

序

随着深地科学研究不断深入，以及重大基础设施建设不断向地下深部延伸，深埋特长隧道等深地工程日益增多。然而，岩爆等动力灾害对工程安全的制约愈加突出，特别是在高地应力、复杂地质构造和强施工扰动等多重因素作用下，围岩破裂演化过程异常复杂，岩爆灾害的发生呈现出高度的突发性、隐蔽性和随机性。如何更精准地感知深部岩体损伤演化信息，科学识别风险并开展动态预警，进而及时采取有效的现场调控措施，已成为深地工程安全建设中亟需突破的重大技术难题。

微震监测技术作为研究深部岩体破裂演化规律的重要手段，在岩爆灾害预警中发挥着不可或缺的作用。近年来，随着信息技术、智能算法与工程物联网的快速发展，微震监测技术正逐步从传统的信号采集和辅助分析，向面向施工安全控制的智能感知与决策支撑方向演进。然而，面对深埋隧道等复杂施工环境，微震监测仍面临诸多挑战：施工干扰强、有效信号识别困难、处理流程自动化水平不足、预警模型解释能力偏弱、监测结果与现场防控措施的衔接不紧密等，这些问题严重制约了微震技术的深入应用与推广。

成都理工大学在高地应力隧道与工程灾害防治领域有着长期、深厚的研究积累。自 20 世纪 90 年代起，在王兰生教授的指导下，研究团队始终围绕山岭隧道围岩稳定性与地质灾害防治展开系统研究。进入 21 世纪，在李天斌教授带领下，团队紧密结合我国西部山区重大工程建设的实践需求，持续聚焦于高地应力地下工程的围岩稳定性评价、岩爆与大变形灾害防控以及信息化施工监测等方向，开展了大量理论研究、技术开发和工程应用实践。《隧道微震智能监测与岩爆灾害预警》一书正是在长期研究积累的基础上，针对深埋隧道岩爆灾害的监测预警与风险调控问题，进行系统总结与理论凝练的成果。

通览全书，作者团队紧扣深埋隧道岩爆灾害防控的实际需求，围绕微震智能监测、风险预警和协同调控三个关键环节，融合人工智能技术，构建了一套完整的理论方法和技术体系。该书在以下三个方面取得了显著创新和突破：其一，针对复杂施工环境下微震信号识别困难、处理效率低的问题，融合深度学习算法与微震自动处理流程，研发了集信号分类、降噪拾取与空间定位于一体的智能处理技术，有效提升了微震信息提取的精度、效率与稳定性，实现了岩体破裂信号的毫米级响应与高精度空间定位，为微震连续监测和岩爆快速预警提供了技术支撑。其二，围绕岩爆传统预警方法对单一监测参数依赖较强，对灾害孕育过程刻画不足等问题，将微震时空演化规律与岩爆孕育机制联系起来，创建了地质力学约束的岩爆智能综合预警模型，实现了从局部破裂到宏观灾变的跨尺度风险评估。其三，开发了岩爆风险分级预警与协同调控平台，提出了以“释能-柔性防护”为核心的岩爆调控技术，大大增强了监测预警技术的实用性和工程指导意义。

该书不仅系统总结了作者团队在岩爆灾害监测预警与防控领域的最新成果，更体现了

工程地质、岩体力学、隧道工程与信息技术深度交叉融合的科研趋势。我国岩爆灾害防控技术正从经验探索逐步转向基于能量调控的系统性、智能化方法，这正是该书所努力推进的学术方向与工程实践路径。

尤为难能可贵的是，该书紧密结合我国西部重大工程实践，所研究的技术问题源于现实需求，研究成果已在多个深埋隧道工程（如米仓山隧道、大峡谷隧道等）中得到充分验证与应用。实践证明，该书提出的理论与技术方法在岩爆风险识别、预警响应和防控优化方面发挥了重要的科技支撑作用，具有较强的工程实用性和广泛的应用推广价值。

当前，我国隧道和地下工程建设正面临更加复杂、深埋、超长和超大规模的现实挑战，高地应力、高水压、高地温等极端条件对深地工程灾害防控提出了更高要求。该书的出版，将为推动我国深地工程灾害防控理论和技术的发展、促进人工智能与减灾防灾的深度融合、服务深地工程的智能建造提供有力的理论和技术支撑。相信该书的问世，将对隧道与地下工程、岩体力学、工程地质、灾害监测预警等相关领域的科研人员与工程技术人员具有重要的启发和借鉴意义。

中国工程院院士：何川

2026年5月26日

前 言

在全球深地科学探索与深部岩石工程实践不断深化的时代背景下，隧道与地下工程的安全稳定性已成为制约深部资源开发与重大基础设施建设的关键科学问题。微震监测技术作为深部岩体破裂演化过程的重要感知手段，为揭示工程围岩损伤机理、预警动力灾害提供了关键技术支撑。然而，传统微震监测技术长期面临“半自动化”运行模式下人工经验依赖性强、数据处理效率低、预警精度不足等瓶颈问题，难以满足现代深部工程智能化建设的迫切需求。如何实现岩爆灾害从“被动应对”到“主动防控”的转变，已成为我国隧道工程智能化建设亟待突破的技术难题。

本书依托国家自然科学基金重点项目“川藏铁路隧道高地应力赋存规律与岩爆孕灾机理及风险调控”（编号：42130719）的系统性研究，基于作者团队在深部岩爆机理与防控技术领域十余年的科研积累，创造性地将深度学习、物联网技术与传统微震监测方法深度融合。通过构建“数据采集—智能处理—灾害预警—主动防控”的全链条技术体系，本书实现从理论方法创新到工程实践应用的重要突破，相关成果已获四川省科技进步奖一等奖等省部级奖励 3 项。在技术创新层面，本书实现了以下三大突破。

其一，创新构建隧道微震信号自动一体化智能处理技术，攻克强施工干扰环境下信号有效识别难题。通过构建“信号识别—降噪拾取—定位计算”自动化处理链条，突破传统人工经验依赖瓶颈，实现岩体破裂信号的毫秒级响应与高精度空间定位，为灾害防控提供高置信度数据基础。

其二，建立地质力学约束的岩爆智能预警模型，创新性地融合微震时空演化规律与岩爆孕育过程，构建具有地质力学解释性的岩爆风险动态评估体系。该模型突破单一微震参数预警局限，实现从局部破裂到宏观灾变的跨尺度风险研判。

其三，研发岩爆风险分级预警与协同调控平台，创建“风险预警—防控决策—效果反馈”智能决策闭环。通过开发岩爆风险三维可视化与分级预警平台，创新性地提出岩爆调控的“释能-支护协同控制”技术体系，有效保障施工安全。

工程实践表明，本技术体系在川藏铁路配套隧道、世界第一埋深高速公路隧道等 12 项重大工程中成功应用，有效破解强岩爆区施工安全控制难题，使强岩爆发生率降低 60%。通过构建“监测—分析—决策”一体化管控平台，实现施工风险可视化预警与防控方案实时优化，推动隧道岩爆灾害防控从经验驱动向数据驱动转型。

本书的出版标志着我国隧道工程岩爆预警防控进入智能化新阶段，其理论框架不仅推动着地质力学与信息技术的深度交叉融合，更为深地工程智能建造技术体系构建提供了重

要支撑。随着工程物联网技术的快速发展，本书提出的方法体系将持续演进，助力我国地下工程向更深、更安全的方向发展。

本书研究得到国家自然科学基金委员会、蜀道投资集团有限责任公司等单位的持续支持，并获中国岩石力学与工程学会等行业组织的专业指导，在此谨致谢忱。研究过程中张戡轩、唐杰灵、刘天毅、邢东威、邓叶林、曾俊、马家骥、冉雪峰、严文金、李想等博士和硕士研究生做出了不同程度的贡献，在此一并致谢！书中不足之处，恳请专家学者批评指正。

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 引言	1
1.2 研究现状及进展	3
1.2.1 微震波形识别与分类研究	3
1.2.2 微震波形降噪与到时拾取研究	6
1.2.3 微震震源定位方法研究	9
1.2.4 岩爆预测及预警研究	12
1.2.5 岩爆防控技术研究	19
1.3 本书主要内容	21
第 2 章 隧道微震监测系统构建	23
2.1 隧道微震监测特点	23
2.1.1 微震监测原理	23
2.1.2 微震监测技术特点	24
2.1.3 微震监测技术工程应用	24
2.2 隧道微震监测阵列评价	25
2.2.1 微震震源定位方法原理	25
2.2.2 微震阵列评估方法	28
2.2.3 微震阵列优化与评估测试	30
2.3 隧道微震监测阵列的应用与分析	37
2.3.1 微震监测数据分析流程	37
2.3.2 各类震动信号识别和分析	39
2.3.3 微震监测系统的应用	41
第 3 章 隧道微震波形分类研究	45
3.1 微震波形类型及特点	45
3.2 基于时域的微震智能分类方法	47
3.2.1 基于时域特征分类的方法和原理	47
3.2.2 微震波形分类模型构建和测试	49
3.2.3 微震波形分类模型的应用分析	53
3.3 基于时频域的微震智能分类方法	54
3.3.1 基于时频域特征分类的方法和原理	54
3.3.2 微震波形分类模型构建和测试	55

3.3.3	微震波形分类模型的应用分析	57
3.4	基于双模态的微震智能分类方法	58
3.4.1	基于双模态的微震分类方法和原理	58
3.4.2	微震波形分类模型构建和测试	59
3.4.3	微震波形分类模型的应用分析	64
第4章	隧道微震降噪与拾取研究	66
4.1	降噪与拾取的自编码网络模型	66
4.1.1	自编码神经网络模型	66
4.1.2	卷积自编码	67
4.2	隧道微震智能降噪方法	68
4.2.1	微震降噪方法原理和模型的构建	68
4.2.2	CNN 降噪模型训练	71
4.2.3	微震降噪模型的实际应用	76
4.2.4	与其他现有常用方法的比较	78
4.3	隧道微震降噪-拾取双任务处理方法	80
4.3.1	DDTN 模型的构建、测试与应用分析	81
4.3.2	PDTN 模型的构建、测试与应用分析	91
第5章	隧道微震震源定位研究	97
5.1	隧道围岩波速模型	97
5.1.1	隧道围岩波速模型定义	97
5.1.2	常见的波速模型	98
5.1.3	波速模型的选取	100
5.2	隧道震源定位改进粒子群优化算法	101
5.2.1	算法的原理及实施流程	101
5.2.2	算法测试与对比	104
5.2.3	算法的应用	107
5.3	隧道震源定位引力搜索算法	108
5.3.1	算法的原理及实施流程	108
5.3.2	算法测试与对比	112
5.3.3	算法的应用	117
第6章	隧道微震参数预测研究	119
6.1	微震参数定义与计算	119
6.1.1	微震参数定义	119
6.1.2	常见的微震参数	120
6.1.3	微震参数计算	122
6.2	微震参数预测模型	124
6.2.1	单变量序列预测模型	124
6.2.2	平行序列预测模型	126

6.2.3	多输入参数预测模型·····	127
6.2.4	多步输出预测模型·····	128
6.3	微震参数智能预测方法·····	130
6.3.1	岩爆微震预测指标·····	130
6.3.2	微震预测模型数据库·····	132
6.3.3	预测模型的测试与检验·····	133
6.3.4	预测模型的对比·····	136
6.3.5	预测模型的应用·····	139
第7章	隧道岩爆微震预警研究·····	141
7.1	基于震源参数的岩爆预警方法·····	141
7.1.1	EMS 方法的评价指标·····	141
7.1.2	岩爆预警及其等级评估·····	143
7.1.3	EMS 方法的震源参数空间·····	143
7.1.4	EMS 方法应用案例·····	144
7.2	基于深度学习的岩爆智能预警方法·····	148
7.2.1	岩爆预警指标·····	148
7.2.2	微震预警数据预处理·····	152
7.2.3	岩爆微震预警模型的构建与测试·····	153
7.2.4	岩爆微震预警模型的应用·····	162
7.3	地质信息约束的岩爆综合预警方法·····	165
7.3.1	岩爆综合预警流程·····	165
7.3.2	综合预警模型测试及结果·····	166
7.3.3	岩爆微震综合预警模型的应用·····	168
第8章	基于动态微震信息的岩爆调控研究·····	175
8.1	基于动态微震信息的岩爆智能预警系统·····	175
8.1.1	微震信息采集模块·····	177
8.1.2	微震信息云处理模块·····	178
8.1.3	岩爆预测预警与调控决策模块·····	185
8.2	岩爆调控方法与技术研究·····	187
8.2.1	岩爆支护的刚度效应·····	187
8.2.2	岩爆分级调控技术·····	193
参考文献	·····	205

第1章 概 论

1.1 引 言

青藏高原东缘区域位于我国地势第一级阶梯与第二级阶梯的过渡带,受印度板块与亚欧板块的挤压碰撞、青藏高原的隆升及河流的急速下切等多重因素的影响。该区域地形陡峭,海拔高差可达 4000m,地层岩性和地质构造复杂,断裂活动性强,地应力水平高,形成了高梯度、高赋能的独特地质环境特征。中国共产党第二十届中央委员会第三次全体会议指出,面对严峻复杂的国际环境和艰巨繁重的国内改革发展稳定任务,坚持稳中求进工作总基调,统筹推进“五位一体”总体布局。青藏高原东缘逐渐成为水电、交通、油气等重大基础设施建设的高密度区域。然而,该地区特殊的地质背景和复杂的工程环境条件使其交通基础设施建设面临诸多关键技术挑战,其中,高地应力灾害已成为严重制约隧道和地下工程建设及安全运营的重大技术难题。

青藏高原东缘的工程地质环境具有“三高”(高地热、高地应力、高地震烈度)和“四活跃”(活跃的新构造运动、活跃的地热水环境、活跃的外动力地质条件和活跃的岸坡浅表改造过程)典型特征,其工程地质条件异常复杂。山岭隧道因其能够克服地形或高程障碍、规避地表地质灾害、改善线路走向以及减少对植被的破坏,展现出其他工程构筑物所无法比拟的优势。目前,我国交通系统较为完善的区域主要集中于东中部,尤其是沿海及平原地区,未来大量隧道工程建设将更多集中于西部山区等复杂地貌单元。《国家综合立体交通网规划纲要》提出,到 2035 年,国家综合立体交通网实体线网总规模合计 70 万 km 左右,其中铁路 20 万 km 左右、公路 46 万 km 左右;《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》提出,到 2025 年,铁路营业里程达到 16.5 万 km,公路通车里程达到 550 万 km。在国家综合交通基础设施持续完善并向西部地区发展的背景下,复杂山区与深埋长大隧道工程建设需求仍将保持较高水平。例如,在西南地区某线性工程中,仅雅安至林芝段的新建隧道数量就高达 72 座,总长度达到 851km,隧道占整个线路长度的 84%。这类工程在复杂的地形地质条件和活跃的地质构造环境下,面临着诸多严峻的挑战。在深埋断裂挤压带及褶皱核部区域,高地应力条件下的隧道工程将遭遇岩爆、大变形等重大工程地质灾害。

在地应力作用下,隧道发生岩爆灾害的风险大,对深部工程的安全造成巨大威胁。一般认为岩爆是地下工程开挖过程中,在地应力条件下,硬脆性围岩因开挖卸荷导致洞壁应力分异,储存于岩体中的弹性应变能突然释放而产生爆裂松脱、剥落、弹射甚至抛掷现象的一种动力失稳地质灾害,具有突发性、非对称性等特点。有数据显示,隧道工程大

约 67% 的死亡以及 30% 的致伤与岩爆及岩崩等有关；川藏公路二郎山隧道建设期间发生岩爆共计 200 多次。隧道岩爆发生可表现为片状/层状剥落、弯曲鼓折破裂、穹状/楔状爆裂等破坏方式，单次微地震事件释放的能量可达到数百万焦耳，强烈的能量释放可掀翻隧道洞内大型施工器械，触发隧道洞内大范围边墙侧鼓、底板开裂及底鼓、岩体坍塌等现象。典型的隧道岩爆灾害如川藏铁路拉萨—林芝段巴玉隧道（其 94% 的洞段皆为岩爆高发区域）岩爆灾害[图 1-1 (a)]，岩爆导致了大量岩石崩落，并产生巨大声响和气浪冲击，造成了开挖面破坏，设备损坏和人员伤亡。巴基斯坦 N-J 水电站引水隧洞“5·31”岩爆，导致隧道掘进机(tunnel boring machine, TBM)台车尾部约 90m 长的皮带支架、吊点、托辊扭曲变形严重，台车尾部清渣设备严重损坏，TBM 台车尾部两个后轮严重变形脱离轨道[图 1-1 (b)]。

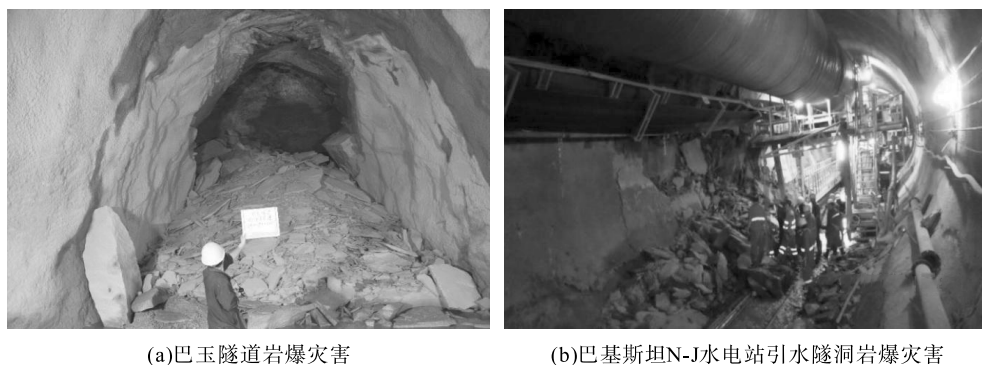


图 1-1 典型岩爆灾害

微震监测技术作为一种新型岩体微破裂监测技术，在隧道与地下工程灾害(如岩爆、冲击地压等)监测预警上发挥了重要作用。通过分析微破裂信号，获取震源时间、位置及震源参数信息，进一步评估围岩微震强度及参数演化趋势，从而实现灾害预警。国内外专家学者对隧道微震监测和岩爆预警技术开展了大量的理论研究和工程实践，主要有如下几个方面：从时域和频域的角度分析岩爆灾害相关的微震信号，提取前兆频谱演化特征作为预警指标；从震源参数(微震能量、视应力、视体积等)的时间序列规律中分析岩爆孕育过程的特征，总结岩爆灾害前兆震源参数变化趋势作为预警指标；结合微震、地质条件和施工工序等信息开展岩爆灾害的综合预警。另外，有的学者对比分析了塌方与岩爆两种灾害的微震特征。例如，Ma 等(2020)利用 EMS(E 代表地震能量，M 代表地震矩，S 代表视应力)震源参数空间方法分析了岩爆和塌方灾害的围岩破坏过程，并区分了两种灾害在发育阶段和发生阶段的微震特征。在隧道围岩稳定性评估方面，一方面是通过微震参数时间序列变化规律来分析围岩的破裂过程和稳定性状态；另一方面是将微震监测与数值模拟相结合来分析和验证围岩破裂过程。例如，Liu 等(2018)采用微震监测技术揭示了不稳定区域微震事件的时空分布，建立了事件数、能量与 TBM 活动之间的关系，并基于幅频分析、双差层析成像等方法，对隧道围岩稳定性进行了评价。周朝等(2020)在抽水蓄能电站工程中首次开展考虑累积微震损伤效应的地下洞室群围岩稳定性分析。

微震监测技术虽然取得了很多行之有效的成果,但是全天候不间断监测所获取的海量数据,对数据处理的有效性、及时性和准确性带来了更高的要求。例如,在隧道微震监测过程中通常会采集到大量噪声与一些未知信号,这类围岩微震信号的分类工作往往是由具有丰富的现场监测经验和较为扎实的地震学功底的工作人员完成,而如何快速、准确区分微震信号,是岩爆预警的关键性基础工作。隧道施工环境复杂,导致微震信号容易受到各种噪声污染,甚至于噪声与微震信号频带重合,而传统降噪方法既不能完全滤除噪声,还可能造成有效信号失真,同时不同类型噪声的差异性导致传统降噪方法参数设置直接影响信号自动化降噪效果。另外,降噪效果会影响波形到时(即到达时间)的拾取精度,而常规自动拾取方法往往需要不断调整算法的参数以达到最佳拾取精度,这进一步影响了震源定位精度。目前,基于微震信息趋势变化的岩爆灾害预警,并未过多考虑时间因素,仅根据当前微震信息进行岩爆风险判断,同时整个预警过程受人为主观因素影响较大。同时,目前尚未建立高应力岩爆灾害的防控理论和方法,亟待形成高应力岩爆灾害新型释能的综合调控技术。基于此,以下章节将详细总结当前隧道微震监测技术研究现状及存在的问题。

1.2 研究现状及进展

1.2.1 微震波形识别与分类研究

根据微震信号波形在岩爆预警分析中的有效性,可以将其分为微震(微破裂)信号和噪声信号。常见的噪声信号包括爆破信号、机械振动信号、电气信号、未知的高斯噪声以及高相似类微震噪声信号等。微震监测技术能够有效采集并记录围岩破裂所产生的弹性波。这些弹性波在传播过程中,当其强度超过传感器设定的阈值时,便会触发系统进行记录,从而形成一次微破裂事件。由于传感器类型的差异(如单轴和三轴传感器),所接收到的信号表现形式也会有所不同。在由单轴传感器构成的微震阵列网络中,每个传感器对应一个独立的通道,且每个通道产生一个波形。

通常情况下,爆破信号的波形特点是单一或多重叠加,持续时间较长,尾波发育明显,且具备较强的强度与高频特性,其平均峰值幅度一般不低于 4000mV,时频图上的归一化谱强度峰值可达 1.0。相比之下,微破裂信号的强度和频率相对较低,波形成分较为单一,衰减速度较快,时频图的归一化谱强度峰值为 0.15。其中,高相似类微震信号是指在时域波形、频谱结构、能量突变特征或初至形态上与真实岩体微破裂信号具有较高相似性,但其成因并非岩体破裂的有效信号。该类信号在自动识别过程中易被误判为微震事件,是影响微震事件识别准确率的重要干扰类型。人类活动所产生的机械信号则表现为随时间重复且规则地振动,振幅变化不明显,时频图的归一化谱强度峰值为 0.04。此外,还有一些未知信号具有可变特征,并没有明显的运动形式,其时频图的归一化谱强度峰值为 0.01。

微震监测技术在各行各业得到广泛应用,然而,如何快速有效地处理微震监测系统每天采集的大量数据已成为一个棘手的难题。目前,这一工作主要依赖经验丰富的工程师进行处理,但效率相对较低。微震监测技术源于声发射和地震学理论的结合,逢焕东等(2004)指出微震信号与声发射信号在频率特征上存在一定差异,但两者在多个方面具有相似性质,因此并没有明确的分类界限。基于此,我们可以借鉴声发射和地震信号处理的方法与手段来处理微震信号。

国内外科研工作者在区分微震(微破裂)信号与非微震信号的困难问题上进行了大量探索与研究,这些研究为微震信号的有效处理提供了重要的理论基础与实践指导,主要采用的方法包括多参数分析法和频谱分析法。

1. 多参数分析法

微震多参数分析法是一种综合利用微震事件的多个参数,从多维度对微震进行深入分析的方法。这一方法旨在通过全面评估岩体的稳定性及其潜在灾害风险,为岩土工程提供科学依据。近年来,随着微震监测技术的发展,越来越多的研究者开始探索如何通过多参数分析提高微震信号的识别和分类效果。

例如,Peng 等(2021)在其研究中采集了六种震源参数,包括主频、能量、地震矩、第一峰值、最大峰值时间以及触发传感器的个数,进而构建了一个逻辑回归模型以识别微震信号。王英乐等(2022)则通过优化算法的支持向量机模型,利用五种时频域特征参数[峭度、偏度、重构信号、希尔伯特(Hilbert)边际谱能量与伦佩尔-齐夫(Lempel-Ziv)复杂度]对微震信号进行了有效的分类和识别。樊鑫等(2022)基于小波理论,采用小波散射分解变换提取微震信号的特征,其主要参数包括质量因子、时不变尺度以及散射分解次数。Pu 等(2020)则选择了五种微震参数(主频、地震能量、地震矩、最大峰值到达时间和首次峰值幅值)来构建识别模型,这进一步丰富了微震信号分析的手段。

尽管多参数分析法在特征提取上表现出良好的效果,能够显著提升微震检测的精度和可靠性,但其实现过程仍然面临挑战。特征参数的多样性和复杂性使得数据处理变得相对困难,导致分析效率较低。此外,参数之间的相关性和相互影响,也可能导致模型过拟合或欠拟合,从而影响最终的识别结果。因此,如何有效选择和优化特征参数,提升多参数分析法的效率和准确性,仍然是当前研究的重要课题。

为此,未来的研究可考虑结合机器学习和深度学习等先进技术,以自动化和智能化的方式进行特征选择与优化,从而提高微震信号分析的效率。同时,加强对不同环境和条件下微震信号特征的研究,也有助于提升多参数分析法在实际应用中的适用性和普遍性。这将为岩体稳定性评估和灾害预警提供更加可靠的技术支持,推动相关领域的进一步发展。

2. 频谱分析法

频谱分析法是一种有效的技术,通过对微震信号的频率特征进行深入分析,能够快速且准确地提取出其频率特性,从而实现对微震信号的分类。这种方法在微震监测与分析领域中被广泛应用,得益于其简洁性和高效性。许多学者采用傅里叶变换(Fourier

transform, FT)来分析微震信号的频谱特征,为微震信号的有效识别和分类提供了重要支持。

例如,郭超和陈莹(2016)在研究中首先剔除了微震信号中由于基线漂移和 50Hz 频率信号干扰所带来的影响,随后对微震信号的主要频率、傅里叶谱以及小波时频谱进行了详细分析。这一研究为微震信号的清晰识别奠定了基础,使得后续的信号处理和分类更加精确。此外,卢俊和吴建星(2019)提出了一种基于近似熵与聚合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)的微震信号提取方法,旨在解决震动信号自动识别的难题。通过引入近似熵的概念,该方法能够有效地评估信号的复杂性,从而提高信号提取的准确性和效率。程铁栋等(2021)改进了经验小波变换(empirical wavelet transform, EWT)方法并将其应用于矿山微震信号特征提取中。他们通过将微震信号分解至不同的频段,成功解决了以往在处理复杂信号频谱时常见的过切分问题。这一改进使得频谱分析的结果更加可靠,有助于进一步提高微震信号分类的精度。

综上所述,频谱分析法在微震信号处理中的应用展示了其独特的优势与潜力。随着技术的不断发展,未来的研究将可能结合更多先进的信号处理算法,以进一步提升微震信号的识别和分类能力。这不仅为微震监测提供了更为精准的工具,也为岩土工程的安全评估与管理提供了强有力的支持。

3. 自动微震/地震识别和分类算法

自动微震与地震识别及分类算法是一种灵活的技术手段,能够根据具体的需求和数据特性进行调整与优化。这些算法通过对微震信号进行特征提取与分类,以实现微震类型的准确判识。近年来,各类自动识别与分类算法的迅速发展显著提升了微震和地震识别的效率,为解决长期存在的识别效率低下问题提供了有效的解决方案。

在众多识别和分类方法中,一些经典技术包括基于振幅的长短时窗比(short-term average/long-term average, STA/LTA)法、波形相关性分析法,以及指纹与相似性阈值法等。这些方法各自具备独特的优势,同时也面临一定的局限性。具体而言,STA/LTA 算法通过计算短时平均振幅与长时平均振幅的比值,反映了微震(或微破裂)信号在振幅和频率等方面的变化。当信号到达时,STA 与 LTA 的比值会出现显著的突变。Trnkoczy(2012)设定了一个阈值,当 STA 与 LTA 的比值超过该阈值时,便可判定为微震或地震事件。该方法在高信噪比信号的识别上表现出色,但在信噪比较低的情况下,识别效果会明显下降,易导致信号漏检。此外,Yoon 等(2015)提出的指纹与相似性阈值法,结合了 Waveprint(音频指纹)算法,利用计算机视觉技术与大数据处理方法,展现出良好的检测灵敏度、适用性和计算效率。然而,该方法对计算内存和资源的需求较高,这在某些应用场景中可能会造成限制。吴爽等(2023)通过对比分析长短时窗比法、赤池信息量准则(Akaike information criterion, AIC)法和偏态/峰态法的到时(到达时间)拾取效果,最终确定了将长短时窗比法与赤池信息量准则法相结合的方式,以实现最高的拾取精度。

尽管上述微震与地震识别和分类方法在研究中取得了一定成效,但每种方法都存在一些缺陷。例如,某些方法在参数设置上较为复杂,计算量大、计算效率低、稳定性差等问题仍然亟待解决。因此,未来的研究有必要在现有基础上进一步探索更为高效、稳定且易

于应用的微震与地震识别和分类算法,以适应日益复杂的地质环境和实际应用需求。

4. 智能分类算法

随着计算机性能的飞速提升,机器学习和深度学习技术应运而生,成为微震和地震信号处理领域的重要工具。在众多算法中,神经网络算法旨在模拟人类大脑的学习过程,通过构建复杂的非线性网络结构,模拟输入(微震/地震信号)与输出(波形类型和到时等)之间的复杂关系,从而实现对新输入的有效预测(Goodfellow et al., 2016)。这类算法在良好训练模型的基础上,展现出出色的泛化能力,成为微震信号识别的有力工具。

自“大数据时代”概念被提出以来,以卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)为代表的神经网络算法得到了广泛的应用与发展。卷积神经网络的权重共享特性,加快了其在语音和视觉识别、自然语言处理等多个领域的突破(LeCun et al., 2015; He et al., 2016; Krizhevsky et al., 2017)。在微震和地震波形数据的分析与处理方面,研究也取得了长足进展。Bi等(2018)利用DCNN-SPP(深度卷积神经网络-空间金字塔池化)方法对多通道微震波形进行识别与分类,准确率达到91.13%;丁琳琳等(2020)则对原始微震数据进行了极值连接降维处理,改进了煤矿微震识别技术;陈泽等(2020)基于改进的小波分解和极限学习机(extreme learning machine, ELM),构建了一套高准确率的微震事件识别方法。

此外,Fan等(2022)结合小波散射分解与支持向量机模型,成功识别低信噪比下的微震信号;李文旭等(2022)通过对比分析微震/岩爆信号与其他无效信号的频率特征,采用多输入卷积神经网络方法,建立了基于信号时频特征的微震波形识别模型,显著提升了识别效果;李佳明等(2023)基于LeNet框架提出了一种改进模型,专门用于微震监测波形识别,不仅提高了识别精度,还使得整个波形的识别过程可视化。

综上所述,前人的研究为微震和地震波形的识别与分类奠定了坚实的基础,并取得了显著成果。然而,传统方法依然存在多种缺陷,机器学习和深度学习技术在地震波形识别和分类中的应用展现出更多潜力。然而,针对隧道等复杂施工环境中采集的微震波形的分类研究仍显不足,因此,未来亟须探索一种快速、准确的深埋隧道围岩微震波形分类方法,以应对日益复杂的工程挑战。

1.2.2 微震波形降噪与到时拾取研究

在实际工程中,由于复杂的现场环境,各个微震通道的信号常常受到多种噪声的干扰。这些噪声包括施工噪声、仪器噪声、机械噪声、电噪声以及其他形式的环境噪声。噪声的存在严重影响了微震波形的到时拾取、震源定位以及震源类型分析等一系列微震反演工作的开展。因此,针对工程现场采集的微震(微破裂)信号进行有效降噪,是提高震源参数获取精度的关键环节,同时也是提升灾害预警准确性和有效性的必要措施。

在微震波形降噪与到时拾取的方法中,传统的降噪方法与到时拾取方法已被广泛应用。例如,短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, STFT)、连续小波变换(continuous wavelet transform, CWT)和经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)等技术,

常用于从噪声中提取微震信号的特征。这些方法各有优缺点,适用于不同类型的噪声和信号特征。同时,基于深度学习的智能降噪方法和到时拾取技术近年来也逐渐崭露头角。这些方法利用神经网络等先进算法,能够在大规模数据中学习信号的特征,自动识别和去除噪声,显著提高了降噪效果与到时拾取的准确性。综上所述,微震信号的降噪与到时拾取技术正朝着多元化和智能化方向发展。传统方法与现代深度学习技术的结合,为微震信号分析提供了新的思路与方法,进一步推动了相关领域的研究与应用进展。

1. 传统的微震波形降噪方法

在微震及地震数据处理领域,为了有效抑制信号中的噪声,研究人员开展了大量基于算法的研究。众多传统的降噪方法应运而生,这些方法包括短时傅里叶变换(STFT) (Allen and Rabiner, 1977)、连续小波变换(CWT) (Mousavi and Langston, 2016)、经验模态分解(EMD) (Huang et al., 1998; Bekara and van der Baan, 2009; Chen et al., 2017)、基于稀疏变换的降噪方法(Chen et al., 2016)、基于数学形态学的降噪技术(Li et al., 2016),以及非局部均值(non-local means, NLM)算法(Bonar and Sacchi, 2012)等。这些方法各具特色,能够针对不同类型的噪声和信号特征进行降噪处理。例如,STFT通过将信号分为若干短时段,再进行傅里叶变换,能够有效捕捉信号的瞬时频率特性;而CWT则通过多尺度分析,能够更好地处理非平稳信号。在这一系列方法中,EMD 凭借其自适应性和局部特性,成为处理复杂信号的重要工具。

在实际应用中,薛瑞雄等(2024)通过对比信噪比和波形特征,发现 db10 小波函数在降噪效果上表现尤为出色。这一发现不仅为微震信号的处理提供了新的思路,也为岩体失稳预测的精度提升奠定了基础。李亚飞等(2024)将正交匹配追踪(orthogonal matching pursuit, OMP)算法与稀疏重构技术结合,成功提取出微震信号的特征波形,并利用鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, WOA)进行全局参数的快速寻优。这一方法的创新在于,通过高效的算法组合,实现了微震信号的有效降噪,显著提高了信号处理的速度和准确性。

综上所述,传统的微震波形降噪方法在实际应用中已取得显著成效,但仍需不断探索与优化,以应对日益复杂的噪声环境和信号特征。通过整合多种方法及技术,不仅能够提升降噪效果,也为微震信号的精确分析提供了坚实的技术基础。

2. 基于深度学习的微震波形降噪方法

尽管前述的传统降噪方法在噪声抑制方面取得了一定的效果,但它们也存在一些固有的缺陷。随着近年来深度学习技术的迅猛发展,这一强大的机器学习工具已成为处理复杂信号和图像的重要手段。深度学习模型,尤其是神经网络模型,能够通过学习高度复杂的函数关系,极大地推动了信号处理领域的进步(LeCun et al., 2015; Goodfellow et al., 2016)。因此,基于深度学习的数据插值和降噪策略逐渐成为图像处理任务中的热门研究方向。

在微震信号的处理上,研究者们纷纷探索深度学习技术的应用。何正祥(2023)利用深度网络模型 UACNet 进行微震事件的识别,并提出了一种针对有限数据集的补充方案——

Caps Net。在识别出的微震事件中，他运用 PSNSeg Net 模型，通过掩膜生成的方式，将微震信号有效分离为噪声、P 波和 S 波。这一创新方法在微震事件分析中展现出了良好的效果，为后续的信号处理提供了重要支持。饶帝军(2023)研究了一种新颖的技术，采用震源参数作为特征，并结合粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法优化极限学习机 (ELM)，进行微震事件与爆破事件的智能识别。这种方法不仅提高了事件识别的准确性，还为微震监测提供了更加可靠的技术保障。薛凯文等(2024)将连续小波变换与卷积自编码器相结合，设计了一个具有多个卷积和反卷积操作的编码-解码器，以实现信号的降噪过程。该方法显著提高了信号的峰值信噪比，使得微震信号在后续分析中更具可用性。尚雪义等(2024)构建了一种基于自适应增强策略的长短期记忆 (long short-term memory, LSTM) 网络微震信号预测模型，提出了一种新的降噪方法，该方法基于模型预测数据与观测数据之间的差异，有效减少微震信号中的噪声。这些研究成果标志着深度学习在微震信号降噪领域的应用潜力，为未来的研究指明了方向。

综上所述，深度学习技术的引入为微震信号的降噪与分析开辟了新的视野。通过充分发挥深度学习的优势，研究者能够更准确地提取有用信号，进而提升微震监测的有效性和可靠性。

3. 传统的波形初至拾取方法

在对大量地震(微震)数据进行处理时，波形初至的拾取精度对后续的震源定位、震源参数计算，以及地震预测和灾害预警的准确性具有直接而深远的影响。然而，波形初至的拾取精度受到多种因素的制约，包括各种类型和强度的噪声、波形的固有特性、传感器的种类(如单轴与三轴传感器)，以及设备的采样率等(Akra and Eaton, 2016)。因此，开发一种鲁棒性和稳定性强的波形到时拾取算法，对于确保波形到时拾取的效率和质量至关重要。

近几十年来，国内外学者围绕这一问题进行了深入的研究与探索，提出并发展了多种微震和地震信号的拾取方法。这些方法包括改进的蒙特卡罗法(Monte Carlo method, MCM) (Sabbione and Velis, 2010)、改进的能量比法(Han et al., 2009; Gaci, 2014)、分形分维法、偏振分析法、卡尔曼估计法等。其中，长短时窗比(STA/LTA)法是较为基础且广泛应用的拾取方法，因其高效快捷和应用广泛而受到重视。然而，该方法在时窗长度和噪声污染的影响下，对低信噪比的微震/地震信号拾取性能较低，且易出现误判。

为了解决这些问题，研究者们提出了多种创新性的方法。周竹生等(2020)利用改进的粒子群优化(PSO)算法，通过全局搜索从低维数据中选出最优聚类中心，同时结合相位差自适应时间校正法，对超过阈值的异常地震道进行了有效校正。这一方法在处理复杂地震信号时展现出了优越性。李康丽等(2022)则采用高维多属性 K 均值聚类法，结合马尔可夫决策过程(Markov decision process, MDP)，成功实现了初至时刻的精准拾取，进一步提升了信号处理的准确性。此外，Zhu 等(2022)提出了一种时间序列分割聚类(time series segmentation and clustering, TSSC)算法，首先利用赤池信息量准则(AIC)方法确定 P 波的初至时刻，再通过 K 均值聚类法准确划定 P 波与 S 波的分界点，即 S 波的初至位置。这一创新方法为微震信号的精确识别提供了新的视角。

综上所述,微震波形初至拾取技术的研究正朝着更加精细化和智能化的方向发展。随着算法的不断进步和新技术的应用,未来的微震信号处理将能够更有效地应对复杂的噪声环境,提升地震监测的整体效率和准确性。

4. 基于深度学习的波形初至拾取方法

大量文献资料和实验结果表明,常规P波拾取算法在实现最佳拾取精度时需要不断调整参数。这一过程不仅烦琐,而且往往依赖于操作人员的经验和技巧。近年来,机器学习和深度学习技术的迅速发展,为微震和地震到时拾取的研究提供了新的可能性,吸引了国内外众多学者的关注。蔡振宇和盖增喜(2019)在地震P波初至拾取中引入了深度学习技术,显著提高了数据处理的效率和准确性,尤其在低信噪比数据的处理上表现出色。

在深度学习的应用方面,赵明等(2019)成功利用U-Net卷积神经网络实现了地震震相的识别及波形到时的拾取。Zheng等(2020)设计了一种名为SC-PSNET的深度神经网络,该模型结合卷积神经网络与循环神经网络结构,用于单分量记录的P、S相检测与到时拾取,并提出可通过信号时频分析确定标签向量的宽度。这种方法不仅提升了拾取精度,也为深度学习模型的构建提供了新的思路。Johnson等(2021)通过对相对较少的采矿地震数据重新训练卷积神经网络(CNN)模型,成功使训练后的模型在识别效果上与人工识别相媲美,这一研究为深度学习在地震信号处理中的应用提供了有力的支持。Lim等(2022)采用目标检测模型YOLO网络提取微地震波形区域,随后通过CNN回归方法预测P波和S波的初至时间,在保证模型性能的同时有效减少了模型参数的数量。这一创新极大地提升了模型的实用性和灵活性。

波形到时的拾取是震源参数准确计算的关键因素,然而其过程极易受到噪声的干扰。传统的拾取方法往往需要通过调整参数以达到最佳效果,这不仅增加了工作量,也使得处理过程充满不确定性。而基于深度学习的波形到时拾取方法,则通常能够减少对参数设置的依赖,从而简化了整个过程。

因此,开展针对深埋隧道围岩微震降噪与到时拾取的快速、高精度的深度学习研究,不仅能够为微震震源定位及震源参数的计算提供合理而有效的技术支持,同时也为未来的地震监测与预警系统的发展奠定了坚实的基础。通过深入探索这一领域的创新技术,我们有望进一步提升微震信号处理的效率与准确性,从而为地震灾害的防范和应对提供更为有力的支撑。

1.2.3 微震震源定位方法研究

微震震源定位的精度在微震监测技术中占据着至关重要的地位,直接影响着监测结果的有效性和准确性。通过高精度的微震监测技术,研究人员能够准确定位岩体内部微破裂(即微破裂事件)发生的具体位置,这一过程不仅有助于揭示岩体的破裂行为,还能够对围岩的稳定性进行全面评估。

通常情况下,良好的震源定位效果受到多个因素的共同影响,其中微破裂波形的到时拾取精度、微震阵列的布置方式以及所采用的震源定位方法均起着关键作用。首先,波形

到时的准确拾取是震源定位的基础,任何误差都可能导致最终定位结果的不准确。其次,微震阵列的合理布置能够优化信号接收的质量,提高震源定位的精度。例如,阵列的空间分布、传感器的类型及其灵敏度等,都会对波形信号的获取产生重要影响。最后,震源定位方法的选择也至关重要,利用不同的算法处理同一数据时,计算原则和处理策略的不同可能导致定位结果出现差异。

因此,在微震监测的研究与应用中,确保震源定位的高精度显得尤为重要。通过不断优化波形到时的拾取算法、合理配置监测阵列,并选择适合的震源定位方法,能够显著提高微震监测技术的有效性,为岩体工程的安全评估及预警提供坚实的数据支持。随着技术的不断进步,微震监测将为地下工程的稳定性分析与风险管理提供更为精准的信息,从而推动相关领域的可持续发展。

1. 传统的震源定位方法

早期的微震震源定位方法主要源自盖革(Geiger)定位法,这是一种经典的微震震源定位算法。Geiger定位法由地震学家Geiger于20世纪初提出,其核心在于利用走时信息进行震源定位。这一方法本质上是高斯-牛顿拟合算法的应用,通过求解偏导数和逆矩阵来实现震源的精确定位。由于Geiger定位法简捷有效,其在当时迅速成为微震监测领域的基础技术。

在Geiger定位法的基础上,许多学者开展了大量的研究,旨在克服传统方法的局限性。例如,董陇军等(2011)关注到测量速度误差对定位精度的影响,提出了三种无须预先测量速度的震源定位数学模型,有效提升了定位结果的可靠性。李健等(2014)则在深入分析传统单纯形法及多种速度模型相关误差的基础上,提出了一种无须测速和反演的速度模型,为微震震源定位技术的应用开辟了新的方向。

除了基于走时的定位方法,基于波形的震源定位技术也逐渐引起研究者的关注。这类方法利用波形信号的传播特性进行定位,已成为传统方法的重要补充。Dales等(2017)提出了一种结合互相关技术的波形定位方法,并将其成功应用于地下矿井的地震监测。Shi等(2019)基于不同接收器的波形,通过皮尔逊相关系数的堆叠,发展出一种多通道相干迁移方法,显著提高了数据定位的效率。此外,姜小欢等(2023)采用接收函数逆时偏移(receiver function-reverse time migration, RF-RTM)方法,对地壳结构进行了深入成像,为微震震源定位技术的进一步发展提供了新视角。

尽管传统震源定位方法在微震监测中取得了一定的成就,但随着地下工程规模和复杂性的不断增加,其局限性逐渐显露。传统方法在面对深埋地下复杂地质条件时,常常难以满足高精度和高效率的需求。因此,针对这些挑战,亟须研发更为先进的震源定位技术,以适应日益复杂的地下环境和工程需求。整体而言,传统震源定位方法的研究现状表明,尽管取得了一定的成果,但在应对新兴挑战时仍需不断创新和改进,以推动微震监测技术的持续进步。

2. 微震震源定位智能优化算法

近年来,启发式算法(heuristic algorithm)在微震震源定位领域的应用愈加广泛。作为