

OPTIMAL DESIGN AND SYSTEM ENGINEERING

# 优化设计系统工程

杨开泰 万书钧 编著  
冯 斌 张辑纯



湖南大学出版社

# 前 言

近年来系统工程这门科学技术在各个部门得到广泛的应用，特别是工程的优化设计为广大工程师们所重视。以往的设计是凭经验设计有限个方案，从中选取较好的方案进行施工。众所周知，有限个方案很难接近于最佳方案，而借助于电子计算机进行优化设计，则可迅速地确定其最佳方案，从而大大地节省了时间，提高工效，提高设计质量，其经济效益是显著的。它已深深地吸引了众多的工程师，经济学者和管理人员，引起他们极大的兴趣，并逐步应用于工程实践中。

我们编写本书的目的在于：向有关的科技人员、经济学者和管理干部介绍优化设计系统工程的理论，并介绍一些实用的方法和有关的实例，作为各自工作中的参考，也可作为一些大专院校的研究生、高年级学生学习之用。本书的内容有优化设计系统工程的理论、方法、实用模型与工程实例。其中有一部份是作者为解决工程实际问题，结合生产进行课题研究的科研成果。如（1）混凝土重力坝的优化设计；（2）大、中型水电工程砂、砾石料场的优化设计；（3）工程网络的优化设计等。这些研究成果已分别在相应的工程中取得了经济效益。

为了便于推广应用，对本书内容的系统性、通用性和实用性作了认真的推敲和严谨的安排，理论的阐述力求深入浅出，使读者阅读本书后能掌握优化设计系统工程的某些方法，并应用于实践中，取得经济效益，这就是要达到的目的。

本书的编写和出版得到了湖南大学周叔子教授、国防科技大学蒋增荣教授、湖南大学出版社的领导和编辑同志给予支持和帮助。谨此一并深表感谢之忱。

由于作者水平所限，缺点和错误在所难免，敬请有关专家，学者和广大科技人员不吝指教。

编著者

一九八九年二月二十日于长沙

# 目 录

## 前 言

|                                |        |
|--------------------------------|--------|
| <b>第一章 概论</b> .....            | ( 1 )  |
| 第一节 优化设计的概述及其经济效益.....         | ( 1 )  |
| 第二节 优化设计的基本概念.....             | ( 2 )  |
| 第三节 系统工程概述.....                | ( 5 )  |
| 第四节 系统工程的研究、应用与推广.....         | ( 7 )  |
| <b>第二章 线性规划</b> .....          | ( 13 ) |
| 第一节 线性规划问题和数学模型的建立.....        | ( 13 ) |
| 第二节 用图解法求解线性规划问题.....          | ( 15 ) |
| 第三节 用消去法解两个变量的线性规划问题.....      | ( 16 ) |
| 第四节 单纯形法.....                  | ( 19 ) |
| 第五节 单纯形法电算程序.....              | ( 23 ) |
| 第六节 隐枚举法.....                  | ( 26 ) |
| 第七节 指派问题.....                  | ( 32 ) |
| 第八节 线性规划应用实例.....              | ( 41 ) |
| <b>第三章 非线性规划</b> .....         | ( 49 ) |
| 第一节 概述.....                    | ( 49 ) |
| 第二节 无约束的非线性规划优化方法.....         | ( 51 ) |
| 第三节 约束优化设计的优化方法.....           | ( 62 ) |
| 第四节 优化设计实例.....                | ( 70 ) |
| <b>第四章 网络规划在工程计划中的应用</b> ..... | (101)  |
| 第一节 网络计划图.....                 | (101)  |
| 第二节 网络图的编制.....                | (104)  |
| 第三节 网络的时间计算与关键路线.....          | (104)  |
| 第四节 计划方案的优化.....               | (111)  |
| 第五节 工程网络技术优化软件及其应用.....        | (130)  |
| <b>第五章 战略分析与投入产出技术</b> .....   | (145)  |
| 第一节 战略分析.....                  | (145)  |
| 第二节 投入产出技术.....                | (151)  |
| <b>第六章 动态规划</b> .....          | (185)  |
| 第一节 动态规划的基本原理与方法.....          | (185)  |
| 第二节 增量动态规划.....                | (188)  |

# 第一章 概 论

## 第一节 优化设计的概况及其经济效益

随着科学技术的发展以及电子计算机应用日益普遍,工程优化设计已逐步取得了经济效益,目前已成为一门新的工程学科,近十年来已在建筑工程、水电工程、化学工程、机械设计、结构优化设计等得到应用,在不久的将来,优化设计将不断完善而趋于成熟。

工程优化设计是数学规划方法与电子计算机技术的结合,应用于工程实践。数学规划方法是第二次世界大战期间发展起来的一门新的数学分支,它包括线性规划,非线性规划,动态规划,网络优化等,是工程上解决优化设计的方法。在工农业生产中为取得产品的高产、优质、低消耗起着重要的作用,最优化方法亦在工程优化中得到应用,并逐渐形成优化设计方法。在我国由于客观条件的各种原因,目前优化设计还推广的不够,过去,一些数学家做了不少的工作,1956年开始对运筹学的应用和研究,数学工作者与科研、设计、生产部门紧密配合,运用线性规划,在交通运输物资调运、基建工程和国防工业等方面取得了很大的成绩,从而推动了这门科学在理论和应用方面得到发展。华罗庚教授提出的统筹法和优选法,在生产组织和管理中进行实践,推广和应用,如关键路线法(CPM)和计划协调技术(PERT)在油田、林业战线、铁路系统以及农业生产中,推广运用取得良好的效果。计划协调技术(PERT)应用于国防尖端项目的研制,借助于电子计算机应用于计划,为我国大型武器系统的研制,管理推广应用PERT积累了经验。

从近十年来优化的发展情况来看,由于优化设计能在很短的时间内由电子计算机获得最优方案,避免了传统设计的多方案比较,大大地节省了人力、物力,提高工效,节省时间,提高设计质量。在传统的设计中,凭经验进行有限个方案的设计,虽然方案不多,但工作量是相当大的,而且这些方案也难以接近最优方案,于是在工程设计上探求最优设计,是工程设计的有效方法。所谓设计,就是在一定条件下,力求达到一个理想的目标,而优化设计则是综合各方面的因素、指标、约束等产生一个最优的设计方案,这是一种复杂的综合性的分析,优化设计本质上就是一个求函数的极值问题的数值方法和试验最优化方法。工程设计问题用数学模型描述,在计算机上求得极值,所得工程设计问题的最优方案,即为工程优化设计。这是专业理论、数学规划与计算机技术的结合。优化理论的研究和计算机技术的迅速发展为优化设计开拓了广阔的前景。

优化设计与传统的多方案比较,其经济效益很难作出准确的估价,从过来的一些工程优化实例来看,一般来讲能节省工程投资2~10%左右,收到立竿见影的效果。这种无需增加新设备而能取得显著经济效益的现代化设计方法为各个部门各级领导所重视,也是广大科技人员,工程技术人员所感兴趣的。近年来优化设计迅速地发展,它的应用也愈来愈广,但是对于优化设计的标准化、通用化、系列化以及计算机的辅助设计等有待于工程设计人员,数学工作者、计算机软件研制人员共同努力解决。目前,优化设计在国内尚未被广大工程技术人员、科技工作者、设计人员所普遍应用,其主要原因是



同时掌握优化理论和计算机应用技术的工程设计专业人才还不多,对各种专业的工程技术队伍对新近发展的优化方法及电算软件技术还有一个熟悉的过程,这是推广优化设计有待于尽快解决的问题,以便于将这种现代化的优化设计方法广泛地应用于工程实践中,提高设计质量,进一步取得经济效益。

## 第二节 优化设计的基本概念

优化设计亦称为最佳设计,或称为设计最优化,它是根据给定的设计要求和客观所具有的工程技术条件下,应用专业理论和优化方法,从满足所需要的给定的要求而得到可行方案中,按提出的规定指标(目标函数)由电子计算机自动算出最优的设计方案。

### 一、优化设计与传统的设计相比较,有以下几个特点

#### 1、具有明显的经济效益

传统的设计是以达到规定的设计要求为止,它只是一个可行的方案,或从几个可行方案中选出一个较好的方案,它不是最经济的最佳方案。而优化设计是以达到最优指标为止,它是许多可行方案中的最优方案,是最经济的方案,具有明显的经济效益。

#### 2、设计的计算工具采用电子计算机,提高了计算的精度。

优化设计必须由电子计算机来完成庞大的计算工作量,因此可以采用较精确的数学模型,以达到提高精度的目的,而且分析的变量和范围还可以根据需要给予扩大。计算速度快,设计周期短。

#### 3、设计的方法是优化的

优化设计的方案调整,是电子计算机程序按照优化的方法逐步沿着改善的方向推进,直至达到极值点,即最优方案。这种由电子计算机进行选优,速度快,准确可靠,大大缩短了设计的周期、提高设计质量、节省人力和物力。

例如,水电站的拦河大坝设计,需要对设计方案做各种试验(光弹模型试验、石膏模型试验等)来验证设计是否可行,而做试验则需花费较多的人力和物力,时间又冗长。而采用电子计算机设计,既快又经济,可把理论分析做得较为深入,从中得出最终的方案,则用试验验证。这样可克服试验的盲目性和减少试验的次数,从而节省大量的资金。所以逐步改进设计的程序,以理论分析为主,而试验工作则是少量的验证工作。充分发挥电子计算机计算费用省、速度快的特点,这是今后发展的方向。

## 二、优化设计的主要步骤

#### 1、拟定初始方案

每一组设计变量决定一个设计方案,首先由设计人员凭以往的设计经验、初步拟定一个初始方案,也就是确定第一个初始方案所对应的设计变量。

#### 2、建立符合设计要求的数学模型

分析模型是对工程设计问题用数学形式来描述,它是提供系统分析和评比阶段所需要的数据。系统分析(方案分析)是具有专业性的,例如结构分析要求出应力、位移和稳定等,只要系统是确定的,那么分析的结果也就确定了,所以数学模型的建立是优化设计

的重要组成部分。

### 3、评比分析

评比分析就是对目标值进行分析，或方案评价。是根据数学模型分析的结果，确定设计变量所组成的设计方案与最优设计方案接近的程度。如果已达到最优的设计方案，则输出最优设计方案。否则，继续进行调优。

### 4、方案调优

方案调优是根据以上分析的结果，自动调整设计变量的值，形成新的探索方案，朝着改善的方向推进。优化方法对各种工程设计的方案调优都能适用，但是不同的方法对不同的具体问题，则方案调优的效果是不同的。

数学模型的建立，加上评比分析和方案调优称之为综合模型。它用于设计问题时，则选择最优的设计方案。

### 5、监视分析

通过计算机的显示设备和打印设备，可观察到计算机的优化设计过程，如果发现有异常情况，则可适当地调整相应的设计变量、使计算机按照设计者的意图继续进行正常的工作。

### 6、输出优化方案

由计算机完成的优化设计方案，其数据是比较可观的，如果用人工去分类、整理、图表化等，则工作量是繁重的，因此这部份的成果整理工作，需要由计算机把所需要的数据自动分类、并绘制成曲线，或在打印机上打印出图表。这样，设计人员就可直接使用。

## 三、设计变量的确定

在设计过程中，某些量的数值有待选择，这样的量称为设计变量，也称为结构参数或结构变量等。确定设计变量须注意以下几点：

### 1、确定正交的设计变量

在 $n$ 维欧氏空间中，各设计变量必须是正交的。应用最优化方法进行设计时，设计变量之间是相互独立的。如果设计变量之间存在依存关系的交互作用，将给优化设计的寻优带来困难。

### 2、选择决定性的变量作为设计变量

对目标函数影响较大的变量，确定为设计变量，这样目标函数将有明显的极值，提高计算的速度。根据设计上的要求，分析各设计变量的主次，把设计变量对目标函数影响的重要程度依次排列，首先选择最重要的变量进行寻优，作为全空间寻优的起始过程。或者尽量减少变量的数目，删去对目标函数影响较小的变量，使优化设计问题简单化。

### 3、确定设计变量的标准值

在设计中，各设计变量的数量级可能相差比较大，这样在调优过程中若用真实值，则计算误差对数量级小的变量影响很大，从而造成失真。所以，采用标准值，对同一的寻优步长，也可保证相同的计算精度。设计变量的标准值就是将设计变量的真实值化为 $0 \sim 1$ 之间的数值，作为设计变量的相对位置。这实质上就是坐标变换的问题。

### 4、分析设计变量的取值范围

在优化计算过程中,若设计变量在大范围内探索,则势必增加计算的工作量。为了加快优化速度,在优化之前就对变量确定其取值的范围,这可根据设计变量的边界条件,或设计人员的经验,确定最优值可能出现的范围。对于把握性比较大的,设计变量的取值范围可以取得小一些。对于把握不大的,其变化区间可取得大一些。

设计变量的变化区间确定之后,则以变化区间上下限为边界形成了一个多维的封闭空间。此空间即是设计方案的变量空间,也就是变量探索空间。变量空间内的任意一点,就是一个设计方案。

#### 四、设计约束

一个设计方案,就是设计变量的一组值,对于设计问题来说,如果它满足所有给定的要求,则称为可行设计。否则为不可行设计。一个可行设计必须满足某些设计限制,这些限制称为约束。约束限制可分为几种类型,设计外形的约束就称为几何约束,结构的强度限制有应力约束,稳定约束等。

在工程设计中,要把约束条件用设计变量写成表达式,这往往是难以办到的。例如应力约束中的应力值,若要通过有限元法的复杂计算得来的,这种约束条件是不可能写成设计变量的显式表达式。但约束函数是设计变量的一个可计算的函数。

约束是对工程设计的具体数量要求,在优化设计中必须予以满足。建立约束条件必须是设计本身所提出的限制条件,例如具体工程的技术水平限制条件,人力、物力、资金、设备等条件的限制等。约束条件对设计变量的变化形成一个封闭的约束空间,在封闭的约束空间内或边界上,均满足约束条件。因此,约束是设计方案是否可行的标准。

约束条件用数学表达式来表示,可分为等式约束和不等式约束,等式约束则要求系统的指标正好等于给定的数值,不等式约束则要求系统的指标必须大于等于或小于等于指定值。

#### 五、目标函数的建立

在设计的可行方案中,有一些方案比另一些方案好一些,这种优劣的衡量方法,可以用我们所追求的目标来描述,这种目标表示成设计变量的函数,并优化这种函数,以得到最优的设计,这种使设计获得最优的函数称为目标函数。

目标函数一般可直接写成数学表达式,强调它对设计变量的依赖性,通常总是假定使目标函数为最小值,这并不丧失普遍性,因为目标函数的最小值变个符号即是最大值。选择目标函数是优化设计过程中最重要的决策之一。在某些场合下,目标函数可能是明显的,例如,对于战士来说,轻的背包显然比重的要好。对于大型工程的复杂系统,按某些特性优化各个部件能使系统的最终用途为最优。例如要设计一架飞机,总是希望在各种性能和技术指标方面都能令人满意。如飞机的载重量大、航程长、使用经济、价格便宜、跑道长度合理等等。一架好的飞机需要由轻部件组成,采用轻的零部件,促使了各个技术指标的实现,而不致于妨碍其中任何一项。在工程实践中,设计往往存在着多种指标,即多目标优化问题,对于这类问题,应借助于多目标数学规划理论予以解决。

目标函数的选取应与所选的设计变量有关，并能写成直接或间接的表达式，使之能作为设计优劣的评价指标。对于优化设计问题，其目标面的特征，一般并不事先知道，例如目标面可能是单峰，也可能是多峰，有主峰和亚峰。于是对优化的结果尚需进行判断分析，进行鉴定，看它是否为全局最优，为主峰顶点。

## 六、优化的类型与标准

优化的类型大致可分为准则法和数学规划法两大类。准则法是一种具有物理意义的最优准则方法，例如，满应力设计是使结构中各个部件达到满载，达到允许应力，若某一部件的应力超过允许应力时，则该部件的断面尺寸增大。若某部件的应力低于允许应力，则该部件的断面尺寸减少，直至结构达到满应力，这就是满应力设计，它使结构的每一部件都能充分发挥其材料强度，即结构发生破坏时，是每个部件同时破坏，于是满应力设计在结构设计中得到广泛的应用。

数学规划法的最优化问题有如下情形，一是求函数的极值和求泛函的极值。当目标函数有明显的表达式，则用变分法或微分法等解析法求解。如果目标函数没有明显的表达式，则用数学规划法求目标函数的数值，这种直接求优化设计的最优解是对客观最优值逐步渐近的过程，使之满足工程设计的要求。所以，结束优选的标准，拟按以下几种情况来控制：①计算优选迭代的次数为控制条件；②前后两次目标函数值之差小于某一允许值为控制条件；③探索的步长小于指定的精度为控制条件；④由计算机显示或打印优化过程的情况，供设计人员判断是否停机，停止优选。

## 第三节 系统工程概述

系统是由相互关联的多个元素集合而成的，并具有特定功能的有机整体，例如宇宙中的太阳系就可以称为系统，企业的一套制度也可以是一个系统。

系统的概念来源于社会生产实践，人类在生产活动中都在同自然系统打交道，随着现代科学技术的发展，促进了系统思想方法的发展，使系统思想方法有着定量的分析，成熟的数学理论能够定量分析系统各组成部分的联系，电子计算机为系统思想方法的量化提供了有力的计算工具。系统是有组织的，所有各部分都是为了共同的目的而形成的有机整体，系统的结构很复杂，一个总系统可以视为由很多分系统组成，总系统与分系统之间，分系统之间的关系非常复杂，系统这个词，根据使用方法和使用部门的不同而有各种含义，在一定范围内使用时，一般可定义如下：相互间具有有机联系的组成部分结合起来，成为一个能完成特定功能的总体，这种组成部分的有机的结合体就称为系统。

作为系统工程所需要研究的系统，应当具有以下五个特征：

(1) 集合性：集合是数学上的名词，集合中的对象叫做集合的单元，系统的集合性是指系统至少是由两个或两个以上的可以相互区别的单元组成。

(2) 相关性：组成系统的单元是相互联系、相互作用的，相关性说明单元之间的关系，若单元之间不发生任何关系，则它们不能组成为系统，例如一个水利系统的防洪、灌溉、发电互不相关，则就不能互相协调而充分发挥水利工程的经济效益。



(3) 目的性：在人工系统中都具有目的性，而且不止一个目的，就是数学中的目标函数或多目标函数，建立一个系统须有具体的定量目标，这在系统设计中是非常重要的问题，例如某一结构物，它的目标是在满足安全的情况下所需的投资最少。

(4) 整体性：系统是由许多具有独立功能的单元所组成，而单元之间的相互联系只能是逻辑地统一协调于系统的整体之中，才能发挥系统的整体功能，任何一个单元不能离开整体去研究，脱离了整体性，单元的机能和作用就失去意义。整体性是系统工程的重要观点，只有系统的单元协调得好才能构成良好的系统。

(5) 环境适应性：任何系统不可能孤立存在，它是存在于一定的物质环境（更大的系统）之中，一个系统必然要与外界环境产生物质的、能量的和信息的交换，即适应外部环境的变化，能经常与外界环境保持最佳的适应状态的系统是理想的系统，不能适应环境变化的系统是缺乏生命力的。

系统工程是基于以上五个特征而解决许多问题取得效益。由以上特征建立起来的系统是合理的、完整的、科学的。首先解决系统存在的价值问题，进而明确系统建立的目的，克服盲目性。目的性的分析结果，明确了系统的功能。由集合性分析的系统，其构成的单元既无多余又无缺少，整体性是从整体出发解决系统内部的问题，使整体与局部之间的关系达到合理，增强整体的功能，相关分析是使各组成成分建立合理的关系，使之满足相互之间的约束，避免盲目的联系和行动，环境适应性是使系统与外部环境关系达到合理，使系统具有生命力，系统分析符合这五个特征是最基本的，是系统设计成功的关键。

早在一九世纪就使用了系统工程，美国通讯机械制造厂，1940年在彩色电视研制设计中就运用了系统的处理方法，第二次世界大战时，以大规模的系统作为对象，用科学方法对它进行分析，推导出了解决问题的一种技术方法。第二次世界大战以后，广泛应用于宇宙开发，电力工程、土木、水利工程、通讯以及新产品的研制等，1969年美国阿波罗登月向宇宙进军计划的成功，被认为是系统工程方面的成就，致使人们对系统工程的重视，以后人们对系统工程日益感到兴趣，现在甚至于行政、经济、教育、生活等各个领域也应用系统工程，应用系统工程解决许多难以解决的复杂问题。

系统工程虽是一种工程，但它在性质上与其它工程（如机械工程、电气工程等）有所不同，其它的工程部分是把特定领域的工程物质对象作为对象，而系统工程是不限定在特定领域的工程物质对象，可把任何物质对象作为对象，各种自然现象，企业、管理方法等，都可作为对象，它是综合应用各种科学、各种技术的综合性科学技术体系，对于系统工程这门学科简单地下个定义是不容易的，如果勉强地说可以定义为“系统工程是为了把对象创造出来或者在改善的时候，最优地并且最有效地达到该对象的目的，根据系统的思考方法，把它作为系统而进行开发、设计、制造、运用的思考方法、步骤以及各种方法的综合性的工程体系”。我国著名科学家钱学森同志提出“把极其复杂的研制对象称为系统，即由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合成具有特定功能的有机整体，而且这个系统本身又是它所从属的一个更大系统的组成部分，……系统工程则是组织管理这类系统的规划、研究、设计、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。”

系统工程是一种边缘科学，它涉及到社会经济和政治等领域，对于每个系统都有多

个目标，它们之间的重要性在于各种系统中可能大不相同，而系统工程方法则按照各个目标的重要性进行权衡，求系统总体功能最优化及系统各个组成部分的最大协调，系统工程是以大型复杂系统为研制对象的综合性科学技术，它借助于自然科学、社会科学的理论与方法，研究系统与外界环境协调，局部与整体之间的关系，以实现系统目标综合最优化、运筹学、控制论、现代数学方法及电子计算机等科学技术的发展，使之能对系统之间及系统内部作定量的分析，进行最优设计。

#### 第四节 系统工程的研究应用与推广

系统工程过去在数学界做了大量的工作，六十年代开始，我国数学工作者与产业部门配合，开始了运筹学的研究与应用，华罗庚教授把优选法在生产和管理中进行实践推广，取得了很大的经济效益。

在水利水电建设方面，应用系统工程是值得重视的，水利水电工程中的规划、设计、施工、运行等是一些规模庞大、结构复杂、影响因素众多的大系统、是一个多目标、跨学科、跨行业的大系统工程，需用系统工程的思想方法进行分析，如我国水资源的利用和最优分配，南水北调、水、火电系统的经济分析等。水电站水库优化调度方案在湖南省祁阳水电站实施，取得了显著的经济效益，平均每年可多发电 $1 \cdot 3$ 亿度左右。

在结构设计方面也进入了系统工程领域，应用结构优化设计理论进行设计，以前的结构设计是凭经验确定其几何尺寸，然后计算各部位的应力、应变、总体的承载能力，安全系数和结构的造价等进行比较选择，结构优化设计则是一个逆问题，给定的是结构约束条件，如应力强度、总体的承载能力、安全系统等，求解满足这些约束的情况下，达到理想的目标，如结构的重量最轻、材料最省、造价最低等。

工程施工的组织管理是一个复杂的大系统，其中包括多个分系统，如土石方开挖系统，出渣运输系统，骨料系统，混凝土拌和系统，混凝土运输浇筑系统，施工交通、水电供应系统、附属企业系统等，这些系统要做到整体最优、达到多快好省的目的，就需要用系统工程的方法来进行管理，从而提高效率、缩短工期，节省人力物力。施工进度计划的合理制定，以及随施工所进行的计划调整更新也是项重要的工作，以前施工计划一般采用横道线方法编制，此法全凭经验判断，不够严格，不能清楚地表示各个环节之间的相互依存和制约的关系，难免出现计划不周、工程窝工拖延、浪费等现象，而用网络规划来分析施工过程，合理地组织管理整个工程的施工，就可以清楚地表示各施工环节间的先后程序，相互关系及完成时间等主要因素，从中找出那些工序是关键工序，从而有针对性地使用施工力量和资源，使工程的工期最短、费用最省并合理使用现有的资源设备。施工场地的总体布置也可以用系统分析的方法使布置尽量合理，减少干扰，节约人力物力。

一般说来，系统工程都是把研制大规模系统的开发项目作为主要对象，但它的观点与方法也适用于小规模的开发项目，它的应用范围非常广泛，例如自然对象的系统、人体对象的系统、产业系统、社会系统等，可以说，它能应用于解决一切部门的复杂而又困难的问题，为了加速我国的四个现代化建设，提高规划、设计施工和运行管理水平，必须学习、研究、推广、应用这门技术学科。

## 一、开展系统工程研究是技术革命的需要

系统工程这门新发展起来的综合性、边缘性学科，是运用计算机数学管理各种系统的一种新的科学方法，现已在国民经济的一些领域取得了令人鼓舞的成果。例如，湖南柘溪水电站运用系统工程方法进行优化调度，一九八〇年至一九八二年共多发电五亿九千多万度。湖南省娄底地区采用系统工程方法进行水稻规范化栽培，取得了显著成效。一九八一年全区按规范化技术推广杂交水稻一万五千一百六十三亩，平均亩产八百九十二点八斤，总产增加一百零六万斤。为解决长沙市“乘车难”问题，从一九八三年元月起，运用系统工程方法，综合治理城市交通、开辟了《城市公共交通系统工程学》的新领域，目前已初步取得效果。此外，在经济预测，城市规划、企业管理、环境治理等方面，系统工程都在发挥积极作用。

系统工程是人类社会和生产力发展的必然产物。系统思想是在社会实践过程中形成并不断发展的。恩格斯在《路德维希·费尔巴哈和德国古典哲学的终结》一文中，批判“旧形而上学”时指出：“当这种研究已经发展到可以向前迈出决定性的一步，即可以过渡到系统地研究这些事物在自然界本身中所发生的变化的时候，在哲学领域内也就响起了旧形而上学的丧钟”。现代科学技术的发展雄辩地证明了这一点，并把系统这一概念具体化，形成了系统工程这样一门科学的应用技术。

系统工程是一门综合性很强的科学。它加强了自然科学与社会科学之间的联系，为促进社会经济系统的发展开辟了新的途径。经济建设要依靠科学技术，科学技术要面向经济建设。

系统工程是一门实用性很强的科学，因此必须强调理论联系实际，特别要注意研究四化建设中的现实问题。

最近，中央领导同志多次指出，要用系统工程方法，全面统筹、综合论证，提高效益。面对新的技术革命，我们必须运用系统的思想，全局的观点，优化的原则，作出系统工程的对策，以便不失时机地迎着浪潮而上。

## 二、联系建设的需要，开展系统工程研究

实现我国的社会主义现代化，有许多课题需要研究。由于内容广泛和复杂，需要多学科、多方面的合作研究。参加这个合作的，即要实际工作者，也要理论工作者。我们的总任务和总目标就是建设具有中国特色的社会主义现代化强国。目标是由一个复杂庞大的目标体系构成的。总目标是整个目标体系的高度概括。目标体系包括经济、社会、科技、文化、环境等多种子目标体系，它们下面还有次一级的目标系统，形成一个多层次的结构。是个很典型的系统工程课题。

为了实现这个总目标，怎样才能在不断提高经济效益的前提下，力争使全国工农业的年总产值翻两番。如何正确处理速度 and 经济效益的关系、宏观效益与微观效益的关系，也需要用系统工程的方法进行系统研究和综合分析工作。

怎样实现力争本世纪末把人口控制在十亿之内的目标，怎样培养、使用人才和提高人的素质。这是个人口战略问题，也是个综合性很强的问题，要与社会、经济、就业、

劳动工资、人才培养等问题综合考虑，也是个跨部门跨学科的大系统。

经济、社会、科技协调发展问题。经济、社会、科技的协调发展是一个规律。任何国家如果违反这个规律，不仅不能获得全面的、健康的发展，而且还会出现许多严重问题。资本主义社会的经济危机，政治、社会的动乱，以及精神、文化的颓废等，就充分说明了这个问题。怎样做到经济、社会、科技的协调发展，也是一个重要的系统工程课题。

类似的课题还很多，以上举例足以说明系统工程所面临任务的重要性和紧迫性。系统工程可帮助我们总结过去，立足现在，面向未来。

系统工程学包括系统工程学的基本理论及其实际应用的各个方面。是一门边缘的新兴学科。由于它应用的广泛性，考虑问题的整体性、综合性以及它的一整套方法的科学性等等，给我们以启迪。在研究发展战略问题时，关于系统范围的确定，涉及到是用唯物的观点还是唯心的观点来分析系统的要素。也有因对系统的分析不客观而不成功的例子。所以，系统工程在国外发展的二十多年的历史中，有各种理论、各种学说与各种流派，免不了受资产阶级唯心主义的影响，这是不足为奇的。特别是外国系统工程从技术工程领域进入到经济、社会等领域之后，那些在资产阶级经济理论、资产阶级的社会学理论指导下的系统工程的理论和方法，更需要我们进行分析，取其精华，去其糟粕。

在马克思主义指导下，系统工程作为一门科学在我国必然会得到很大的发展。而且在我们的实际应用过程中一定会逐步形成中国式的社会主义的系统工程学。

我们用什么思想什么世界观认识世界，对我们改造世界的成败具有决定性影响。客观世界是十分复杂的，无论是自然界或者社会，客观上是由一个完整的系统组织成的，人们是否能如实地认识它，这同指导人们的思想理论基础有关。如果用唯心主义或者机械唯物论去观察事物，用这种思想指导系统工程，那就不可避免地会犯主观、片面错误。而用马克思主义的辩证唯物主义作指导则可以帮助我们正确地认识事物，避免犯主观和片面的错误。因此，在马克思主义理论的指导下，系统工程才有可能得到很好的发展。像我国这样一个人口众多，经济比较落后的大国，建设社会主义是人类历史上从来没有过的伟大实践。它必然带有许多特色。我们在社会主义建设的实践中，在马克思主义指导下，建设具有中国特色的社会主义系统工程学是所有从事这门学科的同志的共同愿望。

从我国的社会主义现代化的需要来看，系统工程的课题是非常多的。如何选择和安排课题、确定次序、层次和分析课题相互关系是很重要的。因此，用系统工程的方法来制定系统工程学科的研究与应用规划，并与国家的发展需要协调，这本身就是首先要考虑的系统工程的问题。

要做好规划，需要总结一下我国的系统工程的研究与应用工作，确定发展目标，选择重点骨干课题，把全国的系统工程力量调动起来，并做好推广普及工作。

### 三、与决策者紧密配合，以增强实用性

系统工程为国民经济服务中的一个重要问题还是决策者对系统工程方法的信任问题。这个问题的存在是很自然的，即使在系统工程发展得更为普遍和深入的国家也还存在这个问题。他们也还在讨论：“怎样来加强决策者对模型的实用性和可靠性的信任程度”，“决策者对模型的实用性抱什么态度”等等。我们在实践中体会到，为了改善上

述问题，可以向决策者多作介绍，但最重要的是系统工程工作者只有努力拿出更多的更成功的事例，用事实来获取决策者的信任。

系统工程工作者为了取得决策者对系统工程的信任，就必须十分注意在整个工作过程中与决策者进行对话。首先通过与决策者的对话，明确其咨询要求。其次在建立模型的阶段，要询问决策者对所建模型的功能以及实现这些功能而采用的结构是否符合要求。在采集及处理数据的阶段，对数据的可信度和准确度，要通过与决策者共同讨论而获得一致的估计。最后在仿真分析阶段，更要与决策者多交换意见，以便使分析工作具有针对性，而不陷于一般空论。

在采集处理数据和编制图表整个过程中，我们与决策者及时对话，使他们了解整个过程，这样双方对数据的可信度和准确度取得了一致的看法。最后通过与决策者对仿真分析的讨论，使这一咨询工作基本上完成了预期的要求，对决策者具有实用意义。我们在实践中体会到，系统工程为国民经济服务中的第二个重要问题是，分析者要与决策者密切对话，熟悉研究对象，根据实际可能的条件，针对决策者的要求，努力使工作结果对决策者具有尽可能大的实用性。

#### 四、系统工程需与有关专业密切结合，尽力符合我国的具体情况

系统工程的应用范围极广，因而对系统工程工作者的要求，除了掌握本学科的理论和方法论外，还必须具有广博的知识。但是，个人的知识有限，不可能样样都懂。因此，系统工程工作者不可能也不应该“包打天下”，认为能解决一切问题。在进行每一项系统工程的应用，都必须首先向有关部门和专业人员学习，并在工作中密切协作，这样才能取得切合实际的结论。

我们在实践中体会到，如果不是向各有关部门和专业的人员学习，不是密切协作，我们是无法取得这些结果的。这是系统工程为国民经济服务中的重要问题。

系统工程在社会经济的领域内具有很多重要的优点。例如在分析问题时的全面性、综合性，并且可以定量化和最优化。但是实践表明，在应用系统工程方法时，特别在社会经济系统的领域内，绝不可忽视传统的、经验的和定性的方法，这是因为，社会经济系统是一个多层次、多因素、多目标的复杂的大系统。到现在为止，我们还没有能力完全用数学方法来求解，有不少情况还是无法定量化。系统工程还有一个很重要的特点是，对无法在实验室内作模拟试验、更不能在现实社会中做试验的社会经济系统，通过建立数学模型和计算机仿真，就可以预知未来将会出现什么后果，该采取什么措施，周期长达几十年、上百年的变化可以很快就算出结果。但是这种建模和仿真的方法还是需要经验的帮助。最简单的例子，一个多目标线性规划的最优解的获得，目前不管采用什么方法求解，都具有主观的成份。

当系统工程还不为人们所认识的时候，系统工程工作者要宣传这种科学方法。目前各级领导已开始重视这一方法，实事求是地对待它们的作用。我们实践中体会到，系统工程工作者要努力使现代方法和传统方法相结合，使科学方法和经验方法相结合，使定量方法和定性方法相结合，在为国民经济服务的实践中，努力创造符合我国国情的系统工程方法。这是系统工程为国民经济服务中的重要问题。



当前系统工程出现了一个新的局面,各行各业纷纷要求在自己的工作中应用系统工程的方法。面临这一局面,要乐于帮助各行各业的人员来实现这一愿望。同时要看到,由于国民经济不断发展,对系统工程学也提出了更高的要求。例如,对更巨大的系统和更长时期的未来的预测和分析,对多层次、多因素、多目标的复杂大系统的研究等等。当前系统工程的理论和方法虽然已经发展到了一定水平,但对更高要求而言,是很不适应的。我们认为,系统工程工作者的责任是:积极帮助各行各业的人员在各自领域外应用系统工程,同时要不断地发展系统工程的理论和方法论,不断创造符合国情的系统工程方法,并不断提高各行各业人员的应用水平,使系统工程在实现我国经济和社会发展的宏伟目标的实践中发挥出更大的作用。

## 五、积极努力地开展系统工程的研究

运筹学是分析复杂系统,寻求其静态最优规划的理论和方法。系统工程则以运筹学为主要理论基础,解决工程设计和管理等问题最优化的工程技术。大系统理论主要是解决大系统动态最优化的理论。由此可见,它们都有自己学科的特点和侧重。从学科的角度看,从事科学研究的目的,应当使大学科的重点内容逐步得到充实而完善。各学科本身越发展,各学科本身的理论、方法和技术也就越丰富,越有效,它们渗透到其他学科中去共同解决问题的作用也就越强,因而也就越促进了它们的渗透作用。就目前水平而言,在现代控制理论中采用了运筹学方法已能解决原来许多不好解决的最优化问题。如果能够找出简单而在一定程度上还有效的大系统的简化数学模型,能用某种非确定性数学以一定的有效程度描述了机械化后人的行为的因果关系,那么不但对大系统控制,而且对科学管理和系统工程都是极有成果。

从近十几年的科学发展来说,重要特点是学科本身发展迅速,各学科间相互渗透作用强烈。系统工程、运筹学和控制理论都是二次世界大战前后才发展起来的。这几门学科今后的重要发展趋势之一就是它们相互渗透,且在渗透中形成一类解决复杂的最优化设计、最优管理和最优控制的理论、方法和技术。复杂的综合性问题对人类社会日益成为一种普遍而严重的问题。在工程技术界,在生产领域中,都尽力节约物资、提高能源利用、增加工效、减少污染,现代企业都趋向于大型化、高强度、多品种、综合利用的生产方式。在城市交通、通信系统等方面,也都是复杂的要求能高效率运行的大规模网络。因而如何搞最优设计、最优管理和最优控制就是一个重要问题。在自然界,对全球性的资源系统、大气环境系统等研究也已开始。在经济界,在资本主义国家,则由于物资浪费、能源危机、人口失控、经济衰退等等原因,迫切需要找到一个能够控制或至少是能够预估世界性经济变化的办法。当然,由于资本主义的性质,要找到一个能够彻底控制它们经济变化的办法是不可能的,而在这一点上,恰巧是发挥我国社会主义计划经济优越的地方。为了更好地发展我国社会主义计划经济,使计划尽可能符合经济发展规律,在我国特定的社会、自然条件和工程技术水平情况下,很有必要研究系统工程等一套方法来预测、规划和管理我国的经济事业。这些问题只有应用系统工程、运筹学、大系统理论和政治经济学等学科的相互渗透作用才能解决。

因而,要注重系统工程、运筹学、大系统理论问题以及它们和其他学科间的渗透问

题。各方面的，特别是经济学方面的研究工作应当以我国社会主义经济发展的具体模型作为重要研究课题之一。这是发展我国系统工程研究的一条极为重要的路子，它的成果必然会为我国四个现代化或甚至是更长远的发展作出贡献。

我国的国民经济在经营管理和某些工业部门的生产上，和国外差距较大。所以目前有一个非常迫切的任务是学习和普及。学习国内外现有的系统工程、运筹学甚至是一般的工商业管理方面的知识，并普及到全国各有关人员。这个任务的工作量很大也很迫切，应当由国家有关部门有计划有组织地加以安排落实。对于我们从事系统工程及相邻学科的科研人员来说，也要相应地在科普工作和培训工作中作出努力。

另一个很重要的问题是研究。研究有两方面：一方面是应用研究，一方面是理论研究。所谓应用研究主要是指利用现有的理论、方法和技术解决我们自己的具体问题，如用系统工程技术解决一个复杂的具体的工程设计问题，用控制理论中的数学模型方法提出我国的人口模型，并找出几种控制方案供有关领导参考……，这类研究的面应当铺得广些，在各有关部门（工业的或非工业的）都应当有若干点。这类研究一般都可以收到近期实效，应用研究应当说是我们系统工程研究中的最主要的一环，应投入最多的人力。另一类理论研究工作，从发展理论的角度，从解决实际问题过程中遇到的困难等等得到的课题，这类课题需要较长的时期，应着重于应用研究和长期的理论性研究。

## 六、应用系统工程方法，推广微机应用

在迎接新产业革命的过程中，应该大力提倡在微机应用的开发工作中应用系统工程的思想和方法。例如在开发步骤上，应严格按照项目选定、可行性分析、系统设计、系统建立与投运、系统评价、系统的维护与改进这一系列步骤有秩序地进行，在项目选择上，应该从一个系统着眼，把微机当作一种手段，通过它的应用来改进生产计划管理工作，形成有效的管理信息系统。要从经济效益、社会效果、科技水平诸方面来衡量这一系统的建立能有什么成效，这样不但对生产能提供实效，而且也为微机应用建立信誉。我们建设资金有限，用在开发微机系统上一定要取得必要的效益才好。

微机系统毕竟是一种手段，希望通过它来提高生产、管理、设计、科研的科技水平。例如通过计算机辅助设计提高设计工作水平；通过计算机辅助测试与研究试验自动化提高科研水平；通过计算机与传统产品的结合，形成像数控机床、工业机器人、智能型仪器等新型产品；通过计算机在规划、计划、管理中的应用提高管理现代化水平；……通过这些就会自然而然地形成新兴产业，提高知识密集度，赶上世界潮流。要做到这一点，绝不仅仅是从事计算机硬软件人员的工作，而是要把各行各业的工作都和它联系起来，形成多学科综合研究，协同作战，这就需要运用系统工程的思想与方法来统筹规划，协调组织。

## 第二章 线性规划

### 第一节 线性规划问题和数学模型的建立

线性规划是运筹学的一个重要分支，由生产部门和经济管理部门首先开始应用。目前在军事、工农业生产和经济管理等部门中都得到广泛的应用；自一九四七年，丹捷格（G·B·Dantzig）提出了求解一般线性规划问题的单纯形法之后，线性规划在理论上趋向成熟，特别是应用电子计算机来处理成千上万个约束条件和变量的大规模线性规划问题之后，它的运用领域就更广泛了。计算技术也比较简便，是现代管理科学的重要基础和手段之一。

先举几个实例来说明什么是线性规划问题，它的数学模型是怎样形成的。

例2—1 设有重量 $P=2$ 吨的物体悬挂在两根钢丝绳上，已知钢丝绳长 $AC=14.1$ 米， $BC=11.5$ 米。许用应力 $[\sigma]=1000$ 公斤/平方厘米，弹性模量 $E=2000000$ 公斤/平方厘米，为了保证此悬挂结构正常工作，钢丝绳的应力不应大于容许应力，现在要求钢丝绳的横截面面积，使承受荷载的结构重量最小。

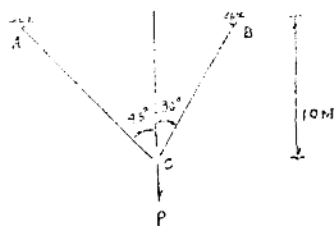


图2—1

钢丝绳的重量 $G$ 由下列公式确定：

$$G = r(1410F_1 + 1150F_2)$$

式中： $r$ ——材料单位体积重量公斤/立方厘米，

$F_1$ ——钢丝绳 $AC$ 的横截面面积，

$F_2$ ——钢丝绳 $BC$ 的横截面面积。

钢索中的内力可用静力平衡方程式求得：

$$N_{AC} = 1036 \text{ 公斤}$$

$$N_{BC} = 1464 \text{ 公斤}$$

强度要求为

$$F_1 \geq \frac{N_{AC}}{[\sigma]} = 1.036 \text{ 平方厘米}$$

$$F_2 \geq \frac{N_{BC}}{[\sigma]} = 1.464 \text{ 平方厘米}$$

于是这个寻求结构最小重量的数学问题，是一个线性规划问题，则得，

$$\text{MIN} \quad G = r(11410F_1 + 1150F_2)$$

约束条件为

$$1.036 - F_1 \leq 0$$

$$1.464 - F_2 \leq 0$$

例2—2 某工厂生产A和B两种产品，生产一吨A产品需耗煤9吨，耗电4千瓦，需要3个劳动力，能得到7万元产值。生产一吨B产品需消耗煤4吨，耗电5千瓦，需要10个劳动力，能得到12万元产值。现在该厂有360个劳动力，调拨指标煤为360吨，电力为200千瓦。问如何安排这个工厂的生产（即求A和B两种产品各生产多少吨），使产值最大。

解：设生产A产品 $X_1$ 吨，生产B产品 $X_2$ 吨，根据现有的劳动力和调拨的煤指标、电力指标的限制，得出约束条件为：

$$9X_1 + 4X_2 \leq 360$$

$$4X_1 + 5X_2 \leq 200$$

$$3X_1 + 10X_2 \leq 300$$

$$X_i \geq 0 \quad i = 1, 2$$

求目标函数即求总产值的最大值。

$$\text{MAX} \quad S = 7X_1 + 12X_2$$

经过运算以后，得： $X_1 = 20$ ， $X_2 = 24$ 这时得到的总产值为428万元。

例2—3 某车间生产甲、乙两种产品，制造一件甲种产品要A种元件5个、B种元件3个；制造一件乙种产品要A种元件2个、B种元件3个，现因条件限制A种元件只有180个，B种元件只有135个；每件甲种产品可获得利润20元，乙种产品可获得利润15元。在这种情况下，生产甲、乙产品各多少件才能得到最大利润。

解：设生产甲种产品的件数为 $X_1$ ，生产乙种产品的件数为 $X_2$ ，由于条件的限制，A元件只有180个，B元件只有135个，得出约束条件为：

$$5X_1 + 2X_2 \leq 180$$

$$3X_1 + 3X_2 \leq 135$$

$$X_1 \geq 0 \quad X_2 \geq 0$$

求目标函数即总利润的最大值。

$$\text{MAX} \quad S = 20X_1 + 15X_2$$

经过计算以后，得 $X_1 = 30$ ， $X_2 = 15$ ，得到的最大利润是825元。

从以上例子可以看出：①每个问题都用一组未知数（ $X_1, X_2, \dots, X_n$ ）表示某一方案；这组未知数的一组定值就代表一个具体方案。通常要求这些未知数的值是非负的。②存在一定的限制（称为约束条件），这些限制都可以用一组线性不等式或线性等式来表达。③都有一个目标要求，并且这个目标可表示为一组未知数的线性函数（称为目标函数）。按不同的问题，要求目标函数实现最大值或最小值。

一般可把这类问题用数学语言描述如下：

目标函数  $\text{MAX}$ （或 $\text{MIN}$ ） $S = C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n$  满足约束条件。