

深部煤层底板突水危险性预测的 PSO_SVM 模型

张风达^{1,2},申宝宏^{1,2}

(1.煤炭科学研究院 煤炭战略规划研究院,北京 100013;2.中国矿业大学(北京) 资源与安全工程学院,北京 100083)

摘要:为了更好地预测深部煤层底板突水危险性,将深部煤层底板破坏深度多元非线性数学模型给出的预测值,与底板含水层水压力、隔水层厚度、工作面斜长、埋深 4 个因素相结合,共同作为深部煤层底板突水危险性预测的输入向量;运用 PSO 获取 SVM 的最优惩罚因子和核函数参数,建立了深部煤层底板突水危险性预测模型,并与突水系数法、马氏距离判别法、贝叶斯判别法的预测精度进行对比。结果表明:深部煤层底板破坏深度数学模型预测的准确度较高;考虑煤层底板采动破坏影响的深部煤层底板突水危险性预测模型,较好地预测了煤层底板突水危险性,其准确度相比于突水系数法、马氏距离判别法和贝叶斯判别法均较高。

关键词:深部煤层;煤层底板;突水评价;支持向量机;粒子群算法

中图分类号:TD12 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2018)07-0061-07

PSO_SVM prediction model for evaluating water inrush risk from deep coal seam floor

ZHANG Fengda^{1,2}, SHEN Baohong^{1,2}

(1. Strategic Planning Research Institute, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

2. School of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to better predict water inrush risk from deep coal seam floor, the mathematic model for failure depth predicted value of deep coal seam floor was obtained by using multiple linear regression theory. Based on this, the influences of confined aquifer pressure, thickness of aquifuge, length of panel and buried depth were considered as input vectors of the prediction model for evaluating deep water inrush risk. The prediction model for evaluating water inrush risk from deep coal seam was built, which optimal penalty factor and optimal kernel function parameter of SVM was obtained by PSO. The predictive accuracy of the model was compared with water inrush coefficient method, Mahalanobis distance discriminant method and Bayes discriminant method. The results show that the correlation coefficient between fitting results calculated by mathematic model for failure depth of deep coal seam floor and measured results had a high fitting degree, which means the mathematic model had a higher accuracy. Taking the failure depth of deep coal seam floor into consideration, the model for water inrush risk from deep coal seam floor provided better results, which prediction accuracy was higher than the water inrush coefficient method, Mahalanobis distance discriminant method and Bayes discriminant method.

Key words: deep coal seam; coal seam floor; water inrush evaluation; support vector machine; particle swarm optimization

0 引言

随着浅部资源的日益枯竭,煤炭开采深度不断增加。据统计,1 000 m 以下的煤炭资源量为 2.95 万亿 t,占我国总储量的 53%,主要分布在我国华北地区。华北煤田的深部煤炭资源安全回采多受到奥

陶系岩溶裂隙水害的威胁。随着煤炭资源回采逐渐向深部发展,随之而来的是高地应力、高承压水压力、强采动扰动影响以及复杂的地质构造。为确保深部承压水体上煤炭资源的安全开采,煤层底板突水危险性的准确预测成为亟待解决的问题。

国外学者早在 20 世纪 50 年代,针对煤层底板

收稿日期:2018-02-01;责任编辑:赵瑞 DOI:10.13199/j.cnki.est.2018.07.009

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51704158);中国煤炭科工集团科技创新青年基金资助项目(2014QN005)

作者简介:张风达(1988—),男,河南鹤壁人,助理研究员,博士。E-mail:fdzhang123@126.com

引用格式:张风达,申宝宏.深部煤层底板突水危险性预测的 PSO_SVM 模型[J].煤炭科学技术,2018,46(7):61-67,228.

ZHANG Fengda, SHEN Baohong. PSO_SVM prediction model for evaluating water inrush risk from deep coal seam floor [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(7): 61-67, 228.

突水危险性预测提出了底板相对隔水层、底板突水的安全水头等^[1]概念,并展开大量研究。目前国外以疏干含水层为主要的底板水害防治措施,最新研究成果相对较少,而国内底板含水层由于储量大、补给量充足等原因,多采用带压开采^[2]的方式,这就涉及到承压水体上采煤的安全评价问题。国内专家早在20世纪60年代提出了突水系数法,之后对突水系数法进行了修正^[3-5],但现有的突水系数法已难以完全满足深部煤层底板突水危险性预测的需要^[6]。为此,国内学者^[7-13]运用多元统计分析法、神经网络模型算法等预测煤层底板突水危险性。武强等^[7-8]针对煤层底板突水危险性多因素耦合的特点,提出了煤层底板突水危险性预测的脆弱性指数法。陈红江等^[9]运用距离判别分析法,建立了煤层底板突水危险性预测模型。张文泉等^[10]运用Fisher判别分析模型预测了煤层底板突水危险性。施龙青等^[11]基于主成分分析、模糊数学、粒子群算法以及支持向量机,建立了底板突水危险性评价模型。朱宗奎等^[12]基于影响因素的无量纲化处理,预测了煤层底板突水危险性。曹庆奎等^[13]基于模糊-支持向量机预测了煤层底板突水危险性。

尽管以上专家关于底板突水危险性预测开展了大量研究,但在预测过程中未明确煤层底板破坏深度的影响。考虑出现该情况的主要原因是原有的实测数据多采用落后的开采技术装备,对煤层底板产生的采动影响较小;开采深度较小,采动后底板应力变化的剧烈程度较弱;已考虑了部分与煤层底板破坏深度相关的因素等。然而现有的综采工作面开采强度较大,对煤层底板产生较为剧烈的采动影响,尤其是深部煤层底板不仅受到采动破坏影响,而且底板由高应力向低应力急剧卸载的过程中,增加了采动卸荷破坏可能性^[14],其破坏深度相比于浅部呈现明显增大的特点^[15]。因此,笔者建立了深部煤层底板破坏深度多元非线性预测模型,拟合计算出深部煤层底板破坏的预测深度;在此基础上,结合底板含水层水压力、隔水层厚度、工作面斜长与埋深4个因素,作为深部煤层底板突水危险性预测的输入向量;借助粒子群优化算法的不断更新、自我学习的能力,获取支持向量机的最优惩罚因子和核函数参数,构建了深部煤层底板突水危险性预测模型,从而有效地判别底板突水的危险性。

1 深部煤层底板破坏深度预测模型

近年来,国内专家基于大量的统计数据,运用数

理统计的方法,构建了煤层底板破坏深度预测模型。《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采指南》^[16]给出了煤层底板破坏深度与工作面斜长、煤层倾角、煤层厚度线性相关的回归公式;许春等^[17]结合统计的400 m以深的实测数据,构建了大埋深煤层底板破坏深度线性预测模型;施龙青等^[18]运用多元非线性方法给出了煤层底板破坏深度预测模型。

考虑到深部煤层底板处于“三高一扰动”的复杂应力环境,呈现出有别于浅部煤层底板破坏特征的非线性、多因素耦合的特点,现有的、适用性相对较强的煤层底板破坏深度预测模型难以充分诠释深部煤层底板破坏机理。笔者参考文献[6]给出的以520 m为界的17组华北型煤田深部煤层底板破坏深度实测数据(表1),构建了深部煤层底板破坏深度预测模型。

在考虑了埋深H、煤层倾角α、煤层厚度M和工作面斜长L的非线性因子基础上,参考基于半无限体理论计算得出的煤层底板破坏深度计算公式、现有的煤层底板破坏深度预测模型^[6,16-19],给出了1个类比覆岩破坏高度计算因子,同时构建了埋深H与煤层倾角α乘积的耦合变量N、采厚M与煤层倾角α乘积的耦合变量W、工作面斜长L与采厚M乘积的耦合变量S,分别体现受地层赋存特征影响的原岩应力、受煤层赋存情况影响的煤壁分布特征、工作面开采范围,具体的基函数见式(1)。

$$h = a_1 + a_2 H^{a_3} + a_4 \sin(a_5 \alpha + a_6) + a_7 \cos(a_8 \alpha + a_9) + a_{10} M^{a_{11}} + a_{12} L^{a_{13}} + \frac{a_{14} M^{a_{15}} + a_{16}}{a_{17} M^{a_{18}} + a_{19}} + a_{20} \ln N + a_{21} \sqrt{N} + a_{22} \sqrt{W} + a_{23} \ln S + a_{24} \sqrt{S} + a_{25} F \quad (1)$$

其中, a_1, a_2, \dots, a_{25} 为拟回归的相关系数。运用多元非线性回归方法,构建了深部煤层底板破坏深度数学模型,见式(2)。

$$h = 0.846\ 51 + 0.000\ 011\ 912\ 9H^{2.065\ 88} + 4.550\ 15 \times \sin(0.020\ 76\alpha - 0.016\ 77) + 0.686\ 49 \cos(0.019\ 33\alpha - 0.003\ 66) + 2.151\ 85M^{1.239\ 27} + 1.109\ 51L^{0.684\ 143} + \frac{2.036\ 89M^{1.410\ 10} + 0.298\ 97}{0.059\ 86M^{1.664\ 49} + 0.128\ 11} - 2.558\ 36 \ln N - 0.062\ 50 \sqrt{N} + 2.147\ 66 \sqrt{W} + 2.921\ 23 \ln S - 2.341\ 37 \sqrt{S} + 6.846\ 65F \quad (2)$$

表 1 华北型石炭二叠系深部煤层底板采动破坏深度实测数据
Table 1 Mining failure depth of Permo Carboniferous coal seam floor in North China

编号	工作面	埋深 <i>H/m</i>	采厚 <i>M/m</i>	煤层倾角 $\alpha/(^\circ)$	工作面斜长 <i>L/m</i>	地质构造 <i>F</i>	底板破坏 深度 <i>h/m</i>
1	杨煤五矿 8403	520	8.74	8.5	220	1	20.0
2	开滦赵各庄矿 12 槽煤 1237	1 056	10.00	26.0	200	1	35.0
3	新汶煤田良庄矿 51302(1)	640	1.00	12.0	165	1	35.0
4	开滦赵各庄矿 1237(2)	1 000	2.00	30.0	200	0	38.0
5	潘三煤矿 37(1)	590	3.00	15.0	205	0	14.6
6	赵固一矿 11111	570	3.50	2.0	175	0	23.5
7	兗州煤田东滩矿 1305	598	8.78	6.0	223	1	20.0
8	邯郸地区某矿 1212	1 000	3.50	10.0	150	1	33.8
9	钱营孜煤矿 13	630	3.50	9.0	200	0	17.0
10	新集二矿首采面	650	4.50	10.0	150	0	19.2
11	赵固一矿 11011	710	3.60	3.0	180	0	25.8
12	巨野煤田赵楼矿 1304(2)	985	4.81	4.0	205	0	22.6
13	新汶煤田良庄矿 51101W	640	1.50	15.0	165	0	20.1
14	新汶华丰矿 2 号井 41303	721	0.94	30.0	120	0	11.9
15	邢东矿 2121	1 000	3.70	12.0	150	0	32.5
16	开滦赵各庄矿 1237(1)	900	2.00	26.0	200	0	27.0
17	钱营孜煤矿 12	650	3.50	9.0	150	0	24.3

注:地质构造 *F* 主要指断层,0 表示无断层,1 表示有断层。

通过回归拟合得出,深部煤层底板破坏深度预测模型的回归结果与实测数据的相关系数为 0.941 5,接近 1,说明该模型可以较好地预测深部煤层底板破坏深度。

2 深部煤层底板突水危险性预测模型

深部煤层底板破坏深度相比于浅部明显增大,在预测深部煤层底板突水危险性时需重视煤层底板破坏深度的影响。笔者将深部煤层底板破坏深度预测模型给出的预测值作为深部煤层底板突水危险性预测的因素之一。煤层底板突水危险性预测的本质是在充分挖掘突水案例与非突水案例差异的基础上,通过构建模型将 2 类数据最大限度地划分开来。由于深部煤层底板突水危险性与其主控因素呈多因素耦合、非线性的特点,采用常规预测方法难以给出准确的结果,因此,笔者借助具有较强的鲁棒性、非线性映射能力、自学习能力等特点的神经网络模型算法,构建了深部煤层底板突水危险性预测模型。

2.1 PSO 优化 SVM 模型

2.1.1 SVM 算法及原理

支持向量机是通过非线性映射 ψ 将原线性不

可分的低维空间训练集样本转换至高维空间 *G*,同时构建最优超平面,使得分类间隔边缘达到最大化,以实现样本分类^[20-21]。

假定在精度 ε 内,训练样本集可以用式(3)进行无误差地线性拟合。

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = [\mathbf{z}\psi(\mathbf{x})] + \xi \quad (3)$$

式中: \mathbf{x} 、 $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ 分别为输入和输出向量, $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T$, $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}^T$, $x_j \in \mathbf{R}^l$, $f_j \in \mathbf{R}$; f_j 为输出向量 $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ 的第 *j* 个样本; *n* 为样本数, *l* 为输入向量维数; \mathbf{z} 为权向量; $\psi(\mathbf{x})$ 为某非线性映射; ξ 为偏置项。

约束条件为

$$\begin{cases} f_j - \mathbf{z}\psi(x_j) - \xi \leq \varepsilon + \delta_j \\ \psi(x_j)\mathbf{z} + \xi - f_j \leq \varepsilon + \delta_j^* \end{cases} \quad (4)$$

式中: δ_j 与 δ_j^* 为松弛变量, 用于协调拟合误差; *j* = 1, 2, 3, ..., *n*。

根据支持向量机的最大间隔原理,求解的非线性回归问题就是最小化目标函数的问题,即

$$\min \frac{1}{2}(\mathbf{z}^T \mathbf{z}) + \frac{c}{n} \sum_{j=1}^n (\delta_j + \delta_j^*)$$

其中, *c* 为惩罚因子,

$c > 0$ 。 c 越大,对误判样本的惩罚程度越大。采用对偶理论,可转变为对应的对偶问题,即

$$\max \left[-\frac{1}{2} \sum_{j,k=1}^n (\boldsymbol{\beta}_j - \boldsymbol{\beta}_j^*)(\boldsymbol{\beta}_k - \boldsymbol{\beta}_k^*) K(x_j, x_k) - \xi \sum_{j=1}^n (\boldsymbol{\beta}_j - \boldsymbol{\beta}_j^*) + \sum_{j=1}^n f_j (\boldsymbol{\beta}_j - \boldsymbol{\beta}_j^*) \right] \quad (5)$$

$$\text{约束条件为 } \sum_{j=1}^n (\boldsymbol{\beta}_j - \boldsymbol{\beta}_j^*) = 0, \boldsymbol{\beta}_j, \boldsymbol{\beta}_j^* \in [0, c]。$$

其中: $\boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\beta}^*$ 为待求解的 l 维支持向量; $K(x_j, x_k)$ 为核函数; x_k 为第 k 个向量样本。

支持向量机预测模型的核心在于核函数的选择,笔者选择较为常用的径向基核函数。此时的对偶问题变为二次规划问题,求解该二次规划问题即可得到最优解 $\boldsymbol{\beta}_j, \boldsymbol{\beta}_j^*$ 。因此线性回归函数模型可表示为

$$f(x) = \sum_{j=1}^n (\boldsymbol{\beta}_j - \boldsymbol{\beta}_j^*) K(x_j, x_k) + \xi \quad (6)$$

采用径向基核函数的SVM模型预测底板突水危险性时,需要给出最优惩罚因子 c 和核函数参数 g ,这正是运用SVM模型进行预测的重点和难点。

2.1.2 PSO 算法及原理

粒子群优化算法(PSO)是基于鸟类、鱼类等群体动物捕食的相关特征提出的,具备较强的参数寻优能力。群体搜索食物的过程中,每个个体均代表一个潜在解,即为粒子,每个粒子以存在最多粒子的方向为目标进行移动。通过对分析粒子当前位置、粒子自身所找到的最优解(个体极值)、粒子群找到的最优解(全局极值)的适应度值,调整粒子的位置和速度,最终获得最优适应度值^[20-21]。

假设 D 维的搜索空间中,由 m 个粒子组成种群 $\boldsymbol{\gamma} = [\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_m]$,每一个粒子代表在 D 维搜索空间中的位置,也是一个潜在解。其中第 u 个粒子 $\boldsymbol{\gamma}_u = [\gamma_{u1}, \gamma_{u2}, \dots, \gamma_{uD}]^T$,根据适应度函数计算出相应的适应度值,其速度 $\boldsymbol{V}_u = [V_{u1}, V_{u2}, \dots, V_{uD}]^T$,个体极值 $\boldsymbol{P}_u = [P_{u1}, P_{u2}, \dots, P_{uD}]^T$,种群的全局极值 $\boldsymbol{P}_g = [P_{g1}, P_{g2}, \dots, P_{gD}]^T$ 。

粒子在迭代的过程中,通过个体极值和全局极值更新自身的速度和位置,具体见式(7)、式(8)。

$$V_{ud}^{kk+1} = \omega V_{ud}^{kk} + c_1 r_1 (P_{ud}^{kk} - \gamma_{ud}^{kk}) + c_2 r_2 (P_{gd}^{kk} - \gamma_{gd}^{kk}) \quad (7)$$

$$\gamma_{ud}^{kk+1} = \gamma_{ud}^{kk} + V_{ud}^{kk+1} \quad (8)$$

式中: kk 为当前迭代次数; $u = 1, 2, \dots, m$; c_1, c_2 为加速度因子,为非负常数; r_1, r_2 为分布于 $[0, 1]$ 之间的

随机数;维数 $d = 1, 2, \dots, D$; ω 为惯性权重; V_{ud} 为粒子速度。

2.1.3 PSO_SVM 算法

通过分析SVM和PSO算法及原理易知,SVM算法具有将低维空间线性不可分的样本通过非线性映射,实现在高维空间线性可分,但在分类的过程中,需获取最优惩罚因子 c 和核函数参数 g ;PSO具有不断更新、自我优化学习的能力,通过模型的不断训练、迭代可用于获取最优解。综上分析,笔者借助PSO较强的参数寻优能力,获取了支持向量机模型的最优惩罚因子 c 和核函数参数 g ,构建了深部煤层底板突水危险性预测的PSO_SVM模型。同时为了更为准确地预测分类且缩短模型训练时长,笔者采用K-CV方法进行交叉验证,以获取最优惩罚因子 c 和核函数参数 g ;并将训练集CV意义下的准确度作为PSO优化算法中的适应度函数,具体如图1所示。

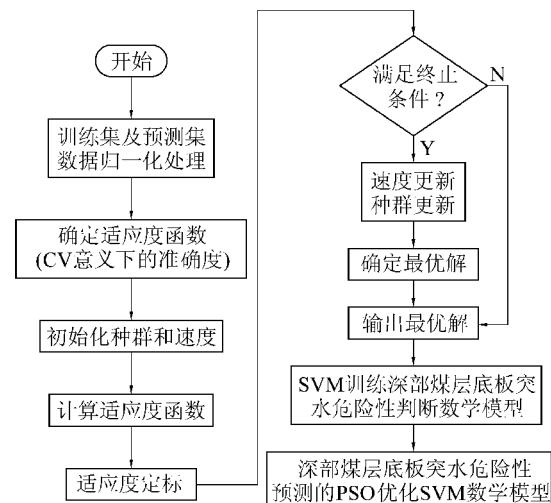


图1 PSO_SVM 算法流程

Fig. 1 Algorithm flow of SVM parameters optimized by PSO

2.2 构建评价指标体系

为搜集适用于深部煤层底板破坏深度预测模型的、且全面反映底板突水特征的案例,笔者重点调研了华北煤田大水矿区峰峰集团所属主要生产矿井(九龙矿、梧桐庄矿、辛安矿和羊东矿),结合矿井的突水台账和矿井充水性图,确定了16组突水案例;搜集相关文献^[22-23]获取了2组突水案例。考虑到所搜集的案例均位于华北型煤田,煤层赋存时期基本接近,而且准确统计煤层底板岩体的阻水性能难度较大,故假设所统计案例的煤层底板岩性较为接近。在假设条件下,统计的案例仅考虑工作面斜长、

煤层倾角、底板承压水压力、采厚、底板隔水层厚度、地质构造和埋深 7 个因素。深部煤层底板突水危险

性判断案例见表 2。

表 2 深部煤层底板突水危险性判断案例

Table 2 Water inrush risk judgment case of deep coal seam floor

序号	煤矿	工作面斜长/m	煤层倾角/(°)	底板承压水压力/MPa	采厚/m	底板隔水层厚度/m	地质构造	埋深/m
1	九龙矿 1 号	142.0	11.0	8.69	1.40	41.50	1	873.00
2	九龙矿 2 号	134.0	12.0	2.47	1.34	28.32	1	760.00
3	九龙矿 3 号	202.0	12.6	6.51	1.92	105.00	0	790.30
4	九龙矿 4 号	122.0	11.0	6.10	1.40	66.00	0	833.00
5	九龙矿 5 号	164.2	15.9	5.23	2.37	101.40	0	662.40
6	九龙矿 6 号	124.0	1.4	1.40	1.89	28.32	1	653.00
7	九龙矿 7 号	143.7	15.9	5.76	2.69	101.40	0	715.30
8	梧桐庄矿 1 号	150.0	7.0	2.95	3.00	40.70	1	635.00
9	辛安矿 1 号	111.3	24.0	6.05	4.40	116.20	0	721.00
10	辛安矿 2 号	133.7	19.0	8.90	3.40	70.00	1	707.07
11	枣庄付村煤业 206 ^[22]	153.0	3.0	5.20	3.86	58.00	0	542.00
12	羊东矿 1 号	152.7	7.5	1.05	1.13	34.90	0	849.00
13	羊东矿 2 号	152.7	7.5	3.49	1.13	78.15	0	849.00
14	羊东矿 3 号	180.0	10.0	3.25	1.30	78.15	0	840.00
15	赵各庄矿 2137 ^[23]	180.0	26.0	10.00	9.00	130.00	0	1 100.00
16	梧桐庄矿 2 号	135.3	13.0	2.70	3.20	40.00	1	621.60
17	九龙矿 8 号	120.0	13.0	6.10	1.34	66.00	0	738.34
18	辛安矿 3 号	142.7	23.0	6.48	4.13	116.20	0	764.34

地质构造是诱发煤层底板突水的主要影响因素,但考虑到描述地质构造特征涉及的因素较多,准确的统计分析难度较大,因此,所统计的突水案例中,除个别案例外,地质构造均为小断层或原生裂隙,主要影响煤层底板破坏深度的大小,未对煤层底板是否突水产生直接影响。针对个别诱发煤层底板突水的地质构造(如隐伏断层、陷落柱),采取修正底板隔水层厚度和底板承压水压力的方式进行简化处理,同时考虑其对煤层底板破坏深度的影响。参考文献[17],将存在地质构造的情况定义为 1,反之定义为 0,即地质构造这一因素反映的信息量相对较少。如果将地质构造作为深部煤层底板破坏深度预测模型的影响因素后,再将其与深部煤层底板破坏深度的预测值同时作为深部煤层底板突水危险性预测模型的输入向量,略显繁冗,而且所体现的信息量较小。综上分析,仅在确定煤层底板破坏深度时考虑地质构造的影响,而在进行深部煤层底板突水危险性预测时,选择忽略地质构造的影响。

基于深部煤层底板突水危险性判断案例(表 2)的相关数据,运用深部煤层底板破坏深度预测模型给出相应的预测值;将煤层底板破坏深度的预测值、埋深、含水层水压力、工作面斜长和底板隔水层厚度 5 个因素,作为深部煤层底板突水危险性评价的输入向量,将煤层底板是否发生突水作为输出向量,具体见表 3。将 1—15 组数据作为训练集,将 16—18 组数据作为验证集。

2.3 预测结果分析

为避免盲目搜索、费时费力,对深部煤层底板突水危险性预测的 PSO_SVM 模型的相关参数进行一定限制^[20-21],取惩罚因子 c 的取值范围为 [0.1, 100],核函数参数 g 的取值范围为 [0.1, 1 000],种群规模为 30,初始全局搜索能力参数为 1.7,初始局部搜索能力参数为 1.7,迭代进化次数为 2 000。

通过模型训练得出最优惩罚因子 c 为 1.518 7,最优核函数参数 g 为 0.115 26。根据训练好的模型对 3 个验证集的突水案例进行预测,同时对比分析

了突水系数法(以突水系数不大于 0.06 MPa/m 为标准)、马氏距离判别法、贝叶斯判别法的预测结

果,具体见表 4。

表 3 深部煤层底板突水危险性评价

Table 3 Water inrush risk assessment of deep coal seam floor

分组	序号	煤矿	底板破坏预测 回归深度/m	工作面 斜长/m	底板承压水 压力/MPa	底板隔水层 厚度/m	埋深/m	是否突水
训 练 集	1	九龙矿 1 号	33.34	142.0	8.69	41.5	873.0	突水
	2	九龙矿 2 号	34.86	134.0	2.47	28.3	760.0	突水
	3	九龙矿 3 号	33.70	202.0	6.51	105.0	790.3	未突水
	4	九龙矿 4 号	24.16	122.0	6.10	66.0	833.0	突水
	5	九龙矿 5 号	21.25	164.2	5.23	101.4	662.4	突水
	6	九龙矿 6 号	35.20	124.0	1.40	28.3	653.0	突水
	7	九龙矿 7 号	21.60	143.7	5.76	101.4	715.3	未突水
	8	梧桐庄矿 1 号	33.97	150.0	2.95	40.7	635.0	突水
	9	辛安矿 1 号	30.13	111.3	6.05	116.2	721.0	未突水
	10	辛安矿 2 号	33.19	133.7	8.90	70.0	707.1	突水
	11	枣庄付村煤业 206	21.63	153.0	5.20	58.0	542.0	未突水
	12	羊东矿 1 号	32.35	152.7	1.05	34.9	849.0	未突水
	13	羊东矿 2 号	24.76	180.0	3.25	78.2	840.0	未突水
	14	羊东矿 3 号	32.35	152.7	3.49	78.2	849.0	未突水
	15	赵各庄矿 2137	31.99	180.0	10.00	130.0	1 100.0	未突水
验 证 集	16	梧桐庄矿 2 号	34.010	135.3	2.70	40.0	621.6	突水
	17	九龙矿 8 号	27.030	120.0	6.10	66.0	738.3	未突水
	18	辛安矿 3 号	31.739	142.7	6.48	116.2	764.3	突水

表 4 深部煤层底板突水危险性评价对比

Table 4 Water inrush risk comparative evaluation of deep coal seam floor

分组	序号	煤矿	底板突水危 险性实际结果	模型预测结果			
				深部底板突水 危险性预测模型	突水系数法	马氏距离判别法	贝叶斯判别法
验证集	16	梧桐庄矿 2 号	突水	突水	突水	突水	突水
	17	九龙矿 8 号	未突水	未突水	突水	突水	未突水
	18	辛安矿 3 号	突水	突水	未突水	未突水	未突水

从表 4 可知,相比于突水系数法预测的准确度(33.3%)、马氏距离判别法预测的准确度(33.3%)和贝叶斯判别法预测的准确度(66.6%),构建的深部煤层底板突水危险性预测模型的准确度(100%)较高。这在一定程度上也说明现有的、较为简单的模型难以满足深部煤层底板突水危险性预测的需要。

3 结 论

1) 基于半无限体理论计算的煤层底板破坏深

度和现有的煤层底板破坏深度预测模型,以多因素耦合为出发点,在考虑多个影响因素的非线性因子的基础上,构建了受地层赋存特征影响的原岩应力、受煤层赋存情况影响的煤壁分布特征、工作面开采范围 3 个耦合变量,建立了深部煤层底板破坏深度预测模型。

2) 将深部煤层底板破坏深度数学模型给出的预测值与工作面斜长、底板承压水压力、埋深、底板隔水层厚度,作为深部煤层底板突水危险性评价的输入向量,将煤层底板是否发生突水作为输出向量。

运用支持向量机的非线性映射函数处理深部煤层底板突水危险性预测的非线性特点,同时结合粒子群优化算法的不断更新、自优化学习能力,获取支持向量机的最优惩罚因子和核函数参数,构建了考虑煤层底板破坏深度影响的深部煤层底板突水危险性预测模型。

3)通过 PSO 优化 SVM 的最优惩罚因子和核函数参数,得出最优惩罚因子 c 为 1.518 7,最优核函数参数 g 为 0.115 26。将训练好的模型对 3 个验证案例进行对比分析得出,深部煤层底板突水危险性预测的 PSO_SVM 模型分析结果与实际情况一致,其预测的准确度相比于突水系数法、马氏距离判别法和贝叶斯判别法较高。

参考文献(References):

- [1] 斯列萨列夫 B.水体下安全采煤的条件[C]//国外矿山防治水技术的发展与实践.鞍山:冶金工业部鞍山黑色冶金矿山设计院,1983.
- [2] 白海波,缪协兴.晚古生代煤田水文地质特征与防治水理论及技术[J].中国矿业大学学报,2016,45(1):1-10.
BAI Haibo, MIAO Xiexing. Hydrogeological characteristics and mine water inrush prevention of late Paleozoic coalfields [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45 (1):1-10.
- [3] 乔 宁,丁亮斌.上覆不明采空区突水危险性分析及积水范围探测[J].煤炭科学技术,2017,45(8):48-54.
QIAO Ning, DING Liangbin. Analysis on water inrush risk and detection of accumulation water scope in overlying unknown gob [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45 (8):48-54.
- [4] 王思栋,邓 涛,张厉峰,等.湖下深部开采下组煤底板突水危险性分区分级预测[J].煤炭科学技术,2017,45(8):217-222.
WANG Sidong, DENG Tao, ZHANG Lifeng, et al. Classification and prediction of water inrush risk from coal seam floor with deep coal seam mining under lake [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45 (8):217-222.
- [5] 刘其声.关于突水系数的讨论[J].煤田地质与勘探,2009,37 (4):34-37,42.
LIU Qisheng. A discussion on water inrush coefficient [J]. Coal Geology and Exploration, 2009, 37 (4):34-37,42.
- [6] 张风达.深部煤层底板变形破坏机理及突水评价方法研究 [D].北京:中国矿业大学(北京),2016.
- [7] 武 强,庞 炜,戴迎春,等.煤层底板突水脆弱性评价的 GIS 与 ANN 桥合技术[J].煤炭学报,2006,31(6):314-319.
WU Qiang, PANG Wei, DAI Yingchun, et al. Vulnerability forecasting model based on coupling technique of GIS and ANN in floor groundwater bursting [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31 (6):314-319.
- [8] 武 强,张 波,赵文德等.煤层底板突水评价的新型实用方法 V:基于 GIS 的 ANN 型、证据权型、Logistic 回归型脆弱性指
数法的比较[J].煤炭学报,2013,38(1):21-26.
WU Qiang, ZHANG Bo, ZHAO Wende, et al. A new practical methodology of coal seam floor water burst evaluation: the comparison study among ANN, the weight of evidence and the logistic regression vulnerable index method based on GIS [J]. Journal of China Coal Society ,2013,38(1):21-26.
- [9] 陈红江,李夕兵,刘爱华,等.煤层底板突水量的距离判别分析
预测方法[J].煤炭学报,2009,34(4):487-491.
CHEN Hongjiang, LI Xibing, LIU Aihua, et al. Forecast method of water inrush quantity from coal floor based on distance discriminant analysis theory [J].煤炭学报,2009,34(4):487-491.
- [10] 张文泉,张广鹏,李 伟,等.煤层底板突水危险性的 Fisher 判
别分析模型[J].煤炭学报,2013,38(10):1831-1836.
ZHANG Wenquan, ZHANG Guangpeng, LI Wei, et al. A model of Fisher's discriminant analysis for evaluating water inrush risk from coal seam floor [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38 (10):1831-1836.
- [11] 施龙青,谭希鹏,王 娟,等.基于 PCA_Fuzzy_PSO_SVC 的底
板突水危险性评价[J].煤炭学报,2015,40(1):167-171.
SHI Longqing, TAN Xipeng, WANG Juan, et al. Risk assessment of water inrush based on PCA_Fuzzy_PSO_SVC [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40 (1):167-171.
- [12] 朱宗奎,徐智敏,孙亚军.基于无量纲多源信息融合的底板突
水危险性评价方法研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30
(11):911-916.
ZHU Zongkui, XU Zhimin, SUN Yajun. Research on the risk evaluation methods of water inrush from coal floor based on dimensionless multi - source information fusion technique [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30 (11):911-916.
- [13] 曹庆奎,赵 斐.基于模糊—支持向量机的煤层底板突水危
险性评价[J].煤炭学报,2011,36(4):633-637.
CAO Qingkui, ZHAO Fei. Risk evaluation of water inrush from coal floor based on fuzzy - support vector machine [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36 (4):633-637.
- [14] 张风达,申宝宏,康永华.考虑卸荷作用的煤层底板突水破
坏机制研究[J].岩土力学,2016,37(2):431-438.
ZHANG Fengda, SHEN Baohong, KANG Yonghua. Water inrush failure mechanism of mining floor under unloading effect [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37 (2):431-438.
- [15] 蒋勤明.大采深工作面煤层底板采动破坏深度测试[J].煤
田地质与勘探,2009,37(4):30-33.
JIANG Qinming. Coal floor strata failure depth test of working face at big mining depth [J]. Coal Geology & Exploration, 2009, 37 (4):30-33.
- [16] 胡炳南,张华兴,申宝宏.建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱
留设与压煤开采指南[M].北京:煤炭工业出版社,2017.
- [17] 杨建华,汪 东.近距离煤层群上位煤层开采底板破坏特征分
析[J].煤炭科学技术,2017,45(7):7-11.

(下转第 228 页)

- 术应用[J].岩石力学与工程学报,2002,21(12):1786-1790.
- PENG Suping, LING Biaocan, LIU Shengdong. Application of seismic tomography in longwall top-coal caving face [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21 (12): 1786-1790.
- [11] 韩德品.“地质-电法-测温”多参数综合超前探测技术及应用[J].煤炭学报,2009,34(11):1499-1506.
- HAN Depin. “Geology-electricity-temperature” multi-parameter synthesized leading detection technology and application [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34 (11): 1499-1506.
- [12] 程 邈,傅焰林,李振宇.高密度电法在查明潜伏断裂中的应用[J].工程地球物理学报,2011,8(4):417-420.
- CHENG Miao, FU Yanlin, LI Zhenyu. Application of high density resistivity method to hidden fault investigation [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2011, 8 (4): 417-420.
- [13] 赵海龙,唐 海,吴仕鹏.地质雷达在鸣西矿建井初期的应用[J].中州煤炭,2016(5):113-115.
- ZHAO Hailong, TANG Hai, WU Shipeng. Application of ground penetrating radar at early construction of Mingxi Mine [J]. Zhongzhou Coal, 2016 (5): 113-115.
- [14] 杨立彪.运用矿井探地雷达探测汾西矿区的异常地质构造[J].矿业安全与环保,2012,39(5):83-84.
- YANG Libiao. Application of mine ground penetrating radar to detect abnormal geological structure of Fenxi mining area [J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2012, 39 (5): 83-84.
- [15] 梁庆华,宋 劲,孙兴平,等.地质雷达井下探测瓦斯富集区特征研究[J].地球物理学进展,2013,28(3):1570-1574.
- LIANG Qinghua, SONG Jin, SUN Xingping, et al. The characteristics study of ground penetrating radar detection of gas enrichment area in coal mine [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28 (3): 1570-1574.
- [16] 王雪涛.地质雷达探测技术在乌东煤矿的应用实践[J].煤炭科技,2016,41(4):92-95.
- WANG Xuetao. Application of ground penetrating radar detection technology in Wudong Coal Mine [J]. Coal Science & Technology Magazine, 2016, 41 (4): 92-95.
- [17] 王太元,董远浪,屈旭辉.地质雷达技术在阳泉矿区井下超前探测中的应用[J].中州煤炭,2015(2):99-105.
- WANG Taiyuan, DONG Yuanlang, QU Xuhui. Application of advanced detection in Yangquan mining area by ground penetrating radar technology [J]. Zhongzhou Coal, 2015 (2): 99-105.
- [18] 刘 晨.运用地质雷达探测矿井隐伏地质异常体[J].中小企业管理与科技,2017,5(1),181.
- LIU Chen. Using geological radar detect concealed geological anomaly [J]. Management & Technology of SME, 2017, 5 (1): 180-181.
- [19] PENG Suping, YANG Feng. Fine geological radar processing and interpretation [J]. Applied Geophysics, 2004, 1 (2): 89-94.
- [20] 许献磊,杨 峰,夏云海,等.矿井超深探测地质雷达天线的开发及应用[J].煤炭科学技术,2016,44(4):124-129.
- XU Xianlei, YANG Feng, XIA Yunhai, et al. Development and application of mine geological radar antenna for mine ultra-deep detection [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44 (4): 124-129.
- [21] 宋 劲.矿井防爆地质雷达关键技术研究[D].长沙:中南大学,2014.

(上接第67页)

- YANG Jianhua, WANG Dong. Analysis on floor damage characteristic of the upper coal seam mining in contiguous coal seams [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45 (7): 7-11.
- [18] 施龙青,徐东晶,邱 梅,等.采场底板破坏深度计算公式的改进[J].煤炭学报,2013,38(S2):299-303.
- SHI Longqing, XU Dongjing, QIU Mei, et al. Improved on the formula about the depth of damaged floor in working area [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38 (S2): 299-303.
- [19] 孟祥瑞,徐鍇辉,高召宁,等.采场底板应力分布及破坏机理[J].煤炭学报,2010,35(11):1832-1836.
- MENG Xiangrui, XU Chenghui, GAO Zhaoning, et al. Stress distribution and damage mechanism of mining floor [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35 (11): 1832-1836.

- China Coal Society, 2010, 35 (11): 1832-1836.
- [20] 王小川,史 峰,郁 磊,等.MATLAB 神经网络 43 个案例分析[M].北京:北京航空航天大学出版社,2013.
- [21] 卓金武.MATLAB 在数学建模中的应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,2011.
- [22] 李景恒,许延春,张 波,等.深部首采工作面顶底板涌水量预计[J].煤矿开采,2003,8(1):66-68.
- LI Jingheng, XU Yanchun, ZHANG Bo, et al. Water inflow forecast from roof and floor in the deep area of No.1 panel [J]. Coal Mining Technology, 2003, 8 (1): 66-68.
- [23] 张文泉.矿井(底板)突水灾害的动态机理及综合判测和预报软件开发研究[D].青岛:山东科技大学,2004.