

文章编号:1671-251X(2024)S1-0096-04

复杂煤层工作面推进中火灾预警技术研究

闫寿庆¹, 董康宁², 张连荣¹

(1. 扎赉诺尔煤业有限责任公司, 内蒙古 呼伦贝尔 021410;

2. 北京思优特科技发展有限公司, 北京 100083)

摘要: 由于煤矿工作面的复杂性和危险性, 提前预警煤层火灾风险对于矿山安全至关重要。利用随机森林模型, 结合煤层温度、瓦斯含量和压力等监测指标, 建立火灾预警模型, 以提高对火灾风险的准确性和实时性预测。首先, 对复杂煤层工作面的推进过程进行了深入分析, 整理归纳了与火灾风险相关的关键监测指标。然后, 针对采集到的大量监测数据, 采用随机森林模型进行分析和训练, 建立火灾预警模型。研究结果表明, 基于随机森林模型的火灾预警模型能够有效评估工作面内部的火灾风险, 及时发现高风险情况并提供有效的预警。实验结果表明, 模型具有较高的准确性和鲁棒性, 能够为煤矿工作面的安全生产提供可靠的预警保障。

关键词: 复杂煤层; 安全推进; 火灾预警保障技术; 机器学习

中图分类号: TD752 文献标志码: A

Research on fire early warning technology in complex coal seam working face advancing

YAN Shouqing¹, DONG Kangning², ZHANG Lianrong¹

(1. Jalainur Coal Industry Liability Company, Hulunbuir 021410, China;

2. The Suited(Beijing) Science and Technology Development Co., Ltd., Beijing 100083, China)

0 引言

在煤炭采矿业中, 复杂煤层工作面的推进过程存在着巨大的挑战和风险, 特别是潜在的煤层火灾。这些火灾不仅危害矿工的生命, 还对环境和矿井基础设施造成严重影响^[1]。因此, 开发先进的技术以提前预警和预测煤矿工作面的火灾风险至关重要。

火灾预警技术在煤矿安全推进中扮演着重要的角色。通过实时监测煤矿工作面及周边区域的温度、瓦斯含量和氧气浓度等指标, 火灾预警系统能够及时发现潜在的火灾隐患并做出预警, 保障矿工的生命安全及煤矿设施的完好, 对提高煤矿安全生产水平具有重要意义。火灾预警技术可帮助提前发现火灾隐患、实时监测瓦斯浓度、智能预警决策, 提高应急响应速度, 有效减少损失, 最大限度地保障员工的生命安全^[2]。

火灾作为一种严重的事故, 其成因机理复杂且尚未完全阐明, 目前研究主要集中在初步的定性分析和理论假设。在研究煤炭和瓦斯突出现象时, 被广泛讨论的是综合作用假设, 认为火灾的发生是由

地下应力、煤的物理化学性质及其他环境因素共同作用的结果。在这个假设中, 地下应力可能触发火灾, 而煤的物理性质可能会对火灾起到一定的抑制作用。基于这种综合作用的视角, 结合矿井的特定环境, 本文提出利用随机森林模型, 结合煤层温度、瓦斯含量和压力等关键监测指标, 建立火灾预警模型^[3-4]。通过深入分析复杂煤层工作面的推进过程, 确定了这些监测指标。利用机器学习来分析和处理大量监测数据的方法, 有望提高煤矿工作面对火灾风险的准确性和实时性预测。

1 火灾预警随机森林模型建立

随机森林是一个包含多个决策树的分类器, 其输出的类别由个别树输出类别的模式决定。随机森林在处理数据的不确定性方面表现出了极高的鲁棒性, 使其成为火灾预警领域的热门模型之一。

$$Y = f(X) + \epsilon \quad (1)$$

式中: Y 为目标变量; $f(X)$ 为随机森林模型; X 为输入变量; ϵ 为误差项。

结合矿井的特定环境, 构建以火灾危险性为核

心的事故树模型。事故树模型的顶级事件是指人们所不期望发生的事件,例如火灾、爆炸、中毒等,它是事故树分析的核心和起点。这些事件通常是系统或过程中可能发生的严重故障或事故,对于系统安全性的评估至关重要。其下分支是一系列可能导致火灾的因素,包括但不限于煤体的结构属性、地应力水平和瓦斯动态等。煤体的结构属性涵盖了煤层的厚度、倾角、强度和透气性等变化,而地应力相关的因素可能包括地质构造的变动、应力集中的现象及围岩的透气性等。瓦斯相关因素则涉及瓦斯压力、相对含量、释放速度及最大初始涌出速度等^[5-6]。所有这些因素通过一系列逻辑关系连接,形成了一个系统的事故树,如图 1 所示。

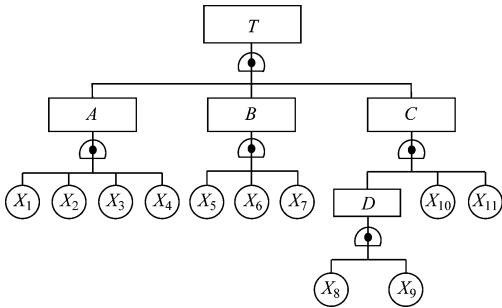


图 1 复杂煤层与火灾危险性事故树

2 指标的监测和采集

2.1 煤层温度的测定

通过在不同的煤层深度和区域安置温度传感器,收集大量的实时温度数据^[7-8]。这些数据被传输到中央数据处理中心,用于进一步分析和评估。

预测模型得出的温度结果与实际采集到的温度数据之间的相关性见表 1。可看出预测温度和采集温度具有一定的误差,通常在 0.6℃左右。说明模型对温度的预测相对较为准确。

表 1 预测结果与采集温度数据对比

采样时间 (年-月-日)	采样深度/ m	预测温度/ ℃	采集温度/ ℃	温度误差/ ℃
2023-7-1	100	34.5	35.2	-0.7
2023-7-2	120	35.8	36.5	-0.7
2023-7-3	140	36.5	37.1	-0.6
2023-7-4	160	37.7	38.3	-0.6
2023-7-5	180	38.6	39.2	-0.6
2023-7-6	200	39.4	40.0	-0.6
2023-7-7	220	39.9	40.5	-0.6
2023-7-8	240	40.6	41.2	-0.6
2023-7-9	260	41.5	42.1	-0.6
2023-7-10	280	42.2	42.8	-0.6

2.2 煤层瓦斯含量测定

在不同深度和区域的煤层中安装瓦斯传感器,实时监测瓦斯浓度的变化。采用实验室分析方法对采集的煤样进行瓦斯含量测试^[9]。

煤层原始瓦斯含量的测定结果和对应的工业分析数据见表 2。其中, M_{at} 表示残存瓦斯量, H_{at} 表示损失瓦斯量, V_{daf} 表示常压不可解吸瓦斯量。从气体成分来看,瓦斯主要含有 CH_4 、 N_2 和 CO_2 。从气体含量来看, CH_4 是主要气体成分, CO_2 和 N_2 的含量相对较低。

表 2 煤层原始瓦斯含量测定和工业分析数据

$M_{at}/$ %	$H_{at}/$ %	$V_{daf}/$ %	气体成分/%			含量/ ($m^3 \cdot t^{-1}$)
			CH_4	N_2	CO_2	
2.80	16.14	7.41	90.32	0.73	8.91	9.89
2.69	11.10	4.51	81.82	8.34	9.65	9.92
3.32	17.23	4.42	91.29	0.88	7.46	13.02
3.27	19.03	5.71	82.06	9.78	8.13	10.54
3.56	10.34	5.42	91.32	2.71	6.17	8.45
3.17	12.02	5.03	91.97	4.15	3.98	7.89

2.3 煤层压力的测定

采用朗格缪尔方程来逆向推导出煤层中的瓦斯压力^[10]。

$$x = \frac{abp}{1 + bp} \left(\frac{100 - F_{ad} - E_{ad}}{100} \right) \times \frac{1}{1 + 0.31E_{ad}} + \frac{10\alpha p}{\gamma}$$

(2)

式中: x 为煤层瓦斯含量; a 为试验温度下的极限吸附量; b 为吸附常数; p 为煤层瓦斯压力; F_{ad} 为煤的灰分,%; E_{ad} 为煤的水分; α 为煤的孔隙率; γ 为煤的容重(视密度)。

将矿区实际测得的煤层瓦斯含量数值应用于朗格缪尔方程进行计算处理,导出基于实测瓦斯含量反演得到的瓦斯压力数据,详细结果见表 3。经由瓦斯含量间接推算得出的相对瓦斯压力为 0.55~1.83 MPa,最高压力值达 1.83 MPa。

3 火灾预警随机森林模型可行性分析与评价

3.1 火灾预警的随机森林物元模型

在随机森林的物元模型中,将火灾风险视为一个物元 G 。在火灾预警的随机森林模型中,将煤层温度、瓦斯含量、压力等监测指标作为输入特征,通过对这些特征进行训练和学习,建立火灾风险预测模型。该模型利用历史数据学习煤矿内各指标与火灾之间的复杂关系,从而能够准确地预测火灾发生可能性,并及时预警。

假定煤炭和火灾危险性的问题为变量 P ,存在

表 3 瓦斯含量和反演煤层压力结果

标准高/m	$M_{at}/\%$	$H_{at}/\%$	$V_{daf}/\%$	气体成分/ $\%$			瓦斯含量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	瓦斯压力/ MPa
				CH_4	N_2	CO_2		
-99.4	2.80	16.14	7.41	90.32	0.73	8.91	9.89	0.78
-77.2	2.69	11.10	4.51	81.82	8.34	9.65	9.92	0.69
-118.3	3.32	17.23	4.42	91.29	0.88	7.46	13.02	1.84
-113.4	3.27	19.03	5.71	82.06	9.78	8.13	10.54	1.12
-76.8	3.56	10.34	5.42	91.32	2.71	6.17	8.45	0.80
-167.9	3.17	12.02	5.03	91.97	4.15	3.98	7.89	0.56

m 个监测的目标实体,采用物元形式表达为 $R_1, R_2, \cdots, R_m$ 。假设有 n 个警示指标构成 1 个集合 $I = \{i_1, i_2, \cdots, i_n\}$ 。在这种情况下,用物元概念来描述 $G = Rr$,其中 R 为预警目标的物元, $R \in (R_1, R_2, \cdots, R_m)$, r 为条件物元。

3.2 基于可拓理论的综合预警模型

基于可拓理论的综合预警模型考虑多种预警指标(地质构造变化、应力集中现象、气体含量、煤层倾角、煤层温度等),通过对这些指标的观测和分析,可有效地综合评估复杂煤层与火灾的潜在危险性,并提供预警和决策支持。

$$R_{0j} = (N_{0j}, I, N_{0j}) = \begin{bmatrix} N_{0j} & i_1 & V_{0j1} \\ & i_2 & V_{0j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & i_n & V_{0jn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{0j} & i_1 & \langle a_{0j1}, b_{0j1} \rangle \\ & i_2 & \langle a_{0j2}, b_{0j2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & i_n & \langle a_{0jn}, b_{0jn} \rangle \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: N_{0j} 为所划分的第 j 个等级; $i_g (g = 1, 2, \cdots, n)$ 为等级 N_{0j} 的特征(即预警指标); V_{0jg} 为 N_{0j} 关于特征 i_g 的量值范围,即预警对象各警度等级关于对应的特征所取的数据范围。

$$R_{0j} = (D, I, V_D) = \begin{bmatrix} D & i_1 & V_{D1} \\ & i_2 & V_{D2} \\ & \vdots & \vdots \\ & i_n & V_{Dn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D & i_1 & \langle a_{D1}, b_{D1} \rangle \\ & i_2 & \langle a_{D2}, b_{D2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & i_n & \langle a_{Dn}, b_{Dn} \rangle \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: D 为警度等级的全体; V_{Dk} 为 D 关于 i_g 所取的量值的范围,即 D 的节域。

将具体的量化信息与预警对象相关联,以便进行下一步的评估和分析。由于预警监测对象 P_i 量值尚不明确,故采用评估待定物元的形式来对预警

监测对象进行预测、计算和确定。

$$R_c = (p_c, I, V_c) = \begin{bmatrix} D & i_1 & V_{c1} \\ & i_2 & V_{c2} \\ & \vdots & \vdots \\ & i_n & V_{cn} \end{bmatrix} \quad c = 1, 2, \cdots, m \quad (5)$$

式中: p_c 为第 c 个预警对象; V_{cj} 为该预警对象 p_c 相对于 i_j 指标的量化值,即预警对象的具体预警指标数值。

在对预警对象 p_c 进行评估时,首先关注关键性的特征 ik 的量值 v_{ck} 。如果 v_{ck} 的值不属于预设的可接受范围 V_{0jk} ,那么可判定预警对象 p_c 并不符合基本的评估标准,因此不适合进行进一步的评价。只有当 v_{ck} 的值位于这个可接受范围内时,才会继续执行后续的评价步骤。

建立关联函数,确定预警对象关于各警度等级的关联度。

$$K_j(v_{kc}(t)) = \begin{cases} \rho(v_{kc}(t), V_{0jc}) & x \in X_0 \\ \frac{\rho(v_{kc}(t), V_{0jc})}{\rho(v_{kc}(t), V_{0Dk}) - \rho(v_{kc}(t), V_{0jc})} & x \notin X_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中 $\rho(v_{kc}(t), V_{0jc})$ 为点 $v_{kc}(t)$ 与区间 V_{0jc} 的距离。

关系度的数值可能遍布整个实数领域。在面对不止一个预警对象的情形时,用下述方程对关系度数值进行标准化处理。如果仅有一个预警对象在考量范围内,则可以略过这一规范化过程。

$$K'_j(v_{kc}(t)) = \frac{K_j(v_{kc}(t))}{\max_{1 \leq c \leq m} |K_j(v_{kc}(t))|} \quad (7)$$

在整合各特征的权重系数时,将标准化后的关系度与各特征的综合权重系数相结合,形成“综合关系度”。

$$K_j(p_k) = \sum_{c=1}^n a_i K'_j(v_{kc}(t)) \quad (8)$$

式中 p_k 为第 k 个预警对象。

若 $K_k(p) = \max_{k \in (1, 2, \cdots, m)} K_j(p_c)$, 则预警对 p 的警度属于等级 k 。当预警系统面对的指标架构呈现层

次性质,或存在大量细分的指标导致权重分配极为微小时,实施多级综合预警模型成为必要。这种多层次的预警方法建立在单一层次预警的框架之上,并采取类似的计算策略。在此体系中,来自第二层级的评价结果构建了第一层级评估所需的矩阵 K_1 。将第一层级评估中各个因素的权重系数 L 纳入考虑,并将其与综合关系度矩阵结合,以此生成最终的预警结果矩阵。

$$K=L\cdot K_1$$

(9)

4 结语

采用机器学习方法中的随机森林模型,结合煤层温度、特征气体含量、压力等关键监测指标,建立了基于随机森林模型的火灾预警模型。该模型不仅能够准确预测潜在的火灾风险,且在发现高风险情况时能够提供及时有效的预警。通过实验数据的验证,发现该模型具有较高的准确性和鲁棒性,能够在复杂煤层工作面环境中准确预测火灾风险,为煤矿安全提供了重要的技术支持。

参考文献:

[1] 王礼,王明远,闫红波,等.“三软”煤层采动覆岩下沉模式及机理研究[J].煤炭技术,2023,42(8):28-31.

[2] 邹栓营,张贵平,侯跃峰.大倾角“三软”煤层综放工作面覆岩运动规律研究[J].能源技术与管理,2022,47(4):68-70.

[5] 李红艳,张焘,张靖乾,.基于时变图的天地一体化网络时间确定性路由算法与协议[J].通信学报,2020,41(10):116-129.

[6] 李劲.分布式多点接入IP电话信息系统[D].武汉:武汉大学,2004.

[7] 许勇,倪宏,朱小勇.信息中心网络多路径传输技术研究综述[J].网络新媒体技术,2023,12(6):1-9,20.

[8] 宋宇鑫.时间确定性网络调度算法设计[D].西安:西安电子科技大学,2020.

[9] 林佳烁,王涛,王卓薇,等.TSN网络下基于网络周期的流调度方法[J].计算机工程与设计,2023,44(11):214-3221.

[10] 黄韬,汪硕,玉栋,等.确定性网络研究综述[J].通信学报,2019,40(6):160-176.

[11] 史召.5G业务环境下的传输网络优化方案[J].数字通信世界,2019(4):80,195.

[12] 白雪峰,舒晓军.煤矿井下无线通信技术演进[J].矿自动化,2023,49(7):14-18.

[13] 李晨鑫.基于5G的矿用装备远程控制技术研究[J].

[3] 撒书一.三软煤层沿空留巷巷道围岩变形控制研究[J].山东煤炭科技,2022,40(5):72-74,77.

[4] 成龙,刘保菊.火灾预警系统的设计与实现[J].工业控制计算机,2023,36(3):144-146.

[5] 龙兴林,俞鉴锋,刘学勇,等.一种新型电气火灾预警系统研究[J].自动化应用,2023,64(3):128-130,133.

[6] CUI Feng, ZHANG Tinghui, CHENG Xiaoqiang. Research on control of rib spalling disaster in the three-soft coal seam[J]. Shock and Vibration, 2021, 2021(11):1-15.

[7] LI Pu, ZHANG Xiaodong, LI Hui. Technology of coupled permeability enhancement of hydraulic punching and deep-hole per-splitting blasting in a ‘three-soft’ coal mine [J]. Materiali in Tehnologije, 2021,55(1):89-96.

[8] ZHANG Qi, LIU Qinzhi, LOU Yahui. Deviation principles of gas drainage drilling in three-soft outburst coal seams[J]. Geotechnical & Geological Engineering,2022,40(6):3147-3168.

[9] QIU Dandan, WU Yanling, LI Li. Evaluation of the gas drainage effect in deep loose coal seams based on the cloud model[J]. Sustainability,2022,14(19).

[10] ZHANG Bingchen, BAI Long, CHEN Xiaohong. Research on the design of fire alarm and pretreatment robot system [J]. Journal of Physics: Conference Series,2021,1865.

工矿自动化,2023,49(9):90-97.

[14] 姜琳,孙超,付恩三.基于云计算的矿用设备监察管理系统设计[J].中国煤炭,2021,47(3):87-95.

[15] 杨传印.基于煤矿视频AI识别技术应用研究[J].山东煤炭科技,2022,40(1):181-183,186.

[16] 胡燕儒.浅析5GV2X通信应用现状及其侧链路标识符更新技术[J].中国设备工程,2023(16):101-102.

[17] 朱海龙,严园园,张华宇.基于驻留时间补偿的5G-TSN系统高精度时间同步方法[J].北京邮电大学学报,2023,46(6):89-94.

[18] 吴振毅.TSN网络技术在采掘装备电控系统中的应用[J].电子技术,2023,52(8):384-385.

[19] 周飞飞,何迎利,程程,等.一种基于TSN特性的以太网组网在智能变电站中的设计方案[J].电力信息与通信技术,2021,19(10):100-106.

[20] 杨利彬,陈少波,郑志丹.分布式电梯监控系统设计[J].信息技术,2009(7):184-186.

[21] 徐晓麟.间敏感网络技术及其在工业互联网中的应用[J].电信网技术,2018(5):1-5.