

高等学校试用教材

系统工程导论

13
西安交通大学汪应洛 主编



机械工业出版社

系统工程导论

西安交通大学汪应洛 主编

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 · 新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $10^{5/8}$ · 字数 280 千字
1982年1月北京第一版 · 1982年1月北京第一次印刷
印数 00,001—13,600 · 定价 1.30 元

*

统一书号: 15033 · 5095

GFS2/11

前 言

本书是根据 1978 年 4 月在天津召开的高等学校一机部对口专业座谈会确定的规划及同年 12 月在合肥召开的工业电气自动化专业教材会议拟订通过的“系统工程导论”编写大纲编写的。

系统工程是在二十世纪中期才开始兴起的一门边缘科学。它是把自然科学和社会科学中某些思想、理论、方法等根据系统总体协调的需要，将其有机地联系而成的一门边缘科学。

当前，由于技术和经济的不断发展和增长，深感作为高等学校自动化专业的学生，需要从系统总体出发来观察处理问题，需要具备系统工程的有关知识。“系统工程导论”就是为这一目的而编写的一本教材。本书主要内容包括两大部分：第一部分从第一章到第二章，主要讲述系统和系统的概念，系统分析的概念、内容和步骤等；第二部分从第三章到第七章，主要讲述系统方法论有关的内容。如模型化技术和仿真技术，最优化技术，系统可靠性，网络系统以及生产管理系统等。

参加本书编写的有：汪应洛副教授（第一章，第二章决策分析），邵济煦副教授（第四章），陶谦坎（第二章系统分析，第三章，第六章，第七章），郭干慈（第五章），吴受章（第四章大系统优化）等同志。汪应洛副教授担任主编，陶谦坎同志协助进行了统编工作。

本书经大连工学院王众托教授主审，夏元富、唐焕文、刘培玉、汪克夷等同志参加了审稿。

本书在编写过程中得到西安交通大学系统工程研究所的万百五副教授、李怀祖、王浣尘、孙国基等同志的热情帮助，在此表示衷心的感谢。

本书可作为工业电气自动化专业试用教材，亦可作管理工程

IV

专业教学参考书。此外，亦可供有关工程技术人员、管理干部自学和参考。阅读本书前必须具备相应的数学知识以及控制论和管理科学的有关知识。

鉴于系统工程涉及的知识面非常广泛，又限于我们的水平，书中不妥和错误之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

1980年12月

目 录

前言

第一章	系统概念与系统工程	1
§ 1-1	系统的概念	1
§ 1-2	系统的形态和性质	4
§ 1-3	系统工程是一门新兴的边缘学科	5
§ 1-4	系统工程的发展过程	13
第二章	系统分析	17
§ 2-1	系统分析的基本概念和作用	17
§ 2-2	系统分析的要素和步骤	20
§ 2-3	系统目的分析和确定	22
§ 2-4	系统模型化和最优化	25
§ 2-5	系统评价	30
§ 2-6	决策分析	38
第三章	模型化技术和仿真技术	47
§ 3-1	系统模型的分类	47
§ 3-2	结构模型解析法 (ISM)	49
§ 3-3	状态空间法	59
§ 3-4	建立最优化数学模型的方法——线性规划法	78
§ 3-5	仿真技术	81
第四章	最优化技术	103
§ 4-1	线性规划 (LP)	103
§ 4-2	非线性规划 (NLP)	125
§ 4-3	动态规划 (D. P)	154
§ 4-4	大系统优化	165
§ 4-5	随机服务系统理论	193
第五章	系统可靠性	207
§ 5-1	可靠性的必要性	207

VI

§ 5-2	可靠性的特征量和数学表示	209
§ 5-3	可靠性设计	214
§ 5-4	可靠性预测	217
§ 5-5	可靠度分配	229
§ 5-6	维修性	237
第六章	网络系统	241
§ 6-1	网络系统及其特征	241
§ 6-2	图的基本概念和矩阵表示法	248
§ 6-3	PERT 网络系统	259
§ 6-4	最大流量问题	274
§ 6-5	最短路径问题	282
§ 6-6	最短回路和最短树	287
第七章	生产管理系统	293
§ 7-1	生产管理系统及其特征	293
§ 7-2	生产管理系统的组织与计划	306
§ 7-3	管理信息系统	315
参考文献		333

第一章 系统概念与系统工程

§ 1-1 系统的概念

系统这一概念来源于人类的长期社会实践，但是由于受到科学技术早年历史的影响，系统这个概念一直没有受到应有的重视，在美国直到二十世纪的四十年代才开始在工程设计中应用了系统这一概念，到了五十年代以后才把系统的概念逐步明确化、具体化；并在工程技术系统的研究和管理中得到了广泛的应用。

其实，无产阶级的革命导师恩格斯早在 1886 年就对系统的概念作了精辟的论述。恩格斯在《路德维希·费尔巴哈和德国古典哲学的终结》一文中就曾指出：“旧的研究方法和思维方法，黑格尔称之为‘形而上学’的方法，主要是把事物当做一成不变的东西去研究，它的残余还牢牢地盘踞在人们的头脑中，这种方法在当时是有重大的历史根据的。必须先研究一个事物是什么，而后才能研究过程。必须先知道一个事物是什么，而后才能觉察这个事物中所发生的变化。自然科学中的情形正是这样。认为事物是既成的东西的旧形而上学，是从那种把非生物和生物当做既成事物来研究的自然科学中产生的。而当这种研究已经进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。”（马克思恩格斯选集第四卷第 240~241 页）。恩格斯还把这一认识上的飞跃称为：“一个伟大的基本思想，即认为世界不是一成不变的事物的集合体，而是过程的集合体”。（同上，第 239~240 页）这里，恩格斯所讲的过程的集合体，正阐明了系统的哲学概念，它说明了系统中各个组成部分的相互作用和整体的发展变化。现代科学技术的贡献在于把系统这一概念具体化了，并且提供了分析系统的理论和方法。

美国学者罗·西·阿柯夫教授 (Russell. C. Ackoff) 指出, 美国从四十年代就进入了“系统的时代”。五十年代以来, 系统的概念得到广泛的应用, 这是对科学技术史方面形而上学观点的一个重大变革。

传统的分析方法往往是把一个事物分解成许多独立的部分来分别进行研究, 人们可以把问题分得很细, 然后进行深入的研究。但是这样的研究方法往往容易把事物看成是孤立的、静止的。因而所得出的结论只能限制在一个局部的条件下, 如果放到更大的范围来考察, 那个结论就可能是片面的, 甚至是错误的。

系统工程认为, 应当把事物当作一个整体来研究, 把一个研究的对象看作一个系统 (System), 从系统整体出发来研究系统内部各组成部分之间的有机联系和系统外部环境的相互关系, 这就是综合的研究方法。

一、系统的定义

系统是具有特定功能的、相互间具有有机联系的许多要素 (Element) 所构成的一个整体。

在韦氏大辞典 (Webster 大辞典) 中“系统”一词被解释为“有组织的或被组织化的整体; 结合着的整体所形成的各种概念和原理的综合; 由有规则的相互作用, 相互依存的形式组成的诸要素集合等等”。

在日本的 JIS 工业标准中, “系统”被定义为: “许多组成要素保持有机的秩序, 向同一目的行动的东西”。

美国著名学者 L. V. 贝塔朗菲把“系统”定义为“相互作用的诸要素的综合体”。

美国学者阿柯夫教授认为: 系统是由两个或两个以上相互联系的任何种类的要素所构成的集合。因此, 系统不是一个不可分解的要素, 而是一个可以分成许多部分的整体。

二、系统概念的剖析

1. 在整体中每一个要素的性质或行为将影响到整体的性质或行为, 例如在人体这个系统整体内每一个器官的性质或行为将

会影响人体这个整体的性质或行为。

2. 每一个要素的性质或行为，以及它影响整体的途径依赖于其它一个或几个要素的性质或行为。因此，没有一个要素是独立地影响整体的，同时，每一个要素至少被其它一个要素所影响。例如，人体内心脏的行为以及它对人体整体的影响依赖于肺脏的行为。

3. 每一个要素对于整体都不具有独立的影响，所以整体不能分解成独立的要素，一个系统不能分解成独立的子系统。例如，人体内的所有子系统，象神经系统、呼吸系统、消化系统等是相互影响的，并且每一个子系统都非独立地影响整体的性能。因此，任何一个子系统都不可能脱离人体而成为一个独立的系统。

综上所述，一个形成系统的诸要素的集合永远具有一定的特性，或者表现一定的行为，而这些特性或行为不是它的任何一个部分所能具有的。例如，一个人能写字、走路，但是它的任何一个部分都不能做到这一点。

一个系统是一个可以分成许多要素所构成的整体，但从系统功能的观点来看，它又是一个不可分的整体，如果把系统拆开，那么它将失去其原来的性质。如果，把人体中的眼睛、手、脚拆开，那么就不再成其为人了。

在物质世界中，一个系统中的任何部分可以被看成为一个系统，而每一个系统又可以成为一个大规模系统中的一个部分。在系统的时代，人们倾向于把事物看成一个大的整体的一部分，而不是把整体拆开。这是一种综合的思想方法，它不同于传统的分析方法。

三、系统的特性

综观上述有关系统的概念，一般系统都具有四种特性：

1. 整体性 系统是由两个或两个以上的可以相互区别的要素按照作为系统整体所应具有的综合整体性而构成。构成系统的各要素虽然具有不同的性能，但们是根据逻辑统一性的要求而

构成的整体。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。因此，即使每个要素并不都很完善，但它们也可以综合、统一成为具有良好功能的系统。反之，即使每个要素是良好的，但作为整体却不具有某种良好的功能，也就不能称之为完善的系统。

2. 相关性 系统内各要素之间是有机联系的，相互作用的。在这些要素之间具有某种相互依赖的特定关系。例如，对于电子计算机系统来说，各种运算装置、储存装置、控制装置、输入输出装置等各个硬件和操作系统、程序等各种软件都是构成要素，它们之间通过特定的关系，有机结合在一起，就形成一个具有特定性能的计算机系统。

3. 目的性 通常系统都具有一定的目的性，要达到既定的目的，系统都具有一定的功能。

4. 环境适应性 任何一个系统都存在于一定的物质环境中，必须适应外部环境的变化。在研究系统的时候，环境往往起着重要的作用，必须予以重视。

§ 1-2 系统的形态和性质

在自然界和人类社会中普遍存在着各种系统，例如太阳系是由某些行星和卫星等组成的。同样，在人类社会中存在着生产系统、消费系统等等。为了对系统的性质加以研究，我们就必须对系统存在的各种形态加以探讨。系统形态分类是：

1. 自然系统与人造系统

自然系统就是说它的组成部分是自然物，比如由矿物、植物、动物等自然物自然形成的系统，像海洋系统、气象系统、生态系统、矿藏系统等。

人造系统是由人工造成的各种要素所构成的系统，如人类对天然物质加工，造出各种机器所构成的各种工程系统，以及各种社会经济系统，科学技术系统等。

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力量，认识、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，目前应该引起注意的是，随着人造系统的发展，破坏了自然生态系统的平衡，使自然环境受到破坏，造成严重的环境污染，甚至出现了威胁人类生存的局面。近年来系统工程愈来愈注意从和自然系统的关系中来研究人造系统。

2. 实体系统和概念系统

凡是以矿物、生物、机械、能量和人等实体为构成要素所组成的系统都是实体系统。凡是由概念、原理、原则、方法、制度、程序等观念性的非物质实体所构成的系统称为概念系统，如科学技术系统，管理系统，教育系统等。

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基础，而概念系统往往为实体系统提供指导和服务。

3. 动态系统和静态系统

动态系统就是系统的状态变量是时间函数，即它的状态变量是随时间而变化的。而静态系统则是表征系统运动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而变化。它只是动态系统的一种极限状态，即处于稳态的系统。

4. 控制系统和行为系统

控制就是为了达到某个目的给对象系统所加的必要动作。控制对象要由控制装置操纵，使其符合规定的目的。因此，为了进行控制而构成的系统叫做控制系统。当控制系统由控制装置自动进行时谓之自动控制系统。

行为系统是以完成目的的行为作为构成要素而形成的系统。所谓行为就是为了达到某一确定的目的而执行某特定功能的一种作用，这种作用能对外部环境产生某些效用。

§ 1-3 系统工程是一门新兴的边缘学科

系统工程是一门新兴的学科，尚处于发展阶段，还不够成

熟，至今还没有统一的定义。

一、‘系统工程’名辞的含义

现列举国内外一些学者对系统工程所作的解释，为我们认识系统工程提供一定的线索与参考。

1. 1967年日本工业标准 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。”

2. 1967年美国学者切斯纳指出：“系统工程认为虽然每个系统都是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，每一个系统都有一定数量的目标。系统工程则是按照各个目标进行权衡，全面求得最优解的方法，并使各组成部分能够最大限度地互相适应”。

3. 1971年日本学者寺野寿郎指出：“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”。

4. 1977年日本学者三浦武雄指出：“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”。

5. 1978年钱学森同志指出：“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，是一种对所有系统都具有普遍意义的科学方法”。

二、‘系统分析’名辞的含义

由于国际上对系统工程与系统分析等名词具有相似的理论和方法，往往只是研究的侧重面不完全相同而采用不同的名词，或

者把它们作为同义语，现在我们列举几个国家的大百科全书中对系统分析的解释作为参考。

1. 《美国大百科全书》中的解释

系统分析是研究相互影响的因素的组成和运用情况。这些因素及其相互的影响完全可能是抽象的，如使用数学方法；也可能是具体的，如运输系统，工业生产系统等。系统分析显著的特点是完整地而不是零星地处理问题，这就要求人们考虑各种主要的变化因素及其相互的影响，运用这种方法常常可以更好地全面地解决问题。因此“系统分析”的意思就是用科学和数学方法对系统进行研究和运用。

2. 美国《麦氏科学技术大百科全书》中的解释

系统分析是运用数学方法研究系统的一种方法。

系统分析的基本概念是，对研究对象（系统）建立一种数学模型，按照这种模型进行数学分析，然后将分析的结果运用于原来的系统。

3. 日本《世界大百科年鉴》中的解释

系统通常是指作用于一个共同目的的两个以上要素的集合体，但它并不单纯是几个要素的集合，而是从输入到输出的整个过程。

系统分析是人们为了从系统的概念上认识社会现象，解决诸如环境问题，城市问题等复杂问题而提出的从确定目标到设计手段的一整套方法。系统分析还可作为系统工程的同义词来理解。系统分析的用处是：通过明确一切和问题有关的要素同实现目标之间的关系，提供完整的资料，以便决策者选择最合理的解决方案。

由于复杂的大系统受到复杂的社会、经济和技术因素的影响，因此分析过程中就必然夹杂决策者个人的价值观和对变化不定的未来的主观臆断或理性判断。这样从方法论上看，系统分析不仅需要计算，还需要依据直观和经验进行判断。从这种意义来说，系统分析的方法既近似科学性，又有某种艺术性。

三、系统工程是一门新兴学科

综上所述，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、方法等内容是广义的系统工程。

系统工程是一门工程学，但它与机械工程、电气工程等其它工程学的某些性质不同。各门工程学都有其特定的工程物质为对象，而系统的对象则不限于某个领域，任何一种物质系统都能成为它的研究对象，而且它的研究对象还不只限于物质系统，它可以包括自然系统、社会经济系统、经营管理系统、军事指挥系统等。由于它处理的对象是信息，在国外有些学者认为系统工程是一种“软科学”，但它在整个工程学体系中占据着非常重要的地位。在实际运用各门工程学于各种系统的研究、设计、制造、运用时，系统工程是一门必需的基本工程技术和组织管理技术。

系统工程作为一门工程技术，就是要改造客观世界并取得实际成果，这就离不开具体的环境和条件，必须有什么问题解决什么问题。避不开客观事物的复杂性，必然是要同时运用多种学科的成果，要综合运用各门学科和各种技术的一门综合性的科学技术体系。系统工程是在运筹学、控制论、电子计算机技术、工程设计、管理科学等学科的基础上发展起来的一门边缘科学。

系统工程作为一门独立的学科，具有它自己独特的思想方法，理论基础，程序体系和方法论。但是，当前系统工程还正在

发展中，尚未形成完善的理论体系和方法论。系统工程思考方法通常叫作系统方法，它是在对系统的概念，系统的基本构成及其各种形态作了深入研究的基础上，把对象作为整体系统来考虑、掌握、分析、设计、制造和使用时的基本思想方法。系统工程也具有自己独特的工作程序体系，虽然在实际运用时，由于对象不同，运用的人各异，所采用的具体程序步骤会各不相同，但其程序体系的一般原则具有普遍意义。

系统工程具有自己特点的方法论，它的方法体系的基础就是运用各种数学方法，计算机技术和控制理论来实现系统的模型化和最优化，进行系统分析和系统设计。从逻辑学的方法体系来讲，需要在理解上述各门学科的基础上来掌握系统工程的方法论，但是，从实践论的观点出发，则需要通过大量的社会实践，去总结供实际使用的各种方法和技术，工程学的实践性是非常突出的。

四、系统工程的方法论

系统工程方法论的基本特点归纳分述如下：

(一) 研究方法上的整体化

把研究对象看作一个系统整体，同时，把研究过程也看作一个整体。人们把系统作为若干子系统有机结合成的整体来设计，对每个子系统的技术要求都首先从实现整个系统技术协调的观点来考虑，对研制过程中子系统与子系统之间的矛盾或者子系统和系统整体之间的矛盾都要从总体协调的需要来选择解决方案。同时，把系统作为它所从属的更大系统的组成部分来进行研究，对它的所有技术要求，都尽可能从实现这个更大系统技术协调的观点来考虑。这种实践体现了一种科学方法，它是组织管理“系统”的规划、研究、设计、制造、试验和使用的一种科学方法。例如，环境问题主要是由于能源使用而引起的，如果对环境标准推行一种更加严格的政策，这些问题可以大大减少，甚至逐步得到解决，然而由于技术方面的限制，推行过分严格的政策，将会大大增加投资，甚至引起社会正常职能的中断和混乱，造成经济困

难，因此，能源、环境和经济是密切地交织在一起的，必须从全局出发来制订能源政策，能源利用的各种技术以保证在促进经济发展的前提下，控制环境的污染，保护环境卫生。

基于系统整体化的概念建立起一系列衡量系统效果的综合性指标，如价值寿命、效能/成本比、造价/维护费用比和时间价值等。在实践中，某些技术措施从局部来看效果是好的，但从全局来看就不一定好，另外有些组织技术措施从局部来看效果不太理想，但从整体来看却有应用的价值。因此，只有根据整个系统的总目标来分析，才能作出科学的判断。

由于现代技术的迅速发展，有些设备的失效，特别是武器系统的失效，往往不是由它固有寿命所决定的，而是由于技术的过时，外部条件的变化，或者要花费过高的维护费用而淘汰，由开始使用到淘汰失效这段时间称为它的价值寿命。

在设计和研制一个新的技术系统时，诚然要尽量采用新技术，以提高系统的效能，但同时还必须考虑到，为此而付出的代价（成本），因而必须在满足所要求的技术性能范围内，通过效能/成本比这一指标来全面权衡。

近年来，很多统计资料表明，一个大系统在长期的运行过程中，它的维护费用高得惊人，甚至比它的造价还要高出许多。因此，在设计一个大系统的过程中，就要充分考虑它的一次制造费用和今后长期运行中维护费用的适当比例，以保证它的整体经济性。一般采用造价/维护费用比这个指标来衡量。

随着科学技术日益发达，一般研制的大系统，技术复杂，研制周期长，而且更新淘汰快，如果一项工程任务拖的时间越长，所付出的代价就越大，甚至一个系统研制了十几年，当它进入鉴定时，技术上已经陈旧落后，失去了它的使用价值，这时所化费的全部人力、物力和资金就失去了原有的意义。于是在系统工程中，提出了时间价值这一综合性指标来衡量系统的效果。

总之，由于现代科学技术的复杂性和外部条件的频繁变化，用直观的传统方法和单凭个人的经验来组织管理一个大规模复杂

系统的研制已经不行了，为了保证系统的整体性，就需要运用现代信息系统和系统工程的方法来统盘地考虑这个问题。

系统工程还要考虑把大系统的研制过程作为一个整体，即分析整个过程是由哪些工作环节所组成的，而后进一步分析各个工作环节之间的信息，以及信息的传递路线、反馈关系等，从而编制出系统研制全过程的模型，把全部过程严密地联结成一个整体，全面地考虑和改善整个工作过程，以便能实现综合最优化。

(二) 技术应用上的综合化

系统工程致力于综合运用各种学科和技术领域内所获得的成就。这种研究能使各种技术相互配合而达到整体系统的最优化。一般大规模的复杂系统几乎都是一个技术综合体。所谓技术的综合运用，并不是将各种技术进行简单的堆砌，而是从系统的总目标出发，将各有关的技术协调配合，综合运用。系统工程师对于系统环境的分析，对于各项技术理解的深入程度和运用能力，研究设备的完善情况，组织管理的效能以及系统工程师本身的经验和创造性才能等因素，决定了综合应用各项技术的能力和水平。人们常常可以看到，具有同样效能的工程系统，所采用的技术方案迥然不同，所化费的代价相差很大，这表明研究各种技术的综合应用是一门很重要的学问。

综合应用各项技术的另一个重要方面是创造新型的技术综合体。例如，制导武器，激光武器等都是当前新一代的技术综合体。但是，一个新型技术综合体的出现有时并不一定是某一基础理论的突破，而是综合应用各项技术的成果。例如，一个电子计算机控制和管理的生产系统是当代先进的技术综合体，但这里并没有什么重大基础理论的突破，而只是综合应用自动控制技术，电子计算机技术和管理科学的成果所获得的成就。

对系统的各组成部分之间的关系，越是揭示的清晰、深刻、精确，就越能得到最佳的综合应用成就。在研究综合运用各项技术的过程中，为了能把很多分析因素数量化，并能显示出那些不