

基于突变理论的开拓方式优选

王新民, 周彦龙, 张钦礼

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 鉴于常规多指标决策法在处理开拓方案优选问题时存在不足,建立了基于突变理论的开拓方案优选系统。以新桥矿露天转地下开拓方案为例建立评价模型;综合考虑决策开拓方案的影响指标,如经济、技术、地质、通风与环保条件等;对各评价指标依重要性进行整合处理,构建层状评价系统;应用归一公式对评价系统进行递归运算,计算各方案最终突变隶属函数值,得到3个方案的评价值分别为0.960、0.976和0.953,从而确定方案II最优。

关键词 开拓系统;多目标决策;突变优选理论;归一化

中图分类号 TD217

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.30.007

Optimization of Development System Based on Catastrophe Optimization Theory

WANG Xinmin, ZHOU Yanlong, ZHANG Qinli

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract Due to the fact that the conventional multiple attribute decision making methods used to solve the optimization of development system have many drawbacks, an optimization model of the development system is established in this paper based on the catastrophe optimization theory. Taking the development system of the Xinqiao Iron Mine from open-pit to underground as an example, a synthetic assessment model is established. During the evaluation process, many factors of the development system are taken into account, such as the economic and technical factors, the geological conditions, the ventilation and environment protection conditions. All evaluations are sorted by their importance as the first step and then a layered array of the evaluations is established. After that, the recursive calculation is made separately based on the catastrophe optimization theory. Then, the total function values for every method are obtained. The final function values in Xinqiao Iron Mine are 0.960, 0.976, 0.953 and the second model is shown to be the best.

Keywords development system; multiple attribute decision making; catastrophe optimization theory; normalization

0 引言

开拓系统堪比整座矿山的命门中枢,是密切关联矿山几乎所有系统的经脉枢纽,且直接影响矿山的生产运作及近、远景经济效益,加之其工程庞大、施工困难且耗资巨大,故而合理选择开拓系统对整座矿山来讲有攸关之重^[1]。

开拓系统的选择应统筹考虑其决策因素,如地形、地质、技术、经济、生产协作条件、机械化水平、通风与环保条件等,因此开拓系统的选择属复杂多目标决策^[2]问题。传统的开拓系统选择方法是首先根据矿体赋存条件及地表、地形特征进行方案初选,然后采用下列方式进行优化评判:①经验法、技术经济比较法等;②类比法;③三维建模与数值模拟^[2-3];④应用数学工具。第1类方法从经济、技术角度给出周详的评判,

但单因素决策评判会产生片面性;类比法则因不同矿山地形、地质条件的高差异性与现场状况的难预测性导致其借鉴意义有较大折扣;建模与模拟技术应用的侧重点在于提供一个三维可视化平台及安全论证,难以实现对方案的综合评价;与前者相比,数学理论因其可量化定性因子进行综合评价而独具优势,如模糊数学、层次分析法^[4]与密切值法等,但此类方法需对评价指标进行赋权计算,由于难以克服人们主观差异所引起的决策失误,再者有较多评判指标参与评判势必引起较大规模的连锁矩阵解算,也就给此类方法在该领域的应用带来了困难。

突变优选方法^[5-6]是一种能实现多指标综合评判的评价方法。计算过程不使用权重,从而削减了主观性影响,计算简

收稿日期:2013-05-27;修回日期:2013-07-25

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2008BA32B03)

作者简介:王新民,教授,研究方向为充填理论与应用技术,电子信箱:wxm1958@126.com

单、易于操作亦益于提高解算精度与优化效率^[7]。目前该理论在煤炭行业及采矿方法优选领域已有所应用,工程实例也证明该理论应用于多目标决策工程领域是可靠的。由于该理论与开拓系统评价指标的复杂特性高度吻合,本文将突变理论应用于开拓方法优选当中,并以新桥矿露天转地下工程设计实例验证其合理性。

1 突变理论

突变优选理论源于法国数学家 Rene Thom 创立的一门数学学科,用于研究系统状态变量特征关于控制变量特征的依从关系。该学科通过研究系统中势函数分类临界点附近的 状态变化特征,归纳出初等突变模型,并根据系统势函数来研究自然和社会中的突变现象^[8]。突变系统有 7 种基本类型,最常用的有折叠突变、尖点突变、燕尾突变及蝴蝶突变 4 种类型,其势函数见表 1、模型结构见图 1。图 1 与表 1 中 X 是状态变量, $A、B、C、D$ 是按重要程度排序的控制变量。

表 1 突变模型势函数

Table 1 Potential functions of catastrophe optimization model

突变模型	状态变量	控制变量	势函数
折叠突变	1	1	$V(X)=X^3+AX$
尖点突变	1	2	$V(X)=X^4+AX^2+BX$
燕尾突变	1	3	$V(X)=X^5+AX^3+BX^2+CX$
蝴蝶突变	1	4	$V(X)=X^6+DX^4+AX^3+BX^2+CX$

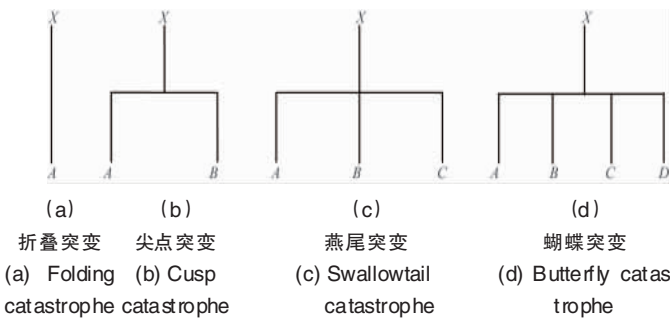


图 1 突变模型结构

Fig. 1 Structure of catastrophe models

2 应用背景

新桥矿是一座东翼露天与西翼地下联合开采的大型矿山,工业储量 1.1 亿 t,目前已形成 150 万 t/a 的产能。西翼地采已进行多年,主井井口毗邻选场,备采矿量不多,产能 60 万 t/a。东翼露天坑底已接近境界水平,产能 90 万 t/a,远离选场。目前为了实现产能衔接、维持经济效益,亟需进行东翼露天转地下工程,以及后期的西翼产能向东翼转接^[9]。

东翼露天转地下开拓方案有下列主要限定因素:

(1) 东翼深部矿石可新建提升系统独立提运,也可由西翼来分担以避免西翼资源枯竭后完备生产系统的废弃与浪费;

- (2) 可进行上盘开拓或下盘开拓;
- (3) 能否修复利用露天坑端部一早期掘成并被封闭的风井;
- (4) 主井位置影响地表矿石运输方式及距离。

根据地表地形条件、矿体赋存特点和设计推荐的采矿方法,并考虑地面运输等因素,初步选定下列 3 个可行开拓方案:

方案 I: 上盘侧翼竖井+斜坡道,主井提升能力按 90 万 t/a 配置;

方案 II: 上盘侧翼竖井+斜坡道,主井提升能力按 150 万 t/a 配置;

方案 III: 下盘侧翼竖井+斜坡道,主井提升能力按 90 万 t/a 配置。

3 突变优选

3.1 构建评价系统图

首先选取系统决策指标,进而根据系统的内在作用机制对其进行层状整合并选取相应突变模型;然后构建层状评价系统。各级评价模型均按重要性排序,即越靠前越重要。

对于新桥露天转地下开拓系统优选问题,统筹考虑露天与地下、西翼与东翼双重空间协作关系及相关影响因素,结合现场现状及行业目的,归纳其主要决策因素为投资、经营费、基建时间、施工条件、生产协作条件、机械化水平、与资源赋存条件协调性、通风条件、地表工业场地条件、区域地质条件、环保条件与利用已有工程程度 12 项指标,且按重要性排序。对上述 12 个影响要素进行整合处理,选取相应突变模型,建立开拓方案优选指标结构(图 2)。

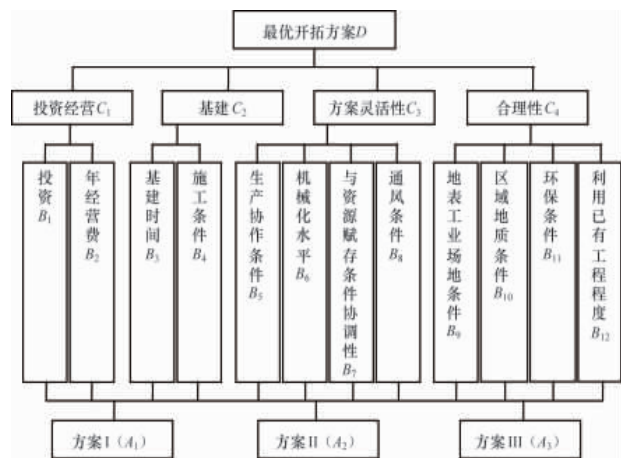


图 2 开拓方案评价指标结构

Fig. 2 Structure of evaluations of development system

3.2 控制变量的无量纲化处理

- (1) 确定控制变量。

新桥各备选方案决策指标对比见表 2,并由专家给出其最终评价等级及其评价价值,列出突变评价表(表 3)。

表 2 方案对比

Table 2 The comparison of all scenarios

序号	项目	A ₁	A ₂	A ₃	
1	C ₁	投资/万	7891.55	7422.37	8892.74
		年经营费/万	1205.63	1230.49	1795.12
	B _{1a}	4.3	3.1	3.6	
2	C ₂	B ₄	可实现地表与西翼地下同时施工;需开掘盲竖井提升系统。最终评价为中。	可实现地表与西翼地下同时施工。最终评价为好。	只能在山体边坡进行地表施工;需开掘盲竖井提升系统;需新掘风井及相关工程。最终评价为很差。
		B ₅	矿石两路提升;作业点与作业人员多;组织协调复杂。最终评价为较差。	作业点集中;组织协调简单;作业人员少。最终评价为好。	矿石两路提升;作业点与作业人员多;组织协调复杂。最终评价为较差。
		B ₆	竖井与斜坡道开拓,机械化程度高。最终评价为好。	竖井与斜坡道开拓,机械化程度高。最终评价为好。	竖井与斜坡道开拓,机械化程度高。最终评价为好。
3	C ₃	B ₇	上盘开拓;能较好地布置相关采切工程;稍多一些联络工程。最终评价为较好。	上盘开拓;能较好地布置相关采切工程;稍多一些联络工程。最终评价为较好。	下盘开拓;距矿体近;能较好地布置相关采切工程。最终评价为好。
		B ₈	作业点多而分散;用风点多。最终评价为差。	作业点集中;用风点少。最终评价为好。	作业点多而分散;用风点多;新掘风井可优化通风系统。最终评价为较差。
		B ₉	有较好的地表工业场地,需平场与搭桥。最终评价为好。	有较好的地表工业场地,需平场与搭桥。最终评价为好。	需要征地;需要剥离部分山体边坡;有铁路影响;最终评价为很差。
4	C ₄	B ₁₀	开拓工程穿过一定结构面与破碎带;竖井附近有河流;地下涌水大;需帷幕注浆。最终评价为中。	开拓工程穿过一定结构面与破碎带;竖井附近有河流;地下涌水大;需帷幕注浆。最终评价为中。	开拓工程穿过少许结构面与破碎带;竖井较远处有河流;地下涌水大。最终评价为较好。
		B ₁₁	减少 40% 的地表汽车运输。最终评价为较好。	全部地表运输。最终评价为差。	减少 40% 的地表汽车运输;主井工业场地附近有个别居民住宅。最终评价为中。
		B ₁₂	充分利用西翼工程与设备。最终评价为很好。	极少利用西翼工程与设备。最终评价为很差。	充分利用西翼工程与设备。最终评价为很好。

表 3 突变评价指标

Table 3 Values of catastrophe evaluations

方案	C ₁		C ₂		C ₃				C ₄			
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇	B ₈	B ₉	B ₁₀	B ₁₁	B ₁₂
A ₁	7891.55	1205.63	5.70	0.55	0.45	0.75	0.65	0.35	0.75	0.55	0.65	0.85
A ₂	7422.37	1230.49	4.10	0.75	0.75	0.75	0.65	0.75	0.75	0.55	0.35	0.25
A ₃	8892.74	1795.12	4.70	0.45	0.45	0.75	0.75	0.45	0.25	0.65	0.55	0.85

(2) 对控制变量进行无量纲化^[10]处理。

控制变量往往具有不同的量纲,需对其进行无量纲化处理,即将控制变量转化为 0~1 的数值。转化方法:

绝对值越大越优型数据:

$$B = \lambda / \lambda_{\max} \quad (1)$$

式中, B 为处理后的评价指标; λ 为指标评价值; λ_{max} 为同类指标评价值中最大值。

绝对值越小越优型数据:

$$B = \lambda_{\min} / \lambda \quad (2)$$

式中, λ_{min} 为同类指标评价值中最小值。

控制变量在 0~1 之间时,无需进行数据处理。

以经营费为例,计算如下。

年经营费属越小越优型, λ_{min}=1205.63。应用公式(2)可得

$$B_{A1} = 1205.63 / 1205.63 = 1.000, B_{A2} = 1205.63 / 1230.49 = 0.980,$$

$$B_{A3} = 1205.63 / 1795.12 = 0.672.$$

年经营费评价环节无量纲化处理结果分别为 1.000, 0.980, 0.672。同理对其他评价指标进行无量纲化处理,结果见表 4。

表 4 无量纲处理结果
Table 4 Dimensionless results

方案	C ₁		C ₂		C ₃				C ₄			
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇	B ₈	B ₉	B ₁₀	B ₁₁	B ₁₂
A ₁	0.941	1.000	0.719	0.550	0.450	0.750	0.650	0.350	0.750	0.550	0.650	0.850
A ₂	1.000	0.980	1.000	0.750	0.750	0.750	0.650	0.750	0.750	0.550	0.350	0.250
A ₃	0.835	0.672	0.872	0.450	0.450	0.750	0.750	0.450	0.250	0.650	0.550	0.850

3.3 归一计算

上述 4 种突变模型的归一化公式^[1]见表 5。表 5 中 A、B、C、D 为经无量纲化处理后的控制变量, X 为归一计算值。各经无量纲化处理的控制变量依据其所属突变模型及所处的位置顺序找出其对应归一公式, 进行归一计算。

表 5 突变模型归一化公式
Table 5 Normalization function of catastrophe model

模型	归一化公式
折叠突变	$X_A=A$
尖点突变	$X_A=A^{1/2} \quad X_B=B^{1/3}$
燕尾突变	$X_A=A^{1/2} \quad X_B=B^{1/3} \quad X_C=C^{1/4}$
蝴蝶突变	$X_A=A^{1/2} \quad X_B=B^{1/3} \quad X_C=C^{1/4} \quad X_D=D^{1/5}$

投资经营、基建、方案灵活性、合理性 4 个评价子系统所

属的突变模型依次为尖点突变、尖点突变、蝴蝶突变、蝴蝶突变。以 A₁ 为例, 归一计算如下。

投资经营子系统:

$$X_{B_1}=B_1^{1/2}=0.941^{1/2}=0.970, X_{B_2}=B_2^{1/3}=1^{1/3}=1.000$$

基建子系统:

$$X_{B_3}=B_3^{1/2}=0.72^{1/2}=0.848, X_{B_4}=B_4^{1/3}=0.55^{1/3}=0.819$$

方案灵活性子系统:

$$X_{B_5}=B_5^{1/2}=0.45^{1/2}=0.671, X_{B_6}=B_6^{1/3}=0.75^{1/3}=0.909, X_{B_7}=B_7^{1/4}=0.65^{1/4}=0.898, X_{B_8}=B_8^{1/5}=0.35^{1/5}=0.811$$

合理性子系统:

$$X_{B_9}=B_9^{1/2}=0.75^{1/2}=0.866, X_{B_{10}}=B_{10}^{1/3}=0.55^{1/3}=0.819, X_{B_{11}}=B_{11}^{1/4}=0.65^{1/4}=0.898, X_{B_{12}}=B_{12}^{1/5}=0.85^{1/5}=0.968$$

同理对 A₂ 与 A₃ 进行归一计算, 得出归一计算函数值, 如表 6 所示。

表 6 归一计算函数值

Table 6 The result of catastrophe normalization computation

方案	C ₁		C ₂		C ₃				C ₄			
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇	B ₈	B ₉	B ₁₀	B ₁₁	B ₁₂
A ₁	0.970	1.000	0.848	0.819	0.671	0.909	0.898	0.811	0.866	0.819	0.898	0.968
A ₂	1.000	0.993	1.000	0.909	0.866	0.909	0.898	0.944	0.866	0.819	0.769	0.758
A ₃	0.914	0.876	0.934	0.766	0.671	0.909	0.931	0.852	0.500	0.866	0.861	0.968

3.4 一级优化计算

对归一计算的结果进行优化计算, 即各模型依据其控制变量(A、B、C……)之间的关系, 计算其状态变量 X, 状态变量 X 的计算原则如下:

(1) 同一系统各控制变量或指标(A、B、C……)之间无相关性, 则该系统状态变量 X 根据“非互补”原则, 按“大中取小”取值;

(2) 同一系统各控制变量或指标(A、B、C……)之间有明显相关性, 则该系统状态变量 X 根据“互补”原则, 取其平均值。

以 A₁ 为例, 一级优化计算如下。

(1) 投资经营子系统变量之间无相关性, 按“非互补”原则取其小值。

$$X_{C_1}=\min\{X_{B_1}, X_{B_2}\}=\min(0.970, 1.000)=0.970$$

(2) 基建子系统变量之间有相关性, 按“互补”原则取其平均值。

$$X_{C_2}=(X_{B_3}+X_{B_4})/2=(0.848+0.819)/2=0.834$$

(3) 方案灵活性子系统变量之间有相关性, 按“互补”原则取其平均值。

$$X_{C_3}=(X_{B_5}+X_{B_6}+X_{B_7}+X_{B_8})/4=(0.671+0.909+0.898+0.811)/4=0.822$$

(4) 合理性子系统变量之间无相关性, 按“非互补”原则取其小值。

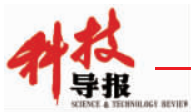
$$X_{C_4}=\min\{X_{B_9}, X_{B_{10}}, X_{B_{11}}, X_{B_{12}}\}=\min(0.866, 0.819, 0.898, 0.968)=0.819$$

同理对 A₂ 与 A₃ 进行回归计算, 结果见表 7。

表 7 一级优化计算结果

Table 7 The first result of optimization computation

开拓方案	D			
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
A ₁	0.970	0.834	0.822	0.819
A ₂	0.993	0.954	0.904	0.758
A ₃	0.876	0.850	0.841	0.861



3.5 二级优化计算

完成上述步骤即完成了一级评价计算。投资经营、基建、生产管理、合理程度 4 个子系统又组成蝴蝶突变模型,按上述计算过程进行二级迭代运算,算出最终方案隶属函数值即可根据其函数值大小评判其优劣,即函数值越大,效果越优。由于该子系统相互之间存在相关性,回归计算按“互补”原则取其平均值,计算结果见表 8。

表 8 最终评价计算结果

Table 8 The final result of evaluation computation

开拓方案	C_1^{U2}	C_1^{U3}	C_1^{U4}	C_1^{U5}	得分	结果
A_1	0.985	0.941	0.952	0.961	0.960	2
A_2	0.997	0.985	0.975	0.946	0.976	1
A_3	0.936	0.947	0.958	0.971	0.953	3

综上可得各备选方案最终的突变优选函数值: $A_1, 0.960$; $A_2, 0.976$; $A_3, 0.953$ 。则开拓方案最优的排序为 $A_2 > A_1 > A_3$, 即 A_2 最优,故选用 A_2 。与项目设计方案推荐结果吻合^[12],证明该理论应用于开拓方案选择是合理、可行的。

4 结论

(1) 依据新桥硫铁矿现状确定 12 个开拓方案决策指标,应用突变优选理论基本原理建立了开拓方案综合评价模型,应用归一公式和优化原则进行迭代运算,计算方案最终评价函数值。

(2) 对具体工程实例用突变优选方法建立综合评判模型进行优选分析,计算出各方案的综合评价函数值为 (0.960, 0.976, 0.953), 从而确定 A_2 最优,与工程设计实例结果一致。

(3) 将开拓方案优选转化为多目标决策问题,用突变优选理论进行综合评价。克服了评价指标难于分配权重的难题,同时也避免了单因素决策的片面性与人们主观认识差异所致的决策失误,并简化解算过程提高优化效率,更兼有评价系统有较多决策因子时,能够做出更为准确、科学、有理论依据的判断。

参考文献 (References)

[1] 采矿手册编委会. 采矿设计手册第二卷[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987.

Editorial committee of Mining Design Manual. Mining design manual: Vol.2[M]. Beijing: China Architecture & Bulding Press, 1987.

[2] 游安弼, 蔡嗣经. 矿山三维实体建模及应用[J]. 矿冶研究与开发, 2007, 27(6): 63-65.
You Anbi, Cai Sijing. Mining Reseach & Development, 2007, 27(6): 63-65.

[3] Yan Y, Qin D, Yu Y, et al. The development of mine digitization information system and its application to the Lanping Pa-Zn mine[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2008, 27(3): 317-324.

[4] Kluge P, Malan D E. The application of the analytical hierarchical process in complex mining engineering design problems[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2011, 111(12): 847-855.

[5] 凌复华. 突变理论及其应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987.
Ling Fuhua. The application of catastrophe theory [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1987.

[6] Zhai J, Wang X. The evaluation of coal mine safety management based on catastrophe theory [C]// 2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce. 2011: 7358-7361.

[7] 白云飞, 叶振华. 基于突变优选理论的采矿方法选择[J]. 金属矿山, 2011, 424(10): 61-67.
Bai Yunfei, Ye Zhenhua. Metal Mine, 2011, 424(10): 61-67.

[8] 谷新建, 柴红保. 应用突变理论选择采矿方法[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(7): 13-15.
Gu Xinjian, Chai Hongbao. China Safety Science Journal, 2004, 14(7): 13-15.

[9] 湖南中大设计院. 新桥矿业有限公司露天转地下开采工程可行性研究报告[R]. 长沙: 湖南中大设计院, 2011.
Hunan Zhongda Design Institute. The feasibility study report about transition from open-pit to underground of Xinqiao mining industry company[R]. Changsha: Hunan Zhongda Design Institute, 2011.

[10] 方崇. 基于燕尾突变理论光面爆破效果的综合评价[J]. 爆破, 2010, 27(4): 40-47.
Fang Cong. Blasting, 2010, 27(4): 40-47.

[11] 高科, 李明, 吴超, 等. 突变级数法在硫化矿爆堆自燃发火预测中的应用[J]. 金属矿山, 2008, 380(2): 20-24.
Gao Ke, Li Ming, Wu Chao, et al. Metal Mine, 2008, 380(2): 20-24.

[12] 湖南中大设计院. 新桥矿业有限公司露天转地下开采工程初步设计[R]. 长沙: 湖南中大设计院, 2012.
Hunan Zhongda Design Institute. The preliminary design about transition from open-pit to underground of Xinqiao mining industry company[R]. Changsha: Hunan Zhongda Design Institute, 2012.

(责任编辑 吴晓丽)



《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映中国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域中国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过 300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。