

基于多源数据融合的岩石破坏失稳预警系统研究

宋清蔚¹, 侯晨¹, 朱万成¹, 徐晓冬¹, 刘溪鹤¹, 张鹏海¹

(1.东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819)

摘要:受制于监测手段, 岩石损伤与破坏过程中的动态特征提取十分困难, 基于单一指标变量的岩石失稳破坏预警准确性不高。通过构建动态应变、声发射和散斑端部多源监测系统, 采用 Lab VIEW 二次开发方式实时获取岩石受载过程点应变、表面变形、内部破裂信息, 选取相应的证据体指标, 基于 D-S 证据理论实现多源数据融合的边缘计算, 最后通过 HTTP、WebSocket 等数据传输协议实时传输数据, 完成“端—边—云”3 层架构的岩石失稳破坏过程监测预警系统搭建, 实现了多源监测数据的实时采集、动态融合和破坏失稳预警。验证实验表明该系统在破坏时间、损伤表征方面都有更为准确的预测, 实现了基于多源异构监测数据融合下的岩石失稳破坏预测预警。

关键词: 多源数据融合; 岩石破坏; 实时监测; 失稳预警

中图分类号: TD672

文献标识码: A

Research on rock failure and instability warning system based on multi-source data fusion

Song Qingwei¹, Hou Chen¹, Zhu Wancheng¹, Xu Xiaodong¹, Liu Xige¹, Zhang Penghai¹

(1.School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819,China)

Abstract: Constrained by the monitoring means, it is very difficult to extract dynamic features in the process of rock damage and destruction, and the accuracy of early warning of rock instability and destruction based on a single indicator variable is not high. Through the construction of dynamic strain, acoustic emission and scattering end multi-source monitoring system, Lab VIEW secondary development method is used to obtain real-time point strain, surface deformation, internal rupture information of the rock loading process, select the corresponding body of evidence indicators, and realise the edge computation based on the theory of D-S evidence for the fusion of multi-source data, and then finally transmit the data in real time through HTTP, WebSocket and other data transmission protocols. Finally, the monitoring and early warning

system of rock instability damage process with "end-edge-cloud" 3-layer architecture is completed, which realises real-time collection, dynamic fusion and destabilisation early warning of multi-source monitoring data. Verification experiments show that the system has more accurate prediction in terms of damage time and damage mode, and realises the prediction and warning of rock instability damage based on the fusion of heterogeneous monitoring data from multiple sources.

Keywords: Multi-source data fusion; rock failure; real-time monitoring; instability warning

岩石损伤与破坏的预测预警是岩石力学的基本问题，也是灾害预测的本质问题^[1]。矿山工程现场条件复杂，除了机理因素，还有很多不稳定、不可控的因素会对矿山安全造成影响，这给探寻岩石失稳破坏规律带来了干扰；同时，由于矿山开采的条件限制，不利于开展现场测试，这将影响理论、方法、技术的创新发展^[2]。因此，借助于室内岩石力学实验开展岩石损伤与失稳破坏特性的研究，可为指导矿山灾害的预测预警提供重要的理论基础。

室内实验具有多源监测的条件，能够获得加载过程中的多源监测数据，可以从声、光、力等多角度反映岩石失稳破坏过程。岩石是不透明材料，因此需要研究岩石破裂过程中的物理场特征来实现对岩石失稳破裂的研究。物理场主要包括破裂场、位移场、应力场、电磁场、温度场，其中电磁场和温度场环境敏感性强，信号微弱，难以采集，难以通过电磁场和温度场来揭示岩石失稳破裂的规律。岩石内部破裂场的特征可以通过声发射方法获取，表面变形场特征可以通过光学散斑方法、应变方法获取，宏微观力学响应可以通过力学应力应变方法获得。因此，本文结合课题组实际情况，选择了应变数据、声发射数据以及散斑数据作为监测手段。

通过应变片可以感知岩石表面的细微应变，测得岩石的横向应变和轴向应变，结合岩石破坏过程中的其他数据，根据绘制的应力-应变曲线，可以对岩石的破坏过程进行分析^[3-4]；声发射设备可以监测岩石破坏过程中岩体内部微断裂和能量等多种信息，声发射参数同时也包含着岩石应力水平和破裂面扩展的丰富信息，将声发射参数在岩石试样加载过程中的前兆规律作为岩石失稳破裂的预警标志已经得到学者们的一致认同^[5-6]；数字散斑技术通过计算机视觉技术，通过事先绘制在岩石试件表面上的标记点，对试样图片上标记点的位置进行分析，可以根据标记点的变化给出试件局部的位移与应变信息，得到全局的位移场和应变场，

从而获取岩石破裂面变形的信息^[7-9]。而上述采用的实验手段，主要是在实验结束之后对获取的监测数据进行分析、处理，无法做到对岩石损伤与破坏过程中的数据进行实时分析和处理，自然不能实时、直观地展示实验过程中被测物的形变情况和破坏过程。目前现有的实践中都使用“先采图后处理”的分析方式，缺少实时的变形、破坏过程测量手段和方法，使得分析效果大打折扣^[10-11]，岩石的实时预测预警更是无从谈起。

而当前对岩石失稳预测预警的评价方法中，多是单指标数据用于预警，难以窥得失稳破坏过程全貌；考虑多源数据融合处理能够从多维度表征岩石失稳破裂过程，能更贴近实际失稳破裂情况^[12]。但当前对多源数据的处理仍处于比较初步的阶段，不同类型数据之间不能做到协同处理，不同指标数据所反映的岩石失稳破裂情况差异较大，有时甚至会出现互相矛盾的情况，如何融合多源数据进行岩石失稳的预测预警仍需进一步研究^[13-14]。

因此有必要开发一套系统,打破数据孤岛,实现基于数据融合的岩石损伤破坏过程的实时预警。基于此,本文通过对动态应变仪、声发射仪和散斑监测设备的二次开发,实时处理应变、声发射、散斑数据,引入 D-S 证据理论对监测结果进行融合,搭建了“端-边-云”岩石失稳预警系统,最终实现岩石试样受载过程破坏失稳的预测预警。

1 系统设计与架构

1.1 系统设计思路

为了实现岩石失稳破裂的实时预警,需要实时获取岩石加载过程中的各种监测数据并进行实时处理。在单轴加载过程中应变、声发射、散斑会产生大规模的数据,为了缓解上述密集计算带来的问题,本文引入了“端-边-云”协同机制,构建包含设备终端、边缘计算、云端服务相互协同的架构。“端-边-云”协同机制能够对数据处理任务进行合理分工,充分发挥边缘计算的作用,减轻云端计算压力,提升整体系统的数据处理效率,降低数据传输的时延,为数据实时处理、岩石失稳破裂预测预警提供架构基础。

1.2 系统架构

系统整体架构如图 1 所示,从下往上依次为“端”、“边”、“云”组成部分。“端”表示的是监测设备终端,包括动态应变仪、声发射采集仪、相机等力学响应实时监测设备,用于感知岩石变形破坏过程中的实时多源力学响应,“端”中主要进行数据实时采集以及将数据发送到“边”中进行处理,包括应变数据、声发射振铃数能量、散斑照片等。

“边”表示边缘计算，主要用于数据的智能分析自动处理，是系统的核心内容。“边”中主要对实时数据进行处理计算以及将数据发送到“云”中进行展示。应变及声发射数据直接通过 HTTP 客户端接收数据继而进行处理，散斑数据则通过 Python OS 模块对文件夹进行监测。应变数据在进行原始数据储存之后，通过动态窗口的方式计算出体应变拐点，最终通过拐点量化损伤；因为声发射数据属于被动触发，因而在 HTTP 接收时直接储存至数据库中进行累积，每秒钟对结果进行读取并发送，通过无量纲曲线的方法建立切线角与损伤之间的关系；散斑数据通过 Python OS 获取之后，通过稠密光流法计算获得位移场及应变场，最终从局部到整体利用体应变矩阵对散斑数据进行量化损伤。应变、声发射、散斑损伤量化结果通过 WebSocket 发送到云中，散斑照片则由云端通过 FileSystemWatcher 感知。



图1 系统“端-边-云”架构图

“云”表示的是云端服务，用于监测数据的可视化展示并实时更新预测信息，借助低代码技术搭建云端服务平台。“云”主要对“端”中采集到的原始数据以及“边”中的计算结果进行展示。利用低代码平台搭建起云端展示界面，对多源监测数据快速集成展示。界面展示内容主要包括实验基本信息，应变、声发射、散斑的原始数据以及损伤表征的岩石失稳破裂量化值。

云边端协同通信模块，为了对监测数据进行实时处理，数据的实时传输是必须要保证的。图中，从下往上依次为“端”、“边”、“云”组成部分，从数据处理的角度来看，依次为“数据获取”、“数据处理”、“数据展示”。首先，动态应变仪和声发射采集仪将实时监测到的应变和声发射数据通过 HTTP 数据传输协议发送到数据处理模块；EOS 90D 相机采集到的散斑数据，则通过 EOS Utility 工具传输到数据处理模块。其次，在数据处理模块中，三种数据

分别按照对应的算法进行处理。最后，通过 WebSocket 数据传输协议将应变和声发射数据发送到数据展示模块；散斑图像数据则由数据展示模块通过#.NET-FileSystemWatcher 监测文件处理情况直接获取。

2 基于 D-S 证据理论的多源数据融合的岩石破坏预警方法

2.1 D-S 证据理论介绍与改进

D-S 证据理论是建立在一个非空集合 θ 上的理论， θ 称为识别框架，或称假设空间， θ 由一系列互斥且穷举的基本命题组成，主要包括基本概率分配、信任函数、似然函数、信任区间等几个基本要件^[15-16]。对于问题域中的任意命题 A ，都应属于幂集 2^θ 。

1) 基本概念

在 2^θ 上定义基本概率分配(Basic Probability Assignment)。在识别框架上，使用函数 m 来计算假设空间中每个元素的概率，函数 m 被称为 mass 函数，且满足识别框架中每个元素的概率之和等于 1:

$$m(\emptyset) = 0 \quad (2.1)$$

$$\sum_{A \subseteq \theta} m(A) = 1 \quad (2.2)$$

其中，使得 $m(A) > 0$ 的 A 称为焦元。

在识别框架 θ 上基于 BPA 的信任函数定义为:

$$Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \quad (2.3)$$

信任函数 $Bel(A)$ 表示全部 mass 函数给予命题 A 的支持程度。

在识别框架 θ 上基于 BPA 的似然函数定义为:

$$Pl(A) = \sum_{B \cap A \neq \emptyset} m(B) \quad (2.4)$$

似然函数 $Pl(A)$ 表示全部 mass 函数不反对 A 的程度。

在证据理论中，对于识别框架 θ 中的某个假设 A ，根据基本概率分配 BPA 分别计算出关于该假设的信任函数 $Bel(A)$ 和似然函数 $Pl(A)$ ，组成信任区间 $[Bel(A), Pl(A)]$ ，用以表示对某个假设的确认程度。

2) Dempster 合成规则

Dempster 合成法则是一个反映证据联合作用的法则，给定几个同一识别框架上的不同

证据的信度函数，可以利用该合成法则计算出一个新的信度函数，而这个新的信度函数就可以作为证据联合作用下的信度函数，也就是证据组合之后的对命题真假程度的判断。

Dempster 合成法则也称证据合成公式，定义如下：

对于 $\forall A \subseteq \theta$ ， θ 上的两个 mass 函数 m_1, m_2 的 Dempster 合成规则为：

$$m_1 \oplus m_2(A) = \frac{1}{K} \sum_{B \cap C = A} m_1(B)m_2(C) \quad (2.5)$$

其中， K 为归一化常数：

$$K = \sum_{B \cap C \neq \emptyset} m_1(B)m_2(C) = 1 - \sum_{B \cap C = \emptyset} m_1(B)m_2(C) \quad (2.6)$$

对于 $\forall A \subseteq \theta$ ， θ 上的有限个 mass 函数 m_1, m_2, \dots, m_n 的 Dempster 合成规则为：

$$(m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n)(A) = \frac{1}{K} \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = A} m_1(A_1) \cdot m_2(A_2) \cdot \dots \cdot m_n(A_n) \quad (2.7)$$

其中：

$$\begin{aligned} K &= \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n \neq \emptyset} m_1(A_1) \cdot m_2(A_2) \cdot \dots \cdot m_n(A_n) \\ &= 1 - \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = \emptyset} m_1(A_1) \cdot m_2(A_2) \cdot \dots \cdot m_n(A_n) \end{aligned} \quad (2.8)$$

3) 冲突证据处理

目前，岩石加载过程中的多种监测数据，由于数据类型及数据内涵的不同，在进行预测预警工作时，难免会出现“矛盾”情况。例如：在应变数据检测到预警标志时，试样内部的微破裂活动可能并不活跃，声发射数据并未检测到预警标志，这时候对试样状况做出的判断就会有较高的冲突。为了避免这种矛盾证据导致的“Zadeh 悖论”，采用文献^[17]中方法对经典 Dempster 证据合成规则进行修改。

式(3.5)修改为：

$$m_1 \oplus m_2(A) = \sum_{B \cap C = A} m_1(B)m_2(C) + (1-K)f(A) \quad (2.9)$$

相应的，式(3.7)修改为：

$$(m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n)(A) = \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = A} m_1(A_1) \cdot m_2(A_2) \cdot \dots \cdot m_n(A_n) + (1-K)f(A) \quad (2.10)$$

其中， $f(A)$ 为证据冲突概率的分配函数：

$$f(A) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i(A) \quad (2.11)$$

2.2 证据体指标选取

1) 应变指标

通过 Lab VIEW 二次开发可以通过 DHDAS 应变检测仪获取试样的实时应变值, 包括横向应变与纵向应变, 通过应变值实现对试样损伤程度估计。

首先, 通过轴向应变 ε_y 和横向应变 ε_x , 计算出岩石试样体应变为:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_y + 2\varepsilon_x \quad (2.12)$$

根据岩石扩容点及泊松比, 定义岩石试样损伤与体应变的量化关系:

$$D = \frac{\varepsilon_{v\max} - \varepsilon_v}{\varepsilon_{v\max}} \quad (2.13)$$

式中, $\varepsilon_{v\max}$ 表示扩容点体应变值, ε_v 表示当前时刻的体应变值, 据此式计算得到损伤。在泊松比超过 0.5 后将大于 1, 这种情况认为岩石试样已经彻底损坏, 将其值置为 1。

针对动态获取的体应变序列 ε_v , 以及当前时刻获取的体应变值 $\varepsilon_v(t)$, 构建以时间 t 为索引终点, l 为索引长度的动态时间窗口 S , 具体如下式:

$$\begin{cases} S = \{\varepsilon_v(t-l+1), \varepsilon_v(t-l+2), \varepsilon_v(t-l+3), \dots, \varepsilon_v(t)\} \\ \text{mod}(l, 2) = 1, l \neq 1 \end{cases} \quad (2.14)$$

针对动态时间窗口 S , 按照如下准则判断其集合局部最大值 S_{\max} 是否为拐点 (即曲线形状是否为凸曲线), 如果 $G > 0$, 则可以认为该局部最大值点为临时体应变拐点:

$$G = (S(1) - S_{\max}) \times (S_{\max} - S(l)) \quad (2.15)$$

临时体应变拐点动态存储在集合 P 中, 如果当前集合 P 不为空, 则根据当前时刻获取的体应变值 $\varepsilon_v(t)$ 来对临时体应变拐点集合中的值进行失效判别, 并定义临时体应变拐点失效判别集合 T , 如下式所示, 其中 n 为动态插入临时体应变拐点后集合的长度。

$$T_i = \begin{cases} 0, i = n \\ T_i + 1, P_i < \varepsilon_v(t) \\ T, P_i > \varepsilon_v(t) \end{cases} \quad (2.16)$$

设定失效次数容忍阈值 r ，实现临时体应变拐点集合 P 与失效判别集合 T 的合并，得出最终的体应变拐点判断集合 Q 。

$$Q_i = \begin{cases} P_i, T_i \leq r \\ +\infty, T_i \geq r \end{cases} \quad (2.17)$$

在岩石试样的加载过程中，在体应变到达最大值之前，因为数据的波动，有时会产生局部的体应变拐点。由于后续损伤的计算依赖体应变拐点值，所以局部体应变拐点的存在会影响损伤的计算，为了降低局部体应变拐点对损伤结果的影响，本文加入了拐点持续时间来做筛选。假设一个疑似体应变拐点的持续时间为 t_m ，设置拐点持续时间为 T_L ，增加新的判断条件：

$$Q_i = \begin{cases} P_i, t_{mi} \geq T_L \\ +\infty, t_{mi} \leq T_L \end{cases} \quad (2.18)$$

这样，持续时间未达到 T_L 的拐点将被剔除。

从集合中选出体应变拐点的值：

$$V = \min(Q) \quad (2.19)$$

计算出拐点值之后，通过实时获取到的体应变值 $\varepsilon_v(t)$ 和体应变拐点 V 计算岩石试样的实时损伤情况：

$$D_\varepsilon = \frac{V - \varepsilon_v(t)}{V} \quad (2.20)$$

通过上述步骤即可实现岩石试样扩容点的计算，进而计算获得应变损伤。

2) 声发射指标

通过 Lab VIEW 二次开发，获取声发射检测仪监测到的实时声发射数据，包括振铃数、能量等。借助破裂时刻的数据可以建立岩石损伤与归一化声发射特征参数的等效关系：

$$D = \frac{N}{N_a} \quad (2.21)$$

式中， N 表示某一时刻的声发射特征参数值（振铃数、能量）， N_a 表示岩石试样完全破坏时刻对应的累积声发射特征参数值。

在实际处理过程中，将“振铃累计数-时间”曲线去除量纲，用得到的“时间-时间”曲线的

切线角来表征损伤程度。考虑到角度越大声发射振铃数陡升情况越剧烈，可采用指数类型的量化（角度转化为弧度计算）：

$$D = \frac{e^{\theta(t)} - e^{\frac{\pi}{4}}}{e^{\frac{\pi}{2}} - e^{\frac{\pi}{4}}} \quad (2.22)$$

为了降低岩石试样破坏前局部损伤对总体结果的影响，本文引入了时间因子的概念来对数据进行处理。

$$\tau = \frac{t - t_{\varepsilon}}{t_a - t_{\varepsilon}} \quad (2.23)$$

式中， t 表示当前时刻， t_{ε} 表示体应变拐点到达的时间， t_a 表示预测的破坏时间。重新定义声发射损伤：

$$D = \frac{e^{\theta(t)} - e^{\frac{\pi}{4}}}{e^{\frac{\pi}{2}} - e^{\frac{\pi}{4}}} \times \tau \quad (2.24)$$

3) 散斑指标

一张散斑照片对应一个体应变矩阵，多张时序散斑照片对应多个时序体应变矩阵。时序体应变序列的处理方式与本文中对应变数据的损伤量化方式一致，每个点的损伤计算结束之后，一张照片的整体损伤就是所有点上损伤的累积，同样地，定义一个点上的损伤：

$$D = \frac{\varepsilon_{v\max} - \varepsilon_v}{\varepsilon_{v\max}} \quad (2.25)$$

式中， $\varepsilon_{v\max}$ 表示扩容点体应变值， ε_v 表示当前时刻的体应变值，据此式计算得到损伤，在泊松比超过 0.5 后将大于 1，这种情况认为岩石试样已经彻底损坏，将其值置为 1。

采用时间因子来控制不同损伤的权重，用来表征时间对失稳破裂的影响：

$$\tau = \frac{t - t_{\varepsilon}}{t_a - t_{\varepsilon}} \quad (2.26)$$

式中， t 表示当前时刻， t_{ε} 表示体应变拐点到达的时间， t_a 表示预测的破坏时间。对式 2.25 进行修正，一个点上，假设其在体应变拐点之后出现了 j 次局部破坏，那么该点的损伤 D 为：

$$D = \sum_{k=1}^j D_k \times \tau_k \quad (2.27)$$

对于尺寸为 $m \times n$ 的体应变矩阵，第 i 个点上的损伤为 D_i ，一张散斑照当前的实时损伤为：

$$D_{DIC} = \frac{\sum_{i=1}^{m \times n} D_i}{m \times n} \quad (2.28)$$

2.3 多源异构数据融合预警方法

以单轴加载过程中岩石试样为研究对象，确定识别框架： $\Theta = \{R_1, R_2\}$ ，其中： R_1 代表加载导致岩石试样失稳破裂； R_2 代表加载不会导致岩石试样失稳破裂。基于此识别框架，开展数据融合处理。融合过程中，其 mass 函数分配如表 1 所示：

表 1 证据源的 mass 函数分配情况

证据源	试样失稳破裂	试样稳定不破裂
应变	D_ε	$1 - D_\varepsilon$
声发射	D_{AE}	$1 - D_{AE}$
散斑	D_{DIC}	$1 - D_{DIC}$

根据 mass 函数分配表，通过改进的证据理论 Dempster 合成规则对三个证据源的数据进行融合，可以得到基于三个量化指标的岩石试样稳定性评价结果 D_{rock} ，将岩石失稳破裂预警等级划分为“蓝”、“黄”、“橙”、“红”四个等级，如表 2 所示。

表 2 岩石失稳预警等级划分情况

风险等级	蓝	黄	橙	红
D_{rock}	0~0.2	0.2~0.5	0.5~0.7	0.7~1

2.4 破坏时间估算

本文对破坏时间的估算共分为两个阶段，第一个阶段是当到达体应变拐点时，根据经验对破坏时间进行粗略估算：

$$t_a = \frac{t_v}{k} \quad (2.29)$$

式中， t_a 表示初步预测的破坏时间 (s)， t_v 表示到达体应变拐点的时间 (s)， k 表示扩容起

始应力与宏观抗压强度的比值，根据上文的经验， k 取值范围为 0.6~0.8。

第二阶段，从散斑到达橙色预警 t_{DIC} 开始，直至声发射到达橙色预警 t_{AE} 结束，将这段区间定义为“散斑-声发射”预警区间，这段区间的 D-S 融合损伤结果构成损伤时间序列 D_N ：

$$D_N = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_N\} \quad (2.30)$$

式中， N 表示区间长度， d_i 表示从 t_{DIC} 到 t_{AE} 时间段内的 D-S 融合损伤结果。

根据损伤时间序列 D_N 获得反速度序列 V_N ：

$$V_N = \left\{ \frac{1}{d_1}, \frac{1}{d_2}, \frac{1}{d_3}, \dots, \frac{1}{d_N} \right\} \quad (2.31)$$

通过最小二乘法对 V_N 中序列数据进行一次拟合，得到拟合直线，定义直线与 x 轴交点为 t_0 ，那么更新预测破坏时间为：

$$t_a = t_0 + t_{DIC} \quad (2.32)$$

从实时加载的角度，当试样从散斑橙色预警首次加载到声发射橙色预警时，进行第二次破坏时间预测，随着加载的进行， D_N 序列实时更新，破坏时间、损伤结果也随之实时更新。

3 预测预警系统实验验证及效果评价

3.1 实验方案与系统

本文在室内开展单轴压缩实验，通过监测压力机加载过程中的力、声、光等物理信息特征，对岩石试样的失稳破裂进行预测预警。本节介绍室内实验采用的实验系统，总体示意图如图 2 所示，由东华测试 DHDAS 动态应变测试系统、PCI-2 声发射监测系统、EOS 90D 数字散斑监测系统组成。本文选取红砂岩制作岩石试样进行单轴压缩实验，试样为 150mm×150mm×300mm 的长方体。单轴压缩实验采用东北大学岩石破碎实验室的 YAW-3000 压力试验机来完成。

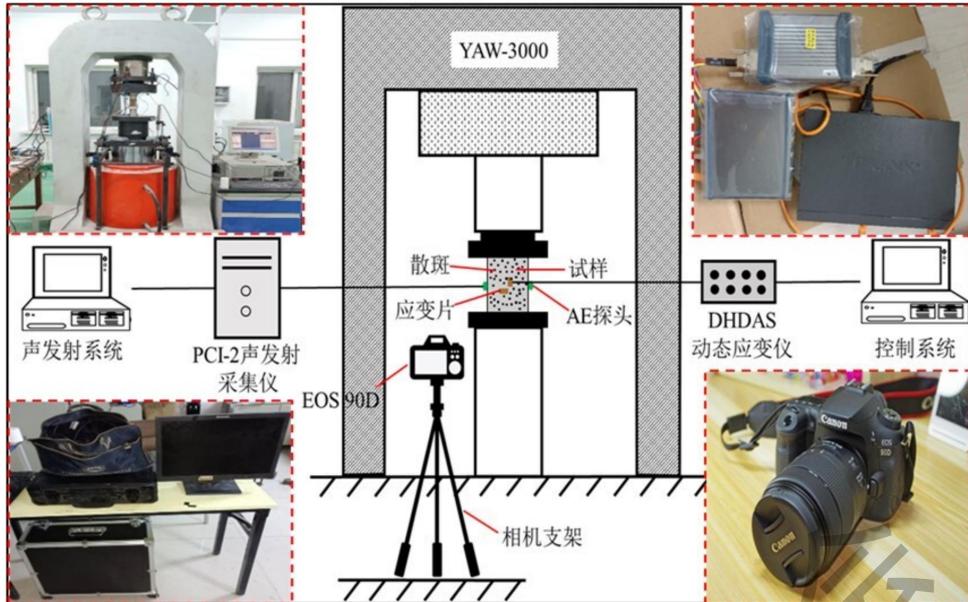


图2 实验系统示意图

3.2 实验结果

对于后验式分析的数据处理来说，力学试验的结果通常分析应力-应变曲线中应力水平变化，在本文中，从实时预测预警的角度出发，本对不同加载时长的试样状态、系统信息进行介绍分析。其应力-应变曲线如图3所示，按照加载过程共分为六个时间阶段。

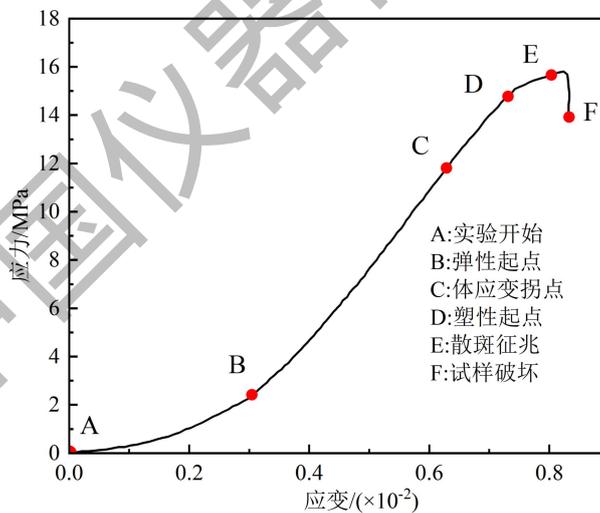


图3 应力-应变曲线

实验开始之前（图3中A点），数据显示区域没有实时数据，散斑区域展示的是没有应变情况的原始图像，如图4a所示。

实验开始加载到B点后。此时应变数据正在上升并伴有小幅波动，声发射数据并无明显趋势，散斑图像也没有明显破裂模式。系统未检测出体应变拐点，因此关于破坏时间、量

化损伤等预测内容均没有信息，如图 4b 所示。

压力机继续加载到 C 点，系统实时估算出破坏时间为 656.25s。从散斑应变场可以大致估测出岩石将沿着倾斜剪切面发生破裂，如图 4c 所示。

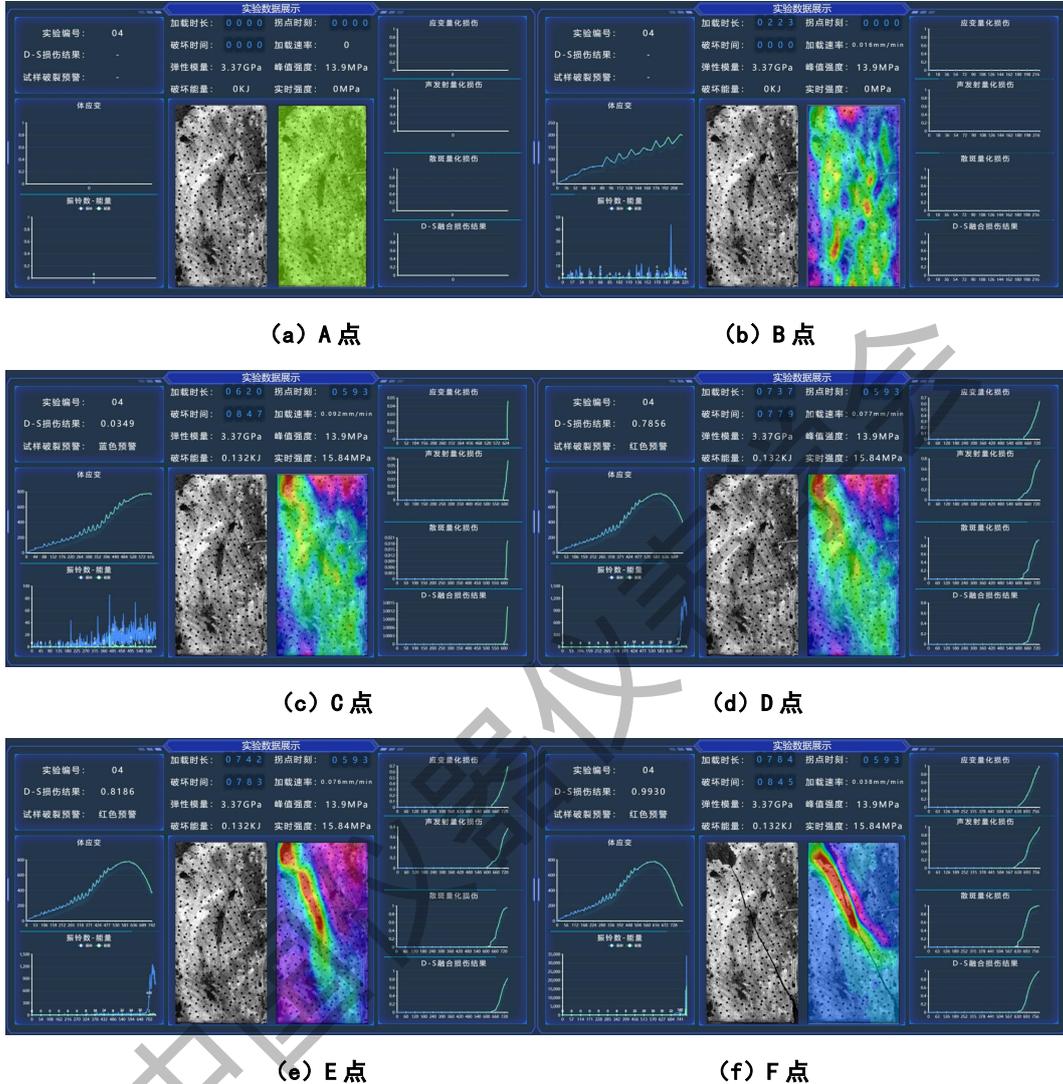


图 4 岩石受载过程预警系统页面显示图像

压力机继续加载到 D 点，损伤逐渐累积，岩石试样经过弹性阶段进入塑性阶段。此时应变数据已明显回落，声发射数据有小幅度陡升情况出现，散斑趋势愈发明显。损伤逐渐累积，各种量化损伤已经明显升高，D-S 融合结果显示当前损伤已经进入红色预警，散斑-声发射数据的预警区间已经出现，所以对破坏时间的估测开始迭代更新，有了新的预测时间，如图 4d 所示。

压力机继续加载到 E 点，应变数据与声发射数据趋势并无太大变化，散斑实物照片可以看到明显的裂痕，从散斑应变场中也可以看出很清晰的破裂模式。三种数据的量化损伤结

果明显爬升，D-S 损伤结果继续提高，岩石试样即将破裂，随着散斑-声发射预警区间数据的增加，破坏时间持续迭代更新，如图 4e 所示。

压力机继续加载，试样发生失稳破坏（图 4.3 中 F 点）。此时，声发射数据振铃数与能量陡增，实时观测时，陡升现象略滞后于失稳破坏的时间。试样发生破坏导致数据波动，于是根据散斑-声发射预警区间预测的破坏时间也随之发生波动。散斑照片及应变场能够清晰看出岩石试样的破裂模式，跟预测结果基本一致，如图 4f 所示。

实验结束后，对预测的参数进行了验证。其中破坏时间、破裂模式的预测结果与实际破坏情况接近，实现了较为准确的预测，试样实际破坏时间为 784s，预测时间在 779s 附近。

3.3 预警效果对比与评价

1) 单指标与多源数据融合预警效果评价

应变数据、声发射数据、散斑数据和多源融合方法的预警对比情况如表 3 所示。从预警角度来看，数据融合方法红色预警时间均提前于实际破坏时间，说明能够实现对岩石试样破裂的预警。从预测破坏时间角度来看，通过单指标的应变、声发射数据来对破坏时间进行预测时，其鲁棒性较差，存在无法预测的情况。应变数据表现为“散斑-声发射”预警区间内损伤值全部为 1，预测出来的时间是无穷大，或者早已破坏，显然两种结果都是不符合实际情况的；声发射数据表现为“散斑-声发射”预警区间内数据通过反速度法计算后，拟合曲线 R^2 接近 0，没有明显趋势，不能通过反速度法对破坏时间进行预测。通过单指标散斑数据对破坏时间的预测，结果误差较大。而应变、声发射、散斑三种数据经 D-S 证据理论融合之后的结果，在单指标数据较差的情况下，融合结果仍能保证很好的鲁棒性，且融合结果接近实际破坏时间，对破坏时间的预测结果较好。这表明本文提出的对时间预测的方法能够较为准确地对岩石试样失稳破坏的时间进行预测预警。

表 3 预警效果对比

编号	应变		声发射		散斑		融合方法		实际 试样破 坏 时间/s
	红色预 警 时间/s	预测破 坏 时间/s	红色预 警 时间/s	预测破 坏 时间/s	红色预 警 时间/s	预测破 坏 时间/s	红色预 警 时间/s	预测破 坏 时间/s	
	1	953	910	840	--	764	1390	905	
2	746	1300	743	1345	885	1303	744	1453	1012

3	745	771	729	791	697	825	735	837	784
4	714	--	736	888	848	1226	731	1012	1068
5	702	713	641	663	616	1255	641	753	823

四种损伤量化结果如图 5 所示。从图中可以看出，相比于应变数据较快的爬升速度，D-S 融合结果稍显平缓，能够先给出预警；对于声发射数据较大的波动情况，D-S 数据融合之后消除了绝大部分影响，数据几乎无大幅波动；同时缓解了散斑数据过早预警的情况。

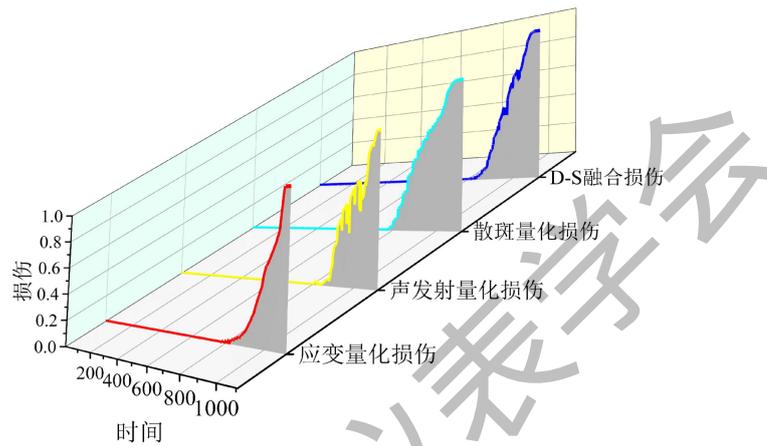


图 5 损伤量化效果图

2) 与常见预警方法对比

当前对岩石失稳破裂进行预测预警的方法中，对岩石试样失稳破坏时间的预测很少，多是对岩石试样损伤程度的描述。本小节中将介绍几种常见的损伤量化方法，并与本文所提方法的损伤量化效果进行比较。

(1) 分形维数法

本节选取一个岩石试样为例，对比分形维数处理结果与本文方法的效果。计算结果如图 6 所示，图中蓝色曲线为声发射分形维数，黑色曲线为本文中量化的损伤结果，红色点为计算出的分形维数相对下降幅度较大的点。从图中可以看出，分形维数在岩石试样破裂前确实能够起到显示前兆信息的作用，但是存在两方面缺陷，一方面是需要完整数据才能计算出分形维数，另一方面是只能起到显示前兆信息的作用，对损伤程度无法做到量化。

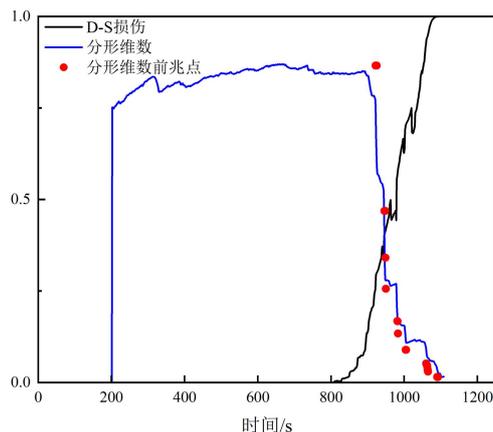


图6 分形维数效果对比图

(2) 裂纹体积应变量化损伤

采用裂纹体积应变对损伤进行量化的方法，通过归一化的方式，可对岩石试样的损伤过程进行了表征。计算结果如图7所示，图中红色曲线为裂纹体积应变表征损伤，黑色曲线为本文中量化的损伤结果。从图中可以看出，裂纹体积应变总是早于本文方法给出损伤结果，更符合岩石力学的实际情况，但是损伤破坏程度爬升较慢，在临近破坏前的一段时间存在一定程度上的“陡升”现象，从预测预警的角度来讲不利于对岩石失稳破裂做出预测。另一方面，该方法需要在实验完成后，借助最大体积应变来实现归一化，也无法做到实时预测预警。

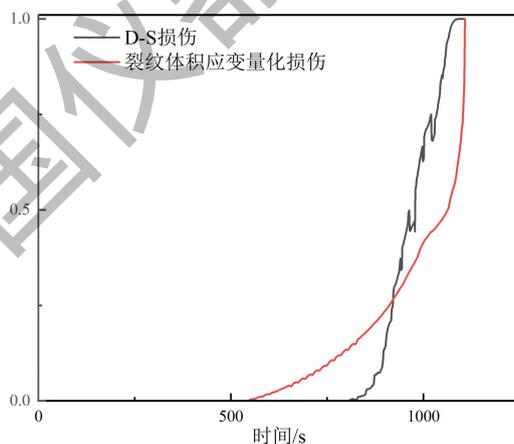


图7 裂纹体积应变效果对比图

(3) 声发射参数量化损伤

声发射参数用作岩石失稳破裂的前兆信息已经得到了广泛认可，同样通过归一化方式，对岩石试样加载过程的损伤结果进行了量化，并对比声发射参数处理结果与本文方法的效果。计算结果如图8所示，图中黑色曲线表示声发射能量量化损伤，红色曲线表示声发射振铃数量量化的损伤，图中蓝色曲线表示本文量化的损伤结果。从图中可以看出本文中量化的损

伤结果明显优于声发射参数量化损伤结果，声发射参数量化的损伤结果存在严重的损伤“陡升”现象，无法正确反应岩石试样失稳破裂过程中的损伤变化情况，同时，声发射参数需要最终累积量来进行归一化，无法实现实时的预测预警。

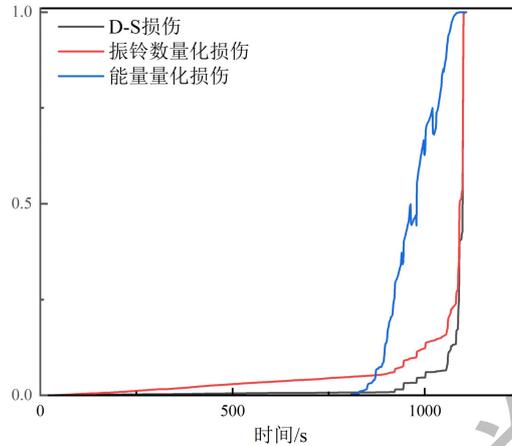


图8 声发射参数效果对比图

4 结论

1) 采用“端-边-云”架构设计了岩石失稳预警系统，通过 Lab VIEW 对 DHDAS 动态应变仪及 PCI-2 声发射测试仪进行二次开发，借助 HTTP 数据传输协议实现了监测数据的实时获取，借助低代码平台搭建了系统展示界面，系统能够在岩石试样加载过程中对其失稳破裂进行预测预警。

2) 选择应变、散斑、声发射实时监测数据作为证据体，实现了岩石损伤的定量表征，引入 D-S 证据理论，提出了一种基于 D-S 证据理论的多源数据融合的岩石破坏预警方法，能够对实时加载中的岩石试样给出蓝黄橙红四级预警。

3) 经实验验证表明，构建的岩石预警系统能够实时采集、处理并展示试样加载过程中应力、散斑、声发射数据信息，在破坏时间和岩石损伤指标预测结果均优于单指标预测结果，部分参数的预警值接近实际情况。而与其他预警方法对比，该系统在预警实时性方面具有明显优势。

参考文献:

- [1]赵阳升. 岩体力学发展的一些回顾与若干未解之百年问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(7): 1297-1336.

- [2]宋清蔚,朱万成,徐晓冬,等. 岩石破坏过程实时监测预警软件系统——搭建与初步应用[J]. 金属矿山, 2022, (10): 155-164.
- [3]高永青,刘建锋,林庆元,等. 微风化红层砂泥岩动三轴力学特性试验研究[J/OL]. 力学与实践: 1-11.
- [4]冯增朝,吕兆兴,赵阳升. 岩石破坏短临预报研究进展——岩石破坏短临预报竞赛评述[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(12): 2522-2529.
- [5]郭鹏飞,邱洋,邓仕伟,等. 油页岩单轴压缩声发射演化规律及其破坏前兆特征研究[J/OL]. 长江科学院院报: 1-8.
- [6]张旭龙,张盛,王龙飞,等. 基于砂岩三轴加载过程声发射与波速变化的峰前特征应力识别研究[J/OL]. 岩石力学与工程学报: 1-16.
- [7] Munoz H, Taheri A. Specimen aspect ratio and progressive field strain development of sandstone under uniaxial compression by three-dimensional digital image correlation[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017, 9(4): 599-610.
- [8] Liu LW, Li H B, Li X F, et al. Full-field strain evolution and characteristic stress levels of rocks containing a single pre-existing flaw under uniaxial compression[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(4):3145-3161.
- [9] Liu LW, Li H B, Li X F, et al. Underlying Mechanisms of Crack Initiation for Granitic Rocks Containing a Single Pre-existing Flaw: Insights From Digital Image Correlation (DIC) Analysis[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(2): 857-873.
- [10]邵新星,陈捷,马沁巍,等. 实时三维数字图像相关方法在材料力学教学中的应用[J]. 力学与实践, 2021, 43(5): 776-782.
- [11]李卫平,刘慧丛,陈海宁,等. 基于 COMSOL 软件的腐蚀仿真实验教学方法[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(10): 82-85.
- [12]朱万成,徐晓冬,李磊,等. 金属矿山地质灾害风险智能监测预警技术现状与展望[J/OL]. 金属矿山: 1-30.
- [13]晏涛,连会青,夏向学,等. 基于多源数据融合的矿井水害“一张图”预警平台构建与应用[J]. 金属矿山, 2022, (3): 158-164.

- [14]贺永亮,王素萍,付玉平,等. 基于多源信息融合的冲击地压风险预警与弱结构防治技术[J]. 煤矿安全, 2023, 54(7): 78-84.
- [15]罗小燕,占鹏飞,黄祥海,等. 基于加权 D-S 证据理论融合多域特征的岩体失稳预测方法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(10): 3446-3452.
- [16]邓展. 基于 D-S 证据理论的不确定信息决策方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2022.
- [17]李弼程,王波,魏俊,等. 一种有效的证据理论合成公式[J]. 数据采集与处理, 2002, (1): 33-36.
- [18] Cai M, Kaiser K, Tasaka Y, et al. Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41(5): 833-847.
- [19]王宇,李晓,贲雨星,等. 脆性岩石扩容起始应力预测——以花岗岩和闪长岩为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(004):737-746.