

KA

中华人民共和国矿山安全行业标准

KA/T XXXXX—XXXX

煤矿冲击危险性定量表征方法

Quantitative characterization method of coal bump risk in coal mine

（征求意见稿）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

国家矿山安全监察局 发布

目 次

前 言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 基本要求 3

5 经验打分法 3

6 统计分析法 5

7 机器学习法 7

8 煤矿冲击危险性定量通用表征流程 9

附 录 A （规范性） 11

附 录 B （规范性） 16

附 录 C （资料性） 17

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由国家矿山安全监察局政策法规和科技装备司提出。

本文件由矿山安全行业标准化技术委员会冲击地压（岩爆）防治分技术委员会归口。

本文件起草单位：煤炭科学研究总院有限公司、山东能源集团、辽宁大学、中国中煤能源集团有限公司、国能神东煤炭集团有限责任公司、煤炭科学技术研究院有限公司、辽宁工程技术大学。

本文件主要起草人：李海涛，齐庆新，张修峰，潘一山，王爱文，张海宽，王书文，张传玖，罗浩，邓志刚，郑伟钰，李云鹏，赵善坤，杨冠宇，王超，杜伟升。

煤矿冲击危险性定量表征方法

1 范围

本文件规定了冲击危险性定量表征工作中的术语和定义、基本要求、经验打分法、统计分析法和机器学习法，以及不同定量表征方法的使用范围。

本文件适用于潜在或具有冲击地压风险的井工煤矿。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 25217.1-2010 冲击地压测定、监测与防治方法 第1部分：顶板岩层冲击倾向性分类及指数的测定方法

GB/T 25217.2-2010 冲击地压测定、监测与防治方法 第2部分：煤的冲击倾向性分类及指数的测定方法

GB/T 25217.3-2019 冲击地压测定、监测与防治方法 第3部分：煤岩组合试件冲击倾向性分类及指数的测定方法

GB/T 25217.4-2019 冲击地压测定、监测与防治方法 第4部分：微震监测方法

GB/T 25217.5-2019 冲击地压测定、监测与防治方法 第5部分：地音监测方法

GB/T 25217.6-2019 冲击地压测定、监测与防治方法 第6部分：钻屑监测方法

GB/T 25217.7-2019 冲击地压测定、监测与防治方法 第7部分：采动应力监测方法

GB/T 25217.8-2021 冲击地压测定、监测与防治方法 第8部分：电磁辐射监测方法

GB/T 25217.9-2020 冲击地压测定、监测与防治方法 第9部分：煤层注水防治方法

GB/T 25217.10-2019 冲击地压测定、监测与防治方法 第10部分：煤层钻孔卸压防治方法

GB/T 25217.11-2019 冲击地压测定、监测与防治方法 第11部分：煤层卸压爆破防治方法

GB/T 25217.12-2019 冲击地压测定、监测与防治方法 第12部分：开采保护层防治方法

GB/T 25217.13-2019 冲击地压测定、监测与防治方法 第13部分：顶板深孔爆破防治方法

GB/T 25217.14-2020 冲击地压测定、监测与防治方法 第14部分：顶板水压致裂防治方法

MT/T 1201.5-2023 煤矿感知数据联网接入规范 第5部分：冲击地压

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

冲击危险性 coal bump risk in coal mines

矿井建设、生产过程中，在地质环境、开采环境及防冲措施等因素作用下，矿井内特定区域发生冲击地压事件的概率及其可能造成的破坏程度。

3.2

冲击危险性定量表征 quantitative characterization of coal bump risk

对冲击地压的危险区范围、危险程度和主控因素等信息进行数值化描述的过程，包括面向历史及现状的冲击危险性评价，和面向未来的冲击危险性预测。

3.3

冲击危险性评价 coal bump risk evaluation in coal mines

针对煤矿不同尺度区域，通过定量与定性分析方法，表征现有地质条件和生产状态下诱发冲击地压的潜在风险。

3.4

冲击危险性预测 coal bump risk prediction in coal mines

针对煤矿不同尺度区域，通过定量与定性分析方法，综合考虑地质条件和未来生产状态，对可能发生冲击地压的时间、空间范围、危险程度及主控因素等信息进行系统性表征。

3.5

冲击危险区范围 coal bump risk zone extent

指在不同尺度煤岩体中，可能受到潜在动力灾害影响的空间区域。

3.6

冲击危险程度 coal bump risk level

采用量化方法对危险区范围发生冲击地压事件可能性的概率化表征。

3.7

冲击危险等级 coal bump risk grade

对冲击危险程度的人为划分等级，通常分为四个级别：无冲击危险、弱冲击危险、中冲击危险和强冲击危险，用于指导现场布控与应急响应。

3.8

冲击地压影响因素权重 weight of controlling factors for coal bump

反映各影响因素对冲击危险性贡献程度的相对重要性，通过归一化处理得到。

3.9

冲击地压主控因素 main controlling factors of coal bump

对冲击危险性起主导作用的影响因素，可通过影响因素权重排序分析确定

3.10

经验打分法 empirical scoring method

依据工程经验对地质条件、开采条件及防冲措施等因素赋以冲击危险指数，通过综合评分确定待表征区域冲击危险性的评估方法。

3.11

统计分析法 statistical analysis method

基于历史数据和统计学原理，通过计算关键监测参数的统计特征（如均值、方差、分布形态等），识别系统状态偏离正常范围的情况，并据此表征冲击危险性的方法。

3.12

绝对值分析法 absolute value analysis method

通过设定关键监测参数的阈值范围，将实时监测数据与预设的安全限值进行直接对比，以判断系统是否处于异常或危险状态的分析方法。

3.13

趋势分析法 trend analysis method

通过对时间序列数据进行分析，识别数据随时间变化的趋势特征，以表征冲击危险性的方法。

3.14

机器学习法 machine learning method

一种以数据驱动为核心的技术方法，利用历史数据训练模型，使其自动学习输入特征与输出结果之间的复杂映射关系，并通过识别数据模式和特征来实现冲击危险性表征的方法。

3.15

安全状态基准 baseline of safe state

在冲击危险性判定过程中，用于对比分析的正常或无危险状态下的参考值体系，依据不同方法可表现为评分基准、历史正常波动区间或模型识别的安全模式特征。

3.16

危险模式 hazardous pattern

在冲击地压发生前或发生过程中，反映煤岩体失稳及能量释放特征的典型数据特征组合。该模式通常通过历史监测数据、人工标注样本或经验分析提取，用于表征高冲击危险状态的主要特征。

3.17

危险指数 risk index

在经验打分法中，通过综合评分反映某一区域冲击危险程度的量化指标，通常由多个影响因素的加权得分计算得出，可用于划分冲击危险等级。

3.18

偏离度 deviation degree

表征当前监测数据与安全状态基准之间的差异程度，用于衡量系统是否偏离正常状态，是判断冲击危险性的重要指标之一。

3.19

特征匹配 feature matching

在冲击危险性表征过程中，通过比对输入数据与已知危险模式之间的特征相似性，判断当前状态是否接近历史高危状态的技术方法。

4 基本要求

4.1 数据核查与管理

冲击危险性定量表征前应对危险表征所需数据进行核查与管理，包括：

- a) 数据核查：根据不同冲击危险性表征方法的技术要求，对原始数据进行全面核查，确认数据来源可靠、内容齐全，并满足表征方法的输入条件；
- b) 数据管理：建立数据管理机制，包括数据分类、归档和追踪体系，实现数据的规范化整理和全过程追溯。

4.2 表征结果要求

为有效支撑现场决策，冲击危险性表征结果应包括以下内容：

- c) 冲击危险范围：采用绝对坐标或地理/工程位置信息对冲击危险的空间分布范围进行准确定义；应将整体空间合理划分为若干子区域，每个区域应具有明确的边界；
- d) 冲击危险等级：在冲击危险范围的每个子区域内，应明确其冲击危险等级；统一划分为四个等级：无、弱、中、强；
- e) 冲击危险影响因素权重：在冲击危险范围的每个子区域内，应包含各项冲击危险影响因素的权重分配结果；各因素权重之和应为 1，用以反映不同因素在该区域对冲击危险性的贡献程度。

5 经验打分法

5.1 适用范围与适用情况

5.1.1 适用范围

具备完整的地质资料、开采资料、防冲措施资料的矿井，资料应符合附录A中影响因素特征数据的规定。

5.1.2 适用情况

- a) 对危险性表征结果的定量精度要求不高；
- b) 对跨尺度建模与复杂地质条件表征需求较弱；
- c) 现场数据基础相对薄弱，缺乏完整的地应力、微震监测或多尺度地质建模资料；
- d) 需要在较短时间内完成冲击危险性评估，为采掘工作和安全管理提供初步参考。

5.2 表征流程

基于经验打分法开展冲击危险性定量表征的流程框架见图 1，具体步骤为：

- a) 资料收集：明确待表征区域尺度，收集并整理相关地质、开采及防冲措施等基础资料；
- b) 冲击危险指数计算：根据表征目标与资料特征，将表征区域划分为多个子区域，识别并提取冲击危险性表征的关键特征指标（应符合附录 A），计算子区域冲击危险指数；

- c) 表征结果生成：明确各子区域的冲击危险范围、危险等级及主控影响因素，对多个子区域的表征结果进行空间插值处理，生成表征区域中连续分布的冲击危险性表征结果；
- d) 结果评估与调整：判断最终表征结果是否满足表征要求，若不满足则返回步骤 a。

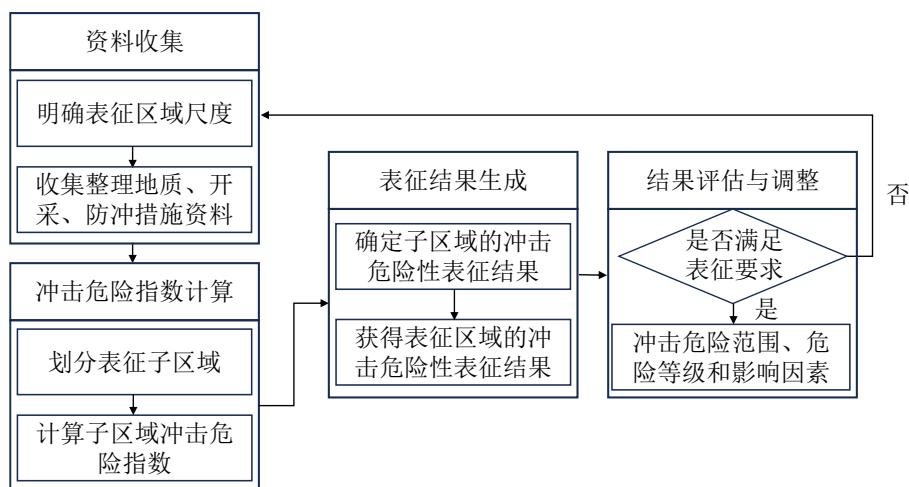


图1 基于经验打分法开展冲击危险性定量表征的流程框架

5.3 输入特征

基于经验打分法的冲击危险性定量表征，其输入内容应包括地质条件、开采条件及防冲措施中的影响因素及其对应的“危险指数分值”。应根据矿井具体地质与开采条件、数据可获取性以及表征目标的不同，从附录A中选择适用的指标进行打分。对于未列入附录A但对冲击危险性具有显著影响的新因素，应根据工程经验制定相应的危险指数赋分规则，并纳入表征体系。

“影响因素”对应的“危险指数分值”分为六个等级，由低到高依次为-2、-1、0、1、2、3；其中，-2表示对冲击地压有明显的减弱作用，-1表示对冲击地压较小的减弱作用，0表示对冲击地压无影响，1表示对冲击地压有较小的促进作用，2表示对冲击地压有明显的促进作用，3表示对冲击地压有较强的促进作用。

5.4 表征方法

根据表征对象和表征对象适用的冲击危险性输入指标，选取“影响因素”和对应的“危险指数分值”，冲击危险指数计算见式1：

$$W_t = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} W_{1,i} + \sum_{j=1}^{n_j} W_{2,j} + \sum_{k=1}^{n_k} W_{3,k}}{\sum_{i=1}^{n_i} W_{1,i} + \sum_{j=1}^{n_j} W_{2,j} + \sum_{k=1}^{n_k} W_{3,k}} \quad (1)$$

式中：

W_t —— 冲击危险指数，其数值应为介于0与1之间的实数；

$W_{1,i}$ 和 $W_{1,\bar{i}}$ —— 第*i*个地质类影响因素的实际危险指数分值和最大危险指数分值；

$W_{2,j}$ 和 $W_{2,\bar{j}}$ —— 第*j*个开采类影响因素的实际危险指数分值和最大危险指数分值；

$W_{3,k}$ 和 $W_{3,\bar{k}}$ —— 第*k*个防冲措施类影响因素的实际危险指数分值和最大危险指数分值；

n_i 、 n_j 、 n_k —— 地质类、开采类和防冲措施类影响因素数目。

5.5 表征结果

经验打分法的表征结果应包括以下内容：

- a) 冲击危险范围：表征区域中具有潜在冲击危险的空间分布范围，其边界应与评价区域一致；
- b) 冲击危险等级：冲击危险等级应为无冲击危险（ $W_t < 0.25$ ）、弱冲击危险（ $0.25 \leq W_t < 0.5$ ）、中冲击危险（ $0.5 \leq W_t < 0.75$ ）、强冲击危险（ $W_t \geq 0.75$ ）四类；

- c) 影响因素权重：地质与开采类影响因素的危险指数分值反映各影响因素的权重，取危险指数最高的影响因素作为该区域冲击危险性的主控因素。

6 统计分析法

6.1 适用范围与适用情况

6.1.1 适用范围

- a) 具备微震、地音、钻屑、采动应力等监测系统的煤矿；
- b) 具备连续、稳定的数据采集与接入系统的煤矿。

6.1.2 适用情况

- a) 对冲击危险性预测结果要求不高，侧重于对已有数据特征的归纳与描述；
- b) 对冲击地压发生的历史规律和当前状态进行统计性评估；
- c) 用于辅助经验打分法或为机器学习建模提供特征工程支持。

6.2 表征流程

基于统计分析法开展冲击危险性定量表征的流程框架见图2，具体步骤为：

- a) 采集感知监测数据（符合数据接入细则）并进行预处理；
- b) 构建指标体系，依据相似工作面或历史数据，确定基准值与阈值；
- c) 采用绝对值分析与趋势分析方法计算偏离度；
- d) 进行危险性等级划分；
- e) 输出表征结果，包括危险程度、主控因素及空间位置。

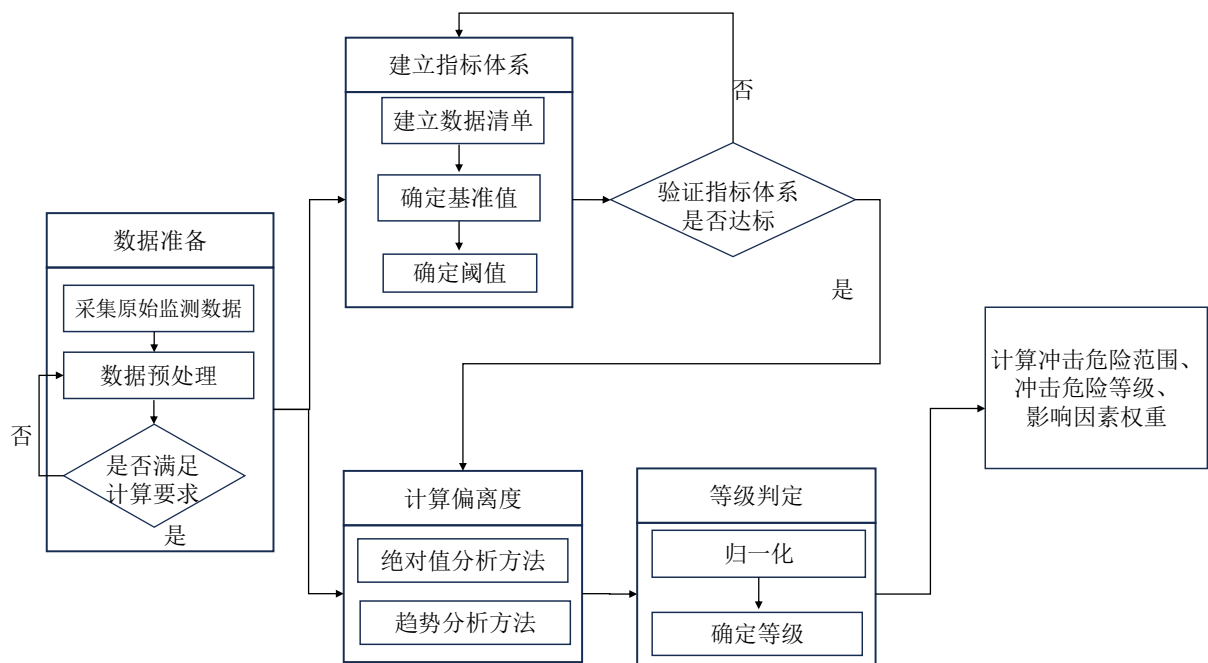


图2 基于统计分析法开展冲击危险性定量表征的流程框架

6.3 数据要求

依据《煤矿冲击地压感知数据接入细则》要求，所用监测数据应包括以下类型及格式要求，其中位置数据用来确定危险范围，记为 P ；监测数据用来确定危险等级，记为 V ，相关数据清单见表1。

表1 基于统计分析法开展冲击危险性定量表征的数据清单

数据类型	数据字段要求	数据格式要求
微震数据	震源位置P、能量V	详见接入规范第 5.1.4 节
钻屑数据	钻屑位置P、标准/实际煤粉量V	详见接入规范第 5.2.6 节
应力监测	应力传感器位置P、监测应力值V	详见接入规范第 5.1.3.1 节
采动应力数据	支架位置P、工作阻力V	详见接入规范第 5.1.2 节
注：所述接入规范为《MT/T 1201.5-2023 煤矿感知数据联网接入规范 第5部分：冲击地压》		

6.4 表征方法

选取条件相似表征对象的监测参数，利用统计分析方法确定的正常波动范围，明确矿井安全状态基准，通过计算需要表征对象监测数据与正常值的偏离程度 D ，确定不同等级冲击危险性的临界值。

6.4.1 绝对值分析方法

将相似工作面的监测数据参数按升序进行排序，通过设定百分位数划分正常数据范围，冲击危险性利用数据偏离程度表示，计算公式见式 2。

$$D = \frac{V - P_{D1}}{P_{D2} - P_{D1}} \tag{2}$$

式中：

P_{D1} —— 安全阈值；

P_{D2} —— 危险阈值，当偏离程度大于1时，表示超过危险临界值。

式2计算得到的偏离度越大，冲击危险性越高。推荐采用百分位法设定阈值，其中安全阈值取历史数据监测值的85%~90%百分位数，危险阈值取90%~99%百分位数，并结合现场工程实际进行调整。

6.4.2 趋势分析方法

应通过时间序列分析方法建立各监测参数的动态变化基准模型，并依据实测数据相对于基准值的持续偏离程度及其变化趋势，划分不同等级的冲击危险性临界值。

推荐采用滑动时间窗口内的监测数据均值作为动态基准值，冲击危险等级应根据实测值相对于该基准值的持续偏离程度进行判定，计算公式见式3。

$$D = \frac{|V - \mu_t|}{\sigma_w} \tag{3}$$

式中：

μ_t 和 σ_w —— 时间窗口内监测数据的均值和方差；

V —— 需要表征的监测数据。

式3中时间窗口长度为人为划定值，应根据监测数据采集频率和矿井情况综合确定。

6.4.3 计算结果归一化

采用归一化 G 值作为输出指标。归一化 G 计算方法采用最大值减最小值方法，计算公式见式 4。

$$G = \frac{D - D_{min}}{D_{max} - D_{min}} \tag{4}$$

式中：

D_{min} 和 D_{max} —— 预先设定的合理偏离值最小值和最大值。

若 $D < D_{min}$ ，则 D 取 D_{min} ；同理，若 $D > D_{max}$ 则 D 取 D_{max} 。对绝对值分析方法和趋势分析方法的结果求取平均值，得到最终的量化表征结果 G 。

6.5 表征结果

6.5.1 危险范围划定

通过监测数据的类型和位置信息，来确定危险范围，具体如下：

- a) 微震：震源位置半径50~100米为主；
- b) 应力监测：应力计附近5~10米范围；
- c) 支架阻力：顶板活动区域，如支架布置区域；
- d) 钻屑：钻屑附近5~10米范围。

6.5.2 冲击危险等级

将表征结果划分为四个等级（见表2），再结合持续时间，确定基于统计分析的冲击危险性分析。

表2 基于统计分析的冲击危险等级划分

判定标准	$G < 0.25$	$G \geq 0.25$ 且 $G < 0.5$ 持续3个周期	$G \geq 0.5$ ，或 $G \geq 0.25$ 且 $G < 0.5$ 持续5个周期	$G \geq 0.75$ ，且3 个周期单调递增
危险性	无冲击危险	弱冲击危险	中等冲击危险	强冲击危险

6.5.3 影响因素权重计算

基于统计分析法的影响因素权重计算，应综合考虑冲击危险区的空间分布范围及各类监测数据的偏离度。具体方法如下：

- a) 影响因素筛选：根据冲击危险空间范围，确定与冲击危险性相关的主要地质条件、开采条件影响因素；
- b) 权重赋值：对各类监测数据的偏离度进行归一化计算，为监测数据范围内影响因素赋予相应的权重值；
- c) 主控因素判定：若某类监测数据在对应危险空间范围内的偏离度显著高于其他类型，则判定该类因素为冲击危险性的主控影响因素。

7 机器学习法

7.1 适用范围与适用情况

7.1.1 适用范围

- a) 具备完整的地质资料、开采资料、防冲措施资料及监测资料的矿井；
- b) 具备必要的信息化基础设施的矿井，能够实现数据采集、传输、存储和分析。

7.2 适用情况

- a) 需要对冲击危险范围、危险等级和影响因素权重进行动态、精细化评估；
- b) 对表征结果的准确性和时效性要求较高，期望实现冲击危险性的超前预测；
- c) 具备一定数据处理与建模能力的技术团队支持模型构建、训练与优化。

7.3 表征流程

采用机器学习方法进行冲击危险性表征如图3所示（示例见附录C），包括：

- a) 数据预处理：对地质条件、开采条件、防冲措施及监测数据等原始信息进行量化处理，并利用数据清晰与增强方法提升数据质量，以满足建模要求；
- b) 数据集构建：明确样本输入特征与输出指标（即冲击危险性表征结果），建立表征数据集；依据时间序列划分样本数据，处理类别不平衡问题，形成训练集、验证集和测试集；
- c) 算法选择与模型设计：结合数据特征和应用场景，合理选择机器学习算法，并设计模型结构；
- d) 模型训练与评估：利用训练集完成模型训练，通过验证集调整模型参数与结构，使用测试集或实际场景数据评估模型性能，确保其预测准确性和应用可靠性；
- e) 冲击危险性表征结果输出：模型运行完成后，应输出包括冲击危险范围、危险程度及影响因素权重的量化表征结果。

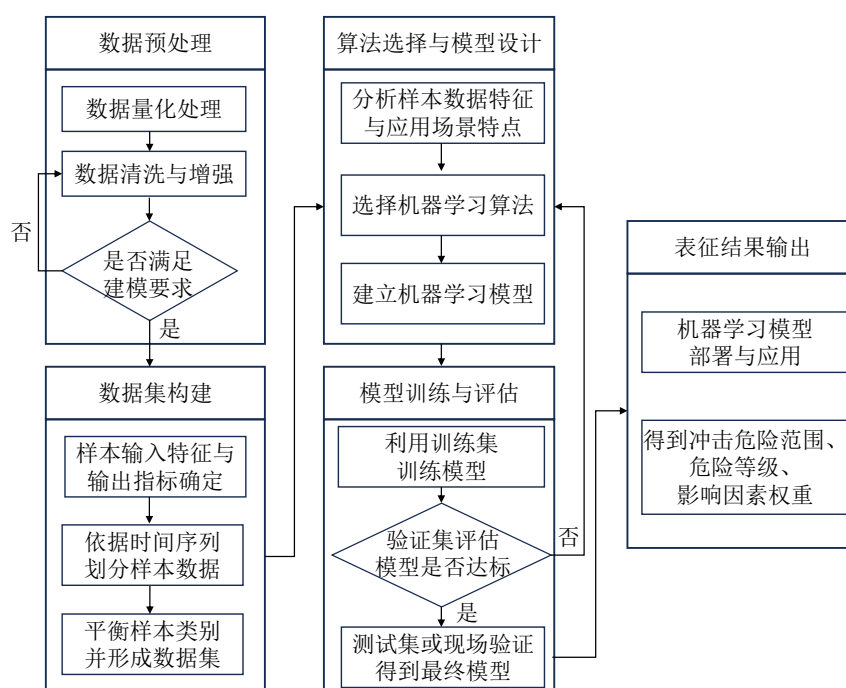


图3 基于机器学习法开展冲击危险性定量表征的流程框架

7.4 输入数据处理

基于机器学习的冲击危险性定量表征方法，应对原始数据进行系统清洗、整合与特征提取，转化为满足建模要求的结构化数据。模型输入数据应包括煤矿地质条件、开采条件、防冲措施及冲击地压监测数据四类信息。各类数据的具体内容、特征描述及数据类型要求按附录B（规范性）的规定执行。

7.5 数据集构建与处理

冲击危险定量表征数据集的构建与处理，应遵循以下要求：

- 基于历史冲击事件记录、经验打分法或统计分析法，计算某一时空范围内煤岩体的冲击危险范围、危险等级和影响因素权重；
- 以冲击危险性表征的输入数据作为样本特征，以表征结果作为样本标签，建立冲击危险性定量表征数据集；
- 按照时间顺序将数据集划分为训练集、验证集和测试集，保证样本在各子集间不重复出现；
- 采用不平衡数据处理算法，保证各子集中不同危险等级样本的分布均衡。

7.6 表征方法

机器学习法基于异常检测、时序趋势分析与特征匹配，建立输入与危险状态之间的映射关系，实现冲击危险性的自动化判定。

7.6.1 表征方法

7.6.2 机器学习方法选择

在基于机器学习算法中，判定冲击危险性的方法主要包括：

- 异常数据检测：利用历史数据建立正常状态下的统计分布模型，确定矿井安全状态基准与危险状态特征，识别输入数据的异常偏移情况，根据明确冲击危险性，相关方法包括孤立森林、局部异常因子检测等；
- 时序趋势分析：捕捉数据随时间演变的趋势特征，识别突发性波动或长期积累性变化，从而预判是否进入冲击危险状态，相关方法包括循环神经网络、长短时记忆网络等；

- c) 综合特征匹配：利用人工标注冲击危险性的数据，建立输入数据与已知危险状态之间的映射关系，通过计算输入数据与危险模式的特征匹配度确定冲击危险性，相关方法包括支持向量机、深度神经网络等。

7.6.3 模型建立

机器学习模型的建立应满足以下要求：

- a) 模型输入层应兼容矿井地质条件、开采条件、防冲措施及监测数据等多源数据；
- b) 模型中间层应具备较强的非线性建模能力，能够有效刻画输入特征与冲击危险性之间的复杂映射关系；
- c) 模型输出层应包含冲击危险范围、危险等级及影响因素权重等关键指标。

7.6.4 模型训练与评估

模型训练与评估需遵循以下流程，

- a) 模型训练：运用训练集对机器学习模型迭代训练，通过反向传播、梯度下降等优化算法对模型权重进行动态优化，利用验证集对模型结构与超参数进行优化；
- b) 模型评估：模型验证应基于实际场景，通过预测结果与真实数据的对比分析，评估模型在冲击危险性空间范围、危险程度和影响因素权重等方面的预测准确性与稳定性。

7.7 表征结果

表征结果应通过训练完成的机器学习模型对新输入数据进行推理生成，其内容应包含：

- a) 冲击危险范围：将模型输出结果处理为绝对坐标或地理/工程位置信息，明确危险区域的边界与分布特征。
- b) 冲击危险等级：模型输出冲击危险程度是0~1之间的实数 D ，冲击危险等级应划分为无冲击危险（ $D < 0.25$ ）、弱冲击危险（ $0.25 \leq D < 0.5$ ）、中冲击危险（ $0.5 \leq D < 0.75$ ）、强冲击危险（ $D \geq 0.75$ ）；
- c) 影响因素权重：采用特征重要性评估方法，计算各输入特征对输出结果的影响程度，并对影响程度进行归一化处理，结合各影响因素所对应的特征，确定其对冲击危险性的最终影响权重值。

8 煤矿冲击危险性定量通用表征流程

煤矿冲击危险性定量表征如图4所示，包括：

- a) 根据矿井数据基础、技术条件及工程需求，合理选择适用的冲击危险性表征方法，包括但不限于经验打分法、统计分析法或机器学习方法；
- b) 收集并整理相关地质条件、开采参数、防冲措施及监测数据等基础资料，进行数据筛选、清洗和特征提取，形成符合建模或计算要求的数据；
- c) 根据不同方法的技术特点，确定正常或安全状态下的参考基准。经验打分法应基于历史经验与工程实践设定无冲击危险状态的评分基准；统计分析法应基于历史监测数据确定参数的正常波动范围；机器学习法则应通过训练样本识别“安全模式”的特征分布；
- d) 基于输入数据与安全状态基准之间的偏离程度、匹配度或相似性，开展冲击危险性计算。经验打分法通过综合评分得出冲击危险指数，当其超过设定阈值时判定为危险状态；统计分析法通过计算监测数据与正常值的偏离度确定危险等级；机器学习法通过计算输入数据与危险模式的特征匹配度，输出冲击危险性；
- e) 输出冲击危险范围、危险等级及影响因素权重等关键指标，判断表征结果是否满足需求，若不满足则返回 a，最终编制冲击危险性表征报告。

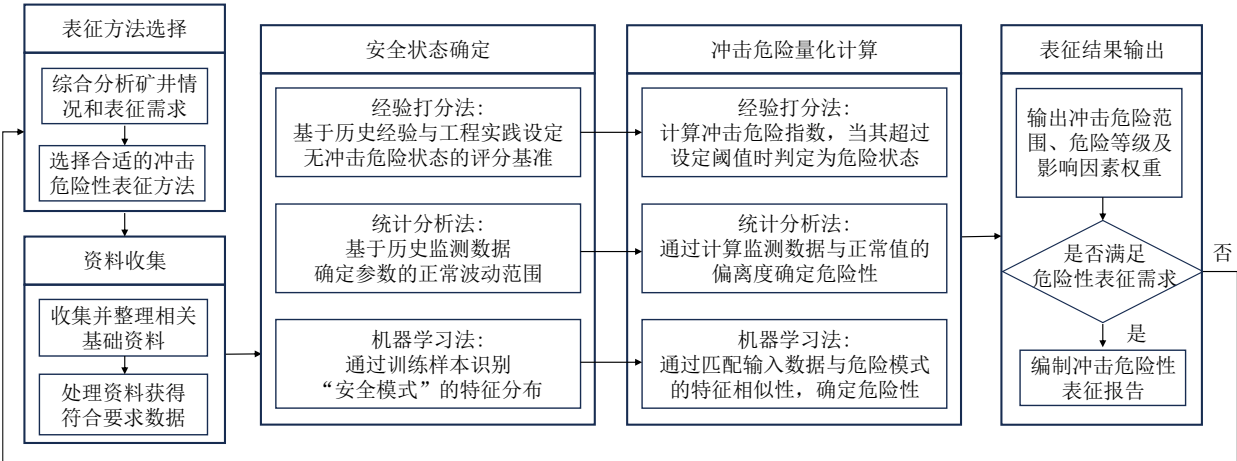


图4 煤矿冲击危险性定量通用表征流程框架图

附录 A（规范性）

表A.1~A.3给出了评价冲击危险性的地质类和开采类影响因素、影响因素定义、影响因素分类及对应危险指数分值。

表A.1 评价冲击危险性的地质类影响因素及对应危险指数分值

序号	影响因素	影响因素定义	影响因素分类	危险指数分值
1	W_1	开采深度 h	$h < 400\text{m}$	1
			$400 \leq h < 800\text{m}$	2
			$h \geq 800\text{m}$	3
2	W_2	顶板中坚硬厚（ $h \geq 10\text{m}$ 、 $R_c \geq 60\text{MPa}$ ） 岩层距煤层的距离 d	$d > 100\text{m}$	1
			$50 < d \leq 100\text{m}$	2
			$d \leq 50\text{m}$	3
3	W_3	开采区域内构造复杂程度	简单	1
			中等	2
			复杂	3
4	W_4	开采区域内构造应力 集中程度	$\frac{\sigma_{\text{构造}} - \sigma_{\text{正常}}}{\sigma_{\text{正常}}} < 10\%$	0
			$10\% \leq \frac{\sigma_{\text{构造}} - \sigma_{\text{正常}}}{\sigma_{\text{正常}}} < 20\%$	1
			$20\% \leq \frac{\sigma_{\text{构造}} - \sigma_{\text{正常}}}{\sigma_{\text{正常}}} < 30\%$	2
			$\frac{\sigma_{\text{构造}} - \sigma_{\text{正常}}}{\sigma_{\text{正常}}} \geq 30\%$	3
5	W_5	顶板岩层厚度特征参数 L_{st}	$L_{\text{st}} < 50$	0
			$50 \leq L_{\text{st}} < 80$	1
			$80 \leq L_{\text{st}} < 90$	2
			$L_{\text{st}} \geq 90$	3
6	W_6	煤的抗压强度 R_c	$R_c < 7\text{MPa}$	0
			$7 \leq R_c < 14\text{MPa}$	1
			$14 \leq R_c < 20\text{MPa}$	2
			$R_c \geq 20\text{MPa}$	3
7	W_7	煤的弹性能量指数 W_{ET}	$W_{\text{ET}} < 2$	0
			$2 \leq W_{\text{ET}} < 5$	1
			$5 \leq W_{\text{ET}} < 10$	2
			$W_{\text{ET}} \geq 10$	3
8	W_8	冲击能指数 K_E	$K_E < 1.5$	0

			$1.5 \leq K_E < 5$	1
			$5 \leq K_E < 10$	2
			$K_E \geq 10$	3
9	W_9	动态破坏时间	$DT > 500$	0
			$50 < DT \leq 500$	1
			$DT \leq 50$	2
10	W_{10}	煤层厚度变异系数 γ	$\gamma < 0.15$	0
			$0.15 \leq \gamma < 0.3$	1
			$0.30 \leq \gamma < 0.40$	2
			$\gamma \geq 0.4$	3

表A.2 评价冲击危险性的开采类影响因素及对应危险指数分值

序号	影响因素	影响因素定义	影响因素分类	危险指数分值
1	W_1	保护层开采年限	$<3a$	0
			$\geq 3a$	1
2	W_2	保护层与被保护层的距离	$<50m$	0
			$\geq 50m$	1
3	W_3	距上保护层开采 遗留煤柱的水平距离 h_z	$h_z > 60m$	0
			$30m < h_z \leq 60m$	1
			$0m < h_z \leq 30m$	2
			$h_z \leq 0m$ (煤柱下方)	3
4	W_4	与邻近采空区的关系	实体煤工作面	0
			一侧采空	1
			两侧采空	2
			三侧及以上采空	3
5	W_5	区域工作面接续情况	交替开采	-1
			顺序开采	0
			孤岛工作面	2
6	W_6	工作面长度 L_m	$L_m > 300m$	0
			$150m < L_m \leq 300m$	1
			$100m < L_m \leq 150m$	2
			$L_m \leq 100m$	3
7	W_7	区段煤柱宽度 d	$d < 3m$, 或 $d > 50m$	0
			$3m \leq d < 6m$	1
			$6m \leq d < 10m$	2
			$10m \leq d \leq 50m$	3
8	W_8	留底煤厚度 t_d	$t_d = 0m$	0
			$0m < t_d < 1m$	1
			$1m \leq t_d < 2m$	2
			$t_d \geq 2m$	3
9	W_9	向采空区推进的工作面 停采线与采空区的距离 L_{mc}	$L_{mc} > 300m$	0
			$200m < L_{mc} \leq 300m$	1
			$100m < L_{mc} \leq 200m$	2
			$L_{mc} \leq 100m$	3
10	W_{10}	向落差大于 10m 的断层推进的工作面 与断层的距离 L_d	$L_d > 100m$	0
			$50m < L_d \leq 100m$	1
			$20m < L_d \leq 50m$	2
			$L_d \leq 20m$	3

11	W_{11}	向煤层倾角剧烈变化（ $>15^{\circ}$ ）的向斜或背斜推进的工作面与之的距离 L_z	$L_z>50\text{m}$	0
			$20\text{m}<L_z\leq50\text{m}$	1
			$10\text{m}<L_z\leq20\text{m}$	2
			$L_z\leq10\text{m}$	3
12	W_{12}	向煤层侵蚀、合层或厚度变化部分推进的工作面接近煤层变化部分的距离 L_b	$L_b>50\text{m}$	0
			$20\text{m}<L_b\leq50\text{m}$	1
			$10\text{m}<L_b\leq20\text{m}$	2
			$L_b\leq10\text{m}$	3
13	W_{13}	工作面内部遗留巷道情况	无	0
			1 条	1
			多条	2
14	W_{14}	是否属于异形工作面	否	0
			是	2
15	W_{15}	巷道断面	宽巷	0
			非宽巷	1
16	W_{16}	向采空区掘进的巷道其停掘位置与采空区的距离 L_{jc}	$L_{jc}>150\text{m}$	0
			$100\text{m}<L_{jc}\leq150\text{m}$	1
			$50\text{m}<L_{jc}\leq100\text{m}$	2
			$L_{jc}\leq50\text{m}$	3
17	W_{17}	向落差大于 3m 的断层推进的巷道其迎头与断层的距离 L_d	$L_d>100\text{m}$	0
			$50\text{m}<L_d\leq100\text{m}$	1
			$20\text{m}<L_d\leq50\text{m}$	2
			$L_d\leq20\text{m}$	3
18	W_{18}	向煤层倾角剧烈变化（ $>15^{\circ}$ ）的向斜或背斜推进的巷道其迎头与之的距离 L_z	$L_z>50\text{m}$	0
			$20\text{m}<L_z\leq50\text{m}$	1
			$10\text{m}<L_z\leq20\text{m}$	2
			$L_z\leq10\text{m}$	3
19	W_{19}	向煤层侵蚀、合层或厚度变化部分推进的巷道接近煤层变化部分的距离 L_b	$L_b>50\text{m}$	0
			$20\text{m}<L_b\leq50\text{m}$	1
			$10\text{m}<L_b\leq20\text{m}$	2
			$L_b\leq10\text{m}$	3

注：巷道断面面积小于 20m² 为非宽巷，大于等于 20m² 为宽巷。

表A.3 评价冲击危险性的防冲措施类影响因素及对应危险指数分值

序号	影响因素	影响因素定义	影响因素分类	危险指数分值
1	W_1	煤层钻孔卸压	未钻孔卸压	0
			按照国标进行钻孔卸压	-1
2	W_2	开采保护层	未开采保护层	0
			按照国标开采保护层	-1
3	W_3	顶板深孔爆破	未进行顶板深孔爆破	0
			按照国标进行顶板深孔爆破	-2
4	W_4	顶板水压致裂	未进行顶板水压致裂	0
			按照国标进行顶板水压致裂	-2
注：本部分所述国标分别指代是： 《GB/T 25217.10-2019 冲击地压测定、监测与防治方法 第10部分:煤层钻孔卸压防治方法》 《GB/T 25217.12-2019 冲击地压测定监测与防治方法 第12部分:开采保护层防治方法》 《GB/T 25217.13-2019 冲击地压测定监测与防治方法 第13部分:顶板深孔爆破防治方法》 《GB/T 25217.14-2020 冲击地压测定、监测与防治方法 第14部分:顶板水压致裂防治方法》				

附 录 B （规范性）

表B.1给出了基于机器学习的冲击危险性定量表征所需数据的类别、内容、关键特征要求等信息。

表 B. 1 基于机器学习的冲击危险性定量表征所需数据

数据类别	数据内容	关键特征要求	数据来源	数据类型要求
地质条件	煤岩层	煤岩物理力学性质、煤层范围、煤层厚度、煤岩相变、埋深	地质勘探报告、 钻孔柱状图	数值型、文本型、 坐标型、图像型
	顶底板岩层	顶底板岩层的类型、厚度及其物理力学性质	地质勘探报告、 钻孔柱状图	数值型、文本型、 类别型
	断层	断层位置、类型、落差、走向、倾向	地质勘探报告、 地质构造分析报告	数值型、文本型、 坐标型、图像型
	褶曲	核部、翼部、轴面、轴迹、枢纽位置或坐标、褶曲类型	地质勘探报告、 地质构造分析报告	文本型、坐标型、 图像型
	地应力分布	测点坐标或位置、最大主应力、最小主应力的大小及方向	地应力测试报告	数值型、文本型、 坐标型
开采条件	工作面	名称、范围坐标、长度、宽度、埋深	采掘工程平面图、 工作面作业规程	数值型、文本型、 坐标型
	巷道	名称、范围坐标、长度、断面尺寸与形状、埋深、巷道类型	采掘工程平面图、 工作面作业规程	数值型、文本型、 类别型、坐标型
	煤柱	煤柱的位置、尺寸、形状及承载状态	采掘工程平面图、 工作面作业规程	数值型、类别型、 坐标型
	采空区 掘进或回采速度	空间范围、充填状态 单位时间内推进的距离	采掘工程平面图 日报表	数值型、类别型 数值型
防冲措施	煤层钻孔卸压	钻孔位置或坐标、深度、直径、数量	防冲措施报告、 日报表	数值型、坐标型
	开采保护层	保护层位置、厚度、距离	防冲措施报告、 日报表	数值型、坐标型
	顶板爆破	爆破参数、施工位置	防冲措施报告、 日报表	数值型、坐标型
	顶板水压致裂	压裂位置、压裂压力、流量、持续时间	防冲措施报告、 日报表	数值型、坐标型
	微震监测数据	时间、震源位置、能量	微震监测系统	数值型、坐标型
监测数据	支架阻力数据	时间、支架位置、工作阻力	支架系统	数值型、坐标型
	钻屑数据	时间、钻屑位置、 标准/实际煤粉量	钻屑记录表、 日报表	数值型、坐标型、 类别型
	应力数据	应力传感器位置、监测应力值	应力监测系统	数值型、坐标型

附录 C（资料性）

基于机器学习的冲击危险性定量表征示例

C.1 数据预处理

某煤矿矿井具备较完整的地质勘探、开采记录、防冲措施及微震监测等基础数据资源。为提升冲击地压风险预警能力，拟采用深度学习方法对该矿井采区工作面区域开展冲击危险性定量表征。在建模前，首先对原始数据进行系统性预处理。

预处理内容包括：去除缺失值与异常值，确保数据一致性；对非结构化描述类字段进行编码转换；提取时间序列统计特征（如滑动窗口均值、方差、最大值等）；对低频但高风险样本采用SMOTE过采样策略增强代表性；对不同量纲数据进行归一化处理，以提升模型稳定性。最终形成统一格式的结构化数据集，用于后续建模分析。

C.2 数据集构建

在完成数据预处理的基础上，进一步构建用于深度学习建模的数据集。输入特征应包含地质条件、开采条件、防冲措施以及监测数据等多源信息，应符合附录B规定。

以天为时间单位，处理地质条件、开采条件、防冲措施和前一天的监测数据为样本特征；基于统计分析和监测数据，计算未来一天冲击危险范围、危险程度和影响因素权重，作为样本标签。按照时间顺序划分样本数据为训练集（70%）、验证集（15%）和测试集（15%），通过SMOTE方法解决类别不平衡问题。

C.3 算法选择与模型设计

鉴于数据维度较高且存在复杂的非线性关系，同时考虑到需要输出多维表征结果（危险范围、危险程度、影响因素权重），我们选择了深度神经网络（DNN）作为主要建模工具，并结合卷积神经网络（CNN）和长短时记忆网络（LSTM）模块，构建多任务联合学习模型。

该深度学习模型采用多模态结构，输入层接收包含数值型、类别型等类型特征的结构化数据，并对类别型变量进行嵌入编码处理；中间层融合LSTM网络以捕捉监测数据的时间演化趋势，结合CNN模块提取地质与开采参数中的空间相关性，再通过全连接层整合多源特征，形成综合表征；输出层分别实现冲击危险等级（回归输出，根据冲击危险程度人为划分）、危险范围（基于位置编码映射）以及影响因素权重（特征重要性评估方法分析）的多维度冲击危险性表征结果。

C.4 模型训练与评估

在完成模型设计后，利用训练集对深度神经网络模型进行迭代训练，并在验证集上调整超参数（如学习率、批次大小、隐藏层单元数等）。通过交叉验证防止过拟合，并引入早停机制提高训练效率。

在测试集评估结果显示，模型在多个维度上的表现均达到较高水平，能够准确预测冲击危险程度，合理划分危险区域，并有效识别影响冲击地压发生的关键驱动因素。

C.5 表征结果输出

完成模型训练后，将其部署至矿井安全监测系统，采用本地服务器与边缘计算架构实现对地质、开采、防冲措施及监测数据的实时接入与推理计算。模型输出包括冲击危险等级、空间危险范围分布，以及通过特征重要性分析得出的影响因素权重，为矿井冲击地压风险的动态预警与防控提供多维度量化依据。