

徐东晶, 窦旋, 李业, 等. 山东矿区矿井导水裂隙带发育高度预测模型研究[J]. 矿业科学学报, 2025, 10(1): 86-94. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024931

XU Dongjing, DOU Xuan, LI Ye, et al. Predictive modeling of the development height of water-conducting fissure zones in mines in Shandong mining area[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2025, 10(1): 86-94. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024931

山东矿区矿井导水裂隙带发育高度预测模型研究

徐东晶¹, 窦旋¹, 李业², 夏志村²

1. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东青岛 266590;

2. 鲁西矿业集团鲁西煤矿, 山东济宁 272000

摘要: 预测导水裂隙带发育高度对煤矿安全开采具有重要意义, 在分析类似采矿条件下导水裂隙带发育规律的基础上, 选取山东矿区相似地质条件下的36组导水裂隙带发育高度实测数据作为研究对象。以煤层采高、煤层采深、工作面斜长和硬岩岩性比例系数作为导水裂隙带预测模型的主控影响因子, 分析其与导水裂隙带发育高度之间的关联性, 并基于回归分析和神经网络算法, 建立多因素高度关联的导水裂隙带发育高度预测模型。将预测模型的预测值同实测数据和“三下”规范预测值对比分析, 结果表明: 与导水裂隙带实测值相比, “三下”规范预测值误差绝对值小于5m的数据占比仅为6%和17%, 而回归分析和神经网络2种预测模型的预测值误差绝对值小于5m的数据占比分别高达83%和89%。2种预测模型的拟合度、稳定性和准确性均优于“三下”规范模型。

关键词: 导水裂隙带发育高度; 山东矿区; 回归分析; 神经网络; 预测模型

中图分类号: TD 324

文献标志码: A

文章编号: 2096-2193(2025)01-0086-09

Predictive modeling of the development height of water-conducting fracture zones in mines in Shandong mining area

XU Dongjing¹, DOU Xuan¹, LI Ye², XIA Zhicun²

1. School of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong 266590, China;

2. Luxi Coal Mine, Luxi Mining Group, Jining Shandong 272000, China

Abstract: Predicting the development height of the hydraulic fracture zone is vital to safe coal mining. This study first analyzed the development patterns of hydraulic fracture zones under similar mining conditions. Taking 36 sets of data measuring the development height of hydraulic fracture zones under similar geological conditions in Shandong mining area as example for analysis, we selected coal seam thickness, mining depth, sloping length of working face, and hard rock lithology ratio coefficient as the main control factors for the prediction model. We analyzed their correlation with the development height of hydraulic fracture zones, and established a multifactorial prediction model with highly-correlated factors via regression analysis and deep learning calculation. Compare and analyze the specification value of the prediction model with the measured data and the “triple down” specification data. Results show that compared with the measured value of hydraulic fracture zones, only 6% and 17% of the “triple

收稿日期: 2024-10-21 修回日期: 2024-12-30

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2022MD101)

作者简介: 徐东晶(1986—), 男, 山东烟台人, 博士, 副教授, 主要从事能源地质灾害防控方面的研究工作。E-mail: xudongjinggg@

126.com

down" specification data exhibit less than 5m of absolute value of the prediction error, while those in the 2 prediction models via regression analysis and deep learning are 83% and 89% respectively. The two prediction models show high curve fit, and their stability and accuracy outperform that of the "triple down" model.

Key words: development height of hydraulic fracture zone; Shandong mining area; regression analysis; neural networks; prediction model

预测导水裂隙带发育高度是防治煤矿顶板突水的关键。目前,我国主要依据《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》^[1](简称“三下”规范)开展顶板导水裂隙带(含垮落带、裂隙带,简称“两带”)高度的预测与防治工作。在矿井实际生产过程中,导水裂隙带预计高度与实测高度存在一定的偏差。因此,精准预测导水裂隙带的发育高度,对于煤矿安全开采至关重要。随着我国采煤技术的不断发展,众多学者对煤层开采导水裂隙带发育高度的预测开展了大量的研究。胡小娟等^[2]在分析导水裂隙带发育高度控制因素的基础上,采用硬岩岩性比例系数表示覆岩岩性,通过回归分析法建立导水裂隙带发育高度与其他控制因素之间的线性统计关系模型并应用于工程实例中,取得了良好的效果。李新旺等^[3]采用3种模拟方法分析煤层开采过程中工作面上覆岩层导水裂隙带发育高度变化规律,发现微震监测结果与现场实测结果最为接近。邬建宏等^[4]基于实测数据建立适用于黄陇煤田的导水裂隙带发育高度预测模型并开展工作面导水裂隙带发育高度预测,其精度能够满足工程实践要求。施龙青等^[5]建立GWO-Elman神经网络煤层底板突水预测模型对红旗煤矿未来2个工作面开展突水预测,其预测结果成功指导矿井实际安全生产。张村等^[6]以上湾煤矿12401工作面为例,采用经验公式、数值模拟与现场实测相结合的方法研究发现,工作面推进过程中导水裂隙带的发育形态随采动程度的变化从“拱形”转变为“马鞍形”。还有文献采用数据分析和数值模拟等方法构建了矿区导水裂隙带高度的回归公式并对其进行了验证,发现回归公式计算结果与数值模拟和现场实测的结果基本吻合^[7-11]。文献[12-13]构建相似模型和数值模型研究覆岩采动裂隙带发育高度规律,发现围岩破坏度指标为2时可以很好地反映采动裂隙带高度的发育特征。谢道雷等^[14]、GUO等^[15]利用相关性分析、回转下沉量等方法得出了计算导水裂隙带发育高度的模型,通过与现场实测数据的对比,验证了所得模型的合理性。ZHANG等^[16-17]以上湾煤矿为例,现场

监测发现,在采矿过程中塌陷带的高度约为采矿高度的5~6倍,裂缝带的高度约为采矿高度的10~11倍。

受地质条件、研究方法等因素的限制,山东矿区导水裂隙带发育高度的预测仍然依靠“三下”规范中提供的经验公式。经验公式法考虑的因素较为单一,且只适用于单层采高1~3m、累计采高不超过15m的厚煤层分层开采等情况。因此,该方法在预测导水裂隙带发育高度时具有一定的局限性。鉴于此,收集山东省(宁汶煤田、兖州煤田、济宁煤田和滕县煤田)多矿区类似地质条件下导水裂隙带发育高度数据,通过分析主控因素与导水裂隙带发育高度的关系,建立导水裂隙带发育高度与多因素之间的预测模型,以期精准预测导水裂隙带发育高度。

1 研究区域概况

山东矿区煤炭资源丰富,具有悠久的开采历史。但其受区域断块构造的影响显著,断裂构造的延展长度及落差大于褶曲的长度和幅度,煤田的形成、赋存和分布都受到块断构造的控制,煤炭资源分布不均,储量呈现西多东少的现象,且大部分资源埋藏较深,覆岩较厚。山东矿区煤田属华北型,为华北晚古生代聚煤盆地演化而来的聚煤盆地构成,与东北、西北煤田等存在一定差异。该地区覆岩结构以中硬结构居多,中硬覆岩条件下裂采比为7.52~22.06^[18]。山东矿区导水裂隙带发育高度较华北西部和北部偏低,较南部略高。因此,山东矿区无论是在成煤环境还是在赋存特征等方面均具有独特性。

2 导水裂隙带发育高度综合预测模型

2.1 导水裂隙带发育高度主控因素

煤层顶板导水裂隙带的形成是一个复杂的力学过程,综合现场调研和前人研究成果^[2],最终确定煤层采高、煤层采深、工作面斜长和硬岩岩性比例系数4个因素,作为导水裂隙带发育高度预测的主要因素。

(1) 煤层采高 M 。 M 主要通过顶板岩体的应

力分布、变形和破裂范围对采空区造成影响。煤层开采使得上覆岩层逐渐失去支撑,进而在煤层顶板形成应力集中区域。随着岩梁跨度的增加,应力集中区的岩梁所受的弯矩逐渐增大,当弯矩超过岩层的极限抗弯强度时,顶板将发生大范围的垮落现象,从而促使导水裂隙带进一步发育。因此, M 是导水裂隙带发育高度的主要控制因素之一。

(2) 煤层采深 s 。由地质力学与岩体力学理论可知,采场顶底板岩层受到的原岩应力会随着 s 的增加而增加。 s 与围岩破坏范围之间存在明显的正相关关系。通常情况下,随着 s 的增加,煤层受到的矿山压力增加,导致采场顶底板岩层破坏程度加剧,导水裂隙带的发育范围扩大。因此, s 可作为导水裂隙带发育高度的主要评价因子。

(3) 工作面斜长 l 。 l 是影响导水裂隙带发育高度的开采空间尺寸指标。根据材料力学理论可知,固定在两端的岩梁的弯曲度与岩梁的跨度成正比。从应力分布角度看,更长的工作面使得上覆岩层应力重新分布的范围变大。因此,裂隙带发育的高度随着煤层 l 的增大而增加。可见, l 是裂隙带发育的主要影响因素。

(4) 硬岩岩性比例系数 b 。 b 是指煤层顶板以上统计高度(导水裂隙带高度)范围内硬岩岩层累计厚度与统计高度的比值。 b 不仅综合反映岩石组合结构的特征性质,还涵盖煤层顶部的单轴抗压性能。通过引入 b ,能够有效解决现有标准在判断顶部岩石构造类型及依据单轴抗压性能判定顶板种类时所面临的困境。 b 的计算^[19]过程如下:

$$b = \frac{\sum h}{(15 \sim 20)M} \quad (1)$$

式中, $\sum h$ 为估算导水裂隙带发育高度范围内硬岩岩层的累计厚度,m。

收集山东省(宁汶煤田、兖州煤田、济宁煤田和滕县煤田)36例导水裂隙带发育高度实测数据,将 M 、 s 、 l 和导水裂隙带发育高度制作成箱线图如图1~4所示,以便更直观地观察各数据间的关系。由图1~4可知:收集到的 M 和导水裂隙带发育高度的数据整体比较分散,而 s 和 l 的数据整体比较集中。

2.2 导水裂隙带发育高度多元回归预测

回归分析法是一门研究数据观测值之间数学相关性的方法。该方法是利用自变量的变化解释因变量的变化,并建立一个相关性较好的回归方程

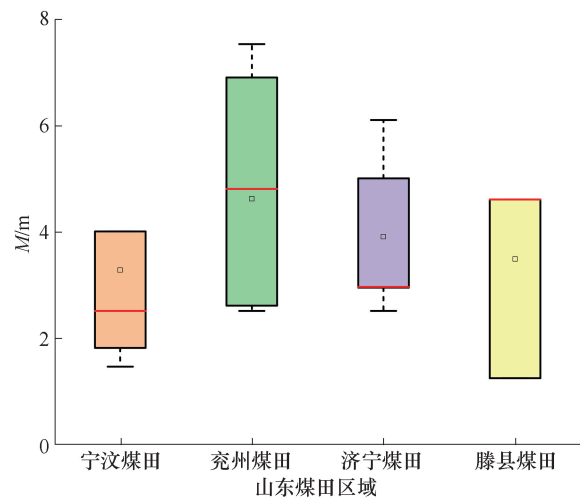


图1 煤层采高箱线图

Fig. 1 Box line diagram of coal seam thickness

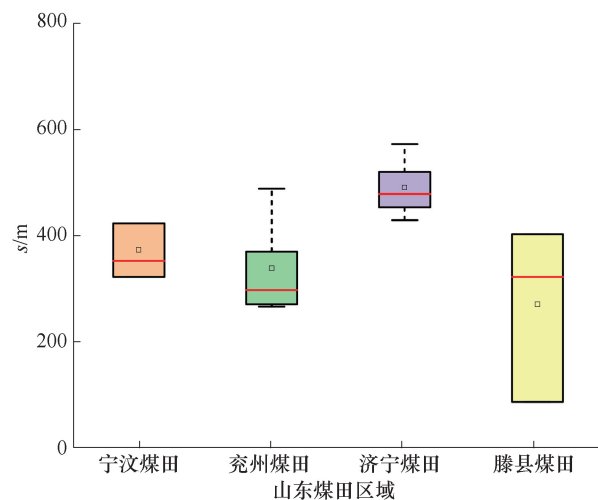


图2 煤层采深箱线图

Fig. 2 Box line diagram of mining depth

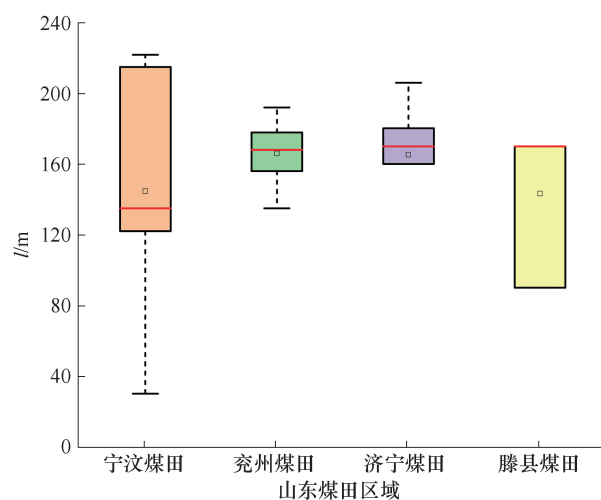


图3 工作面斜长箱线图

Fig. 3 Box line diagram of sloping length of working face

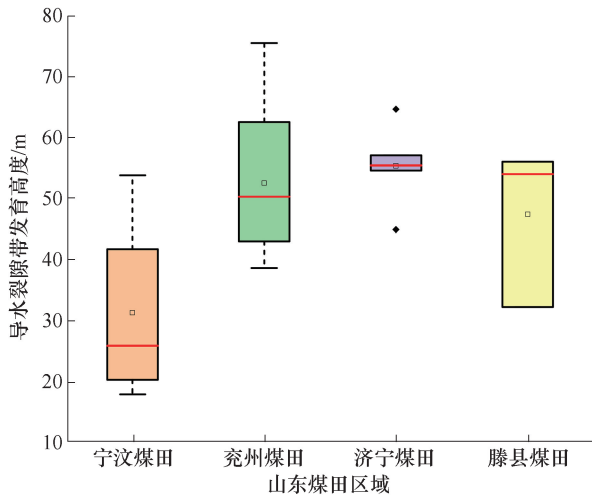


图 4 导水裂隙带发育高度箱线图

Fig. 4 Box line diagram of the development height of hydraulic fracture zones

(函数表达式),再将其用于预测因变量未来的变化^[20]。多元回归分析预测探究的是 2 个或多个不同自变量与 1 个因变量之间的关系,从而建立预测模型。当自变量和因变量间出现线性关系时,则称为多元线性回归分析。由于许多非线性回归都可以化为多元线性回归,因而可以用线性回归方法解决非线性回归预测问题^[21]。

多元线性回归分析多被用于分析 n 个自变量和因变量之间的关系,其基本模型为

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \quad (2)$$

式中, β_0 为回归常数; β_1, \dots, β_n 为回归系数; 自变量 x_1, x_2, \dots, x_n 和因变量 y 均为已知参数。

用最小二乘法求回归系数 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$, 过程如下

$$f(x_i) = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 = \min(\sum (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_{1i} - \beta_2 x_{2i} - \dots - \beta_n x_{ni})^2) = \min \quad (3)$$

为求回归系数,对 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 进行求导,并令一阶导数为 0, 可得

$$\begin{cases} L_{11}\beta_1 + L_{12}\beta_2 + \dots + L_{1n}\beta_n = L_{1y} \\ L_{21}\beta_1 + L_{22}\beta_2 + \dots + L_{2n}\beta_n = L_{2y} \\ \vdots \\ L_{n1}\beta_1 + L_{n2}\beta_2 + \dots + L_{nn}\beta_n = L_{ny} \end{cases} \quad (4)$$

$$L_{ij} = L_{ji} = \sum (x_{ij} - \bar{x}_i)(x_{ij} - \bar{x}_j) \quad (5)$$

$$L_{iy} = \sum (x_{ij} - \bar{x}_i)(y_i - \bar{y}_i) \quad (6)$$

由于 $L_{i1}, L_{i2}, \dots, L_{in}, L_{iy} (i=1, 2, \dots, n)$ 已知, 即 $x_{ij}, y_i, \bar{x}_i, \bar{x}_j, \bar{y}_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为已知, 可用行列式法或消去法解算出 β_1, \dots, β_n , 进而解出 β_0 。

选取具有代表性的数据, 利用多因素非线性统计方法, 探究导水裂隙带发育高度与各单因子之间的曲线回归分析。

M 对导水裂隙带发育高度的影响是直观的, 随着开采高度的增加, 导水裂隙带发育高度呈现出明显的增长趋势。开采高度越大表明被移除的岩石越多, 进而导致顶板岩层的支撑结构被破坏的程度越大。这种破坏作用导致顶板岩层中的应力重新分布, 促使导水裂隙带的形成和扩展。通过分析发现, 在其他影响因素相近的情况下, 现煤层采高与导水裂隙带发育高度呈正相关关系。 M 线性拟合曲线如图 5 所示。

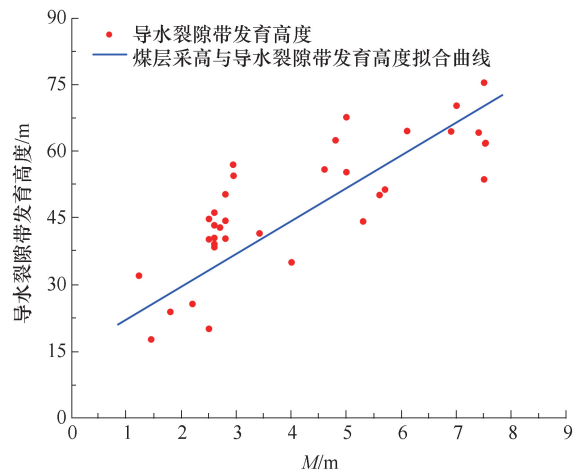


图 5 煤层采厚线性拟合曲线

Fig. 5 Linear fit for coal seam thickness

采深是影响导水裂隙带发育的重要因素, 导水裂隙带的发育高度随着 s 的增加而增大。当 s 超过阈值时, 水平应力增加使得采动裂隙闭合, 导水裂隙带的高度基本上不再出现显著变化。因此, 可以采用对数函数描述导水裂隙带发育高度与 s 之间的关系。 s 线性拟合曲线如图 6 所示。

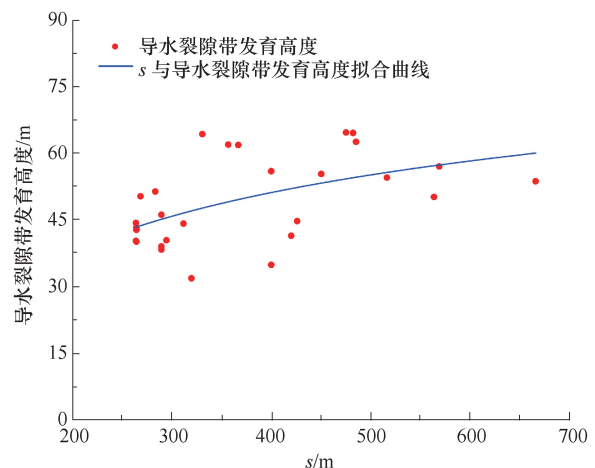


图 6 煤层采深线性拟合曲线

Fig. 6 Linear fit for mining depth

在煤层未充分采动的情况下,导水裂隙带发育高度和斜长成正比关系;在充分采动的情况下,随着 l 的增加,顶板岩梁的应力分布与变形特征发生显著变化,导致岩梁结构发生更为剧烈的破坏,使得导水裂隙带的高度值呈现上升趋势。因此,采用指数函数描述导水裂隙带发育高度与 l 之间的关系。 l 线性拟合曲线如图 7 所示。

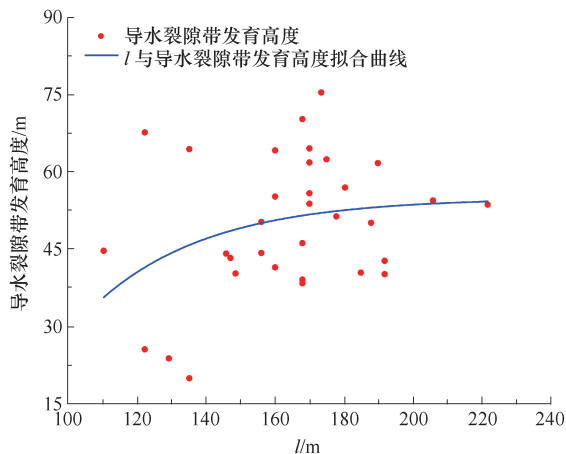


图 7 工作面斜长线性拟合曲线

Fig. 7 Linear fit for sloping length of working face

在 M 条件相近的条件下,综合分析不同矿区 b 与导水裂隙带发育高度的统计数据,发现 b 与导水裂隙带发育高度之间呈现正相关关系。 b 线性拟合曲线图如 8 所示。

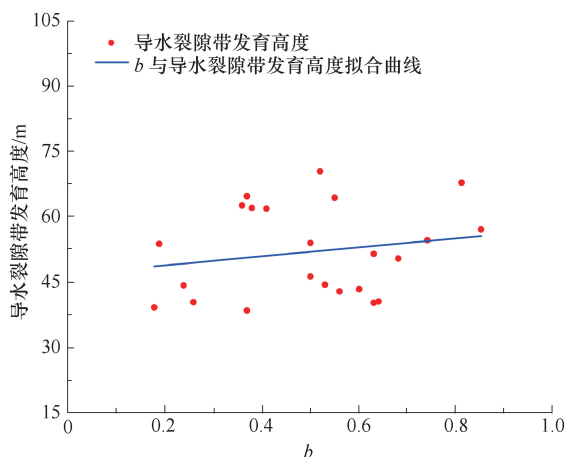


图 8 硬岩比例系数线性拟合曲线

Fig. 8 Linear fit for hard rock lithology ratio coefficient

分析导水裂隙带发育高度与各影响指标之间的关系式,构建考虑 M 、 s 、 l 、 b 这 4 个因素下的导水裂隙带发育高度拟合回归经验公式如下:

$$H = 3.326M + 19.175b - 0.28\log l + 16.516\ln s - 69.624 \quad (7)$$

2.3 导水裂隙高度卷积神经网络预测

卷积神经网络是一种具有局部连接、权重共享等特点的深度前馈神经网络^[22]。卷积神经网络要

求每个节点只与低一层的部分节点连接,同一卷积层不同位置节点的权重系数共享。局部连接和权重共享特点使得卷积神经网络与其他全连接神经网络相比,系数明显减少,运算效率大大提高。在使用样本数据对模型进行训练完成以后,需要指标对训练结果进行评估,由于本文探讨的是回归预测问题,所以拟采用均方根误差(RMSE)对此预测模型进行评价。其公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (r_i - p_i)^2}{n}} \quad (8)$$

式中, r_i 为第 i 个样本的实测值; p_i 为卷积神经网络模型对第 i 个样本的预测值; n 为样本的总体数量。

卷积神经网络训练过程如图 9 所示。卷积神经网络模型通过监督学习训练样本数据,训练过程包括前向传播和反向传播 2 个阶段。在训练开始前,首先,确定网络结构并设置初始参数,将样本数据输入模型,进行前向传播;然后,模型学习训练样本中导水裂隙带高度预测值与真实值进行对比,得到均方根误差,进行反向传播;最后,使用优化算法更新权重矩阵,以减少模型误差。整个卷积神经网络训练过程中,需要根据实际情况调整训练的次数^[23]。

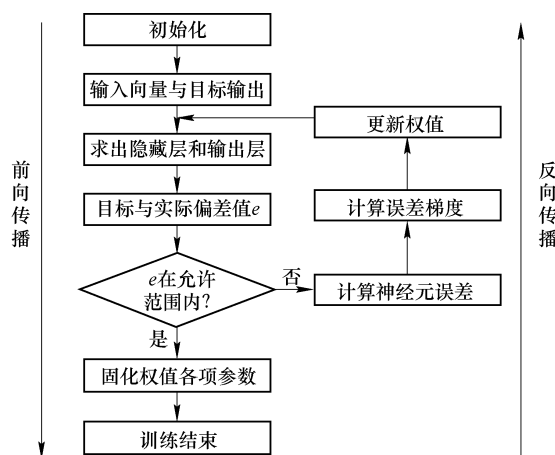


图 9 卷积神经网络训练过程

Fig. 9 Convolutional neural network training

神经网络结构如图 10 所示。第 1 层为图像输入层,负责将样本数据传入模型中,考虑到模型的大小,将输入层尺寸定为 $4 \times 1 \times 1$ 。第 2 层和第 5 层为卷积层,深度分别为 16 和 32。卷积核(kernel)大小为 3×1 ,移动步长为 1。每个卷积层后连接 1 个 BN 层,进行批量归一化工作。BN 层后跟 ReLU 激活层,可以有效解决因反向传播涉及求导和除法操作增加的计算复杂度,显著降低计算量。第 8 层为 Dropout 层,将 Dropout 设置为 0.2,可有效避免

过拟合现象。第 9 层为全连接层,层用于执行分类任务。第 10 层为回归层,用于表明是在研究回归问题^[24]。

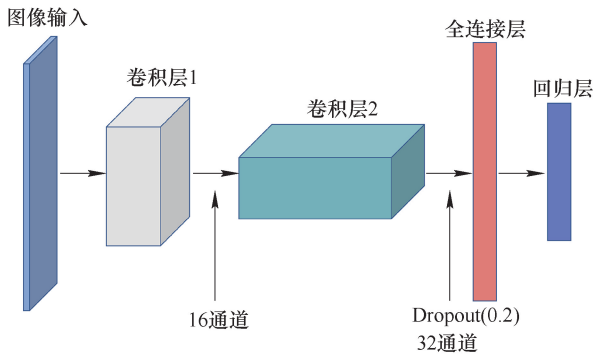


图 10 神经网络结构

Fig. 10 Neural network structure

以 M, s, l, b 作为输入样本,导水裂隙带发育高度作为输出样本,构建神经网络模型。在训练过程中,设置迭代次数为 8 000 次,学习率为 0.000 5,学习率下降因子为 0.8。预测结果如图 11 所示。由图 11 可知,经过训练,该模型在预测上表现良好, RMSE 为 2.319 9。

3 导水裂隙带发育高度预测结果对比

对比分析回归经验公式、卷积神经网络模型和“三下”规范中经验公式(表 1)的预测值与实测导水裂隙带发育高度之间的误差(表 2),选取部分误差数据绘制 2 种规范公式、拟合回归经验公式、卷积神经网络和实测结果之间的拟合曲线(图 12~13)。

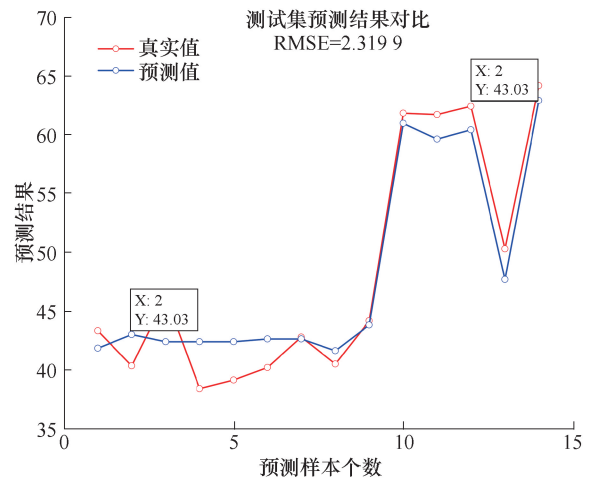


图 11 预测结果

Fig. 11 Predicted results

表 1 导水裂隙带发育高度“三下”经验公式^[1]

Table 1 Empirical equations for the development height of conductive fracture zones in “triple downs”^[1]

岩性	计算公式一/m	计算公式二/m
坚硬	$H = \frac{100 \sum M}{1.2 \sum M + 2.0} \pm 8.9$	$H = 30\sqrt{\sum M} + 10$
中硬	$H = \frac{100 \sum M}{1.6 \sum M + 3.6} \pm 5.6$	$H = 20\sqrt{\sum M} + 10$
软弱	$H = \frac{100 \sum M}{3.1 \sum M + 5.0} \pm 4.0$	$H = 10\sqrt{\sum M} + 10$
极软弱	$H = \frac{100 \sum M}{5.0 \sum M + 8.0} \pm 3.0$	

表 2 导水裂隙带发育高度预测与实测误差对比

Table 2 Comparison between predicted and measured errors in the height of conductive fracture zone

矿区	导水裂隙带发育高度实测值/m	“三下”规范(1)		“三下”规范(2)		拟合回归经验公式		卷积神经网络	
		预测值/m	相对误差/%	预测值/m	相对误差/%	预测值/m	相对误差/%	预测值/m	相对误差/%
兴隆庄矿	43.34	23.91	44.83	26.12	39.73	42.08	2.91	41.86	3.41
兴隆庄矿	40.35	24.47	39.36	26.73	33.75	36.19	10.31	43.03	6.64
兴隆庄矿	46.22	23.91	48.27	26.12	43.49	41.63	9.93	42.41	8.24
兴隆庄矿	38.41	23.91	37.75	26.12	32.00	39.14	1.90	42.41	10.41
兴隆庄矿	39.14	23.91	38.91	26.12	33.27	35.50	9.30	42.40	8.33
兴隆庄矿	40.21	23.61	41.28	25.81	35.81	42.29	5.17	42.65	6.07
兴隆庄矿	42.81	24.19	43.49	26.43	38.26	41.61	2.80	42.65	0.37
兴隆庄矿	40.50	23.91	40.96	26.12	35.51	44.59	10.10	41.63	2.79
兴隆庄矿	44.20	28.73	35.00	33.02	25.29	46.85	6.00	43.83	0.84
鲍店矿	61.90	53.72	13.21	64.88	4.81	59.16	4.43	61.04	1.39
鲍店矿	61.77	53.71	13.05	64.85	4.99	60.14	2.64	59.70	3.35
南屯矿	62.50	48.15	22.96	53.82	13.89	54.75	12.40	60.50	3.20
兴隆庄矿	50.34	40.25	20.04	43.47	13.65	44.52	11.56	47.71	5.22
兴隆庄矿	64.25	53.53	16.68	64.41	0.25	60.75	5.45	62.99	1.96
兴隆庄矿	51.40	50.41	1.930	57.75	12.35	54.08	5.21	42.10	18.09
济三矿	64.60	51.26	20.65	59.40	8.05	58.93	8.78	60.28	6.69
济二矿	57.00	41.00	28.07	44.29	22.30	60.58	6.28	66.64	16.91
济二矿	54.50	41.06	24.66	44.35	18.62	56.89	4.39	58.97	8.20

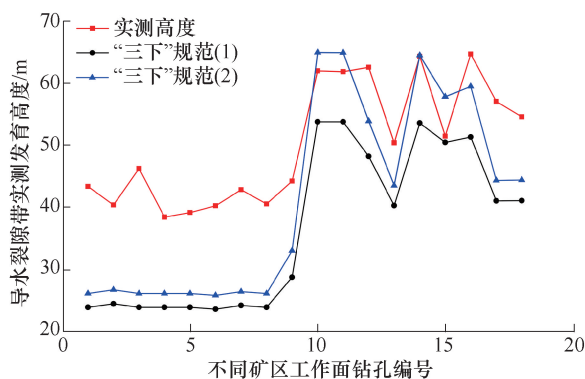


图12 “三下”规范误差折线

Fig. 12 Line graph of “triple down” specification error

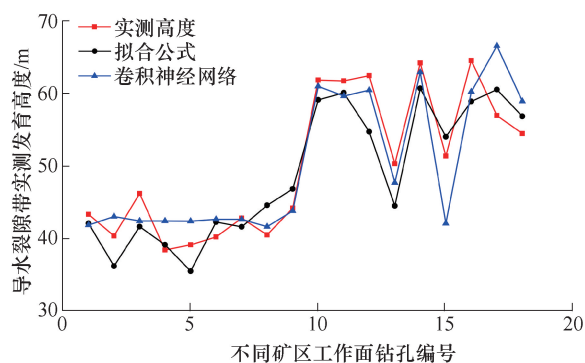


图13 拟合误差折线

Fig. 13 Line graph of fitting error

由表2可以看出,“三下”规范(1)和规范(2)的预测值与实测值相比,误差较大,最小误差分别为0.99 m和-6.35 m,最大误差分别为22.31 m和20.1 m,且误差绝对值小于5 m的占比为6%和17%,误差绝对值大于10 m的占比分别为83%和60%;拟合回归经验公式及卷积神经网络预测误差较小,其最小误差分别为-0.73 m和0.16 m,最大误差分别为7.75 m和9.3 m,误差绝对值小于5 m的占比分别为83%和89%,误差绝对值大于10 m的数据为0。误差对比结果如图14所示,2种预测模型曲线与实测曲线更加吻合。这表明所建立的卷积神经网络预测模型与多元非线性回归模型的预测效果较好,可为山东省矿井的导水裂隙发育高度的预测提供依据。

4 结论

(1) 采用回归分析法分析煤层采高、煤层采深、工作面斜长和硬岩岩性比例系数之间的线性关系,得出导水裂隙带发育高度与采高、硬岩岩性比例系数呈线性关系,与工作面斜长、采深呈对数函数关系。

(2) 对比分析预测模型的预测值与“三下”规

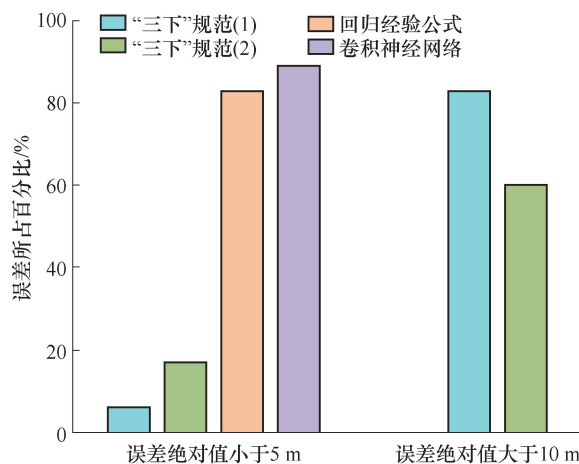


图14 误差对比

Fig. 14 Error comparison chart

范预测值和实测数据,表明卷积神经网络预测模型与多元非线性回归模型的预测准确性较高、稳定性较好,可为相似地质条件下导水裂隙带发育高度预测和防治水工作提供一定的指导。

(3) 分区研究可有效避免因地质条件差异导致的预测精度低、适用性差和防治不当等问题,为提高山东矿区导水裂隙带发育高度预测精度,在以后的研究中应打破数据源影响因素较少的禁锢,进一步考虑煤层倾角、开采方式及工作面推进速度等因素的控制作用。

参考文献

- [1] 国家煤矿安监局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017, 56.
State Administration of Coal Mine Safety. Specification for coal pillar design and coal mining in buildings, water bodies, railways and main shafts and lanes [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2017.
- [2] 胡小娟, 李文平, 曹丁涛, 等. 综采导水裂隙带多因素影响指标研究与高度预计[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 613-620.
HU Xiaojuan, LI Wenping, CAO Dingtao, et al. Index of multiple factors and expected height of fully mechanized water flowing fractured zone [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4): 613-620.
- [3] 李新旺, 王汉青, 代卫林, 等. 大埋深厚煤层开采导水裂隙带发育高度综合确定[J]. 煤炭技术, 2023, 42(1): 110-114.
LI Xinwang, WANG Hanqing, DAI Weilin, et al. Comprehensive determination of water-conducting fracture zone development height of thick coal seam mining in

- deep mine[J]. *Coal Technology*, 2023, 42(1): 110-114.
- [4] 郭建宏,潘俊锋,高家明,等. 黄陇侏罗纪煤田导水裂隙带高度预测研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(S1): 231-241.
- WU Jianhong, PAN Junfeng, GAO Jiaming, et al. Study on height prediction of water-conducting fracture zone in Huanglong Jurassic coalfield [J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(S1): 231-241.
- [5] 施龙青,张荣遨,徐东晶,等. 基于GWO-Elman神经网络的底板突水预测[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(7): 2455-2463.
- SHI Longqing, ZHANG Rongao, XU Dongjing, et al. Prediction of water inrush from floor based on GWO-Elman neural network [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(7): 2455-2463.
- [6] 张村,任赵鹏,韩鹏华,等. 西部矿区厚基岩特大高采高工作面导水裂隙带发育特征[J]. *矿业科学学报*, 2022, 7(3): 333-343.
- ZHANG Cun, REN Zhaopeng, HAN Penghua, et al. Characteristic of the water-conducting fracture zone development in thick overburden working face with extra-large mining height in western mining area[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 7(3): 333-343.
- [7] 盛奉天,段玉清. 彬长矿区巨厚砂岩含水层下综放开采导水裂隙带高度研究[J]. *煤炭工程*, 2022, 54(3): 84-89.
- SHENG Fengtian, DUAN Yuqing. Height of water-conducting fracture zone in fully mechanized caving mining under extra-thick sandstone aquifer in Binchang mining area[J]. *Coal Engineering*, 2022, 54(3): 84-89.
- [8] 刘成勇,宋伟,盛奉天,等. 强含水层下特厚煤层综放开采导水裂隙带发育高度[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2024, 6(2): 114-124.
- LIU Chengyong, SONG Wei, SHENG Fengtian, et al. Development height of water-conducting fracture zone in fully-mechanized caving of extra-thick coal seam under strong aquifer[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2024, 6(2): 114-124.
- [9] 寻博辉,吕义清,姚星. 导水裂隙带发育高度预测模型对比研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(3): 190-200.
- XUN Bohui, LÜ Yiqing, YAO Xing. Comparison of prediction models for the development height of water-conducting fractured zone[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(3): 190-200.
- [10] 杜君武,董振波. 雅店煤矿4号煤层开采导水裂隙带高度研究[J]. *矿业安全与环保*, 2018, 45(5): 78-82, 86.
- DU Junwu, DONG Zhenbo. Research on the height of water flowing fractured zone in No. 4 coal seam of yadi-an coal mine[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2018, 45(5): 78-82, 86.
- [11] 王创业,薛瑞雄,朱振龙. 不同采高和关键层对导水裂隙带发育的影响[J]. *煤矿安全*, 2016, 47(3): 169-171.
- WANG Chuangye, XUE Ruixiong, ZHU Zhenlong. Influence of different mining height and key stratum on development of water flowing fracture zone[J]. *Safety in Coal Mines*, 2016, 47(3): 169-171.
- [12] 郝宪杰,孙卓文,赵毅鑫,等. 神东保德浅埋煤层覆岩裂隙带高度数值指标判别阈值及采高效应[J]. *矿业科学学报*, 2021, 6(4): 472-479.
- HAO Xianjie, SUN Zhuowen, ZHAO Yixin, et al. Threshold value of numerical index and mining height effect of overburden fracture zone height in Shendong Baode shallow coal seam[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 6(4): 472-479.
- [13] 张彬,许延春,李江华,等. 软弱覆岩分层综放开采工作面“两带”发育高度研究[J]. *矿业科学学报*, 2019, 4(6): 515-523.
- ZHANG Bin, XU Yanchun, LI Jianghua, et al. Research on the “two-zone” heights of soft stratum working face with slicing full-mechanized caving mining [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2019, 4(6): 515-523.
- [14] 谢道雷,江兴洪,韩承豪,等. 基于回转下沉量的导水裂隙带发育高度预测[J]. *煤矿安全*, 2024, 55(6): 176-183.
- XIE Daolei, JIANG Xinghong, HAN Chenghao, et al. Prediction of development height of water-conducting fracture zone based on rotational subsidence[J]. *Safety in Coal Mines*, 2024, 55(6): 176-183.
- [15] GUO W B, ZHAO G B, LOU G Z, et al. A new method of predicting the height of the fractured water-conducting zone due to high-intensity longwall coal mining in China[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(8): 2789-2802.
- [16] ZHANG D S, FAN G W, MA L Q, et al. Aquifer protection during longwall mining of shallow coal seams: a case study in the Shendong Coalfield of China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2011, 86(2/3): 190-196.
- [17] ZHANG D S, FAN G W, LIU Y D, et al. Field trials of aquifer protection in longwall mining of shallow coal seams in China[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(6): 908-914.

- [18] 张玉军,申晨辉,张志巍,等. 我国厚及特厚煤层高强度开采导水裂缝带发育高度区域分布规律[J]. 煤炭科学技术,2022,50(5): 38-48.
ZHANG Yujun, SHEN Chenhui, ZHANG Zhiwei, et al. Regional distribution law of water-conducting fractured zone height in high-strength mining of thick and extra-thick coal seams in China[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(5): 38-48.
- [19] 曹丁涛,李文平. 煤矿导水裂隙带高度计算方法研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(1): 63-69.
CAO Dingtao, LI Wenping. Estimation method for height of fractured zone with water flow in coal mining area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(1): 63-69.
- [20] 何晓群,刘义卿. 应用回归分析[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2001, 6.
HE Xiaqun, LIU Yiqing. Applied regression analysis [M]. Beijing: China Renmin University Press, 2001.
- [21] 徐群. 非线性回归分析的方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
XU Qun. Research on the method of nonlinear regression analysis[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009.
- [22] 李长春,郑春,黄晓林,等. 智慧工地安防系统研发及运用[J]. 智能建筑与智慧城市, 2022(5): 147-149.
LI Changchun, ZHENG Chun, HUANG Xiaolin, et al. Development and application of smart site security system[J]. Intelligent Building & Smart City, 2022(5): 147-149.
- [23] 陈建平,王春雷,王雪冬. 基于CNN神经网络的煤层底板突水预测[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(1): 50-57.
CHEN Jianping, WANG Chunlei, WANG Xuedong. Coal mine floor water inrush prediction based on CNN neural network[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(1): 50-57.
- [24] ZHAI P H, LI N Z. Predicting the height of the hydraulic fracture zone using a convolutional neural network [J]. Mine Water and the Environment, 2023, 42(3): 500-512.

(责任编辑:陈骏)