

# Fisher 判别法在综放回采巷道支护形式选择中的应用

赵国彦,王珊,王江

中南大学资源与安全工程学院,长沙 410083

**摘要** 将 Fisher 判别分析法应用于综放回采巷道支护形式选择中,建立了综放回采巷道支护形式选择的 Fisher 判别分析模型,选取围岩强度、煤层强度、巷道埋深、围岩节理裂隙发育程度、采动影响系数、顶煤厚度、护巷煤柱宽度和断面面积 8 项指标作为 Fisher 判别分析模型的判别因子,以 15 组综采巷道围岩及支护实测数据作为学习样本进行训练,建立相应的判别函数对待判样本进行分类。研究表明,Fisher 判别分析模型分类性能良好,预测精度高,回判估计的误判率很低,是一种综放回采巷道支护形式选择的有效方法。

**关键词** 综放回采巷道;支护形式;选择;Fisher 判别

**中图分类号** TD355

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.04.003

## Application of Fisher's Discriminant Analysis Model in the Selection of Support Pattern for Mining Roadway in Fully Mechanized Caving Face

ZHAO Guoyan, WANG Shan, WANG Jiang

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

**Abstract** Based on the mathematical theory of discriminant analysis method, the Fisher's discriminant analysis model is applied to select support pattern for mining roadway in fully mechanized caving face, eight indexes reflecting the selection of support pattern, that is, surrounding rock intensity, coal seam intensity, mining depth, joint and crack of surrounding rock, mining influence coefficient, top coal thickness, coal pillar width, and section area of roadway are taken as the discriminant factors of Fisher's discriminant analysis model. Discriminant functions are obtained by training a large set of expansive samples. The results show that the forecasting model of Fisher's discriminant analysis has the excellent classification performance, high prediction accuracy, and is an effective method for selecting support pattern for the mining roadway in fully mechanized caving face.

**Keywords** mining roadway in fully mechanized caving face; support pattern; selection; Fisher's discriminant model

### 0 引言

综放回采巷道的特点是两帮和顶板均为煤体,围岩松软、变形量大,故选择支护形式是综放回采巷道支护设计的重要内容。锚杆支护作为一种主动支护方式,具有显著的技术经济优越性,目前已被广泛用于综放回采巷道支护。

在实际工程中,综放回采巷道支护多采用以悬吊、组合梁、组合拱、楔固、冒落拱等理论为基础的解析法确定锚杆支护形式,上述锚固理论各有特点,但在很多情况下锚杆支护

理论和技术尚不完善。近年来,随着计算机科学和系统科学的发展,一些人工智能技术在综放回采巷道围岩稳定性分类和支护设计中得到了应用,并取得了一定的成果。如,朱川曲等<sup>[1]</sup>运用神经网络对综放回采巷道进行锚杆支护方案优选及变形预测;刘金海等<sup>[2]</sup>运用距离判别分析方法进行综采巷道支护选择;朱兰洋等<sup>[3]</sup>根据现场调研对西石门铁矿回采巷道围岩进行分类,提出相应的支护方案;申艳梅等<sup>[4]</sup>利用模糊聚类进行回采巷道支护效果评判;邬书良等<sup>[5]</sup>利用基于主成分

收稿日期:2012-11-20;修回日期:2012-12-06

基金项目:国家重点基础研究发展计划("973"计划)项目(2007CB209402);国家重点实验室开放基金项目(SKLG200906)

作者简介:赵国彦,教授,研究方向为采矿与岩土工程灾害控制及其安全评价,电子信箱:312929122@qq.com

分析与 BP 网络方法进行锚杆支护方案优选。

Fisher 判别分析方法根据已有观测样本的若干数量特征,对新获得的样本进行识别,近年来已经在矿业工程领域得到很多的应用<sup>[6-8]</sup>,但是目前还没有在综放回采巷道支护选择中得到应用。本文基于这一分析方法,并借鉴文献[1]中采用的支护选择方案,选取与综放回采巷道支护设计密切相关的 8 个因素作为判别因子,建立合适的分类判别函数,实现对综放回采巷道不同开采状况下支护形式选择。

## 1 Fisher 理论基本原理

### 1.1 Fisher 理论基本思想

对于某一由多项指标控制的分类问题( $p$  项指标,  $m$  个类别),Fisher 判别法的基本思想是将已知的高维数据点投影到低维空间上,根据同一类的投影离差尽可能小,而不同类间的投影区别尽可能大的投影原则,借助方差分析的思想确立最优投影方向,继而根据最优投影方向建立有效的判别函数( $y=c_1x_1+c_2x_2+\dots+c_px_p$ )。利用建立的判别函数可判定待判样品的类别,使问题得以解决。

### 1.2 Fisher 理论基本方法

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  $\mu^{(1)}, \mu^{(2)}, \dots, \mu^{(m)}$  和  $V^{(1)}, V^{(2)}, \dots, V^{(m)}$ 。从总体  $G_i (i=1, 2, \dots, m)$  中分别抽取容量为  $n_i$  的样本

$$X_a^{(i)} = (x_{a1}^i, x_{a2}^i, \dots, x_{ap}^i)^T \quad (1)$$

则

$$\mu^T X_a^{(i)} = \mu_1 x_{a1}^i + \mu_2 x_{a2}^i + \dots + \mu_p x_{ap}^i \quad (2)$$

为  $X_a^{(i)}$  在  $\mu$  轴上的投影。其中,  $a=1, 2, \dots, n_i; i=1, 2, \dots, m$ ; 向量  $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_p)^T$ , 为  $p$  维空间的 1 个方向;  $Y = \mu^T X$  为  $\mu$  与  $X$  的内积, 即  $X$  在  $\mu$  轴上的投影向量为

$$\bar{X}^{(i)} = \frac{1}{n} \sum_{a=1}^{n_i} X_a^{(i)} \quad (3)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \sum_{a=1}^{n_i} X_a^{(i)} \quad (4)$$

式中,  $n = \sum_{i=1}^m n_i$ ,  $\bar{X}^{(i)}$  和  $\bar{X}$  分别为组内平均向量和总平均。于是, 组内差为

$$e = \sum_{i=1}^m \sum_{a=1}^{n_i} (\mu^T X_a^{(i)} - \mu^T \bar{X}^{(i)})^2 = \mu^T W \mu \quad (5)$$

$$W = \sum_{i=1}^m S_i \quad (6)$$

式(6)中,  $S_i$  为  $G_i$  中  $n_i$  样本的  $X_a^{(i)} (a=1, 2, \dots, n_i)$  的样本离差阵, 则组间差为

$$b = \sum_{i=1}^m \sum_{a=1}^{n_i} (\mu^T \bar{X}^{(i)} - \mu^T \bar{X})^2 = \mu^T \beta \mu \quad (7)$$

令  $\Phi = \frac{b}{e} = \frac{\mu^T \beta \mu}{\mu^T W \mu}$ , 为了使  $\Phi$  达到最大, 且使解有唯一性, 通常附加一个条件  $\mu^T W \mu = 1$ 。于是, 问题就转化为在条件

$\mu^T W \mu = 1$  下, 求使  $\mu^T \beta \mu$  达到最大的  $\mu$ 。

为此, 用拉格朗日乘法, 令

$$F = \mu^T \beta \mu - \lambda (\mu^T W \mu - 1) \quad (8)$$

对式(8)求偏微分, 并使之为 0, 即

$$\frac{\partial F}{\partial \mu} = 2\beta \mu - 2\lambda W \mu = 0 \quad (9)$$

整理式(9)得

$$(W^{-1}\beta - \lambda I)\mu = 0 \quad (10)$$

由式(10)可得到  $W^{-1}\beta$  的最大特征值  $\lambda$  对应的特征向量  $\mu$ , 这样就可以求出判别函数的系数, 从而得到判别函数。

### 1.3 模型检验

为考查所求判别函数的判别能力, 采用以训练样本为基础的回归估计法计算误判率。来自总体  $G_i$  容量为  $n_i$  的训练样本:  $X_a^{(i)} = (x_{a1}^i, x_{a2}^i, \dots, x_{ap}^i)^T (a=1, 2, \dots, n_i; i=1, 2, \dots, m)$ 。以所有的训练样本作为新样本, 依次代入建立的判别函数中, 并且利用判别准则进行判别, 该过程称为回判。用  $n_i$  表示将属于总体  $G_i$  的样本误判为总体  $G_j$  的个数, 设总的误判个数为  $N$ , 误判率为  $\eta$  的回代估计为

$$\eta = \frac{N}{n_1 + n_2 + \dots + n_m} \quad (11)$$

## 2 综放回采巷道支护形式选择的 Fisher 模型及其应用

### 2.1 综放回采巷道支护形式

根据综放回采巷道的特点, 其现场采用的支护形式主要有锚网、锚梁网、锚梁网索、锚网棚 4 种<sup>[1]</sup>。在本文样本中这 4 种支护形式分别用数字 1、2、3、4 表示。

### 2.2 判别指标的确定

支护形式选择的判别指标须能反映其对围岩变形的影响。根据综放回采巷道的特点, 并参考有关研究成果<sup>[9]</sup>, 选取围岩强度 ( $X_1$ )、煤层强度 ( $X_2$ )、巷道埋深 ( $X_3$ )、围岩节理裂隙发育程度 ( $X_4$ )、采动影响系数 ( $X_5$ )、顶煤厚度 ( $X_6$ )、护巷煤柱宽度 ( $X_7$ ) 和断面面积 ( $X_8$ ) 作为判别指标。其中围岩强度 ( $X_1$ ) 是取巷道宽两倍范围内的顶板岩石、巷道宽度 1 倍范围内的底板岩石的单轴抗压强度的加权平均值<sup>[9]</sup>; 围岩节理裂隙发育程度 ( $X_4$ ) 分为很发育、发育、中等发育、不发育 4 种, 分别用数字 1、2、3、4 表示; 采动影响系数 ( $X_5$ ) 用直接顶板 (包括顶煤) 厚度与采高的比值表示。

### 2.3 Fisher 判别模型的建立

根据前面 Fisher 判别分析方法的基本思想, 选取文献 [1, 9~11] 中的 19 个已知明确结果的综放回采巷道支护实例作为研究对象, 其中 1~15 号作为样本, 应用 Fisher 判别理论, 结合多元分析统计软件, 可求得判别函数。

第 1 判别函数:

$$Y_1 = 0.068973X_1 - 0.070634X_2 - 0.015941X_3 + 2.273396X_4 + 2.267530X_5 - 1.033927X_6 - 0.918389X_7 - 1.097095X_8$$

第 2 判别函数:

$$Y_2 = 0.044577X_1 - 0.116420X_2 - 0.005157X_3 + 0.111938X_4 +$$

$$0.144642X_5 - 0.416795X_6 + 2.155037X_7 + 1.289789X_8$$

第3判别函数:

$$Y_3 = -0.012206X_1 + 0.709493X_2 + 0.024143X_3 + 0.422136X_4 - 3.788237X_5 + 4.318867X_6 + 0.230124X_7 - 0.133821X_8$$

表1所示为根据样本1~15所得第1、2、3判别函数在各分类的中心值。以第1个判别式为例,其在1类支护的中心

表1 判别函数在各支护类别的中心值

Table 1 Centre values of discriminant function at each group

支护分类	中心值		
	第1判别函数	第2判别函数	第3判别函数
1	5.1210	2.1682	-0.0512
2	3.1676	-1.7086	0.7825
3	-1.8747	-0.4423	-1.2722
4	-6.2199	0.8471	1.1282

值分为5.121;在2类支护的中心值分为3.1676;在3类支护的中心值分为-1.8747;在4类支护的中心值分为-6.2199。可以通过比较待判样本的函数值与表1中4类支护形式组别的中心值的距离来识别新样本的组别。

### 2.4 模型的检验及工程应用

为了考查综放回采巷道支护选择的Fisher判别模型的有效性和正确性,用建立的模型对15组训练样本实测数据逐一预测,并与实际情况比较(表2)。结果表明,与实际情况符合良好,证明所建立的模型是稳定而且可靠的,回判检验误判率为0。

以表2后面的16~19号4个样本为例进行预测,其结果亦列入表2(带\*号的样本)。由表2可以看出,4个预测样本预测全部正确,预测准确度达到100%,达到了满意的效果。因此,本文所提出的Fisher判别分析模型在综放回采巷道支护选择中的应用是合理而且可靠的,判别准确度高,误判率低,具有重要的实用价值。

表2 学习样本数据及计算结果

Table 2 Data and discriminant results of the study samples

样本编号	判别指标								实际支护	本文结果
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>		
1	15.0	7.0	475	2	3.40	5.00	4.5	12.88	3	3
2	28.7	11.0	475	2	3.40	5.00	4.5	12.88	3	3
3	30.4	12.0	650	1	2.16	3.20	6.0	11.60	4	4
4	30.9	10.0	490	1	2.76	4.83	3.9	15.54	4	4
5	35.6	12.9	594	2	2.48	3.40	5.3	12.60	4	4
6	37.1	12.7	647	2	2.31	2.60	4.6	12.00	3	3
7	37.8	14.7	492	4	2.35	3.70	4.4	12.20	2	2
8	38.2	10.2	406	2	1.96	3.80	4.3	12.90	3	3
9	42.5	16.1	486	3	2.89	3.50	5.0	10.70	2	2
10	45.7	18.3	491	3	2.69	3.20	4.0	12.20	2	2
11	46.6	20.4	315	3	1.83	3.00	3.5	12.80	2	2
12	51.8	17.2	301	1	1.94	3.60	4.7	12.50	3	3
13	54.5	18.5	200	3	2.08	4.00	4.2	12.40	1	1
14	56.0	19.1	212	3	2.25	3.80	6.2	11.90	1	1
15	56.5	25.0	200	4	2.00	3.20	4.3	14.40	1	1
16*	58.2	22.1	288	4	2.56	2.80	4.9	12.00	1	1
17*	41.9	16.7	480	3	2.58	3.30	4.3	11.60	2	2
18*	33.8	15.7	335	2	1.84	3.50	5.1	12.80	3	3
19*	30.9	10.0	526	2	2.76	4.83	4.6	15.54	4	4

注:带\*号的表示预测样本。

Note: The study samples which are marked with "\*" are forecast samples.

### 3 结论

(1) 综放回采巷道支护形式的选择是一个复杂的多因素决策问题。本文借鉴了Fisher判别理论,选用围岩强度、煤层强度、巷道埋深、围岩节理裂隙发育程度、采动影响系数、顶煤厚度、护巷煤柱宽度和断面面积8项指标作为Fisher判别

模型的判别指标,建立了综放回采巷道支护选择的Fisher判别模型。应用表明,Fisher判别模型具有较强的选择能力和较高的识别精度,为综放回采巷道支护形式优选提供了一条新途径。

(2) 通过小样本就可以建立高效、可靠的Fisher判别模

型,计算方法简单,能满足工程应用的要求。实例应用结果表明,综放回采巷道支护形式选择的 Fisher 判别模型的正确率为 100%,可以在实际工程中推广使用,为解决回采巷道支护形式选择提供了一条新的途径。

(3) 该方法的缺点是未考虑其他类型的支护形式,主要是因为其他支护类型的样本参数不足。所以,补充样本数据库,能够进一步提高该模型的选择能力和准确性,为综放回采巷道选择经济、可行的支护形式。

#### 参考文献 (References)

- [1] 朱川曲,冯涛,施式亮,等.神经网络在锚杆支护方案优选及变形预测中的应用[J].煤炭学报,2005,30(3):322-326.  
Zhu Chuanqu, Feng Tao, Shi Shiliang, et al. Journal of China Coal Society, 2005, 30(3): 322-326.
- [2] 刘金海,林大能,刘辉,等.综放回采巷道支护形式选择的距离判别分析方法及应用[J].矿冶工程,2008,28(5):5-8.  
Liu Jinhai, Lin Daneng, Liu Hui, et al. Mining and Metallurgical Engineering, 2008, 28(5): 5-8.
- [3] 朱兰洋,乔兰,赵存厚,等.基于模糊聚类分析的回采巷道围岩分类与支护研究[J].中国矿业,2008,17(8):77-80,86.  
Zhu Lanyang, Qiao Lan, Zhao Cunhou, et al. China Mining Magazine, 2008, 17(8): 77-80, 86.
- [4] 申艳梅,韦四江.回采巷道锚杆支护效果模糊综合评判[J].采矿与安全工程学报,2011,28(4):576-580.  
Shen Yanmei, Wei Sijiang. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(4): 576-580.
- [5] 鄢书良,陈建宏,杨珊,等.基于主成分分析与BP网络的锚杆支护方

- 案优选[J].工程设计学报,2012,19(2):150-155.  
Wu Shuliang, Chen Jianhong, Yang Shan, et al. Journal of Engineering Design, 2012, 19(2): 150-155.
- [6] 董陇军,李夕兵,白云飞.急倾斜煤层顶煤可放性分类预测的 Fisher 判别分析模型及应用[J].煤炭学报,2009,34(1):58-63.  
Dong Longjun, Li Xibing, Bai Yunfei. Journal of China Coal Society, 2009, 34(1): 58-63.
- [7] 付玉华,董陇军.基于 Fisher 判别的煤层底板突水量预测研究[J].矿业研究与开发,2009,29(3):70-72.  
Fu Yuhua, Dong Longjun. Mining Research and Development, 2009, 29(3): 70-72.
- [8] 董陇军,李夕兵,赵国彦,等.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[J].岩石力学与工程学报,2009,28(4):750-756.  
Dong Longjun, Li Xibing, Zhao Guoyan, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 750-756.
- [9] 朱川曲,王卫军,施式亮,等.综放沿空掘巷围岩稳定性分类模型及应用[J].中国工程科学,2006,8(3):35-38.  
Zhu Chuanqu, Wang Weijun, Shi Shiliang, et al. Engineering Science, 2006, 8(3): 35-38.
- [10] 王辉,黄锋.煤巷锚杆支护形式选择设计浅析[J].岩土工程界,2009,12(1):27-29.  
Wang Hui, Huang Feng. Geotechnical Engineering World, 2009, 12(1): 27-29.
- [11] 杨科,谢广祥.基于 ANN 的综放回采巷道围岩稳定性预测研究[J].煤炭科学技术,2004,33(7):48-50.  
Yang Ke, Xie Guangxiang. Coal Science and Technology, 2004, 33(7): 48-50.

(责任编辑 刘志远)

#### ·学术动态·

## 精品科技期刊工程项目

为促进科技期刊提高出版质量和论文发表水平,推动我国科技期刊学术繁荣和健康发展,中国科协 2006 年启动精品科技期刊工程项目,设立了培育国际知名期刊(A 类)、培育国内领衔期刊(B 类)、培育精品后备期刊(C 类)项目。2006 年至 2008 年累计资助项目 317 项(次),获资助期刊 147 种,资金 3115 万元,成为国内对科技期刊支持力度最大的支撑项目。

2009 年精品科技期刊工程进入第二个项目周期,设立精品科技期刊示范项目,包括培育国际知名科技期刊(A 类)和培育国内领衔科技期刊(B 类)项目。为大力宣传精品科技期刊示范项目,中国科协网特设立“精品期刊工程项目”栏目,每月将从科技期刊示范项目各选择一篇代表性论文刊登,进行广泛交流。

详情见中国科协网 <http://www.cast.org.cn>。