

文章编号:0253-9993(2011)01-0029-05

# 基于经济时间序列预测的露天矿开采境界动态优化

杨彪,罗周全,陆广,鹿浩,王益伟

(中南大学资源与安全工程学院,湖南长沙 410083)

**摘要:**为获得更为优越的露天矿山境界,构建了集经济时间序列预测、矿岩时间属性赋值和动态经济指标计算为一体的境界全动态优化方法。金属价格是矿山境界优化过程中最重要的因素之一,以金属价格历史数据为平台,通过创建合适时间序列模型,对未来价格做出预测,以预测结果为基础,运用L-G图论法生成系列境界方案,根据矿山实际情况编排进度计划,实现矿岩块参数赋值,将预测结果代入到矿岩块体模型中,计算境界净现值(NPV),经多方案比较确定最优境界。以某铜矿山为例,通过对近50 a伦敦金属交易所(LME)铜精矿季度平均结算价格分析处理,建立了自回归求和移动平均模型(ARIMA),实现了未来15 a铜价预测,最终确定了矿山经济最优境界。建立于金属价格预测基础上的境界动态优化方法所得方案NPV更接近生产实际,其优化结果可更好为矿山设计及未来生产提供基础支撑。

**关键词:**露天矿山;开采境界;时间序列预测;动态优化;金属售价

中图分类号:TD824

文献标志码:A

## Open pit mining limit dynamic optimization based on economic time series forecasting

YANG Biao, LUO Zhou-quan, LU Guang, LU Hao, WANG Yi-wei

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

**Abstract:** In order to get a better mining limit of surface mine, the method of mining limit dynamic optimization was proposed. The method was a synthetical system of economic time series forecasting, block time attribute giving and dynamic economic indicators computing. Metal price is one of the most important factors in the mining limit optimization, by the time series forecasting method which is on the basis of historical data, to get the future value from suitable forecast model and price parameter. The series limit pits were created from L-G graph theoretic approach which was based on forecasting metal price. Analyzed the exploitation technique of the complex mining, and arranged the schedule for each limit pit. The forecasting metal price was dragged in every schedule project; finally chose the best optimization scheme through comparing net present value. Taking a surface mine as example, by building autoregressive integrated moving average model based on London Metal Exchange copper quarter average settlement price of the recent fifty years, to forecasted the future fifteen years copper price and got the best economic mining limit. Mining limit dynamic optimization that builds on metal price forecasting can get more actual net present value, and is a new way to define the best mining limit.

**Key words:** open pit mine; mining limit; economic time series forecasting; dynamic optimization; metal price

1965年Lerchs和Grossman提出了L-G三维图论法优化矿山境界,L-G法建立在矿岩块净价值模

型基础上,通过对最大权值的搜索获得最优境界<sup>[1-2]</sup>,该法忽略了矿岩的时间特性且没有考虑金属

价格参数的动态变化特性。1988 年 Whittle 将 L-G 图论法与生产规划方法结合提出了境界优化的 4D 算法,该算法可根据设定的参数生成一系列境界,每个境界都是对应经济参数条件下的最优境界,而经济参数则是在当前金属售价指标基础上上下浮动 20%,根据不同经济参数及生产规划计算系列境界的净现值(NPV),进行境界方案比较<sup>[3-4]</sup>。Whittle 首次考虑了矿岩的时间属性和金属价格的不确定性,但其优化过程是建立在确定参数上的计算机自动规划计算,对于复杂矿山,其基建位置、开采发展顺序及生产过程中的动态投资等项目控制难度较大。另外,金属售价仅作±20%的浮动与实际变化规律相去甚远,例如 2005 年国际铜精矿价格为 3 678 美元/t,而 2006 年为 6 721 美元/t,是 2005 年的 1.83 倍,多年平均价格则相差更大<sup>[5]</sup>。文献[6]提出了基于详细进度计划编排的境界动态优化方法,该法基本解决了矿岩块的时间属性赋值问题,但仍没有考虑金属售价的可变性。如何解决经济参数可靠性成为境界优化的关键问题。对此,本文提出了基于经济时间序列预测的矿山境界动态优化方法,首次将经济参数时间序列预测与 L-G 图论法及矿山进度计划结合,进行境界方案的经济效益计算,实现了经济参数未来动态预测、矿岩时间属性赋值及境界动态经济指标计算的全动态境界优化方法。

## 1 露天矿山境界全动态优化方法原理

### 1.1 时间序列预测方法

1928 年德国经济学家 Oskar Morgenstern 首次系统性论述了经济预测方法<sup>[7]</sup>,1976 年 Box 和 Jenkins 提出了著名的自回归移动预测模型(ARMA),之后 Harvey、Hendry 等对其进行了改进和升华<sup>[8-10]</sup>。ARIMA 模型是一种常用的随机时序模型的综合表达形式,可表示为 ARIMA( $p, d, q$ ),其中  $p$  为自回归阶数; $d$  为差分阶数; $q$  为移动平均阶数。当  $d=0$  时,模型可表示为 ARMA( $p, q$ ),即自回归移动平均模型;当  $p, d, q$  均不等于 0 时,模型表示为 ARIMA( $p, d, q$ ),即自回归求和移动平均模型<sup>[11]</sup>。

ARMA( $p, q$ ) 模型是指时间序列可表示为其当前和前期随机误差项及前期值的线性函数,其表达式见式(1)。其中  $y_t$  为时间序列; $\theta$  为移动平均系数; $\varphi$  为自回归系数; $u_t$  为相互独立的白噪声序列,且服从均值为 0、方差为  $\sigma_u^2$  的正态分布。

$$y_t = \varphi_1 y_{t-1} + \varphi_2 y_{t-2} + \cdots + \varphi_p y_{t-p} + u_t - (\theta_1 u_{t-1} + \theta_2 u_{t-2} + \cdots + \theta_p u_{t-p}) \quad (1)$$

ARIMA( $p, d, q$ ) 是将时间序列经  $d$  阶差分后的

随机时序模型,其表达式见式(2),其中  $B^k$  为延迟算子,可表示为  $y_{t-k}/y_t$ 。

$$y_t = \frac{(1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \cdots - \theta_q B^q) u_t}{1 - \varphi_1 B - \varphi_2 B^2 - \cdots - \varphi_p B^p} \quad (2)$$

时间序列预测分析主要包括以下几步:

(1) 序列自、偏相关性分析。构成时间序列的每个序列值之间的简单相关关系称为自相关,自相关系数  $r_k$  由式(3)计算,其中  $n$  为样本量; $k$  为滞后期; $\bar{y}$  为样本数据算术均值。

$$r_k = \frac{\sum_{j=1}^{n-k} (y_j - \bar{y})(y_{j+k} - \bar{y})}{\sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2} \quad (3)$$

偏自相关是指对于时间序列  $y_t$ ,在给定  $y_{t-1}, y_{t-2}, \cdots, y_{t-k+1}$  条件下,  $y_t$  与  $y_{t-k}$  之间的条件相关关系,偏自相关系数  $\varphi_{kk}$  由式(4)计算,当  $k=1$  时,  $\varphi_{kk} = r_1$ 。

$$\varphi_{kk} = \frac{r_k - \sum_{j=1}^{k-1} \varphi_{k-1,j} r_{k-j}}{1 - \sum_{j=1}^{k-1} \varphi_{k-1,j} r_j} \quad (4)$$

序列的偏、自相关性是判断序列稳定性及预测模型类型和阶数选择的重要依据。

(2) 模型参数估算。常用的模型参数估计方法主要有 Yule-Walker 相关矩估计法、最小二乘估计法、极大似然估计及熵估计等,常用的是前两种,且第 1 种主要针对 AR 模型,最小二乘法一般针对 MA 模型,两种方法的混合,主要针对 ARMA 模型<sup>[12]</sup>。

(3) 预测分析。时间序列预测是指如果  $y_t$  已知,要求对  $t+l$  时期未来的  $y_{t+l}$  ( $l>0$ ) 进行预测。由于  $t$  时刻值已知,所求  $y_{t+l}$  时刻的预测值可称为从  $t$  开始的第  $l$  步预测,记为  $\hat{y}_l$ 。为获得尽可能好的预测效果,要求预测值  $\hat{y}_l$  与真值  $y_{t+l}$  的均方差最小,即使得  $E[y_{t+l} - \hat{y}_l]^2$  最小。最小方差预测值由  $y_{t+l}$  的条件期望求得,即  $\hat{y}_l(l) = E(y_{t+l} | y_t, y_{t-1}, \cdots)$ ,因此只要建立  $y_t$  的模型,就可推导出  $\hat{y}_l(l)$ 。ARMA 预测的逆转形势为式(5),即预测值  $\hat{y}_l(l)$  是现在和过去所有数据的线性组合,系数  $w_j$  由逆函数决定,即

$$\hat{y}_l(l) = \sum_{j=1}^{\infty} w_j y_{t+1-j} \quad (5)$$

### 1.2 境界的矿岩时间特征及赋值方法

矿体以品位不均匀状态赋存,不同时间采出不同品位矿石会产生不同的经济效果。对于开采寿命达十几甚至数十年的矿山来说,时间因素对开采经济效果的影响很大<sup>[2]</sup>。例如,按贴现率 12% 计,10 a 后年

盈利 1 万元折合现值 3 220 元,20 a 后年盈利 1 万元折合现值 1 037 元。因此,在境界优化过程中矿岩的时间属性必须考虑。采用编排详细进度计划的方式可将块体时间属性合理的加入模型中<sup>[6]</sup>。图 1 为一简单的块体二维模型,粗线部分为某一境界方案,其中 D 为矿块,C 为岩块,经编排进度计划,赋予矿岩块时间参数。第 1 年为基建年,剥离了 D<sub>1</sub>上部的 3 个废石块,D<sub>1</sub>作为投产第 1 年开拓矿量,生产第 1 年采出 D<sub>1</sub>矿块,同时剥离 3 个岩块,将 D<sub>2</sub>作为生产第 2 年开拓矿量,以此类推。

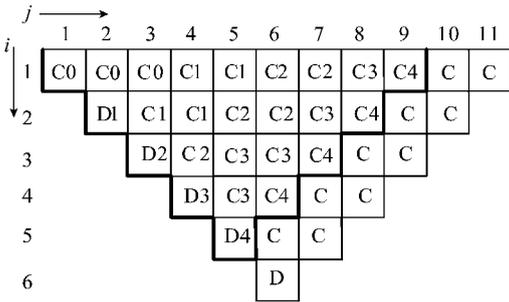


图 1 编排进度计划后境界模型

Fig. 1 Limit model after arranging time schedule

### 1.3 境界动态经济指标的获取

NPV 是指项目在经济或物理寿命期内将每年的净现金流量按行业的贴现率折现到计算期初的基年现值之和,当  $NPV \geq 0$  时,项目可行, $< 0$  则不可行。净现值是一种比较科学的投资方案评价方法,在已知矿岩块时间属性及对应时间点的矿石售价后,根据 NPV 的概念可计算出境界方案的净现值<sup>[13]</sup>,即

$$NPV_i = \sum_{l=1}^n \frac{W_{ore} (\hat{V}_i(l) - V_{ore}) - W_{rock} V_{rock} - C_{fl}}{(1+r)^{l-1}} \quad (6)$$

式中, $NPV_i$ 为第  $i$  个境界方案的净现值; $\hat{V}_i(l)$ 为预测所得未来第  $l$  年的矿石金属元素单位重量售价; $W_{ore}$ 、 $W_{rock}$ 分别为第  $l$  年开采的矿石、岩石量; $V_{ore}$ 、 $V_{rock}$ 分别为矿石、岩石的生产成本; $r$ 为贴现率; $C_{fl}$ 为第  $l$  年投资额。

## 2 实例分析

### 2.1 矿山概况

某矿为一中型、矽卡岩铜矿床,矿石整体品位较高。矿体呈不规则陀螺状埋藏于山坡坡底。根据矿山地形及勘探数据,运用普通克立格法建立了矿床地质块体模型(图 2)。

### 2.2 矿石售价参数的时间序列预测

伦敦金属交易所(LME)是世界金属交易的主要

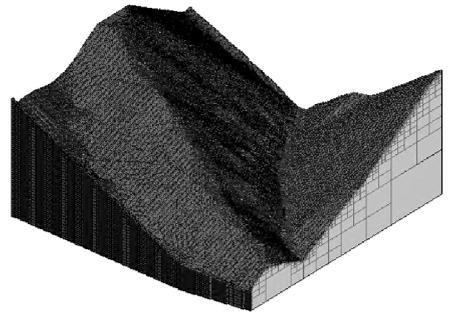


图 2 矿床地质块体模型

Fig. 2 Deposit block model

市场,其价格变动和趋势体现国际有色行业的发展动态<sup>[12]</sup>。采集 1959—2010 年 LME 的铜价格为分析对象,图 3(a)为价格走势图及其自、偏相关性图。由图 3(a)可知,自 1959 年铜精矿价格循环震荡上升,自相关系数值( $C_A$ )和偏相关系数值( $C_{PA}$ )没有出现截尾、拖尾性,其值变化较大且后期出现反弹,该序列为

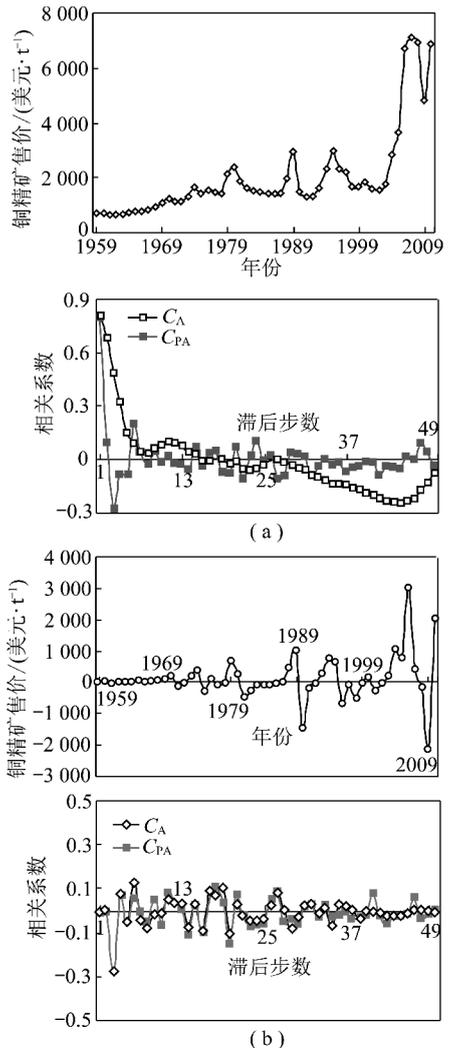


图 3 LME 铜价时间序列及自、偏相关性

Fig. 3 The LME price series and its  $C_A, C_{PA}$

非平稳序列。图3(b)为对原序列经一阶差分并均值化处理后的序列走势及其自、偏相关性图,此时价格序列沿零轴上下波动, $C_A$ 、 $C_{PA}$ 值均出现明显的拖尾性,在 $k=3$ 后 $C_A$ 、 $C_{PA}$ 值均以正弦波形式逐渐减少并趋近于0,该序列为平稳序列,可用于创建预测模型。

根据差分后序列自、偏相关性可初步判定模型

$p, q \leq 3$ , 可创建模型有 ARIMA(3,1,3)、ARIMA(3,1,2)、ARIMA(3,1,1)、ARIMA(3,1,0)、ARIMA(2,1,2)、ARIMA(2,1,1)等,通过 EViews 软件获得各模型样本决定系数( $R^2$ )、赤池信息准则( $C_{AI}$ )、施瓦茨准则( $C_S$ )及估计参数等值,见表1。表中数据显示,ARIMA(2,1,2)的 $C_{AI}$ 和 $C_S$ 值均最小,且 $R^2$ 最大,故预测模型采用 ARIMA(2,1,2)。

表1 不同预测模型下的参数估算

Table 1 The parameter estimate form all forecast model

$(p, d, q)$	$R^2$	$C_{AI}$	$C_S$	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$
(3,1,3)	0.113	0.008 7	0.242 6	-0.451 7	-0.531 5	-0.735 8	0.610 9	0.791 5	0.754 9
(3,1,2)	0.269	0.056 1	0.251 0	-0.156 3	0.250 2	-0.261 9	0.295 5	-0.258 1	
(3,1,1)	0.497	0.019 1	0.175 1	0.242 0	-0.056 6	-0.194 6	-0.112 3		
(3,1,0)	0.270	-0.021 9	0.095 1	0.134 6	-0.041 1	-0.203 0			
(2,1,2)	0.514	-0.080 0	0.074 4	0.353 8	-0.817 1		-0.155 1	0.916 0	
(2,1,1)	0.119	-0.029 5	0.086 3	1.056 1	-0.145 2		-0.949 2		

根据创建的预测模型,采用动态法进行外推预测。图4为1990—2025年铜精矿趋势,其中2011—2025年为外推预测数据。由图4可知,铜精矿价格总体呈上升趋势,其中在2012年出现峰值,随后有小幅回落,再往后基本处于小幅度震荡状态。预测结果与世界经济发展现状比较吻合,2009年经济危机对有色金属行业的冲击较大,随后世界各国的经济刺激措施使经济状况很快回升,由于经济刺激的后期效应,有色金属将有一个上扬的过程,随后逐渐进入稳步发展状态。

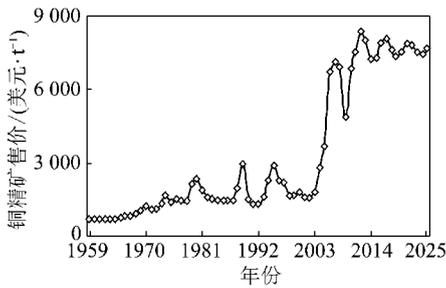


图4 预测结果及样本数据趋势

Fig. 4 Forecasting and sample data tendency

### 2.3 矿山系列境界方案生成

矿石售价采用所预测铜精矿售价多年均值,经换算为矿石单位品位价值。在矿石采、选回收率分别取0.97、0.83,采选和剥离成本分别为156.2、13.8元/t时,利用L-G图论法,以5%的矿石售价折扣对矿床静态价值模型进行境界圈定,获得了一系列相互嵌套的境界坑方案(图5)。

### 2.4 矿岩块时间属性赋值

矿体倾角较缓,且集中于山坡底部,为平衡剥离

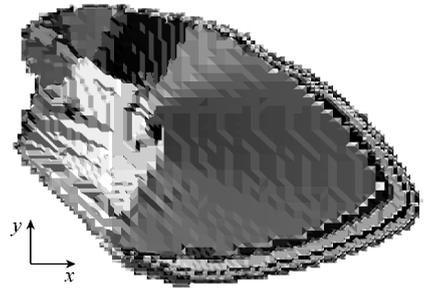


图5 系列境界方案坑文件叠加

Fig. 5 Series limit pit

比,采用条带式开采。基建剥离在第一条带,开采前一条带矿石的同时剥离紧邻上一条带岩石,满足生产规模要求同时尽量往后平衡剥离量。根据设备所需空间,工作平台宽度30m,工作线长度不小于100m,同一条带内同时工作台阶段数不大于3个。满足上述约束条件下利用 Minesched 对各境界方案编排进度计划。图6为无折扣境界方案经排进度计划后输出的矿床块模型,颜色深浅不同表示不同开采年采剥的矿岩块。

### 2.5 动态经济指标比较下的最优境界确定

根据进度计划结果可获得矿山基建工程量、年矿岩采剥量、年出矿品位等信息<sup>[6,14]</sup>。由基建工程量计算基年投资,根据矿山年矿岩采剥量及服务年限可进行设备投资估算,根据出矿品位、采出矿量及金属售价、废石剥离量等信息,按式(6)计算各方案NPV。图7为折现率取12%时各方案净现值及矿量折线图,由图7可知此时折扣10方案的NPV值最大,从矿山投资角度来看,此时的境界可使企业获得最好的回报。

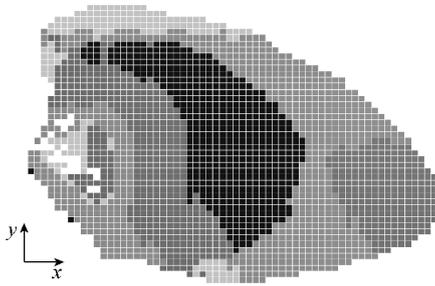


图 6 编排进度计划后的矿床块模型

Fig. 6 Model after arranging time schedule

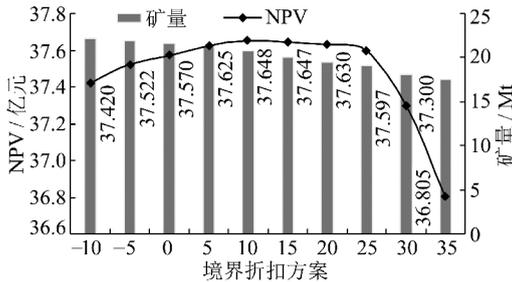


图 7 各境界方案最终净现值及矿量折线图

Fig. 7 Final NPV and ore quantity of each limit

### 3 结 论

(1)从理论分析入手,构建了集时间序列预测、矿岩块时间参数赋值和动态经济指标计算为一体的境界动态优化方法。时间序列作为一种非确定性的分析理论和方法符合价格信息的复杂性行为,将预测结果运用到境界优化中能获得更为客观的境界 NPV,优化结果能更好地指导矿山生产。

(2)创建了铜售价的 ARIMA 时间序列模型,并对未来售价进行了预测,预测结果表明,未来铜价呈小幅度震荡稳步递升态势,2010 年后铜价将持续上升,在 2012 年出现回落,随后逐渐进入稳定期,这与当前国际经济形式较为吻合。

(3)创建了某铜矿床地质品位模型,在铜价预测结果基础上运用图论法以售价折扣方式获得了系列境界方案。根据矿山实际情况,编排了详细进度计划,将时间参数植入块体模型,经计算各境界方案 NPV,获得境界方案净现值拐点,最终确定折扣 10 方案为矿山经济最优境界。

(4)预测方法及所建预测模型的适应性对预测结果起着决定性作用,而金属价格对境界优化结果影响很大,如何进一步提高预测准确度是境界优化方法的一个研究重点。

### 参考文献:

- [1] Lerchs H, Grossman I F. Optimum design of open pit mines[J]. Canadian Institute of Mining Bulletin, 1965, 58: 40-55.
- [2] 张幼蒂, 杨荣新. 露天开采境界动态优化的探讨[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 20(1): 10-16.  
Zhang Youdi, Yang Rongxin. Discussion of the dynamic optimization of mining boundary in open pit[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, 20(1): 10-16.
- [3] Whittle J. Beyond optimization in open pit design[A]. 1st CAMI [C]. Quebec City: Laval University, 1988: 7-9.
- [4] Whittle J. The Facts and Facilities of Open Pit Design[R]. Whittle Programming Pty Ltd, 1989.
- [5] Akbari A D, Osanloo M, Shirazi M A. Reserve estimation of an open pit mine under price uncertainty by real option approach[J]. Mining Science and Technology, 2009, 19(6): 709-711.
- [6] 杨 彪, 罗周全, 廖江南, 等. 露天矿山开采境界动态优化圈定[J]. 煤炭学报, 2010, 35(3): 368-372.  
Yang Biao, Luo Zhouquan, Liao Jiangnan, et al. Dynamic optimization for open pit mining limit[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3): 368-372.
- [7] Clements M P, Hendry D F, Lu Maozu. Forecasting economic time series[M]. Beijing University Book Concern, 2008: 7-8.
- [8] Box G E P, Jenkins G M. Time series analysis, forecasting and control[M]. San Francisco: Holden-Day. Published, 1976.
- [9] Harvey A C. Forecasting, structural time series models and the kalman filter[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- [10] Hendry D Y, Doornik J A. Modeling linear dynamic econometric systems[J]. Scottish Journal of Political Economy, 1994, 41: 1-33.
- [11] 王 沁. 时间序列分析及其应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2008: 54-81, 137-141.  
Wang Qin. The time series analysis and applications[M]. Chengdu: South West Jiaotong University, 2008: 54-81, 137-141.
- [12] 刘春学, 林幼斌. 时间序列分析在金属价格预测中的应用[J]. 云南财贸学院学报, 2001, 16(6): 62-63.  
Liu Chunxue, Lin Youbin. The applications of time series analysis in metal price forecasting[J]. Journal of Yunnan Finance & Economics University, 2001, 16(6): 62-63.
- [13] 张 静. 投资评价动态决策的 NPV 法与 IRR 法比较分析[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(5): 492-495.  
Zhang Jin. Comparative analysis of dynamic decision-making methods of investment project evaluation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2001, 30(5): 492-495.
- [14] 郑友毅, 王 青, 顾晓薇. 露天煤矿开采计划的整体动态优化[J]. 煤炭学报, 2009, 34(8): 1 054-1 056.  
Zheng Youyi, Wang Qing, Gu Xiaowei. Overall dynamic optimization of production schedule in open pit coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(8): 1 054-1 056.