

普通高等教育“九五”国家级重点教材

CAIKUANG

XITONG GONGCHENG

采矿系统工程

张幼蒂 王玉浚 主编

中国矿业大学出版社



九五



CAIKUANG
XITONG
GONGCHENG

责任编辑 姜志方

封面设计 肖新生



ISBN 7-81070-112-6



9 787810 701129 >

ISBN 7-81070-112-6 / TD·14

定价：30.00 元

TD80
Z-915

普通高等教育“九五”国家级重点教材

采矿系统工程

主编 张幼蒂 王玉浚

编著人员 张幼蒂 王玉浚 韩可琦
才庆祥 李克民 张玉祥
姬长生 张瑞新 王家臣

中国矿业大学出版社

内容提要

采矿系统工程是由采矿工程学与系统工程学相结合而形成的一个新兴学科分支。本书已被确定为普通高等教育“九五”国家级重点教材。主要内容有：总论，矿山设计与规划系统优化，矿山生产工艺系统优化，矿山管理系统优化，以及采矿系统工程发展前景展望等。本书较为全面、充分地反映了采矿系统工程国内外发展水平，核心内容体现了作者们多年来主持或参加完成的研究成果。本书适用于煤炭、冶金、化工、建材等工业部门的采矿工程相关专业，读者对象以高校本科生为主，兼顾研究生需要，也可供工程技术人员参考。

责任编辑 姜志方

责任校对 杜锦芝

图书在版编目(CIP)数据

采矿系统工程/张幼蒂,王玉浚主编. —徐州:中国矿业大学出版社,2000.1
高等教育“九五”国家级重点教材
ISBN 7-81070-112-6

I. 采… II. ①张…②王… III. 矿山开采-系统工程-高等学校-教材 IV. TD 80

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 12825 号

中国矿业大学出版社出版发行

(江苏徐州 邮政编码 221008)

出版人 解京选

新华书店经销 中国矿业大学印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 21 字数 524 千字

2000年1月第1版 2000年1月第1次印刷

印数 1~1000 册 定价 30.00 元

Abstract

Mining systems engineering is a newly developed branch of learning by combining mining engineering and systems engineering. The main contents of this book include: general introduction, optimization for mine design and planning system, optimization for mine production and technology system, optimization for mine management system, the prospect of mining systems engineering, etc. The international development of mining systems engineering has been reflected in this book and many important contents in the book come from the research results by the authors. This book has been determined as the national key textbook for the ordinary high education by the State Educational Commission.

前 言

采矿系统工程是由采矿工程学与系统工程学相结合而形成的一个新兴学科分支,近 20 年来发展尤为迅速。自 20 世纪 80 年代初期,采矿系统工程课程即列入我国高等学校矿业类专业教学计划。在多年来采矿系统工程领域积累的教学经验及科研成果的基础上,为适应采矿工程专业面的拓宽与知识更新要求,完成了本书的编著。本书已被国家教委于 1997 年确定为普通高等教育“九五”国家级重点教材立项选题。

本书在体系结构上,采取“纵横交织”的方式,即以系统科学在采矿工程中的应用领域为纲以形成篇章,各章节中再结合所采用的优化理论与计算机技术为目做横向展开。期望这种结构有利于系统科学理论与采矿工程实践的密切结合,并对启发学生广开思路有所裨益。

本书内容主要包括采矿系统工程总论,矿山设计与规划系统优化,矿山生产工艺系统优化,矿山管理系统优化,以及采矿系统工程发展前景展望等。作者广泛收集了采矿系统工程学科形成和发展过程中的国内外科技文献,较为全面、充分地反映了本领域国际学术发展水平;而书中内容的核心部分及多半篇幅则体现了作者们多年来主持或参加完成的研究成果。

本书力求通用性。从开采方式上讲它适用于露天开采及地下开采;从开采对象上说,它又适用于煤炭、冶金、化工、建材等各工业部门采矿工程相关专业;读者对象以高校本科生为主,兼顾研究生教学需要,也可供工程技术人员参考。

在书中各章节内容的安排上,追求理论联系实际,深入浅出与良好的结构,以有利于启发学生独立分析问题与解决问题的能力。为此,文中佐以大量典型实例,并在各章中附有若干思考题及练习题。

阅读本书必要的基础知识有:采矿工程学,概率论与数理统计,线性代数,运筹学基础,计算机系列课程等。

本书各章编写分工如下:

总 论	张幼蒂	王玉浚	
第一章	张幼蒂	张瑞新	
第二章	张幼蒂	姬长生	
第三章	王玉浚	李克民	
第四章	韩可琦		
第五章	王玉浚	张幼蒂	张瑞新
第六章	张幼蒂	才庆祥	
第七章	张玉祥	王家臣	
第八章	张幼蒂	韩可琦	
第九章	张玉祥	张幼蒂	

第十章 张幼蒂 王玉浚

本书的出版得到了中国矿业大学学术著作和重点教材出版基金的支持。王泳嘉和骆中洲两位教授精心审阅了全书,提出了中肯的评价及宝贵的修改意见。在本书的形成过程中,还得到了不少同行专家学者的直接或间接帮助与支持。作者在此一并致以深切的谢意!

限于作者的水平与眼界,书中必有缺陷与错误之处,诚恳希望读者批评指正。

作者

1999年8月

目 录

总论	1
第一篇 矿山设计与规划系统优化	
第一章 矿床模型及矿床资源条件可开发性评价	13
第一节 地质统计学基础知识	13
第二节 矿床模型的建立	25
第三节 矿床资源条件的系统分析与评价	32
第二章 矿田开采境界与产量规模的优化	46
第一节 露天矿开采境界的优化	46
第二节 矿田划分与矿山产量规模的优化	64
第三章 矿山开采设计综合优化	91
第一节 采区设计优化	91
第二节 矿井设计方案优化	101
第三节 露天矿长远设计综合优化	111
第四章 矿区开发规划优化	132
第一节 矿区开发系统模型	132
第二节 矿区开发系统优化方法	137
* 第三节 矿区系统动态模拟分析	152
第二篇 矿山生产工艺系统优化	
第五章 矿山开采工艺选择	163
第一节 露天矿开采工艺及设备选择	163
第二节 矿井开采方法选择	174
第六章 矿山生产系统分析与优化	186
第一节 矿山生产工艺系统模拟	186
第二节 矿山生产工艺系统的数学规划	202
* 第三节 生产工艺系统的排队论分析	206
第四节 生产系统可靠性分析	213
* 第七章 矿山压力及边坡稳定的系统分析	231
第一节 岩石移动规律的数值计算与系统模拟	231
第二节 矿山压力及其控制的系统模型	237
第三节 边坡稳定系统分析与优化	246

第三篇 矿山管理系统优化

第八章 矿山采掘(剥)计划与施工管理系统优化	259
第一节 矿山采掘(剥)工程计划.....	259
* 第二节 施工项目的优化管理.....	271
* 第九章 矿山监控及管理系统优化	286
第一节 矿井生产过程的监测与控制.....	286
第二节 矿山卡车调度系统.....	291
第三节 矿山管理信息系统.....	298
第十章 采矿系统工程发展前景展望	314
第一节 采矿系统工程所采用若干技术与理论的新发展.....	314
第二节 采矿系统工程发展趋向.....	322
* 用于高校本科教材时,若课程时数有限,可做为选学的章节。	

总 论

一、系统工程

系统 (system) 是由相互关联、相互制约、相互作用的一些部分组成的，具有某种功能的有机整体^[3]。人们侧重研究的是与人类认识世界及改造世界有关的系统。

系统工程 (systems engineering) 这一概念，随着现代化工程技术的发展，早在 20 世纪 40 年代即已出现，至 50 年代美国学者发表了同名专著^[1]，标志着系统工程作为新兴学科的形成。

系统工程的定义，各国各家不尽相同，现举其有代表性的两种如下。

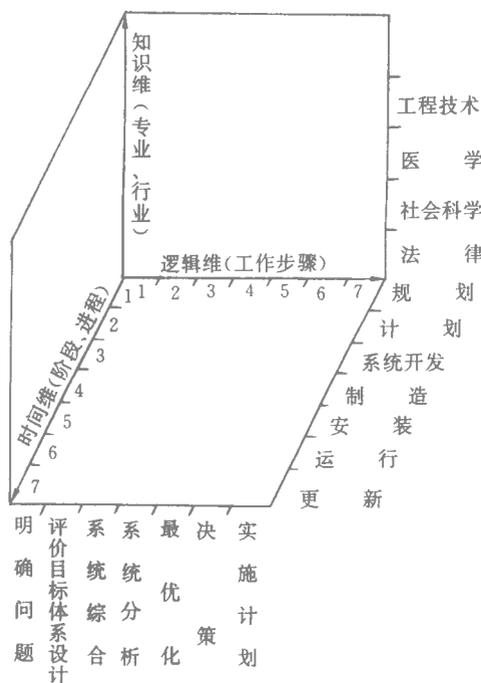


图 1 霍尔三维结构图

1969 年提出了霍尔三维结构，即展示系统工程各项工作内容的三维（时间维、逻辑维、知识维）结构图如图 1 所示。

系统工程的工作步骤亦可归纳为三个阶段：

- 系统分析；
- 系统设计；
- 系统实施。

《大英百科全书》(1974 年版)认为“系统工程是一门把已有学科分支中的知识有效地组织起来用以解决综合性工程问题的技术”。^[2]

《中国大百科全书》(1991 年版)指出“系统工程是从整体出发合理开发、设计、实施和运用系统的工程技术。它根据总体协调的需要，综合应用自然科学和社会科学中有关的思想、理论和方法，利用电子计算机作为工具，对系统的结构、要素、信息和反馈进行分析，以达到最优规划、最优设计、最优管理和最优控制的目的”。^[3]

系统的研究对象往往是复杂的大系统乃至巨系统。系统的复杂性体现在：

- 构成系统的要素本身往往就是一个系统(子系统)从而体现了系统的多层次性；
- 系统涉及的因素往往是多维的；
- 系统是由不同质的要素集合而成的；
- 系统可以是包含人在内的人-机系统。

关于系统因素的多维性，A. D. Hall 于

系统分析 systems analysis 指的是应用建模、仿真等技术对系统的各个方面进行定量和定性分析，为选择最优的系统方案提供决策依据的分析研究过程。

对于不同领域或不同行业，可以形成各自的系统工程，例如工程系统工程、科研系统工程、企业系统工程、信息系统工程、军事系统工程、经济系统工程、环境系统工程、教育系统工程、社会系统工程、计量系统工程、标准系统工程、农业系统工程、行政系统工程、法制系统工程等。^[4]

二、采矿系统工程

采矿系统工程是由采矿工程学与系统工程学相结合而形成的一个新的学科分支，已成为系统工程在各行各业中开展较为充分的一大分支。

采矿学与系统工程学的结合，是从 50 年代运筹学用于采矿业的研究开始的。随着计算机技术的迅速发展，60 年代将运筹学原理与计算机技术综合应用于矿业研究的一批成果涌现出来，使采矿系统工程作为一个新兴学科逐渐形成，并得到蓬勃发展。

国际计算机及运筹学在矿业中应用学术会议（简称 APCOM）是国际上矿业系统工程发展的一个缩影。APCOM 系由美国矿业学术界发起，1961 年于亚利桑那大学举行首届会议，其后逐渐发展成为世界性的学术会议组织。至 1999 年已举行过 28 届学术会议。从表 1 所示会议论文中可见运筹学与计算机在矿业不同分支中的应用概况。

表 1 历届 APCOM 会议论文分类统计表

研究内容	历届会议论文所占比例/%			
	第 1~7 届	第 8~14 届	第 15~19 届	第 21~25 届
地质勘探	27.5	31	14	7
矿床评价	13.5	21	7	14
采矿工程	19.5	33	47	46
选矿工程	16.0	15	14	10
其他(注)	23.5	18	18	23

注 此项包括信息管理、岩石力学、环境监测、自动控制与机器人等内容

由表 1 可见，在矿业各研究分支中，采矿工程方面占据重要地位，其所占比重呈增长之势。此外，诸如矿床评价、信息管理、岩石力学、自动控制等方面的研究内容，也往往与采矿工程关系密切，或互相交叉，难于严格划分。

除 APCOM 会议外，在美国、加拿大、波兰、捷克、前苏联等国家还分别主办过矿业系统工程方面的地区性或行业性的国际学术会议。

在我国，将运筹学用于采矿工程始于 20 世纪 50 年代末期，60 年代前期有若干初步研究成果出现。其间由于历史原因，我国在这方面的研究工作中断多年，直到 70 年代后期，才乘改革开放的春风，跟踪国际趋势，开展采矿系统工程研究。进入 80 年代后，研究工作更加深入广泛，研究成果纷纷涌现。由中国煤炭学会、中国金属学会及中国有色金属学会下属的矿山系统工程专业委员会联合主办的矿山系统工程学术会议成为全国性跨行业的学术活动，至今已开过 7 届学术会议。80~90 年代，我国矿业系统工程研究成果纷纷在 APCOM 等国际会议上发表，标志着我国矿业系统工程研究已经步入世界，在国际上占有一席之地。

以采矿为核心的矿业系统工程已成为各行业系统工程中开展较为充分、应用相当广泛的一大分支。

采矿系统工程作为一个新兴交叉学科，其基本概念可定义为：

采矿系统工程为采矿工程学与系统工程学相结合所形成的一个新的学科分支。采矿系统工程是根据采矿工程内在规律和基本原理，以系统论和现代数学方法研究和解决采矿工程综合优化问题的采矿工程学科分支。 [7]。

三、系统模型及其建立

为了对某个系统进行研究，需要构筑一定的信息体系，即模型 (model)。模型可以划分为物理 (physical) 模型和数学 (mathematical) 模型，其中物理模型是建筑在系统之间某些相似性能上，利用有关的物理定律来控制模型，例如利用机械系统与电力系统的相似性，或电学与流体力学的相似性来构筑模型；数学模型则用数学符号和等式来表达该系统的特征。模型又可划分为静态的 (static) 与动态的 (dynamic)，静态模型仅反映系统处于平衡状态时的指标，动态模型则可反映由于系统行为随时间进展而引起的系统变更。

对于数学模型而言，按其求解方法，可采用解析方法 (analytical method) 或数值方法 (numerical method)。前者是用数学理论的演绎推理方法去求得模型的解；后者则应用一系列的计算机程序去一步步求解。模型可做如图 2 所示的分类 [6]。

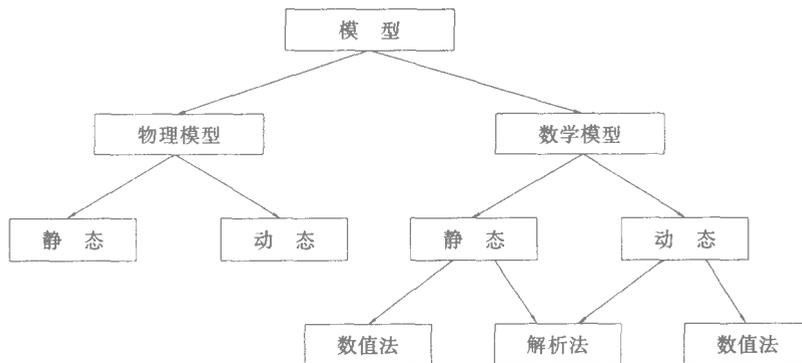


图 2 模型类型

按照系统中行为发生的特点，模型还可划分为确定型的 (deterministic) 与随机型的 (stochastic)。后者因有随机性变量参与，所得结果带有随机变动性。

另外，按照某一系统随周围环境做连续式渐变或间断式突变，系统又可划分为连续系统 (continuous system) 及离散系统 (discrete system)，在构筑模型及其解法上亦各具特点。

系统模型建立的步骤 因时因地而异 并无一定之规。图 3 所示模型建立过程可供参考。

通过系统分析 我们可以把一个极其复杂、变幻莫测的现场实际系统 抽象、提炼成一个简明扼要、反映系统实质的模型。我们又可以利用这种数学模型进行大量的实验研究工作。这种试验在现实系统中往往需要耗费大量人力物力，甚至是难以实现的；而利用模型，则可集中精力于重要环节、重要参数之间的关系上，设计出不同的方案进行运算与对比分析，并可对未来的发展做出预测，或为该类系统的改造提出科学依据。因此，模型又像一个实验室，供我们运筹于帷幄之中，决胜于千里之外。

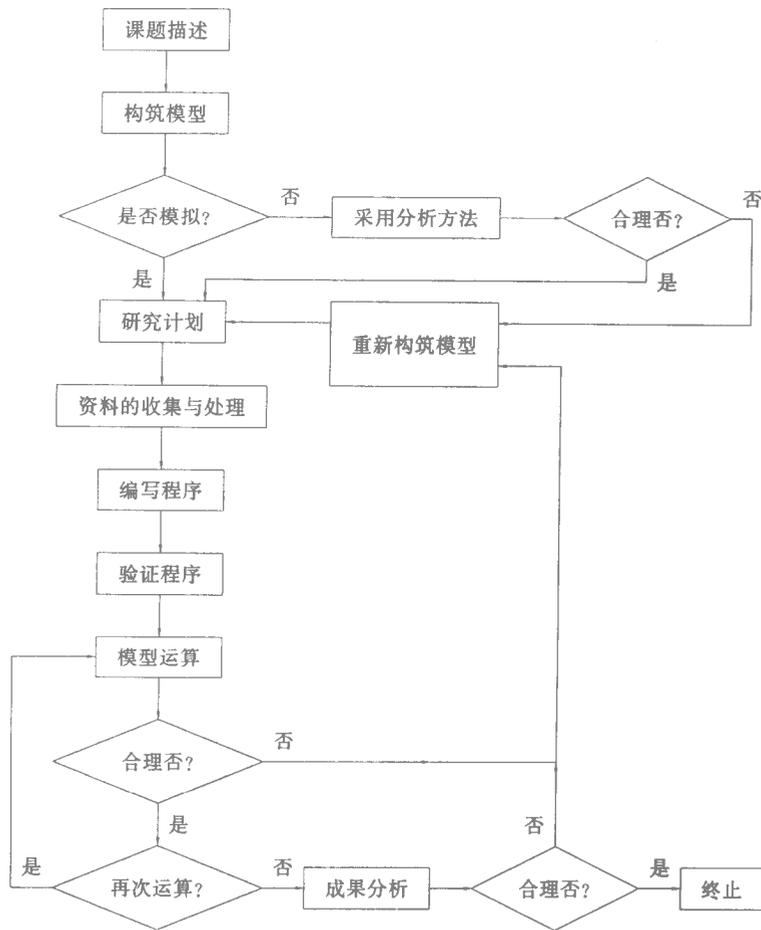


图3 系统模型建立过程

对于建立模型应有如下基本要求：

1. 客观性

永远不要忘记，模型是用来反映某一系统的本质并对其分析研究的工具，因此，从模型的建立、资料的收集到运算结果的检验，都要从该系统的客观实际出发，使模型做到出于母体，服务母体。

2. 准确性

设立正确的参数及表达式，以求尽可能确切反映系统内诸要素的特征及其相互联系，确切反映其随时间、地点、条件而发生的变化。

3. 简明性

客观系统往往是庞大复杂的，必须通过尽可能的简化与抽象，抓住系统中那些本质的、重要的因素 舍弃那些次要的、细枝末节的因素 以便建立起反映系统实质的模型。当然 这种简化是相对的，是针对具体课题的需要；过分简化将不能反映系统的实质。

4. 通用性

所建模型应尽可能适用于类似条件的系统。当然，所谓通用也是相对的，在一定范畴内通用的模型，在更广大的范畴中则未必适用。这里也不排斥在特定条件下建立专用模型的可行性。

四、采矿系统工程基础理论与技术^[5]

在当代采矿系统工程中采用较多的基础理论学科及有关技术，可归纳如下：

(1) 运筹学诸学科分支，常用者如下：

线性规划 (Linear Programming)；

整数规划 (Integer Programming)；

非线性规划 (Non-Linear Programming) ；

目标规划 (Goal Programming)；

动态规划 (Dynamic Programming)；

⑥ 图论及网络分析 (Graph Theory & Network Analysis)；

⑦ 排队论 (Queueing Theory)；

⑧ 存贮论 (Inventory Theory)；

⑨ 决策论 (Decision Theory)；

⑩ 对策论 (Game Theory)。

(2) 现代应用数学若干学科分支，往往与研究随机现象及模糊现象相关，如：

地质统计学 (Geostatistics) ；

可靠性理论 (Reliability Theory) ；

模糊数学 (Fuzzy Logic)；

灰色系统理论 (Grey System Theory)。

(3) 与计算机技术密切结合的交叉学科分支，如：

系统模拟 (System Simulation)；

系统动态学 (System Dynamics)；

人工智能学 (Artificial Intelligence)；

决策支持系统 (Decision Support System)；

⑤ 管理信息系统 (Management Information System)；

⑥ 计算机辅助设计 (Computer-aided Design)。

需要说明的是：

除上述各学科分支以外，有些更为基础性的应用数学或计算数学分支，如概率论与数理统计、随机过程、数值方法等 虽然它们应用亦十分广泛 但未一一列入。

正在发展形成的系统论、信息论与控制论是更为宏观的，有普遍指导意义的现代科学理论 亦未列入上述范围。

涉及上述各种基础理论与有关技术，有些已在有关先修课程中（如运筹学等）介绍，其余内容则因限于篇幅，本教材不能逐一阐述，仅结合各章节内容对有关的理论与方法做些必要的简单介绍。有兴趣的读者可参看有关的参考文献以求深解。

五、采矿系统工程发展现状

采矿系统工程应用范围已相当广泛，深入到采矿工程各个领域。

1. 矿床赋存条件的分析与评价

如矿床模型的建立，矿床资源条件评价等。

2. 矿山开采设计规划

如矿山开采方法、开采工艺及设备选型，矿井及露天矿开采境界的圈定，矿山生产能力及边界品位的优化，矿井及采区设计，露天矿长远设计，矿山短期生产计划，矿区发展规划等。

3. 矿山建设及项目评价

如新建或改扩建矿山投资项目的评价，矿井或露天矿建设过程的优化等。

4. 矿山生产工艺系统

如采矿工作面生产状况分析，矿山采运系统分析，露天矿卡车运输调度系统，矿井通风排水系统，矿山生产系统可靠性，矿山生产监控系统等。

5. 矿山压力及边坡稳定

如采场矿压及其控制，回采巷道布置与支护，露天矿边坡稳定分析等。

6. 其他方面

如爆破工程，疏干排水工程，以及矿区环境工程研究等，属近年开拓的研究领域。

随着采矿系统工程研究工作的不断深入与发展，有必要对有关研究领域及相应的研究方法做出总结。为此，按照国内外采矿系统工程迄今研究所取得的成果，以二维表格形式做出归纳与分析。^[5]

现将采矿系统工程基本研究内容（计 20 项）及相应的研究方法（计 20 种）列入表 2，分别以行、列方向表示其相互的关系。表中研究方法按其在特定领域中应用的主次程度分为 A、B、C 三级。

从表 2 可以看出不同研究内容目前所采用的相应研究方法及其主次程度。例如，矿床模型研究采用的方法有地质统计学、人工智能学、计算机辅助设计等，其中主要是地质统计学方法。

从表 2 也可以看出，某种理论或方法已应用的研究领域及内容。例如，线性规划方法常用于建设项目评价、矿井及采区优化设计、矿山采运系统分析、露天矿卡车调度系统及矿山短期生产计划等方面，其中后两个领域常作为主要手段来采用。

进一步分析表 2 可见：

目前国内外用系统工程方法研究采矿工程问题，已涉及相当广泛的领域，从矿床估值与评价，到采矿生产过程的优化管理与控制，都有可观的研究成果出现。

采矿系统工程所采用的研究方法多种多样。在众多优化理论与方法中，有些应用甚广，如系统模拟、决策论、图论及网络分析、动态规划及可靠性理论等，说明这些理论与方法对解决采矿问题具有较强的通用性与灵活性。例如，系统模拟方法是一种非严格优化方法，但由于它的灵活方便，适应采矿工程的特点，得到了广泛的应用。

表 2 中研究方法的主次程度，系根据目前使用情况大致排列的，随着各领域研究工作的不断发展，这种排序可能发生变化，新的理论与方法可能引入该领域，而且常常几种研究方法联合应用从而形成综合优化方法。

