

文章编号:1000-582X(2010)12-078-06

改进的露天境界优化几何约束模型及其应用

黄俊歆^{1, 2}, 王李管¹, 毕林¹, 谭正华¹, 陈建宏¹

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 湖南工学院安全与环境工程系, 湖南衡阳 421001)

摘要:提出了一种改进的露天境界优化几何约束新模型(improved geometric constraint model, IGCM)。IGCM 基于三维块段模型, 采用图论的方法将每个块段的多边坡角开采锥抽象为节点与有向边的集合, 介绍了利用集合理论对其进行优化的方法, IGCM 由优化后的节点与有向边的集合构成。基于 IGCM 的算法已用于 DIMINE 数字矿山系统中, 并在实际露天矿山的境界优化工程中得到应用。应用表明: IGCM 能够准确模拟任意方位、高程上的边坡角变化, 适应于任何复杂几何约束条件下的露天矿境界优化问题。

关键词:露天矿; 境界优化; 块段模型; 多边坡角; 几何约束模型

中图分类号:TD804

文献标志码:A

The improved geometrical constraint model of open-pit mine boundary optimum and its application

HUANG Jun-xin^{1, 2}, WANG Li-guan¹, BI Lin¹, TAN Zheng-hua¹, CHEN Jian-hong¹

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, P. R. China; 2. Department of Safety and Environment Engineering, Hunan Institute of Technology, Hengyang 421001, Hunan P. R. China)

Abstract: This paper develops the improved geometric constraint model (IGCM) based on the 3D block model. The variable-slope excavation cones of each block have been abstracted to collections of nodes and directed edges, and the optimization method has been introduced using the set theory. The IGCM consists of the optimized collection nodes and directed edges. The algorithm based on IGCM has been actualized in DIMINE digital mine system, and is applied to an actual open pit mine boundary optimization engineering. The results shows that IGCM can accurately simulate variable slope angles in any azimuth and elevation changes, and adapt to all open pit mine boundary optimum problems in any complex geological conditions, calculation speed and accurate. It provides a new and effective method for the variable-slope open pit mine boundary optimization problem in complex geological conditions.

Key words: open-pit mine; boundary optimum; block model; variable slopes; geometrical constraint model

露天境界优化是露天矿开采设计和生产过程控制的重要内容, 是露天矿山生产经营决策的重要依据。长期以来, 国内外学者对露天境界优化理论和

方法进行了深入研究, 提出了多种优化算法, 其中应用最为广泛的是 LG 图论法及浮动圆锥法^[1-2]。此后, 一些学者在此基础上先后提出了 Korobov 算

收稿日期: 2010-09-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50774092)

作者简介: 黄俊歆(1982-), 男, 博士研究生, 从事安全预警、采矿仿真及可视化技术研究, (Tel)0734-6666858; (E-mail)amwwcwujqw@126.com。

王李管(联系人), 男, 中南大学教授, 博士生导师, (Tel)0734-88877665。

法^[3-4]、参数化算法^[5]、动态规划法^[6]、网络最大流法^[7-8]、虚拟流算法^[9-10]等算法。这些算法无疑推动了露天境界优化方法的发展, 但无论运用哪一种算法, 其正确运行都依赖于准确的几何约束模型。

由于露天矿边坡的岩性差异及节理、裂隙发育等特点, 其实际边坡角通常因方位、高程而异, 因此, 准确的几何约束模型应能正确描述任意方位、高程上的边坡角变化情况^[11]。文献[12]介绍的 1:5、1:9、1:5:9 3 种几何约束模型。其中 1:5、1:9 两种几何约束模型为二层模型, 1:5:9 几何约束模型为 3 层模型, 均为近似模型, 无法正确模拟实际露天边坡; 文献[13]介绍的多边坡角几何约束模型能较好的模拟实际边坡角, 但这种模型只能在为东、南、西、北 4 个方位点分别指定不同的边坡角, 形成 4 个方位区间, 各方位区间内以椭圆弧相连形成 1 个渐变的边坡角约束, 在高程方向上只能指定单一边坡角。不能准确描述任意方位、高程上的边坡角变化情况, 未能很好地解决复杂几何约束条件下的露天境界优化问题。基于此, 提出了一种用于露天境界优化的改进的几何约束模型 (improved geometrical constraint model, IGCM), 构建了实现算法, 并用于工程实例分析。

1 露天矿境界优化流程

将矿床划分为有限个尺寸相等的长方体块体 (包括开采的矿石和剥离的废石), 每个块体形成的离散模型称为矿床块段模型。采用矿体解译、地质资料分析方法, 通过估值使块段模型中每 1 块的净价值变为已知, 估值后的块段模型称为价值块段模型。露天矿境界优化流程图见图 1。

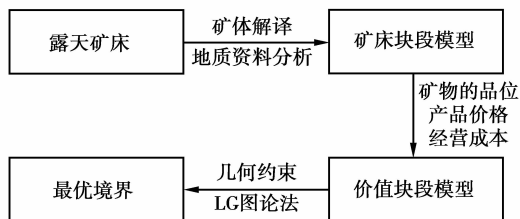


图 1 露天矿境界优化流程图

块段净价值是根据块中所含可利用矿物的品位、经营成本及产品价格的计算。由于矿床所含矿物的多样性及矿山企业经营体制和成本管理制度的差异, 计算净价值时用到的参数并不固定。其净价值计算方法见图 2。其中每个块体的值表示开采该块体的净利润, 剥离的废石为负值, $V_{ore} = V_o - C_{om} -$

$$C_{ot} - C_{or} - C_p - C_s, V_{waste} = -C_{wm} - C_{wt} - C_{wr}。$$

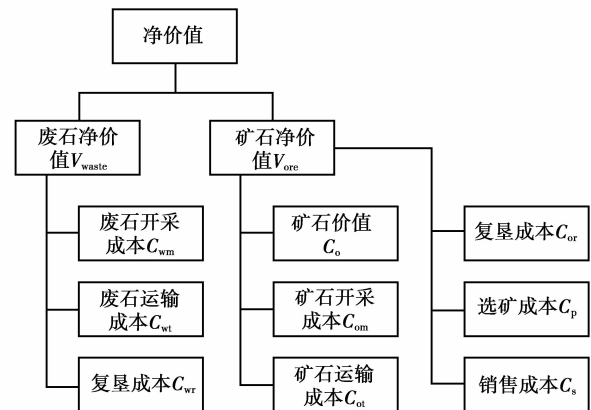


图 2 矿床价值模型净价值计算方法

2 IGCM 的构建

2.1 基本原理

为便于阐述问题, 以图 3 所示的二维块段模型为例, 来说明 IGCM 的基本原理, 其中每个块段用该块段的中心点 (以下称节点) 表示。

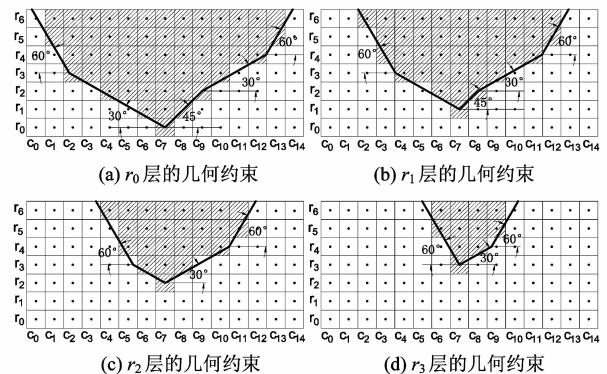


图 3 二维块段几何约束模型

图 3(a) 为节点 $N(r_0, c_7)$ 的几何约束示意图, 节点 $N(r_0, c_7)$ 左侧 $r_0 \sim r_3$ 层的边坡角为 30° , $r_3 \sim r_6$ 层的边坡角为 60° , 右侧 $r_0 \sim r_2$ 层的边坡角为 45° , $r_2 \sim r_4$ 层的边坡角为 30° , $r_4 \sim r_6$ 层的边坡角为 60° 。同理, r_1 层的几何约束如图 3(b) 所示, r_2 层的几何约束如图 3(c) 所示, r_3 层的几何约束如图 3(d) 所示, 其它层的几何约束类似。从节点引出边坡轮廓线所形成的倒锥称为该节点的开采锥。其内部所有节点的集合即为该节点的初始 IGCM。初始 IGCM 中所有节点被描述为这些节点相对于开采锥顶点的相对坐标值的集合。因此, 每层只需建立 1 个节点的初始 IGCM。图 3(a) 表示开采节点 $N(r_0, c_7)$ 之

前必须先开采其上部各层被阴影覆盖的节点,这些节点的集合记为 $X(r_0, c_7)$ 。同理,图 3(b)(c)(d) 中阴影部分记为 $X(r_1, c_7)$ 、 $X(r_2, c_7)$ 、 $X(r_3, c_7)$ 。

显然, $X(r_0, c_7)$ 中节点 $N(r_1, c_6)$ 的开采可由 $X(r_1, c_6)$ 来约束,节点 $N(r_1, c_7)$ 的开采由 $X(r_1, c_7)$ 来约束,依之类推,节点 $N(r_6, c_{13})$ 的开采可由 $X(r_6, c_{13})$ 来约束。

因此, $X(r_0, c_7)$ 可化简为 $X'(r_0, c_7)$:

$$X'(r_0, c_7) = X(r_0, c_7) - \left[\begin{array}{l} X(r_1, c_6) \cup X(r_1, c_7) \cup X(r_1, c_8) \cup \\ X(r_2, c_4) \cup X(r_2, c_5) \cup \dots \cup X(r_2, c_9) \cup \\ X(r_3, c_2) \cup X(r_3, c_3) \cup \dots \cup X(r_3, c_{10}) \cup \\ \dots \\ X(r_6, c_1) \cup X(r_6, c_2) \cup \dots \cup X(r_6, c_{13}) \end{array} \right],$$

同理, $X(r_1, c_7)$ 可化简为 $X'(r_1, c_7)$:

$$X'(r_1, c_7) = X(r_1, c_7) - \left[\begin{array}{l} X(r_2, c_6) \cup X(r_2, c_7) \cup X(r_2, c_8) \cup \\ X(r_3, c_4) \cup X(r_3, c_5) \cup \dots \cup X(r_3, c_9) \cup \\ X(r_4, c_3) \cup X(r_4, c_4) \cup \dots \cup X(r_4, c_{11}) \cup \\ \dots \\ X(r_6, c_2) \cup X(r_6, c_3) \cup \dots \cup X(r_6, c_{12}) \end{array} \right],$$

节点 $N(r_0, c_7)$ 、 $N(r_2, c_7)$ 化简后的 IGCM 如图 4 所示,其他各层的 IGCM 依之类推,图略。

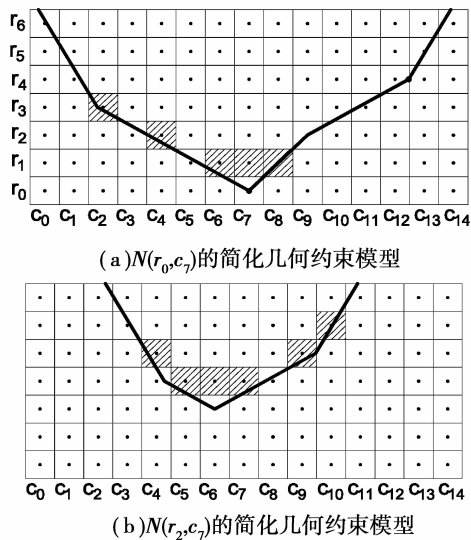


图 4 节点的简化几何约束模型

将整个矿床块段模型中所有节点与其 IGCM 中所有节点以有向边连接,构成的有向图称为整个矿床块段的 IGCM。

2.2 实现算法

建立图 5 所示的坐标系,XYZ 坐标系为世界

坐标系,其值为块段的真实坐标值; ijk 坐标系为相对坐标系,其值为块段在矿床块段模型中的序号。

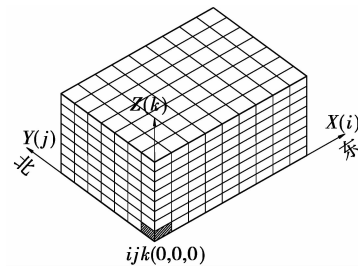


图 5 三维块段模型坐标系

取矿床块段模型中任一层的第一个节点 $N(0, 0, k)$ 的 IGCM 的实现算法进行描述,图 6 为节点的开采锥平面图及剖面图。

IGCM 构建算法:

第 1 步:令 $k=0$;

第 2 步:若 $k \geq$ 矿床模型的最大层数,执行第 3 步;否则,构建节点 N_{00k} 的开采锥相对坐标集(相对于坐标点 $(0, 0, k)$), $k=k+1$,重复执行第 2 步;

第 3 步:遍历 $N(0, 0, k)$ 中所有坐标点,以 (a, b, c) 表示当前坐标点,将 $X(0, 0, k)$ 所表示的开采锥平移至 (a, b, c) , $X(0, 0, k) = X(0, 0, k) - N(a, b, c)$,重复执行第 3 步直到遍历完所有坐标点。

构建节点 $N(0, 0, k)$ 的开采锥相对坐标集的算法:

第 1 步:取下 1 个方位角约束,令该约束区间为 $[\beta_a, \beta_b)$,见图 6。

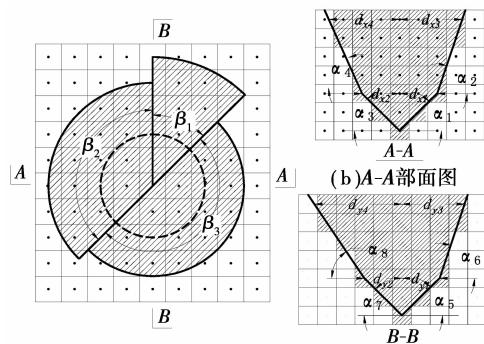


图 6 开采锥平、剖面图

第 2 步:取当前方位角约束下的 1 个高程约束,令该约束区间为 $[H_a, H_b)$,该方位角区间、高程区间的边坡角为 α ,则第 $k+c$ 层 $(H_a \leq k+c < H_b)$ 该约束区间的境界边界半径 $d_{r_c} = \frac{c \cdot z_{size}}{\tan \alpha}$,见图 6;

第 3 步:遍历第 $k+c$ 层的节点,记节点坐标为 (i_c, j_c, k_c) ,若该点位于方位角区间 $[\beta_a, \beta_b)$ 内,且与点 $(0, 0, k_c)$ 的直线距离不大于 d_x ,即 $\sqrt{i_c^2 + j_c^2} \leq d_x$,将该节点的相对坐标加入到开采锥相对坐标集中,反之执行第 4 步;

第 4 步:若该方位角区间内还有其他高程约束,执行第 2 步,否则执行第 5 步;

第 5 步:若还有方位角约束区间,执行第 1 步,否则,程序停止。

3 实例应用

3.1 三维地质模型的创建

新模型算法已用于 DIMINE 数字矿山系统中。以云南某矿为研究对象,用 DIMINE 创建了该矿的空间地质数据库、数字地形模型(DTM)^[14]、矿体模型、矿床品位块段模型,见图 7,这些模型是后续露天境界优化工作的基础。

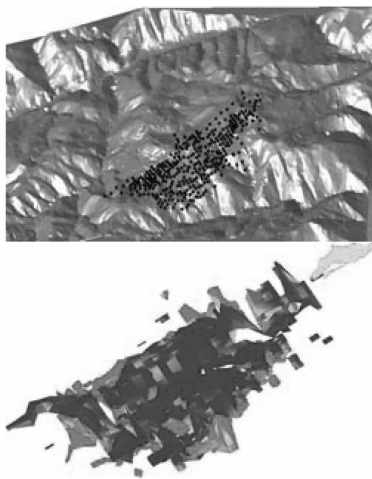


图 7 DTM、钻孔空间位置及主要矿体分布图

矿体呈北西,向北东波状缓倾斜,倾角 $10^\circ \sim 25^\circ$,局部大于 35° 。地面标高 1 210 m,矿体总体长 2 000 m,宽 100~670 m,埋深从地表到 280 m 标高,矿体厚度 2~50 m,平均品位约 0.4%。矿体形态较为复杂,呈多个不规则的透镜体或构造块体。同一矿体厚度与品位变化较大。

本次建立地质数据库包含钻孔 486 个;测斜数据 2 246 条;所有钻孔、槽探和坑探取样 38 411 个。矿床主要有 I 号、II 号、III 号 3 个矿体,其中 II、III 号矿体储量大,为该矿区的主要矿体,块段模型创建中选择单元块尺寸大小为 $10 \text{ m} \times 20 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 。

3.2 露天境界优化参数选择和优化结果分析

DIMINE 露天境界优化模块采用 LG 图论法结

合提出的新模型,以矿床块段模型为基础,以边界品位、产品价格、采选指标、采选成本、边坡限制条件等参数为约束,综合判断每个块段的开采价值,通过综合计算后,寻找出相关经济参数和开采技术条件下最大净现值(NPV)的露天境界,来说明 IGCM 的可行性及正确性。

3.2.1 经济参数的选取

此次优化的参数主要来源于地质报告、选矿实验指标和根据目前的开采技术条件下通过工程类比法选取相关指标,其主要优化参数见表 1。

表 1 优化参数表

序号	类别	项目	参数
1	采矿	采矿成本	23.53 元/t
		剥离成本	12.94 元/m ³
		贫化率	5%
		损失率	5%
		复垦成本	不考虑
		矿石体重	2.73 t/m ³
		废石体重	2.70 t/m ³
			Cu:90%(单铜)
			76%(铜锌分离)
			选矿回收率
		Au:15%	
		Ag:45%	
2	选矿	入选品位	0.2%
		最高品位	矿石中最大品位
			铜锌分离:0.292%;
			单铜:0.06%
		尾矿品位	Zn:0.334%;
	Au:0.472g/t;		
	Ag:8.594g/t		
	精矿品位	Cu:18%; Zn:45%	
		Au:1g/t; Ag:50g/t	
3	产品	产品价格	Cu:31 550; Zn:7 260
			Au:153; Ag:2
		销售及 管理成本	精矿含铜:6 118.14 元/t 精矿含锌:723.00 元/t

3.2.2 边坡控制参数的确定

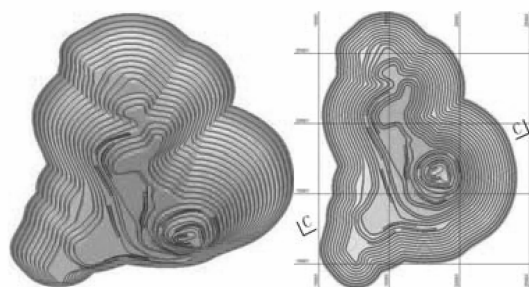
根据工程地质条件,参照有关设计资料^[15-16],本次露天境界优化的边坡角控制参数见表 2。

表 2 露天坑边坡角

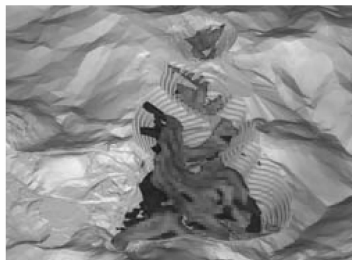
方位角/(°)	高程/m	边坡角/(°)
0~180	800~1 210	45.0
180~270	800~1 120	42.2
	1 120~1 210	46.8
270~360	800~1 000	45.8
	1 000~1 210	44.0

3.2.3 露天境界优化结果分析

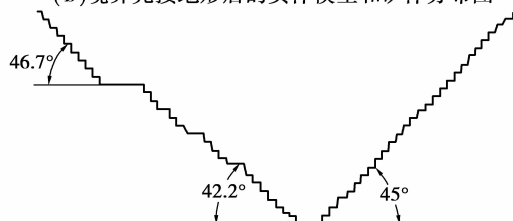
将上述参数输入 DIMINE 软件露天境界优化模块中,优化结果见图 8。



(a)露天境界优化设计结果



(b)境界壳接地形后的实体模型和矿体分布图



(c)C-C剖面图及其边坡角

图 8 露天矿境界优化计算结果

图 8(a)为境界优化结果经设计后的最终境界;图 8(b)为最终境界与 DTM 模型^[17]作布尔运算形成的实体模型及矿体分布图;图 8(c)为露天图 8(a)中所示的 C-C 剖面轮廓图,其右侧剖面轮廓线位于 0~180°方位角区间,左侧剖面轮廓线则位于 180~270°方位角区间,其对应高程上的边坡角与表 2 基本吻合,充分说明了 IGCM 的正确性与可行性。

4 结 论

露天境界优化是露天矿开采设计的重要环节。针对露天境界的复杂性提出了一种用于露天境界优化的复杂几何约束新模型(IGCM),构建了其实现算法,并应用于实例分析。其主要结论如下:

1)可以采用图论的方法将矿床三维块段模型抽象为节点与有向边的集合,结合集合理论来描述多边坡角几何约束模型;

2)将基于 IGCM 的算法应用于工程实例。应用表明:IGCM 能够准确模拟任意方位、高程上的边坡角变化,结果准确;

3)基于 IGCM 的算法为解决复杂地质条件下的多边坡角露天境界优化问题提供了一种新的有效方法;

4)IGCM 的不足之处在于其依赖于规则三维块段模型,块段的细分程度及各个方向的尺寸对边坡角的精度影响很大。如何构建一种不规则块段模型,通过调整不同区域、不同位置的块段尺寸、形状、细分程度来更精确地模拟任意方位、高程上的边坡角,是未来露天矿境界优化技术的技术难点与发展方向。

参考文献:

- [1] 周智勇,陈建宏,杨立兵. 大型矿山地矿工程三维可视化模型的构建[J]. 中南大学学报, 2008, 39(3): 423-428.
ZHOU ZHI-YONG, CHEN JIAN-HONG, YANG LI-BING. 3D visualization modeling on geological and mining engineering in a large-sized mine[J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 39(3): 423-428.
- [2] 李德,曾庆田,吴东旭,等. 基于三维可视化技术的露天境界优化研究[J]. 金属矿山, 2008, 382(4): 103-108.
LI DE, ZENG QING-TIAN, WU DONG-XU, et al. Study on technology of 3D visualization based open pit limit optimization[J]. Metal Mine, 2008, 382(4): 103-108.
- [3] YEGULALP T M, ARIAS J A. A fast algorithm to solve the ultimate pit limit problem [C] // 23rd International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industries (APCOM), Littleton, Colorado, April 7-11.

- [S. I.] : AIME, Littleton, Co, 1992: 391-397.
- [4] KOROBOV S. Method for determining optimal open pit limits [R]. Montreal: Ecole Polytechnique de l' Université de ontréal, 1974.
- [5] DOWD P A, ONUR A H. Open-pit optimization-part 1: optimal open-pit design [J]. Transaction of the Insitution of Mining and Metallurgy: Section A: Mining Industry, 1993, 102: 95-104.
- [6] WILKE F L, WRIGHT E A. Determining the optimal ultimate pit design for hard rock open pit mines using dynamic programming [J]. Erzmetall, 1984, 37: 139-144.
- [7] YAMATOMI J, MOGI G, AKAIKE A, et al. Selective extraction dynamic cone algorithm for three-dimensional open pit designs[C]// International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1996, 33(5):220A-220A.
- [8] HOCHBAUM D S. A new-old algorithm for minimum cut and maximum-flow in closure graph[J]. Networks: Special 30th Anniversary Paper, 2001, 37 (4): 171-193.
- [9] HOCHBAUM D S, CHEN A. Performance analysis and best implementations of old and new algorithms for the open-pit mining problem[J]. Operations Research, 2000, 48(6): 894-914.
- [10] Dowd P A. The optimal design of quarries [J]. Geological Society of London, 1994, 79: 141-155.
- [11] 王李管, 何昌盛, 贾明涛. 三维地质体实体建模技术及其在工程中的应用[J]. 金属矿山, 2006, (6): 58-62.
WANG LI-GUAN, HE CHANG-SHENG, JIA MING-TAO. 3D geological solid modeling technology and its application in engineering [J]. Metal Mine, 2006, (6): 58-62.
- [12] 王青. 采矿学[M]. 北京:冶金工业出版社, 2007.
- [13] KHALOKAKAIE R, DOWD P A, FOWELL R J. Lerchs-Grossmann algorithm with variable slope angles [J]. Mining Technology, 2000, 109(2): 77-85.
- [14] 毕林, 王李管, 陈建宏, 等. 快速多边形区域三角化算法与实现[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(10): 3030-3033.
BI LIN, WANG LI-GUAN, CHEN JIAN-HONG, et al. Fast triangulation algorithm for polygon regions and implementation [J] Application Research of Computer, 2008, 25(10): 3030-3033.
- [15] 曹兰柱, 贾兰. 露天矿深部境界陡帮开采最终帮坡角的确定[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2009, 28(S2): 25-27.
CAO LAN-ZHU, JIA LAN. Determine the final slope angle of deep realm steep working slope mining in PingZhuang West open pit mine [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2009, 28(S2): 25-27.
- [16] 张彤炜, 王李管, 龚元翔. 露天开采的境界优化算法研究及应用[J]. 金属矿山, 2008, 380(2): 30-34.
ZHANG TONG-WEI, WANG LI-GUAN, GONG YUAN-XIANG. Study on algorithms for open-pit limit optimization and its application[J]. Metal Mine, 2008, 380(2): 30-34.
- [17] 任海军, 文俊浩, 徐玲. 一种三维数字城市的构建和实现方法[J]. 重庆大学学报, 2006, 29(4): 101-104.
REN HAI-JUN, WEN JUN-HAO, XU LING. Construction and realization method for 3D digital city [J]. Journal of Chongqing University, 2006, 29(4): 101-104.

(编辑 陈移峰)