

姑山矿区多矿床矿产资源开发 利用的综合优化模型研究

蔡嗣经¹, 王文潇^{1,2}, 郑明贵^{1,3}

(1. 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育国家重点实验室, 北京 100083;
2. 马钢集团姑山矿业公司, 安徽马鞍山 243184; 3. 江西理工大学, 江西赣州 341000)

[摘要] 依据整体采矿学的理念,即从整体上全过程、多方位、系统和动态地研究一个矿区多矿床矿产资源的开采与利用,构建了人工神经网络专家系统综合优化模型,根据所构建的模型对姑山矿区的多矿床矿产资源开采与利用进行了综合优化研究,得出了姑山矿区的铁矿石推荐生产规模为 $540 \times 10^4 \sim 680 \times 10^4$ t/a 的结论。研究结论对加强姑山矿区的建设、提高经济效益以及矿区可持续发展均有较好的指导作用。

[关键词] 姑山矿区;多矿床开采;整体采矿学;人工神经网络专家系统模型

[中图分类号] TD85 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)03-0056-07

1 前言

马钢集团姑山矿业公司位于安徽省当涂县境内,距马钢厂区 30 km,芜湖市 18 km。矿区有专用铁路线与宁芜(南京—芜湖)线接轨,并与马钢厂区铁路线相通,紧靠矿区的县级公路与 205 国道相连。青山河通往姑溪河与长江相通,交通十分便利(见图 1)。矿区处于低山丘陵与长江冲积平原接合部位,地形属于侵蚀残丘,由 4 座海拔标高在 +53 ~ +102 m 的小山和山间凹地组成,地表和地下水系十分发育,水文地质条件复杂^[1]。

矿区属中亚热带湿润季风气候,气候温暖,年平均降雨量 1 906.5 mm,年平均蒸发量 1 361 mm,年平均气温 16.1 °C,年平均风速 3.3 m/s,冰冻期 15 ~ 60 d,最大冻土深度 9 cm。

姑山矿区有 4 个相距很近的铁矿床,即姑山矿、和睦山矿、白象山矿、钟九矿,地质储量近 3.25×10^8 t,地质品位约 Fe 40%。目前的生产矿山为姑山露天矿、和睦山地下矿;白象山地下矿正在基建

中,预计 2010 年后投产;钟九矿还在筹划开发中,可能露天开采。另外,姑山露天矿在几年内将要转入



图 1 姑山矿业公司地理位置及交通图
Fig. 1 Location and transportation
of the Gushan Mining Company

[收稿日期] 2009-08-10

[基金项目] 国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BA08B01)

[作者简介] 蔡嗣经(1952—),男,江西南昌市人,教授,博士生导师,主要从事矿业工程、安全技术及工程的研究与教学工作;
E-mail: Sjcai@admin.ustb.edu.cn

地下开采,相关地下开采的设计工作已完成。总体规划将姑山建成一个大型矿区,产原矿 400×10^4 t/a、成品矿 200×10^4 t/a,成为马钢集团主要的球团矿和高硅矿生产基地之一^[2]。

2 矿区多矿床开发的整体采矿学理念

采矿工程是一个系统工程,一个矿区的多矿床开发更是一个复杂的大系统,主要表现在:a. 系统庞大。包括地质系统、露天开采系统、地下开采系统、运输系统、破碎系统、选矿系统、排土系统、尾矿系统、电力系统、管理系统、销售系统、环境系统等,系统之间存在嵌套现象,系统下还有子系统。b. 关系复杂。子系统之间存在各种关系,这种关系使得系统整合大于整体。c. 不确定性。系统存在许多不确定性、隐蔽性、动态性、层次性、随机性和时空性因素。d. 综合性。系统存在着多学科交叉、融合,同时又具有一定的社会性和宏观性^[3-5]。

矿区多矿床采矿系统是一个复杂的大系统,采用整体采矿学的理念对其进行系统分析与研究或许是一种行之有效的途径。所谓整体采矿学,是指从整体上全过程、多因素、多层次、多方位研究对矿床有用矿物的开采与利用以及开采过程中产生的时空物流,是一个系统的、动态的采矿理念^[6-9]。

整体采矿学的基本原则主要有:

1)整体性原则。系统是由若干要素组成的具有一定新功能的有机整体,各个作为系统子单元的要素一旦组成系统整体,就具有独立要素所不具有的性质和功能,形成了新系统的质的规定性,从而整体的性质和功能不等于各个要素的性质和功能的简单叠加。矿区多矿床采矿系统作为一个复杂大系统,其整体所具有的功能远大于其各个子系统所具有的功能。在矿山设计与建设时必须从整体上进行考虑,找准各个子系统在整个系统中的作用与地位,发现各个子系统的瓶颈环节并加以解决,有利于实现整个矿区的可持续发展。

2)时空量序原则。所谓时空量序原则,是指系统在发展演化过程中必须满足时间、空间、数量、次序等相协调、相统一的客观规律性。这是因为,复杂系统是由若干要素有机联系组成,含有等级结构,具有独立功能特性的动态体系,是一个开放的、远离平衡态的系统,具有自组织性、自相似性、随机性的非线性系统,是无序性和有序性的对立统一。矿区多矿床开发随着采矿生产的不断进行,矿区人力、资

源、资金等要素的发展必须遵循时空量序原则。

3)部分延伸与转化原则。组成系统的各个子系统之间是可以相互延伸与转化的,子系统之间的边界也不是绝对清晰的。

4)采矿与环保结合的原则。在采矿生产过程中对矿区周围环境造成了一定程度的污染与破坏,应实行采矿与治理环境相统一的设计,这样,才能真正实现矿区的可持续协调发展,建设绿色生态矿区。

3 矿区多矿床开发的综合优化模型

矿区多矿床矿产资源开发与利用的综合优化,将基于专家系统与神经网络的集成,即神经网络专家系统模型来进行研究^[10,11]。

3.1 神经网络专家系统的结构

图2表示神经网络专家系统的一种结构,系统主要由知识库、数据文件、并行推理机、知识获取模块、解释系统及人机接口(界面)等部分组成^[12,13]。

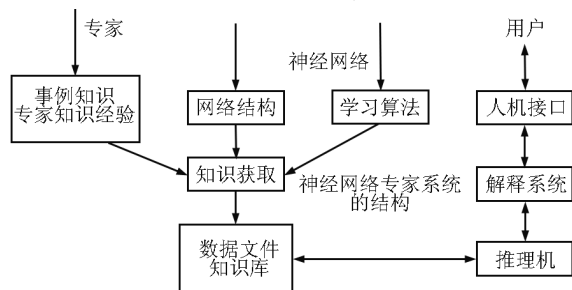


图2 神经网络专家系统的结构

Fig. 2 Structure of ANN-Expert system

3.2 姑山矿区矿床开采综合优化的神经网络专家系统设计

3.2.1 矿床开采条件评价指标体系

构建的矿床开采条件评价指标体系见表1,其中一级指标3个,二级指标9个,三级指标18个(分别用 C_1, C_2, \dots, C_{18} 表示)。

表1 矿床开采条件评价指标体系

Table 1 Indexes of deposit mining condition evaluation

一级指标	二级指标	三级指标(单位,符号)
地质资源条件	矿体地质特征	矿体厚度(m, C_1)
		矿体倾角($^\circ$, C_2)
		矿体厚度变化系数(% , C_3)
矿石品质特征	矿石品位特征	矿石品位(% , C_4)
		伴生有益组分(C_5)

续表

一级指标	二级指标	三级指标(单位,符号)
		矿石可选性(%, C_6)
	矿床储量	设计计算储量($\times 10^8$ t, C_7)
	岩石力学特征	矿岩物理力学性质(C_8)
		矿体及围岩的稳定性(C_9)
开采技术条件	矿床水文地质条件	矿坑充水因素(C_{10})
		矿坑日均涌水量($\times 10^3$ m ³ ·d ⁻¹ , C_{11})
矿体埋藏深度	矿区开采条件	平均开采深度(m, C_{12})
		矿区地质条件(C_{13})
		矿区地形地貌(C_{14})
外部建设条件	经济地理条件	矿区交通运输条件(C_{15})
		原材料、燃料、电力等供应条件(C_{16})
	施工建设条件	矿床施工建设条件(C_{17})
		人文素质条件(C_{18})

3.2.2 神经网络结构

根据对矿床开采条件的分析,可以构造一个3层的多输出神经网络。

1)输入神经元: C_1, C_2, \dots, C_{18} 。

2)网络输出神经元:矿床开采条件综合评价(EMC)、矿床开采规模($S, \times 10^4$ t/a)、投资概算总额(TI,亿元)以及全投资内部收益率(IRR,%)。

3)隐蔽层神经元数目的确定,基本原则是:一般隐含层的神经元数目大于输入神经元数目和输出神经元数目之和的一半,小于输入神经元数目和输出神经元数目之和。因此,取 $n = 12, n$ 为隐蔽层神经元数目。

3.2.3 BP神经网络的学习算法

根据BP神经网络的学习特点,笔者收集了8个类似铁矿床的数据资料。这些数据资料经过设计院以及矿山企业多位专家共同论证,是可以充分信赖的(见表2),其中部分指标为定性指标。对于18个变量的原始数据需要按照一定的规则加以处理,即应位于[0,1]范围内,使处理后的数据能满足神经网络训练和学习的要求。这些变量数据规格化处理原则见表3。通过网络训练达到要求后,网络各节点间互联权值就完全确定,则BP网络已经学习好。

姑山矿区4个铁矿床的数据资料见表4。表中EMC、 S 、TI以及IRR均为设计院设计值或矿山专家估计值。

表2 供BP神经网络学习的类似铁矿床实例数据

Table 2 Example data of related iron-ore deposits used in BP-ANN training

指标	矿床1	矿床2	矿床3	矿床4	矿床5	矿床6	矿床7	矿床8
C_1	57	44	49	47	36	72	14.5	25
C_2	23	42	31	37	40	18	20	67
C_3	30	24	28	26	60	42	15	55
C_4	37	30	32	29	39	41	46.5	42.6
C_5	有	无	无	无	有	有	无	无
C_6	75.8	60.1	63.5	65.6	65	64	70	70
C_7	1.22	1.78	1.65	0.81	1.76	3.16	0.26	0.15
C_8	一般	一般	一般	一般	较好	较好	一般	一般
C_9	不稳定	较稳定	较稳定	较稳定	稳定	稳定	不稳定	不稳定
C_{10}	较复杂	简单	一般	一般	复杂	简单	复杂	复杂
C_{11}	8	1.2	3	3.2	19.4	0.4	11	15
C_{12}	440	308	314	320	430	623	120	500
C_{13}	一般	一般	好	好	较复杂	一般	较好	较复杂
C_{14}	有利	一般	一般	一般	一般	不利	一般	一般
C_{15}	较好	好	好	好	好	一般	好	一般
C_{16}	较好	好	好	好	好	较好	好	一般
C_{17}	一般	较好	较好	较好	好	较好	好	较好
C_{18}	好	较好	较好	较好	较好	较好	较好	较好
EMC	优	良	良	中	良	优	中	差
S	350	400	360	200	300	400	100	250
TI	6.3	8.7	8.1	5.8	5.6	14.4	2.1	1.58
IRR	15	12	12	8	17.9	14.1	13.6	9.2

表 3 输入数据初始化规则表

Table 3 Regulation of ANN input data initiation

1	0.8	0.7	0.6	0.4	0.2
C_1	> 50	(40, 50]	(30, 40]	(20, 30]	≤ 20
C_2	> 50	(40, 50]	(30, 40]	(20, 30]	≤ 20
C_3	≤ 30	(30, 40]	(40, 50]	(50, 60]	> 60
C_4	> 45	(40, 45]	(35, 40]	(30, 35]	≤ 30
C_5	—	有经济利用价值	—	无经济利用价值	—
C_6	> 69	(66, 69]	(63, 66]	(60, 63]	≤ 60
C_7	> 2	(1.5, 2]	(1, 1.5]	(0.5, 1]	≤ 0.5
C_8	好	较好	一般	差	极差
C_9	很稳定	稳定	较稳定	较不稳定	不稳定
C_{10}	简单	一般	较复杂	复杂	极复杂
C_{11}	≤ 5	(5, 10]	(10, 15]	(15, 20]	> 20
C_{12}	≤ 300	(300, 400]	(400, 500]	(500, 600]	> 600
C_{13}	好	较好	一般	较复杂	复杂
C_{14}	有利	—	一般	—	不利
C_{15}	好	较好	一般	差	极差
C_{16}	很好	好	较好	一般	差
C_{17}	很好	好	较好	一般	差
C_{18}	很好	好	较好	一般	差

表 4 姑山矿区 4 个矿床的数据

Table 4 Data of 4 deposits in Gushan mining area

指标	白象山矿	姑山矿	和睦山矿	钟九矿	指标	白象山矿	姑山矿	和睦山矿	钟九矿
C_1	34	30	23	27	C_{12}	350	245	220	400
C_2	20	50	45	30	C_{13}	复杂	复杂	复杂	复杂
C_3	70	50	65	35	C_{14}	有利	有利	有利	有利
C_4	36	41	40	34	C_{15}	好	好	好	好
C_5	有	有	无	有	C_{16}	很好	很好	很好	很好
C_6	64	65	64.5	64	C_{17}	好	好	好	好
C_7	1.34	0.99	0.21	0.54	C_{18}	较好	较好	较好	较好
C_8	较好	一般	较好	一般	EMC	优	良	良	中
C_9	稳定	较不稳定	稳定	较稳定	S	250	70	70	150
C_{10}	极复杂	复杂	复杂	极复杂	TI	7.3	1.7	1	4.1
C_{11}	32	6.5	4	52	IRR	10.5	14.9	16.3	11.6

神经网络专家系统的性能测试。为了使网络收敛速度较快,输出数据初始化的基本方法是将实际值除以一个比例因子,而比例因子获取应遵循的原则是找出某一项数据可能取的最大值,具体如下:矿床开采规模输入值 = 矿床开采规模实际值/500;投资概算总额输入值 = 投资概算总额实际值/15;全投资内部收益率输入值 = 全投资内部收益率实际值/20。另外,矿床开采条件综合评价(EMC)规定优

(0.8)、良(0.6)、中(0.4)、差(0.2)。对系统进行测试时,规定:EMC ≥ 0.8 时为优秀; $0.6 \leq EMC < 0.8$ 时为良好; $0.4 \leq EMC < 0.6$ 时为中等; $0.2 \leq EMC < 0.4$ 时为差; EMC < 0.2 时为极差。利用输出数据初始化处理原则对各矿床输出数据进行规格化,得到表 5、表 6 的系统输出训练值;神经网络训练结果输出示意图如图 3 所示。训练好的神经网络测试结果见表 7。

表 5 类似铁矿床系统的输出训练值

Table 5 ANN training output of the related iron-ore deposits

指标	矿床 1	矿床 2	矿床 3	矿床 4	矿床 5	矿床 6	矿床 7	矿床 8
EMC	0.8	0.6	0.6	0.4	0.6	0.8	0.4	0.2
S	0.7	0.8	0.72	0.4	0.6	0.8	0.2	0.5
TI	0.42	0.58	0.54	0.39	0.37	0.96	0.14	0.11
IRR	0.75	0.60	0.60	0.40	0.90	0.71	0.68	0.46

表 6 姑山矿区 4 个矿床的输出训练值

Table 6 ANN training output of 4 deposits in Gushan mining area

指标	白象山矿	姑山矿	和睦山矿	钟九矿
EMC	0.8	0.6	0.6	0.4
S	0.50	0.14	0.14	0.30
TI	0.49	0.11	0.07	0.27
IRR	0.53	0.75	0.82	0.58

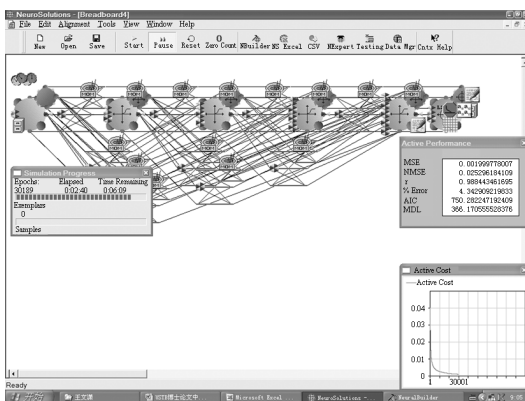


图 3 神经网络训练结果示意图

Fig. 3 Diagram of ANN-Export system training results

表 7 神经网络测试结果表

Table 7 Results of BP-ANN testing

指标	项目	矿床 1	矿床 2	矿床 3	矿床 4	矿床 5	矿床 6	矿床 7	矿床 8
EMC	实际值	0.8	0.6	0.6	0.4	0.6	0.8	0.4	0.2
	输出值	0.788	0.593	0.570	0.442	0.604	0.792	0.391	0.219
	相对误差/%	-1.5	-1.2	-5.0	10.5	0.7	-1.0	-2.3	9.5
S	实际值	0.7	0.8	0.72	0.4	0.6	0.8	0.2	0.5
	输出值	0.700	0.769	0.644	0.473	0.604	0.810	0.189	0.497
	相对误差/%	0.0	-3.9	-10.6	18.3	0.7	1.3	-5.5	-0.6
TI	实际值	0.42	0.58	0.54	0.39	0.37	0.96	0.14	0.11
	输出值	0.420	0.579	0.533	0.403	0.373	0.946	0.119	0.126
	相对误差/%	0.0	-0.2	-1.3	3.3	0.8	-1.5	-15.0	14.5
IRR	实际值	0.75	0.60	0.60	0.40	0.90	0.71	0.68	0.46
	输出值	0.750	0.599	0.550	0.477	0.899	0.713	0.677	0.461
	相对误差/%	0.0	-0.2	-8.3	19.3	-0.1	0.4	-0.4	0.2

由表7可见,训练好的神经网络除了个别输出值偏差较大(如矿床4和矿床3的一些项目相对误差在10%以上)以外,其余均较好。因此,效果较

理想。利用训练好的神经网络对姑山矿区4个铁矿床进行综合评价,结果见表8。

表8 姑山矿区4个矿床开采条件评价结果

Table 8 Mining condition evaluation results of 4 deposits in Gushan mining area

指标	项目	白象山铁矿	姑山铁矿	和睦山铁矿	钟九铁矿
EMC	实际值	0.8	0.6	0.6	0.4
	输出值	0.737	0.569	0.642	0.477
	相对误差/%	-7.9	-5.2	7.0	19.3
S	实际值	0.50	0.14	0.14	0.30
	输出值	0.612	0.195	0.163	0.286
	相对误差/%	22.4	39.3	16.4	-4.7
TI	实际值	0.49	0.11	0.07	0.27
	输出值	0.439	0.159	0.125	0.278
	相对误差/%	-10.4	44.5	78.6	3.0
IRR	实际值	0.53	0.75	0.82	0.58
	输出值	0.593	0.768	0.781	0.556
	相对误差/%	11.9	2.4	-4.8	-4.1

3.3 姑山矿区矿床开采综合优化结果分析

根据表8的数据还原成表9,从中可以看出:

1) 矿床开采条件综合评价。白象山铁矿 EMC 输出值为良好,较设计值(优)低一个等级;姑山铁矿输出 EMC 值为中等,也较设计值(良)低一个等

级;和睦山铁矿、钟九铁矿输出 EMC 值与设计相符合,分别为良好和中等。因此,在白象山铁矿、姑山铁矿基建以及生产过程中建议修正矿床开采条件综合评价,按照低一个等级进行设计,以确保矿床安全生产以及合理的经济社会效益。

表9 姑山矿区4个矿床实际值与网络输出值比较

Table 9 Comparison of actual & ANN output data of 4 deposits in Gushan mining area

指标	项目	白象山铁矿	姑山铁矿	和睦山铁矿	钟九铁矿
EMC	实际值	优	良	良	中
	输出值	良	中	良	中
S/($\times 10^4$ t \cdot a $^{-1}$)	实际值	250	70	70	150
	输出值	306	98	82	143
TI/亿元	实际值	7.3	1.7	1	4.1
	输出值	6.6	2.4	1.9	4.2
IRR/%	实际值	10.5	14.9	16.3	11.6
	输出值	11.9	15.4	15.6	11.1

2) 矿床开采规模。a. 白象山矿。由于地质资源丰富,白象山铁矿设计开采规模明显偏小,考虑马钢集团公司对铁精矿的需求量大,建议其设计开采规模为 250×10^4 t/a,某些生产关键工程留有矿山生产规模发展到 300×10^4 t/a的余地。b. 姑山矿。按照现行设计开采规模 70×10^4 t/a,矿床可以稳产

100年以上,明显不经济;网络输出为 98×10^4 t/a,考虑到其矿床开采条件复杂,因此,建议目前可以按照 100×10^4 t/a的规模进行设计,待开采技术水平提高后,再考虑是否进一步扩大开采规模。c. 和睦山矿。地质储量一般,但开采条件相对较好,因此,可以进一步提高矿床开采规模至 82×10^4 t/a,此时

矿床可以稳产 20 年以上,比较合适。d. 钟九矿。由于钟九铁矿正在进行矿业权价款评估和探矿设计工作,其开采规模为估计值,网络输出值与其很接近,说明 150×10^4 t/a 的规模是可行的。e. 投资概算总额。网络输出 4 个矿床投资概算总额为 15.1 亿元,设计为 14.1 亿元。在资金投向上,应重点保证白象山铁矿、姑山铁矿两个铁矿床的投资建设,同时应进一步控制投资,使得和睦山铁矿新矿段、钟九铁矿建设得以顺利进行。f. 全投资内部收益率。由于各个矿床生产规模、投资概算总额发生了变化,因此,网络输出全投资内部收益率与设计值也产生了差异,但均在 11% 以上,说明,投资经济效益较好,在经济上可行。

4 结语

姑山矿区各矿床矿产资源合理开发与综合优化问题,涉及“时、空、量”3 个方面,即姑山矿区各矿床在“时间”的调度上(即在矿床之间的开采顺序上)必须以经济效益和马钢集团统一生产安排为原则^[14];各矿床在“空间”的调度上(即在总图运输、辅助生产设施空间布局上)必须以技术上可行、经济上合理、生产上易于安排为着眼点;各矿床在“数量”的调度上(即在矿床之间的生产规模安排上)必须以设计的最大选矿生产能力为依据。

1) 姑山矿区各矿床采矿生产规模。按设计利用的地质储量 B + C 级考虑,整个姑山矿区的推荐生产规模为 $540 \times 10^4 \sim 680 \times 10^4$ t/a,其中白象山铁矿 $250 \times 10^4 \sim 300 \times 10^4$ t/a、姑山铁矿 $100 \times 10^4 \sim 150 \times 10^4$ t/a、和睦山铁矿 $70 \times 10^4 \sim 80 \times 10^4$ t/a、钟九铁矿 $120 \times 10^4 \sim 150 \times 10^4$ t/a。

2) 姑山矿区选矿生产规模及流程。姑山矿区各矿床相距较近,呈“品”字形分布。和睦山铁矿床与姑山矿区龙山选矿厂相距仅 1 km,交通便利。钟九铁矿床位于钟山与九连山之间,与和睦山矿毗邻。因此,在选矿厂布局及生产规模上值得深入研究^[15]。

3) 姑山矿区各矿床开采顺序。姑山矿区 4 个矿床开采顺序的制订取决于马钢集团生产需要及投资资金安排。从生产的延续性以及矿床开采条件看,开采顺序依次为和睦山铁矿、姑山铁矿(包括露

天转地下开采)、白象山铁矿、钟九铁矿。

4) 姑山矿区多矿床矿产资源开发的“空间”优化。矿区地面总图布置的基本原则是:a. 保护环境,节约用地;b. 满足各个场地和设施的基本功能要求;c. 充分利用姑山矿区现有各种设施的能力,避免重复建设;d. 满足各种防护距离、安全规范的要求;e. 系统考虑各矿床的分总图情况,进行综合优化,以降低整体运营成本^[16]。

参考文献

- [1] 张国强,李交平,郑志军,等. 白象山铁矿的水文地质问题及解决措施[J]. 矿业快报,2008,24(3):69-72.
- [2] 徐克创,钟 铁. 姑山矿矿区生态建设规划的探讨[J]. 金属矿山,2004,(6):50-52.
- [3] 刑立亭,徐征和,王 青. 矿产资源开发利用与规划[M]. 北京:冶金工业出版社,2008.
- [4] 郑明贵,蔡嗣经. 基于理想点法的金属矿山扩建方案选择[J]. 金属矿山,2008(7):5-8.
- [5] Cavender B. Determination of the optimum lifetime of a mining project using discounted cash flow and option price techniques[J]. Mining Engineering,1992,44(10):5-11.
- [6] 王秀山. 复杂系统演化过程的有序性和无序性[J]. 系统辩证学学报,2005,13(1):44-47
- [7] 汤万金,高 林,吴 刚,等. 矿区可持续发展系统动力学模拟与调控[J]. 生态学报,2000,20(1):20-27.
- [8] 郑明贵,蔡嗣经. 地下开采金属矿山扩建合理规模智能化系统[J]. 系统工程理论与实践,2008,28(12):133-139.
- [9] Torries T F. NPV or IRR? Why not both[J]. Mining Engineering,1998,50(10):69-73.
- [10] 刘丽员,杨昔阳. 基于神经网络的专家系统概述[J]. 辽宁经济管理干部学院学报,2009(1):101-103.
- [11] McLoone S, Brown M D, Irwin G, et al. A hybrid linear/nonlinear training algorithm for feedforward neural networks[J]. IEEE Transactions on Neural Networks,1998(9),9:669-683.
- [12] 胡中栋,曾志勇,黄小岭. 基于 BP 神经网络的专家系统体系结构[J]. 电脑开发与应用,2008,21(7):51-53.
- [13] 吉孔诗,潘 昊. 基于神经网络的专家系统体系结构[J]. 微机发展,2001(6):11-13.
- [14] 余 辉. 马钢集团发展战略研究[D]. 安徽:合肥工业大学,2008.
- [15] 毛益平,黄礼富,赵福刚. 我国铁矿山选矿技术成就与发展展望[J]. 金属矿山,2005(2):1-5.
- [16] 闫旭骞,胡丽竹,王广成. 矿区可持续发展评价方法研究[J]. 有色金属(矿山部分),2003,55(4):2-4.

(下转 76 页)