

探 矿 优 化 設 計

—系统工程在煤矿开采中的应用—

徐永圻 编

中 国 矿 业 学 院

一九八五年一月

采 矿 优 化 设 计

(系统工程在煤矿开采中的应用)

目 录

第一章	矿井开采设计的原理及方法总论	1
第一节	矿井开采设计的方法	1
第二节	系统工程、最优化理论及其应用概况	9
第二章	回采工作面参数的最优化	17
第一节	数理统计及其应用	18
第二节	用经济数学模型确定回采工作面最优长度	36
第三节	用系统可靠性分析法确定回采 工作面最优长度	0 50
第四节	用系统可靠性分析法及数学分析法 相结合确定回采工作面最优长度	 55
第五节	用计算机模拟法确定回采工作面最优长度	58
第三章	采区设计最优化	80
第一节	用经济数学规划法 (非线性) 进行采区设计最优化	 100
第二节	用多目标决策法进行采区设计最优化	114
第三节	用决策树法选择采区最优方案	118
第四节	用线性规划法进行采区及工作面 产量的最优分配	 122
第五节	用图解法 (诺莫图) 选择最优布置方案	131

第四章	矿井设计最优化	165
第一节	矿井系统特征及技术经济评价	165
第二节	用规划法、多目标决策法 进行矿井设计最优化	171
第三节	用动态规划法进行矿井多水平 开采设计最优化	191
第四节	用对策论法进行在不确定条件下 矿井延深设计最优化	197
第五节	用系统可靠性分析法评价开拓方式	207
第六节	用统筹法确定矿井建设工期	215
第七节	用成本效益分析法确定经济 合理的矿井服务年限	222
第五章	单项工程的优化	233
第一节	用拉格朗日乘数法、线性规划法等 确定井巷最优断面	233
第二节	用计算机作图法设计甩车场线路	241
第三节	用计算机模拟法确定煤仓容量	253

第一章 矿井开采设计的原理及方法总论

矿井设计是综合性的设计，包括井田开拓、采区巷道布置和采煤方法，以及巷道掘进、矿井提升、运输、通风、排水、动力供应等各个生产环节，其中以井田的开采为中心。对于采矿专业来说，矿井开采设计主要应解决井田开采的技术方案和确定各项开采参数，如确定井田开拓方式、新水平开拓延深方案、采区巷道布置及生产系统，选择采煤方法，确定阶段垂高、采区走向长度、工作面长度等等。设计时应结合具体条件，正确地灵活地加以运用，使所选用的方案及参数在技术上是优越的，经济上是合理的。

所谓技术上是优越的，即选用的方案生产环节简单、可靠、安全，采用了适合于该矿具体条件的先进技术，有利于采用新技术工艺，有利于实现生产过程的机械化、综合机械化及自动化，有利于生产的集中化，有利于提高资源回收率，有利于加强生产技术管理。

衡量经济上合理的标准主要是，所选用的方案吨煤生产能力的基建投资少，特别是初期投资少，劳动生产率高，吨煤生产费用低，建设时间短，投资效果好，投资回收期短，利润高。

第一节 矿井开采设计的方法

由于矿井地质条件的多样化和技术条件的复杂性，并且所解决问题的性质、影响范围各不相同，研究和确定开采设计方案也就可采用不同的方法，通常采用的有方案比较法，统计分析法，技术标定法（标准定额法），数学分析法等。随现代科学技术的发展，特别是电

子计算机的应用，对于矿井这样一个复杂的系统工程，又发展了经济—数学规划法等。现对这些方法的实质和基本原则做简要的介绍。

一、方案比较法

方案比较法是我国目前确定开采设计方案时应用最广的方法。方案比较法的实质是对不同的具体的方案进行技术经济分析和对比。而后择优选用。

采用方案比较法确定开采设计方案时，首先据据矿井的自然和技术条件、针对所需解决的问题，拟定出若干个技术上可行的方案，经过分析比较、充实修改，使之逐渐趋于完善。在此基础上，按前述技术经济合理的准则，详细进行各方案的技术分析，计算各方案不相同的经济费用（如基本建设费、生产经营费等），进行经济比较，根据比较的结果，综合权衡各方案的利弊，选用较优越的方案。

由于煤矿开采的影响因素很多，需解决问题的性质和涉及的范围不尽相同，不同问题的方案，其应比较的内容和项目也不相同，没有一个统一的格式，应该通过对参加比较的方案进行具体的深入细致的分析，使最后的抉择较为合理。一般在进行方案比较时，应该注意以下问题。

(1) 拟定出先进合理的技术方案是进行方案比较的前提。因此，首先应深入细致地研究方案，务必使所比较的方案在技术上是优越的、完整的、切实可行的。在进行比较前，要仔细分析各方案的不同之处，详细编列比较项目，反复核对，避免遗漏。

(2) 进行经济比较时，应抓住重点。主要应比较重要项目的费用；对影响不大、差别很小的费用项目，可不进行比较；对费用相同的项目也不进行比较。应该注意，对哪些项目是重要的、或影响不大的或相同的，要进行具体的分析。在通常情况下，重要项目常包括井巷

工程费、地面建设费、煤的运输提升费，井巷维护费。对低瓦斯矿井的通风费、涌水量小的矿井的排水费常作为影响不大的项目不予计算。但如比较的方案是专门研究通风或排水的问题，那就必须进行比较了。关于某项费用是否相同的问题，也应具体分析。例如，两方案采用相同的井底车场及地面设施，当两方案井型相同时，可看做是相同的项目不予比较；但如两方案井型不同，则分摊于吨煤生产能力的投资即不相同，就不能认为是相同的项目，而必须进行全面的计算和比较。

(3) 正确选用各项原始计算数据。各项费用参数的选取应当适合比较方案的自然和技术条件。例如，采用的运输单价应与所采用的运输设备相适应，采用的巷道维护费单价应与该方案巷道的维护条件相适应，尽可能使方案比较的数字和结果符合客观实际。

(4) 应该把基本建设费用和生产经营费用分别列出。因为基本建设费用是国家以投资的形式集中拨出的，要考虑发挥投资效果、为国家增加利润的问题，故合理使用和节约国家投资对我国社会主义扩大再生产有重要意义；而生产经营费用则是逐年付出的，其对国民经济的影响相对较小。此外还应该把基本建设初期投资和后期投资分别列出，因为同样份额的资金在国家经济发展的不同时期和水平，其重要性当然是不同的。

(5) 不仅要看各方案总费用绝对值的大小，而且要看主要材料消耗量和设备占用量，特别是稀缺材料的消耗量和大型设备的占用量，这对物资供应条件较差的地区尤有现实意义，还应该比较各方案占用土地的多少和资源回收率的高低。

(6) 应该比较各方案的建设期限，因为缩短建设工期不仅可以提前为国家供应煤炭、上交利润，还可以节约施工费用，并使施工单位能更多地建设其它项目。

(7) 从经济上评定各方案的优劣，通常是分别对基建投资、初期投资、生产经营费用（有时只考虑前期费用）进行对比，综合考虑其影响。

在如何对比基本建设费和生产经营费的方法上，曾经采用过将二者简单相加作为各方案的总费用来进行对比。这种做法没有考虑充分发挥基建投资效果，缩小了占用基建投资的意义，早已不再采用，也曾试用过投资回收期（返本期）法，即以吨煤生产费用及吨煤投资年返本额总和最低为准则来对比判断方案（即以 $C_i + E \cdot K_i$ 最小作为衡量 i 个方案经济上优劣的依据， C_i 为某方案的吨煤生产费用， K_i 为该方案的吨煤投资， E 为部门额定投资效果系数，即投资返本期的倒数，亦即 $E = 1/T$ ， T 为投资返本期），在实际设计中也未得到推广，故这一问题尚有待于进一步研究。

(8) 评定各方案的优劣时，要全面考虑各种因素的影响。如果各方案经济上相差不大，就要根据技术上的优越性、初期投资的大小、施工的难易、建设期的长短、材料设备供应条件等因素，综合考虑，合理选定。

方案比较法从具体的实际情况出发，即考虑各种因素的影响，通过方案的计算，能得出所需的各项技术经济指标，故广泛用于解决井田开采的主要技术方案问题，但其计算工作量很大，当所解决的问题涉及的范围很广时，工作量就更繁重。为简化计算，在进行大的方案全面比较之前，可先进行类型相同方案内的局部问题（小方案）的比较，得出该类型方案中较合理的方案，而后进行不同类型方案的比较。

二、统计分析法

统计分析法是根据现有矿井生产建设的实际情况，针对需解决的问题进行调查统计，借以分析某些参数之间的关系。某些参数的平均

合理值或可取值的范围。例如，统计分析一定条件下的工作面长度与其技术经济指标之间的关系，以寻求合理的工作面长度；统计分析矿井设计的与实际的水平服务年限，以提供可选用的储量备用系数；调查统计一定条件下的巷道维护费用，以确定相似条件下的费用参数；统计分析现有矿井的平均先进的技术经济指标，作为设计相类似矿井时参考数据。等等。

统计分析法是建立在数理统计的基础上的。由于采矿问题的复杂性，要得到大量同类的可比的统计资料是比较困难的，因此对于条件多样、影响因素复杂的技术方案问题，不宜采用这种方法。但作为一种辅助方法，从现有生产矿井的经验教训中，总结某些开采设计所需的参数，则还是可行的必要的。由于统计数据是在原有的生产技术条件下取得的，当采用新技术新工艺时，原有数据即不能适应新的情况，故应重新进行调查研究，这是应用统计分析法时必须注意的。

三、标准定额法

标准定额法是以规程、规范、规定的形式对开采设计中的某些技术条件或参数值作出具体规定，而后根据此规定条件以确定技术方案内的其它参数值。例如，在井田范围和矿井生产能力一定的条件下，根据水平服务年限的规定，可计算矿井必需的水平储量及阶段高度；规定了矿井的工作制度（年工作日数、日工作小时数、生产班数等），据此计算各生产环节的能力；规定了巷道内的允许风速，据以求巷道的最小断面等等。在一些具体矿井的条件下，受原有技术条件的限制，也可看做是标准定额法的应用。例如，不允许更换矿井提升设备时，按设备允许能力确定井筒延深的深度；按绞车的提升能力和容绳量确定上山或下山的长度等。

标准定额法的依据是一定条件下的技术可能性、技术安全性、经

济合理性或生产技术管理的需要，具体表现为“定额值”（或约束条件），而“定额”的规定要根据专门的研究，从这个意义上说，它不是一个独立的方法，但用于解决某些实际设计问题还是比较方便的。

四、数学分析法

数学分析法通常是以吨煤费用最低为准则，列出吨煤费用与欲求参数之间的函数关系，用求函数极值的方法求解开采设计方案中某些参数的有利值。

前所述，矿井开采设计的某些参数，如阶段高度，采区走向长度、井田走向长度、井型等，常受两类互相矛盾的因素的影响，由于这些因素的作用，当变动某一参数时，一部分费用随其增减。另一部分费用则随其增减而增减，两部分费用有增有减，此增彼减，总费用也随之变化，当该参数为某一数值时，可使总费用达到最低。根据这一原理，可将待求的参数作为变数 x ，计算与其有关的吨煤基建费和生产费并将吨煤总费用整理成函数式 $f(x)$ ，求函数式 $f(x)$ 的极小值，使 $f(x)$ 最小的 x_0 值及其邻近范围，就是经济上有利的参数值，本书中关于回采工作面长度的计算即是此法应用的一例。

数学分析法是以一定的技术方案为前提，所拟定的技术方案不同，其费用项目及编列的函数方程也就不同，故数学分析法不能解决不同技术方案的对比，而只用以研究某一方案的合理参数值。由于采矿问题的复杂性，应用数学分析法时，要将某些条件予以简化，以适应编列函数方程的需要（如将煤层储量视作均匀分布，费用参数视为定值等）。并且这种方法不能全面考虑技术、安全和管理等因素，故只能把由数学分析法求得的参数值看做是相当大的合理值范围，还必须结合其它因素综合考虑。数学分析法以数学形式反映各因素在量上的关系是很简明的，有助于我们认识各因素的相互消长关系及其变化趋势，

故可视为一种研究方法。

五、经济—数学规划法

如前所述，原有的开采设计方法都各有优缺点，有在其基础上发展更完善的设计方法的需要，而现代应用数学的发展，尤其是电子计算技术的发展，又为发展新的设计方法提供了有效的手段。近年来，国外逐步发展了经济数学规划法，应用电子计算机解决矿井开采设计的问题。

矿井是复杂的煤炭生产工艺系统，也就是一个复杂的工程系统。它由矿井开拓、准备、回采、巷道掘进与维护、井下运输与提升、矿井通风、动力供应、地面生产工艺等多个分系统组成。每个分系统又各有不同的技术方案（定性参数）和具体参数（数量参数）。各分系统之间、分系统内的各参数之间都是互相联系、相互制约的。某一分系统或其某一参数发生变化，都可能影响到整个系统，从而使设计矿井的技术经济指标发生变化。因此，应把矿井作为一个复杂的系统来研究，不仅要使各分系统自身合理化，而且要使它们组成最优的矿井系统，使整个系统达到最优化，于是可运用规划论来解决这一问题。对矿井设计来说，根据拟定的方案、按照设计的要求（如吨煤费用最低、劳动生产率最高等）来编列函数方程，就构成了规划论中的所谓目标函数；同时，设计方案的某些技术原则和参数必须满足一定的技术条件和“定额”的规定。若将其用数学式来描述，便形成了规划论中的所谓约束条件，目标函数和约束条件一起，就构成了矿井的经济—数学模型。对于一个矿井来说，目标函数和多数约束条件均为非线性函数，因此矿井设计为一非线性规划问题，问题就归结为求解多元目标函数在一定约束条件下的最大值（如劳动生产率最高）或最小值（如吨煤费用最低），从而求出最佳配合的各参数值。

采用经济—数学规划法进行矿井开采设计的主要步骤和方法可概括如下。

(1) 深入研究井田的地质及开采技术条件，在此基础上拟定各分系统技术上可行的各种方法，如开拓方式，采区巷道布置，采煤方法，运输、提升、通风系统等。

(2) 在深入研究各分系统诸方案的基础上，按技术合理的要求编制各分系统的组合方式，即提出若干个全矿井的工艺系统方案，并绘制出各方案的草图。

(3) 分别对每个矿井工艺系统方案进行参数优化和技术经济计算，建立各矿井工艺系统方案的经济数学模型。

首先应确定最优化的经济准则和欲求的参数，并需获得与欲求参数有关的各项费用参数（如与所求参数有关的基建费、生产经营费等，应用专门的研究确定）。然后建立每一矿井工艺系统的各项欲求参数与选定的最优经济准则之间的数学关系（即目标函数），确定各欲求参数的变动范围（即约束条件），即建立与各方案相对应的经济数学模型。

六、其他优化设计方法

最优化理论、系统工程的主要理论基础是运筹学。因此，除了规划论以外，尚有一些其他数学分支，下面将一一加以介绍。

第二节 系统工程、最优化理论 及其应用概况

一、系统工程简介

系统工程 (Systems Engineering) 是六十年代开始发展起来的一门新兴学科。有的认为早在第二次世界大战期间,英国为提高雷达操纵的空防系统效率,成立的以著名物理学家勃莱凯特为首的由物理、数学家组成跨学科研究小组所作的工作便是系统工程的开端。而系统工程的提出最早的则是 1957 年美国密执安大学的 H · H Goode 和 R · E · Machol 所著的《系统工程学》一书。真正的引人注目和受到重视,并广泛地被应用,却是在 1969 年 7 月 21 日美国发射的“阿波罗”飞船,载人踏上月球表面的巨大成功之后。因为实现这项计划用了 8 年时间,投资 240 亿美元,有 42 万科技人员参加,遍布全国的 2 万多个工厂分工承制 700 多万个零件,它的总指挥所依靠的是系统工程这门科学。

所以国外对系统工程学的发展通常分为三个时期,1956 年以前为萌芽时期,1957 ~ 1964 年为发展时期;1965 ~ 1980 年为初步成熟时期。

1978 年我国钱学森讲:“系统工程学是组织管理系统的规划、研究、制造、试验和使用的科学方法,是一种对所有系统都具有普遍意义的科学方法。”

综合一下可以认为,系统工程是以研制大系统为对象的一门跨学科的边缘科学。它是把自然科学和社会科学中的某些思想、理论、方法、策略和手段等根据总体协调的需要,有机地联系起来,把人们的生产、科研或经济活动有效地组织起来,应用数学方法和电子计算机

等工具，对系统的构成要素、组织结构、信息交换和反馈控制等功能进行分析、设计、制造和服务，从而达到最优设计、最优控制和最优管理的目标，以便最充分地发挥人力、物力的潜力，通过各种组织管理技术，使局部和整体之间的关系协调配合，以实现系统的综合最优化。

对系统的分析、综合、模拟、最优化等常称为狭义的系统工程。

为了合理地进行系统的研制、设计、运用等工作所采用的思想、程序、组织、方法等内容称为广义的系统工程。

系统工程是一门工程学，但与一般工程学性质不同，它的研究对象不限于某个领域的特定的工程物质，任何一种物质系统都能成为它的研究对象。它处理的对象是信息，国外有人称之为“软科学”，但在整个工程学体系中却占据非常重要的地位。

系统工程的思考与过去的工程设想相比，可以说具有完全不同的思想。因为过去的工程学设想是想通过重视各个单元的方法来确保整个系统性能。与此相反，系统工程则往往是首先断定总体的功能和需要，然后决定各个单元所必需的功能。如果说过去的工程学是用单元的良好程度来保证全体的良好状态的话，那么系统工程学的考虑方法是利用各单元间的巧妙联系和各子系统间的巧妙联系，这比提高每个单元的良好程度更能提高整个系统的水平。

因此，系统工程的应用范围十分广阔，现在已经应用的有自然科学的系统（宇宙、资源、农业…），人体和医疗系统，工业交通系统，以及社会系统。美国40年代研制原子弹的“曼哈顿计划”，50年代的“北极星导弹潜艇”，60年代的“阿波罗登月计划”，都被认为是运用系统工程所取得的成效。

系统工程的主要理论基础是运筹学，还有一些其他数学分支。具

体的常用的有如下一些：

概率论和数理统计

线性规划、非线性规划、动态规划

排队论（随机服务理论）

对策论、决策论

图论、网络分析

存贮论

统筹方法

系统可靠性

控制论

信息论等

此外，优化原理还有计算机模拟

综合一下也可以说：系统工程学就是应用系统的观点，信息的理论，控制的基础，现代数学的方法和电子计算机的技术，溶合渗透而成的一门综合性的管理工程技术。系统工程学是解决系统的最优设计、最优控制和最优管理的一门科学。

二、系统工程在煤矿开采中应用的概况

煤矿是一个由许多子(分)系统构成的复杂系统，煤矿的地质条件复杂多变，生产环节多，设备规格、匹配和数量比例关系复杂，在时间和空间上经常变动，具有随机性的特点。煤矿生产不仅受地理位置、气候交通、电源、环保、资金等因素的影响，而且还受国民经济方面其他部门之间关系的影响，矿井一方面要维持自身的连续生产，一方面还要进行新矿井的建设。因此要发展煤炭工业，必须从全局出发利用系统工程和电子计算机技术，研究矿山地质资源，进行矿山综合规划和优化设计，综合利用资源，合理组织煤矿的建设、生产和运销，对

煤矿生产过程实行有效地控制，改善煤矿的环保和安全条件，提高煤矿生产的可靠性和经济效益。

系统工程在煤矿中的应用比其他工业部门落后，而在煤矿地下开采中的应用比金属矿和露天开采还要晚一些迟一些。国外大致从六十年代开始，我国则是近几年才开始起步。

国外系统工程在煤矿开采中的应用情况，以苏美两国为例。大体上有两种类型（或称途径）。

苏联在研究和解决煤矿开采问题中，过去采用的传统方法是方案比较法和数学分析法，六十年代开始采用系统工程学的观点方法和电子计算机技术，主要是在传统方法的基础上发展成为综合优化的方法，对有关问题编制经济数学模型，考虑到多方案多参数的综合影响，从中选择最优方案和参数。

其特点是以吨煤费用（或折算费用）最低，或效率最高，或几个指标最优作为目标函数，以技术可能性作为约束条件，用电子计算机求解。

应用的具体问题有：

- 1、采煤方法中的工艺和参数选择，例如综采设备选型，合理工作面长度的确定等；
- 2、准备方式选择，例如阶段、盘区、分区准备方式和其中不同方案的选择，无煤柱开采方法的选择等；
- 3、巷道网断面优化和通风系统选择；
- 4、井巷施工工期的网络分析和计划管理；
- 5、地面生产系统和布置的优化；
- 6、矿井优化设计，包括新水平开拓和准备的优化设计。

其中在矿井设计优化方面所作的工作最多，系统也最大。 1964

年来已经编制了单一煤层矿井，分区开拓矿井，水采矿井等几十个优化设计的经济数学模型，并在实际矿井设计，特别是典型的矿井设计中得到应用。而且将要建立煤矿企业自动化设计系统，计划编制60个能自动输出成果的实用程序，用以解决100多个设计问题。

美国（包括美州国家）采用系统工程解决采矿问题也是从六十年开始，其中大量的模型和程序是用于金属矿和露天矿。用以研究和解决煤矿地下开采最早的是宾西法尼亚州州立大学的C·B·曼纽拉和R·V·罗迈尼，他们所编制的地下开采运输系统模拟模型包括有十个子系统。子系统的名称为外部环境，内部环境，地质储量，采矿方法，岩石控制，暴露时间发生器，成品控制，物料运输，支护，其他（安全、卫生）。这样的模型是有一定代表性的，它反映了美国系统工程在煤矿中应用的基本状况。

我国煤炭工业部门对系统工程应用的研究起步较晚，七十年代末才开始。1980年煤炭部委托中国矿业学院研究生部举办了“系统工程与运筹学”短训班，一些科技人员还参加了外系统举办的系统工程短训班，这就为系统工程在煤矿中应用，作了人才和理论上的初步准备；近年来，科研、设计、院校和生产部门又装备了更多的电子计算机，为开展这方面的工作，提供了必要的物质手段；煤炭部领导十分重视系统工程在煤矿生产建设中的应用，1982年曾委托中国科协科技咨询总公司顾问华罗庚教授，聘请优选法统筹法、煤炭、电机、铁道、航海、通信、能源等7个学会的20多名科技人员，组成专家考察论证组，对两淮煤炭开发方案进行了论证，取得了良好效果。1983年年初煤炭部又成立了“科学管理方法应用领导小组”，使系统工程在煤矿应用的研究正在兴起和发展。

近年来，系统工程在煤矿生产建设中应用的研究一直延续进展，

近年来，系统工程在煤矿生产建设中应用的研究一直延续进展，愈来愈和生产实际相结合，参加研究的人员也愈来愈广泛。1980年煤炭学会第一届开采专业学术会议上，系统工程应用方面的论文只有三篇。1983年9月煤炭学会开采专业委员会与江苏省煤炭学会联合召开的“系统工程在煤矿开采中应用”的专题学术讨论会上就提出38篇论文。同年在泰安召开的“电子计算机及系统工程在煤矿中应用”学术会议则交流了110份论文。其中属于系统工程在煤矿中应用的约有50篇。

三、发展趋势和存在问题

不论从当前世界的技术革命发展趋势来看，从其他工业部门发展的实际情况来看，从国内外煤炭工业应用系统工程的进展来看，都十分清楚地表明系统工程在我国煤炭工业中包括煤矿开采中的应用，必然以较快的速度发展，应用的范围将不断扩大，解决实际问题的能力将不断加强，将成为煤矿现代化建设的一项重要内容和组成部分。

系统工程在煤矿生产建设中的应用将会出现一些重要的转变，即从少数几个技术方案的比选，到多方案、多目标的优化设计；从技术方案的定性分析，到定性问题的定量解决；从按理想的简化的确定条件决策，到考虑复杂多变随机因素的影响；从凭借个人经验和水平来领导生产，到实行科学管理与最优控制；从单纯依靠人工计算分析，到充分利用现代化手段（电子计算机）。实现这些转变是加强煤矿生产建设科学管理的需要，也是煤炭工业走新路子、开创新局面的迫切需要。

概括国外煤炭工业应用系统工程的情况，从苏联曾走过的和将要走的道路来看，大致有以下几个特点，从中可见它的发展过程和趋势。

1、由简单条件开始向复杂条件发展