

# 系统工程学

大连工学院

王众诤 编

国防工业出版社



016630

# 系统工程学

大连工学院

王众诤 编



科工委字802 2 0012771 9

GF/32/66



国防工业出版社

**系 统 工 程 学**

**大 连 工 学 院**

**国防工业出版社出版**

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

解放军第七二二六工厂印刷 内部发行

\*

787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张14 千字328

1980年12月第一版 1980年12月第一次印刷 印数1-5,000册

统一书号: N15034 (四教54) 定价1.45元

## 内 容 简 介

本书是工科电子类自动控制专业选修课“系统工程”的试用教材，主要介绍系统工程中常用的系统模型、分析与优化方法。全书包括绪论、系统的结构模型、系统的静态模型与静态最优化、系统的动态模型与动态最优化、决策的某些问题、网络系统、随机服务系统、系统可靠性等部分。本书还可供工科相近的专业有关系统工程的课程作为教学参考书，并可供工程技术人员与管理人员进修参考。

## 前 言

本书系高等学校工科电子类自动控制专业的试用教材之一。根据 1977 年拟订的自动控制专业教学计划，“系统工程”列为选修课，本书是这一课程的试用教材。全书的内容和重点是根据 1978 年在上海召开的工科电子类自动控制专业教材编写会议系统工程分组会的讨论意见安排的。

根据本课程在教学计划中的地位与学时安排（40~60 学时），这本教材以介绍系统工程中常见的几类系统模型、分析与优化方法为主。全书包括绪论与七章：

绪论介绍系统工程的内容、特点、理论基础、应用举例以及系统工程的步骤；

第一章介绍系统的结构模型及其建立方法；第二章介绍系统的静态模型与静态最优化，以线性规划、非线性规划以及大型规划的分解协调为主；第三章是在读者已掌握自动控制理论的基础上，对大型系统（特别是一些非工程系统）的模型建立、模型简化以及动态最优化方法（以动态递阶优化为主）作一些讨论；

第四章介绍在系统分析过程中的某些决策方法；第五章讲述另一类很典型的系统——网络系统中某些问题的解法，其中也包括了作为时间网络的网络计划方法（统筹法）；第六章介绍又一类典型系统——随机服务系统的模型与分析方法；第七章讲述系统可靠性分析的基本方法。

本书在使用时可以根据选修课的分工与学时安排适当进行章节的取舍。如果单独开设“大系统理论”选修课，可以在本课程中略去第三章的内容。如果相近的专业用作系统工程课程教学参考书或者作为培训班、进修班教材，也可以略去第三章和第二章的几节。这样取材后，只要具备线性代数和概率论的初步知识，便可使用这本教材。

本书由华中工学院陈珏（主审）、李救安、付明晖等同志审阅，他们严密细致的工作使编者得以改正许多错误和疏漏的地方，得到很多的教益，在编写和试用过程中还得到不少同志的教正，在此一并致谢。

由于编者的理论水平与实践经验都很差，书中错漏之处在所难免，敬请读者随时指正，编者无任铭感，意见请寄大连工学院系统工程研究室。

编 者

一九八〇年十月

# 目 录

|                                        |       |
|----------------------------------------|-------|
| 绪 论                                    | (1)   |
| § 0-1 系统工程的内容和特点                       | (1)   |
| § 0-2 系统工程的理论基础和得力工具                   | (3)   |
| § 0-3 系统工程的应用及实例                       | (5)   |
| § 0-4 系统工程的步骤                          | (9)   |
| 第一章 系统的结构模型                            | (14)  |
| § 1-1 结构模型的图形与矩阵表示                     | (14)  |
| § 1-2 系统结构模型的分解                        | (18)  |
| § 1-3 结构模型的建立 (一)                      | (26)  |
| § 1-4 结构模型的建立 (二)                      | (32)  |
| 第二章 系统的静态模型与静态最优化                      | (39)  |
| § 2-1 系统的静态模型                          | (39)  |
| § 2-2 系统的静态优化 (一) ——线性规划问题             | (43)  |
| § 2-3 单纯形法                             | (48)  |
| § 2-4 线性规划中的对偶问题                       | (63)  |
| § 2-5 大型线性规划问题的分解                      | (67)  |
| § 2-6 系统的静态优化 (二) ——非线性规划问题            | (72)  |
| § 2-7 非线性规划的分解与协调                      | (88)  |
| 第三章 系统的动态模型与动态最优化                      | (100) |
| § 3-1 系统的动态模型举例                        | (100) |
| § 3-2 系统动态模型的简化                        | (108) |
| § 3-3 线性并具有二次型指标的系统的动态递阶优化 (一) ——目标协调法 | (114) |
| § 3-4 目标协调法的改进                         | (121) |
| § 3-5 线性并具有二次型指标的系统的动态递阶优化 (二) ——关联予估法 | (131) |
| § 3-6 递阶反馈控制                           | (135) |
| 第四章 决策的一些问题                            | (145) |
| § 4-1 在不确定情况下的决策问题                     | (145) |
| § 4-2 对策问题                             | (150) |
| § 4-3 多目标决策问题                          | (157) |
| 第五章 网络系统                               | (165) |
| § 5-1 最短路径问题                           | (165) |
| § 5-2 最大流问题                            | (171) |
| § 5-3 网络计划方法                           | (176) |
| 第六章 随机服务系统                             | (183) |

|             |                      |              |
|-------------|----------------------|--------------|
| § 6-1       | 引 言                  | (183)        |
| § 6-2       | 生灭过程                 | (186)        |
| § 6-3       | 无限队长的普阿松输入、指数服务分布的系统 | (189)        |
| § 6-4       | 有限队长的普阿松输入、指数服务分布的系统 | (194)        |
| § 6-5       | 普阿松输入、一般服务分布的系统      | (196)        |
| <b>第七章</b>  | <b>系统可靠性</b>         | <b>(199)</b> |
| § 7-1       | 可靠性的一些概念与定义          | (199)        |
| § 7-2       | 系统可靠性模型与可靠度计算        | (202)        |
| § 7-3       | 系统可靠性估计与分配           | (206)        |
| § 7-4       | 可维修系统的模型             | (211)        |
| § 7-5       | 几种可维修系统的可用性分析        | (213)        |
| <b>参考文献</b> |                      | <b>(215)</b> |

# 绪 论

## § 0-1 系统工程的内容和特点

系统工程研讨的对象,是各种“系统”的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法,这类方法对所有“系统”都具有普遍意义。系统工程是跨越各个领域的方法性科学。

由于现代工业、农业、国防和科学技术的发展,出现了许多大而复杂的系统,例如钢铁、化工联合企业的生产系统,电力系统,交通运输系统,通讯系统,军事指挥系统,社会经济系统,环境生态系统等。这些系统常常具有综合性的功能和目标,需要从结构组成、技术性能、经济效果、社会效果、生态影响等多方面来研究考虑。系统工程正是要从整体上来研究这些系统的共同问题。

为了讨论系统工程的内容和特点,我们先要对系统的概念和特征加以介绍。

所谓“系统”,就是由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合成的、具有特定功能的有机整体。系统具有下面的特征:

- (1) 系统是由许多组成部分按照一定方式结合起来的,系统的这一特征有时称为系统的“集合性”;
- (2) 系统各个组成部分之间是相互连系、互相制约的,有时把这种特征称为系统的“关联性”;
- (3) 系统总是具有特定功能的,特别是人创造或改造的系统,总有一定的目的性,系统的组成单元正是按这种目的组织起来的,这是系统的“目的性”;
- (4) 系统总是存在于一定的环境之中,与环境不断进行物质、能量、信息的交换。系统必须适应环境。这种特征可称为系统的“环境适应性”。

我们已经熟悉一些工程控制系统,特别是机电控制系统。上面列举的各种系统尽管比我们所熟悉的系统庞大和复杂得多,但它们的基本特点仍旧是一样的,例如:

系统都有输入与输出,输入、输出以及在系统中流动的有物质流、能流、信息流,系统本身则是在处理这些“流”;

从组织、管理、控制的角度看来,我们更要着重研究信息流,研究信息的采集、整理、保存、利用等问题;

“反馈”不仅是控制系统的一种重要概念和手段,在其它系统中也是如此,例如规划设计、组织管理过程中,我们也要通过“反馈”来了解已布置的工作的执行情况,以确定下一步的策略;

复杂的系统都是有层次的,对于某一个系统来说,它既是由一些组成部分(子系统)结合而成的,又要作为一个子系统去作为更大的系统的组成部分。这在工程系统中表现为多级控制,在管理上组织机构也是分级的,特别值得提出的是生物系统也是有层次的,例如人的神经系统也是由脑、脊髓、外周神经这样的多级组织形成的。

作为工程学科的系统工程,主要是研究由人来创造或改进的系统。它是千百年来人们生

产实践的总结。在人类历史上，人们在从事复杂的工程建设时，已经开始摸索到一些系统工程的方法。公元前 250 年，李冰父子带领四川劳动人民修筑都江堰，把分洪、引水、排沙巧妙地结合起来，这种思想便是系统工程的方法。北宋真宗时皇宫失火，丁渭主持修复，其中清理废墟、挖土烧砖、运输建筑材料等工作都很繁重，丁渭提出一个方案：在皇宫前的大街挖沟取土烧砖，解决了取土问题；再放水入沟，用船运输材料，解决了运输问题；再在竣工后将废砖碎瓦回填，修复大街，解决了废墟清理问题。这种一举三得的施工方案便是一种系统工程方法。但是作为一门学科，系统工程还是在本世纪 50 年代，总结了二次大战以来，在军事、经济以及尖端技术发展中开发系统的经验基础上建立起来的。

目前关于系统工程这样的学科体系的范围，国内外都还没有统一的看法。这一方面是由于系统工程的理论和方法，是在工程规划设计、管理、控制这三门学科向纵深发展，相互渗透，产生了一些共同性的问题需要解决的形势下发展起来的，从事不同专业工作的人对系统工程自然会有不同的理解；另一方面是因为系统工程要综合运用新的科学理论与方法，所以很难划清界限。我们这里列举一些国内外学者的解释和看法，供读者参考：

“系统工程学是为了更好地达到系统目标，而对系统的构成要素、组织结构、信息流动和控制机构等进行分析与设计的技术”（1967 年日本工业标准 JIS）。

“系统工程学是应用科学知识设计和制造系统的一门特殊工程学”（1969 年美国质量管理学会系统工程委员会）。

“系统工程是一门把已有的学科分支中的知识有效地组合起来用以解决综合性的工程问题的技术”（1974 年大英百科全书）。

“系统工程研究的是怎样选择工人和机器最适宜的组合方式以完成特定的目标”（1975 年美国百科全书）。

“系统工程是一门研究复杂系统的设计、建立、试验和运行的科学技术”（1976 年苏联大百科全书）。

“系统工程是为了合理地开发、设计和运用系统而采用的思想、程序、组织和方法的总称”（1971 年日本寺野寿郎）。

“系统工程与其它工程学不同之点在于它是跨越许多学科的科学，而且是填补这些学科边界空白的一种边缘学科。因为系统工程的目的是研制系统，而系统不仅涉及到工程学的领域，还涉及到社会、经济和政治等领域。为了适当解决这些问题，除了需要某些纵向技术以外，还要有一种技术从横的方向把它们组织起来，这种横向技术就是系统工程。也就是研制系统所需的思想、技术、方法和理论等体系化的总称”（1977 年日本三浦武雄）。

“系统工程是组织管理系统的规划、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方法”（1978 年钱学森等）。

这里我们需要指出系统工程这门学科的几个特点。首先，系统工程不同于机械工程、化学工程、电力工程等，它不是以某一专门的技术领域为对象，而是跨越各专业领域，研究各行各业中系统的开发、运用等问题，是适用于许多学科与领域的一种方法性的学科。

第二个特点：系统工程不仅涉及工程系统，而且涉及到非工程系统。不仅涉及技术因素，还涉及到经济、社会、生态甚至心理因素，所以它的研究和运用不仅涉及自然科学和技术科学，还涉及社会科学，特别是需要把它们结合起来。

第三个特点：系统工程中的概念和原则是本质的，一些数学方法是手段，是从属于概念和原则的。

系统工程强调考虑和处理问题时要注意：

(1) 整体性，就是要把系统当作一个整体，不要见木不见林。系统既是由各个单元按一定方式组成的，我们就不能孤立地只考虑其中一个部分。一个系统可以分成许多个子系统，而这个系统本身又可能是一个更大的系统的组成部分（子系统）。常常是从局部看来有利的方案从整体看来是不利的；而从整体看来有利的方案，对于其中某些局部可能是不利的。这就要求有整体观点，全局观点。上面提到的这种整体性是从空间来看的。而从时间上来看，我们也要把一个系统的研制、建立与使用过程当作一个整体。要从全过程来衡量和处理问题，不能只抓住一个片段或阶段。特别要从发展上看问题。由于一个系统从规划到使用经历的时间很长，而科学技术发展得又很快，考虑不周会在花费很长时间和很大代价后由于技术陈旧而失去使用价值。我们在处理任何一个系统时，首先应该注意的便是它的整体性。

(2) 综合性：我们在考虑一个系统时，应该时时想到它是一个综合体。其中不仅有技术问题，还有经济问题，以至于社会、生态等问题。技术问题本身也是物流、能源、信息交织在一起。各种因素互相制约，有时还会出现矛盾。我们必须综合地加以考虑。例如技术性能和成本的关系，产品和副产品（包括环境污染）的关系，必要性与可能性等，都必须从各方面加以综合考虑，在多种方案中选择最合理可行的一种。由于系统工程问题的多样性和综合性，也就使得我们在处理这些问题时应该综合使用各门科学技术的理论、方法和工具。系统工程的这个特点也是它成为一门边缘学科的原因之一。

(3) 科学性：在处理系统工程问题时，我们应该尽可能做到准确、严密。我们在前面已经讲过，系统工程的概念和原则是本质的，数学方法是手段，是从属于概念和原则的。但这绝不是说数学方法不重要。为了准确地运用概念和原则，我们应该尽可能运用数学工具，因此我们在建立系统的数学模型和进行最优化时，要充分利用现代数学方法和工具。

以上谈的整体性、综合性和科学性，构成了系统工程方法或者说系统工程思路的主要内容。为了能建立正确的思想方法和工作方法，我们应该以马克思主义的辩证唯物主义为指导，在具体运用辩证唯物主义的哲学原则于系统工程实际的过程中，在吸收过去的有益的实践经验基础上，逐步形成和建立比较正确和完整的方法。

## § 0-2 系统工程的理论基础和得力工具

系统工程一个很大的特点就是它要按照它特有的思考与工作方法综合运用各个学科的成果来解决系统的规划设计、管理与控制问题。但是作为系统工程的主要理论基础的，还是运筹学、控制论。

系统工程的具体实现过程，不论是规划设计，还是管理、控制，都离不开它的得力工具——电子计算机。正是由于有了电子计算机，才使系统工程实践有了广泛的发展。

现在我们先来介绍一下系统工程的几门理论基础学科。

运筹学是近四十年来发展起来的一门科学，根据运筹学的一位创始人给它下的定义，运筹学是“管理系统的人为了获得关于系统运行的最优解而必须使用的一种科学方法”。它使

用许多数学方法（代数、分析、概率论、数理统计、图论、组合数学等）和逻辑判断方法，也使用具有一定实验性质的模拟方法，来处理组织管理、规划中的问题。运筹学的具体内容包括线性规划论、非线性规划论、决策论、对策论、排队论、搜索论、库存论以及新发展起来的如可靠性理论等。本书后面几章，将介绍其中一些目前已在系统工程中广泛应用的理论和方法。

控制论是研究各种控制系统（包括机器、生物体和社会）的信息传递、变换、处理过程的共同规律，也就是研究控制与信息过程的共同属性、共同问题、共同方法的科学。它的一个主要分枝——工程控制论的基本原理与方法是大家所熟知的。它处理系统的动态分析、动态优化等问题，在研究系统规划、组织、管理等广义的控制问题上它是有力的武器。

这里应该特别提到的是处理大系统问题的一些思路和方法，正在实践需要的推动下迅速发展。由于大系统结构复杂，影响因素众多，使用一般运筹学与控制理论难以解决，需要建立新的理论与方法，尤其是系统中不但有工程因素，而且有非工程因素（社会、经济、生态等），不但有机器，而且有人，所以必须在更广泛的基础上建立理论，这种理论必将成为系统工程的重要理论基础。

如果说运筹学目前处理的主要是静态问题，那末控制论处理的主要是动态问题，二者相辅相成，互相渗透，做为系统工程的理论基础，促进系统工程的发展。

系统工程中还广泛应用了关于信息的采集、传输、检索、加工处理与利用的技术，这些技术属于信息科学的内容，有些还属于计算机科学内容，也有人认为这些理论和方法已经包括在控制论这门学科之内了。

当然，现在各个学科都在迅速发展，尤其是上述学科都是边缘学科，很难清楚地划清界限，随着科学技术的发展，还会有新的学科和新的学科划分方法出现，在这里我们只是着重说明一下它们的关系。

仅仅有了理论和方法，而没有得力的工具也是无法使系统工程实现的。在规划设计、管理、控制的任务中，计算、逻辑判断或实验性模拟的繁重工作，可由电子计算机迅速而准确地完成。计算机不但能完成计算与信息处理，而且还能用数据库把历史情况和最新情况保存起来，有需要可以随时显示，并能对当时的变化及时进行处理。电子计算机由于能在短时间内作出多种方案可供选择，就使我们能够找到最合理的解决方法。

这里应该特别提到由电子计算机构成的管理信息系统，这是一种很有用的工具。

为了更好地了解这种计算机系统的作用，让我们先来研究一下人怎样获取信息和利用信息。如图 0-1 所示，我们从客观事物中得到表述事物的数据；数据经过处理，选择那些有价值的构成信息；根据信息和一定的准则，作出决策，采取行动；对于行动的结果的测定和评价，就是成果。

如果说在控制系统中信息是以信号形式呈现的，那末在管理系统中信息则是以文件形式表达和保存的。

管理信息系统的物质基础是配套齐全的电子数字计算机系统，它有完备的输入、输出和外存贮器。它的功能是：

(1) 数据的采集：通过传感器或键盘等向计算机输入各种需要的数据；



图 0-1

- (2) 信息的加工：数据经过加工才能成为有用的信息，并且还需要加以整理；
- (3) 信息的贮存：这个工作由数据库系统来承担，除了保存外，还要能更新；
- (4) 信息的检索：在需要时能迅速调出信息来使用；
- (5) 信息的显示：以打印或者声、光（屏幕）形式向人显示；
- (6) 信息的传输：这是指当输入输出等设备分散在各处时，需要进行必要的传送；
- (7) 信息的处理和作出决策：信息有时需要按一定方式定型处理，或者进行最优化处理。有时采取人机对话方式，经过处理，作出决策。所以要作决策的系统常称作管理信息决策系统。

在一些大型企业中，管理功能与生产的自动控制功能有机地联系在一起，这样就形成了所谓集成管理控制系统。从功能上说，管理和控制是分级进行的，一般分为三到四级：计划决策级，制订中、长期计划；管理调度级，制订短期计划和日常调度管理；控制操作级，进行工艺过程控制与操作控制。这种多级系统正好用计算机的多级系统实现。顶上的一级使用大型机进行离线计算，下面的级则使用小型机或微型机进行在线控制。特别是微型计算机的发展，使得许多功能可以分散给多部微型机去执行，然后用计算机网络连接起来。这种多级的管理系统，是生产走向计算机综合自动化的主要方向。

### § 0-3 系统工程的应用及实例

系统工程的方法和工具目前已开始应用于下面这些领域内：

- 大型联合企业（钢铁、石油、化工等）的规划设计、管理和综合自动化；
  - 矿山、油气田的开发规划和生产的管理以及综合自动化；
  - 大电力网的规划设计、运行和控制；
  - 水源系统、城市供水、农田灌溉网的规划、管理调度与控制；
  - 输油输气管线系统的规划设计、调度管理与控制；
  - 大型工厂和加工协作网的规划设计、管理控制；
  - 铁路、公路、航空、城市交通系统的规划设计、管理控制；河运与海运管理；
  - 大型数据处理中心、数据通讯网；情报中心、图书资料档案自动检索、分类；
  - 通讯、电视、广播系统；
  - 导弹、卫星、飞船、航天飞机的控制；
  - 军事指挥系统，全国或地区防御系统；
  - 经济计划管理系统，资源分配与开发规划管理系统，世界经济模型；
  - 大型公共服务系统，银行，商业中心，医疗中心，人民保健网；
  - 城市建设与农村发展规划、管理系统；
  - 大型工程、科研项目、尖端技术产品的规划设计、组织管理系统；
  - 生态系统，环境保护与污染控制系统，环境监视网；
  - 消防、治安与保卫系统；
  - 海洋研究与开发系统的规划设计管理；等等。
- 随着生产和科学的发展，应用面还在扩大。

为了说明系统工程应用的方式、规模和成效,我们在这里列举两个国外系统工程的例子。

### (一) 阿波罗登月计划

阿波罗计划是一个规模十分庞大的研制项目。整个工程共有 300 多万个零部件。美国政府为它花费了 244 亿美元。参与这项计划的美国与外国企业共两万余家,有一百二十多个大学与研究所参加研究工作。从 1961 年 5 月起,历时十一年,完成了计划任务。这个计划的成功,关键在于整个计划的组织管理和实施过程中,采用了系统工程方法。现在介绍如下:

#### 1. 建立强有力的管理组织,明确职责分工。

为了完成登月计划,美国宇航局设立了阿波罗计划办公室,主管全部工作,并在宇航局所属的三个研究中心内分别设立阿波罗项目办公室,由计划办公室领导,分管各项任务。

计划办公室和项目办公室的职能是:(1)项目的计划与控制;(2)系统工程;(3)可靠性与质量保证;(4)试验;(5)操作实施。各项工作都分别设立了主管部门。

考虑到研制工作的情况,整个管理过程又分为五个方面:(1)确定计划的基本要求;(2)量测性能;(3)分析与评价;(4)控制与指导变化;(5)动作与反馈。在整个管理过程中和五个职能部门内经常考虑和处理的变量是工程进度、成本费用和技术性能。

#### 2. 制定和选择飞行方案

计划办公室成立后,首先是为实现登月选择飞行方案。当时一共提出了三个备选的方案:(1)直接飞行,使用新型运载火箭;(2)地球轨道交会,使用土星运载火箭分别发射载人航天飞行器和液氧贮箱;(3)地球轨道交会,使用土星运载火箭一次发射载人航天飞行器和登月舱。对上述三种飞行方案从技术因素、工作进度、成本费用和研制难易程度等方面进行分析,权衡得失利弊。

在技术因素中,分别考虑了性能、制导精度、通讯与跟踪、飞行成功率等问题。结果发现,第一方案在性能、制导精度、通讯与跟踪方面最好;第二方案在飞行成功率方面最差,只是其它两方案的三分之二,性能方面也难提高;第三方案在信息因素上并不突出,仅在性能和飞行成功率上与第一方案相等,其它方面都不及第一方案但优于第二方案。

接着进行了三种方案研制难易程度的比较。第一方案要求研制大型载运火箭和第二方案所要求的那种大型登月火箭,还需要解决低温火箭的空间使用问题。第二方案要求研制贮箱系统、液氢液氧传输系统和大型月球着陆舱,还要解决低温火箭的空间操作和载人与无人飞行器对接问题。第三方案要求研制月球轨道交接技术和载人飞行器。比较看来,第三方案比较容易实现。

最后从进度和费用作了比较,根据保守的设计,第三方案可比前两方案提前几个月完成,而且研制费用比前两方案低 10%。

结论是第三方案最能确保在最短期间内最经济地完成阿波罗计划的全部目标。

#### 3. 阿波罗计划的管理过程和管理工作。

管理过程的第一方面是确定该计划的基本要求。阿波罗计划采用了“工作细分结构”的系统分析法。它把整个计划由上而下逐级分成项目、系统、分系统、任务、分任务等六个层次。使用这种分析法的好处是:(1)确定了阿波罗计划的所有分支细目及其相互关系,明确哪个单位负责什么工作;(2)作为绘制计划协调技术的网络图的基础,保证所有分支细目都包括在工作进度系统之内;(3)作为编制预算的基础,把预算要求、实际成本费用与具体工

作成果联系起来。总之它为管理人员把整个计划的进度、财务与技术三者的要求连成一个整体提供了共同的基础。

为了明确工程进度的要求，阿波罗计划采用了计划协调技术，以形成主承包商与政府之间的进度管理系统。计划协调技术是1958年美国海军为赶制北极星导弹时制订的一种控制工程进度的新方法（详见本书第五章）。

管理过程的第二方面是量测性能，即按照该计划的基本要求审查整个计划的进度情况。为了及时洞察全局，要经常取得各职能领域的管理质量与进展情况的信息。为此，在各职能领域，制订了报告的具体要求，建立了“管理信息与控制系统”和一系列“设计审查及产品检查”制度。“管理信息与控制系统”将所需要了解的各种性能的信息，编绘成100张左右的图表，经过整理分析后，每月上报计划负责人，以便他集中精力抓薄弱环节。在阿波罗计划的全部过程中连续进行各种审查与检查：初步设计审查，关键设计审查，首次产品结构检查，飞行合格检定，设计检定审查，飞行准备审查等。

管理过程的第三方面是分析评价。主要工作是对性能数据进行评价并归纳出需要及时采取行动的几个明确的问题，向计划负责人报告。阿波罗计划中应用了计划协调技术和成本相关法等，以便查出存在问题的领域，保持各个领域相互平衡和保证完成主要目标。成本相关法分析的是工作进度与成本费用间的关系，看花的钱是否得到了预期工作量，并绘出今后费用增长率变化的曲线，以估计完成计划所需的总费用。它可以用来比较几个主要承包商完成的工作量，找出哪些薄弱环节上费用未得到预期工作量。这个方法假定人力物力相对固定，完成某项工作任务所需时间的变化就会使它的成本发生相应的变化。因此用单位时间作为对整个工作流程网络图上各项任务分配财政计划金额的标准，每个月所计划的成本费用在各项任务中平均分配。

管理过程的第四个方面是控制与指导变化。研制计划往往会发生变化，因此必须有系统地进行控制，以保证全部计划的实现。凡是影响最终产品的形成，装配、功能的任何变化，都必须由规定的某一级决策机构批准。

管理过程的最后一个方面是保证整个管理结构在日常生活中履行各种指令、规程、程序并为下一轮性能量测提供反馈数据资料，目的是让各级负责人明确自己的职责范围，做到事事有人负责。在日常活动中召开计划审查会促进管理行动的执行。

总之，阿波罗计划的成功是依靠了执行过程中使用的管理系统和工具的。工具就是电子计算机。据统计，美国所有承担阿波罗计划的企业在财会、生产管理、规划方面普遍采用了计算机。

## （二）印度河流域的水利、动力资源的开发

巴基斯坦为了开发印度河和它的支流作为灌溉和发电使用，制订了开发计划。总目标是为巴基斯坦政府制订下一个五年计划打下基础。着重点在于协助编制一个综合利用巴基斯坦的水力和动力的规划。

### （1）中心问题和系统的确定

编制巴基斯坦的动力、灌溉和农业总体规划之所以复杂，是由于不但在各个部门内部，而且在各个部门之间，都有很多是互相影响和互相关联的。例如多用途的塔贝拉大坝工程的经济价值主要取决于它的灌溉收益和它所能提供的动力收益。但是确定修建水坝与否，需要

确切查清将来在火电燃料和外汇供不应求时水坝的作用。此外，可以作为代用发电燃料的巨大天然气资源，又有其它用途，例如用于化肥生产。而化肥生产是否需要，又取决于农业增产所采取的措施。在发展水利资源方面，考虑了四种方案：扩大沟渠，增加天然水流的分流能力；季节之间地面水的贮存；单个电井抽水；公共电井抽水以平衡贮水量。虽然这些方案在某种程度上是相互依存的，但必须对每种方案分别进行考察。总的动力负荷预测主要取决于农业发展规划，特别是电井抽水和农业投入物资的制造。

从涉及的所有部门来看，必须把整个巴基斯坦经济作为一个系统来考虑，并把农业和灌溉子系统与能源利用子系统单独抽出加以研究。把世界其它地区、出口对象、进口供应商以及外汇来源等外部关系看作是系统的环境。

## (2) 建立模型

巴基斯坦的经济模型是线性的各部门平衡模型（详见本书第二章）。

建立了动力系统的两个模型：第一个是预测各水电站的负荷量并算出灌溉用途与动力用途之间关系的；第二个是用纯现值作为准则来选择一个最优动力规划的。

第一个模型是根据动力网运行方案（发电量和输电负荷量随时间的变化）的计算机模拟而建立的。第二个模型使用了线性规划方法（见本书第二章）。

第一个模型对评价动力与灌溉之间的一致性和相互关系特别有用。例如按照预定的放水模式，于全年中多排放一些和在水库中多贮存一些水作一比较，就可以确定前一种情况下动力和农业的成本和收益的数量。

综合利用地面水和地下水，这是印度河研究的核心。为了做到这一点，需要建立一系列水利模拟模型，以便把地下含水层作为地下水库来利用，把水从潮湿地区输往干燥地区以及从淡水地区输往咸水地区。

其次，用一个扩大的整个流域活动的模拟模型，按实际水文历史记录来考查所建议的发展计划可能实施的方案。该模型证实了下述结论：这个规划如按建议来执行，就应包括一些适当的设施，以满足农业和动力上的需要。

为了检验这些建议项目的经济效果，建立了一个线性规划最优化模型。因为每个项目所能得到的资源都很不足，所以必须采用线性规划，而不是按收益率来排队。这样才可以利用全部资源以取得最大的总收益。

为了采用线性规划，把整个流域分为若干个自然地理区。对每个指定地区，模拟了水利开发活动的各种组合形式，并按照估算的灌溉要求，分析了它们的相对优点。拟订了一系列水利开发方案，并测定了它们对整个灌溉系统的预期最大效益。

考虑了大约 500 个设计项目，分两个阶段实施。这些项目是作为线性规划中的备选项目并用模拟方法选出的。备选项目受到可用的外汇，地面水，公共发展基金和实施能力的限制。采用线性规划方法还可弄清这些受限制的资源可用到什么程度，以及投入后产生的效果如何，并可为整个流域制订一个内部协调一致的最优水利发展规划。

工程基本完成后产生了实际效果。

## § 0-4 系统工程的步骤

一个大型的系统，它的开发、建造和运用是分阶段按一定步骤进行的。根据多年来系统工程的实践，人们总结出一套工作步骤。下面将介绍几种划分阶段与步骤的方法<sup>[10-41]</sup>，可供使用参考。

每个阶段和步骤的工作都必须以系统工程的基本手法为基础。所谓系统工程的基本手法，指的是应该把所研究的对象当作系统来分析，对分析结果加以综合后产生的就是系统的组成部分，然后再对这个系统进行评价，如图 0-2 所示，这样反复进行，直到能有效地实现预定目的为止。

所谓分析，就是为了使我们的目的能够最好地实现，应该如何构成系统。可以应用各种分析方法对系统进行模拟、计算，从而获得系统设计所必需的信息。在分析过程中，每次结果都要同制订的评价标准作比较，在考虑环境条件的情况下，按照比较后的差距反复进行分析，直到满足评价要求为止，然后转入综合。

所谓综合，就是根据分析与评价结果确定系统的构成方式和动作方式，作出系统的设计。设计最好能有多种方案，然后按评价标准从不同的观点和角度反复进行综合评价，选出最优的设计，这种反复过程是一种反馈过程，如图 0-2 所示。

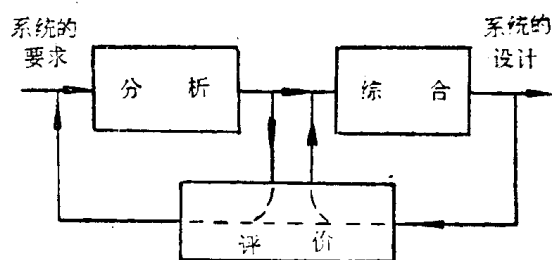
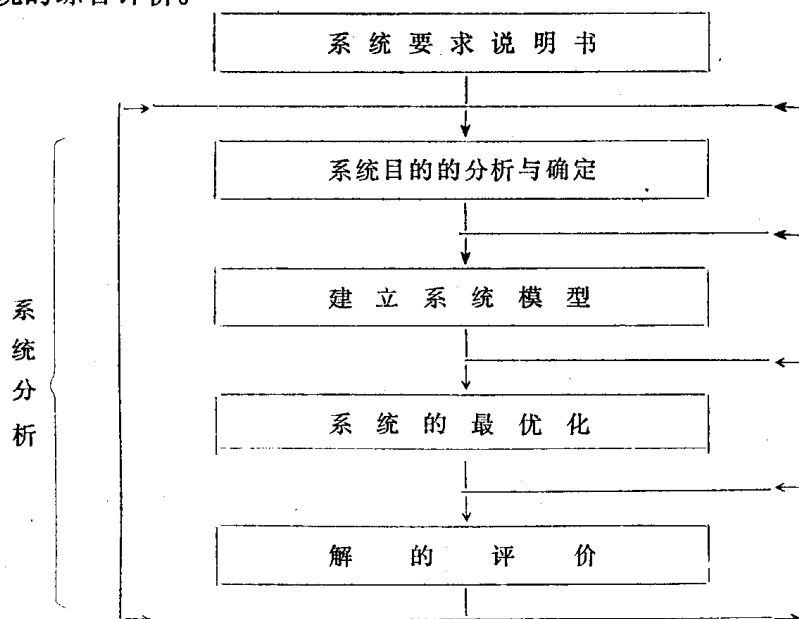


图 0-2

上面谈到的过程实际上可以说是分成三步：

1. 系统分析；
2. 系统设计；
3. 系统的综合评价。



系统设计

系统的综合评价

