input and output parameters used for neural network modeling

数据类型	输入数据	编号	范围
输入	底盘抵抗线/m	1	4 ~ 5.5
	单孔装药量/kg	2	57 ~ 169
	孔径/mm	3	115 ~ 140
	孔深/m	4	11 ~ 16.5
	堵塞长度/m	5	3.5 ~ 5.0
	单位耗药量/(kg · m ⁻³)	6	0.3 ~ 0.4
	孔间延期时间/ms	7	30 ~ 80
	钻孔岩溶率/%	8	2 ~ 6
	岩溶密度/(个 · km ⁻²)	9	0 ~ 3
输出	飞石距离/m	10	51 ~ 291

4 网络体系结构

与其他类型的神经网络相比,前馈-反向传播神

经网络(FBPNN)被认为更适合这种基于模式匹配的问题。这是一种输入-输出映射结构,映射越近,网络的性能越好。使用 FBPNN 可以实现网络预测给定输入模式的目标,从而实现输入模式和目标模式之间的适当映射^[12]。为了进行可靠的映射,输入内容应涵盖与输出相关的所有参数,并将其作为输入提供给网络。网络体系结构设计的一个重点是识别和避免过度拟合和欠拟合等现象,当使用过多的训练时段训练网络时,会发生过度拟合,从而导致模型记忆^[13];另一方面,应考虑输入数据组数量不足,导致模型结果拟合不足和不准确的情况^[14]。

在本研究中,随机抽取 90%的可用数据集进行训练^[15],其余 12 组数据集用于测试模型。为了确定最佳网络,计算各种模型(一至两个隐层)的均方根误差 RMSE(式 1)、平均绝对误差 Ea(式 2)和平均相对误差 Er(式 3)。

$$RMSE = \sqrt{\frac{(Q_i - T_i)^2}{N}} \quad (1)$$

式中, T_i 、 O_i 和 N 分别表示实测输出、预测输出和输入输出数据对的数量。

表 2 不同模型均方根误差比较

Table 2 Results of a comparison between some of the Models

建模函数	函数架构	均方根误差(RMSE)
$L-L-P$ 型传输函数	9-4-1	0.91
$L-L-P$ 型传输函数	9-10-1	2.23
$L-L-L-P$ 型传输函数	9-10-8-1	1.77
$T-T-P$ 型传输函数	9-11-1	1.21
$T-L-T-P$ 型传输函数	9-15-25-1	2.98
$T-L-P$ 型传输函数	9-16-1	0.86
$L-L-P$ 型传输函数	9-11-1	2.56

表 2 中建模函数代称 L 为 S 型传输函数、 P 为线性传输函数、 T 为双曲正切 S 型传输函数,从表 2 中可以看出,架构为 9-16-1 的 $T-L-P$ 型网络具有最小均方根误差,因此被认为是最佳模型^[16]。

5 模型性能

通过比较预测值和测量值,可以评估模型的性能。图 2 和图 3 中显示了预测和测量飞岩的图形对比。从这些图中可以看出,每个爆破模式的测量值和预测值之间存在非常高的一致性和相关性。

模型性能也可以用式(2)和式(3)计算表示。为此,可以确定平均 E_a 和平均 E_r 。对于选定的优化模型, E_a 和 E_r 分别等于 2.29 m 和 3.31%

$$E_a = |T_i - O_i| \quad (2)$$

$$E_r = \left(\frac{|T_i - O_i|}{T_i} \right) \times 100 \quad (3)$$

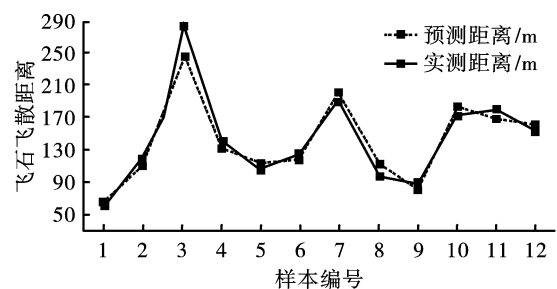


图 2 不同类型飞石的实测和预测对比
Fig. 2 Comparison of measured and predicted flyrock for different type of patterns

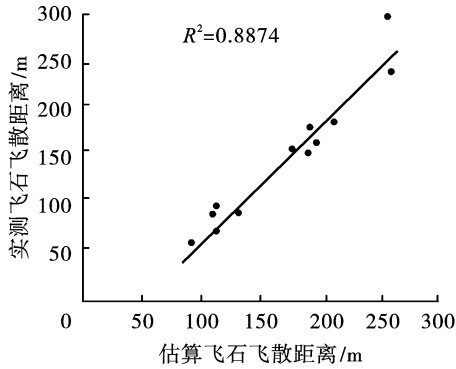


图3 实测和预测飞石距离之间的相关性

Fig. 3 Correlation between measured and predicted flyrock

6 敏感性分析

实测飞石飞散距离与输入参数之间关系的强度可通过余弦振幅法进行评估^[17],应用这种方法,所有数据对都用公共 X 空间表示。用于构造数据数组 X 的数据对定义为

$$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n\} \quad (4)$$

数据数组 X 中的每个元素 X_i 都是一个长度为 m 的向量。

$$X = \{x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{im}\} \quad (5)$$

因此,可以将每个数据集看作是 m 维空间中的一个点,其中每个点需要 m 坐标才能进行完整的描述,空间中的每个点都与成对比较的结果有关系。数据集 X_i 和 X_j 之间的强度关系由式 6 给出

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m x_{ik}x_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m X_{ik}^2 \sum_{k=1}^m X_{jk}^2}} \quad (6)$$

根据余弦振幅法评估得到的影响系数(图4),输入参数中单孔装药量、钻孔岩溶率、孔径、堵塞长度、延期时间是对飞石距离影响最明显的参数。

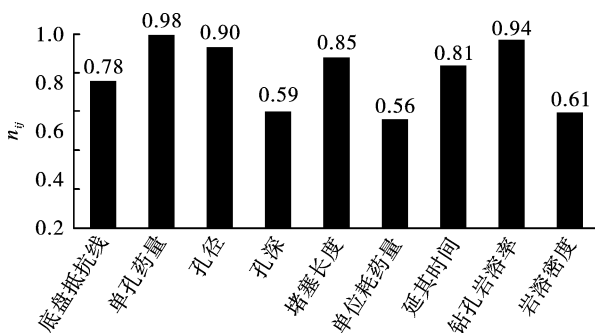


图4 飞石距离与各输入参数之间的灵敏度分析

Fig. 4 Sensitivity analysis between the flyrock and each input parameters

7 结论

(1) 由于以往同类研究中未将岩溶地质对爆破飞石的影响量化地反映到预测公式中,因此本模型的输入参数引入了经矿山地勘获得的钻孔岩溶率、岩溶密度等参数,经敏感性分析发现钻孔岩溶率与爆破飞石飞散距离的相关性极高。

(2) 基于 ANN 的人工神经网络模型能更有效应用于贵阳市清镇市樱桃井水泥用石灰岩矿山爆破飞石飞散距离的预测,其平均相对误差仅为3.31%。

(3) 根据敏感性分析,对爆破飞石飞散距离影响最大的参数依次为单孔装药量、钻孔岩溶率、孔径、堵塞长度、延期时间,体现了不良地质条件对爆破飞石产生的重要影响。

(4) 考虑到地勘采样率不足,数据密度不够高的缺点,采样的输入数据中岩溶密度系数变化幅度和范围都很小,因此该模型的敏感性分析不能证明岩溶密度对爆破飞石飞散距离的影响偏小。

参考文献 (References)

- [1] 崔雪蛟,周建敏,赵明生,等. 延时间隔对爆破振动信号时频特征的影响[J]. 工程爆破,2020,26(3):85-88.
- [1] CUI Xue-jiao, ZHOU Jian-min, ZHAO Ming-sheng, et al. The influence of delay interval on time-frequency characteristics of blasting vibration signal[J]. Engineering Blasting, 2020, 26(3): 85-88. (in Chinese)
- [2] ANDERSON D. A method site-specific prediction and control of ground vibration from blasting[J]. Proc 1st Symposia On Explosive and Blasting Research, 1985: 28-42.
- [3] 卢文波,赖世骧,李金河,等. 台阶爆破飞石控制探讨[J]. 武汉水利电力大学学报,2000,33(3):9-12.
- [3] LU Wen-bo, LAI Shi-xiang, LI jin-he, et al. Study on fly-rock in bench blasting[J]. J of Wuhan Univ of Hydr & Elec Eng, 2000, 33(3): 9-12. (in Chinese)
- [4] 熊炎飞,董正才,王辛,等. 爆破飞石飞散距离计算公式浅析[J]. 工程爆破,2009,15(3):31-34.
- [4] XIONG Yan-fei, DONG Zheng-cai, WANG Xin, et al. Analysis of the formula about blasting flying rock's casting distance[J]. Engineering Blasting, 2009, 15(3): 31-34. (in Chinese)
- [5] 齐留洋,王德胜,刘占全,等. 改进加权距离判别分析模型的边坡爆破稳定性判别[J]. 中国有色金属学报,2021,31(7):1989-1996.
- [5] QI Liu-yang, WANG De-sheng, LIU Zhan-quan, et al. Improved distance discriminant analysis model for slope blasting stability discrimination[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(7): 1989-1996. (in Chinese)
- [6] 王俊青,蒲传金,姜锐,等. 溶洞对露天石灰石矿中深孔爆破效果的影响及改进措施分析[J]. 化工矿物

- 与加工,2015,5(10):31-35.
- [6] WANG Jun-qing, PU Chuan-jin, JIANG Rui, et al. Analysis and improvement measures of impact of caverns on medium-deep hole blasting effects in open pit limestone mines [J]. Industrial Minerals & Processing, 2015, 5(10):31-35. (in Chinese)
- [7] 文博. 边坡爆破的振动响应分析与爆破效果参数的预测方法研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2021.
- [7] WEN Bo. Analysis of vibration response of slop blasting and study on prediction method of blasting result parameters[D]. Lanzhou:Lanzhou University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [8] CIGIZOGLU HK, KIS OZR. Flow prediction by three back propagation techniques using k-fold partitioning of neural network training data[J]. Nord Hydrol, 2005, 36:49-64.
- [9] 王毅. 基于人工神经网络和随机森林算法的爆破振动预测研究[D]. 南宁:广西大学,2020.
- [9] WANG Yi. Prediction of blasting vibration based on artificial neural network and random forest [D]. Nanning: Guangxi University, 2020. (in Chinese)
- [10] NEAUPANEA KM, ACHET SH. Use of backpropagation neural network for landslide monitoring; a case study in the higher Himalaya [J]. Engineering Geology, 2004, 74(3):213-226.
- [11] 王帷先. 基于神经网络的露天矿抛掷爆破爆堆形态预测研究与应用[D]. 北京:华北科技学院,2020.
- [11] WANG Wei-xian. Research and application of the prediction of muck-pile shape of the open-mine throwing blasting based on neural network[D]. Beijing:North China institute of Science&Technology,2020. (in Chinese)
- [12] CHANDOK JS, KAR IN, TULI S. Estimation of furnace exit gas temperature(FEGT) using optimized radial basis and backpropagation neural networks [J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(3):1989-1998.
- [13] 黄玉华,张海军,徐国权. 前白枣山铁矿地面爆破振动预测[J]. 爆破,2021,38(3):152-158.
- [13] HUANG Yu-hua, ZHANG Hhai-jun, XU Guo-quan, et al. Prediction of ground blasting vibration in qianbaizaoshan iron mine[J]. Blasting, 2021, 38(3):152-158. (in Chinese)
- [14] BUDZINSKI R C, LOPES S R, MASOLLER C. Symbolic analysis of bursting dynamical regimes of Rulkov neural networks[J]. Neurocomputing, 2021, 441:44-51.
- [15] 肖伟. 爆破开挖飞石抛掷距离研究[D]. 赣州:江西理工大学,2017.
- [15] XIAO Wei. Research on throwing distance of flying rock in blasting excavation[D]. Ganzhou: JiangXi University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [16] 兰振. 深孔爆破飞石产生的机理计算及控制措施[J]. 爆破技术, 2018, 13(2):182-184.
- [16] LAN Zhen. Mechanism calculation and measures of fly rock produced by deep hole blasting[J]. Blasting Technique, 2018, 13(2):182-184. (in Chinese)
- [17] YANG Y, ZHANG Q. A hierarchical analysis for rock engineering using artificial neural networks [J]. Rock Mech Rock Eng, 1997, 30(1):207-222.

英文编辑:陈东方

科技论文写作小知识——摘要

摘要是以提供文献内容梗概为目的,不加评论和补充解释,简明、确切地记述文献重要内容的短文。摘要应具有独立性和自明性,并且拥有与文献同等量的主要信息,即不阅读全文,就能获得必要的信息。一篇完整的论文都要求写随文摘要,按摘要的不同功能来划分,大致有如下3种类型:

(1) 报道性摘要

报道性摘要是指明一次文献的主题范围及内容梗概的简明摘要,相当于简介。报道性摘要一般用来反映科技论文的目的、方法及主要结果与结论,在有限的字数内向读者提供尽可能多的定性或定量的信息,充分反映该研究的创新之处。科技论文如果没有创新内容,如果没有经得起检验的与众不同的方法或结论,是不会引起读者的阅读兴趣的,所以建议学术性期刊(或论文集)多选用报道性摘要,用比其他类摘要字数稍多的篇幅,向读者介绍论文的主要内容,以“摘录要点”的形式报道出作者的主要研究成果和比较完整的定量及定性的信息,篇幅以300字左右为宜。

(2) 指示性摘要

指示性摘要是指明一次文献的论题及取得的成果的性质和水平的摘要,其目的是使读者对该研究的主要内容(即作者做了什么工作)有一个轮廓性的了解。创新内容较少的论文,其摘要可写成指示性摘要,一般适用于学术性期刊的简报、问题讨论等栏目以及技术性期刊等只概括地介绍论文的论题,使读者对论文的主要内容有大致的了解,篇幅以100字左右为宜。

(3) 报道-指示性摘要

报道-指示性摘要是以报道性摘要的形式表述论文中价值最高的那部分内容,其余部分则以指示性摘要形式表达,篇幅以100~200字为宜。

论文发表的最终目的是要被人利用,如果摘要写得不好,在当今信息激增的时代论文进入文摘、杂志、检索数据库后,被人阅读、引用的机会就会少得多,甚至丧失,一篇论文价值很高,创新内容很多,若写成指示性摘要,也可能会失去较多的读者。所以一般地说,向学术性期刊投稿,应选用报道性摘要形式,只有创新内容较少的论文,其摘要可写成报道-指示性或指示性摘要。