

文章编号: 1673-3363-(2013)05-0648-05

# 煤矿巷道支护方案专家系统及应用研究

杨仁树<sup>1</sup>, 马鑫民<sup>1</sup>, 李清<sup>1</sup>, 张军<sup>1</sup>, 白晓生<sup>1,2</sup>, 王茂源<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083;

2. 汾西矿业集团中兴煤业公司, 山西 吕梁 033000)

**摘要** 煤矿巷道支护方案是涉及到工程地质、生产条件及岩石力学等因素的复杂理论技术问题, 煤矿巷道支护方案专家系统针对这一难点, 将巷道支护领域专家经验、典型工程案例、理论研究成果与计算机人工智能技术能结合, 建立了内容丰富的巷道支护专家经验、典型案例、理论研究成果知识库, 采用基于规则和典型案例2条途径推理出巷道支护初始方案, 运用FLAC<sup>3D</sup>二次开发技术建立了巷道支护模型运行程序并编译成动态链接库文件进行加载和调用, 实现了基于数值模拟的巷道支护方案优化, 并自动生成巷道支护断面图表。以山西某煤矿巷道支护方案设计为例进行应用, 结果表明系统优化方案合理、可行。

**关键词** 煤矿巷道; 支护方案; 专家系统

**中图分类号** TD 822

**文献标志码** A

## Research on expert system of roadway supporting schemes for coal mine and its application

YANG Ren-shu<sup>1</sup>, MA Xin-min<sup>1</sup>, LI Qing<sup>1</sup>, ZHANG Jun<sup>1</sup>, BAI Xiao-sheng<sup>1,2</sup>, WANG Mao-yuan<sup>1</sup>

(1. School of Mechanics & Civil Engineering, State Key Laboratory of Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Zhongxing Mine,

Fenxi Mining Group Company, Lvliang, Shanxi 033000, China)

**Abstract** Concerned with geology condition, production conditions, mining conditions and rock mechanics, supporting schemes of mine tunnel is an involved problem of theory and technology. Aiming at the above-mentioned problem, the expert system of roadway supporting schemes for coal mine combines expert experience, typical engineering cases and theoretical achievements with artificial intelligence technology; establishes content-rich knowledge base of expert experience, typical engineering cases and theoretical research achievements; adopts initial program for roadway support inferred from two methods of rules and typical cases; builds the program for the roadway support model and compiles into dynamic-link library files loaded and invoked based on the secondary development technology of FLAC<sup>3D</sup>; realizes optimization of the roadway support on the basis of the initial program and generates sectional chart of roadway support automatically. An application example is presented in coal mine in Shanxi province; the results prove that the system optimization scheme is reasonable and feasible.

**Key words** roadway; supporting schemes; expert system

收稿日期: 2012-05-10

基金项目: 国家自然科学基金煤炭联合基金重点项目(51134025)

作者简介: 杨仁树(1963-), 男, 安徽省和县人, 教授, 博士生导师, 从事岩土工程方面的研究。

E-mail: mdh0530@163.com

Tel: 010-62339225

大量的巷道开掘使得保持巷道畅通和围岩稳定对煤矿建设与生产具有重要意义<sup>[1]</sup>, 支护效率的高低是影响煤矿巷道掘进速度快慢的重要因素之一, 合理的支护方案是巷道安全高效施工的重要保障。工程类比、理论计算、数值模拟和监控设计作为现阶段主要的巷道支护方法, 单独采用其任何一种都不符合巷道围岩复杂和多变性的特点。因此, 建立可靠、全面、合理的支护方案决策系统切实可行和必要<sup>[2]</sup>。FLAC<sup>3D</sup>在岩土力学计算中重要性不言而喻<sup>[3]</sup>, 其二次开发技术也日益完善, 在地下洞室、矿山工程等领域得到了广泛的应用<sup>[4-6]</sup>。分析总结我国煤矿巷道施工特点, 融合工程类比、理论计算和专家经验, 利用智能技术开发基于FLAC<sup>3D</sup>的巷道支护方案专家系统, 进行支护方案优化。最后, 将系统应用于山西某矿的巷道支护方案设计, 取得了较好的效果。

## 1 煤矿巷道支护方案专家系统结构

系统主要包括理论分析、工程类比推理、数值模拟建模和支护绘图4个部分<sup>[7]</sup>。其结构如图1。

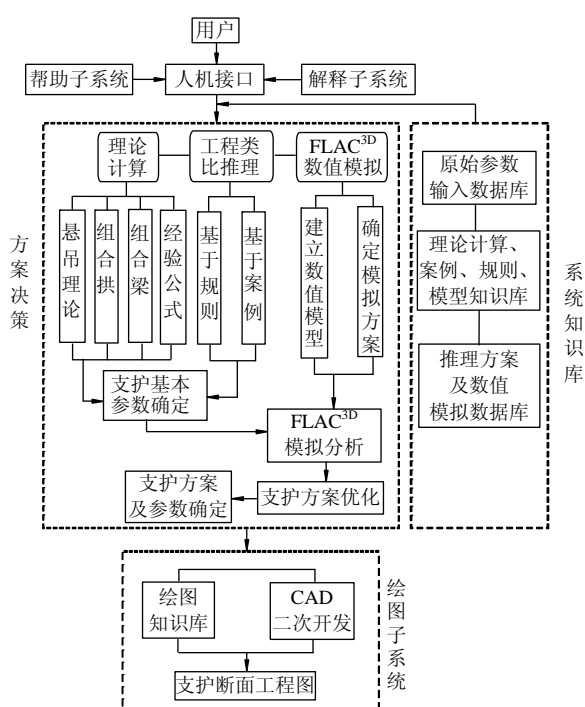


图1 煤矿巷道支护方案专家系统结构图

Fig.1 Structural diagram of expert system for roadway supporting schemes in coal mine

### 1.1 模块化结构设计

系统基于巷道支护理论计算、工程类比、数值模拟等支护方法, 针对各自不同的特点及优劣进行了模块化结构设计, 各模块之间既相互独立, 又相

辅相成。

### 1.2 人机交互界面

人机交互界面是实现用户与系统、知识工程师与系统进行交互的窗口, 是用户应用系统功能的平台, 系统界面设计遵循了简洁、直观、友好、实用性的原则。基于用户的思维及视觉角度去考虑系统界面的管理和设计, 基于煤矿技术人员的使用习惯和易于接受的方式进行模块化布局。

### 1.3 知识库

1) 典型案例知识库: 基于作业规程和施工方案, 分析提取5所矿区煤矿典型巷道支护实例纳入知识库。

2) 专家及经验知识库: 巷道支护领域相关专家理论知识及现场工程技术人员经验知识。

3) 规则知识库: 总结分析专家的学术专著、行业标准、技术报告等文献资料。其中收录的有关标准有《锚杆喷射混凝土支护技术规范》、地方行业标准以及行业规范《采矿工程设计手册》、《煤矿支护手册》、《煤矿安全规程》等。

4) 理论知识库: 支护理论有悬吊理论、组合拱理论、组合梁理论以及经验型公式等。

5) 绘图知识库: 矿山采矿制图标准以及具体煤矿特殊要求等。

### 1.4 推理机

推理机作为专家系统核心内容之一其推理算法描述如下:

1) 提出问题。根据系统要求输入巷道支护方案决策初始条件及相关信息, 并将数据存入数据库。

2) 搜索知识库。当原始数据的某个属性与支护专家知识实例库中的前提条件相似, 即锁定该实例进行下一条件的匹配。否则, 推理结束并进行下一个实例的搜索和匹配。

3) 最大匹配度。从相似巷道支护方案实例中找出最相似的或通过多个实例的组合, 选择匹配度最大的实例形成目标问题的解决方案, 并通过对目标方案的修改来满足当前的要求。

匹配度是指本次支护原始条件与某条支护实例的原始条件的匹配程度<sup>[8]</sup>。它不仅和匹配的条件个数有关, 而且还和原始条件各因素对支护方案的权重有关。

## 2 煤矿巷道支护方案专家系统的实现

### 2.1 理论分析

理论分析作为传统的支护设计方法, 虽然所依

据的理论基础的不同以及假定条件的局限导致其计算结果可能会存在误差,但这种传统的设计方法仍然依靠其自身的优点被广泛应用。它可以结合工程类比法来进行使用。系统基于 3 种理论分析方法,根据巷道断面类型、地质条件、巷道围岩类型等条件,自动给出适合的理论分析方法。并有帮助文件,提示原始数据的使用范围和使用条件。

## 2.2 工程类比推理

影响工程类比的因素较多,系统中只能考虑对支护方案起重要作用的因素。知识库设计基于管理科学,便于知识更新和完善,为推理机提供高效支持。采用产生式规则的知识表示方法,可较简洁地表达知识库中相关知识,易于理解推理,便于人机交换信息<sup>[9]</sup>。

典型案例推理基于总结出各种类型的典型巷道在不同初始条件下的支护方案,并将方案以产生式规则表达方法进行规则化和条理化,将知识分门别类转化为计算机识别的语言作为“专家知识”存入知识库。

支护规则推理知识库是收集煤矿巷道锚杆支护工程有关的规范、规定、标准和要求,基于规则级别、特点进行分层分类管理,对规则的前提条件和结果进行分解和分类,形成便于知识库管理和推理机使用的知识库结构。其结构如图 2 所示。

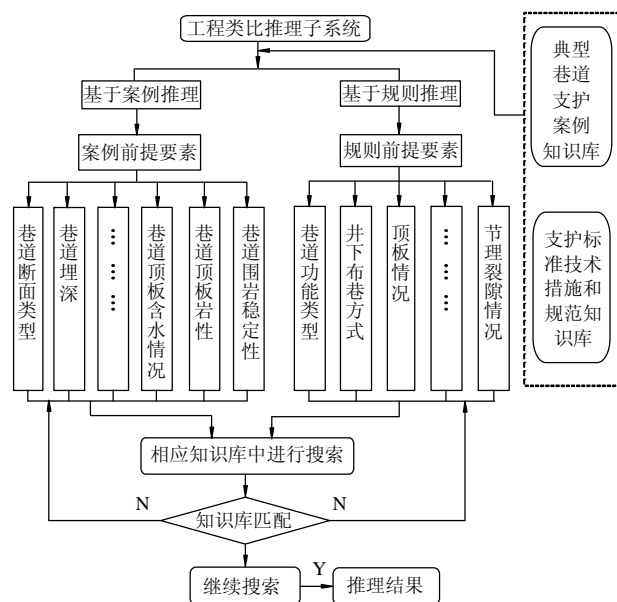


图 2 工程类比推理流程图

Fig.2 Reasoning process graph of engineering analogy

## 2.3 煤矿巷道支护数值模拟系统

### 1) 开发环境

基于分析功能强大的  $FLAC^{3D}$ , 利用 VB 语言以及  $FLAC^{3D}$  接口程序开发, 所有本构模型均以动态链接库的形式提供给用户, 系统会自动调用用户指定的动态链接库 DLL 文件, 实现建模的直观、快速和自动化。系统界面友好、简洁、直观。用户不需要具备任何  $FLAC$  软件知识, 只需输入指定的相关原始数据, 系统便可自动进行方案模拟。

### 2) 系统结构设计

主要包括原始参数输入、模型建立、模拟计算及方案优化。其特点一是模块化结构设计, 利于系统管理、升级和完善; 二是设计操作简单、易行, 基本数据仅为几何图形数据点, 提高了数值模拟的频率; 三是有利于充分发挥理论分析、工程类比法与  $FLAC^{3D}$  有机结合。系统结构如图 3 所示。

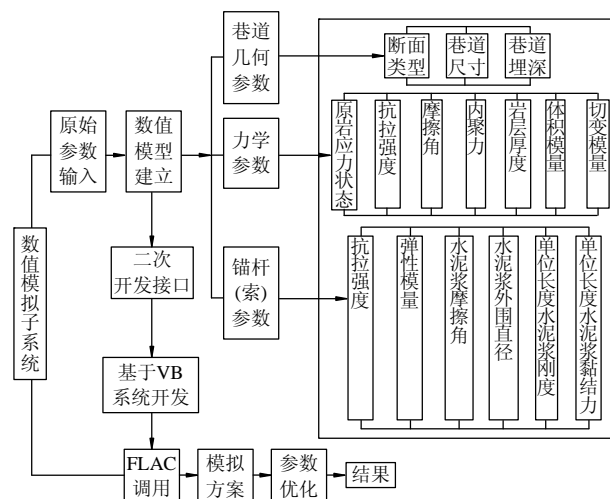


图 3  $FLAC^{3D}$  模拟子系统结构图

Fig.3 Structural diagram of simulation subsystem on  $FLAC^{3D}$

## 3 煤矿巷道支护方案专家系统应用实例

### 3.1 山西某煤矿某巷道基本情况

巷道掘进断面为矩形, 毛宽为 5.0 m, 毛高为 3.8 m。直接顶为粉砂岩, 厚度平均为 7.50 m, 平均单轴抗压强度为 75.6 MPa。伪顶为泥岩, 厚度均为 0.50 m, 平均单轴抗压强度为 35.6 MPa。

经过三维原岩地应力测量, 工作面附近最大主应力为 14.61 MPa, 倾角为 19.7°, 主方位角为 281.3°; 最小主应力为 6.2 MPa, 倾角为 12.4°, 方位角为 188.7°。最大、最小主应力为近水平主应力。中间主应力为垂直主应力, 大小为 9.8 MPa, 倾角为 74.6°, 主方位角为 247.4°。

### 3.2 系统初始支护方案决策

启动工程类比法进行初始方案决策。首先, 基

于巷道实际情况,输入类比关键指标原始参数。其次,系统调用典型案例知识库前提条件与关键指标进行逐一匹配,并将匹配度结果存入临时数据库。接着进行下一个案例的匹配直到完成所有案例搜索和匹配。最后系统会自动提取最大匹配度  $a = \max\{a_i\}$  的实例作为当前相似实例。该实例工程类比子系统推理给出初始支护方案,支护形式采用锚杆+锚网+锚索支护。

### 3.3 基于 FLAC<sup>3D</sup> 的巷道支护模拟分析

1) 原始数据输入。启动 FLAC<sup>3D</sup> 子系统,并根据原始参数输入界面进行相关数据输入。

2) 系统模型建立。系统基于输入数据进行模型建立。根据输入数据该案例模拟范围的长、宽分别为 40 m 和 60 m, 横向和纵向网格分别为 40 个和 70 个。模型原岩应力场根据现场实测的地应力值进行应力初始化得到,各岩层的初始水平应力与其弹性模量有关。采用库伦-摩尔模型来模拟岩层的应力

-应变特征。各岩层之间采用 Interface 单元进行连接,采用 Cable 单元模拟锚杆和锚索。

3) 系统模拟方案。根据具体的地质条件和技术条件及工程类比推理的初始支护方案,系统基于正交法共建立 28 个模拟方案,模拟支护关键参数。

#### 4) 模拟结果分析及优化

基于模拟子系统分析结果进行方案优化,系统优化的指标主要是巷道支护移近量和受力 2 种。

① 锚杆根数对支护效果的影响。顶板每排 6 根锚杆时,巷道顶板下沉量为 88 mm,降低 86.8%;两帮煤体相对移近量 62 mm,降低 74.0%,顶板和两帮变形得到有效控制。围岩应力分布如图 4a 和 b 所示,在巷道附近,水平应力和垂直应力都比较小。

每排 4 根锚杆时,巷道破坏和变形状况如图 4c 和 d 所示。当顶板仅有 4 根锚杆时,巷道顶板下沉量为 239 mm,仅降低 64.2%,两帮煤体相对移近量 81 mm,仅降低 59.5%。

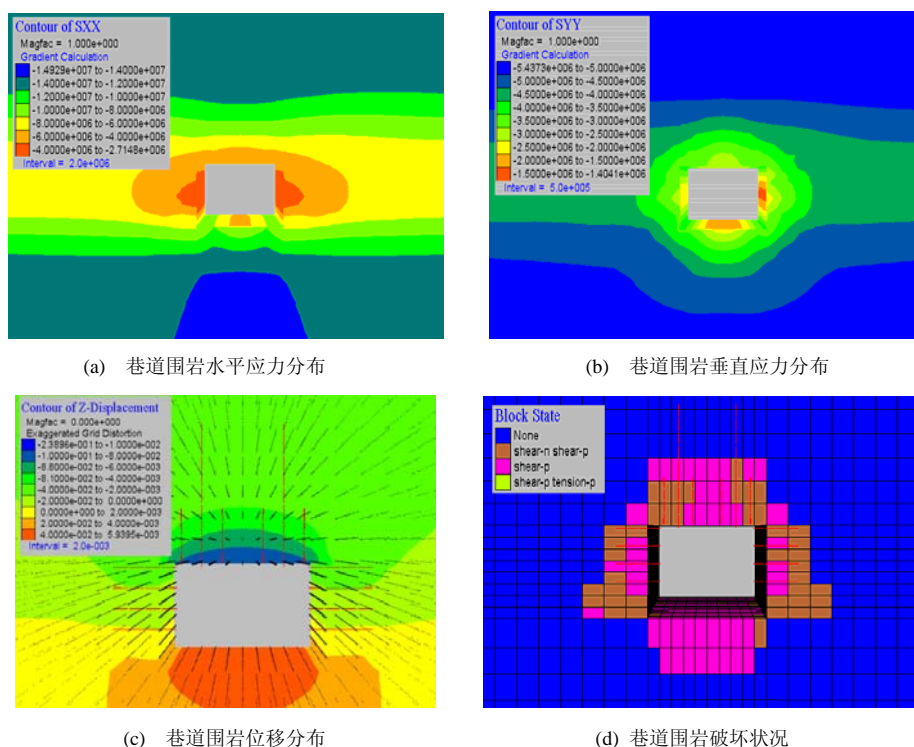


图4 数值模拟相关图形

Fig.4 Associated graphics of numerical simulation

② 顶板锚杆排距对支护效果的影响。锚杆排距从 0.6 m 到 1.0 m,顶板下沉量变化不大。排距从 1.0 m 加大到 1.2 m,顶板下沉量为 140 mm,增加了 52 mm,对支护效果影响明显。

③ 顶板锚杆长度对支护效果的影响。锚杆长度为 1.8, 2.0 和 2.2 m 时,顶板下沉量比 2.4 m 时大,其中锚杆长度 1.8 m 时顶板下沉量增加明显。

④ 顶板锚索排距对支护效果的影响。锚索排距从 0.6 m 到 1.0 m,顶板下沉量变化不大。排距从 1.0 m 加大到 1.2 m,顶板下沉量为 159 mm,对支护效果影响明显。

### 3.4 巷道支护方案

基于巷道支护设计系统理论分析、工程类比以及数值模拟系统方案优化,结合井下实际生产条件

和地质条件, 巷道最终支护方案如下。

1) 顶板。支护形式: 采用锚杆+网+钢带+锚索的联合支护方式。

支护参数: 锚杆长度 2 400 mm, 间距 875 mm, 排距 1 000 mm; 锚索: 单根钢绞线,  $\Phi 22$  mm, 长度 6 300 mm, 每排 2 根, 间距 2 000 mm, 排距 1 000 mm。

2) 巷帮。支护形式: 采用锚杆+网+钢带的联合支护方式; 支护参数: 锚杆长度 2 000 mm, 间距 1 000 mm, 排距 1 000 mm。

系统咨询结果合理, 与工程实际支护相符, 说明了巷道支护方案专家系统决策的可靠性。

基于系统优化方案, 启动绘图子系统自动生成支护断面图如图 5 所示。

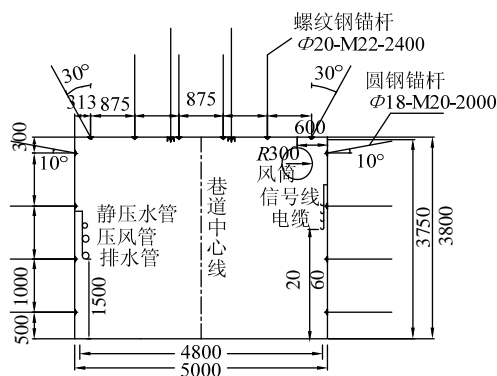


图 5 系统生成的支护断面图 (mm)

Fig.5 Cross-sectional graphics of the support system generated

## 4 结 论

1) 煤矿巷道支护方案专家系统, 采用多种支护设计方法进行有机结合, 利用计算机智能技术和支护专业知识, 建立了具有智能化的推理机、内容丰富的知识库和解释系统, 基本具备了煤矿巷道支护方案决策优化以及支护断面工程图自动绘制功能。

2) 应用该系统对实际煤矿支护案例进行方案决策和优化, 咨询结果与实际情况基本吻合, 证实了系统决策的可靠性, 为煤矿信息化建设和支护技术的发展提供参考。

## 参考文献:

[1] 康红普, 王金华, 林健. 煤矿巷道支护技术的研究与应用[J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1809-1814.  
KANG Hong-pu, WANG Jin-hua, LIN Jian. Study and applications of roadway support techniques for coal mines [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11):

1809-1814.  
[2] 陈建宏, 郑海力, 刘振肖. 基于优势关系的粗糙集的巷道支护方案评价体系[J]. 中南大学学报, 2011, 42(6): 1698-1703.  
CHEN Jian-hong, ZHENG Hai-li, LIU Zhen-xiao. Rough sets of laneway supporting schemes evaluation system based on dominance relation [J]. Journal of Central South University, 2011, 42(6): 1698-1703.  
[3] 彭文斌. FLAC<sup>3D</sup> 实用教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 3-12.  
[4] 刘继国, 曾亚武. FLAC<sup>3D</sup> 在深基坑开挖与支护数值模拟中的应用[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 505-508.  
LIU Ji-guo, ZENG Ya-wu. Application of FLAC<sup>3D</sup> to simulation of foundation excavation and support[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3): 505-508.  
[5] 左双英, 肖明, 陈俊涛. 基于 Zienkiewicz-Pande 屈服准则的弹塑性本构模型在 FLAC<sup>3D</sup> 中的二次开发及应用[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3515-3520.  
ZUO Shuang-ying, XIAO Ming, CHEN Jun-tao. Secondary development and application of an elastoplastic constitutive model based on Zienkiewicz-Pande yield criterion in FLAC<sup>3D</sup> [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3515-3520.  
[6] 高富强. 基于 FLAC 的煤巷锚杆支护设计系统开发与应用[J]. 煤炭工程, 2007(8): 104-106.  
GAO Fu-qiang. Development and application of rock bolting design system based on FLAC[J]. Coal Engineering, 2007(8): 104-106.  
[7] 马鑫民, 杨仁树, 张京泉. 煤矿巷道锚杆支护智能绘图系统开发与应用[J]. 中国矿业, 2010, 19(11): 77-80.  
MA Xin-min, YANG Ren-shu, ZHANG Jing-quan. Development and application of intelligent plotting system for rock bolting in coal mine roadway[J]. China Mining Magazine, 2010, 19(11): 77-80.  
[8] 杨仁树, 曹洪洋, 王伟. 岩巷定向断裂爆破专家系统中的关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2004, 32(2): 56-58.  
YANG Ren-shu, CAO Hong-yang, WANG Wei. Key technologies of directional cracking blasting expert system for mine roadway[J]. Coal Science and Technology, 2004, 32(2): 56-58.  
[9] 朱元青, 周海清, 陈正汉. 厦门深基坑支护智能选型专家系统知识[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 867-870.  
ZHU Yuan-qing, ZHOU Hai-qing, CHEN Zheng-han. Expert system knowledge of intelligent choice of supporting type for deep excavation Xiamen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(5): 867-870.