

露天采矿爆破振动对砌体结构破坏效应预测的 Fisher 判别模型及应用

董陇军^{1,2}, 李夕兵¹, 赵国彦¹, 宫凤强¹

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 应用 Fisher 判别分析理论并结合工程实际特点, 从爆破振动特征参量和砌体结构自身特性这 2 个方面出发, 选取峰值质点振动速度(PPV)、爆破振动主频率、主频率持续时间、灰缝强度、圈梁构造柱、房屋高度、屋盖形式和砖墙面积率 8 个影响因素作为判别因子, 建立爆破振动对砌体结构破坏效应预测的 Fisher 判别分析模型。将该方法应用到湖北一露天采场爆破振动对砌体结构破坏效应预测问题中, 利用现场实测的 108 组数据进行训练和检验, 回判估计的误判率为 0.083, 通过求解判别函数, 认为峰值质点振动速度为最重要的判别指标, 其后依次为圈梁构造柱、屋盖形式、砖墙面积率、房屋高度、爆破振动主频率、主频率持续时间和灰缝强度, 可以为同类工程在选取爆破振动对砌体结构破坏效应的判别指标方面提供参考。利用其他 12 组现场数据作为预测样本进行测试, 预测结果与实际情况吻合较好。研究表明, 该方法回判估计的误判率低, 判别性能良好, 是爆破振动对砌体结构破坏效应预测的一种有效新方法, 可以在实际工程中进行推广应用。

关键词: 采矿工程; 露天开采; 爆破振动; 砌体结构; FDA 模型; 预测

中图分类号: TD 32

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)04 - 0750 - 07

FISHER DISCRIMINANT ANALYSIS MODEL AND ITS APPLICATION TO PREDICTING DESTRUCTIVE EFFECT OF MASONRY STRUCTURE UNDER BLASTING VIBRATION OF OPEN-PIT MINE

DONG Longjun^{1,2}, LI Xibing¹, ZHAO Guoyan¹, GONG Fengqiang¹

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Based on the Fisher discriminant theory and the actual characteristics of the project, a Fisher discriminant analysis(FDA) model to predict the destructive effect of masonry structure under blasting vibration of open-pit mine is established. Eight major factors are taken into account from the aspects of blasting vibration and structure dynamic characteristics such as peak particle velocity(PPV), dominant frequency, dominant frequency duration, mortar joints intensity, collar beam structure, height of housing, roof forms and the rate of brick walls. After training and testing 108 sets of measured data in a open-pit mine, the discriminant functions of FDA are solved, and the ratio of mistake-distinguish is 0.083. The functions show that PPV is the most important discrimination indicator, followed by the structural columns of collar beam, roof forms, the rate of brick walls,

收稿日期: 2008 - 07 - 25; **修回日期:** 2008 - 11 - 26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50674107, 10872218, 50678028); 中南大学学位论文创新重点资助项目(1343 - 74335000020)

作者简介: 董陇军(1984 -), 男, 硕士, 2007年毕业于中南大学采矿与岩土工程专业, 主要从事采矿与岩土工程灾害控制及其安全评价方面的研究工作。E-mail: csudlj@163.com

housing height, the main frequency, the main frequency of duration and intensity of mortar joints, which provides efficient and accurate reference to forecast the destructive effect of masonry structure from blasting vibration. Another 12 groups of measured data are tested as forecast samples, and the predicted results are consistent with the measured ones. The prediction accuracy of FDA model is acceptable, so it is a new approach to predict destructive effect of masonry structure under blasting vibration, which can be applied to practical engineering.

Key words: mining engineering; open-pit mine; blasting vibration; masonry structure; Fisher discriminant analysis(FDA) model; prediction

1 引言

炸药爆炸时短时间内可放出大量的能量,是目前人类已知的少数功率很大的做功方式之一。该特点使爆破被广泛应用于矿山、水利、道路、交通及国防等国民经济建设领域。由于技术、空间等条件方面的限制,越来越多的爆破作业需要在已有建(构)筑物附近实施^[1~4]。爆破作业产生的地震波携带的能量传至已有工程后,会引起工程振动,影响工程的稳定和安全。因此,爆破振动危害预测的研究一直受到很多学者、专家的关注^[1~10]。近年来,随着矿山开采规模的不断增大,经常要进行大量的爆破作业,爆破后产生的爆破振动、飞石、空气冲击波、以及地震波等造成附近居建筑物破坏事件屡有发生,甚至造成人员伤亡,损失惨重。爆破振动危害在某种程度上已经严重影响着矿山开采按正常生产计划进行^[4]。鉴于此,对爆破点附近房屋破坏效应进行预测研究意义尤为重要。

目前,国内爆破振动控制主要根据规程^[9]中给出的安全距离和一般建筑物的爆破地震安全性满足安全 PPV 和爆破振动主频率的要求来进行的。国外很多国家标准,包括美国矿务局标准^[10]、英国标准^[11]、德国标准和瑞士采矿标准^[12]等均把爆破振动频率和 PPV 或位移共同作为爆破振动安全判据。尽管目前使用的爆破振动安全判据都考虑了多方面因素的影响,但多数安全判据对被保护对象仅做了定性的描述,这样在具体到某一个被保护对象时,难以确定采用什么标准作为判据。T. R. Yu 和 S. Vongpaisal^[13]结合岩体强度特征、爆破振动峰值质点振动速度、岩体结构支护系统及现场地质条件等因素,利用爆破损伤系数(blast damage index, BDI)来评价爆破振动对地下岩体的损伤破坏作用;凌同华等^[14]初步建立了用爆破震动信号时能密度曲线的积分值作为考核指标的爆破震动损伤统一安全判

据;史秀志^[4]结合粗集与神经网络理论,用基于粗糙集的神经网络实现了综合考虑振动主频率、峰值质点振动速度、主频率持续时间以及房屋结构动力特性等因素的对房屋破坏程度预测,然而神经网络系统虽然其网络模型很多,但大都有一定的适用范围和局限性,不能很好地控制训练后的网络推广,且有时不能达得全局最优。因此,建立一种人为影响因素小,能容定量与定性指标于一体的多参数综合预测模型非常必要。

判别分析法是根据观测到的样本的若干数量特征对新获得的样本进行归类、识别,判断其所属类型的一种多元统计分析方法。该方法包括距离判别分析法、Bayes 判别分析法、Fisher 判别分析法,已在自然科学和社会科学的各个领域得到很好的应用。在岩土和矿业工程领域内,距离判别分析法、Bayes 判别分析法已经得到应用^[15, 16]。但是 Fisher 分析法的应用较少^[17, 18]。在爆破振动对砌体结构破坏效应预测方面, Fisher 判别分析法的应用至今还未见文献报道。本文基于 Fisher 判别理论并结合实际工程的特点,建立了爆破振动对砌体结构破坏的 FDA 模型,并将该方法应用到湖北一露天矿采场爆破振动对砌体结构破坏效应预测问题中。

2 FDA 模型计算理论

2.1 FDA 模型的求解

设有 m 个总体 G_1, G_2, \dots, G_m , 相应的均值向量和协方差矩阵分别为 $\mu^{(1)}, \mu^{(2)}, \dots, \mu^{(m)}$; $V^{(1)}, V^{(2)}, \dots, V^{(m)}$ 。从总体 G_i 中分别抽取容量为 n_i 的样本^[19]:

$$X_{\alpha}^{(i)} = \{x_{\alpha 1}^{(i)}, x_{\alpha 2}^{(i)}, \dots, x_{\alpha p}^{(i)}\}^T$$

$$(\alpha = 1, 2, \dots, n_i; i = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

则

$$\mu^T X_{\alpha}^{(i)} = \{\mu_1 x_{\alpha 1}^{(i)}, \mu_2 x_{\alpha 2}^{(i)}, \dots, \mu_p x_{\alpha p}^{(i)}\}^T \quad (W^{-1}B - \lambda I) \mu \leq 0 \quad (9)$$

$$(i = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

为 $X_{\alpha}^{(i)}$ 在轴上的投影, 记

$$\bar{X}^{(i)} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} X_{\alpha}^{(i)} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{X} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \sum_{\alpha=1}^{n_i} X_{\alpha}^{(i)} \\ n &= \sum_{i=1}^m n_i \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $\bar{X}^{(i)}$, \bar{X} 分别为组类平均与总平均。

于是组内差为

$$\left. \begin{aligned} e &= \sum_{i=1}^m \sum_{\alpha=1}^{n_i} (\mu^T X_{\alpha}^{(i)} - \mu^T \bar{X}^{(i)})^2 = \\ &\mu^T \left\{ \sum_{i=1}^m \left[\sum_{\alpha=1}^{n_i} (X_{\alpha}^{(i)} - \bar{X}^{(i)})(X_{\alpha}^{(i)} - \bar{X}^{(i)})^T \right] \right\} \mu = \\ &\mu^T \left\{ \sum_{i=1}^m S_i \right\} \mu \triangleq \mu^T W \mu \\ W &= \left\{ \sum_{i=1}^m S_i \right\} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: μ 为最大特征值 λ 对应的特征向量, S_i 为 G_i 中 n_i 个样本 $X_{\alpha}^{(i)}$ ($\alpha = 1, 2, \dots, n_i$) 的样本离差阵。

组间差为

$$\begin{aligned} b &= \sum_{i=1}^m \sum_{\alpha=1}^{n_i} (\mu^T \bar{X}^{(i)} - \mu^T \bar{X})^2 = \\ &\sum_{i=1}^m n_i \mu^T (\bar{X}^{(i)} - \bar{X})(\bar{X}^{(i)} - \bar{X})^T \mu = \\ &\mu^T \left[\sum_{i=1}^m n_i (\bar{X}^{(i)} - \bar{X})(\bar{X}^{(i)} - \bar{X})^T \right] \mu \triangleq \mu^T B \mu \quad (6) \end{aligned}$$

为了使判别函数能够很好地区别来自不同总体的样品, 则希望满足来自 2 个总体的组间离差愈大愈好; 来自 2 个总体的组内离差愈小愈好。综合以上两点, 有

$$\Phi = \frac{b}{e} = \frac{\mu^T B \mu}{\mu^T W \mu} \quad (7)$$

为此, 用拉格朗日乘法, 令 $F = \mu^T B \mu - \lambda(\mu^T W \mu - 1)$ 。

对 $F = \mu^T B \mu - \lambda(\mu^T W \mu - 1)$ 求偏微分, 并使之 0:

$$\frac{\partial F}{\partial \mu} = 2B\mu - 2\lambda W\mu \leq 0 \quad (8)$$

求解式(8), 并进一步整理可得

这样就可以求出判别函数的系数; I 为组内离差平方和与组间离差平方和的比值, 解方程分别可求得 $S - 2$ 个判别函数($S = \min\{G - 1, m\}$), 一般第一个方程可以解释大部分样本的信息, 如仅第一个判别函数难以作判别时, 可结合后续的判别函数综合考虑。

2.2 FDA 模型预测准则

写出函数 $y = u^T X$, 将 $\bar{X}^{(i)}$ 代入 $y = u^T X$ 可得 $\bar{y}^{(i)}$, 再将 $\bar{y}^{(i)}$ 按照从小到大排列, 例如设 $\bar{y}^{(1)} < \bar{y}^{(2)} < \dots < \bar{y}^{(m)}$, 则相邻两总体 G_i, G_{i+1} 的阈值为

$$y_c(i, i+1) = \frac{n_i \bar{y}^{(i)} + n_{i+1} \bar{y}^{(i+1)}}{n_i + n_{i+1}} \quad (10)$$

回代样本, 进行预测。对给定的样本 X , 如果相应的 $y = u^T X$ 介于 $y_c(i-1, i)$ 与 $y_c(i, i+1)$ 之间, 则 X 应归属于 G_i [19]。

3 爆破振动作用下房屋的破坏机制及判别指标体系

3.1 破坏机制

爆破振动作用下房屋的破坏实质上是由于爆破时, 地震波的作用引起地面运动, 这种地振动通过建筑物的基底传递给建筑物上部结构, 使建筑物结构发生振动[4]。反映结构振动的参量通常用结构构件振动应力、振动位移和加速度来描述。当结构构件的振动应力大于构件材料的强度极限时, 就会造成结构的构件以至整个结构的破坏。若结构振动位移过大, 虽没造成结构强度的破坏, 但由于结构产生过大的变形而不能满足正常使用的要求, 这在工程上也是不容许的。

3.2 判别指标体系

爆破振动对房屋破坏程度的影响因素很多, 结合史秀志[4]的研究成果, 主要从最爆破振动特征参量和房屋自身强度及结构特点这 2 个方面考虑, 选取 PPV、爆破振动主频率、主频率持续时间、灰缝强度、砖墙面积率、房屋高度、屋盖形式、圈梁构造柱、施工质量和场地条件等 10 个参量为评判指标, 其中峰值质点振动速度、爆破振动主频率、主频率持续时间、灰缝强度、砖墙面积率、房屋高度为定量指标, 采用实测值; 屋盖形式、圈梁构造柱、施工质量和场地条件为定性指标, 其取值标准见表 1。

表 1 定性指标分级与赋值

Table 1 Classification and valuation of qualitative indexes

屋盖形式			圈梁构造柱		
木制	预制板	现浇混凝土	无梁无柱	有梁无柱	有梁有柱
1	2	3	1	2	3

房屋(砌体结构)破坏程度的划分。一般情况下, 房屋在爆破振动作用下有如下破坏特征: (1) 在爆破振动水平剪力的作用下, 砖砌房屋底层的窗间横墙易产生 45°交叉斜裂缝。在房屋应力集中和刚度变化处, 如转角墙、房屋端部和凸凹处易产生裂缝。(2) 平行于主震方向的主要承重墙体易发生开裂、滑移甚至局部掉角或坍塌, 构件联系破坏。(3) 墙间、墙与屋盖、墙与附属结构的连接处因受振联系失效而产生裂缝。(4) 墙体抹灰层易开裂或脱落, 室内装饰物掉落。根据爆破振动对房屋的破坏特征, 可以把房屋的破坏程度分为 3 个等级: 基本完好、轻微损伤、破坏, 分别用 III, II, I 表示, 其破坏等级标准见表 2^[4]。

表 2 破坏等级标准

Table 2 Standard of classification of destruction

破坏标准及等级	破坏特征
基本完好(III)	房屋仅产生弹性变形, 门、窗、墙体、屋盖没有任何裂纹
轻微损伤(II)	门、窗、墙角等局部应力集中点出现非张开裂型细微裂纹, 粉刷层出现细微裂纹, 墙体、屋盖没有任何裂纹
破坏(I)	出现不可恢复张开裂型裂缝, 墙体、屋盖出现裂纹

4 爆破振动对房屋破坏效应预测的 FDA 模型及实例应用

湖北一露天矿目前已有近 40 a 的开采历史, 由于多种原因, 长期以来, 每年都会有村民声称自己的住宅受爆破振动影响出现损坏要求赔偿。为解决工农矛盾, 对周围房屋进行了爆破振动监测, 同时对典型房屋破坏情况进行了宏观调查记录。房屋按照建筑层数共有 3 种类型, 其中 2 层楼房最多, 建筑质量有好有坏, 结构形式多种多样; 1 层平房也占一定比例, 主要是比较老旧的住宅或临时建筑, 建筑形式单一, 质量多数较差; 3 层楼房较少, 基本是近期建筑, 建筑质量很好, 都有圈梁和立柱。根据建筑物的类型, 选择了 6 套房屋进行观测和测试, 其中 1 层平房 2 套, 2 层楼房 3 套, 3 层楼房 1

套。表 3 为选择的房屋观测特征指标^[4]。由于房屋的结构都比较规则, 因此表中没有房屋结构的规则性指标。

表 3 观测指标特征

Table 3 Characteristics of observing indexes

房号	灰缝强度/MPa	屋盖形式	圈梁立柱	砖墙面积率/%	房屋高度/m	施工质量	场地条件
1	15	木制	无梁无柱	3.28	2.8	一般	一般
2	10	木制	无梁无柱	2.16	3.5	差	一般
3	25	预制板	有梁无柱	2.87	6.5	一般	好
4	50	现浇混凝土	有梁有柱	3.11	6.5	好	差
5	25	预制板	无梁无柱	3.53	6.5	差	一般
6	50	现浇混凝土	有梁有柱	2.58	10.5	好	好

4.1 模型的建立

用史秀志^[4]提供现场观测数据, 采用 112 组实测数据作为训练样本进行训练, 其训练样本集见表 4 (鉴于篇幅, 每套房屋分别列出前 5 组), 应用上文介绍的理论, 结合 MATLAB, 求得 Fisher 判别函数为

$$y_1(X) = 1.381 + 1.403X_1 + 0.011X_2 + 0.001X_3 + 0.014X_4 - 0.811X_5 - 0.270X_6 + 0.538X_7 - 1.323X_8 \quad (11)$$

$$y_2(X) = 0.363 + 0.638X_1 + 0.097X_2 - 0.003X_3 + 0.045X_4 + 0.802X_5 - 0.033X_6 + 0.550X_7 + 0.838X_8 \quad (12)$$

式中: $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8$ 分别为峰值质点振动速度 PPV(cm/s)、主频率(Hz)、持续时间(ms)、灰缝强度(MPa)、砖墙面积率(%)、房屋高度(m)、屋盖形式和圈梁构造柱。由于判别指标施工质量和场地条件对判别结果影响较小, 不影响判别结果, 所以在式(11), (12)中没有表示。

从判别函数可以看出, 峰值质点振动速度及圈梁构造柱为最重要的判别指标, 依次为屋盖形式、砖墙面积率、房屋高度、主频率、主频率持续时间、灰缝强度, 可以为同类工程在选取爆破振动对砌体结构破坏效应的判别指标方面提供参考。

4.2 模型的验证及应用

为了考察爆破振动对砌体结构破坏效应预测的 FDA 模型的有效性和准确性, 用建立的模型对 108 组训练样本数据逐一回判, 并与房屋实际情况比较, 部分训练样本集见表 4。为了说明该模型强大的预测功能, 图 1 为模型第一、二判别函数分组的检验及预测情况。由表 4 可知, 回判估计误判率为 0.083, 正确率高; 由图 1 可见, 房屋的破坏程度基

表 4 部分训练样本集
Table 4 Part of training samples

序号	房号	峰值质点 振动速度 $X_1/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	主频率 X_2/Hz	主频率持续 时间 X_3/ms	灰缝强度 X_4/MPa	砖墙面 积率 $X_5/\%$	房屋 高度 X_6/m	屋盖形式 X_7	圈梁立柱 X_8	施工 质量*	场地 条件*	破坏等级	
												实测值	预测值
1	1	1.753	31.2	870	15	3.28	2.8	1	1	2	2	II	II
2	1	1.572	24.4	815	15	3.28	2.8	1	1	2	2	II	II
3	1	2.714	18.6	1 090	15	3.28	2.8	1	1	2	2	I	I
4	1	1.378	34.3	485	15	3.28	2.8	1	1	2	2	III	II
5	1	3.648	36.5	1 120	15	3.28	2.8	1	1	2	2	I	I
6	2	0.449	35.1	775	10	2.16	3.5	1	1	1	2	III	III
7	2	1.395	23.2	765	10	2.16	3.5	1	1	1	2	II	II
8 [#]	2	1.812	32.9	790	10	2.16	3.5	1	1	1	2	I	II
9 [#]	2	1.798	25.3	850	10	2.16	3.5	1	1	1	2	I	II
10	2	2.683	19.8	1 100	10	2.16	3.5	1	1	1	2	I	I
11	3	1.495	21.2	740	25	2.87	6.5	2	2	2	3	III	III
12	3	1.888	37.5	1215	25	2.87	6.5	2	2	2	3	II	II
13	3	0.865	35.5	310	25	2.87	6.5	2	2	2	3	III	III
14	3	1.543	17.3	780	25	2.87	6.5	2	2	2	3	III	III
15	3	1.458	35.1	470	25	2.87	6.5	2	2	2	3	III	III
16	4	1.633	17.7	780	50	3.11	6.5	3	3	3	1	III	III
17	4	1.444	24.1	790	50	3.11	6.5	3	3	3	1	III	III
18	4	4.946	16.2	390	50	3.11	6.5	3	3	3	1	I	I
19	4	2.879	38.7	760	50	3.11	6.5	3	3	3	1	II	II
20	4	3.769	25.3	816	50	3.11	6.5	3	3	3	1	II	II
21	5	1.412	14.3	690	25	3.53	6.5	2	1	1	2	II	II
22	5	0.399	37.5	745	25	3.53	6.5	2	1	1	2	III	III
23	5	1.391	25.2	755	25	3.53	6.5	2	1	1	2	III	III
24 [#]	5	2.856	36.7	765	25	3.53	6.5	2	1	1	2	I	II
25	5	1.357	27.7	750	25	3.53	6.5	2	1	1	2	III	III
26	6	1.659	16.7	760	50	2.58	10.5	3	3	3	3	III	III
27	6	1.376	22.1	730	50	2.58	10.5	3	3	3	3	III	III
28	6	1.376	21.4	795	50	2.58	10.5	3	3	3	3	III	III
29	6	1.874	35.5	1 150	50	2.58	10.5	3	3	3	3	III	III
30	6	0.862	34.5	310	50	2.58	10.5	3	3	3	3	III	III

注：“*”表示 FDA 模型剔除掉的判别指标，“#”表示误别的样本，下同。

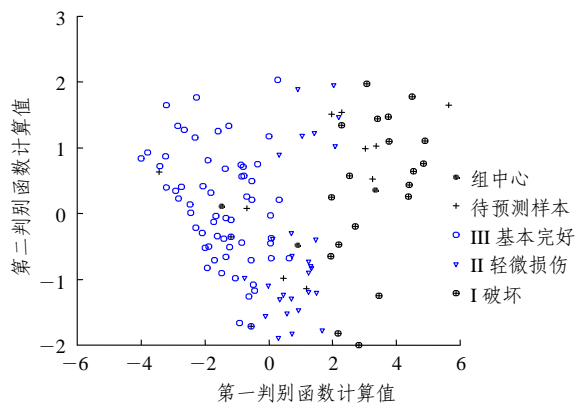


图 1 第一、二判别函数分组简图

Fig.1 Figure of grouping using the first and the second discriminant functions

本完好、轻微损伤、破坏，即 III，II，I 组分类预测性能良好，组内距离小，组间距离大，证明所建立的模型是稳定而且可靠的。

选取另外 12 组没有参加训练的实测数据作为测试样本(每套房屋选取 2 组数据)进行测试，用来证明模型的正确性，将结算结果列表 5，可见 FDA 分析模型计算结果与实际情况吻合较好。

4.3 FDA 模型的优越性讨论

史秀志^[4]提供的粗集神经网络方法首先要对收集的样本集进行约简，进而用约简后的样本进行训练，最后才对预测样本(或工程实例)进行预测，主要缺点有：计算过程复杂，且神经网络大都有一定

表 5 FDA 模型测试结果
Table 5 Test results of FDA model

序号	房号	峰值质点 振动速度 $X_1/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	主频 率 X_2 /Hz	持续时 间 X_3 /ms	灰缝强 度 X_4 /MPa	砖墙面 积率 X_5 /%	房屋高 度 X_6/m	屋盖形 式 X_7	圈梁立 柱 X_8	施工 质量*	场地 条件*	破坏等级	
												实测值	预测值
1	1	0.604	26.6	215	15	3.28	2.8	1	1	2	2	III	III
2	1	2.979	39.7	785	15	3.28	2.8	1	1	2	2	I	I
3	2	1.497	17.1	655	10	2.16	3.5	1	1	1	2	II	II
4	2	4.923	16.3	385	10	2.16	3.5	1	1	1	2	I	I
5	3	1.543	17.3	780	25	2.87	6.5	2	2	2	3	III	III
6	3	4.193	29.3	825	25	2.87	6.5	2	2	2	3	I	I
7	4	3.536	39.6	1 100	50	3.11	6.5	3	3	3	1	II	II
8	4	1.697	30.9	880	50	3.11	6.5	3	3	3	1	III	III
9	5	3.608	24.3	805	25	3.53	6.5	2	1	1	2	I	I
10	5	1.589	23.3	850	25	3.53	6.5	2	1	1	2	II	II
11	6	4.106	26.3	865	50	2.58	10.5	3	3	3	3	II	II
12	6	0.783	24.6	310	50	2.58	10.5	3	3	3	3	III	III

的适用范围和局限性,不能很好地控制训练后的网络推广,有时不能达得全局最优;粗集神经网络方法中的判别指标施工质量、场地条件等的确定受人为因素影响比较大。

与粗集神经网络方法不同,本文提出的方法主要有以下 3 个方面的优势:首先,从预测样本可见,采取 8 个判别指标达到了与粗集神经网络方法 10 个判别指标相同的效果,更为重要的是剔除掉的 2 个定性判别指标(施工质量与场地条件)在实际工程中往往难以客观确定;其次,通过 FDA 判别函数对 8 个指标对判别结果的影响程度进行排序,在某些指标缺损的情况下可以科学、快速的判断爆破振动对房屋的破坏效应,粗集神经网络方法很难实现这一点;最后,本文方法计算过程更加简单,因为 FDA 分析模型可以借鉴统计学的优势,可以充分利用已有观测数据提供的信息建立爆破振动对房屋破坏效应预测的 FDA 模型,既可以克服粗集神经网络难以实现全局最优的缺点,又可以在一定程度上避免繁杂的粗集约简过程。

5 结 论

将 FDA 应用到爆破振动对房屋的破坏效应预测问题中,选取 PPV、爆破振动主频率、主频率持续时间、灰缝强度、圈梁构造柱、房屋高度、屋盖

形式、圈梁构造柱 8 个影响因素作为模型判别因子,建立了爆破振动对房屋的破坏性预测的 Fisher 判别模型,达到了与粗集神经网络方法 10 个判别指标相同的效果,使得预测爆破振动对房屋的破坏效应简单可行。

通过判别函数可以看出,峰值质点振动速度及圈梁构造柱为最重要的判别指标,依次为圈梁构造柱、屋盖形式、砖墙面积率、房屋高度、主频率、主频率持续时间、灰缝强度。可以为快速地预测爆破振动对房屋的破坏效应提供参考。将本文模型应用到湖北一露天采场爆破振动对房屋破坏效应预测问题中。应用结果表明,本文方法科学合理,简便可行,预测精度高,在爆破振动对砌体结构破坏效应的预测方面,能够为同类工程提供一种新思路。

需要指出的是, FDA 理论运用到爆破振动问题研究中还只是初步尝试,在今后的工作中,在判别指标重要度排序及样本量选取方面需要继续深入研究,以便增强该方法的适用性。

致谢 中南大学史秀志老师为本文的完成提供了很多有益的建议,在此深表感谢!

参考文献(References):

- [1] 李夕兵,凌同华,张义平. 爆破震动信号分析理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.(LI Xibing, LING Tonghua, ZHANG Yiping.

- Analysis of blast vibration signals theories and methods[M]. Beijing: Science Press, 2009.(in Chinese)
- [2] 李夕兵, 凌同华. 单段与多段微差爆破地震的反应谱特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2 409 - 2 413.(LI Xibing, LING Tonghua. Response spectrum analysis of ground vibration induced by single deck and multi-deck blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(14): 2 409 - 2 413.(in Chinese))
- [3] 张义平, 李夕兵, 赵国彦, 等. 基于 HHT 方法的硐室大爆破震动分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增 1): 4 784 - 4 787. (ZHANG Yiping, LI Xibing, ZHAO Guoyan, et al. Analysis of chamber blasting vibration based on HHT method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp.1): 4 784 - 4 787.(in Chinese))
- [4] 史秀志. 爆破振动信号时频分析与爆破振动特征参量和危害预测研究[博士学位论文][D]. 长沙: 中南大学, 2007.(SHI Xiuzhi. Study of time and frequency analysis of blasting vibration signal and the prediction of blasting vibration characteristic parameters and damage [Ph. D. Thesis][D]. Changsha: Central South University, 2007.(in Chinese))
- [5] WORSEY P, GILNER S G, DRECHSLER T, et al. Vibration control during the construction of an in-pit lime Kiln[C]// Proceedings of the 22nd Annual Conference on Explosives and Blasting Technique(II). New Jersey: [s. n.], 1996: 180 - 190.
- [6] MOHANTY B, LUDWIG G. Optimization of development drilling and blasting in an underground mine[C]// Proceedings of the 24th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique. New Jersey: [s. n.], 1998: 441 - 450.
- [7] GINN H. On the development of explosive technology in Seoul metro-subway construction[C]// Proceedings of the 26th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique(II). Anaheim: [s. n.], 2000: 175 - 185.
- [8] KASLIK M, BIRCH W L, COBB A. The effects of quarry blasting on the structural integrity of a disused railway tunnel[C]// Proceedings of the 27th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique(II). Orlando: [s. n.], 2001: 199 - 211.
- [9] 中华人民共和国国家标准编写组. GB6722 - 2003 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB6722 - 2003 Safety regulations for blasting[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004. (in Chinese))
- [10] SISKIND D E. Vibration from blasting[M]. Cleveland: International Society of Explosives Engineer, 2000.
- [11] British Standard Committee. BS7385 - 2003 Evaluation and measurement for vibration in buildings[S]. [S. l.]: [s. n.], 1993.
- [12] WILTON T J, HILLS R L. Blasting vibration monitoring on anchored retaining walls and within boreholes[C]// Proc. Conf. Rock Eng. and Excavation in Urban Environment. Hongkong: [s. n.], 1986: 65 - 78.
- [13] YU T R, VONGPAISAL S. New blast damage criteria for underground blasting [J]. CIM Bulletin, 1996, 89(3): 139 - 145.
- [14] 凌同华, 李夕兵, 陈文胜. 基于小波分析的爆破地震效应评估[J]. 振动与冲击, 2007, 26(2): 124 - 127.(LING Tonghua, LI Xibing, CHEN Wensheng. Evaluation of blast seismic effect based on wavelet analysis [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(2): 124 - 127.(in Chinese))
- [15] 宫凤强, 李夕兵. 岩爆发生和烈度分级预测的距离判别分析方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 1 012 - 1 018. (GONG Fengqiang, LI Xibing. A distance discriminant analysis method for prediction of possibility and classification of rock burst and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 1 012 - 1 018.(in Chinese))
- [16] 宫凤强, 李夕兵. 隧洞围岩稳定性评价的 Bayes 判别分析法及应用[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(6): 1 138 - 1 141.(GONG Fengqiang, LI Xibing. Bayes discriminant analysis method for stability evaluation of rock surrounding in tunnel and its application[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(6): 1 138 - 1 141.(in Chinese))
- [17] DONG L J, WANG F Y, BAI Y F. A Fisher discriminant analysis model for prediction of seismic liquefaction of sand soil[C]// 2008 Proceedings of the 3rd International Conference on Environment and Engineering Geophysics: Near-surface Geophysics and Human Activity. Beijing: Science Press, 2008: 146 - 150.
- [18] 董隴军, 李夕兵, 白云飞. 急倾斜煤层顶煤冒放性分类预测的 Fisher 判别模型及应用[J]. 煤炭学报, 2009, 34(1): 548 - 553. (DONG Longjun, LI Xibing, BAI Yunfei. Fisher discriminant analysis model for classifying of roof coal cavability of steep seam[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(1): 548 - 553.(in Chinese))
- [19] 邵淑彩, 孙毓玉, 何娟娟. 应用数理统计[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005: 105 - 132.(TAI Shucai, SUN Yunyu, HE Juanjuan. Applied mathematical statistics[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005: 105 - 132.(in Chinese))