

文章编号: 1671-251X(2024)01-0009-08

DOI: [10.13272/j.issn.1671-251x.2023060044](https://doi.org/10.13272/j.issn.1671-251x.2023060044)

基于截割顶底板高度预测模型的采煤机自动调高技术

李重重， 刘清

(北京天玛智控科技股份有限公司, 北京 101399)

摘要: 传统的煤层截割路径规划通过几何控制、规划计算等方式对采煤机滚筒高度进行预测, 但存在预测的数据误差较大、无法适应地质条件变化的问题。针对上述问题, 提出了一种基于截割顶底板高度预测模型的采煤机自动调高技术。首先, 分析了影响截割顶底板高度的因素, 指出影响顶底板高度的主要因素包括煤层的起伏变化数据、历史截割数据、刮板输送机的高程数据及人工操作记录, 将上述 4 类数据融合处理, 建立以长短期记忆 (LSTM) 模型和灰色马尔可夫模型为基础的截割顶底板高度预测模型, 通过算法模型预测出截割顶底板的高度。然后, 以截割顶底板的高度数据为基础, 结合采煤机位姿和空间坐标, 建立计算滚筒高度的几何模型, 同时依据刮板输送机上窜下滑量及是否执行加减刀工艺等因素进行修正, 最终将顶底板高度序列转换为滚筒高度序列, 即将截割顶底板高度转换为采煤机滚筒的目标高度, 由采煤机执行到目标高度, 实现滚筒自动调高工业性试验结果表明: ① 在自动调高技术的控制下, 顶滚筒和底滚筒的预测高度与实际高度偏差值有 90% 的数据量均在 10 cm 以内, 滚筒的预测高度和实际高度具有明显的一致性。② 与传统手动控制方式相比, 中部截割一刀煤的人工干预调高次数由 49 次下降为 21 次, 说明截割顶底板的高度预测模型和计算滚筒高度的几何模型是准确合理的, 采煤机滚筒的自动调高技术是可行的。

关键词: 采煤机；滚筒自动调高；截割顶底板高度预测；长短期记忆；灰色马尔可夫；采煤机位姿；人工干预

中图分类号: TD632.1

文献标志码: A

Automatic height adjustment technology of shearer based on cutting roof and floor height prediction model

LI Zhongzhong, LIU Qing

(CCTEG Beijing Tianma Intelligent Control Technology Co., Ltd., Beijing 101399, China)

Abstract: The traditional coal seam cutting path planning predicts the height of the drum through geometric control, planning calculation, and other methods. But there are problems with large data errors in planning and prediction and inability to adapt to changes in geological conditions. In order to solve the above problems, a shearer automatic height adjustment technology based on a cutting roof and floor height prediction model is proposed. Firstly, the factors affecting the height of the cutting roof and floor are analyzed. It is pointed out that the main factors affecting the height of the cutting roof and floor include the fluctuation data of the coal seam, historical cutting data, elevation data of the scraper conveyor, and manual operation records. The above four types of data are fused and processed to establish a cutting roof and floor height prediction algorithm model based on long short term memory (LSTM) model and gray Markov model. The height of the cutting roof and floor is predicted through an algorithmic model. Secondly, based on the height data of the cutting roof and floor, combined with the position and posture and spatial coordinates of the shearer, a geometric model for calculating

收稿日期: 2023-06-13; 修回日期: 2024-01-15; 责任编辑: 王晖, 郑海霞。

基金项目: 山东省重大科技创新工程项目(2020CXGC011501)。

作者简介: 李重重(1986—), 男, 河北石家庄人, 助理研究员, 主要从事综采自动化软件设计、智能化无人开采等方面研究工作,

E-mail: lzzlzhong@163.com。

引用格式: 李重重, 刘清. 基于截割顶底板高度预测模型的采煤机自动调高技术[J]. 工矿自动化, 2024, 50(1): 9-16.

LI Zhongzhong, LIU Qing. Automatic height adjustment technology of shearer based on cutting roof and floor height prediction model[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(1): 9-16.



扫码移动阅读

the height of the drum is established. At the same time, correction is made according to factors such as the sliding amount of the scraper conveyor and whether the addition and subtraction process is carried out. Finally, the height sequence of the roof and floor is converted into a drum height sequence. The cutting roof and floor height is converted into the target height of the shearer drum, which is executed by the shearer to the target height, achieving automatic adjustment of the drum height. The industrial test results show the following points. ① Under the control of automatic height adjustment technology, 90% of the predicted height deviation values of the roof and floor drums are within 10 cm of the actual height. The predicted height of the drums is significantly consistent with the actual height. ② Compared with traditional manual control methods, the number of manual intervention height adjustment times for cutting coal in the middle has decreased from 49 to 21. It indicates that the height prediction model for cutting the roof and floor and the geometric model for calculating the height of the drum are accurate and reasonable, and the automatic height adjustment technology for the shearer drum is feasible.

Key words: shearer; automatic height adjustment of the drum; prediction of cutting roof and floor height; long short-term memory; gray Markov; position and posture of the shearer; manual intervention

0 引言

井下开采环境复杂^[1-2], 传统煤矿开采方式效率低, 以智能生产装备为基础的智能化开采成为实现煤矿高效绿色开采的关键途径^[3-5]。采煤机作为工作面的核心装备, 其智能自适应的程度代表了智能化开采的水平, 也成为实现智能化开采的关键因素^[6-8]。

提升采煤机的智能自适应性需实现开采过程与围岩空间动态变化的适应性控制^[9], 即提升采煤机跟随煤层截割开采的适应能力。通过对截割顶底板线进行预测, 超前规划采煤机的滚筒高度, 使其在生产推进中能跟随煤层起伏变化而自动调高, 是实现采煤机智能自适应截割的关键, 也是综采工作面智能化开采的必要基础保障。

针对采煤机滚筒智能化调高功能的需求, 诸多学者在煤岩识别^[10-13]、透明地质^[14-18]、割煤路径规划^[19-21]等方面开展了大量研究。在煤岩识别方面, 通过分析各类截割信号, 构建计算煤层厚度的理论模型或识别煤岩的算法模型, 为煤岩分界线的判定提供了理论依据, 但煤岩识别的技术理论成果尚未转化为可进行工程实施的成熟的煤岩分界传感器或产品, 此外采煤机不能简单按照煤岩分界线进行截割, 还需考虑工作面平直度等工程质量要求。在透明地质方面, 有学者提出了利用地质探测技术构建三维地质模型并对模型进行动态修正的若干思路和方法, 为基于地质模型实现采煤机滚筒高度控制提供了理论支撑, 但目前地质探测技术的精度多为米级或亚米级, 而井下煤层截割的精度要求已达厘米级, 地质模型精度不能满足对滚筒精准控制的要求, 单纯依靠地质模型无法实现对滚筒高度的精确预测。传统的割煤路径规划通过几何控制、规划计算

等方式对滚筒高度进行预测, 但存在预测的数据误差较大、无法适应地质条件变化的问题。

针对采煤机滚筒高度自动控制功能方面的研究现状和面临的问题, 本文提出了一种采煤机自动调高技术, 建立了截割顶底板高度预测模型, 结合采煤机位姿将截割顶底板高度计算转换为滚筒高度计算, 采煤机依据预测的滚筒高度进行调高, 达到自动调高的目的, 经过工业性试验验证了该技术的准确性和可行性。

1 自动调高方案

采煤机每完成一刀截割, 工作面会产生一条顶板线和底板线, 下一刀的顶板线和底板线即是采煤机滚筒截割的目标位置, 因此顶底板高度的准确预测是采煤机滚筒能够自动调高的前提。

影响顶底板高度的主要因素包括煤层的起伏变化、历史截割数据、刮板输送机的高程数据及人工操作记录。煤层的起伏变化直接影响顶底板高度的变化趋势。历史截割数据代表了近期顶底板的截割高度, 为满足连续推进的需要, 未来顶底板的高度需与近期高度保持平稳, 落差不能过大。刮板输送机的高程数据可精确反映底板的起伏落差, 是未来底板高度的直接参考依据。人工操作记录代表开采经验和工程质量的约束, 人工的操作习惯也会影响顶底板高度的调整量。

采煤机滚筒自动调高方案如图 1 所示。将煤层地质、历史截割、刮板输送机高程、人工操作记录这 4 类数据作为样本, 建立以截割顶底板高度为预测目标的多维数据模型, 利用长短期记忆(Long Short-Term Memory, LSTM)和灰色马尔可夫 2 种机器学习算法预测出工作面截割的顶底板高度。结合采煤机

的各类位姿数据,建立计算采煤机滚筒高度的几何模型,同时依据刮板输送机上窜下滑量及是否执行加减刀工艺等因素进行修正,最终将顶底板高度序列转换为滚筒高度序列,即将截割顶底板高度转换为采煤机滚筒的目标高度,由采煤机执行到目标高度,实现滚筒自动调高。

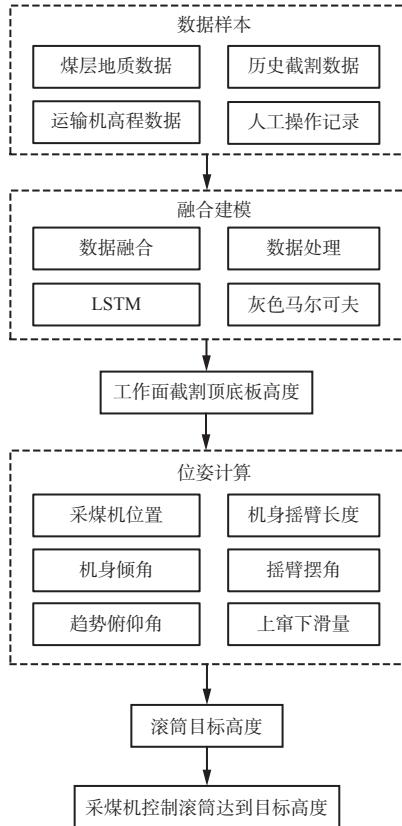


图1 采煤机滚筒自动调高方案

Fig. 1 Automatic height adjustment scheme of shearer drum

2 截割顶底板高度预测算法

为准确预测截割顶底板的高度,提出一种基于LSTM模型和灰色马尔可夫模型的预测算法。

2.1 算法流程

截割顶底板高度预测算法包括数据融合、数据处理、预测建模、位置连接4个步骤,如图2所示。

1) 数据融合。影响截割顶底板高度的因素较多,因此需从多个维度采集数据。从综采工作面一小时空尺度下的煤层厚度、起伏变化、截割电流、截割温度、支架高度、滚筒高度、牵引速度、人工干预记录、采煤机位姿、刮板输送机高程等维度采集数据,并以时间作为索引将其整合为时间序列数据。

2) 数据处理。数据处理分为数据清洗和数据拆分2个部分。在数据融合完成后,形成了以顶底板高度为因变量的多维数据集,在实际作业中,网络异常、通信中断等会导致多维数据中出现数据缺失的

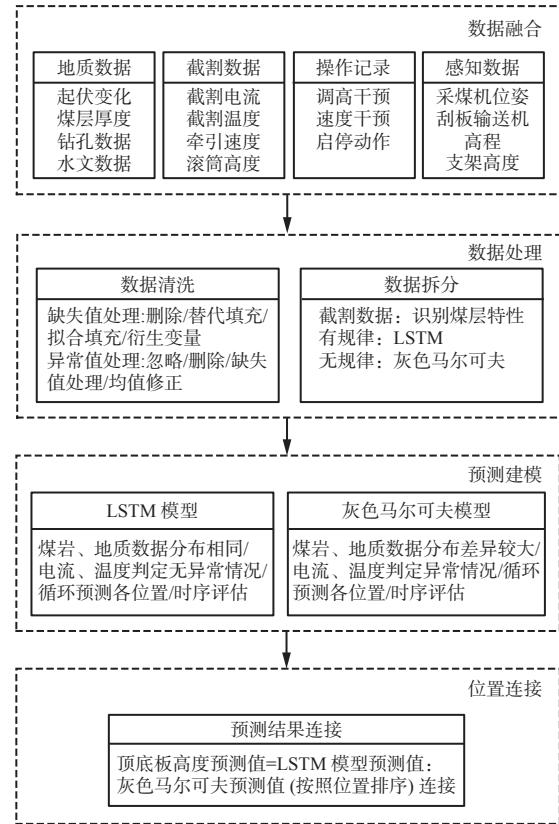


图2 截割顶底板高度预测算法流程

Fig. 2 Algorithm process for predicting the height of the cutting roof and floor

情况,采煤机滚筒触碰到岩层时会出现截割岩石的异常数据,因此需考虑对缺失和异常数据进行清洗处理。对于缺失数据,根据数据缺失的原因和类型,使用不同方法进行处理,如直接删除、替代填充(前值/后值/均值/众数/中位数/插值法等)、拟合填充(回归算法/极大似然估计算法/随机森林算法等)、衍生变量等。对于通过统计分析判别出的异常数据,可将其视为数据的内在表现不予处理,也可根据异常的原因和类型通过直接删除、均值修正或以处理缺失值的方法进行处理。数据清洗完成后进行数据拆分,以采集到的电流、温度数据为依据,定位异常电流、温度数据对应的采煤机位置,按照采煤机位置将顶底板高度数据拆分为2个部分。第1部分为电流、温度有规律数据,即无异常情况对应的采煤机位置的多维数据;第2部分为电流、温度无规律的数据,即出现异常情况时采煤机位置的多维数据。

3) 预测建模。对于拆分后的第1部分数据,采用LSTM模型完成预测建模,设置自变量为按照时间升序的历史顶底板高度,预测步长为1,即预测下一刀顶底板高度数据。对于拆分后的第2部分数据,采用灰色马尔可夫模型完成预测建模,设置自变量为上一时刻的顶底板高度数据,预测步长同样设

置为 1。

4) 位置连接。将 LSTM 时序预测出来的各个位置的数据及灰色马尔可夫预测出来的各个位置的数据进行合并, 将 2 个模型得到的下一刀顶底板高度数据进行连接, 完成对下一刀顶底板高度的预测。

2.2 预测模型

通过 LSTM 模型和灰色马尔可夫模型预测下一刀各个位置顶底板的高度, 均采用时序数据建立模型。设置顶底板高度为因变量, 预测步长为 1, 在数据记录的过程中, 每隔一段距离(约 0.5 m)设置 1 个记忆点, 在每个记忆点采集并保存 1 次采煤机截割工作数据。

LSTM 模型是对传统循环神经网络的改进, 通过输入门、遗忘门和输出门来控制其历史信息的记忆, 模型的算法原理如图 3 所示, 图中 LSTM 的激活函数包括 \tanh 和 Sigmoid, \tanh 将值规范化到 $-1 \sim 1$, Sigmoid 生成一个 $0 \sim 1$ 的向量, 表示保留或丢弃输入的不同部分。当输入 x_t 进入模型后, 历史记忆状态 C_{t-1} 将会更新为当前记忆状态 C_t , 这个过程经过了遗忘门和输入门 2 步控制。遗忘门决定了保持历史记忆的程度。根据当前输入 x_t 和上一时刻隐藏状态 h_{t-1} 来计算遗忘因子, 即经过 Sigmoid 函数后再乘以历史记忆状态 C_{t-1} , 得到需要保留的历史记忆。输入门决定了如何将当前输入中有用的信息加入到记忆中。 x_t 和 h_{t-1} 经过 Sigmoid 函数后, 经过一些处理, 得到需要添加到记忆中的新信息。通过遗忘门和输入门的协作, LSTM 模型能够在记忆状态中保留有用的历史信息, 并将当前输入中的重要信息整合进来。

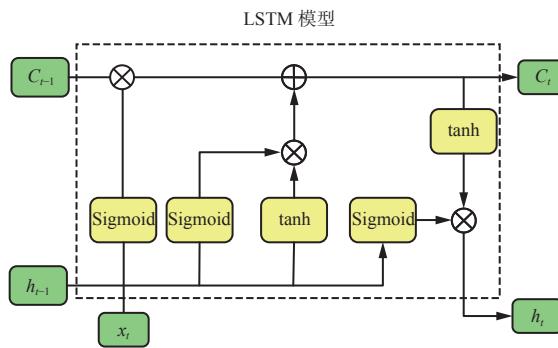


图 3 LSTM 模型的算法原理

Fig. 3 The algorithm principle of LSTM model

LSTM 模型在截割顶底板高度预测中的具体实现步骤如下:

- 1) 模型构建。构建 LSTM 模型, 依据训练样本数据量确定网络层数和隐藏单元数。
- 2) 模型训练。将数据集划分为训练集和测试

集, 使用训练集对 LSTM 模型进行训练。在训练过程中, 可使用反向传播算法和优化器来调整模型的权重和偏置, 使得模型能够更好地拟合数据。

3) 模型预测。使用训练好的 LSTM 模型对测试集进行预测。将历史截割高度和相关特征输入到模型中, 通过前向传播得到预测的截割高度。

4) 模型评估。通过计算预测值与真实值之间的误差指标(平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)或均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)), 来评估模型的预测性能。

LSTM 模型在处理短期和长期依赖关系的问题上更加稳健, 因此适用于数据拆分后的第 1 部分数据, 即有规律、无异常的数据集, 可稳定实现顶底板高度数据的季节性和趋势性预测, 且能够发现顶底板高度内在的规律性, 增加预测的准确性。

灰色预测模型能有效预测少量数据的序列, 但随着数据的增加和波动性的增大, 该模型会逐渐失去优势, 而马尔可夫模型可应用于随机变化的时间序列中, 弥补灰色模型的不足。采用灰色马尔可夫模型, 可提升数据分布无规律或地质、煤岩变化较大情况下的截割顶底板高度的预测精度, 适用于数据拆分后的第 2 部分数据, 即无规律且存在异常的数据集。灰色马尔可夫模型的算法流程如图 4 所示, 该算法集合了灰色模型和马尔可夫模型的优点, 先利用灰色模型对预测的时序趋势进行大致判断, 再用马尔可夫理论对预测结果进行精确调整, 这样可使预测精度大幅度提高。

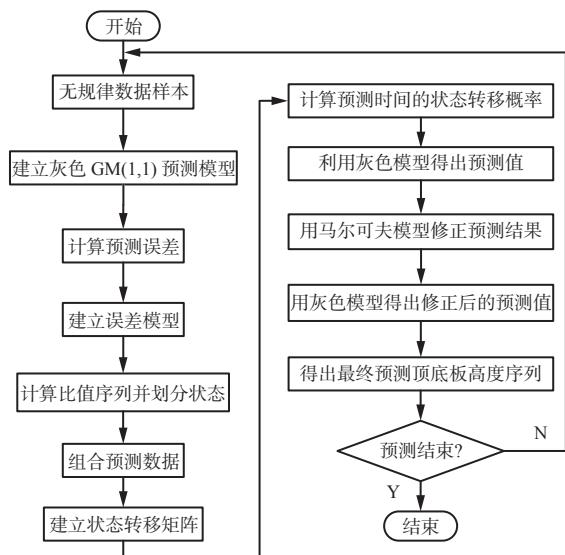


图 4 灰色马尔可夫模型的算法流程

Fig. 4 The algorithm principle gray markov model

1) 灰色建模。对数据样本中的截割顶底板高度序列进行累加运算, 得到累加序列。根据累加序列,

构建一阶线性微分方程模型。通过最小二乘法或其他优化算法估计微分方程的参数。对模型进行残差检验,评估模型拟合度。

2) 模型预测。根据上一步构建的模型,预测下一个时间步的累加序列值。将预测的累加序列值还原为截割顶底板高度序列。

3) 模型评估。通过计算预测值与真实值之间的误差指标来评估模型的预测能力。

2.3 滚筒高度计算

截割顶底板的高度是基于大地坐标标志的,在以煤层构建的三维坐标系中属于绝对高度,采煤机的滚筒高度是基于采煤机机身的相对高度,也是采煤机滚筒调高的目标值。为了实现采煤机滚筒的自动调高,需将截割顶底板的高度通过计算转换为采煤机的滚筒高度。

滚筒高度的计算流程如图5所示。采煤机沿底板牵引行走,行走的里程代表采煤机的位置。滚筒高度是以截割底板的高度为基线,结合采煤机在不同位置处的位姿角度、摇臂角度、机身长度等因素,建立几何模型后计算得出,考虑到工作面整体的上窜下滑量,结合开采工艺对滚筒高度再进行一次修正。

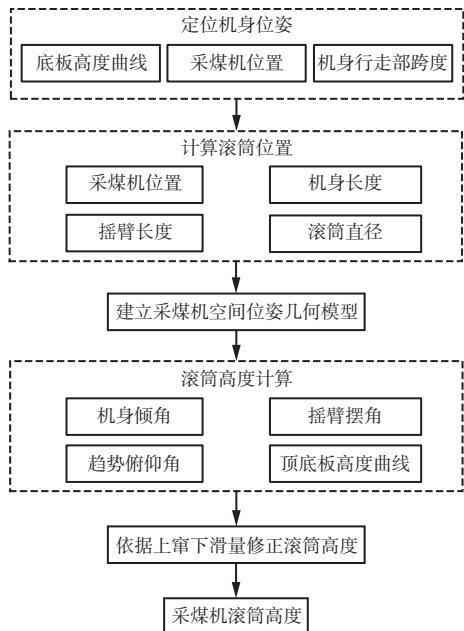


图5 采煤机滚筒高度计算流程
Fig. 5 Calculation process of shearer drum height

采煤机的空间位姿如图6所示,为方便说明滚筒高度几何模型的计算过程,此处将模型稍作简化,以顶板高度 T 、滚筒半径 R 、2个滚筒位置的底板高度 H_1 和 H_4 、2个滑靴位置的底板高度 H_2 和 H_3 、机身高度 K 、倾角 α 、摇臂长度 L 作为空间几何模型参量。采煤机滚筒调高是通过其调高油缸实现的,调

高的目标值(调高量 Y_1 和卧底量 Y_2)是基于采煤机机身的相对高度,一般通过摇臂摆角 θ 计算得出。

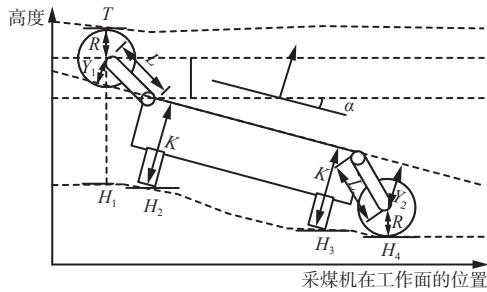


图6 采煤机的空间位姿
Fig. 6 Space position and posture of the shearer

调高量计算的几何模型如图7所示, M 为机身到滚筒中心的距离,通过已知参量求得 M 的值,进而求得摇臂摆角 θ 的值,最终计算得出调高量 Y_1 的值。

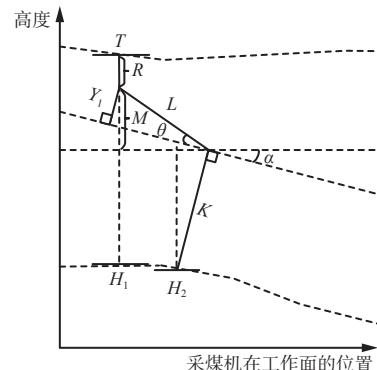


图7 采煤机顶滚筒高度几何模型
Fig. 7 Geometric model of shearer roof drum height

$$M = T - H_2 - R - K \sin(90^\circ - \alpha) \quad (1)$$

$$\theta = \arcsin(M/L) - \alpha \quad (2)$$

$$Y_1 = L \sin \theta \quad (3)$$

卧底量计算的几何模型如图8所示,求得摇臂摆角 θ 的值,进而计算卧底量 Y_2 的值。

$$M = K \sin(90^\circ - \alpha) + (H_3 - H_4) - R \quad (4)$$

$$\theta = \arcsin(M/L) - \alpha \quad (5)$$

$$Y_2 = L \sin \theta \quad (6)$$

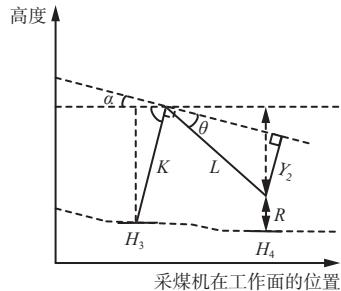


图8 采煤机底滚筒高度几何模型
Fig. 8 Geometric model of shearer bottom drum height
计算出调高量和卧底量,即得出了采煤机滚筒

的高度序列。刮板输送机的上窜下滑会导致标记高度的横坐标位置整体产生偏移, 即上窜下滑量会影响滚筒高度序列对应的横坐标位置, 因此, 需根据上窜下滑量再对底滚筒高度序列进行一次调整, 通过统一增减横坐标数值对偏移量进行修正, 最终得出符合当前刀的滚筒高度序列。

3 应用测试

3.1 试验概况

试验通过上位机控制软件和采煤机内部的控制系统共同配合完成, 如图 9 所示。上位机控制软件中集成了预测滚筒高度的数据样本和算法模型, 负责实现滚筒目标高度序列的预测与生成。采煤机的内部控制系统与上位机控制软件双向通信, 一方面接收上位机控制软件下发的滚筒目标高度, 进而计算出抬高油缸调节量, 依靠采煤机调高装置控制滚筒达到目标高度, 另一方面通过摇臂的摆角传感器计算出滚筒的实际高度并返回给上位机控制软件。通过对比试验中滚筒的预测高度与实际高度来验证滚筒高度预测算法的准确性, 通过对比司机对滚筒高度的干预次数, 验证自动调高对煤层的适应能力。

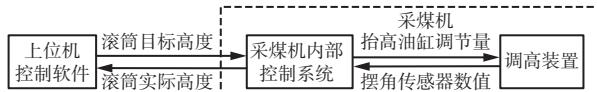


图 9 上位机控制软件和采煤机控制系统关系

Fig. 9 Relationship between upper computer control software and shear control system

为了验证采煤机自动调高技术的应用效果, 在黄陵矿业集团有限责任公司某矿的综采工作面进行了工业性试验, 该工作面走向长度为 2 880 m, 进风巷道长度为 3 010.8 m, 回风巷道长度为 2 984.8 m, 工作面地质情况见表 1, 该工作面煤层结构简单, 工作面走向起伏变化较小, 属于稳定煤层。

表 1 试验工作面地质情况

Table 1 Geological conditions of the coal mining face

煤层厚度/m	煤层倾角/(°)	基本顶厚度/m	直接顶厚度/m	底板厚度/m
1.7~3.0	1~5	9.8	6.6	8.0

3.2 试验结果

试验时间选在生产班, 试验开始后, 在 18:32 至 19:20 之间, 采煤机基于自动调高技术完成两刀煤的截割, 同时允许采煤机司机使用遥控器干预滚筒调高, 试验过程中记录下采煤机司机干预滚筒调高的时间和次数, 以及滚筒的实际高度, 之后关闭自动调高功能, 从 19:20 开始使用传统的手动控制再次完成一刀煤的截割。

滚筒的实际高度与预测高度对比结果如图 10 所示, 可看出滚筒的预测高度和实际高度具有明显的一致性, 顶板预测的最大偏差为 14 cm, 底板预测的最大偏差为 11 cm。预测高度和实际高度偏差占比统计见表 2, 顶底滚筒的预测高度与实际高度偏差在 10 cm 以内的占比都在 90% 以上, 其中底板滚筒高度的预测尤为准确, 原因是该工作面底板起伏变化较小, 相比顶板更加平直。试验结果说明采煤机滚筒高度预测是准确可行的。

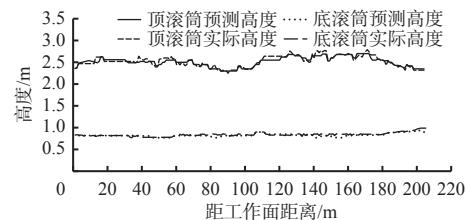


图 10 采煤机滚筒的实际高度与预测高度对比结果

Fig. 10 Comparison between the actual height and predicted of the shearer drum

表 2 预测高度和实际高度偏差情况

Table 2 Deviation between predicted height and actual height

位置	偏差/cm	占比/%
顶板	≤5	76.69
	≤10	94.66
	≤15	100
底板	≤5	91.74
	≤10	97.69
	≤15	100

试验过程中, 在自动调高方式下司机的干预调高次数与传统手动控制方式下司机的干预调高次数的对比结果如图 11 所示。可看出 18:32 至 18:50 之间, 在自动调高控制下中部完成截割一刀煤, 人工干预调高 21 次, 19:20 至 19:30 之间, 传统手动控制方式下中部完成截割一刀煤, 人工干预调高 49 次, 采用采煤机自动调高技术可显著降低采煤机司机的干预次数, 证明了自动调高可有效提升采煤机跟随煤层截割开采的适应能力。

4 结论

1) 基于数据融合和机器学习建立了截割顶底板高度的预测模型, 结合采煤机空间位姿建立了计算采煤机滚筒高度的几何模型, 进而实现了采煤机滚筒高度的预测, 采煤机据此实现了自动调高的功能。

2) 在生产班进行了工业性试验, 结果表明, 采煤机滚筒的预测高度和实际截割高度趋势一致, 顶板预测的最大偏差为 14 cm, 底板预测的最大偏差为

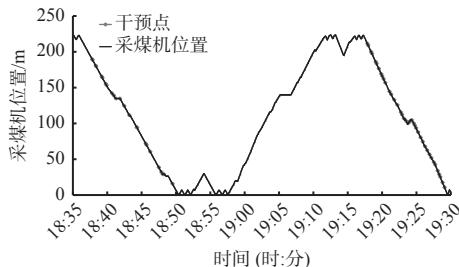


图 11 自动调高方式下司机的干预次数与传统手动调高方式下司机的干预次数对比

Fig. 11 Comparison of the intervention frequency of drivers under automatic height adjustment mode and traditional manual height adjustment mode

11 cm,且预测偏差在 10 cm 以内的占比在 90% 以上。

3) 传统手动控制方式下中部完成截割一刀煤,人工干预调高 49 次,在自动调高技术的控制下,中部截割一刀煤人工干预次数为 21 次,采煤机司机对滚筒的干预显著降低。自动调高技术提升了采煤机对围岩空间动态变化的适应性,为采煤机装备的智能化建设提供了有力的技术支撑。

参考文献(References):

- [1] 张世龙,张民波,朱仁豪,等.近 5 年我国煤矿事故特征分析及防治对策[J].煤炭与化工,2021,44(8):101-106,109.
ZHANG Shilong, ZHANG Minbo, ZHU Renhao, et al. Analysis of the characteristics of China's mine accidents in the past five years and countermeasures for prevention and control[J]. Coal and Chemical Industry, 2021, 44(8): 101-106, 109.
- [2] 谭震,王建文,王宏科,等.煤矿灾害智能综合防治系统构建及关键技术[J].中国煤炭,2022,48(12):68-75.
TAN Zhen, WANG Jianwen, WANG Hongke, et al. Construction and key technologies of intelligent comprehensive prevention and control system for coal mine disaster[J]. China Coal, 2022, 48(12): 68-75.
- [3] 张胜利,汤家轩,王猛.“双碳”背景下我国煤炭行业发展面临的挑战与机遇[J].中国煤炭,2022,48(5):1-5.
ZHANG Shengli, TANG Jiaxuan, WANG Meng. Challenges and opportunities for the development of China's coal industry under the background of carbon peak and carbon neutrality[J]. China Coal, 2022, 48(5): 1-5.
- [4] 李浩荡.减碳背景下煤炭如何直面挑战[N].中国煤炭报,2021-04-01(2).
LI Haodang. How does coal face the challenge in the context of carbon reduction[N]. China Coal News, 2021-04-01(2).
- [5] 王国法.煤矿高效开采工作面成套装备技术创新与发
展[J].煤炭科学技术,2010,38(1):63-68,106.
WANG Guofa. Innovation and development of completed set equipment and technology for high efficient coal mining face in underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(1): 63-68, 106.
- [6] 赵亦辉,赵友军,周展.综采工作面采煤机智能化技术研究现状[J].工矿自动化,2022,48(2):11-18,28.
ZHAO Yihui, ZHAO Youjun, ZHOU Zhan. Research status of intelligent technology of shearer in fully mechanized working face[J]. Industry and Mine Automation, 2022, 48(2): 11-18, 28.
- [7] 王国法,徐亚军,张金虎,等.煤矿智能化开采新进展[J].煤炭科学技术,2021,49(1):1-10.
WANG Guofa, XU Yajun, ZHANG Jinhu, et al. New development of intelligent mining in coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 1-10.
- [8] WANG Guofa, XU Yongxiang, REN Huaiwei. Intelligent and ecological coal mining as well as clean utilization technology in China: review and prospects[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2019, 29(2): 161-169.
- [9] 任怀伟,巩师鑫,刘新华,等.煤矿千米深井智能开采关键技术研究与应用[J].煤炭科学技术,2021,49(4):149-158.
REN Huaiwei, GONG Shixin, LIU Xinhua, et al. Research and application on key techniques of intelligent mining for kilo-meter deep coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(4): 149-158.
- [10] 王昕.基于电磁波技术的煤岩识别方法研究[D].徐州:中国矿业大学,2017.
WANG Xin. Study of coal-rock identification method based on electromagnetic wave technology[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [11] 杨文萃,邱锦波,张阳,等.煤岩界面识别的声学建模[J].煤炭科学技术,2015,43(3):100-103.
YANG Wencui, QIU Jinbo, ZHANG Yang, et al. Acoustic modeling of coal-rock interface identification[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(3): 100-103.
- [12] 孙继平,陈浜.基于双树复小波域统计建模的煤岩识别方法[J].煤炭学报,2016,41(7):1847-1858.
SUN Jiping, CHEN Bang. An approach to coal-rock recognition via statistical modeling in dual-tree complex wavelet domain[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(7): 1847-1858.
- [13] 刘俊利,赵豪杰,李长有.基于采煤机滚筒截割振动特性的煤岩识别方法[J].煤炭科学技术,2013,41(10):93-95,116.
LIU Junli, ZHAO Haojie, LI Changyou. Coal-rock recognition method based on cutting vibration features of coal shearer drums[J]. Coal Science and Technology,

- 2013, 41(10): 93-95, 116.
- [14] 孙振明, 毛善君, 祁和刚, 等. 煤矿三维地质模型动态修正关键技术[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 918-924.
SUN Zhenming, MAO Shanjun, QI Hegang, et al. Dynamic correction of coal mine three-dimensional geological model[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 918-924.
- [15] 殷大发. 煤矿三维地质模型精度评价及动态更新技术探讨[J]. 煤矿开采, 2018, 23(4): 20-24.
YIN Dafa. Exploration of precision evaluation and dynamic update technology of coal mine 3D geological model[J]. Coal Mining Technology, 2018, 23(4): 20-24.
- [16] 刘万里, 张学亮, 王世博. 采煤工作面煤层三维模型构建及动态修正技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 1973-1983.
LIU Wanli, ZHANG Xueliang, WANG Shibo. Modeling and dynamic correction technology of 3D coal seam model for coal-mining face[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 1973-1983.
- [17] 程建远, 朱梦博, 王云宏, 等. 煤炭智能精准开采工作面地质模型梯级构建及其关键技术[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2285-2295.
CHENG Jianyuan, ZHU Mengbo, WANG Yunhong, et al. Cascade construction of geological model of longwall panel for intelligent precision coal mining and its key technology[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2285-2295.
- [18] 卢新明, 阚淑婷. 煤炭精准开采地质保障与透明地质云计算技术[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2296-2305.
LU Xinming, KAN Shuting. Geological guarantee and transparent geological cloud computing technology of precision coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2296-2305.
- [19] 董刚, 马宏伟, 聂真. 基于虚拟煤岩界面的采煤机上滚筒路径规划[J]. 工矿自动化, 2016, 42(10): 22-26.
DONG Gang, MA Hongwei, NIE Zhen. Path planning of shearer up-drum based on virtual coal-rock interface[J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(10): 22-26.
- [20] 陈尔奎, 吴梅花. 基于改进遗传算法和改进人工势场法的复杂环境下移动机器人路径规划[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(33): 79-85.
CHEN Erkui, WU Meihua. The path planning of mobile robots based on the improved genetic algorithm and the improved artificial potential field algorithm in complex environment[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(33): 79-85.
- [21] 权国通, 谭超, 侯海潮, 等. 基于粒子群三次样条优化的采煤机截割路径规划[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(3): 77-79.
QUAN Guotong, TAN Chao, HOU Haichao, et al. Cutting path planning of coal shearer based on particle swarm triple spline optimization[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(3): 77-79.

(上接第 8 页)

- [25] 王媛娜, 李英顺, 贺喆. D-S 证据理论融合粗糙集的火控系统状态评估[J]. 控制工程, 2020, 27(12): 2176-2184.
WANG Aina, LI Yingshun, HE Zhe. State evaluation of fire control system based on fusion of D-S evidence theory and rough set[J]. Control Engineering of China, 2020, 27(12): 2176-2184.
- [26] 王俊松, 李建林. D-S 证据理论改进方案综述[J]. 信息化研究, 2011, 37(6): 4-7.
WANG Junsong, LI Jianlin. Overview of D-S evidence theory modification[J]. Informatization Research, 2011, 37(6): 4-7.
- [27] 杨呈永, 刘佳伟. 基于物联网节点加权的 D-S 证据理论数据融合算法[J]. 桂林理工大学学报, 2019, 39(3): 731-736.
YANG Chengyong, LIU Jiayi. Data fusion algorithm based on weighted D-S evidence theory in Internet of things[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2019, 39(3): 731-736.
- [28] 叶瑾, 许枫, 杨娟, 等. 一种基于多传感器的复合量测 IMM-EKF 数据融合算法 [J]. 电子学报, 2020, 48(12): 2326-2330.
YE Jin, XU Feng, YANG Juan, et al. A composite measurement IMM-EKF data fusion algorithm based on multi-sensor[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(12): 2326-2330.
- [29] 韩丙光, 赵子源, 刘建, 等. 基于多传感器信息融合的电缆火灾预警建模与仿真[J]. 电子设计工程, 2022, 30(10): 150-154.
HAN Bingguang, ZHAO Ziyuan, LIU Jian, et al. Modeling and simulation of cable fire warning based on multi-sensor information fusion[J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30(10): 150-154.