

文章编号: 1005-3026(2004)04-0352-04

采矿工业两级供应链中的协调生产计划建模

李建祥¹, 唐立新¹, 吴会江²

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 沈阳工程学院基础部, 辽宁 沈阳 110036)

摘 要: 对由一个矿山和一个选矿厂构成的采矿工业两级供应链中的协调生产计划问题进行了研究,建立了相应的线性规划模型.模型的特点是: 集成采选两个环节的生产计划; 将运输问题集成到生产计划中.模型的目标追求供应链总成本最小.模型适用于由一个矿山和一个选厂所组成的两级供应链或者采选联合企业,且能够较容易地扩展到多个矿山和多个选厂的供应链结构.给出了算例以说明模型的应用.结果表明:能够为矿山和选矿厂的协调生产提供决策支持,能够节省总的生产和运输成本,有潜在的应用价值.

关 键 词: 两级供应链;协调生产计划;线性规划;采矿工业

中图分类号: TP 29; C 935 **文献标识码:** A

随着世界经济一体化和信息与计算机网络技术的快速发展,企业的竞争规则已经被改写.过去是单个企业间的竞争,现在已经变为供应链之间的竞争^[1].供应链管理已经成为当前企业快速响应市场,降低成本、提高服务水平、赢得竞争的重要手段.供应链管理的目的是协调供应链各环节的矛盾,寻求供应链的整体优化.因此,供应链管理关键是协调^[2,3].在整个供应链中,生产计划与控制系统处于核心地位^[4,5].文献[6]也指出,供应链管理的实质是集成的计划(本文称为协调计划).本文的研究便是供应链管理中的协调生产计划问题,研究的背景是服务于钢铁企业的采矿工业供应链.

采矿工业供应链通常包括两级——矿山和选厂,用户是钢铁企业,提供的矿石供钢铁企业的高炉进行炼铁.在公开发表的文献中,未发现对于采矿工业中的供应链集成与协调问题的研究文献.关于采矿工业供应链中的生产计划问题的研究,多是针对单个环节.其中,关于采矿计划问题的文献有很多,文献[7]对此进行了较好的总结.关于选矿生产计划的研究文献,未曾发现.对于选矿的考虑多见于采选联合企业中的采矿生产计划制定当中,而且仅对选矿的能力进行了考虑,对选矿成

本考虑得很少,诸如文献[7~10].

本文是研究采矿工业两级供应链中的协调生产计划的一个尝试,研究定位在一个矿山和一个选厂所构成的采选两级供应链上.建立了两级供应链中的协调生产计划的线性规划模型.

1 问题描述

铁矿山通常是露天矿.露天开采的一个重要特征是分台阶分爆(破)区开采.矿石和岩石在爆破带爆破后,电铲将它们铲装到等待着的汽车上(或者火车和皮带运输机),汽车再将它们按照矿石和岩石的不同,分别运往选矿厂和排土场.岩石被废弃.矿石在选矿厂经粗碎、细碎和选矿后,品质提高到一定的水平(品位是最重要的指标),最终销售给市场上的客户(钢铁企业).图1是由一个矿山和一个选矿厂所构成的两级供应链的结构图.



图1 采矿工业两级供应链
Fig.1 Two-stage mineral industry supply chain

这个两级供应链中的协调生产计划需要确定的是: 在哪开采,即在哪个台阶哪个爆区开采;

收稿日期: 2003-10-31
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70171030;60274049); 霍英东青年教师基金资助项目(81073).
作者简介: 李建祥(1974 -),男,江西南昌人,东北大学博士研究生; 唐立新(1966 -),男,黑龙江绥化人,东北大学教授,博士生导师.

开采多少,即在每个开采区域需要开采多少矿石,同时必需剥离多少岩石; 为谁开采,即开采出来的矿石经选矿后,最终运往哪个客户.目标是在满足一定的资源与能力约束以及特殊的采选工艺约束下,使得整个供应链的总成本最小.

2 建 模

2.1 符 号

Q_{ij} 为第 i 个台阶上的第 j 个爆区的矿岩储量(t); r_{ij} 为第 i 个台阶上的第 j 个爆区的矿岩比; g_{ij} 为第 i 个台阶上的第 j 个爆区的矿石平均品位; i_j 为开采第 i 个台阶上的第 j 个爆区的矿岩前必须开采的台阶爆区集合; D_k 为第 k 个客户(冶金企业)的需求(t); K_k 为第 k 个客户的质量要求(最小矿石品位); C_s 为电铲铲装能力(t); C_d 为排土场排土能力(t); C_v 为汽车运输能力(t); C_c 为破碎机破碎能力(t); C_m 为选矿厂选矿能力(h); D_{ij} 为从第 i 个台阶上的第 j 个爆区到选厂的距离(km); D_{ij} 为从第 i 个台阶上的第 j 个爆区到排土场的距离(km); w 为汽车载重量(t); s 为汽车载重行驶速度(km/h),空车行驶速度为 1.5 s; f 为选矿厂将单位矿石提高一个品位消耗的能力(h/t); c_s 为单位铲装成本(元/t); c_d 为单位排土成本(元/t); c_v 单位运输成本(元/t·km); c_c 为单位破碎成本(元/t); c_m 为单位选矿成本(将一个单位的矿石的品位提高一个百分点的成本,元/t); x_{ijk} 为决策变量,表示第 i 个台阶上的第 j 个爆区为第 k 个客户开采的矿石量(t).

2.2 模型目标函数

模型目标追求供应链的总成本最小.总成本包括矿山和选矿厂的生产成本,还包括矿石从矿山到选矿厂以及岩石从矿山到排土场的运输成本.矿山的生产成本又包括爆破成本,电铲铲装成本,选矿厂的生产成本又包括破碎机破碎成本和选矿成本.不失一般性,采矿和选矿成本均不包括固定成本,并且忽略爆破成本.因此,模型的目标函数可表示为

$$\min z = \sum_{i,j,k} [c_s x_{ijk} (1 + r_{ij}) / r_{ij} + c_v x_{ijk} D_{ij} + c_v D_{ij} x_{ijk} / r_{ij} + c_d x_{ijk} / r_{ij} + c_c x_{ijk} + c_m x_{ijk} (G_k - g_{ij})] . \quad (1)$$

2.3 模型约束条件

(1) 需求满足约束

客户的需求必须满足.则有

$$\sum_{i,j} x_{ijk} = D_k, \quad k \in \{1, 2, \dots, k\} . \quad (2)$$

(2) 资源约束

在每个爆区的矿岩开采总量应该小于矿岩储量.即满足

$$\sum_k \frac{x_{ijk} (1 + r_{ij})}{r_{ij}} \leq Q_{ij}, \quad i \in \{1, 2, \dots, j\} . \quad (3)$$

(3) 能力约束

具体来说,采矿和选矿受电铲能力限制(采剥总量限制)、汽车运输能力限制(运送矿石到选厂或运送岩石到排土场的能力限制)、破碎机破碎能力限制(矿石量限制)、排土场排土能力限制(岩石量限制)以及选矿厂的选矿能力限制,分别用约束(4)~(8)表示.其中约束(8),即选矿能力约束,同时能够使得客户的质量要求得以满足.

$$\sum_{i,j,k} \frac{x_{ijk} (1 + r_{ij})}{r_{ij}} \leq C_s, \quad (4)$$

$$\sum_{i,j,k} \left(\frac{x_{ijk}}{w} \cdot \frac{D_{ij}}{0.6s} + \frac{x_{ijk}}{r_{ij}w} \cdot \frac{D_{ij}}{0.6s} \right) \leq C_v, \quad (5)$$

$$\sum_{i,j,k} x_{ijk} \leq C_c, \quad (6)$$

$$\sum_{i,j,k} \frac{x_{ijk}}{r_{ij}} \leq C_d, \quad (7)$$

$$\sum_{i,j,k} x_{ijk} f (G_k - g_{ij}) \leq C_m . \quad (8)$$

(4) 开采顺序约束

露天开采时,在开采某些矿岩前,必须提前开采一些矿岩,目的是使前者得以暴露出来,为开采提供条件,或者为了保证一定的平盘宽度和帮坡角,使开采活动得以安全顺利地进行.因此,存在如下约束:

$$\sum_k x_{ijk} \leq x_{i,j,k}, \quad i \in \{1, 2, \dots, J\};$$

$$j \in \{1, 2, \dots, J\}; (i, j) \in i_j . \quad (9)$$

(5) 变量非负约束

$$x_{ijk} \geq 0, \quad i \in \{1, 2, \dots, J\}; j \in \{1, 2, \dots, J\};$$

$$k \in \{1, 2, \dots, K\} . \quad (10)$$

3 应用举例

3.1 案 例

举一个例子,来说明模型在采矿工业供应链管理中的应用.某露天铁矿在计划期内可能的开采台阶数为 4.台阶分区及属性见表 1.矿山开采及选别后的矿石供给 4 个钢铁厂.电铲能力为 400.5 kt,排土场能力为 150 kt,汽车运输能力为 5 kt,破碎机能力为 360 kt,选矿能力为 500 t,汽

表 1 台阶分区情况
Table 1 Benches and blast areas

爆区	属 性	台 阶			
		1	2	3	4
1	储量	56 700	46 500	52 300	54 000
	矿岩比	8.8	8.6	8.2	4.1
	品位	0.55	0.55	0.58	0.52
	到选厂距离	8.0	7.3	6.7	6.0
	到排土场距离	10	9.5	8.7	8.0
	开采顺序约束集	(2,1)	(3,1)	(4,1)	—
2	储量	56 000	46 200	51 100	53 500
	矿岩比	8.5	8.6	8.2	6.5
	品位	0.55	0.58	0.55	0.52
	到选厂距离	7.9	7.1	6.5	6.3
	到排土场距离	9.9	9.3	8.5	8.3
	开采顺序约束集	(2,2)	(3,2)	(4,2), (4,3)	—
3	储量	53 500	45 500	51 000	52 300
	矿岩比	8.4	8.4	7.9	7.5
	品位	0.56	0.59	0.60	0.56
	到选厂距离	7.5	6.9	6.7	6.5
	到排土场距离	9.5	9.1	8.9	8.6
	开采顺序约束集	(2,3)	(3,2), (3,3)	(4,3)	—
4	储量	53 500	45 000	50 500	52 000
	矿岩比	5.5	8.4	7.9	7.5
	品位	0.58	0.55	0.60	0.60
	到选厂距离	7.8	7.3	7.0	6.8
	到排土场距离	9.8	9.5	9.2	9.0
	开采顺序约束集	(2,4), (2,5)	(3,4)	(4,4)	—

车载重量为 180 t,行使速度为 10 km/ h,单位选矿能力消耗为 0.018 h/ t,单位电铲成本为 0.1 元/ t,单位排土成本为 0.1 元/ t,单位汽车运输成本为 0.3 元/ t,单位破碎成本为 0.05 元/ t,单位选矿成本为 1.3 元/ t.钢铁厂 1,2,3,4 的需求量分别为 100 kt, 50 kt, 100 kt 和 100 kt,品位要求分别为 0.62,0.67,0.65 和 0.64.

3.2 计算结果及分析

该模型是一个线性规划模型,可以使用标准线性规划程序求解.将数据代入模型,可得最优解,结果如表 2 所示,最小总成本为 914 181.6 元.对所得的最优解的成本结构进行分析,发现汽车运输成本为 816 873.7 元,占总成本的 89.36%.由此可知,降低供应链总成本的关键是降低汽车运输成本.对能力的使用情况进行分析,发现电铲、破碎机和选厂能力均得到充分利用,而排土场和汽车运输能力仍有大量剩余(分别剩 66% 和 42.3%).因此推荐出租这部分能力,为供应链赚取额外的利润.另外还可以对优化结果进行灵敏度分析,以得知模型参数的变化对结果及最优性的影响.

表 2 优化结果
Table 2 The optimal solution

爆区	属 性	台 阶			
		1	2	3	4
1	供给钢铁厂 1	0	0	0	0
	供给钢铁厂 2	0	0	0	0
	供给钢铁厂 3	0	0	40 064	40 064
	供给钢铁厂 4	0	0	0	0
	采出总矿石量/ 岩石量	0/ 0	0/ 0	40 064/ 4 886	40 064/ 9 772
2	供给钢铁厂 1	0	0	0	26 495
	供给钢铁厂 2	0	0	32 353	0
	供给钢铁厂 3	0	0	0	19 872
	供给钢铁厂 4	0	0	13 193	0
	采出总矿石量/ 岩石量	0/ 0	0/ 0	45 546/ 5 554	46 367/ 7 133
3	供给钢铁厂 1	0	0	27 623	0
	供给钢铁厂 2	0	0	17 647	0
	供给钢铁厂 3	0	0	0	0
	供给钢铁厂 4	0	40 660	0	46 147
	采出总矿石量/ 岩石量	0/ 0	40 660/ 4 840	45 270/ 5 730	46 147/ 6 153
4	供给钢铁厂 1	0	0	0	45 882
	供给钢铁厂 2	0	0	0	0
	供给钢铁厂 3	0	0	0	0
	供给钢铁厂 4	0	0	0	0
	采出总矿石量/ 岩石量	0/ 0	0/ 0	0/ 0	45 882/ 6 118

4 结 论

本文对采矿工业两级供应链中的协调生产计划问题进行了研究,建立了求解该问题的线性规划模型.而在此之前,供应链中的两个环节的生产计划是分别制定的.并且该生产计划模型集成了

运输问题.算例结果表明:采用该模型方法,能够为矿山和选矿厂的协调生产提供决策支持,能够节省总的生产和运输成本,有潜在的应用价值.该模型适用于由一个矿山和一个选厂所组成的两级供应链或者采选联合企业,且能够较容易地扩展到多个矿山和多个选厂的供应链结构.当然,问题

的规模会有所加大,但模型的基本结构相似.将来的研究方向是:考虑库存的影响及分时间段.另外需要说明的是,举例中的部分数据来源于文献,部分数据经假设得到,不过数据本身并不影响模型的应用.

参考文献:

[1] Croom S, Romano P, Giannakis M . Supply chain management: an analytical framework for critical literature review [J] . *European Journal of Purchasing & Supply Management*, 2000 ,6:67 - 83 .
[2] Blanco-Freja E E . Coordinated production and distribution scheduling in supply chain management [D] . Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2000 .3 - 9 .
[3] Shin H . Inventory coordination in the industrial supply chain [D] .Columbus: The Ohio State University, 2001 .4 - 9 .
[4] Sauter H, Nawrath F . Integrated production planning as core competence of a supply chain [J] . *Stahl und Eisen*, 2000 ,

120(12) :103 - 106 .
[5] Winterhalder L, Kleinschmidt R . Operative production planning and control as a precondition for supply chain management[J] . *Stahl und Eisen*, 2000,120(3):57 - 60 .
[6] 杰里米·夏皮罗 [美] . 供应链建模 [M] . 北京: 中信出版社, 2002 .3 - 7 .
(Shapiro J . *Modeling the supply chain*[M] . Beijing: CITIC Publishing House,2002 .3 - 7 .)
[7] Caccetta L, Hill S P . An application of branch and cut to open pit mine scheduling [J] . *Journal of Global Optimization*, 2003 ,27:349 - 365 .
[8] Sundar D K, Acharya D . Blast schedule planning and shiftwise production scheduling of an opencast iron ore mine [J] . *Computers and Industry Engineering*, 1995,28(4) : 927 - 935 .
[9] Tolwinski B, Underwood R . A scheduling algorithm for open pit mines [J] . *IMA Journal of Mathematics Applied in Business and Industry*, 1996,7:247 - 270 .
[10] Pendharkar P C . A fuzzy linear programming model for production planning in coal mines [J] . *Computers Ops Res*, 1997 ,24(12) :1141 - 1149 .

Modeling of the Coordinated Production Planning of a Two-Stage Mineral Industry Supply Chain

LI Jian-xiang¹, TANG Li-xin¹, WU Hui-jiang²
(1 . School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2 .Shenyang College of Engineering, Shenyang 110036, China . Correspondent: LI Jian-xiang, E-mail: jianxiang- li @ hotmail .com)

Abstract: The coordinated production planning of a two-stage mineral industry supply chain is studied, in which one open pit mine and one concentrating mill are involved . A linear programming model is then formulated, which covers two characteristics: integrating the production planning of two stages, i .e . the mine and concentrating mill; integrating transportation planning and production planning . The model s objective is to minimize the total cost of the supply chain , and it is very applicable but unlimited to the two-stage mineral industry supply chain or the integrated mining-concentrating enterprise with one mine and one mill . It can easily be extended to the supply chain with multiple mines and mills .An application example is given to illustrate the model . The solution shows that the model can offer decision support for the coordinated production of two stages, reduce the total cost of both production and transportation and has a potential of application .
Key words: two-stage supply chain; coordinated production planning; linear programming; mineral industry
(Received October 31, 2003)

待发表文章
摘要 预 报

卫星综合信息网资源管理模型及其实现
潘成胜, 刘勇兵, 姜月秋, 王光兴

在分析网格技术采用的资源管理方法的基础上,针对卫星综合信息网网络特性及其动态分层的卫星网络管理体系结构,提出了卫星综合信息网资源管理的体系结构,并设计和实现了基于 XML 描述的资源管理系统原型.在该结构中,资源管理功能基于管理域的动态划分,形成了由核心资源管理器和本地资源调度器构成的层次式结构,对静态资源与动态资源分别处理.基于 XML 对资源进行描述,用 C+ + 语言实现了资源管理系统,该系统可以与卫星综合信息网网管系统结合,作为其中一个重要功能.

基于 Lyapunov 指数 - 相轨迹的发电机组故障诊断
侯荣涛, 褚祥志, 任立义, 闻邦椿

以混沌理论为基础,根据非线性动力学系统的运动特性,对汽轮发电机组转子故障进行了分析阐述.通过对所测发电机组转子在 3 种不同工作状态下的时间序列进行的最大 Lyapunov 指数计算,并结合对这 3 种状态相轨迹图进行分析和研究,结果发现发电机转子在不同工作状态下其时间序列的 Lyapunov 指数具有明显差异.因此,基于 Lyapunov 指数的实质,提出了发电机组故障诊断的“ Lyapunov 指数 - 相轨迹 ”法.该研究也为其他复杂机械的故障诊断和预测开辟了有效途径.