

水运系统工程

李振福 编著

王 诺 主审

大连海事大学出版社

水运系统工程

李振福 编著

王 诺 主审

大连海事大学出版社

© 李振福 2007

内容简介

本书是适应航运管理专业特色的系统工程教材,同时也兼顾了交通运输规划与管理专业的特点,力求满足航运管理专业及交通运输规划与管理专业学生工作实践的需要。

本书依次介绍了系统与系统工程、系统工程方法论、水运系统分析、水运系统评价、水运系统决策、水运系统规划等内容。详细阐述了系统与系统的概念,以及系统工程的基础理论;系统工程的主要方法的框架、步骤;水运系统分析的方法、技术、对象;系统评价的原则、内容和主要方法;水运系统决策内容、方法和决策支持系统框架;水运系统规划的目标、原则、水运系统需求的预测方法等。

本书着力引导学生建立科学的系统思维,使学生在工作中能够很好地遵循宏观研究和微观研究协调一致、定量分析和定性分析合理统一,做到管理以人为本,方法以客观为准。

图书在版编目(CIP)数据

水运系统工程 / 李振福编著. —大连:大连海事大学出版社, 2007. 8

ISBN 978-7-5632-2080-9

I. 水... II. 李... III. 水路运输—系统工程 IV. U6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 128743 号

大连海事大学出版社出版

地址:大连市凌海路1号 邮编:116026 电话:0411-84728394 传真:0411-84727996

<http://www.dmupress.com> E-mail:cbs@dmupress.com

大连华伟印刷有限公司印装 大连海事大学出版社发行

2007年8月第1版 2007年8月第1次印刷

幅面尺寸:185 mm×260 mm 印张:12.5

字数:301千 印数:1~2000册

责任编辑:黎为 封面设计:王艳

ISBN 978-7-5632-2080-9 定价:25.00元

前 言

系统工程兴起于 20 世纪中叶,是把自然科学和社会科学中的某些思想、理论、方法与实践有机结合的一门新兴交叉学科。近年来,随着科学技术的进步,系统工程的应用越来越广泛。作为航运管理专业的学生,有必要掌握系统工程的理论和方法,以便于更好地服务于航运发展及经济建设。

随着系统工程研究的普及和深入,出现了很多版本的系统工程教材,但由于各自的侧重点和普适性要求,还没有特别适合航运管理专业学生使用的系统工程教材出现。基于多年的教学实践,编者依据航运管理专业的独特要求,编写了这部适应航运管理专业特点的水运系统工程教材。

本书分为六章。前两章是系统工程基础理论与方法部分;第三章至第五章是系统工程方法在水运系统中的应用研究部分;第六章是系统工程与水运系统规划的结合分析部分。具体为:第一章主要阐述了系统与系统的概念,以及系统工程的基础理论等;第二章介绍系统工程的主要方法的框架、步骤等内容;第三章介绍了系统分析的方法、技术(系统模型与模拟)、对象等内容;第四章介绍了系统评价的原则、内容和主要方法等内容;第五章着重介绍了系统决策内容、方法和决策支持系统框架等;第六章重点介绍了水运系统规划的目标、原则,水运系统需求的预测方法等。

本书在内容的选取上,除了要尽量考虑航运管理专业的独特需求外,还力求在思路更符合航运管理业务特点,将做人、做事和学知识有机结合,并更加注重引导学生关注客观实际,使宏观研究和微观研究协调一致、定量分析和定性分析合理统一,期望学生能够做到管理以人为本,方法以客观为准。

本书在编写过程中参阅了大量中外文献资料,部分章节还引用了少量实例,特别是孙东川等的《系统工程引论》、刘舒燕的《交通运输系统工程》等教材;山西财经大学张所地教授的“管理决策”教案和浙江大学王惠教授的“系统工程导论”教案等。编者真心表以深深谢意,没有这些资料,不能写成此书。

本书是特意为航运管理专业量身打造的系统工程教材,但也关注了整个交通运输系统的要求和发展,故此书也可作为交通运输专业的系统工程教材和相关专业的研究生教材。

本书写作过程中得到了编者博士后合作导师杨忠振教授及大连海事大学交通工程与物流学院其他老师的帮助和指导,港口和系统工程专家、大连海事大学交通工程与物流学院院长王诺教授对本书进行了严格审阅,在此表示衷心感谢。

真诚希望各位同行、专家以及使用本书的老师和同学对本书提出宝贵意见!成书仓促,加之本人学识有限,难免有所疏漏,还请各位批评指正!

编者

2007 年 6 月

目 录

第一章 系统与系统工程	(1)
第一节 系统概述	(1)
一、系统思想的发展.....	(1)
二、什么是系统.....	(2)
三、系统的特征.....	(2)
四、系统的分类.....	(3)
五、系统的结构和功能.....	(5)
第二节 系统工程	(6)
一、系统工程概述.....	(6)
二、系统工程解决问题的主要特点.....	(7)
三、系统工程的学科交叉特征.....	(8)
四、系统工程的主要理论基础.....	(8)
第三节 系统工程的发展	(12)
一、系统工程的产生与发展.....	(12)
二、系统科学与系统工程在中国的发展.....	(14)
三、系统工程研究趋势与展望.....	(15)
第四节 水运系统工程	(16)
一、物流系统分析.....	(16)
二、港口装卸系统分析.....	(18)
三、船舶运输系统分析.....	(20)
四、运输生产管理系统分析.....	(20)
五、设备管理系统分析.....	(21)
第二章 系统工程方法论	(23)
第一节 霍尔方法论	(23)
一、时间维(粗结构).....	(23)
二、逻辑维(细结构).....	(24)
三、活动矩阵.....	(27)
四、专业维与三维结构.....	(27)
第二节 软系统方法论	(28)
一、对问题的认识.....	(28)
二、硬系统方法论的局限性.....	(28)
三、软系统方法论解决问题的步骤.....	(29)
四、软系统方法论的应用情况及评价.....	(31)
第三节 综合集成法	(32)
一、综合集成的含义.....	(32)
二、综合集成法和综合集成研讨厅体系.....	(33)

第四节 物理—事理—人理系统方法论	(36)
一、物理—事理—人理系统方法论的基本概念	(36)
二、WSR 系统方法论的主要步骤	(38)
三、WSR 系统方法论中常用的方法	(39)
四、系统工程项目研究的一般过程	(40)
第三章 水运系统分析	(42)
第一节 系统分析概述	(42)
一、系统分析的定义	(42)
二、系统分析的要素	(42)
三、系统分析的原则	(43)
四、系统分析的基本特点	(43)
五、系统分析的内容	(44)
六、系统分析的要点和步骤	(44)
第二节 系统分析技术	(45)
一、系统模型	(46)
二、系统模拟	(50)
第三节 水运系统结构分析	(59)
一、系统结构概念	(59)
二、系统结构分析的任务	(59)
三、系统结构分析方法	(60)
四、水运系统结构分析	(64)
第四节 水运系统投入产出分析	(68)
一、投入产出表的一般结构	(69)
二、投入产出表中的基本关系	(71)
三、水运系统投入产出分析	(75)
第五节 水运系统目标分析	(78)
一、系统目标分析分类	(78)
二、系统目标的建立	(79)
三、目标冲突的协调	(80)
第六节 水运系统环境分析	(81)
一、系统环境的概念	(81)
二、环境因素及分类	(81)
三、环境因素的确定与评价	(81)
第四章 水运系统评价	(84)
第一节 系统评价概述	(84)
一、系统评价的概念	(84)
二、系统评价的特点	(84)
三、系统评价的复杂性	(85)

四、系统评价的原则.....	(85)
五、系统评价的步骤.....	(86)
第二节 水运系统评价指标体系.....	(86)
一、系统评价指标体系的建立.....	(86)
二、评价指标的标准化.....	(87)
三、评价指标权重的确定.....	(89)
第三节 一般综合评价方法.....	(92)
一、简单线性加权法.....	(92)
二、理想解法(TOSIS法).....	(92)
三、加权平方和法.....	(94)
四、功效系数法.....	(96)
五、主次兼顾法.....	(97)
六、分层系列法.....	(97)
七、交叉增援矩阵法.....	(97)
第四节 层次分析法.....	(99)
一、层次分析法的步骤.....	(99)
二、构造递阶层次结构模型.....	(99)
三、构造判断矩阵和计算相对权重.....	(100)
四、一致性检验.....	(102)
五、层次总排序.....	(103)
六、层次分析法在水运系统评价中的应用.....	(103)
第五节 模糊综合评价方法.....	(105)
一、模糊综合评价的数学模型.....	(106)
二、模糊综合评价的应用.....	(107)
第五章 水运系统决策.....	(109)
第一节 系统决策概述.....	(109)
一、系统决策的概念与类型.....	(109)
二、系统决策的原则.....	(110)
三、决策系统.....	(112)
第二节 水运系统确定型决策.....	(114)
一、水运系统盈亏决策分析.....	(114)
二、投资项目决策分析.....	(115)
第三节 水运系统非确定型决策.....	(115)
一、悲观准则——华尔德(Wald)法.....	(115)
二、乐观准则——最大最大法.....	(116)
三、最小遗憾准则——萨凡奇(Savage)法.....	(116)
四、折中准则——赫威斯(Hurwicz)法.....	(117)
五、等可能性准则——拉普拉斯(Laplace)法.....	(118)
第四节 水运系统风险型决策.....	(119)

一、风险型决策问题.....	(119)
二、贝叶斯 (Bayes) 决策分析.....	(120)
三、决策树分析法.....	(127)
第五节 理性期望效用决策理论.....	(129)
一、事态体及其关系.....	(129)
二、效用函数的定义和构成.....	(130)
第六节 马尔科夫决策.....	(137)
一、一次转移概率和一次转移概率矩阵.....	(137)
二、 k 次转移概率和 k 次转移概率矩阵.....	(138)
三、状态概率和稳定状态概率.....	(140)
第七节 决策支持系统.....	(143)
一、决策支持系统 DSS 的定义.....	(144)
二、DSS 的总体结构.....	(144)
三、DSS 的技术构成.....	(145)
第六章 水运系统规划.....	(147)
第一节 概述.....	(147)
一、水运系统规划的目标与任务.....	(147)
二、规划流程及框架设计.....	(147)
第二节 水运系统现状调查与分析.....	(148)
一、水运系统设施调查.....	(148)
二、水运系统运量调查与分析.....	(148)
三、水运系统适应性评价.....	(148)
第三节 系统预测.....	(148)
一、系统预测概述.....	(148)
二、系统预测方法.....	(150)
第四节 水运系统需求预测.....	(178)
一、航道网交通需求预测.....	(178)
二、港口吞吐量预测.....	(185)
三、船型发展预测.....	(185)
第五节 水运系统规划.....	(186)
一、港口规划.....	(186)
二、水运企业运输组织规划.....	(188)
三、航道网规划.....	(189)
参考文献.....	(191)

第一章 系统与系统工程

第一节 系统概述

一、系统思想的发展

半个多世纪以来，“系统”作为一个研究对象引起了很多人的注意，吸引了众多领域的专家对其进行研究和应用，并逐步形成了一门新兴的学科体系，即“系统科学”。系统科学作为一门科学进行研究的时间不是很长，可就其思想发展来说，却是源远流长，从古代系统思想到现代系统科学的演进，经历了相当漫长的历史过程。

系统思想来源于人类长期的社会实践：人类在从事社会实践中，首先要同各种自然系统打交道，同时也要在一定的社会系统中进行活动，自然界和社会客观存在的系统性，通过实践而逐渐为古人所感知、认识和应用，这样就产生了朴素的整体思想或系统观。朴素的整体思想在古希腊哲学和中国古代哲学中，是以朴素辩证法的形式表现出来的。

古希腊哲学集大成者亚里士多德是人类历史上较早地从哲学上论述系统思想的哲学家。贝塔朗菲认为，亚里士多德的世界观和目的论的观点是宇宙程序的一种表达方式。他的“整体大于它的各部分之和”的论点，是系统问题的基本表述，至今仍然正确。在中国古代哲学家中，关于系统问题的哲学论述也不胜枚举。春秋战国时期的许多思想家都强调自然界的统一性，用自发的系统概念观察自然现象。中国较早成书的《周易》就曾试图用阴阳八卦来说明统一的世界。阴阳五行说也体现了朴素的系统概念。它认为金、木、水、火、土是构成世界不可缺少的基本物质要素，并重在揭示五行间存在着的相生相克的关系。东汉时期，张衡提出了“浑天说”。现代耗散结构理论的创始人普利高津在《存在到演化》一文中指出：“中国传统的学术思想是着重于研究整体性和自发性，研究协调和协和。”但是，由于受时代和科学发展的局限，那时人们还缺乏对事物整体的各个细节的认识，因而对事物整体的认识也还不完备。

15 世纪下半叶，近代自然科学开始兴起，天文学、力学、物理学、化学、生物学等得到迅速发展，近代自然科学发展了研究自然界的方法，采用实验、解剖和观察等方法，把自然界的细节从总的联系中抽出来，分门别类地加以研究。这种认识事物的方法反映在哲学上，就形成了形而上学的思维方法。这种思维方法往往忽视或撇开事物总体联系和发展来认识事物，因而缺乏对事物整体性的洞察和把握，以至于只见树木，不见森林。

到了 19 世纪，自然科学取得了巨大的成就，特别是能量转化、细胞和进化论的发现，人类对自然过程的相互联系的认识有了很大的提高。同时，随着近代大工业的发展，出现了马克思主义。马克思关于辩证唯物主义的物质世界整体联系的思想，是对自 17 世纪上半叶以来形成的辩证系统观的高度哲学概括。19 世纪末以来，科学技术的发展进一步推动了系统思

想由定性的哲学理论概括，发展到定量的具有广泛意义的科学思维方式。从 20 世纪 20 年代开始，贝塔朗菲逐步提出了一般系统论的思想。在这个时期，许多人也在不同的研究领域提出了类似的思想。在此基础上，贝塔朗菲在 1937 年正式提出了一般系统论。随着运筹学、控制论、信息论及各门工程学和社会学的发展，特别是 20 世纪 60 年代以来耗散结构、突变论、协同学等现代系统理论的出现与发展，并通过系统工程充实和丰富了实践内容，使系统的定量化研究逐步发展和完善起来，系统科学的体系也正在逐步形成。现在它已发展成与自然科学、社会科学并列的基础科学，是一门独立于其他各门科学的学科。

二、什么是系统

“系统”一词来源于拉丁语的 *systema*，一般认为是“群”与“集合”的意思。长期以来，它存在于自然界、人类社会以及人类思维描述各个领域，早已为人们所熟悉。它频繁出现在学术讨论和社会生活中，但不同的人或同一个人不同的场合会对它赋予不同的含义。究竟什么是系统呢？我们在此采用钱学森给出的对系统的描述性定义：

系统是由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合的具有特定功能的有机整体。

这个定义与类似的许多定义一样，指出了作为系统的三个基本特征：

- 系统是由若干元素组成的；
- 这些元素相互作用、相互依赖；
- 由于元素间的相互作用，使系统作为一个整体具有特定的功能。

虽然有关系统的定义有很多种，但都有包含了上述三个基本的特征，也即它们是系统的基本出发点。

因此，在美国的《韦氏 (Webster) 大辞典》中，“系统”一词被解释为“由有规则的相互作用、相互依赖的形式组成的诸要素集合。”在日本的 JIS (日本工业标准) 中，“系统”被定义为“许多组成要素保持有机的秩序向同一目的的行动的集合体。”前苏联大百科全书中定义“系统”为“一些在相互关联与联系之下的要素组成的集合，形成了一定的整体性、统一性。”《中国大百科全书·自动控制与系统工程》解释“系统”是“由相互制约、相互作用的一些部分组成的具有某种功能的有机整体。”

三、系统的特征

由系统的定义，不难总结出一般系统应具有的下述特性。

1. 整体性

系统整体性是指，具有独立功能的系统要素以及要素间的相互关系根据逻辑统一性的要求，协商存在于系统整体之中。就是说，任何一个要素不能离开整体去研究，要素之间的联系和作用也不能脱离整体去考虑。系统不是各个要素的简单集合，否则它就不会具有作为整体的特定功能，而脱离了整体性，要素的机能和要素之间的作用便失去了原有的意义，研究任何事物的单独部分不能得出有关整体性的结论。系统的构成要素和要素之间的机能、要素间的相互联系要服从系统整体的功能和目的，在整体功能的基础上展开各要素及相互之间的活动，这种活动的总和形成了系统整体的有机行为。在一个系统整体中，即使每个要素并不都很完善，但它们也可以协商、综合成为具有良好功能的系统。相反，即使每个要素都是良好的，但作为整体却可能不具备某种良好的功能，也就不能称之为完善的系统。

2. 集合性

集合的概念就是把具有某种属性的一些对象看成一个整体，从而形成一个集合。集合里的各个对象叫做集合的要素（子集）。系统的集合性表明，系统是由两个或两个以上的可以互相区别的要素所组成的。这些要素可以是具体的物质，也可以是抽象的或非物质的软件、组织等。例如，一个计算机系统，一般都是由 CPU、存储器、输入输出设备等硬件组成；同时还包含有操作系统、程序开发工具、数据库等软件，它们形成一个完整的集合。

3. 层次性

系统作为一个相互作用的诸要素的总体来看，它可以分解为一系列的子系统，并存在一定的层次结构。这是系统结构的一种形式。在系统层次结构中表述了在不同层次子系统之间的从属关系或相互作用的关系。在不同的层次结构中的子系统存在着不同的运动形式，它们一起构成了系统的整体运动特性，为深入研究复杂系统的结构、功能和有效地对系统进行控制与调节提供了条件。

4. 相关性

组成系统的要素是相互联系、相互作用的，相关性说明了这些联系之间的特定关系和演变规律。例如，城市是一个大系统，它由资源系统、市政系统、文化教育系统、医疗卫生系统、商业系统、工业系统、交通运输系统、邮电通信系统等相互联系的部分组成，通过系统内各子系统相互协调的运转去完成城市生活和发展的特定目标。各子系统之间具有密切的关系，相互影响、相互制约、相互作用，牵一发而动全身。要求系统内的各个子系统根据整体目标，尽量避免系统的“内耗”，提高系统整体运行的效果。

5. 目的性

通常系统都具有某种目的。为达到既定的目的，系统都具有一定的功能，而这正是区别这一系统和那一系统的标志。系统的目的一般用更具体的目标来体现。比较复杂的社会经济系统都具有不止一个目标，因此，需要一个指标体系来描述系统的目标。比如，衡量一个工业企业的经营业绩，不仅要考核它的产量、产值指标，而且要考核它的成本、利润和质量指标。在指标体系中各个指标之间有时是相互矛盾的，为此，要从整体出发，力求获得全局最优的经营效果，这就要求在矛盾的目标之间做好协调工作，寻求平衡或折中方案。

6. 适应性

任何一个系统都存在于一定的物质环境之中，因此，它必然要与外界产生物质、能量和信息交换，外界环境的变化必然会引起系统内部各要素的变化。不能适应环境变化的系统是没有生命力的，只有能够经常与外界环境保持最优适应状态的系统，才是具有不断发展势头的理想系统。例如，一家企业必须经常了解市场动态、同类企业的经营动向、有关行业的发展动态和国内外市场的需求等环境的变化，在此基础上研究企业的经营策略，调整企业的内部结构，以适应环境的变化。

四、系统的分类

在自然界和人类社会中普遍存在着各种不同性质的系统，人们为了对系统的性质加以研究，需要对系统存在的各种形态加以探讨。

1. 自然系统与人造系统

按照系统的起源，自然系统是由自然过程产生的系统。这类系统是自然物（矿物、植物、

动物等)所形成的系统,如海洋系统、生态系统等。人造系统则是人们将有关元素按其属性和相互关系组合而成的系统,如人类对自然物质进行加工,制造出各种机器所构成的各种工程系统。

实际上,大多数系统是自然系统与人造系统的复合系统。如在人造系统中,有许多是人们运用科学技术,改造了的自然系统。随着科学技术的发展,出现了越来越多的人造系统。但是,值得注意的是,许多人造系统的出现,破坏了自然生态系统的平衡,造成严重的环境污染和对生态系统良性循环的破坏。近年来,系统工程越来越注意从自然系统的属性和关系中,探讨研究人造系统。

2. 实体系统与概念系统

凡是以矿物、生物、机械和人群等实体行为要素构成的系统称之为实体系统。凡是由概念、原理、原则、方法、制度、程序等概念性的非物质实体所构成的系统称为概念系统,如管理系统、军事指挥系统、社会系统等。在实际生活中,实体系统和概念系统在多数情况下是结合的,实体系统是概念系统的物质基础,而概念系统往往是实体系统的中枢神经,指导实体系统的行为。如军事指挥系统中既包括军事指挥员的思想、信息、原则、命令等概念系统,也包括计算机系统、通信设备系统等实体系统。

3. 动态系统和静态系统

动态系统就是系统的状态变量随时间变化的系统,即系统的状态变量是时间的函数。而静态系统则是表征系统运行规律的数学模型中不含有时间因素,即模型中的变量不随时间变化,它是动态系统的一种极限状态,即处于稳定状态的系统。例如一个化工生产系统是一种连续生产过程,系统中的参数是随着时间变化而变化的动态系统。大多数系统都是动态系统,但是,由于动态系统中各种参数之间的相互关系是非常复杂的,要找出其中的规律性非常困难。有时为了简化起见而假设系统是静态的,或是系统中的参数随时间变化的幅度很小而视同静态的。

4. 开放系统与封闭系统

开放系统是指系统与环境之间具有物质、能量与信息的交换的系统。例如,生态系统、商业系统、工厂生产系统,这类系统通过系统内部各子系统的不断调整来适应环境变化,使其保持相对稳定状态,并谋求发展。开放系统一般具有自适应和自调节的功能。开放系统是具有生命力的系统,一个国家、一个地区、一家企业都应该是一个开放系统,通过和外界环境不断地交换物质、能量和信息,而谋求不断发展。

封闭系统是指系统与环境之间没有物质、能量和信息的交换,由系统的界限将环境与系统隔开,因而呈现一种封闭状态的系统。这类系统要能存在,就应要求该系统内部的各个子系统及其相互关系之中存在着某种均衡关系,以保持系统的持续运行。

研究开放系统,不仅要研究系统本身的结构与状态,而且要研究系统所处的外部环境,剖析环境因素对系统的影响方式及影响程度,以及环境随机变化的因素。由于环境是动态变化着的,具有较大的不确定性,甚至出现突变的环境。所以当—个开放系统存在于某一特定环境之中时,该系统必须具有某些特定的功能。

值得强调的是,现实世界中没有完全意义上的封闭系统。系统的开放性和封闭性概念不能绝对化,用相对程度对其进行衡量才比较符合实际。

5. 简单系统、简单巨系统和复杂巨系统

按复杂程度可分为简单系统、简单巨系统和复杂巨系统。简单系统是指组成系统的子系统（要素）数量比较少，而且子系统之间的关系也比较简单的系统，如一家工厂、一台设备等。

简单巨系统是指组成系统的子系统数量非常多、种类相对也比较多（如几十种，甚至上百种），但它们之间的关系较为简单的系统，如激光系统等。研究处理这类系统的方法不同于一般系统的直接综合法，而是采用统计方法加以概括，耗散结构理论和协同学理论在这方面作出了突出的贡献。

复杂巨系统是指组成系统的子系统数量很多，具有层次结构，它们之间的关系又极其复杂的系统，如生物体系统、人脑系统、社会系统等。其中社会系统是以有意识活动的人作为子系统的，是最复杂的系统，所以又称为特殊的复杂巨系统。这些系统又都是开放的，所以也称为开放的复杂巨系统。目前，研究、处理开放复杂巨系统的方法尚在探讨中。

五、系统的结构和功能

1. 系统的结构

各种系统的具体结构是大不一样的，许多系统的结构是很复杂的。从一般的意义上说，系统的结构可以用以下式子表示：

$$S = \{E, R\} \quad \text{或者} \quad \{E|R\} \quad (1-1)$$

这里， S 表示系统（System）， E 表示要素（Elements）的集合（first set）， R 表示建立在集合 E 上的各种关系（relations）的集合（second set）。

由式（1-1）可知，作为一个系统，必须包括其要素的集合与关系的集合，两者缺一不可。两者结合起来，才能决定一个系统的具体结构与特定功能。

要素集合 E 可以分为若干子集 E_i ，例如一家企业，其要素集合 E 可以分为人员子集 E_1 ，设备子集 E_2 ，原材料子集 E_3 ，产品子集 E_4 ，等等；而人员子集 E_1 又可以分为工人子集 E_{11} ，技术人员子集 E_{12} ，管理人员子集 E_{13} ，等等，即

$$E = E_1 \cup E_2 \cup E_3 \cup \dots \quad (1-2)$$

$$E_1 = E_{11} \cup E_{12} \cup E_{13} \cup \dots \quad (1-3)$$

不同的系统，其要素集合 E 的组成是大不一样的，例如学校与企业、企业与军队、中国与美国，其要素集合 E 的组成有很大差异。但是，在要素集合 E 之上建立的关系集合 R ，从系统论而言，却是大同小异的。不失一般性，可以表示为：

$$R = R_1 \cup R_2 \cup R_3 \cup R_4 \quad (1-4)$$

其中，

R_1 ：要素与要素之间、局部与局部之间的关系（横向联系）。

R_2 ：局部与全局（系统整体）之间的关系（纵向联系）。

R_3 ：系统整体与环境之间的关系。

R_4 ：其他各种关系。

当然，每一个 R_i 都是可以细分的，例如 R_1 ，不但包含同一层次上不同局部之间、不同要素之间的关系，还包含系统内部不同层次之间的关系，但是，无论对于学校、企业、军队，或者国家，式（1-4）都是成立的。

在系统要素给定的情况下，调整这些关系，就可以提高系统的功能。这就是组织管理工作的作用，是系统工程的着眼点。

2. 系统的功能

各种系统的具体功能是大不一样的，例如汽车和计算机、学校和医院。但是，从一般意义上讲，系统的功能如图 1-1-1 所示。

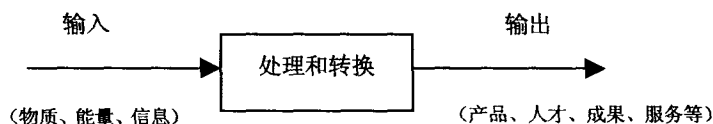


图 1-1-1 系统的功能

就是说，系统的功能包括接受外界的输入，在系统内部进行处理和转换（加工，组装），向外界输出。

系统的输入是作为原材料的物质、能量与信息。系统的输出是经过处理和转换的物质、能量与信息，例如产品、人才、成果、服务等等。所以，系统可以理解为一种处理和转换机构，它把输入转变为人们所需要的输出。也可以看成一种函数关系，用数学式子表示：

$$y = f(x) \quad (1-5)$$

其中，自变量 x 是输入的原材料，因变量 y 是产品和服务。 x 与 y 都是矢量，就是说，是多输入、多输出的； f 也可能是矢量函数，就是说，系统具有多种处理和转换功能。

从狭义来讲，处理和转换就是系统的功能。扩大一些说，把接受输入与向外输出也作为系统的功能。对于闭环系统，往往把反馈也作为系统的功能。

系统工程的任务旨在提高系统的功能，特别是提高系统的处理和转换的效率。即：在一定的输入条件下，使得输出多、快、好；或者，在一定的输出要求下，使得输入少与省。

系统的功能或总体效果最优，并不要求系统的所有组成要素都孤立地达到最优（那样会使系统的成本太高）。另一方面，系统的所有组成要素都孤立地达到了最优并不意味着一定有系统功能或总体效果的最优，为了实现系统总体效果最优，有时还要遏制甚至牺牲某些局部的效果（利益）。这里面有一个协调的问题，有一种“抓总”的工作、统筹兼顾的安排，即整个系统的合理组织与管理，各种资源的合理配置与使用。这正是系统工程所要做的工作。

第二节 系统工程

一、系统工程概述

系统工程在系统科学结构体系中属于工程技术类，是一门处于发展阶段的新兴学科，其应用领域十分广阔。由于它与其他学科相互渗透、相互影响，不同专业领域的人对其理解不尽相同，因此，要给出一个统一的定义比较困难。一般认为用定量和定性相结合的系统思想和系统方法处理大型复杂系统的问题，无论是系统的设计或组织建立，还是系统的经营管理，都可以看成是一种工程实践，都可以统称为系统工程。

下面列举国内外学术界和工程界对系统工程所作的解释，以帮助我们认识系统工程这门学科的内涵。

(1) 中国著名学者钱学森指出：“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”，“系统工程是一门组织管理的技术。”

(2) 美国著名学者 H·切斯特纳 (H.Chestnut) 指出：“系统工程认为虽然每个系统都由许多不同的特殊功能部分所组成，而这些功能部分之间又存在着相互关系，但是每一个系统都是完整的整体，每一个系统都要求有一个或若干个目标。系统工程则是按照各个目标进行权衡，全面求得最优解（或满意解）的方法，并使各部分能够最大限度地互相适应。”

(3) 日本学者三浦武雄指出：“系统工程与其他工程学的不同之处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边缘科学。因为系统工程的目的是研究系统，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，为了圆满解决这些交叉领域的问题，所以除了需要某些纵向的专门技术以外，还要有一种技术从横向把它们组织起来，这种横向技术就是系统工程。也就是研究系统所需的思想、技术和理论等体系化的总称。”

(4) 《中国大百科全书·自动控制与系统工程卷》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。它是系统科学中直接改造世界的工程技术。”

(5) 日本工业标准 (JIS) 规定：“系统工程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。”

(6) 美国军用标准 MIL-STD-499A 定义：“系统工程是将科学和工程技术的成就应用于：
(i) 通过运用定义、综合、分析、设计、试验和评价的反复迭代过程，将作战需求转变为一组系统性能参数和系统技术状态的描述；(ii) 综合有关的技术参数，确保所有物理、功能和程序接口的兼容性，以便优化整个系统的定义和设计；(iii) 将可靠性、维修性、安全性、生存性和其他有关因素综合到整个工程工作中，以满足费用、进度、保障性和技术性指标。”

二、系统工程解决问题的主要特点

系统工程的研究对象是大型复杂的人工系统和复合系统；系统工程的内容是组织协调系统内部各要素的活动，使各要素为实现整体目标发挥适当作用。系统工程的目的是实现系统整体目标最优化，因此，系统工程是一门现代化的组织管理技术，是特殊的工程技术，是跨越许多学科的边缘科学。系统工程具有下列一些特点。

1. 整体性（系统性）

整体性是系统工程最基本的特点，系统工程把所研究的对象看成一个整体系统，这个整体系统又是由若干部分（要素与子系统）有机结合而成的，因此，系统工程在研制系统时总是从整体性出发，从整体与部分之间相互依赖、相互制约的关系中去揭示系统的特征和规律，从整体最优化出发去实现系统各组成部分的有效运转。

2. 关联性（协调性）

用系统工程方法去分析和处理问题时，不仅要考虑部分与部分之间、部分与整体之间的相互关系，而且还要认真地协调它们的关系。因为系统各部分之间、各部分与整体之间的相互关系和作用直接影响到整体系统的性能，协调它们的关系便可提高整体系统的性能。

3.综合性(交叉性)

系统工程以大型复杂的人工系统和复合系统为研究对象,这些系统涉及的因素很多,涉及的学科领域也较为广泛,因此,系统工程必须综合研究各种因素,综合运用各门学科和技术领域的成就,从整体目标出发使各门学科、各种技术有机地配合,综合运用,以达到整体优化的目的。如把人类送上月球的“阿波罗登月计划”,就是综合运用各学科、各领域成就的产物,这样一项复杂而庞大的工程没有采用一种新技术,而完全是综合运用现有科学技术的结果。

4.满意性(最优化)

系统工程是实现系统最优化的组织管理技术,因此,系统整体性能的最优化是系统工程所追求并要达到的目的。由于整体性是系统工程最基本的特点,所以系统工程并不追求构成系统的个别部分最优,而是通过协调系统各部分的关系,使系统整体目标达到最优。

三、系统工程的学科交叉特征

系统工程是以大规模复杂系统为研究对象的一门交叉学科。它把自然科学和社会科学中的某些理论、方法、思想、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,应用定量与定性分析相结合的方法和计算机等技术工具,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的,以便最充分地发挥人力、物力、财力和潜力,通过各种管理技术,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。

四、系统工程的主要理论基础

人类的历史,是一个由必然王国向自由王国不断发展的历史。社会的进步、科技的发展,加之社会经济活动的日趋复杂,以及社会分工的不断细化,人们对统筹兼顾、全面规划、发展战略等原则从朴素的、自发的应用,提高到科学、自觉的应用,把它们从经验提高到科学理论。系统工程的主要理论基础是由一般系统论、大系统理论、经济控制论、控制论、运筹学等学科相互渗透、交叉发展而形成的。

1.系统理论

系统论、信息论、控制论等新兴学科从不同的侧面揭示了客观事物的本质联系和内在运动规律,由于它们从本质上都是研究系统的理论,所以统称为系统理论。系统理论扩大了人们研究问题的广度和深度,极大地提高了人们认识世界和改造世界的能力,同时推动了系统科学的形成和发展,成为系统工程的重要理论基础。

(1)一般系统论

一般系统论是美国理论生物学家路德维希·冯·贝塔朗菲通过对各种不同系统进行科学理论研究而提出的关于适用于一般系统的学说。他把一般系统论的研究内容概括为关于系统的科学、数学系统论、系统技术、系统哲学等。由于以往对系统的研究属于哲学观念的范畴,而贝塔朗菲在创立一般系统论时强调它的科学性,指出一般系统论属于逻辑和数学的领域,它的任务是确立适用于“系统”的一般原则。贝塔朗菲当时提出的基本观点:

- 系统观点 一切有机体都是一个整体(系统),这个整体是由部分结合而成的,其特性和功能不等于各部分特性和功能的简单相加。

- 动态观点 一切有机体本身都处于积极的运动状态。
- 等级观点 各种有机体都是被严格的等级组织起来的。

这些观点,不仅适用于有机体,而且也适合于经济、社会和科学技术等一切系统,已发展成为一般系统论的主要内容。一般系统论用相互关联的综合思想来取代分析事物的零散思维,突破了以往分析方法的局限,如实地把对象作为一个有机整体加以考察,从整体与部分相互依赖、相互制约的关系中揭示事物的特征和运动规律。一般系统论给各门学科带来新的动力和新的研究方法,使许多学科面目焕然一新,并为系统工程的发展、使人类走向系统时代奠定了理论基础。

(2) 控制论

控制论是由美国数学家、生理学家维纳在 20 世纪 40 年代创立的。他所著的《控制论》中写道:“控制论是研究动物和机器全过程的控制和通信的科学理论。”钱学森认为“控制的对象是系统”,“为了实现系统自身的稳定和功能,系统需要取得、使用、保持和传递能量、材料和信息,也需要对系统的各个构成部分进行组织”,“控制论是研究系统各个部分如何进行组织,以便实现系统的稳定和有目的的行为”。由此可见,控制论是研究系统的调节与控制的一般规律的科学,它是自动控制、无线电通信、神经生理学、生物学、心理学、电子学、数学等多门学科互相渗透的产物。

在实际应用中,控制论的具体内容有:最优控制理论,自适应、自学习和自组织系统理论,模糊理论,大系统理论等。

控制论是一门跨学科的具有方法论性质的交叉学科。现在,控制论已形成以理论控制论为中心的四大分支:工程控制论、生物控制论、社会控制论(包括管理控制论、经济控制论)和智能控制论。它横跨工程技术领域、生物领域、社会领域和思维领域,并不断向各门学科渗透,促进了自然科学和社会科学的紧密结合。

(3) 信息论

信息论是一门起源于通信理论、研究信息传输和信息处理一般规律的学科,是由美国科学家香农在 1948 年提出的。

信息论的基本思想和方法完全撇开了物质、能量的具体运动形态,而把任何通信和控制系统都看做是一个信息的传输和加工处理系统,把系统有目的的运动抽象为信息变换过程,通过系统内部的信息交流使系统维持正常的有目的的运动。事实上,任何实践活动都可以简化为多种流:人员流、物质流、资金流和信息流等,其中信息流起着支配作用,它调节着其他流的数量、方向、速度和目标,通过系统内部信息流的作用才能使系统维持正常的和有目的的运动,因此,可以说信息论是控制论的基础。

香农把信息定义为“不确定性的减少”。他认为,信息量是把某种不确定性趋向确定的一种度量。信息量的大小,取决于消息的不确定程度。消息的不确定程度大,则发出的信息量就大,消息的不确定程度小,则发出的信息量就小。

目前,信息论的研究与应用已超出通信领域而广泛渗透到其他学科,特别是进入对大系统和复杂系统的信息研究领域,因此,需要从更为广泛的领域来探讨其一般特征、规律和原理。形成更为一般性的理论,这就导致了信息科学的产生。信息科学是以信息论为基础,与计算机和自动化技术、生物学、数学、物理学等学科交叉而发展起来的一门新兴学科,它