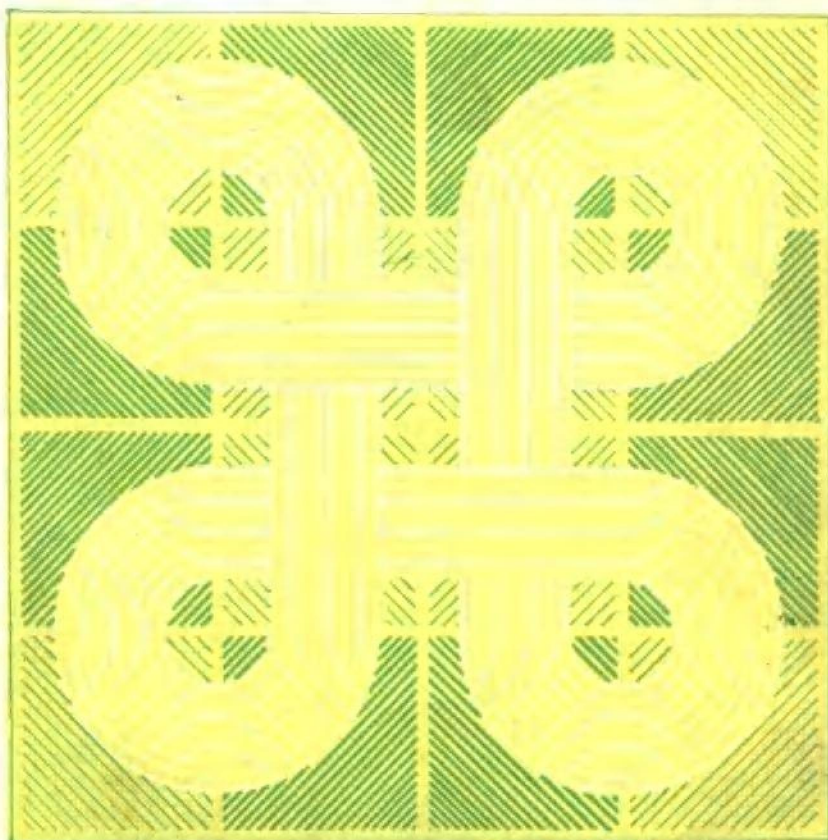


現代管理译丛

系 统 工 程

〔日〕秋山穰 西川智登



机 械 工 业 出 版 社

现代管理译丛

系统工程

〔日〕秋山穰 西川智登 著

高烈夫 译

顾基发 校



机械工业出版社

本书全面系统地说明系统工程的基本概念、方法和步骤。全书共分六章：一、系统与系统工程；二、系统工程的步骤；三、系统分析；四、系统的数理模型化方法；五、系统的最优化方法；六、网络系统。

书中详细地叙述了系统工程的方法论，并用大量的实例和图表加以说明，问题表达比较明晰。在介绍系统工程常用的数学方法中，个别方法还附有计算机程序。

本书可作为大专院校系统工程专业的教师、研究生和高年级学生的教学用书或参考书，也可供系统工程研究人员、工程技术人员和经济计划管理人员学习参考。

システム工学

秋山穰 共著
西川智登

コロナ社 1977年

* * *

现代管理译丛
系统工程

〔日〕秋山穰 西川智登

高烈夫 译

顾基发 校

*

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)

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ ·印张 $14 \frac{1}{2}$ ·字数349千字

1983年8月北京第一版·1983年8月北京第一次印刷

印数00,001—24,500·定价2.30元

*

统一书号：15033·5474

《现代管理译丛》出版说明

第二次世界大战后，特别是六十年代以来，随着科学技术的迅速发展，大大地改变了社会的生产面貌。国外的现代管理是在科学管理的基础上发展起来的。现代管理的特点是：重视人的因素；利用现代数学方法和计算机手段，强调经营决策和系统观念；以及采用动态的组织结构来适应国内外市场的多变和跨国生产。

现代科学技术和现代管理是推动经济发展的两个车轮。我们在进行社会主义建设时，不仅需要先进的科学技术，而且还需要现代的管理技术。学习和研究国外的现代管理，取其精华，去其糟粕，结合我国的实际，建立起具有我国特点的现代管理的理论和方法，这是我国各级管理工作者和管理科学研究工作者的光荣任务。

为了使我国读者对国外现代管理的现状和发展有所了解，以资借鉴，我们组织翻译和出版这套《现代管理译丛》。这套译丛包括现代管理的理论、方法、手段及其具体应用。其中有些管理手段虽然不是新出现的，但近年来有新的发展，在理论上和实践上有较高水平。原著的作者多为各国著名学者，或在著名的高等院校任教。但由于条件和水平的限制，这里所选的不尽是国外最优秀的著作，译校工作也难免有不妥之处，希望读者提出宝贵意见，使之更臻完善。

本译丛适合于高等学校管理专业的教师、高年级学生、研究生以及管理工作人员和研究人员阅读。

译 序

系统工程是二十世纪后半期出现的一门新兴学科，在1960年前后形成体系。近年来，它已得到广泛的应用和发展，1969年，阿波罗飞船登月的成功，就是明显的例证。现在，系统工程不仅应用于工程方面，而且在防止公害、城市建设、交通、运输、通讯、行政、经济和教育等各个方面都得到广泛的应用。

近年来，我国对系统工程的研究和应用非常重视，工作开展比较迅速。首先，在一些高等院校设置了相应的专业，有的还建立了系统工程研究所或研究室。其次，有些部门成立了相应的研究机构。中国科学院建立了系统科学研究所。为了更好地进行学术交流，教育部、中国科学院等单位和一些有关的学会分别召开了一系列学术会议。1980年11月成立了中国系统工程学会。1981年中美两国系统工程科学家在西安召开了中美系统分析和系统工程联合学术讨论会。会上双方交流了各自的系统工程发展简史，以及在机械、企业管理、人口、矿业、经济计划、农业和决策方法等方面的应用经验。我国除了已将系统工程应用于上述各项以外，还将其应用于能源、环境、教育、地区开发、大型工程项目论证、生态和军事等各个方面。

秋山穰和西川智登两位先生编写的这本《系统工程》，在日本国内得到好的评价，故特将此书译出供我国读者学习和参考。

本书全面深入地说明系统工程的基本概念、方法和步骤。详细地讲述了系统工程的方法论，并辅以大量实例和图表，使对问题的表达更为明晰。在介绍系统工程中常用的数学方法时，个别方法还附有计算机程序。书中清楚地交代了数学的计算方法，对不是专攻数学的工程技术人员、管理人员等的学习比较方便。本书可供从事系统工程的研究人员、大专院校的教师、研究生和高年级学生以及从事系统工程应用的广大工程技术人员，经济、计划和企业管理部门的同志学习和参考。

原书中公式、数据有许多误排之处，译者已作了改正，不再一一加注。

本书翻译过程中，曾得到系统科学研究所许国志教授、清华大学茅于杭副教授和吉林工业大学沈景明副教授等的大力支持和帮助，在此表示谢意。

前 言

近年来,在各个领域里对系统工程这一新兴学科的兴趣越来越高,不仅在工程和工业的各个领域里应用系统工程,就是在解决城市、地区、环境、流通等等问题的时候,以及在地区开发、海洋开发、防灾措施、交通措施等各个方面,甚至在教育、文化、艺术这些领域里,也都广泛地应用系统工程。

因此,除了在工科大学、工科高等专门学校的系、科里,开设系统工程这门课程之外,在经济学和经营管理学的系、科也都早就开设了这一门课。现在的情况是,在法学院、文学院这些人文、社会科学方面的系、科也开设了系统工程。日本的高级中学,在1970年修订学习指导纲要时,把系统工程规定为工业体系的一门新的学科,这也是现代技术的需要。不只是在“信息技术专业”正在准备开设系统工程,而且在机械、电气、电子、化学、土木和建筑等科系也正在准备开设系统工程。这是因为,现代的工程、工业技术,在它的研究、开发以及解决各种问题的时候,作为工程和工业技术的基本方法的系统工程是必不可少的。除此之外,系统工程对于社会各个部门的开发以及解决各种问题,也都是一门极为重要的新兴学科。

尽管现在对于系统工程这一学科的要求逐渐加强,可是它的特点,甚至它的方法论以及科学技术体系,都还很难说已经明确地建立起来了。这是因为,系统工程是一门极其新颖的学科,到六十年代才逐渐明确它的特点。它并不是研究“原理”的基础科学,而是以实际应用作为目的、作为特点的一门学科。同时它也是把各个领域的各种科学、各种技术加以综合应用的科学技术体系。

欧美研究人员所写的有关系统工程的各种学术专著和启蒙书籍已经有许多被介绍到日本;日本也出版了许多学术专著和启蒙书籍。这些书籍各自都有独具的特点、方法、体系和内容,但就系统工程来说,可以成为公认的统一的标准体系尚未明确地建立起来。

但是,这几年的各种研究成果,关于系统工程这一学科的特点、它的方法以及体系,正逐渐趋于一致。根据最近国内外研究人员的各种研究成果,我们反复地进行了研究,在本书里试图把系统工程这一学科的特点整理出来,明确它的方法论,并且使之形成科学的体系。我们当初设想本书的体系是,在本书的第六章之后还有四章,即第七章是“程序系统”,后面那三章是“作业系统与管理系统”、“信息系统”和“社会系统”。但是由于篇幅所限,第六章以后只好全部割爱。关于这几章,将采取其他形式予以发表。就系统工程的基本内容来说,本书虽然尚嫌不足,但在体系方面已经完全展开。

本书首先由秋山穰和西川智登二人进行讨论,研究了全书的写法和体系。第一、二两章,主要是由秋山穰在西川智登的协助之下写成的;第三章以后由西川智登执笔,秋山穰进行了调整和文字加工;第四章以后有关电子计算机程序的编制、实验和核对,都是由东京都立工科短期大学的清水静江助教协助完成的。另外,编写本书时,由于作者的工作关系,从计划到完成,超出了当初预定的时间。在此期间,给コロナ出版社的中俣宽、平井贞一、阿部悠治各位先生增添了许多麻烦,并得到他们大力帮助,在此深表谢意。

秋山穰 1977年9月

目 录

《现代管理译丛》出版说明	III	2.8.1 系统分析的目的、任务和步骤	23
译序	IV	2.8.2 系统设计的目的、任务和步骤	25
前言	V	2.8.3 系统综合评价的目的、任务和步骤	25
第一章 系统与系统工程	1	第三章 系统分析	27
1.1 概述	1	3.1 系统分析的特点与任务	27
1.2 系统的意义	1	3.2 系统分析步骤的概要	27
1.3 系统的性质与基本组成	2	3.3 目标系统的分析与选定	29
1.3.1 部分与部分间的有机联系	2	3.4 系统的模型化	30
1.3.2 综合的总体性与统一性, 配合、均衡性	3	3.4.1 系统的模型	30
1.3.3 系统的组成与动作, 系统的功能	4	3.4.2 模型的分类	30
1.3.4 系统与环境	4	3.4.3 模型化的步骤	31
1.3.5 系统的层次与维数	5	3.5 系统的最优化	32
1.4 系统的各种形态及其性质	6	3.5.1 系统最优化的各种形态	32
1.4.1 自然系统与人工系统	6	3.5.2 最优化的一般步骤	33
1.4.2 实体系统与概念系统	6	3.5.3 数学模型的最优化方法	33
1.4.3 闭系统与开系统	7	第四章 系统的数理模型化方法	
1.4.4 静态系统与动态系统	7	——系统的状态变量模型——	36
1.4.5 因果系统与目的系统	8	4.1 系统的状态与状态变量	36
1.4.6 控制系统	9	4.1.1 系统的表示	36
1.4.7 行为系统	10	4.1.2 二维向量的表示	37
1.4.8 按对象区分系统的各种形态	11	4.2 系统的状态变量描述	40
1.5 系统工程	12	4.2.1 状态变量表示与传递函数表示	40
1.5.1 系统工程的定义	12	4.2.2 相变量表示	42
1.5.2 系统工程的产生	14	4.2.3 正则变量表示	45
1.5.3 系统工程的特点及其与各种学科的关系	15	4.3 线性变换	47
1.5.4 系统工程的应用范围	17	4.3.1 特征值与特征向量	47
第二章 系统工程的步骤	19	4.3.2 对角化	48
2.1 步骤的体系	19	4.3.3 特征值的不变性	49
2.2 研制计划阶段的步骤	20	4.4 状态方程式的反应与状态转移矩阵	50
2.3 研制实施阶段的步骤	20	4.5 线性时变系统	53
2.4 实施设计阶段的步骤	21	4.6 离散时间系统	55
2.5 制造实施阶段的步骤	21	4.6.1 状态转移矩阵的应用	55
2.6 系统运用阶段的步骤	22	4.6.2 使用数字计算机的数值解法	63
2.7 系统工程的基本处理方法	22	4.7 状态变量模型在社会、经济系统方面的应用	72
2.8 系统的分析、设计的一般步骤	23	4.7.1 集体行为模型	73

第五章 系统的最优化方法	79
5.1 系统的最优化	79
5.2 最优化方法的种类	80
5.3 线性规划	80
5.3.1 线性规划的简单例子	81
5.3.2 单纯形法	82
5.3.3 二阶段单纯形法	89
5.3.4 罚款法	92
5.4 非线性规划	94
5.4.1 单变量最优化	94
5.4.2 多变量目标函数的最优化 (分析的解法)	100
5.4.3 多变量目标函数的最优化 (数值的解法)	110
5.5 动态规划	127
5.5.1 动态规划的对象	127
5.5.2 多阶段决策过程	128
5.5.3 用于动态规划的术语	128
5.5.4 多阶段决策过程的特点	129
5.5.5 用于管理的事例	131
5.5.6 应用于控制问题	134
5.6 庞特利亚金的最大值原理与变分法	156
5.6.1 变分法与欧拉方程	156
5.6.2 拉格朗日乘子法	159

5.6.3 庞特利亚金最大值原理	162
第六章 网络系统	170
6.1 图的概念与网络系统	170
6.2 拓扑学的观点	172
6.2.1 关联矩阵	173
6.2.2 截集矩阵	173
6.2.3 圈矩阵	175
6.2.4 关联矩阵、截集矩阵、圈矩阵的 关系	176
6.3 时间作为流的网络系统	178
6.3.1 组成统筹网络的步骤	179
6.3.2 用电子计算机编制甘特图 (GANTT chart)	182
6.3.3 缩短日程的步骤	182
6.4 最短路线问题	185
6.5 最大流量问题	187
6.5.1 最大流量问题的含义	187
6.5.2 拓扑学的思考方法	188
6.5.3 福特·富尔克松 (Ford-Fulkerson) 的最大流量算法	190
6.5.4 用电子计算机计算最大流量	193
附录	194
参考文献	219

第一章 系统与系统工程

1.1 概 述

近几年来,系统(system)或者系统工程(system engineering)这类词,不仅在工程界有关部门,而且在社会的各个部门都经常使用。系统这个词由来已久,在古希腊时代早已使用,但是将它用于科学领域,而使之具有特殊含义,还是不久以前的事情。系统工程是在1960年以后才出现的一门新兴学科。后面将要讲到,最先把“系统”这个词以及它的观点和方法引进科学技术领域并赋予特殊意义,这可追溯到1911年出版的F. W. 泰罗(F. W. Taylor)的《科学管理》。被后人称作泰罗系统的这种管理技术就是以《科学管理》一书为起点而发展起来的。在1940年前后,系统的观点和方法在发展高水平新技术的工程设计方面开始应用。此后,在工程领域里,“系统”这个词和观点就具有特殊含义而被人们使用起来。

第二次世界大战后,在工程领域里日益广泛地使用系统的观点和方法。这是有其相应的背景的。以第二次世界大战为转机,各部门的各种科学以及应用这些科学的各种技术在各个领域里发展得非常迅速。同时,各种工程技术上的问题都变得非常复杂和庞大,再用老一套的方法已经无能为力,因此需要用最新发展起来的各种科学技术加以解决。

这样,就研究和发展了两种方法:一种是系统处理(system approach)方法;另一种是系统分析(system analysis)。这两种方法开始在各个领域试用。前一方法是把对象综合地、系统地加以解决的一种处理问题的方法;后一方法是采用系统处理方法的观点,综合地、系统地应用各种科学,并且科学地分析对象之后再去解决问题的方法。

把这样产生出来的观点和方法综合起来加以体系化就是系统工程。简言之,以系统这种观点和方法为基础,综合地、有系统地应用各种技术,分析并解决复杂而困难的问题,把这种综合的、体系化的工程学方法称之为系统工程。

系统工程是二十世纪后半期出现的一门新兴学科,在1960年前后开始形成体系。1969年,阿波罗飞船登月向宇宙进军计划的成功,被认为是美国在系统工程方面的成就。此后,人们对系统工程日益感到兴趣。现在,系统工程不仅应用于工程上的机械设备的研制方面,而且应用于许多需要用工程上的方法来解决问题的地方,如防止公害、预防灾害、城市建设、交通、运输、通讯等各个部门。甚至在行政、经济、教育、生活消费等各个领域中也应用系统工程。系统工程是被广泛地用来解决上述各类复杂而困难的问题的方法。

这一章为学习系统工程作准备,首先讲一讲有关系统的意义和系统本身的基本性质、结构、表现形式,随后对系统工程的概况再作简单介绍。

1.2 系统的意义

一般说来,系统这个词,在日语里相当于系、系统、组织、制度、方式、手续等,但

是这些译名又都未必能恰当地把系统的含义表达出来。因此,在日本一般都不用翻译过来的词,而是用外来语“system”的译音来表示。

当前,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,与其说使用方法尚未统一,还不如说目前还没有一种正式确定下来的一致的使用方法。

但是“系统处理方法”和“系统工程”中的“系统”这个词的内容,它是具有特定的含义的,在一定范围内使用时,一般的定义如下。

〔定义〕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,这种各组成部分的有机的结合体就称为系统。

○ 很早以前就有“系统”这个词,有人说这个词的语源出于拉丁语“Systema”,也有人说它的语源出自希腊语,是由“共同地”这个词冠和“使之定位”这个动词词干构成的复合词,表示群或集合的抽象概念^{1)●}。

○ 按照韦氏大辞典,对“系统”这个词是这样解释的:系统是有组织的或者是组织化了的总体;是构成结合起来的总体的各种概念、各种原理的综合;是以有规则的相互作用或相互依赖的形式结合起来的对象的集合等等²⁾。

○ 系统这个词,有时是指系统这一特定的思考方法,有时是指系统的思考对象或者是指系统的某种实体而言。前者是把概念作为组成部分而形成的概念系统,而后者则是用具有实体的组成部分所形成的实体系统。这二者和本文所提到的系统都是一致的。在系统工程中,前者是以系统的思考或系统的方法这种形式提出来,后者则作为系统对象的实体而提出来。

○ 在日本工业标准里的运筹学用语(JIS Z 8121)中,对“系统”下的定义是:许多组成部分保持有机的秩序,向同一目标行动,这就叫做系统。这种说法,作为系统的一般定义,还是有些问题的。

若与系统的反义词“混乱”(chaos)对照一下,系统的定义将更加明确。

“chaos”的意思是混乱或无秩序,是指杂乱无章的集合而言。就是说,它也是几个组成部分的集合,但各部分之间没有关系,都是独立存在的,表现不出作为一个集合体的任何作用和特性。这种无秩序的集团可以称之为混乱,和系统这个词正好形成明显的对照。

至此,关于系统这个词的意义基本上已经作了说明,可是为了更明确地理解它的含义,还需要了解系统所具有的性质以及它的基本“结构和组成”(基本组成)。

1.3 系统的性质与基本组成

系统具有下列性质与基本组成。

1.3.1 部分与部分间的有机联系

根据上述的系统的定义来看,关于系统的性质,首先可以这样说,系统是由若干“部分”^①(element 或 component)组成,而在各部分之间还具有某种相互依赖的特定“关系”(relation),即相互之间具有有机的关联性的许多部分结合起来构成系统。也就是

● 这种角标数字表示书后参考文献的编号。下同。

● 原文为“要素”,亦可译为“部件”或“元素”。——译注

说, 系统中必具有可以识别的多数的独立“部分”, 而这些部分之间还都有特定的“关系”。

自然界的系统如太阳系, 是由行星、卫星、慧星、流星等部分组成, 在这些部分相互之间存在着一定的力学关系, 从而构成太阳系。电子计算机系统则是把各种输入输出装置、记忆装置、控制装置、运算装置等硬件装置, 以及程序等软件, 甚至操作人员等都作为组成部分, 而且它们也是以各种特定的“关系”相互有机地结合起来, 形成一个系统。

应用集合的概念来表示系统的组成部分之间的关系, 可以明确系统的结构。为此, 下面试用集合的概念, 从形式上表示系统的结构。

就令系统 X 为可识别的、独立的各个部分的集合, 则此系统 X 可首先表示如下。

$$X = \{x_c \in X | c = 1 \sim n\} \quad (1.1)$$

一般说来, 系统的组成部分所包含的内容, 要根据观察者、设计者而定, 因此, 在这里假定暂不考虑其组成部分本身的性质和各个部分间相互关系的形态, 以及内部结构的形态。

任意系统的部分 $x_i \in X_I \subset X$, 对任意的 $x_o \in X_o \subset X$ 具有因果关系和影响关系。用 R 表示这个关系 (relation), 则为

$$x_i R x_o, x_o R x_i \quad (1.2)$$

又, (1.2) 式可写成

$$x_o = R(x_i), x_i = R(x_o) \quad (1.3)$$

把具有这两个关系的 $x_i \in X_I$, $x_o \in X_o$ 的顺序对的组合规定为系统的认识对象。在 $x_i \in X_I$ 与 $x_o \in X_o$ 之间具有一一对应的关系时, 把这个对应叫做映像 (mapping)。

因此, 系统 S 使 $x_i \in X_I$ 和 $x_o \in X_o$ 之间形成关系起着重要的作用, 系统 S 就把这个关系作为条件。这个关系 R 就是 X_I 和 X_o 的顺序对³⁾。可写成

$$R = X_I \times X_o = \{(x_i, x_o) | x_i \in X_I, x_o \in X_o, x_o = R(x_i), x_i = R(x_o), i, o = 1 \sim n, i \neq 0\} \quad (1.4)$$

因为可用式 (1.4) 为条件来表示系统, 所以系统也可以定义为

$$S = \{X | R\} \quad (1.5)$$

如果对于部分 x_i 来说, 存在部分 x_o 的话, 则为⁴⁾

$$\forall x_i \exists x_o \in R^* (x_o = R(x_i)) \quad (1.6)$$

$$(x_i, x_o) \subset R^* \subset R \quad (1.7)$$

式 (1.6) 的意义是, 对于集合 X_o 与集合 X_I 可能的组合关系 (R^*) 来说, 使 $x_i R x_o$ 这一关系得以成立的 (亦即能得出结果的) x_o 存在于 x_i 之中。

上面用集合的概念在形式上表现了系统的结构, 据此, 可以更进一步理解: 系统是由组成系统的各个部分以及这些部分间的有机的关系构成的。但是, 如果组成这个系统的各部分是可以识别的, 那么就可以有概念的系统, 也可以有实体的系统。另外, 还可以有自然的系统和人工的系统。后面要讲到, 根据它的组成部分的性质来确定系统的性质与形态, 而系统工程的研究对象主要是其中的实体系统和人工系统。

1.3.2 综合的总体性与统一性, 配合、均衡性

如前所述, 系统是由独立的多种组成部分以及部分间许多有机的关系所构成, 把它们合并、统一起来, 作为系统的总体 (systematic whole) 具有综合的总体性。组成部分各

自独立，分别具有独自的功能，可是由于它们具有逻辑上的统一性乃构成系统。它们是具有总体统一性的一个系统总体。组成总体的各部分具有总体的配合性与均衡性。系统不单纯是各部分的简单拼凑，它具有总体的特定功能和特定的特性，简单的拼凑则得不到这种功能和特性。系统中各部分即使并不优越，但是它们作为一个总体被统一起来，合并起来，如此形成的系统总体却可以具有优越的功能，这是完善的系统。反之，即使各个部分是优越的，但作为一个总体有时却并不具有那么优越的功能，这就不能说它是完善的系统。

1.3.3 系统的组成与动作，系统的功能

如上所述，系统是把各自独立、分别具有独立功能的许多部分以及这些部分间的“关系”，作为一个具有统一性的系统总体把它有机地组合起来，可以完成特定的功能。把这样的系统的构造称之为系统的结构 (structure) 或组成 (composition)。因此，以各种组成部分的相互关联的总体的、有机的关系为基础，开展各部分与其相互关系的活动，把它综合起来，乃形成作为系统总体的有机的、统一的活动。把作为这个系统的总体的活动叫做系统的行为 (behavior) 或动作 (operation)。以系统的结构为基础把系统的行为予以展开，由上述二者就形成作为系统的“功能”。

根据这样的结构和以此种结构为基础的行为，系统分别具有独自的“功能”，这样，就使各种系统具有不同的特点。根据它所具有的独自的“功能”，这个系统就可以作为特定的系统被认识出来。

在系统工程中研究的人工系统，是根据系统的目的来设定它的功能。也就是说，为了完成设定出来的目的，要设定必备的功能条件，亦即系统应该具备的所需条件。分析最优地实现这些所需条件的系统的结构与行为，以这个分析为基础，再去分析系统的组成与行为，用人为的方法形成系统的功能。因此，人工系统中，系统的功能之所以存在，是为了完成系统的目的。

天然发生的自然系统，虽然有功能，但是却不存在目的。形成一种力学系统的自然系统的太阳系和宇宙系，或者各种生物系统，它们虽然有功能，但是不存在目的。

有的系统是有目的的，有的系统是没有目的，但是它们却都有功能。

1.3.4 系统与环境

因为系统是把许多特定的部分作为组成部分，通过这些组成部分间的有机的结合而形成的一个特定的集合体，所以如果这个特定的集合体以外的某些东西，成为这个系统的组成部分，对这个系统的总体功能具有作用的话，那么在考虑这个系统的时候，对它就不能予以忽视。在实际的系统中，这种情形很多。因为系统是特定的各个部分的有机的集合，也可以说是一种部分集合，是一个限定起来的東西，所以，与其说是在逻辑上，还不如说是系统方面一般还存在围绕着这个系统以外的因素，这样考虑是比较妥当的。对于一个系统来说，这就叫做系统的环境 (environment)，有人也把它叫做一个系统的外部系统。

这种环境，在考虑系统的时候不能忽视，同时在多数的情况下，它是必须考虑进去的一个重要因素。可是由于系统也是一种思考方法，所以把一个系统与外部环境分开，认为它们之间没有关系也是可以的，甚至有时也需要这样做。如上所述，把那些认为与外部环境完全没有相互关系的系统叫做闭系统 (closed system)；与此相反，把那些认为与外部环境具有相互关系的系统叫做开系统 (open system)。

由于许多系统都是在围绕这个系统的外部环境之下进行活动而被认识出来的, 所以多数是把系统都作为开系统来认识的。

1.3.5 系统的层次⁵⁾与维数

系统的层次 (hierarchy) 或称水准 (level) 也是系统的一个重要性质。一般来说, 系统都是由组成系统的子系统 (subsystem) 构成的。这些子系统则由比它更下一层的子系统构成。最下层的子系统就由组成该系统的基础单位的各个部分构成。这样, 系统可以由好几个层次形成。有些系统的层次是简单的, 而有些系统的层次则是复杂的。根据系统的不同, 有时就把这种组成叫做系统的子系统、子系统的子系统等。

如果把系统规定为 S , 其下层的子系统为 S_i , 关系为 R_i (参照式 (1.4)), 可表示如下:

$$S = \{S_i \subset S | R_i\} \quad (1.8)$$

$$R_i = \{(S_{I,i}, S_{o,i}) | S_{I,i}, S_{o,i} \subset S, S_{o,i} = R(S_{I,i}), S_{o,i} = R(S_{I,i})\}$$

$$S_{I,i} \cap S_{o,i'} = \phi \quad (I, o = 1 \sim n, i, i' = 1 \sim m, i \neq i')$$

S_i 下层的子系统 S_{ij} 为

$$S_i = \{S_{ij} \subset S_i | R_{ij}\} \quad (1.9)$$

$$R_{ij} = \{(S_{I,ij}, S_{o,ij}) | S_{I,ij}, S_{o,ij} \subset S_i, S_{o,ij} = R(S_{I,ij}), S_{I,ij} = R(S_{o,ij})\}$$

$$S_{I,ij} \cap S_{o,ij'} = \phi \quad (I, o = 1 \sim n, j, j' = 1 \sim p, j \neq j')$$

同样, S_{ij} 的更下一层的子系统 S_{ijk} 为

$$S_{ij} = \{S_{ijk} \subset S_{ij} | R_{ijk}\} \quad (1.10)$$

$$R_{ijk} = \{(S_{I,ijk}, S_{o,ijk}) | S_{I,ijk}, S_{o,ijk} \subset S_{ij}$$

$$S_{o,ijk} = R(S_{I,ijk}), S_{I,ijk} = R(S_{o,ijk})\}$$

$$S_{I,ijk} \cap S_{o,ijk'} = \phi \quad (I, o = 1 \sim n, k, k' = 1 \sim q, k \neq k')$$

以下同样, 最下层的子系统为

$$S_{ijk \dots \mu} = \{x_c | R_{ijk \dots \mu}\}$$

$$(i = 1 \sim m, j = 1 \sim p, k = 1 \sim q, \dots, \mu = 1 \sim \lambda, \omega = 1 \sim \theta)$$

这样的系统大多由金字塔式结构组成, 伴随着这个结构的层次化, 系统的功能对于上层的系统来说, 也是一层一层地变成次要的。

在观察一个系统的时候, 要注意这个系统的层次, 必须注意上层系统 (supersystem) 与下层系统的组成及其关联。

与系统的层次相类似的一种考虑是关于系统的维数 (dimensionality)。系统的组成部分不一定是同一种类的, 有不少系统是由不同种类的部分组成的, 这样的系统就更加复杂。即使是最简单的人-机系统 (man-machine system), 人的维数与机械的维数也是不同的, 还有许多系统是由不同的部分所组成, 在观察系统时这些都不能忽视。

根据上面的考察, 我们对于系统的一般性质和组成, 可能已有一个基本的认识。

但是, 仅仅通过上面的说明, 还不可能得到关于系统的明确认识。因为系统还有各种不同的形态, 在研究系统工程的时候, 也不可能象上面讲过的那样以一般的形式去处理任何一种具体的系统。因此, 下面对于系统的各种形态要明确它们各自的性质, 把问题的焦点集中在系统工程所研究的系统的性质上, 对系统的性质作进一步的探讨。

1.4 系统的各种形态及其性质

1.4.1 自然系统与人工系统

系统大致可以分为自然系统和人工系统。前者是山、海、河流、矿物以及动植物等自然物的集合体,把这种自然发生而形成的系统叫做自然系统(natural system)。前面提到的太阳系、宇宙系也属于自然系统。人工系统是人为地产生出来的各种部分的集合。用人工方法建立起来的系统,叫做人工系统(artificial system)。例如,由人类对自然物等进行加工,用人工方法制造出来的工具和机械装置等所构成的各种工程系统;人类通过人为地规定的组织、制度、步骤、手续等建立起来的各种管理系统和各种社会系统;人类通过对自然现象和社会现象的科学认识,用人工方法研究出来的科学体系和技术体系等都属于人工系统。

除此之外,实际上还有许多自然和人工的复合系统。例如,社会系统虽可看作是人工系统,但从某种意义上说来,它的产生和发展,在某些方面是与人的意志无关的,而是由自发的社会规律所决定的。可是由于人类智能的发展,也可用人工方法加以改善并使其得到发展。所以把社会系统叫做自然系统和人工系统的复合系统是恰当的。就拿人工系统来说,其中有许多都是人类对自发的自然系统有了科学的理解之后,把它逐渐用人工方法加以改变而造成的。在这个意义上来说,也可以认为其中有许多是与自然系统结合的复合系统。同时也应该注意到,完全由人创造出来的全新的人工系统也不少。系统工程的对象不仅是人工系统,同时也包括自然界的自然系统,以及对于自发的社会系统,人为地施加作用所制造出来的自然系统与人工系统的复合系统。

如果换一个观点来说,也可以认为这些系统是由软件系统(software system)和硬件系统(hardware system)构成的。自然界已经存在的天然物,如上述的矿物、能量、生物等自然物这些硬件,按照自然原理和规律存在着并一直活动到今天,只要人类不是人为地对它们进行干预,它们就会按照自然规律保持平衡。对于这一点,人类是从自然物这种硬件之中,用科学的力量找出支配它并且正在起作用的自然原理和规律,利用它们来改变自然物,使之成为人类生活服务。人类用科学的方法认识自然界的自然现象和历史的社會现象,找出使之起作用的原理、原则和规律,使之体系化,创造自然科学和社会科学,并进而应用它们,用人工的方法改变作为自然系统的自然和社会,创造出对人类社会有用的应用科学体系。对自然和社会积极主动地施加作用,加以改造,利用它们,进而用从中所获得的东西积极地创造出新的硬件,再创造出利用这种新的硬件的软件体系。这样一来,在人类世界中,人工系统就越发占有重要的位置和起着重大的作用。另一方面,也应该注意到,人工系统的发展打破了自然系统的平衡,引起自然破坏和环境破坏,使之产生各种公害,它给人类的生活和生存带来威胁和危机。系统工程本来是以人工系统为对象,但是根据上述观点,最近的系统工程中的人工系统,是在和自然系统的关系当中把它提出来的。

1.4.2 实体系统与概念系统

从另外的观点来看,系统又大致可以分为实体系统(physical system)和概念系统(conceptual system)。实体系统是象人-机系统(man-machine system)或机械系统那

样, 组成部分都是物理方面的存在物。这种系统是以矿物、生物、能量、机械、人类等实体的、物理方面的存在物为组成部分的。与此相对应, 概念系统是以概念、原理、原则、法则、方法、制度、步骤、手续等非物理方面的存在物为组成部分的, 科学技术体系、法律系统、教育系统都属于这一类。机械系统本身虽然是实体系统, 但要想利用它, 并使之产生作用, 就需要有使之产生作用的使用方法, 作为这种使用方法的步骤和手续的系统就是概念系统。在实际的系统当中, 有许多是实体系统和概念系统相结合的。系统工程的对象主要是实体系统, 但是也包括概念系统。

1.4.3 闭系统与开系统

上面是根据系统的组成部分的特点来看系统的种种形态的区别, 另外, 根据系统的组成形态的性质, 也可以有种种区别。下面就这方面加以简单地叙述, 希望能够帮助理解各种不同的概念。

首先, 有闭系统 (closed system) 与开系统 (open system) 的区别。关于它们各自的性质, 在系统与环境那一节中已经叙述过。如将系统 S 与外部环境 $\bar{S}$ 用关系 R 来表示, 则可表示为

$$SR\bar{S}, \bar{S}RS \quad (1.11)$$

式 (1.11) 不成立时, 亦即 $SR\bar{S}$, $\bar{S}RS$ 时, 则 S 就叫做闭系统。式 (1.11) 中的任何一个或两个都成立时, 则 S 叫做开系统。

1.4.4 静态系统与动态系统

静态系统 (static system) 是指赋予系统以特征的状态变量不依存于时间变化的系统而言。因此, 系统是根据状态变量 $x_i \in X (i=1 \sim n)$ 来决定的。

动态系统是系统的状态随着时间一同变化的系统。换句话说, 它是把系统的状态变量作为时间的函数表现出来的系统。因此, 它提供赋予系统以特征的状态变量的时间性变化的信息。状态变量 $x_i(t) \in X(t) (i=1 \sim n)$ 提供为了得知关于系统未来行动的必要的信息。亦即, 系统的特性是根据用状态空间下定义的函数 $f_i (i=1 \sim n)$ 来决定的。系统工程主要是以后者的动态系统为对象。

动态系统是一个连续系统, 当独立变量仅仅是时间 t 的函数的时候, 就用常微分方程来表示。而当状态变量在有微分项的情况下, 就用偏微分方程来表示。

独立变量仅仅是时间 t 的时候, 一般可用下式表示

$$\frac{dx(t)}{dt} = f_i(x(t), t) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1.12)$$

式 (1.12) 表示式 (1.2) 的关系 $x_i R x_j$ 成立。式 (1.12) 的解, 用向量形式则可写成

$$x(t) = \Phi(t)x(0) \quad (1.13)$$

式中 $\Phi(t)$ 是状态转移矩阵 $\Phi_{ij}(t)$, 表示初始条件与状态变量之间的关系, 它表示把系统的第 j 号的初始条件作为输入的第 i 号输出响应。这对搞清系统状态的将来行动起着重要的作用。还有, 从外部环境 $\bar{S}$ 给式 (1.12) 加上原因、影响关系的时候, 将其原因、影响关系的部分规定为 $u_i \in U(t) (i=1 \sim n)$, 用向量形式可写成下式

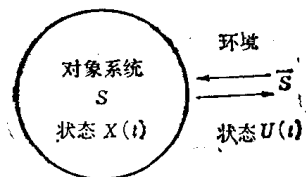


图1.1 系统和外部环境

$$\frac{dx(t)}{dt} = f_i(x(t), u(t), t) \quad (1.14)$$

这方面的详细说明在第四章讲述。

关于状态变量，考虑一下存在微分项的情况⁹⁾。

在规定系统状态的方程式 (1.14) 中， f_i 在某个开集中是连续的，并且假定存在一阶偏导数。 dx_1/dt 在系统中则表示由于相互作用而产生的 x_1 的变化率。此外，再考虑一下，由 x_1 以外的其他状态变量的相互作用， x_1 的变化率受到什么样的影响。第一，在某时刻 t_0 ，由于状态变量 $x_2(t_0)$ 的相互作用，受到 $x_1(t_0)$ 的变化率影响的比率，则成为偏微分项

$$\frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{dx_1}{dt} \right) = \frac{\partial \dot{x}_1}{\partial x_2} \quad (1.15)$$

因此，根据这个符号就可以观察系统的状态。① $\partial \dot{x}_1 / \partial x_2 > 0$ ；② $\partial \dot{x}_1 / \partial x_2 = 0$ ；③ $\partial \dot{x}_1 / \partial x_2 < 0$ 这三种情形。第①种情形意味着， x_2 一增加，就使 x_1 的变化率增加，或者 x_2 一减少，就使 x_1 的变化率减少。第②种情况是，即使 x_2 增加， x_1 的变化率也不改变。第③种情形说明， x_2 一增加， x_1 的变化率就减少。或者 x_2 一减少， x_1 的变化率就增加。同样，对于 $x_3, x_4, \dots$ 借助于已知 $\partial \dot{x}_1 / \partial x_3, \partial \dot{x}_1 / \partial x_4, \dots$ 的符号，从系统也能获得信息。此外，关于各自本身以外的状态变量的相互作用，同样也能得知 $x_2, x_3, \dots$ 的变化率的影响。

因此，借助于求出

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial \dot{x}_1}{\partial x_1} & \frac{\partial \dot{x}_1}{\partial x_2} & \frac{\partial \dot{x}_1}{\partial x_3} & \dots \\ \frac{\partial \dot{x}_2}{\partial x_1} & \frac{\partial \dot{x}_2}{\partial x_2} & \frac{\partial \dot{x}_2}{\partial x_3} & \dots \\ \frac{\partial \dot{x}_3}{\partial x_1} & \frac{\partial \dot{x}_3}{\partial x_2} & \frac{\partial \dot{x}_3}{\partial x_3} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \quad (1.16)$$

能够更深刻地看出系统的性质。

1.4.5 因果系统与目的系统

在通过外部环境 $\bar{S}$ 的状态的 $U(t)$ ，唯一的决定开系统 S 的状态 $X(t)$ 那种系统的情况下，系统 S 就叫做因果系统 (causal system)。也就是说，因果系统有送往系统的一个输入，这就是所谓原因，借助于这个原因产生称之为结果的输出，系统的内容即可确定下来。

反之，系统 S 具有目的时，为了达到该目的而具有特定目标去行动的时候，把这个系统 S 叫做目的系统 (teleological system)。

因此，为了达到目的而设定目标进行活动的时候，把系统组成部分 S_j 所能进行的活动集合规定为 B_j ，全部活动范围就作为各个活动的组合而表示出来。也就是说，作为直积 (direct product) 表示出来¹⁰⁾。亦即可表示为

$$B = B_1 \times B_2 \times \dots \times B_n \quad (1.17)$$

$$= \{(b_1, b_2, \dots, b_n) | b_j \in B_j, j = 1 \sim n\} \quad (1.18)$$

至少在活动范围 B 之中，满足适当评价标准的 B^* 可表示如下

$$B^* = \{(b_1, b_2, \dots, b_n) | (b_1, b_2, \dots, b_n) \in B_1 \times B_2 \times \dots \times B_n, b_j \in B_j, j = 1 \sim n\} \quad (1.19)$$

$$(b_1, b_2, \dots, b_n) \in B^* \subset B \quad (1.20)$$

于是, 对 B^* 来说, 满足评价标准 $C = \{c_k | k = 1 \sim r\}$ 那样的顺序对 $(b_1, b_2, \dots, b_i)$ ($i = 1 \sim m$) 存在于 $(b_1, b_2, \dots, b_j)$ ($j = 1 \sim n$) 之中。亦即

$$\forall (b_1, b_2, \dots, b_j) \exists (b_1, b_2, \dots, b_i) \in B^* (C = \{c_k | k = 1 \sim r\}) \quad (1.21)$$

根据这种活动结果的组合的组来决定系统的状态, 为了要使这个系统的状态最优, 系统的组成部分必须选择适当的系统的状态。因此, 需要有控制组成部分的活动那样的组织。把组织包括在系统中的时候, 系统就成为机构。目的系统就是机构。

1.4.6 控制系统

在日本的工业标准用语中, 对控制 (control) 是这样下的定义: “对作为对象的物体加上所需的操作, 使之适合于某一目的”。也就是说, 为了适合于某一目的, 对被控制对象在控制装置内来加以操作。因此, 为了能够进行控制而组成的各种装置的集合体叫做控制系统 (control system)。另外, 借助于控制装置自动地进行控制时, 叫做自动控制 (automatic control), 控制装置是手动的时候, 叫做手动控制 (manual control)。

自动控制与自动化 (automation) 的内容易于混淆, 而自动控制包含在自动化之中。亦即, 自动化有自动操作 (程序控制: sequence control) 和自动控制 (反馈控制: feedback control)⁸⁾ 两种。

自动操作可以叫做程序控制, 系统的信号传播方法是开环 (open loop) 的。自动控制有反馈控制和前馈控制 (feedforward control), 但是根据控制的特点, 提到自动控制的时候, 在大多数情况下, 主要是指反馈控制。在这种反馈控制中, 具有消除作为其结果的控制量和目标值之间偏移的负反馈 (negative feedback), 以及电子电路中的振荡电路和再生放大等那样的正反馈 (positive feedback)。

图 1.2 表示反馈控制系统的一般组成。另外, 图 1.3 作为程序控制系统的例子, 表示定量填充装置的逻辑控制电路⁹⁾。这里用这样的逻辑元件构成逻辑控制电路, 一般说来是最简单的例子。在高水平的程序控制系统中, 除了逻辑控制部分之外, 多半还要一并设置反馈控制部分。

前馈控制是根据控制对象的环

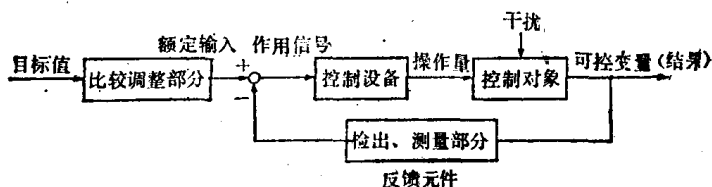


图1.2 反馈控制系统的一般组成

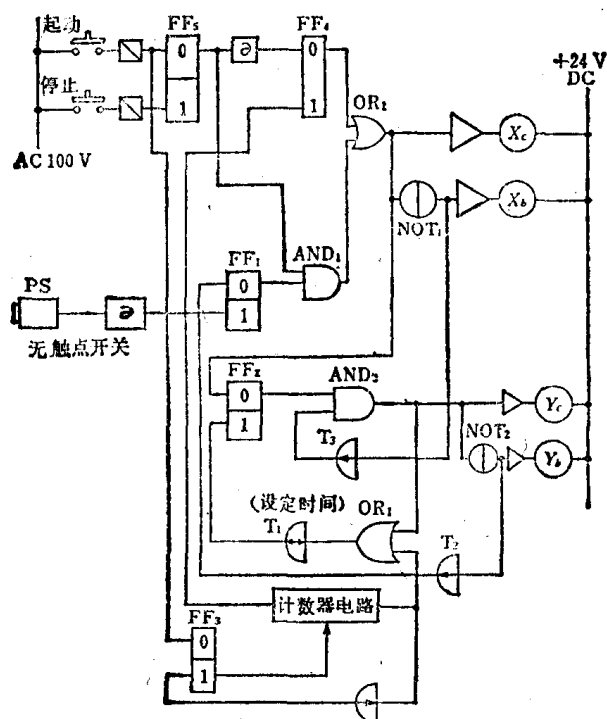


图1.3 定量填充装置的逻辑控制电路⁹⁾