

强动压巷道围岩稳定性控制研究进展与智能控制对策

李青锋^{1*}, 吴昊², 卢清芹², 刘臻³

(1. 湖南科技大学 矿业工程研究院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;
3. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 智能化控制是先进科学技术应用于岩土工程的时代潮流, 也是岩土工程安全、高效、经济的集中体现。首先从动压巷道围岩结构与采动应力监测、动压巷道围岩变形机理与稳定性分类、巷道围岩稳定性监测与智能控制 3 方面进行了系统性文献综述。然后重点阐述了围岩稳定性智能控制对策, 以围岩应力环境及其结构探测系统为基础, 遗传算法、人工神经网络的智能优化算法为核心, 建立动压巷道智能优化设计结构模型和巷道围岩稳定性评价人工神经网络模型。最后提出围岩自适应控制概念, 设计一种适用于锚杆、锚索的智能液压托板。

关键词: 智能化控制; 动压巷道; 围岩稳定性控制; 人工神经网络; 自适应控制

中图分类号: TD322 文献标志码: A 文章编号: 1672-9102(2022)02-0017-09

Research Progress and Intelligent Control Countermeasures of Surrounding Rock Stability Control of Strong Dynamic Pressure Roadway

LI Qingfeng¹, WU Hao², LU Qingqin², LIU Liu³

(1. Institute of Mining Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Intelligent control is not only the trend of advanced science and technology applied in geotechnical engineering, but also the embodiment of safety, efficiency and economy of geotechnical engineering. Firstly, a systematic literature review is carried out on the surrounding rock structure and mining stress monitoring, surrounding rock deformation mechanism and stability classification, surrounding rock stability monitoring and intelligent control. Then, the paper focuses on the intelligent control strategy of surrounding rock stability. Based on the detection system of surrounding rock stress environment and its structure, and the intelligent optimization algorithm of genetic algorithm and artificial neural network as the core, the paper establishes the intelligent optimization design structure model of dynamic pressure roadway and the artificial neural network model of surrounding rock stability evaluation. Finally, the concept of adaptive control of surrounding rock is put forward, and an intelligent hydraulic support plate suitable for bolt and anchor cable is designed.

Keywords: intelligent control; dynamic pressure roadway; stability control of surrounding rock; artificial neural network; adaptive control

随着近年来煤矿开采深度的增加,巷道围岩的稳定受到了邻近煤层的采动作用的影响,在多次强动压作用下,巷道围岩出现了多维度不对称的变形破坏,极大地影响了煤矿的安全生产,在智能矿山的时代背景下迫切需要对强动压巷道围岩稳定性安全、高效、经济的智能化控制.笔者基于动压巷道稳定性控制研究进行系统性综述,提出以围岩应力环境及其结构探测系统为基础,遗传算法、人工神经网络的智能优化算法为核心的围岩自适应控制概念.

1 动压巷道围岩稳定性控制研究现状

1.1 动压巷道围岩结构与采动应力监测研究

巷道围岩复合结构在矿井工程应力作用下呈现复杂的、非均衡的变形破坏现象,围岩局部结构失稳和应力扰动是引起工程结构失稳、破坏的直接因素,巷道围岩有效控制的基础保障是在巷道服务期内准确获知围岩结构与采动应力.针对围岩结构,彭苏萍等^[1]利用地震技术对巷道进行了全断面探测,实现了软弱结构面的空间定位和围岩结构的精确探测;蒋金泉等^[2]采用探地雷达技术测定研究了弱结构破坏区域形态的奇异性;孙辉等^[3]采用探地雷达结合钻孔窥视的方法联合测定岩体的结构及破坏情况,发挥了探地雷达探测结果与钻孔窥视的优势互补作用;张幼振等^[4]提出了一种基于钻进参数和模糊 C 均值聚类算法的含煤地层岩性模糊识别方法,该方法能够在 PDC 锚杆钻头回转钻进条件下快速识别典型含煤地层岩性;王思栋等^[5]利用 ZKXG30 钻孔成像仪,在巷道掘进过程中,对巷道顶板及帮部煤岩体进行钻孔探测,量化分析获得了煤层巷道围岩裂隙时空演化规律;汪进超等^[6]提出一种基于定向声波扫描的钻孔围岩结构探测方法,能够实现钻孔围岩结构特征的立体呈现和参数提取,为岩体结构中不良地质特征的勘测提供一定的数据支持.

针对采动应力,周钢等^[7]采用空心包体应力测量技术,在原岩地应力实测基础上监测采动应力的演化过程,探究采动应力影响下工作面覆岩及巷道围岩应力的动态变化规律;李远等^[8]利用空心包体地应力测量基本理论,提出双温度补偿技术,研发岩体扰动应力长期监测系统,并在工程现场实现对岩体扰动应力的实时监测;李杨等^[9]基于微震监测数据计算微震能量指数与位移云图分布,并分析围岩应力变形演化规律;王恩元等^[10]为了定向测试煤岩体多向应力及其演化规律,自主研发了三向缸体压力感应器和煤岩体应力动态监测系统.

综上所述,深部围岩的监测主要围绕着岩体自身结构的稳定性与应力扰动.目前,单一监测手段获得的数据难以将围岩压力与结构响应精准有效地建立联系,围岩压力、结构响应和巷道围岩变形之间的内在联系仍然不清晰,仍需不断地优化动压巷道围岩监测系统,使之达到动压巷道围岩稳定性智能控制需求.

1.2 动压巷道围岩变形机理与稳定性分类研究

随着开采深度和开采强度的增加,一些经历多次采动影响的回采巷道和准备巷道的围岩变形的非线性、非均衡性、突变性越来越明显,巷道支护与维护也越来越困难.袁越等^[11]对深部动压巷道塑性区形态演化规律进行深入分析,阐明了蝶形塑性区形成的力学条件,界定了塑性区恶性扩展及其临界的定义,揭示了深部动压回采巷道的变形破坏机理;黄炳香等^[12]基于深井强采动巷道围岩所处应力环境及其大变形特征,初步提出了深部采动巷道围岩流变和结构失稳大变形理论框架,其核心思想是巷道围岩结构运动、围岩劣化、梯度应力和偏应力诱导围岩裂隙扩展、软岩流变与结构性流变大变形、破裂岩体长时扩容,基本问题包括深井采动巷道围岩应力路径、考虑应力路径的偏应力和梯度应力对巷道围岩的作用机理、巷道围岩锚固承载结构流变大变形、巷道围岩结构失稳大变形等;宁建国等^[13]的研究结果表明:深部冲击应力与高围岩应力叠加是大断面硐室围岩变形破坏的主要原因,锚固界面(锚固剂/锚杆、锚固剂/岩体)的黏结程度在锚固体对应应力波能量耗散过程中起到了关键作用,深部大断面硐室锚固承载结构的失稳破坏是由于动载作用下硐室围岩、锚固剂和锚杆三者之间不协同变形造成的剪切滑移及锚固体受动载压缩变形导致的;陈上元等^[14]认为采动应力造成巷道围岩应力场的大小和方向发生了改变,是巷道产生非对称变形的主要因素;杨军等^[15]的研究表明,受工作面动压影响,采准巷道临空帮和巷道底板为围岩脆弱区,动压

影响程度随动压源与扰动巷道之间距离的增大而减小,动压巷道与动压源之间的竖直应力呈双峰拱形非对称分布;郝登云等^[16]认为,采空区下近距离特厚煤层回采巷道失稳主要影响因素为迎邻近工作面回采动压掘进、巷道布置方式和巷道支护参数不合理。

连续的较小围岩变形不会影响巷道围岩稳定性及其正常使用,非连续的围岩大变形使巷道围岩不稳定甚至无法正常使用,根据围岩变形情况进行围岩稳定性分类并适时支护非常重要。杨更社^[17]认为,单凭传统的塑性理论、塑性区范围的大小难以对矿山围岩稳定性做出合理判断,必须进一步查明软化区(不稳定区)、硬化区范围;庞建勇等^[18]结合平顶山矿区煤巷赋存条件提出了围岩稳定性综合分类方法,以地压系数(综合指标)、围岩松动圈和节理发育程度这 3 个指标研究煤巷围岩稳定性变化规律,得到了评价围岩稳定性的统计判据;曹野^[19]在金属矿山根据实时监测到的爆破震动信号进行巷道围岩类别确定与诊断分析,并给出相应的工程措施;谭旭燕等^[20]运用 Markov 链分析了围岩的失稳过程,建立了单条巷道和多条巷道的支护结构失效模型,并依据现场实测数据对巷道围岩稳定性进行了分析;谷拴成等^[21]将锚杆与围岩的复合体等效为围岩加固体,提出依靠加固体变形程度来评价围岩稳定性的方法,分析了岩体和锚杆参数对围岩稳定性的影响;靖洪文等^[22]认为,巷道围岩松动圈分类是建立围岩稳定性评价方法的核心内容,为此形成深部大松动圈围岩综合指标分类法;王连国等^[23]基于人工智能专家系统的基本原理,结合软岩巷道锚注支护设计的基本过程,建立了软岩巷道锚注支护设计专家系统结构模型。

由此可见,采动巷道围岩变形机理复杂,围岩大变形极易导致围岩与支护结构失稳,最终使围岩稳定性类别发生跃迁。目前,巷道围岩变形与支护结构相互作用的机理尚不完全明确,支护结构对围岩稳定性劣变的影响机制仍需进一步研究,有必要基于采动巷道围岩稳定性智能控制的迫切需求,在精准获取围岩压力、围岩结构、支护结构参数与围岩变形的基础上,进行围岩稳定性类别评定,并提出针对性的围岩稳定性控制措施。

1.3 巷道围岩稳定性监测与智能控制研究现状

一般来说,巷道围岩稳定性随采掘扰动影响而变化,对巷道围岩稳定性实施监测也是保障煤矿安全的关键。杨光宇等^[24]基于围岩动态结构演化,将掘进工作面及其后方分为迎头区、塑性圈动态演化区、塑性圈稳定区,提出在掘进过程中对巷道的“围岩震动、围岩应力、锚杆锚索支护力”实现实时在线监测,根据监测到的巷道围岩破裂活动、煤岩体应力和支护结构应力变化实施加强支护;李义等^[25-26]认为,围岩位移、锚杆工作荷载是锚杆支护巷道稳定性评价的重要参数,采用相似模拟方法研究了围岩变形和锚杆工作荷载二者的对应关系,提出了通过锚杆工作荷载评估巷道围岩稳定性的设想;康红普等^[27]针对千米深井巷道围岩高应力、强采动的特点,提出通过布置离层仪、钻孔应力计、岩层结构窥视仪、围岩表面位移监测仪来评价围岩控制效果;张向东等^[28]结合 MATLAB 软件的 GA 工具箱与有限差分软件 FLAC^{3D},采用模拟计算值与工程实测值确立适应度函数,智能寻优反演围岩位移等效力学参数,并用于巷道变形预测与控制;单仁亮等^[29]认为,通过精准广泛地采集地层岩性、地质构造、岩体结构、支护体受力、矿山压力动态及围岩变形等实测数据,并与支护装备动作信息实时互馈,实施智能支护;薛广哲等^[30]设计了具有锚固岩体界面力学状态感知和变形重构功能的自感知锚杆,并成功地应用于煤矿巷道锚固岩体的感知实践;杨森等^[31]以一台数码相机与漫射光源组成成像系统,架构了一种以数字图像处理技术为基础的结构面参数全自动统计分析系统,最终计算结构面特征参数与 GSI 评级;陈得民^[32]研制了一种无线智能锚杆,实践表明该智能锚杆既对岩体有加固作用,又可以实时监测隧道岩体健康状态;邓建辉等^[33]的实验结果表明,大理岩破坏的声发射信号均存在明显的、与试验方法无关的双主频特征,低主频带对应微观拉破裂,高主频带对应微观剪破裂。

巷道围岩应力环境及其围岩稳定性类别不同,其支护措施也不同。王其洲等^[34]针对 U 型钢支架支护动压影响巷道强烈变形的支护难题,提出了 U 型钢支架-锚索协同支护技术,明显改善巷道围岩应力分布,增大巷道浅部围岩残余强度;吴建星等^[35]认为,高应力厚煤层动压巷道围岩的控制,必须把巷道围岩看作一个整体,使整个巷道形成一个整体承载结构;李延辉等^[36]针对动压沿空巷道,提出了预应力让压、

非对称支护方案,使应力分布非对称的巷道围岩控制在变形基本对称的范围内;郭相平^[37]在强烈动压巷道的支护试验结果表明,高预应力强力锚索支护技术对强烈动压巷道服务期间围岩变形控制效果显著;娄金福^[38]根据试验巷道围岩支护体的信息反馈结果,提出了高预应力强力一次支护;陈晓祥等^[39]基于综放面动压回采巷道的变形特征和两类滑移面的分布规律,提出了“携顶底,控两帮”的支护思想;杨建威等^[40]针对高瓦斯动压煤巷,提出高预应力高延伸率锚杆锚索+强力护表构件+补强锚索强帮强顶控制技术.随着综采工作面智能化程度的不断提升,巷道支护也需要在智能支护方面不断创新.张科学^[41]认为大断面巷道变形智能控制技术是综掘工作面智能化开采的关键技术之一;杨健健等^[42]认为支护装备受力变形感知是对锚杆锚索、托板、金属网等构件受力及变形的感知,通过监测锚杆锚索工作状态,判断锚杆锚索是否发生屈服和断裂;张广山等^[43]为解决煤矿井下空顶作业及时告警问题,研究了智能视频分析技术在煤矿井下空顶作业检测中的应用,杜绝了掘进工作面的超循环作业和空顶作业安全隐患;张君^[44]针对目前井下巷道锚护存在的问题,基于 TRIZ 理论的实际内容和解题思路,研究发明的矿用智能锚护机器人,解决了现有锚杆维护采用人工矿山顶板、侧壁维护存在作业环境恶劣、危险系数高、工作效率低等问题.

综上所述,在巷道围岩稳定性监测与智能控制方面虽然已取得较多研究成果,但离解决工程实际问题仍有较大差距,仍需在围岩应力环境及其结构探测、巷道支护智能优化设计、围岩稳定性评价和围岩稳定性自适应控制等方面进一步加强研究,提高巷道围岩稳定性智能控制水平.

2 智慧矿山背景下的围岩稳定性智能控制对策分析

2.1 围岩应力环境及其结构探测

地下采掘对周围岩体内的原岩应力场产生扰动,使得原岩应力重新分布,围岩应力环境显著不同于原岩应力,既存在几倍于原岩应力的高应力场,又出现裂隙+低应力场.不论是巷道掘进在高应力场,还是掘进在裂隙+低应力场,2种应力场环境对巷道围岩变形也有其截然不同的影响,在巷道掘进前,以及掘进过程中开展围岩应力环境及其结构探测非常有必要.为此,在综合前人研究基础上,针对矿山的动压影响巷道,提出了如图1所示的围岩应力环境及其结构探测系统.

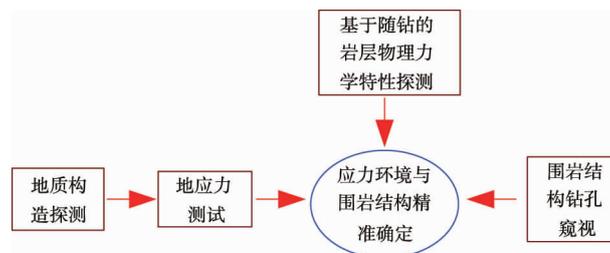


图1 应力环境与围岩结构探测系统

图1所示的围岩应力环境及其结构探测系统技术原理主要体现以下3个方面:一是巷道掘进前,对于构造影响区域,采用物探手段(如探地雷达)对断层(或褶曲)进行物性参数精准探测,以及采用空心包体地应力测量仪进行地应力测试,并结合井田范围内其他区域的地应力测试数据,进行地应力由点及面解译,形成矿井地应力等值线图,为巷道位置选择及定向提供数据支撑;二是在巷道掘进过程中,当钻锚索孔时,在钻杆与钻机之间套接随钻监测仪,监测锚索孔钻进时的钻机推力、扭矩及其三向振动随钻深变化的情况,以及在成孔后进行钻孔窥视,综合确定巷道顶板岩层分层厚度、硬度、强度和弹性模量等,为巷道支护初步设计提供数据支撑;三是在巷道服务期间,结合围岩破裂的微震与电磁辐射监测数据,以及围岩松动圈、支护结构受力与围岩变形监测数据,进一步分析围岩压力及其围岩结构劣变情况,为优化巷道加强支护设计提供数据支撑.上述应力环境与围岩结构探测与监测手段成熟、技术原理科学可靠,通过进一步的数据分析与数据处理,在精确掌握采动巷道围岩变形机理的基础上,可以为巷道围岩稳定性智能控制提供有力的数据支持.

2.2 巷道支护智能优化设计

巷道支护智能优化设计应体现出设计、施工、围岩变形与支护结构力学参数监测、再优化支护设计全过程.首先在掌握巷道围岩应力环境与围岩结构基础上,根据巷道服务需求,综合采用工程类比法和数值模拟仿真方法进行巷道支护初步设计.然后按照设计支护参数支护围岩,并开展巷道掘进过程中的矿山压力显现感知,且根据巷道矿山压力感知结果即时加强支护,实现巷道围岩稳定性的智能控制.最后,根据已施工、围岩稳定巷道段的围岩结构参数、围岩变形值和支护结构受力值,在考虑时变效应基础上,运用位移反分析法反演围岩力学参数,并进行后继施工段的支护参数优化设计.基于面向对象编程和人工智能专家系统的基本原理,建立动压巷道智能优化设计结构模型,如图 2 所示.该系统模型结构主要包括 4 个部分,即人机界面模块、知识库模块、推理机模块和后处理模块.

人机界面模块主要包括启动、地质力学参数输入、采动条件参数输入、数据库存取等操作.知识库模块是巷道支护智能优化设计专家系统的核心,它直接决定支护参数设计结果的合理性.为此,必须收集相应矿区的典型支护案例,形成案例知识库.如对盘江矿区所属煤矿进行智能优化设计,必须对盘江矿区动压影响巷道的应力环境、围岩结构、支护参数和围岩变形等情况深入调研,分类归纳为地质力学参数知识、掘进期支护知识、动压影响期支护知识,如表 1 所列.

表 1 动压巷道支护智能优化设计专家知识整理

类别	项目	具体内容
动压巷道地质力学参数	巷道类型	煤巷、半煤巷、岩巷、新掘巷道,计算潜在松动破坏范围.返修巷道,围岩松动圈探测,确定巷道破坏类型
	巷道断面	断面形状、断面尺寸
	围岩性质	围岩强度、弹模、残余强度和蠕变常数
	围岩结构	层理、节理、裂隙发育情况
	原岩应力	巷道埋深、水平应力
	固定支承压力的	巷道与周围采空区和老巷的位置关系
掘进期支护与围岩变形	掘进方式	炮掘、综掘
	临时支护	支护结构、支护强度
	永久支护	支护结构、支护参数、支护时机
	围岩变形	巷道掘进后围岩变形的时间历程
采动影响期支护与围岩变形	采动支承压力的	正在掘进与回采工作面与巷道的位置关系,以及垂直方向、水平方向上的距离关系
	动力扰动	巷道围岩的冲击倾向性、关键层破断的微震强度
	加强支护	支护形式(架棚、抬楼或锚索)、支护强度、支护时机
	围岩结构变化	围岩裂隙分布及其时变特征
	围岩变形	围岩变形的时间历程

同时,基于图 2 所示结构模型提出的巷道支护智能优化设计系统应具有以下 4 个方面的特征:(1)目的性,提出巷道服务期内围岩变形满足使用要求的经济支护参数;(2)结构性,系统能对知识库的知识表示和知识组织形式进行修改和完善;(3)有效性,系统通过训练学习到的新知识必须有益于改善系统的行为;(4)开放性,系统能够在其实际使用过程中或同环境交互过程中不断进化.根据以上 4 个特征,基于支持向量机、遗传算法、人工神经网络,提出如图 3 所示的巷道支护智能优化设计系统.支持向量机根据巷道类型、巷道断面形状与断面积和掘进方式进行围岩类型分类,根据巷道围岩强度、弹模、残余强度和蠕变常

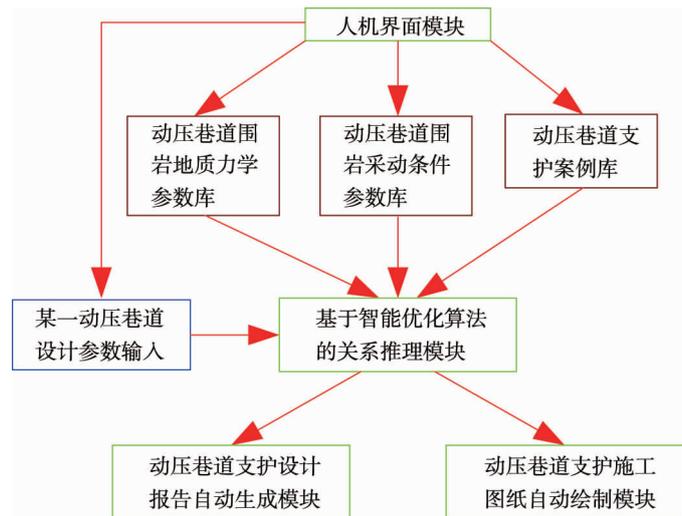


图 2 动压巷道智能优化设计结构模型

数进行围岩性质分类,根据层理、节理、裂隙发育情况和是否返修巷道进行围岩结构分类,根据巷道与周围采空区和老巷的位置关系进行采动应力环境分类.以围岩类型、围岩性质、围岩结构、采动应力环境、原岩应力、临时支护强度、掘进期巷道顶底板最大允许移近量、掘进期两帮最大允许移近量为输入神经元,锚杆间排距、锚杆(锚固)长度、锚杆预紧力、支护成本为输出神经元,隐节点数由遗传算法确定.

在一定支护成本条件下,锚索锚固参数(锚索间排距、锚索(锚固)长度、锚索预紧力)与锚杆间排距、锚杆(锚固)长度、锚杆预紧力耦合能有效地控制围岩稳定,并使巷道围岩变形最小.为此,在已知围岩地质力学参数、锚杆间排距、锚杆(锚固)长度、锚杆预紧力、支护成本条件下,建立锚索锚固参数与围岩变形的关系式,采用遗传算法求得一定支护成本的锚索间排距、锚索(锚固)长度、锚索预紧力、锚杆间排距、锚杆(锚固)长度、锚杆预紧力.

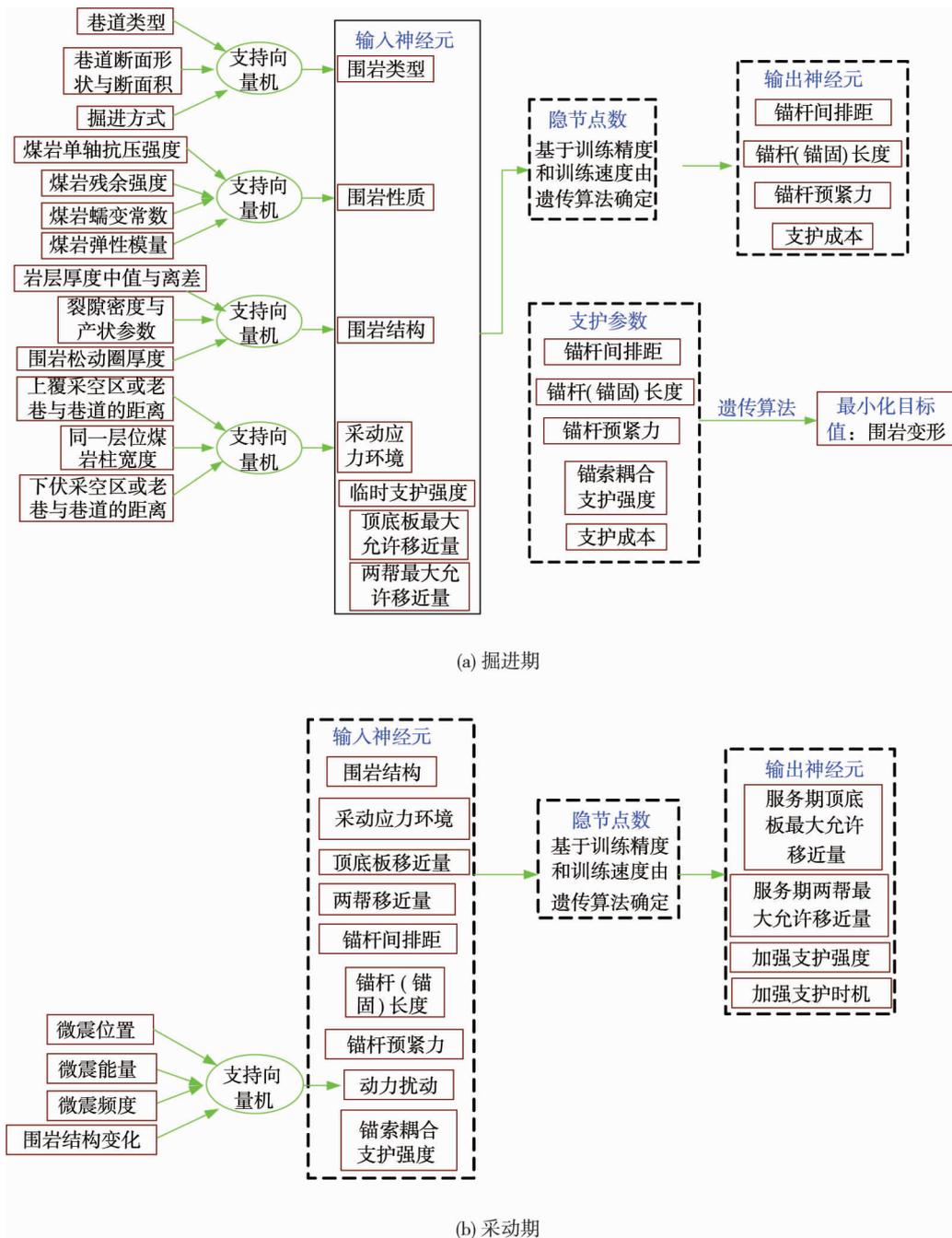


图3 动压巷道锚杆支护智能优化设计系统

支持向量机再根据正在掘进与回采工作面与巷道的位置关系,以及垂直方向、水平方向上的距离关系进行掘采影响分类,以及根据关键层破断的微震强度、频度和围岩结构变化进行动力扰动影响分类.再以锚杆间

排距、锚杆(锚固)长度、锚杆预紧力、锚索间排距、锚索(锚固)长度、锚索预紧力、掘进期巷道顶底板移近量、掘进期巷道两帮移近量、掘采影响、动力扰动影响、服务期巷道顶底板最大允许移近量、服务期两帮最大允许移近量为输入神经元,加强支护强度、加强支护时机为输出神经元,隐节点数同样由遗传算法确定。

2.3 围岩稳定性评价

由锚杆和锚索构成的锚杆索支护结构是巷道永久支护最常见的一种,但是,由于支护质量、锚固体损伤和应力环境变化等原因,前述智能优化设计的锚杆索支护方案并不一定能完全确保巷道围岩稳定,仍需进行巷道围岩稳定性评价并适时采取相应的控制措施,才能确保巷道围岩在全服务周期内安全稳定。围岩变形与支护结构力学参数监测是巷道围岩稳定性评价与自适应控制必不可少的一环,围岩变形包括围岩松动区范围、巷道表面位移、顶底板离层和两帮屈曲分离,围岩松动区范围由微震监测、围岩结构钻孔监测综合确定。支护结构力学参数包括支护结构受力和允许承载力。围岩位移感知主要是对顶底板移近量、两帮移近量、锚固区内顶板离层量、锚固区外顶板离层量的监测感知,并根据围岩位移感知结果验证锚杆支护参数设计合理性,从而判断锚杆的支护效果和围岩的稳定状况。支护结构受力感知是对锚杆锚索、托板、金属网等构件受力情况的感知,通过监测锚杆锚索工作状态,评价判断巷道围岩稳定性。

围岩稳定性评价就是基于监测到的围岩变形与支护结构力学参数实时定量评价围岩状态。为此,以监测的围岩变形和锚杆锚索的受力及其工作状态为依据,将围岩稳定性状态分成 5 级: I 级(非常稳定状态,即过支护状态)、II 级(稳定状态)、III 级(稳定平衡状态)、IV 级(弱稳定状态,即欠支护状态)、V 级(失稳状态)。其中 I 级(非常稳定状态)是指当采动应力增加 30% 以上时,围岩仍然保持稳定; II 级(稳定状态)是指当采动应力增加 20%~30% 时,围岩仍然保持稳定; III 级(稳定平衡状态)是指采动应力增加 10%~20% 时,围岩保持稳定; IV 级(弱稳定状态)是指采动应力增加 0~10% 时,围岩失稳; V 级(失稳状态)是指在已知原岩应力、采动应力及相应支护参数作用下围岩失稳。由于围岩变形与支护结构受力的非线性关系,一般的理论解析公式较难完整描述这种非线性关系,围岩稳定性评价同样采用基于遗传算法、人工神经网络的智能优化算法。首先,采用 3DEC 等数值模拟软件,给定围岩的应力环境、物理力学参数及其相应的支护参数进行数值模拟,得到巷道围岩破断及其引起的围岩松动区和塑性区,并基于围岩松动区范围、巷道表面位移和支护结构受力随计算步变化的关系曲线判断围岩稳定性,若围岩失稳,确定为 V 级(失稳状态)。若围岩稳定,则增加围岩应力至 1.1, 1.2, 1.3 倍,根据围岩稳定性状态判断围岩稳定级别。如此,可建立包含一些实际案例的围岩稳定性评价资源库,以围岩松动区范围、监测锚杆(锚索)的轴力向量和巷道表面位移向量为输入神经元,围岩稳定性状态级数为输出神经元,由遗传算法优化得到隐神经元个数后建立人工神经网络进行训练,就可得到围岩稳定性级别与围岩变形、支护结构力学参数的非线性关系,然后根据监测到的围岩变形与支护结构力学参数评价监测巷道的围岩稳定性级别。围岩松动区范围、锚杆(锚索)的轴力和巷道表面位移的向量维数根据煤矿巷道锚杆支护技术规范确定的监测时间及其监测频次确定。如此建立的巷道围岩稳定性评价人工神经网络模型如图 4 所示。

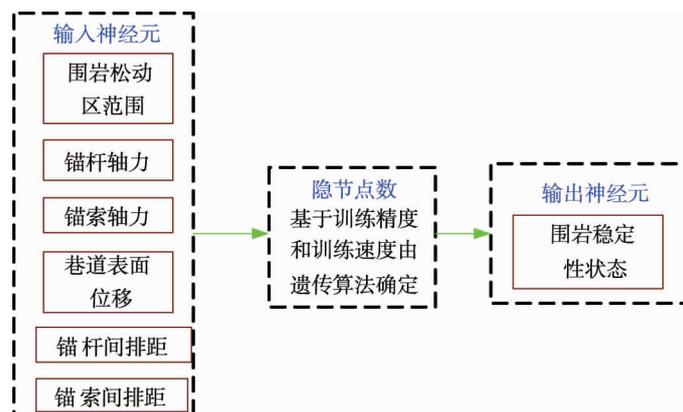


图 4 巷道围岩稳定性评价人工神经网络模型

2.4 围岩稳定性自适应控制

目前,绝大部分巷道围岩稳定性控制是在巷道围岩变形超过限定值后再适当加强支护,此种情况下加强支护常有事倍功半的效果.为此,本文提出一种自适应控制的概念.即在巷道围岩正常变形时,通过微震监测、围岩结构钻孔监测、巷道表面位移监测和支护结构受力监测等手段获取围岩结构变化、支护结构力学参数和围岩变形,根据微震监测、围岩结构钻孔监测结果确定围岩松动圈范围,并将监测整理的数据输入到图4,实时分析围岩稳定性状态并实时加强支护,从而实现自适应控制.

实现围岩稳定性自适应控制的关键是支护结构具有自感知、自动作的功能,即研发适用于锚杆、锚索的智能液压托板,托板的受力由压力传感器采集,并由托板的受力得到锚杆、锚索的轴向工作载荷.该智能液压托板具有高压补液囊,补液动作由电磁阀根据锚杆、锚索受力实时控制.随着巷道掘进和回采工作面回采,锚网索支护巷道的锚杆、锚索工作载荷在动压影响下存在瞬时波动和短期升高情况,此时智能液压托板的具体动作如下:(1)托板的压力传感器主动采集锚杆、锚索的工作载荷;(2)结合围岩变形和围岩松动区范围,若变形与锚杆、锚索受力两者变化趋势相反,则驱动电磁阀打开补液口,高压补液囊向智能液压托板供液;(3)托板的压力传感器同步采集锚杆、锚索的工作载荷,当工作载荷同比增加20%或达到锚固力的80%时,高压补液囊停止向智能液压托板供液,电磁阀关闭补液口.围岩松动区范围由微震监测、围岩结构钻孔监测确定.

3 结论

1)建立以知识库、关系推理模块为专家系统核心的动压巷道智能优化设计结构模型,实现了从设计-施工-围岩变形与支护结构力学参数监测-再优化支护设计全过程的巷道支护智能优化设计.

2)将巷道围岩稳定性状态分为5级,基于围岩松动区范围、围岩变形与支护结构力学参数的巷道围岩稳定性评价人工神经网络模型,定量评价围岩状态,为围岩稳定性自适应控制提供基础数据保障.

3)提出一种巷道围岩稳定性自适应控制概念,设计一种适用于锚杆、锚索的智能液压托板,规定智能液压托板的具体动作,从而实现支护结构的自感知、自动作.

参考文献:

- [1] 彭苏萍,王希良,肖建华,等.软岩巷道围岩损伤破坏范围的地震探测研究[J].中国矿业大学学报,2001,30(1):25-28.
- [2] 蒋金泉,曲华,刘传孝.巷道围岩弱结构灾变失稳与破坏区域形态的奇异性[J].岩石力学与工程学报,2005,24(18):3373-3379.
- [3] 孙辉,李桂臣,卫英豪,等.物探法结合钻孔窥视在岩体结构探测中的应用[J].煤矿安全,2014,45(4):141-144.
- [4] 张幼振,张宁,邵俊杰,等.基于钻进参数聚类的含煤地层岩性模糊识别[J].煤炭学报,2019,44(8):2328-2335.
- [5] 王思栋,朱宗磊,杨斌.滨湖矿巷道围岩裂隙演化规律实测研究[J].煤矿安全,2019,50(10):66-70.
- [6] 汪进超,王川婴,胡胜.基于定向声波扫描的钻孔围岩结构探测方法[J].工程科学与技术,2020,52(1):118-125.
- [7] 周钢,李玉寿,张强,等.陈四楼矿综采工作面采场应力监测及演化规律研究[J].煤炭学报,2016,41(5):1087-1092.
- [8] 李远,刘子斌,乔兰,等.基于数字化CSIRO双温补偿方法的岩体扰动应力长期监测系统的研发与应用[J].工程科学与技术,2018,50(5):18-26.
- [9] 李杨,杨天鸿,侯宪港,等.基于微震监测的高强度开采工作面围岩响应规律[J].东北大学学报(自然科学版),2017,38(6):854-858.
- [10] 王恩元,徐文全,何学秋,等.煤岩体应力动态监测系统开发及应用[J].岩石力学与工程学报,2017,36(s2):3935-3942.
- [11] 袁越,王卫军,袁超,等.深部矿井动压回采巷道围岩大变形破坏机理[J].煤炭学报,2016,41(12):2940-2950.
- [12] 黄炳香,张农,靖洪文,等.深井采动巷道围岩流变和结构失稳大变形理论[J].煤炭学报,2020,45(3):911-926.
- [13] 宁建国,邱鹏奇,杨书浩,等.深部大断面硐室动静载作用下锚固承载结构稳定机理研究[J].采矿与安全工程学报,

2020,37(1):50-61.

- [14] 陈上元,宋常胜,郭志飏,等.深部动压巷道非对称变形力学机制及控制对策[J].煤炭学报,2016,41(1):246-254.
- [15] 杨军,高玉兵,刘世奇,等.动压扰动采准巷道围岩失稳机理及控制研究[J].矿业科学学报,2018,3(5):451-460.
- [16] 郝登云,吴拥政,陈海俊,等.采空区下近距离特厚煤层回采巷道失稳机理及其控制[J].煤炭学报,2019,44(9):2682-2690.
- [17] 杨更社.矿山巷道围岩稳定性的判断准则[J].有色金属(矿山部分),1990(1):16-19.
- [18] 庞建勇,郭兰波.平顶山矿区煤巷围岩综合分类方法探讨[J].岩石力学与工程学报,2006,25(1):179-183.
- [19] 曹野.金属矿山巷道围岩安全监测诊断预警体系[J].金属矿山,2014(9):126-131.
- [20] 谭旭燕,刘伟韬,于师建,等.基于 Markov 链的围岩稳定及支护结构失效模型研究[J].煤炭科学技术,2017,45(2):39-45.
- [21] 谷拴成,周攀,黄荣宾.巷道围岩加固体力学特性与稳定性分析[J].中国安全生产科学技术,2018,14(5):116-123.
- [22] 靖洪文,孟庆彬,朱俊福,等.深部巷道围岩松动圈稳定控制理论与技术进展[J].采矿与安全工程学报,2020,37(3):429-442.
- [23] 王连国,陆银龙,孙小康.软岩巷道锚注支护智能设计专家系统及应用[J].采矿与安全工程学报,2016,33(1):1-6.
- [24] 杨光宇,姜福兴,曲效成,等.特厚煤层掘进工作面冲击地压综合监测预警技术研究[J].岩土工程学报,2019,41(10):1949-1958.
- [25] 李义,高国付,赵阳升.基于特征锚杆工作荷载无损检测的巷道围岩稳定性评估初步研究[J].岩石力学与工程学报,2004(s2):4893-4897.
- [26] 赵文成,李义,高国付.锚杆工作荷载与巷道围岩变形相关性实验研究[J].矿业研究与开发,2014,34(1):58-61.
- [27] 康红普,王国法,姜鹏飞,等.煤矿千米深井围岩控制及智能开采技术构想[J].煤炭学报,2018,43(7):1789-1800.
- [28] 张向东,袁升礼,殷增光,等.基于遗传算法的软岩破碎带巷道围岩参数反分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2018,37(2):285-289.
- [29] 单仁亮,彭杨皓,孔祥松,等.国内外煤巷支护技术研究进展[J].岩石力学与工程学报,2019,38(12):2377-2403.
- [30] 薛广哲.巷道锚固岩体的光纤光栅智能感知机制及应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
- [31] 杨森.基于岩体分类系统的煤巷掘进工作面顶板质量智能感知研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
- [32] 陈得民.无线智能锚杆研制及应用[J].预应力技术,2016(4):18-21.
- [33] 邓建辉,李林芮,陈菲,等.大理岩破坏的声发射双主频特征及其机制初探[J].工程科学与技术,2018,50(5):12-17.
- [34] 王其洲,谢文兵,荆升国,等.动压影响巷道 U 型钢支架-锚索协同支护机理及其承载规律[J].煤炭学报,2015,40(2):301-307.
- [35] 吴建星,方树林.高应力厚煤层动压巷道底鼓力学机理及控制技术[J].煤炭科学技术,2018,46(12):86-91.
- [36] 李延辉,孙佳欣,王振伟,等.郭屯煤矿动压沿空巷道破坏机理及支护控制[J].煤矿安全,2019,50(1):157-160.
- [37] 郭相平.强烈动压巷道围岩变形破坏机理及加固技术[J].煤矿开采,2016,21(6):57-60.
- [38] 娄金福.动压巷道离层变形特征及支护技术研究[J].煤炭科学技术,2015,43(4):6-10.
- [39] 陈晓祥,杜贝举,王雷超,等.综放面动压回采巷道帮部大变形控制机理及应用[J].岩土工程学报,2016,38(3):460-467.
- [40] 杨建威,孙志勇.高瓦斯动压煤巷变形机理与控制技术[J].煤矿开采,2017,22(1):55-59.
- [41] 张科学.综掘工作面智能化开采技术研究[J].煤炭科学技术,2017,45(7):106-111.
- [42] 杨健健,张强,吴森,等.巷道智能化掘进的自主感知及调控技术研究进展[J].煤炭学报,2020,45(6):2045-2055.
- [43] 张广山,杨富强,彭伟,等.基于智能视频识别技术的煤矿井下空顶作业告警应用研究[J].数字通信世界,2018(9):273.
- [44] 张君.基于 TRIZ 理论的矿用智能锚护机器人设计研究[J].煤矿机电,2018(4):8-12.