

宁东矿区煤矿导水裂隙带智能预测及应用

王泽阳

中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710054

[摘要]覆岩导水裂隙带是煤矿突水、水资源流失及矿区生态环境恶化的直接诱因。经济、准确的预测导水裂隙带高度一直是保水采煤的研究重点和难点。文中选取宁东矿区梅花井煤矿为工程背景。以 18 个相似条件矿井的实测导水裂隙带高度样本为依据, 通过粒子群(PSO)-支持向量机回归(SVR)的研究方法, 提出了一种基于实测值的导水裂隙带高度预测模型。并以拟合优度 R^2 、均方根误差 RMSE 为综合评价指标, 开展了 PSO-SVR 模型与经验公式的误差对比。研究结果表明: PSO-SVR 模型预测值的 R^2 比经验公式提高了 18.3%, RMSE 降低了 92.7%。预测模型的预测值与实测值基本一致, 显著提高了导水裂隙带高度的预测精度。为实现宁东矿区煤炭资源安全高效开发与生态保护的协同发展提供了理论依据与技术支持。

[关键词]宁东矿区; 导水裂隙带; 覆岩结构; 统计模型

DOI: 10.33142/ec.v5i8.6521

中图分类号: TD745

文献标识码: A

Intelligent Prediction and Application of Water Conducting Fracture Zone in Ningdong Coal Mine

WANG Zeyang

CCTEG Xi'an Research Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710054, China

Abstract: The water conducting fissure zone in overburden is the direct cause of water inrush, water resource loss and ecological environment deterioration in coal mine. Economic and accurate prediction of the height of water diversion fracture zone has always been the focus and difficulty of water conservation coal mining. This paper selects Meihuajing coal mine in Ningdong mining area as the engineering background. Based on the measured height samples of 18 mines with similar conditions, a model for predicting the height of water conducting fracture zone based on measured values is proposed by using particle swarm optimization (PSO) - support vector machine regression (SVR). Taking goodness of fit R^2 and root mean square error RMSE as comprehensive evaluation indexes, the error comparison between PSO-SVR model and empirical formula is carried out. The results show that the R^2 of PSO-SVR model is 18.3% higher than the empirical formula, and the RMSE is 92.7% lower. The predicted value of the prediction model is basically consistent with the measured value, which significantly improves the prediction accuracy of the height of the water conducting fracture zone, so as to provide theoretical basis and technical support for realizing the coordinated development of safe and efficient development of coal resources and ecological protection in Ningdong mining area.

Keywords: Ningdong mining area; water conducting fissure zone; overburden structure; statistical model

引言

近年来,随着我国西部地区煤炭资源开采深度和开采强度的逐渐增加,采动裂隙发育引起的大范围岩层破断及矿井水害等问题日益严重^[1-2]。大多数西部矿区位于干旱半干旱地区,生态环境较为脆弱,高强度开采导致的水资源破坏和地表沉陷等环境问题较为突出^[3-4]。传统采矿理念及技术已经无法完全适合目前工作面长度大,采高大,推进速度快的强采动条件,急需人工智能、大数据等方法对相关理论进行补充与更新。覆岩导水裂隙带是煤矿突水事故、地表及地下水体流失、矿区生态环境恶化的直接诱因,其高度是保水采煤的重要理论依据和关键参数^[5]。宁东矿区地处干旱半干旱地区,是我国重点建设的煤炭基地之一。其煤炭资源埋深较浅,高强度开采必然加剧上覆岩层的不稳定性,导致上覆岩层破断影响范围加大,增大了矿区生态系统的修复难度。因此,科学、经济并准确地预测导水裂隙带高度是实现西部干旱半干旱矿区绿色开

采,改善人民生活质量的重要举措。

1 研究现状

国内外学者提出的导水裂隙带高度预测方法主要有经验公式、理论计算、相似模拟、数值模拟、现场实测等。范立民等^[6]对我国保水采煤 30 年来的研究成果进行了深入总结。他认为 20 世纪末提出的经验公式已不适用于目前的强采动条件。并提出导水裂隙带高度预测模型是今后保水采煤一个重要的研究方向。杨达明等^[7]认为现场探测是研究导水裂隙带高度的最佳方法,但耗时费力,成本较高。数值模拟法的精度与模型参数密切相关,准确获取相关参数难度较大。柴华彬等^[8]认为目前建立的导水裂隙带理论计算模型过于理想化,与现场复杂的地质赋存特征有较大偏差。曹志国等^[9]基于自主研发的相似模拟实验平台,揭示了煤水协调开采过程中导水裂隙带高度演化特征及顶板破断特征。但平台对材料配比的准确性要求较高,且对某些复杂地质条件的模拟较难实现。因此,通过神经网

络、机器学习等方法来准确、经济的计算矿山导水裂隙带高度是我们应重点研究的方向。部分专家^[10-12]采用 BP 和 Elman 等神经网络对导水裂隙带高度进行预测。但 BP 神经网络存在收敛速度慢、易陷入局部极小等问题,对模型的预测精度和泛化能力有一定影响。Elman 神经网络的可靠性较差,为了达到目标精度,所需隐含层神经元的数目比其他网络结构相对较多。支持向量机回归(Support Vector Regression, SVR)作为一种处理回归预测问题的机器学习方法。具有精度高,收敛速度快,泛化能力强等优点,已广泛应用于工程领域^[13-14]。SVR 模型的参数是影响预测性能的重要因素。到目前为止,其参数选择问题还只能借助其他算法来进行参数寻优^[15]。粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是 Kennedy 等人提出的一种与遗传算法类似的方法。但它并不需要遗传算法繁琐的“Crossover”和“Mutation”操作,而是通过追随当前搜索到的最优粒子进行搜索,最终找到全局的最优解^[16]。PSO 的优势在于简单容易实现并且没有许多参数需要调整。目前已广泛应用于函数优化,神经网络训练,以及其他遗传算法的应用领域^[17]。因此,借助 PSO 算法对 SVR 模型中的参数进行寻优将明显提高预测精度。

论文以梅花井煤矿为工程背景,以 18 组相似条件矿井的实测导水裂隙带高度样本为依据,基于粒子群(PSO)-支持向量机回归(SVR)的研究方法,提出一种基于弹性模量实测值的导水裂隙带高度预测模型。利用拟合优度 R^2 、均方根误差 RMSE 指标,开展 PSO-SVR 模型导高预测值与经验公式预测值的对比分析。最终为相似条件矿井提供一种经济、科学、准确的导水裂隙带预测方法。

2 基于弹性模量校准率响应的导水裂隙带高度智能预测

宁东矿区内资源整合煤矿均存在水文地质条件不清等问题,且地层中多有高矿化度、高酸性地下有害水体,对矿井造成较大威胁^[18-20]。因此,经济、准确的预测导水裂隙带高度是实现宁东矿区煤炭资源安全高效生产与地表生态环境治理的重要举措。

2.1 预测算法选取

粒子群优化算法(PSO)是一种群体智能优化算法^[21],其通过不断迭代来更新粒子的位置和速度,从而找到最优解。相关学者建立了支持向量机回归(SVR)用以解决函数估计的回归问题^[22]。其原理是利用核函数将低维空间的非线性问题映射为高维空间线性问题来进行回归求解。

本次导水裂隙带高度预测问题,具有小样本、非线性等特征,符合 SVR 算法所擅长的领域。惩罚系数 C 通过控制误差范围来避免发生欠拟合或过拟合的情况。核参数 g 控制数据的分布情况,进而对训练和预测的速度造成影响。合理的 C 以及 g 的引入可有效解决高维度下的随机映射问题,使得 SVR 算法具有较高的预测精度和泛化性能^[23]。通

过引入核函数 K 将非线性数据转变为线性数据,再经过处理,得到回归函数:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (a_i - a_i^*) K(x, x_i) + b \quad (1)$$

式中, a 为拉格朗日乘子。

因此,利用 PSO 算法优化 SVR 参数,能够更快使模型收敛,并提高模型精度。

2.2 预测模型的构建

基于 PSO-SVR 的导水裂隙带高度预测模型构建主要包含 3 个步骤(图 10):①导高样本数据输入,②PSO 参数寻优和③SVR 网络训练与检验(图 1)。

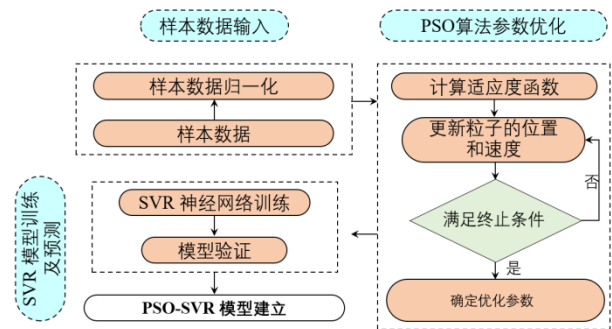


图 1 PSO-SVR 模型建立流程

(1) 样本数据输入

覆岩破坏是采场地质特征、开采条件及应力环境共同作用下的一种非线性力学行为。我们收集了 18 组相似条件矿井的相关参数及导水裂隙带实测值^[24-26](表 1)。导水裂隙带高度(y)的影响参数包括工作面采深(m, x_1)、煤层倾角($^\circ$, x_2)、煤层厚度(m, x_3)、煤层硬度(硬煤:普氏系数大于 1,软煤:普氏系数小于 1;分别取值 0.8 和 0.4, x_4)、岩层结构(参数数据化参照文献^[27-28],顶板岩性结构分为:坚硬-坚硬型、软弱-坚硬型、坚硬-软弱型和软弱-软弱型,分别取 1、0.75、0.50、0.25, x_5)、开采厚度(m, x_6)、工作面倾向长度(m, x_7)和顶板岩石弹性模量(MPa, x_8)。

表 1 中各因素的数值差异较大,因此首先对各参数进行归一化处理,处理后的数据见表 2。

$$f(x_i) = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

式中: $f(x_i)$ 为归一化处理后的数据, $i=1, \dots, n$, n 为数据个数; x_{\max} , x_{\min} 为各数据的最大值和最小值。

(2) PSO 参数的寻优及 SVR 网络训练

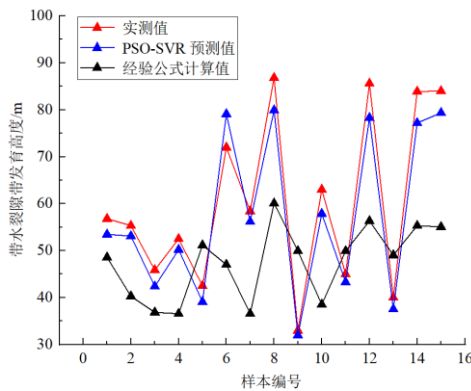
我们调取 MATLAB 的 LibSVM-Faruto Ultimate 工具箱,并通过其中的粒子群优化算法^[29]进行了 C 和 g 的参数优化,得到了 C 和 g 的最优解分别为 $C=28.43$, $g=0.47$ 。将其代入 SVR 回归模型并利用表 1 中前 15 组样本进行训练,确定样本的训练预测值,并与经验公式预测值进行对比(表 3、图 2)。

表 1 导水裂隙带发育高度影响因素及实测值

序号	样本类型	导水裂隙带发育高度影响因素								导水裂隙带实测值
		采深	煤层倾角	煤层厚度	煤层硬度	岩层结构	开采厚度	工作面倾向长度	顶板岩石弹性模量	
1	训练样本	420	23	3.7	0.8	0.5	3.7	70	8.52	56.8
2		550	15	2.4	0.8	0.5	2.4	180	9.78	55.32
3		89	7	2.1	0.8	1	2.03	69	13.35	45.86
4		230	37	2	0.4	0.25	2	85	4.78	52.5
5		56	0	4.5	0.8	1	4.3	55	11.32	42.5
6		117	2	3.4	0.8	0.75	3.4	200	6.14	72
7		150	23	6	0.8	0.25	2	174	4.96	58.4
8		450	8	8	0.8	0.5	8	170	7.83	86.8
9		282	8	4.8	0.8	0.5	4	71	8.22	33
10		101	1	3.2	0.8	0.25	2.2	158	5.12	63
11		49	5	6	0.8	0.25	4	135	6.92	45
12		290	8	8.4	0.8	0.25	6	645	3.89	85.6
13		446	17	3.8	0.8	0.5	3.8	143	13.61	40
14		570	10	8	0.8	0.5	5.6	295	7.47	83.9
15		310	12	8	0.8	0.5	5.5	275	9.24	84
16	检验样本	550	5	5	0.8	0.25	5	180	5.19	59
17		350	5	3.5	0.4	0.25	3.5	210	4.22	57.6
18		210	9	6.3	0.8	0.5	6	240	5.8	98

表 3 网络训练阶段预测精度和误差的比较

模型	R ²	RMSE
PSO-SVR	0.93	4.51
经验公式	0.73	20.04


图 2 网络训练阶段导水裂隙带高度比较

由表 2 可看出, 基于 PSO-SVR 模型导水裂隙带高度预测值的拟合优度 R^2 、均方根误差 RMSE 分别为 0.93、4.51, 而经验公式预测值的拟合优度 R^2 、均方根误差 RMSE 分别为 0.73、20.04。模型训练结果显示, 基于 PSO-SVR 模型预测值的拟合优度比经验公式高 27.4%, 均方根误差低 77.5%。

(3) PSO-SVR 回归模型的检测

通过表 2 后 3 组样本对 PSO-SVR 回归模型预测结果进行检测分析, 并与经验公式预测值进行对比(表 4、图 3)。由表 4 可知, 基于 PSO-SVR 模型导水裂隙带高度预测值的 R^2 和 RMSE 分别为 0.84 和 2.44, 而经验公式预测值 R^2 和 RMSE 分别为 0.71 和 33.65。基于 PSO-SV 模型预测值比经验公式预测值的拟合优度高 18.3%, 均方根误差低 92.7%, 验证了本节所构建 PSO-SV 模型的科学性。

表 4 模型检测阶段预测精度与误差的比较

模型	R ²	RMSE
PSO-SVR	0.84	2.44
经验公式	0.71	33.65

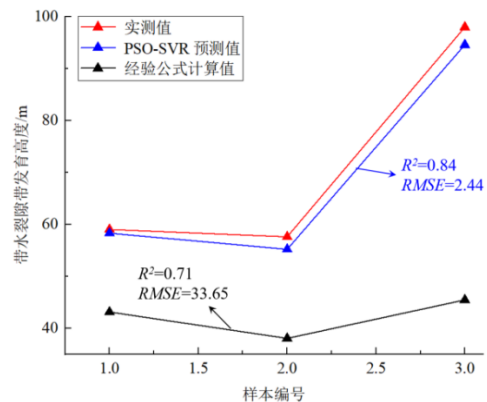

图 3 网络训练阶段导水裂隙带高度比较

表2 数据归一化

序号	样本类型	导水裂隙带发育高度影响因素							
		采深	煤层倾角	煤层厚度	煤层硬度	岩层结构	开采厚度	工作面倾向长度	顶板岩石弹性模量
1	训练样本	0.71	0.62	1.00	1.00	-0.67	0.28	0.03	0.48
2		0.96	0.41	0.24	1.00	-0.67	0.07	0.21	0.61
3		0.08	0.19	0.06	1.00	0.00	0.00	0.02	0.97
4		0.35	1.00	0.00	0.00	-1.00	0.00	0.05	0.09
5		0.01	0.00	1.47	1.00	0.00	0.38	0.00	0.76
6		0.13	0.05	0.82	1.00	-0.33	0.23	0.25	0.23
7		0.19	0.62	2.35	1.00	-1.00	0.00	0.20	0.11
8		0.77	0.22	3.53	1.00	-0.67	1.00	0.19	0.41
9		0.45	0.22	1.65	1.00	-0.67	0.33	0.03	0.45
10		0.10	0.03	0.71	1.00	-1.00	0.03	0.17	0.13
11		0.00	0.14	2.35	1.00	-1.00	0.33	0.14	0.31
12		0.46	0.22	3.76	1.00	-1.00	0.67	1.00	0.00
13		0.76	0.46	1.06	1.00	-0.67	0.30	0.15	1.00
14		1.00	0.27	3.53	1.00	-0.67	0.60	0.41	0.37
15		0.50	0.32	3.53	1.00	-0.67	0.58	0.37	0.55
16	检验样本	0.96	0.14	1.76	1.00	-1.00	0.50	0.21	0.13
17		0.58	0.14	0.88	0.00	-1.00	0.25	0.26	0.03
18		0.31	0.24	2.53	1.00	-0.67	0.67	0.31	0.20

2.3 导水裂隙带高度预测模型的应用

利用构建的 PSO-SVR 预测模型对宁东矿区梅花井煤矿的导水裂隙带高度进行了预测分析, 预测结果为 71.8m, 裂采比分别为 18.41 倍(表 5)。文献^[30-31]分别采用现场实测、经验公式计算及数值模拟的方法对梅花井煤矿导水裂隙带发育高度进行研究。现场实测、经验公式计算及数值模拟的研究结果得出导水裂隙带高度分别为 71m、49.48m 和 73m, 裂采比分别为 18.2 倍、12.69 倍和 18.72 倍(表 6)。

结果表明, 利用基于弹性模量的多参量的 PSO-SVR 方法预测导水裂隙带高度结果与实测值极为接近, 精度较高, 可广泛用于宁东矿区侏罗系煤田导水裂隙带高度预测。

表5 基于 PSO-SVR 模型的导水裂隙带高度预测

序号	样本类型	埋深 /m	倾角 /°	煤层厚度 /m	硬度	Overburden structure	采高 /m	工作面倾向长度 /m	弹性模量 /MPa	预测值	裂采比
1	梅花井煤矿	500	15	3.9	0.8	0.75	3.9	221	5.17	71.8	18.41

表6 裂缝发育高度对比分析

序号	样本类型	预测方法					
		实测值 /m	采裂比	经验公式 /m	采裂比	数值模拟 /m	采裂比
1	梅花井煤矿	71	18.2	49.48	12.69	73	18.72

3 结论

现有导水裂隙带的相关研究, 虽引入了大数据等先进的计算方法, 仍与现场真实值存在一定误差。为解决上述问题, 本文通过研究, 得到了以下结论:

采用粒子群(PSO)-支持向量机回归(SVR)的研究方法, 提出了一种基于弹性模量实测值的导水裂隙带高度预测模型。

(2) 利用拟合优度 R^2 、均方根误差 RMSE 为综合评价指标, 开展 PSO-SVR 模型导高预测值与经验公式预测值对比分析, PSO-SVR 模型预测值的 R^2 比经验公式计算值提高了 18.3%, RMSE 降低了 92.7%, 显著提高了导水裂隙带高度预测精度。为实现宁东矿区煤炭资源安全高效开发与生态保护的协同发展提供了理论依据与技术支持。

[参考文献]

- [1]武强, 许珂, 张维. 再论煤层顶板涌(突)水危险性预测评价的“三图-双预测法”[J]. 煤炭学报, 2016, 41(6): 1341-1347.
- [2]李长洪, 卜磊, 魏晓明, 等. 深部开采安全机理及灾害防控现状与态势分析[J]. 工程科学学报, 2017, 39(8): 1129-1140.
- [3]LI Wenping, WANG Qiqing, LIU Shiliang, et al. Study on the creep permeability of mining-cracked N_2 laterite as the key aquifuge for preserving water resources in Northwestern China[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2018, 5(3): 315-327.
- [4]FAN Limin, MA Xiongde. A review on investigation of

- water-preserved coal mining in western China[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2018, 5(4): 411-416.
- [5] 杜文刚, 柴敬, 张丁丁, 等. 采动覆岩导水裂隙发育光纤感测与表征模型试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1565-1575.
- [6] 范立民, 马雄德, 蒋泽泉, 等. 保水采煤研究 30 年回顾与展望[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(7): 1-30.
- [7] 杨达明, 郭文兵, 赵高博, 等. 厚松散层软弱覆岩下综放开采导水裂隙带发育高度[J]. 煤炭学报, 2019, 44(11): 3308-3316.
- [8] 柴华彬, 张俊鹏, 严超. 基于 GA-SVR 的采动覆岩导水裂隙带高度预测[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(2): 359-365.
- [9] 曹志国, 张建民, 王皓, 等. 西部矿区煤水协调开采物理与情景模拟实验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 638-651.
- [10] 谢晓锋, 李夕兵, 尚雪义, 等. PCA-BP 神经网络模型预测导水裂隙带高度[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(3): 100-105.
- [11] 李振华, 许延春, 李龙飞, 等. 基于 BP 神经网络的导水裂隙带高度预测[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(6): 905-910.
- [12] 施龙青, 吴洪斌, 李永雷, 等. 导水裂隙带发育高度预测的 PCA-GA-Elman 优化模型[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2021, 40(4): 10-18.
- [13] Deng Shaohui, Wang Xiaoling, Zhu Yushan, et al. Hybrid grey wolf optimization algorithm-based support vector machine for groutability prediction of fractured rock mass[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2019, 33(2): 40180651-40180659.
- [14] 贺玉琪, 王栋, 王远坤. BRR-SVR 月降水量预测优化模型[J]. 水利学报, 2019, 50(12): 1529-1537.
- [15] Wang Jiajun, Zhong Denghua, Wu Binping, et al. Evaluation of compaction quality based on SVR with CFA: Case study on compaction quality of earth-rock dam[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2018, 32(3): 50180011-501800110.
- [16] 廉小亲, 刘钰, 陈彦铭, 等. 基于自适应粒子群算法的多峰谱线分离方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(5): 1452-1457.
- [17] LI Xinyu, ZHOU Jianping, LI Hongqing, et al. Improved Droop Control Strategy for Real-time Power Sharing of Microgrid Based on Particle Swarm Optimization[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3425-3432.
- [18] Hou Enke. Prediction of Water-inrush from Roof Separation A Case Study in Dafosi Coal Mine, Shaanxi Province, China [J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 12(23): 156-174.
- [19] XIE Heping, ZHANG Zetian, GAO Feng, et al. Stress-fracture-seepage field behavior of coal under different mining layouts[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(10): 2405-2417.
- [20] Xiuyan Jing. Hydro-geochemical simulation for the evolution of groundwater quality in Yinchuan Plain, China[J]. Journal des sciences hydrologiques, 2016, 61(12): 2487-2495.
- [21] Gong Y J, J. J. Li, Y. Zhou, et al. Genetic Learning Particle Swarm Optimization[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2016, 46(10): 2277-2290.
- [22] A. Shilton, D. T. Lai, M. Palaniswami, A division algebraic framework for multidimensional support vector regression[J]. IEEE Transactions on systems man and cybernetics part b-cybernetics, 2010, 40(2): 517-528.
- [23] 朱霄珣, 徐搏超, 焦宏超, 等. 遗传算法对 SVR 风速预测模型的多参数优化[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(2): 70-75.
- [24] 谢晓锋, 李夕兵, 尚雪义, 等. PCA-BP 神经网络模型预测导水裂隙带高度[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(3): 100-105.
- [25] 张小五, 陈鑫, 芦震. 灵新煤矿导水裂隙带发育高度数值模拟研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(7): 64-69.
- [26] 吴晓军, 赵飞. 新疆大南湖七号煤矿首采区水文地质条件研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(2): 210-215.
- [27] 王正帅, 邓喀中, 谭志祥. 导水裂缝带高度预测的模糊支持向量机模型[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(4): 723-727.
- [28] 孙云普, 王云飞, 郑晓娟. 基于遗传-支持向量机法的煤层顶板导水断裂带高度的分析[J]. 煤炭学报, 2009, 34(12): 1610-1615.
- [29] 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.
- [30] 王沙沙, 魏久传, 宋宝来. 采动影响下采空区覆岩破坏变形规律数值模拟研究[J]. 龙岩学院学报, 2019, 37(2): 50-55.
- [31] 李兴. 河流下浅埋深综放工作面安全开采控制技术[J]. 煤矿现代化, 2017(5): 12-1.
- 作者简介: 王泽阳(1994-)男, 汉族. 陕西西安人, 硕士研究生学历, 现供职单位为中煤科工集团西安研究院有限公司, 研究实习员, 研究方向为矿山动力灾害防治。