

高等学校规划教材

矿山系统工程及 CAD 技术

骆中洲 主编

煤炭工业出版社

TD-05
L-355

高等学校规划教材

矿山系统工程及 CAD 技术

骆中洲 主编

煤炭工业出版社

347171

内 容 提 要

本书是根据煤炭高校采矿工程通风安全、矿山建设专业“系统工程与CAD技术”教学大纲要求编写的。内容包括系统工程概论、矿山运筹学模型、矿床地质模型、矿井优化设计、露天矿优化设计、矿山信息系统、专家系统、矿山CAD技术、计算机模拟。

本书可作为高校采矿工程(地采、露采)、通风安全、矿山建设专业的教材,也可供相关专业的研究生和工程技术管理人员参考。

高等学校规划教材 矿山系统工程及CAD技术

骆中洲 主编

责任编辑:刘社育

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

北京房山宏伟印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 $787 \times 1092 \text{mm}^{1/16}$ 印张 $18\frac{3}{4}$

字数 446 千字 印数 1—755

1997年5月第1版 1997年5月第1次印刷

ISBN 7-5020-1380-6/TD2

书号 4149 定价 14.50 元

前 言

矿山系统工程是由运筹学、工程数学、管理学、系统理论、计算机科学与技术、及采矿工程理论与技术等多种学科和技术交叉产生的新学科。经过几十年的发展，矿山系统工程形成了自己的理论和方法体系，并积累了丰富的计算机软件成果。矿山系统工程的理论和方法已广泛应用于矿山开采的各个方面，为矿山开采的技术决策和管理提供了科学依据和现代化手段，产生了巨大的经济效益和社会效益。

本书在编写过程中注重理论与实际的结合，着重介绍矿业系统工程的实用模型和技术方法。

本书由骆中洲主编。第一章绪论及第二章矿山运筹学模型由骆中洲编写，第三章矿床地质模型和第五章露天矿设计优化由王志宏编写，第四章矿井优化设计和第六章矿山管理信息系统由王学明编写，第七章专家系统由郭文章编写，第八章矿山CAD技术由侯运炳编写，第九章计算机模拟由王学明和王志宏编写。

由于我们水平有限，错误及不足之处在所难免，恳请读者指正。

作者

1997年3月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 矿山系统工程的一般特征	1
第二节 矿山系统工程的发展历史	1
第三节 矿山系统工程的模型	2
第四节 矿山系统工程的一般步骤	2
思考题	3
第二章 矿山运筹学模型	4
第一节 线性规划	4
第二节 非线性规划	10
第三节 动态规划	14
第四节 网络分析模型	17
第五节 排队论模型	23
第六节 存储模型	29
第七节 可靠性分析模型	32
第八节 多目标决策及综合评判	37
第九节 其他模型	42
习题	48
第三章 矿床地质模型	50
第一节 概述	50
第二节 估值方法及其选择	51
第三节 建立矿床地质模型一些问题的处理	58
第四节 地质统计学基本理论	60
习题	77
第四章 矿井优化设计	79
第一节 概述	79
第二节 矿井优化设计的主要任务	82
第三节 矿井优化设计方法	82
第四节 矿井优化设计的一般步骤	92
第五节 矿井优化模型	94
习题	99
第五章 露天矿设计优化	100
第一节 露天开采境界的优化圈定	101
第二节 露天开采进度计划的优化	118
习题	130
第六章 矿山管理信息系统	131
第一节 概论	131
第二节 矿山信息系统的总体设计	134

第三节 矿山信息系统的开发	142
第四节 矿山信息系统软硬件环境	147
第五节 煤炭运销管理系统	148
思考题	152
第七章 专家系统	153
第一节 基本原理	153
第二节 知识表示	156
第三节 不精确推理	162
第四节 专家系统建造	169
第五节 专家系统应用	171
思考题	172
第八章 矿山 CAD 技术	173
第一节 概述	173
第二节 CAD 基础知识	177
第三节 常用图形算法	193
第四节 矿山工程常用曲线的生成方法	202
第五节 微机绘图软件 Auto CAD 简介	221
第六节 矿山 CAD 系统的开发原理及软件实例	235
习题	243
第九章 计算机模拟	244
第一节 概论	244
第二节 模拟方法及矿井应用实例	250
第三节 露天矿工艺系统模拟	261
第四节 系统动力学方法及实例	280
习题	291
主要参考文献	293

第一章 绪 论

第一节 矿山系统工程的一般特征

矿山系统工程是以系统工程的一般原理为基础,运用现代数学和计算机技术,对矿山开采中的各种技术和经济问题进行优化评价、分析和决策的一种综合性的科学技术。它以矿山开采系统为研究对象。

矿山开采系统,除与一般系统一样,具有综合性、目的性、关联性、环境相应性和多层次等共同特征外,还具备以下的特点:

(1) 矿山生产的对象——矿床,有其固定的地理位置,因而在矿山开采过程中,矿产品的供销、矿区的形成和发展,必然与一个地区乃至全国的社会经济发展相联系。

(2) 矿床是赋存在地壳中的自然产物,其地质构造、几何形态、物理性质和化学构成等有很大的变异性。矿山系统工程的一个重要内容就是要正确地在定性和定量上认识这种变异规律,构造一定的数字化和图象化矿床模型。

(3) 矿床开发要经历不同的阶段。地质勘探包括普查、详查、精查和生产探勘等不同阶段。设计过程又分矿区总体设计、矿山可行性研究、初步设计和施工图等阶段,以后则是矿区建设、矿山投产、达产、正常生产和产量递减等阶段。一个矿山的开发过程,历时短则十几年,长则百余年。

同时,矿山生产是多环节的。包括破岩、装载、移运、排卸和矿石加工等环节。各环节之间相互联系,相互制约。

此外,矿山作业的开拓、准备和开采,在时间和空间上要保持一定的超前和配合关系。

基于上述特点,矿山系统工程所研究的系统往往是复杂的、动态的、多阶段的、多环节的,与自然环境密切相关的巨大系统。

第二节 矿山系统工程的发展历史

以运筹学在矿山中应用为主要标志的矿山系统工程发萌于本世纪50年代。在我国则始于50年代末和60年代初。当时在我国,运用的运筹学模型有线性规划、排队论、统筹网络和优选法等,而计算手段则是常规和传统的。计算机的运用仅是极个别的。

经过一段时间的停滞,到70年代后期,以计算机技术为手段的矿山系统工程在我国已具备一定的發展基础。这时期,主要研究内容为计算机化的矿床模型、地质统计学、露天开采境界和进度计划,以及矿井优化设计等,并取得了一批优秀的成果。

80年代,我国矿山系统工程获得了蓬勃的发展。其特点是:

(1) 矿山系统工程知识逐步普及和推广,培养出了一批颇有成就的专门人材;

(2) 矿山系统工程应用领域十分广阔,遍及地质和测量、矿山设计和建设、矿山生产控制和管理、矿石加工和综合利用以及机械制造等各个方面,取得了十分可喜的成果;

(3) 我国矿山工程中应用了国内外出现的系统工程中的各种数学模型和方法,而且已

有所创造和发展。

(4) 矿山系统工程所涉及的问题,既有如工作面、采区这样较小规模的系统,又有矿井和露天矿这样较大的系统,也有如省级、跨省级,乃至全国性的战略规划与决策的规模庞大的系统。

我国矿山系统工程的研究成果,除在国内期刊发表和在不同级别的学术会议交流外,从1984年起,在著名的国际性APCOM(计算机及运筹学在矿业中的应用)文集中历届都有发表,有的成果已达到了相当高的水平。

可以预见,今后,矿山系统工程在我国的发展一定会更加迅速。

第三节 矿山系统工程的模型

矿山系统工程所应用的数学模型,内容十分丰富,主要包括:

- (1) 规划论:线性规划、非线性规划、动态规划、整数规划和混合规划、目标规划;
- (2) 网络模型:支撑树、最短路、网络流、CPM技术等;
- (3) 随机运筹模型:队排论、存储论、可靠性分析、对策论、计算机模拟等;
- (4) 多目标决策及综合评价;
- (5) 预测模型:线性回归及外推、模糊预测、灰色预测、综合预测;
- (6) 系统动态分析(系统动力学);
- (7) 矿床模型:块段二维(三维)模型、地质统计学模型、实体模型;
- (8) 数据库及信息系统模型;
- (9) 专家系统模型;
- (10) 其他模型。

这些模型的引入,使矿业科学更加理论化和数量化。可以说,矿山系统工程是矿业科学的一个重要分支,是推进矿山开采现代化的一个重要因素。

第四节 矿山系统工程的一般步骤

进行矿山系统工程,应遵循如下步骤:

(1) 搞清问题。必须在听取决策层的要求,广泛征集有关部门和人员的意见的基础上,搞清所研究的矿山系统的目标、结构、约束和环境。如果系统包括若干相对独立的子系统,则要明确各子系统之间的信息和动力学交流的内容和程序。要查明有关的参数和变量,明确有关信息的来源、收集途径和方法,还要明确工程的进度和分工,落实人员和组织、资金来源等。

(2) 收集数据和资料。这是开展矿山系统工程的基础。数据和资料必须可靠、充分和有代表性。其中包括入文资料、地质资料、技术经济的历史发展资料、生产统计和实测数据,以及必要的其他资料和相关文献资料。实测资料可用抽样的方法获取。当然,并不是每项矿山系统工程都需要上述全部资料,但与所研究系统有关的资料应尽可能收齐。

(3) 数据处理。对收集到的资料和数据要进行系统的整理和统计分析。在处理数据时,应就以下问题作出回答:有关系统实体的特征值已经齐备吗?有关函数关系已经确定了吗?所收集到的数据能够进行所作的矿山系统工程吗?

(4) 构造模型。这里所指的是所研究问题的用变量、函数和逻辑关系表示的数学模型

或数据和信息处理模型。在构造模型时，应注意：①在系统总体分析的基础上，宜把大系统分解为若干相互衔接的层次和相互联系的相对独立的子系统，以便模型的求解。②变量和函数的建立应繁简适宜。过简势必影响求解的精度；过繁则可能使模型过于庞大，难以求解，而且往往过细的变量值又不易找到。③模型的选择应和所研究的对象相适应，例如层状矿体适于用二维块段模型，三维块段模型则宜用于非层状矿体。

(5) 求解。矿山系统工程求解一般借助于计算机。为此往往要编写专门的计算机程序。对于大的复杂的系统，求解过程往往是定性分析和定量分析相结合进行的。有时则不一定求出最优解，而采用能被接受的可行的次优解。

(6) 系统实施。求解的目的在于实施。但实际上，有的矿山系统工程的成果在审查后被束之高阁，或仅有部分成果被采用实施，这种状况亟待矿山系统工作者努力加以改变。

思 考 题

1. 矿山系统有哪些特点？
2. 矿山系统工程有哪些模型？
3. 进行矿山系统工程应遵循哪些步骤？

第二章 矿山运筹学模型

矿山系统工程的最初发展,是运筹学模型的矿山应用。在此先从矿山运筹学模型入手,进行矿山系统工程的讨论。

第一节 线性规划

线性规划是矿山问题优化中应用最为广泛的运筹学模型,下面列举几个较为典型的例子。

一、产量优化分配

设某矿山有 n 个采矿工作面(或出矿点)。所谓产量优化分配,就是要在满足一定约束条件下,确定各工作面的产量 x_i ($i=1, 2, \dots, n$),以达到优化的目的。

目标可以是:

(1) 总产量最高,即 $\max z = \sum_{i=1}^n x_i$, 其中 x_i 为第 i 工作面的产量。

(2) 总消耗最低,即 $\min z = \sum_{i=1}^n c_i x_i$, 其中, c_i 为第 i 工作面生产单位矿石量的消费系数,如成本、运距、功耗等。

(3) 总收益最高,即 $\max z = \sum_{i=1}^n p_i x_i$, 其中 p_i 为第 i 工作面的矿石产值系数,如售价,利润等。

可能的约束条件有:

(1) 矿石品位:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i \leq \bar{\alpha} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2-1)$$

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i \geq \underline{\alpha} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2-2)$$

其中 α_i 为第 i 工作面的矿石品位; $\bar{\alpha}$ 及 $\underline{\alpha}$ 为要求的矿石品位的上限和下限。各品位有多种指标,则需列出各指标的约束方程。

(2) 资源消耗:

$$\sum_{i=1}^n \beta_{ij} x_i \leq \beta_j \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (2-3)$$

其中 β_{ij} 为第 i 工作面第 j 种资源的消耗系数; k 为资源种类数,如设备、人力、炸药、资金等; β_j 为矿山拥有的第 j 种资源数量。

(3) 超前约束。如果第 i 工作面需超前第 j 工作面,则这种关系要用某种形式的约束方程加以表示。超前约束又往往被称之为几何约束。

(4) 能力约束:

$$\underline{a}_i \leq x_i \leq \bar{a}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2-4)$$

$$\underline{A} \leq \sum_{i=1}^n x_i \leq \bar{A}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2-5)$$

其中, $\bar{a}_i$ 、 $\underline{a}_i$ 为第 i 工作面的产量上限和下限; $\bar{A}$ 和 $\underline{A}$ 为矿山要求的产量上限和下限。

(5) 非负约束, 即 $x_i \geq 0$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

(6) 其他约束。

例 2-1 某铝厂年需铝土原料 $A = 35 \times 10^4 \text{t/a}$, 由 6 个矿山提供。各矿矿石能力 a_i , 矿石 Al_2O_3 品位 $\alpha_i^{(1)}$, SiO_2 含量 $\alpha_i^{(2)}$, 生产每吨矿石的汽车需时数 h_i , 各矿矿石单价 f_i 如表 2-1。铝厂合格矿石品位为 Al_2O_3 , $\alpha_1 = 40.0\% \sim 43.0\%$, SiO_2 , $\alpha_2 = 0.9\% \sim 1.4\%$, 所能提供的汽车台时 $H = 17.5 \times 10^4 \text{h}$ 。确定各矿的供矿量, 使总的售价最高。

解: 模型如下:

$$\max z = \sum_{i=1}^6 f_i x_i \quad (2-6)$$

$$\underline{a}_j \sum_{i=1}^6 x_i \leq \sum_{i=1}^n \alpha_i^{(j)} x_i \leq \bar{a}_j \sum_{i=1}^6 x_i, j = 1, 2 \quad (2-7)$$

$$\sum_{i=1}^6 h_i x_i \leq H \quad (2-8)$$

$$x_i \leq a_i \quad (2-9)$$

$$\sum_{i=1}^6 x_i \geq A \quad (2-10)$$

$$x_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (2-11)$$

这里共有两个品位约束, 分别为 Al_2O_3 和 SiO_2 的含量要求。

把数据代入并求解, 得结果为: $x_1 = 5$, $x_2 = 10.7$, $x_3 = 0$, $x_4 = 0$, $x_5 = 10$, $x_6 = 9.3$, 单位是 10^4t/a 。矿石混合后的品位, Al_2O_3 为 42.999%, SiO_2 为 1.287%, 总售价为 105.36 万元。

表 2-1 各矿矿石品位、汽车台时及售价指标

矿 山	各矿能力 a_i 10^4t/a	Al_2O_3 品位 $\alpha_i^{(1)}$ %	SiO_2 含量 $\alpha_i^{(2)}$ %	汽车台时消耗 h_i h/t	矿石单价 f_i ¥/t
1	5.0	36.5	2.65	0.8	19
2	12.0	46.7	0.30	0.2	38
3	9.0	42.5	1.70	0.6	19
4	7.5	41.0	1.90	0.3	19
5	10.0	44.8	1.0	0.1	38
6	15.0	40.3	2.0	0.5	19

例 2-2 某露天铁矿, 由三个溜子系统出矿, 班产量分别为 2525.25t、2525.25t 和 1515.15t, 矿石品位分别为 $\text{TFe} 32.5\%$ 、 31.5% 和 29.0% 。选厂通过多年生产发现, 原矿 $\text{TFe} < 30\%$ 时, 结晶颗粒小, 磨矿效率低。 $\text{TFe} > 32\%$ 时, 精矿含铁高, 对冶炼不利。故确定原矿入选品位为 $\alpha = 30\% \sim 32\%$, 且确定不同品位的原矿价格为:

$$\text{当 TFe}=30\% \sim 32\% \text{时,} \quad P = (\alpha - 30) + 9 \quad \text{元/t} \quad (2-12)$$

$$\text{当 TFe} > 32\% \text{时,} \quad P = 9 \quad \text{元/t} \quad (2-13)$$

要求确定各溜井系统的班产量及最佳矿石品位, 使矿石总售价最高。

LP 模型如下:

$$\max z = p(x_1 + x_2 + x_3) \quad (2-14)$$

$$x_1 \leq 2525.25 \quad (2-15)$$

$$x_2 \leq 2525.25 \quad (2-16)$$

$$x_3 \leq 2515.15 \quad (2-17)$$

$$(0.325 - \alpha)x_1 + (0.315 - \alpha)x_2 + (0.250 - \alpha)x_3 = 0 \quad (2-18)$$

$$30 \leq \alpha \leq 32 \quad (2-19)$$

$$x_1, x_2, x_3 \geq 0 \quad (2-20)$$

该 LP 的解法是先求出 α 为不同常数值时的解 $X^*(\alpha)$, 及目标函数数值 $Z^*(\alpha)$, 然后作出 $Z^*(\alpha)$ 曲线。使 $Z^*(\alpha)$ 值最大的 α 值为最佳品位, 与之相应的 x_1, x_2, x_3 即各溜子系统的班产量最佳解。

例 2-3 某露天矿有 n 个剥离平盘, 现欲确定各平盘的年剥离量 x_i ($i=1, 2, \dots, n$), 使在保持平盘宽度和遵守设备和材料消耗的条件下, 总剥离量最大。

LP 模型如下:

$$\max \quad Z = \sum_{i=1}^n x_i \quad (2-21)$$

$$\text{st.} \quad x_i - x_{i+1} \leq (b_i - b_{i0}) hl \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2-22)$$

$$\sum_{i=1}^n p_{ij} x_i = P_j \quad j=1, 2, \dots, S \quad (2-23)$$

$$\sum_{i=1}^n q_{it} x_i \leq Q_t \quad t=1, 2, \dots, T \quad (2-24)$$

$$\sum_{i=1}^n c_i x_i \leq C \quad (2-25)$$

$$x_i \geq 0, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2-26)$$

其中, b_i 和 b_{i0} 为第 i 平盘的宽度和最小平盘宽度; h 为台阶高度; l 为台阶工作线长度; P_j 为第 j 种设备台数; p_{ij} 为第 i 平盘单位开采量的 j 种设备所需台数; P_j 为 j 种设备拥有台数; S 为设备种类数; q_{it} 为第 i 平盘单位开采量的第 t 种材料的消耗量; Q_t 为第 t 种材料的拥有量; T 为所需材料种类数; c_i 为第 i 平盘单位开采量所需资金额; C 为拥有资金总额。

二、采掘计划

优化矿山采掘计划的 LP 模型原则上与产量分配 LP 相同, 但就其规模和约束来说, 则更大和更严格。这里主要讨论的是矿山的年度计划和短期计划。

例 2-4 某露天铁矿, 要确定若干计划期内各采区采出的剥离量和采矿量, 以保证精矿粉的销售利润总额最高。

LP 模型的构造如下: 设 x_{et} 为第 t 计划期从第 e 采区采出的矿石量; y_{et} 为第 t 计划期从第 e 采区采出的剥离量; $e=1, 2, \dots, M$; $t=1, 2, \dots, T$ (其中 M 为采区数, T 为计划期数)。

目标函数：精矿粉销售利润最大

$$\max Z = \sum_{t=1}^T \sum_{e=1}^M [U_t - \eta_q (\beta_t - \beta) - C_t] \eta x_{et} - \sum_{t=1}^T \sum_{e=1}^M C'_{et} S'_{et} x_{et} - \sum_{t=1}^T \sum_{e=1}^M C''_{et} S''_{et} y_{et} \quad (2-27)$$

式中 U_t 为第 t 计划期的标准质量的精矿粉的售价，元/t； β_t 为第 t 计划期选出的精矿粉品位，%； β 为标准精矿粉品位，%； η_q 为从选厂外运的精矿粉品位增减 1% 的价格差，元/%； C_t 为采选系统第 t 计划期除矿岩运输外的精矿粉生产成本，元/t； η 为精矿粉产出率； C'_{et} ， C''_{et} 为分别为第 t 计划期的矿石和岩石的运输成本，元/t·km； S'_{et} ， S''_{et} 为分别为第 t 计划期的矿石和岩石的运距，km。

约束条件：

(1) 精矿量。设 D_t 为第 t 计划期的精矿需求量，则

$$\eta \sum_{e=1}^M x_{et} \geq D_t \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (2-28)$$

(2) 选厂能力。设 D'_t 为第 t 计划期的选厂能力，则

$$\sum_{e=1}^M x_{et} \leq D'_t \quad (2-29)$$

(3) 矿石品位。设 e_{et} 为 t 期 e 采区的矿石品位， a_t 为要求的品位，则

$$\sum_{e=1}^M x_{et} e_{et} - a_t \sum_{e=1}^M x_{et} \geq 0, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (2-30)$$

(4) 矿石硬度配比，这是所举例中的一个特殊约束。设 $\bar{\epsilon}_t$ 和 $\underline{\epsilon}_t$ 分别为 t 期入选的硬软矿石量比值的上、下限，则有

$$\sum_{i \in I} x_{it} - \bar{\epsilon}_t \sum_{k \in J} x_{kt} \leq 0 \quad (2-31)$$

$$\sum_{i \in I} x_{it} - \underline{\epsilon}_t \sum_{k \in J} x_{kt} \geq 0 \quad (2-32)$$

式中 I, J 分别为硬矿石和软矿石的采区号集合。

(5) 开拓矿量。设 r_{it} 和 r'_{it} 分别为与开拓工程有关的矿石和剥离的容重，t/m³， K 和 M 分别为进行和不进行开拓工程的采区的标号集合， ϕ 为开拓工程量补偿系数，则

$$\frac{1}{\phi} \sum_{t=1}^T \sum_{i \in K} \left(\frac{x_{it}}{r_{it}} + \frac{y_{it}}{r'_{it}} \right) - \sum_{t=1}^T \sum_{e \in M} x_{et} > 0 \quad (2-33)$$

(6) 平盘宽度。设 $h_t^{(j)}$ ， $h_t^{(j+1)}$ 为 t 期上下相邻两采区的台阶高度； $l_t^{(j)}$ 为相应两采区的长度； $r_{it}^{(j)}$ ， $r_{it}^{(j+1)}$ 为相应两采区的矿石容重， $r_{it}^{(j)}$ ， $r_{it}^{(j+1)}$ 为相应两采区的岩石容量； $B_t^{(j)}$ 和 $B_{\min}^{(j)}$ 为上台阶 t 期之初的平盘宽度和最小平盘宽度，则

$$\frac{1}{h_t^{(j)} l_t^{(j)}} \left(\frac{x_{it}^{(j)}}{r_{it}^{(j)}} + \frac{y_{it}^{(j)}}{r_{it}^{(j)'}} \right) + B_t^{(j)} - \frac{1}{h_t^{(j+1)} l_t^{(j+1)}} \left(\frac{x_{it}^{(j+1)}}{r_{it}^{(j+1)}} + \frac{y_{it}^{(j+1)}}{r_{it}^{(j+1)'}} \right) \geq B_{\min}^{(j)}, \quad \forall j, t \quad (2-34)$$

(7) 资源保有量。设 Q_e 为 e 采区计划的矿石保有量，则

$$\sum_{t=1}^T x_{et} \leq Q_e, \quad e = 1, 2, \dots, M \quad (2-35)$$

(8) 剥采比。设 $\bar{b}_{et}$ 和 $\underline{b}_{et}$ 分别为 e 采区 t 期生产剥采比的上下限，则有

$$y_{et} - \bar{b}_{et} x_{et} \leq 0, \quad \forall e, t \quad (2-36)$$

$$y_{et} - \underline{b}_{et}x_{et} \geq 0, \quad \forall e, t \quad (2-37)$$

(9) 设备能力。设 $\bar{Q}_{et}$, $\underline{Q}_{et}$ 分别为 t 期 e 采区采运设备综合能力的上限和下限, 则

$$x_{et} + y_{et} \leq \bar{Q}_{et}, \quad \forall e, t \quad (2-38)$$

$$x_{et} + y_{et} \geq \underline{Q}_{et}, \quad \forall e, t \quad (2-39)$$

(10) 非负约束, 即

$$x_{et}, y_{et} \geq 0, \quad \forall e, t \quad (2-40)$$

上述 LP 是针对一个具体矿石构造的, 对于其他矿山, 某些参数和约束条件可能要删减或增加, 如矿石软硬比例可不予考虑, 设备能力可不考虑下限值等等。目标函数中还可能包括穿爆和采装等生产环节的成本。

例 2-5 某地采铅锌矿, 用 LP 确定采准, 采场和矿柱回收的合理顺序。模型中的变量为采场采矿量 x_{it} , 矿柱回收量 y_{jt} 和矿块采矿量 z_{kt} 。其中 i 为采场号, j 为矿柱号, k 为切采矿块号, $t=1, 2, 3$, 分别表示今年, 明年和后年。

目标函数为

$$\max z = \sum_i \sum_t p_i x_{it} + \sum_j \sum_t q_j y_{jt} + \sum_k \sum_t r_k z_{kt} \quad (2-41)$$

式中 p_i , q_j 和 r_k 分别表示采场 i , 矿柱 j 和切采矿块 k 的优先权值, 它们是由采矿工程师按各矿场开采先后顺序和轻重缓急而给出的。

约束条件有:

(1) 金属量要求。设 $\alpha_i^{(p)}$, $\alpha_j^{(p)}$ 和 $\alpha_k^{(p)}$ 为从采场 i , 矿柱 j 和切采矿块采出的矿石的铅品位; $\alpha_i^{(2)}$, $\alpha_j^{(2)}$ 和 $\alpha_k^{(2)}$ 为对应的锌品位, $b_t^{(p)}$ 和 $b_t^{(2)}$ 为 t 期的铅和锌的产量要求, γ_p 和 γ_z 为选厂的铅和锌的回收率, 则应保证

$$\sum_i \alpha_i^{(p)} x_{it} + \sum_j \alpha_j^{(p)} y_{jt} + \sum_k \alpha_k^{(p)} z_{kt} \geq b_t^{(p)} / \gamma_p, \quad t = 1, 2, 3 \quad (2-42)$$

$$\sum_i \alpha_i^{(2)} x_{it} + \sum_j \alpha_j^{(2)} y_{jt} + \sum_k \alpha_k^{(2)} z_{kt} \geq b_t^{(2)} / \gamma_z, \quad t = 1, 2, 3 \quad (2-43)$$

(2) 利润指标。设 b_t ($t=1, 2, 3$) 为各年利润指标, 元, c_i , c_j 和 c_k 为从采场 i 、矿柱 j 和切采矿块 k 采出的矿石的利润指标, 元/t, 则应有

$$\sum_i c_i x_{it} + \sum_j c_j y_{jt} + \sum_k c_k z_{kt} \geq b_t, \quad t = 1, 2, 3 \quad (2-44)$$

(3) 采准量。一般, 头一年开始准备的矿块, 第二年才能采矿, 故若 $b_{t+1}^{(M)}$ 为 $t+1$ 年的计划金属产量, k_{it} 为 t 年的采准比, 则

$$\sum_k z_{kt} \geq k_{it} b_{t+1}^{(M)}, \quad t = 1, 2, 3 \quad (2-45)$$

(4) 采准能力。若 R_t 为 t 年的采准能力, 则

$$\sum_k z_{kt} \leq R_t, \quad t = 1, 2, 3 \quad (2-46)$$

(5) 矿柱回收比。设 k_{pt} 为 t 年的矿柱回收比, 则

$$\sum_j y_{jt} \geq k_{pt} b_t^{(M)}, \quad t = 1, 2, 3 \quad (2-47)$$

(6) 矿柱回收能力。设 R_{pt} 为 t 年的矿柱回收能力, 则

$$\sum_j y_{jt} \leq R_{pt}, \quad t = 1, 2, 3 \quad (2-48)$$

(7) 选厂能力 D_t 。

$$\sum_i x_{it} + \sum_j y_{jt} + \sum_k z_{kt} \leq D_t, t = 1, 2, 3 \quad (2-49)$$

(8) 矿石品位。设 $\bar{a}$ 和 $\underline{a}$ 为允许的矿石品位上、下限，而 α_i , α_j 和 α_k 分别为采场 i , 矿柱 j 和切采矿块 k 的矿石品位，则

$$\sum_i (\alpha_i - \bar{a}) x_{it} + \sum_j (\alpha_j - \bar{a}) y_{jt} + \sum_k (\alpha_k - \bar{a}) z_{kt} \geq 0 \quad (2-50)$$

$$\sum_i (\alpha_i - \underline{a}) x_{it} + \sum_j (\alpha_j - \underline{a}) y_{jt} + \sum_k (\alpha_k - \underline{a}) z_{kt} \leq 0$$

(9) 回采顺序。若矿柱 j 在采场 i 和 $i+1$ 之间，且与二者紧邻，则矿柱 j 的回采须与矿房 i 和 $i+1$ 的开采错后一年。若矿柱 j 和矿房 i 及 $i+1$ 的矿石保有量分别为 D_j 和 D_i 和 D_{i+1} ，则应保证

$$(y_{j,t+1} + y_{j,t+2}) D_j^{-1} - (x_{it} + x_{i,t+1}) D_i^{-1} \leq 0 \quad (2-51)$$

$$(y_{j,t+1} + y_{j,t+2}) D_j^{-1} - (x_{i+1,t} + x_{i+1,t+1}) D_{i+1}^{-1} \leq 0 \quad (2-52)$$

此外，必须先进行切割采准，才能开采矿房。设二者也错开一年，则应满足

$$x_{i,t+1} D_i^{-1} - z_{k,t} D_k^{-1} \leq 0 \quad (2-53)$$

$$(x_{i,t+1} + x_{i,t+2}) D_i^{-1} - (z_{k,t} + z_{k,t+1}) D_k^{-1} \leq 0 \quad (2-54)$$

(10) 矿量。

$$\sum_i x_{it} \leq D_i, \quad \forall i \quad (2-55)$$

$$\sum_j x_{jt} \leq D_j, \quad \forall j \quad (2-56)$$

$$\sum_k z_{kt} \leq D_k, \quad \forall k \quad (2-57)$$

(11) 采矿强度。设 E_i , E_j 和 E_k 分别为矿房 i , 矿柱 j 和切割矿块 k 的开采强度，则

$$x_{it} \leq E_i, \quad \forall t \quad (2-58)$$

$$y_{jt} \leq E_j, \quad \forall t \quad (2-59)$$

$$z_{kt} \leq E_k, \quad \forall t \quad (2-60)$$

(12) 非负约束。

$$x_{it}, y_{jt}, z_{kt} \geq 0 \quad (2-61)$$

三、露天矿采剥设备数均衡

在露天矿长远设计中，若矿山开采年限为 n 年，逐年所需采剥设备为 x_i 台， $i=0, 1, \dots, n$ 。 $x_i \geq 0$ ，整数。定义 $Z(t) = \{x_0, x_1, \dots, x_n\}$ 为该矿设备投入轨迹。该轨迹可分为上升段和下降段，相应表示露天矿剥离量的增长期和减缩期。设两者的交点为第 R 年，则可用如下整数线性规划 (ILP) 求出设备最佳投入轨迹：

$$\begin{aligned} \min \quad Z = & F_j x_0 + \sum_{i=1}^R a_i (x_{i+1} - x_i) F_k + \\ & \sum_{i=R+1}^n a_i (x_i - x_{i-1}) F_c + \sum_{i=1}^n a_i x_i F_y \end{aligned} \quad (2-62)$$

$$\text{st.} \quad x_i \leq x_{i+1}, \quad i \leq R \quad (2-63)$$

$$x_i \geq x_{i+1}, \quad i > R \quad (2-64)$$

$$\sum_{i=1}^k x_i \geq Q_i, \quad k = 0, 1, \dots, n \quad (2-65)$$

$$x_i \geq 0, \text{整数} \quad (2-66)$$

式中 F_1 为基建外包每组剥采设备所花费用; F_k 为每组设备投资; F_c 为每组设备残值; F_y 为每组设备年运营费; Q_i 为完成按自然剥采比所确定剥离量累计至第 i 年所需要的设备台年数; α_i 为贴现指数。

$$\alpha_i = 1/(1+r)^{i-1}$$

式中 r 为贴现率。

四、其他模型

LP 还广泛用来解决矿山、矿区乃至地区能源开发的优化问题。

(1) 运输模型。用以解决矿山物料合理流向, 能源合理调配等问题。

(2) 项目安排模型。用以解决矿区或地区矿井或能源安排的顺序和开工年限问题。这时, 目标函数可以是总投资或其现值最小。包括的约束可能有原煤产量要求、地面或外运能力、水资源及其他资源项目相互关系等, 还可能包括采煤机械化程度等。而变量 $x_{i,t} = 0, 1$, 相应表示项目 i 在 t 年开工, 或相反。

(3) 地区能源生产和销售布局模型等。

第二节 非线性规划

在矿山系统分析中, 存在着许多非线性函数, 特别是涉及岩体力学、流体力学方面的函数, 以及费用函数等, 因而在系统优化中, 自然会出现非线性规划的问题。

一、采矿设备分配

设矿山有 M 台运输设备 (如汽车), 分配于 N 处 (如采掘工作面) 作业。各处配备的设备数为 x_i ($i=1, 2, \dots, N$), $\sum_{i=1}^N x_i = M$ 。据随机服务理论, 第 i 处配置 x_i 设备达到的效益 (如采掘能力) 为 $g_i(x_i)$ 。 $g_i(x_i)$ 方程是非线性的。随 x_i 加大而单调上升。现要确定各处所配设备数, 使系统总效益最大, 这就构成如下 NLP:

$$\max \quad G = \sum_{i=1}^N g_i(x_i) \quad (2-67)$$

$$\text{st.} \quad \sum_{i=1}^N x_i = M \quad (2-68)$$

$$x_i \geq 0, \text{整数} \quad (2-69)$$

如果尚需考虑各工作面的能力均衡, 则还应加上以下约束

$$\left| \frac{g_i(x_i)}{\sum_{i=1}^N g_i(x_i)} - p_i \right| \leq \epsilon$$

其中, p_i 为第 i 工作面的能力指数, $\sum_{i=1}^N p_i = 1$, $0 < p_i < 1$ 。

二、矿井采区参数优化

矿井采区参数包括采区的长度 S 、宽度 L 、分段数目 N_1 和同时工作的工作面数目 N_2 等。这些参数与有关费用, 如巷道掘进费用, 巷道维护费用、运输费、通风费、排水费等都可以形成非线性函数 $z_i(S, L, N_1, N_2)$ 。从而形成以下形式的非线性规划:

$$\min Z = \sum_i Z_i(S, L, N_1, N_2) \quad (2-70)$$

$$\underline{S} \leq S \leq \bar{S} \quad (2-71)$$

$$\underline{L} \leq L \leq \bar{L} \quad (2-72)$$

$$\underline{N}_1 \leq N_1 \leq \bar{N}_1 \quad (2-73)$$

$$N_2 \leq N_2 \leq \bar{N}_2 \quad (2-74)$$

式中, $\underline{S}$ 和 $\bar{S}$ 为采区长度下限和上限; $\underline{L}$ 和 $\bar{L}$ 为采区宽度下限和上限; $\underline{N}_1$ 和 $\bar{N}_1$ 、 $\underline{N}_2$ 和 $\bar{N}_2$ 分别为分段数目和同时工作的工作面数目的下限和上限。

三、平硐开掘方向

平硐开拓系统广泛应用于山坡地形的矿区。在选定工业场地和平硐入口位置后, 可以用 NLP 确定平硐的最佳开掘方向。

如图 2-1, 如平硐服务于东部 1, 2, $\dots$, r 上山和西部 $r+1$, $r+2$, $\dots$, $r+s$ 上山, 在平硐开掘方向角 α 设定后, 即可按下式算出从工业广场到各上山车场之间的运距

$$l_i = l + c/\sin\alpha + d_i - c/\cos\alpha, \quad \forall i \quad (2-75)$$

式中, l 为自工业场地至平硐入口的距离; c 为平硐口至大巷的距离; d_i 为自第 i 上山至硐口的距离 (见图 2-1)。

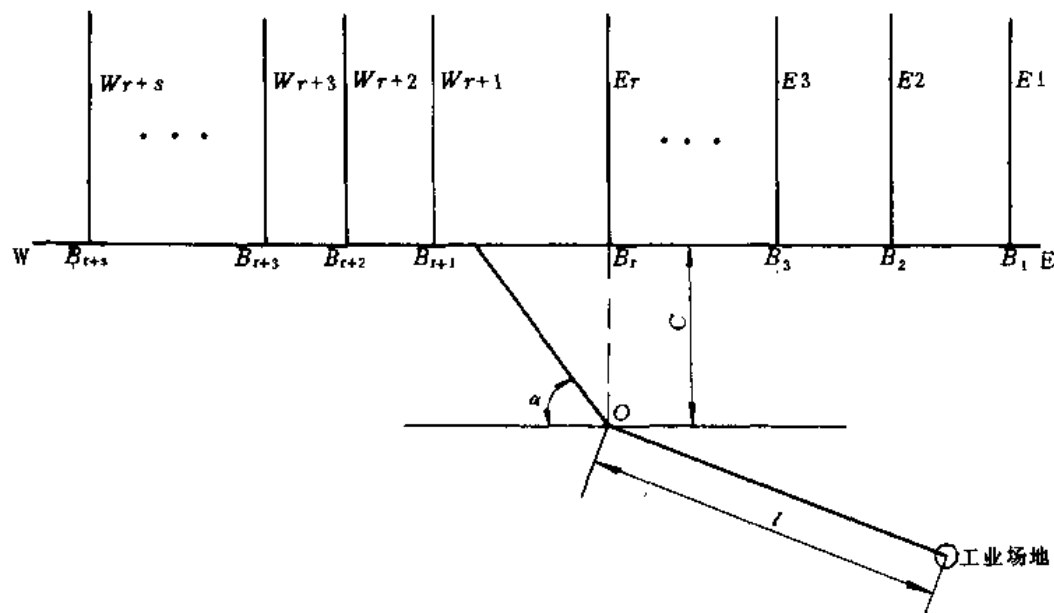


图 2-1 平硐方向优化

则开拓系统的总运费为

$$U_1(\alpha) = \sum_{i=1}^{r+s} Z_i Y_i \quad (2-76)$$

式中, Z_i 为 i 上山负担的开拓煤量; Y_i 为 l_i 运距下的单位运费。这里 $Y_i = f(l_i)$ 是非线性的。

平硐掘进和维护费为