

[文章编号] 1004- 0609(2001) 01- 0157- 05

空场采矿法采场顶板破坏模式识别专家系统^①

刁心宏¹, 冯夏庭¹, 于培言¹, 蔡鸿起²

(东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110006; 2. 马鞍山矿山研究院, 马鞍山 243004)

[摘 要] 对房柱式空场采矿法采场顶板破坏模式及其影响因素进行了探讨, 建立了识别顶板破坏模式的知识库, 并用 VC++ 语言开发出了识别顶板破坏模式的专家系统。实际应用表明, 用该专家系统识别的顶板破坏模式与实际的顶板破坏模式基本吻合。

[关键词] 空场采矿法; 顶板破坏模式; 专家系统

[中图分类号] TD 85

[文献标识码] A

有资料统计, 在黑色金属矿山的锰矿开采、有色金属矿山和化学工业矿山的地下开采中, 空场采矿法的使用比例分别约为 90%, 40% 和 60%^[1]。由此可见, 空场采矿法在我国矿山开采中占有重要地位。而顶板安全管理一直是空场采矿法生产过程中的重要一环, 并且常常成为这一采矿方法应用成败的关键。因此, 在设计阶段根据已获得的地质资料准确预测顶板的稳定性和可能的破坏方式是实施空场法采矿的一项十分重要的工作^[1~ 5], 只有这样才能在生产过程中根据进一步的揭露不断进行修正, 以便在矿体回采实施前或在实施过程中采取恰当的顶板控制措施, 确保采矿生产的顺利进行。

众多专家学者在地质、采矿和岩石力学领域应用人工智能专家系统进行了卓有成效的研究工作, 取得了令人瞩目的成就^[6~ 12]。在顶板安全方面, 山东科技大学(原山东矿业学院)的宋振骐院士等人研制了用于煤矿顶板控制的专家系统^[9, 10], 而用专家系统方法识别房柱式采场顶板失稳破坏模式目前在国内尚属空白。因此, 用人工智能方法研究采场顶板失稳破坏模式及控制方法, 对于增强人们预测顶板灾害的能力, 促进人工智能在采矿工程领域的推广应用, 无疑具有十分重要的现实意义。采场顶板破坏模式识别专家系统 FMC-1 的研制是作者在这方面的初步尝试。

1 顶板破坏模式及其影响因素

所谓顶板破坏模式, 即指当矿石回采过后, 悬

露顶板的失稳破坏方式。长期的工程实践表明, 空场法采矿的顶板破坏模式主要有以下几种。

1) 顶板离层垮冒。其产生条件通常是, 顶板岩体为层状岩体、单层连续性较好但层间结合差、岩层较软、岩石强度较低; 直接顶板较薄、顶板跨度较大、顶板岩体软弱、强度较低。在岩体自重以及构造应力作用下, 顶板岩层之间分离或直接顶板与老顶分离, 产生弯曲变形, 当弯曲变形产生的拉应力超过岩层的抗拉强度时, 顶板岩体即向采空区垮冒。

2) 顶板折断垮落。其产生条件是, 顶板的整体性较好, 但有倾角较大的断层破碎带垂直矿体走向切割采场顶板, 顶板中等厚度以下, 岩体强度较低。由于有断层破碎带切割顶板, 而且断层破碎带比较软弱, 甚至沿断层破碎带发生抽冒, 直接顶板成为一个悬臂梁, 因而在岩体自重作用下岩梁发生折断破坏。

3) 顶板拱形冒落。其产生条件是, 顶板岩体结构类型为块状或碎裂状岩体、层状但被节理裂隙切割的岩体, 节理裂隙结合强度低, 顶板厚度大。顶板岩体的岩块在其自重作用下, 逐渐向上冒落形成拱形是其破坏特征。

4) 顶板楔形冒落。其产生条件是, 顶板被一条或多条断层破碎带或较大裂隙切割, 并且与顶板夹角较小, 岩体强度较低, 顶板厚度较大。若顶板被单个结构弱面切割, 则形成的楔形体在岩体自重作用下发生折断垮冒; 若顶板被两个或两个以上的结构弱面组合切割, 则切割形成的棱柱或棱锥就会脱

① [基金项目] 国家自然科学基金资助项目(59679019)

[收稿日期] 2000- 01- 27; [修订日期] 2000- 07- 11

[作者简介] 刁心宏(1960-), 男, 高级工程师, 硕士。

离母岩而冒落。

5) 沿断层破碎带抽冒。其产生条件是,有断层破碎带切割顶板,且断层破碎带较厚、倾角较大。如果断层破碎带垂直矿体走向展布,并且直接顶板厚度较小,则断层破碎带的抽冒还会继而引起顶板的折断垮冒。

6) 顶板不规则冒落。其产生条件是,顶板岩体结构为块状或碎裂状,或为层状顶板但被节理裂隙切割,节理裂隙粘结强度低。若顶板厚度较小且无断层破碎带或大规模裂隙弱面切割顶板,则不可能产生上述破坏模式,顶板破坏与否取决于局部的顶板岩体质量及小范围的裂隙分布情况。

影响上述顶板破坏模式的因素可以概括为两个方面,即地质因素和工程因素。地质方面的因素主要包括:顶板是否被大型结构弱面切割,若是,与顶板的空间关系如何;矿体倾角;顶板厚度;顶板岩体结构;岩石及节理裂隙强度等。工程方面的因素主要包括开采深度和顶板跨度等。对不同的破坏模式,各因素所起的作用大小不同,这可以通过赋予各因素在不同破坏模式里的不同权重来体现。

2 知识库的建立

2.1 知识的收集

有关顶板破坏模式的知识,来源于三个方面:一是前人的理论研究成果和工程经验,二是专家们的经验体会,三是作者的实践经验和体会。通过查阅大量的有关论著和文献资料,与经验丰富的专家进行交流,结合作者的实际工作经验,进行分析、提取、归纳和总结,并按照如下形式整理、记录。

序号: 条件。

破坏模式。

例如

357: 顶板岩体结构为完整层状,岩石强度低,顶板厚度为薄,矿体倾角小于 30 度。

顶板发生离层垮冒。

402: 顶板岩体结构类型为块状,节理裂隙类型为张开型,结合强度低,顶板厚度为厚,矿体倾角小于 30 度。

顶板发生拱形冒落。

共收集整理这样的知识 421 条,并按照下列顺序进行排列:

① 楔形冒落;

② 沿断层破碎带抽冒;

③ 折断垮落;

④ 离层垮冒;

⑤ 拱形冒落;

⑥ 不规则冒落。

2.2 知识的表达

知识的表达方法通常有产生式规则表示法、语义网络表示法、框架表示法、状态空间表示法和神经网络表示法等,结合所研究问题的特征,这里采用产生式规则来表达。具体规则表示为如下形式:

rule(结论可信度, 规则编号, 结论, 〈前提条件编码表〉, 〈条件权重表〉)。

例如, 357 号和 402 号知识分别表示为

rule(0.9, 357, “离层垮冒”, [102, 124, 171, 161], [0.3, 0.25, 0.25, 0.20]);

rule(0.8, 402, “拱形冒落”, [104, 131, 142, 173, 161], [0.3, 0.15, 0.15, 0.25, 0.15])。

3 推理策略

3.1 推理方法

本系统采用基于随机、模糊分析的不确定性推理和反向推理方法进行推理。反向推理是先提出假设(结论),然后寻找支持这个结论的证据的方法,其步骤如下:

① 验证所提假设是否在数据库中,若在则假设成立,这时推理过程结束或进行了一个假设的验证,否则进行下一步;

② 判断所验证的假设是否证据节点,若是,系统就提问用户,否则进行下一步;

③ 找出结论部分包含这个假设的规则,并把它们的前提部分的事实作为新的假设;

④ 重复 ①、②、③步,直到一个假设成立为止。若所有假设都不成立,系统回答顶板结构稳定。

根据上述推理步骤,反向推理设计的示意图如图 1 所示。

顶板破坏模式的识别为典型的岩石力学问题,影响顶板破坏模式的诸多因素的描述通常是模糊的和不确定的,因此,本系统采用模糊数学方法进行不确定性推理。当系统提问事实时,用户给出事实存在的可信度(0~1),如果给出的可信度小于某一阈值,则认为事实不存在。结论或中间结论的可信度由式(1)计算:

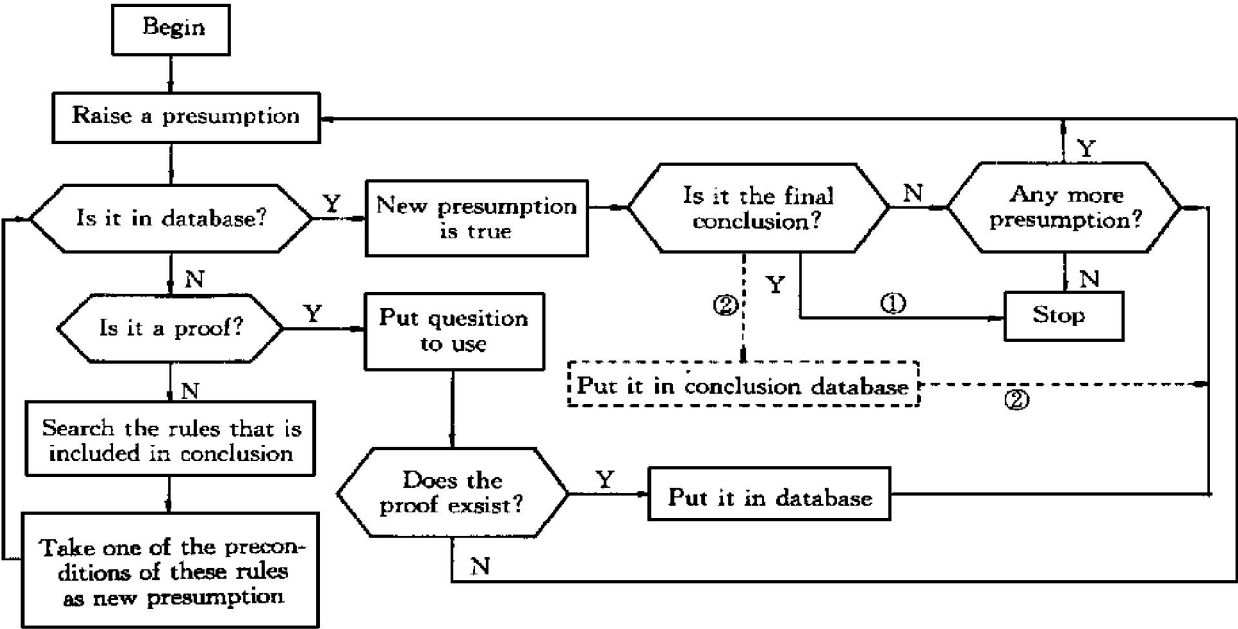


图 1 反向推理示意图

Fig. 1 Sketch map of reverse direction reasoning

$$f(q) = \sum_{i=1}^n w_i \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^{i_s} (x_j^i \lambda_j)^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{i_s} \lambda_j^2}} \tag{1}$$

式中 w_i —第 i 条推理路径或证据源的权重。即支持某一结论的前提命题(事实或中间结论)都存在时,该结论成立的可信度,由专家确定; x_j^i —第 i 条推理路径第 j 个前提命题(事实或中间结论)的可信度; λ_j —第 j 个前提命题(事实或中间结论)对结论或中间结论的贡献(权重),由专家确定; i_s —第 i 条推理路径或证据源的前提命题的个数。

3.2 多解问题

专家系统在许多领域的应用,均要求解的唯一性,但是岩石力学领域里的许多问题本身是多解的,顶板破坏模式受多种因素影响,在同一个采场里,完全有可能发生两种甚至两种以上模式的失稳破坏。所以,在推理过程中匹配成功后,将结论记入数据库,如果还有假设,则要继续进行匹配,直到规则耗尽为止。为此,将图 1 中的推理路径 ①修改为路径 ②即可。

4 系统开发

4.1 开发环境

本系统采用 VC++ 语言在 Windows 环境下开发,全部过程完全是可视化的,即使是对专家系统完全不懂的人也可以顺利使用该系统进行咨询,极

大地方便了用户。

4.2 系统功能

本系统具有咨询、结果解释和知识查询三大功能。

调入数据库并启动咨询功能模块后,用户即可按照屏幕提示回答系统的提问。系统根据用户的回答进行推理,最后给出推理结果。对于顶板破坏模式的识别,若顶板不稳定,则给出顶板失稳破坏形式,否则系统提示用户复核其提供的事实,如果提供的事实无误,则说明顶板结构稳定。

解释功能能够给出系统的推理路径、推理所使用的规则以及某一规则在推理过程中是否被使用的信息(见图 2)。

查询功能可以实现按条件号查询、按规则号查询和按结论号查询。按条件号查询时,用户给出某一事实的编号,系统即显示包含这一事实的所有规则;按规则号查询时,用户给出规则编号,系统则显示这一规则的条件和所有条件都满足时的结论;按结论号查询时,用户给出结论编号,系统则显示得到这一结论的所有规则。

开放式的知识库设计是该系统的另一个优点。这包含两个方面的内容:其一,凡是能用产生式表示方法表达知识的岩石力学问题,只要按照该系统要求的格式建立知识库,都可以使用本系统进行有关问题的咨询;其二,用户在任何时候都可以用通用的文本编辑软件对知识库进行编辑、修改和补充,极大地方便了用户的使用。

5 系统运行

进行顶板破坏模式咨询时，只需执行 FMC-1 程序，调入知识库 ROOF，即可进行咨询、解释咨询结果和知识查询工作。

为了检验系统运行的正确性，现以遵义锰矿 844 m 中段 3[#] 试验矿块、斗南锰矿 V₈ 矿体 1 560 m 中段 111 号矿块、良山铁矿 220 m 中段浅孔房柱法采场、铜山铜矿前山南矿区 30[#] 矿体开采为例，用 FMC-1 系统进行顶板破坏模式识别(见表 1)。

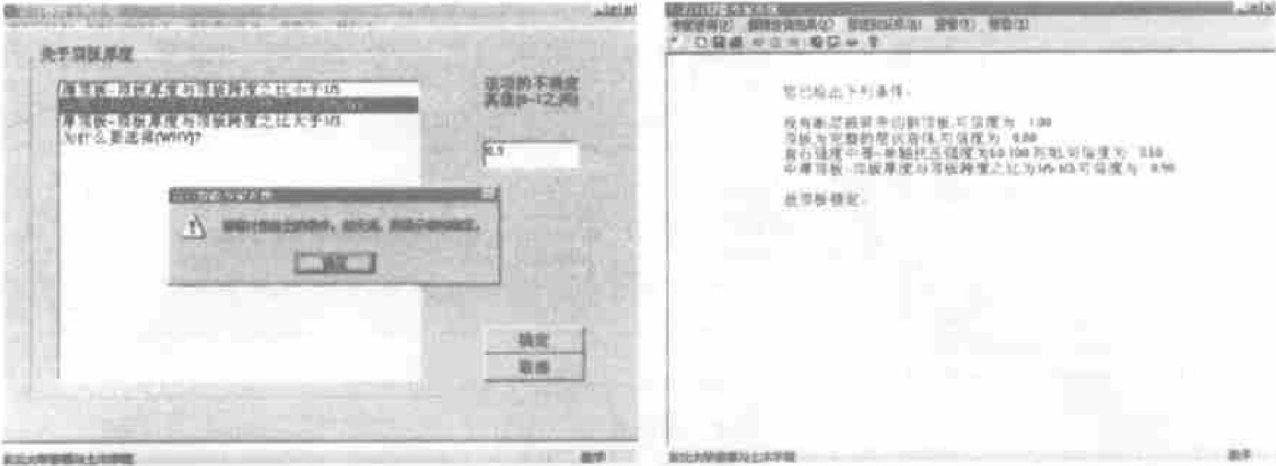


图 2 顶板不破坏时系统的提示及结论解释

Fig. 2 Prompt and explanation of system when hanging wall is stable

表 1 FMC-1 系统预测顶板破坏模式实例

Table 1 Examples of forecasting failure mode of hanging wall by FMC-1 system

Items	Zunyi manganese mine	Dounan manganese mine	Liangshan iron mine	Tongshan copper mine
Mining method	Room and pillar	Room and pillar	Room and pillar	Sublevel open stopping
Hanging wall is cut by structural surface	No	Hanging wall is cut by a joint of bedding	No	No
Trend of structural surface		Intersect with axis of stope in a small angle		
Angle of structural surface		< 30°		
Thickness of structural surface		Small		
Span of hanging wall / m	8	7	11~ 15	12
Thickness of hanging wall/ m	2	2. 7		15~ 18
Angle of ore body / (°)	30	14~ 34	15~ 25	40~ 60
Depth of mining/ m	170	< 300	< 300	< 300
Structure of rock mass of hanging wall	Stratified rock mass	Jointed rock mass	Jointed rock mass	Jointed rock mass
Strength of rock / MPa	40~ 50	40~ 70	100	80~ 100
Type of joint fracture	Close	Close	Close	Close
Binding strength of joint fracture	Bad	Bad	Good	Good
Forecasting failure mode	Collapse because of Departure between strata	Collapse as bending failure	Stability	Stability
Actual failure mode	Large scale collapse because of departure between strata	Collapse as bending failure	Stability	Stability

比较用专家系统识别的顶板破坏模式和实际的顶板破坏模式, 可以看出两者完全相符。说明用专家系统识别顶板破坏模式的方法是完全可行的, 作者建立的识别房柱式采矿采场顶板破坏模式的知识库是合理的。

6 结束语

采矿工程面对的是性质极其复杂多变的地质体, 有关这种地质体的概念的模糊性、性质的不确定性, 使得用传统的确定性研究方法解决采矿工程中的问题遇到了极大的困难和挑战, 这就迫使人们改变传统观念, 从确定性定向思维向不确定性思维和全方位发散思维转变。用专家系统方法研究采矿工程问题, 可以充分发挥人们的形象思维, 并与逻辑思维有机结合起来, 用不确定性思维方法解决不确定性问题, 从而实现由模糊求得精确、由不确定求得确定。可以相信, 专家系统方法在采矿工程领域将得到越来越广泛的应用。

[REFERENCES]

- [1] Information Network for Ferrous Metal Mine of Ministry of Metallurgical Industry(冶金工业部黑色金属矿山情报网). 倾斜缓倾斜中厚以下矿体采矿方法调查报告 [R]. Beijing: Ministry of Metallurgical Industry, 1982.
- [2] Edition Committee of Mining Engineering Handbook(《采矿手册》编辑委员会). Mining Engineering Handbook (Vol. 2)(采矿手册, 第二卷) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1990.
- [3] Edition Committee of Mining Engineering Handbook(《采矿手册》编辑委员会). Mining Engineering Handbook

- (Vol. 4)(采矿手册, 第四卷) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1990.
- [4] Hoek E and Brown E T. Underground Rock Engineering (岩石地下工程) [M], Beijing: Metallurgical Industry Press, 1986.
- [5] GAO Lei(高磊). Rock Mechanics to Mine(矿山岩体力学) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1979.
- [6] HUANG Yun-fei(黄运飞) and FENG Jing(冯静). Computational Engineering Geology(计算工程地质学) [M]. Beijing: Engineering Industry Press, 1992.
- [7] DIAO Xin-hong(刁心宏), FENG Xia-ting(冯夏庭) and YANG Cheng-xiang(杨成祥). 岩石工程中数值模拟的关键问题极其发展 [J]. Metal Mine(金属矿山), 1999, 2: 12- 15.
- [8] FENG Xia-ting(冯夏庭) and DIAO Xin-hong(刁心宏). 智能岩石力学(1)——导论 [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering(岩石力学与工程学报), 1999, 4: 222- 226.
- [9] SONG Zhen-qi(宋振骐) and JIANG Fu-xing(姜福兴). 顶板控制专家系统的研制 [J]. Coal Science and Technology(煤炭科学技术), 1990, 2: 29- 32.
- [10] LIANG Jin-huo(梁金火). 采矿应用专家系统研制进展 [J]. Coal Science and Technology(煤炭科学技术), 1990, 2: 33- 36.
- [11] FENG Xia-ting(冯夏庭) and LIN Yun-mei(林韵梅). Expert System for Rock Mechanics and Engineering(岩石力学与工程专家系统) [M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 1993.
- [12] FENG Xia-ting(冯夏庭) and WANG Yong-jia(王泳嘉). Intelligent System for Mining Engineering(采矿工程智能系统) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994.

Expert system in identifying failure mode of hanging wall of room-and-pillar mining

DIAO Xin-hong¹, FENG Xia-ting¹, YU Pei-yan¹, CAI Hong-qi²

(1. College of Resource and Civil Engineering, Northeastern University,
Shenyang 110006, P. R. China;

2. Ma'anshan Institute of Mining Research, Ma'anshan 243004, P. R. China)

[Abstract] The failure mode of hanging wall of room-and-pillar mining was investigated. A knowledge base in identifying the failure mode of hanging wall was built. An expert system was developed with VC++ computer language to identify possible failure modes of hanging wall at given geological and mining conditions. The application of expert system in actual mines shows that the identified failure modes of hanging wall by this expert system have good agreement with the actual.

[Key words] room-and-pillar mining; failure mode of hanging wall; expert system

(编辑 何学锋)