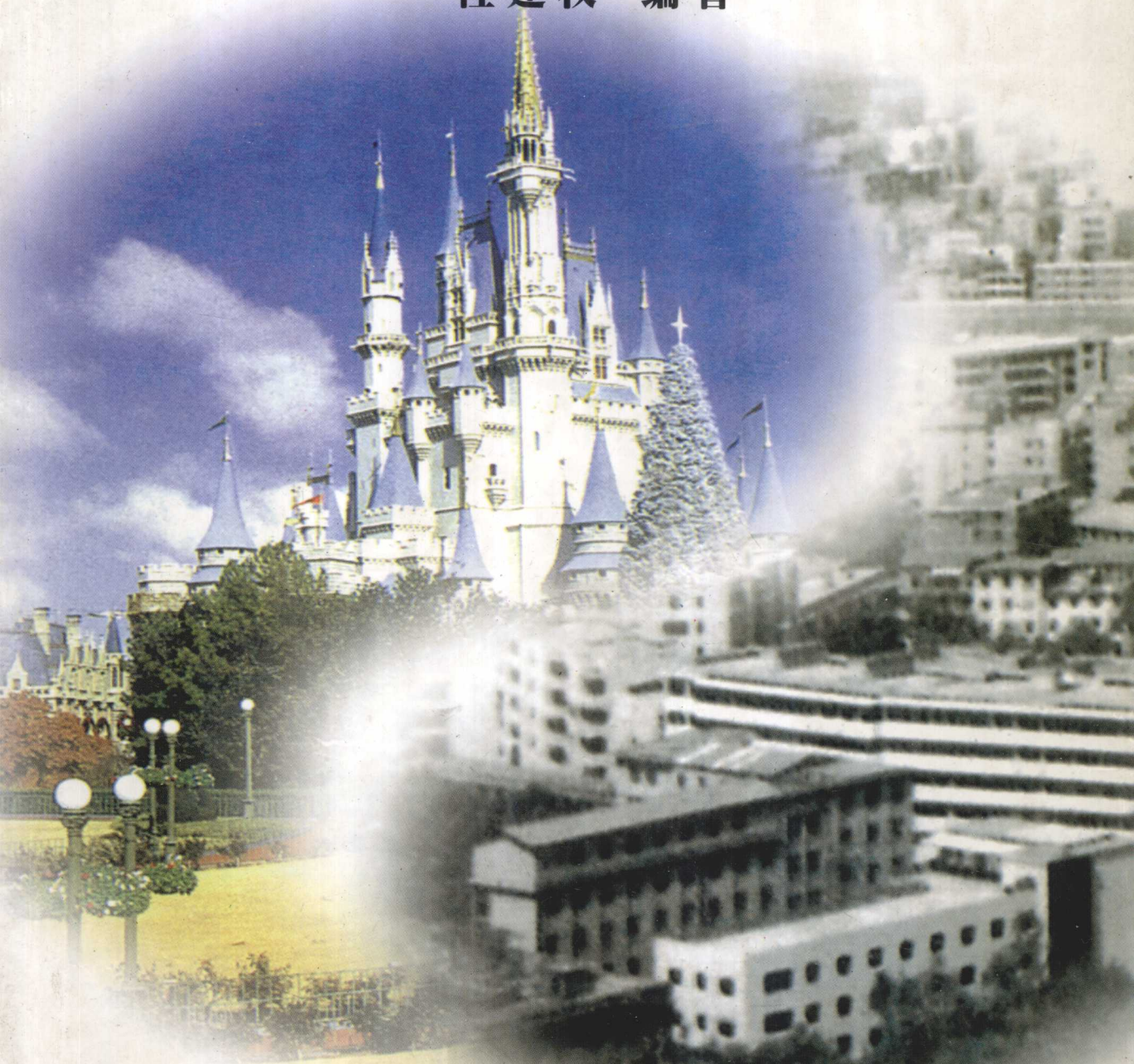


城市系统工程

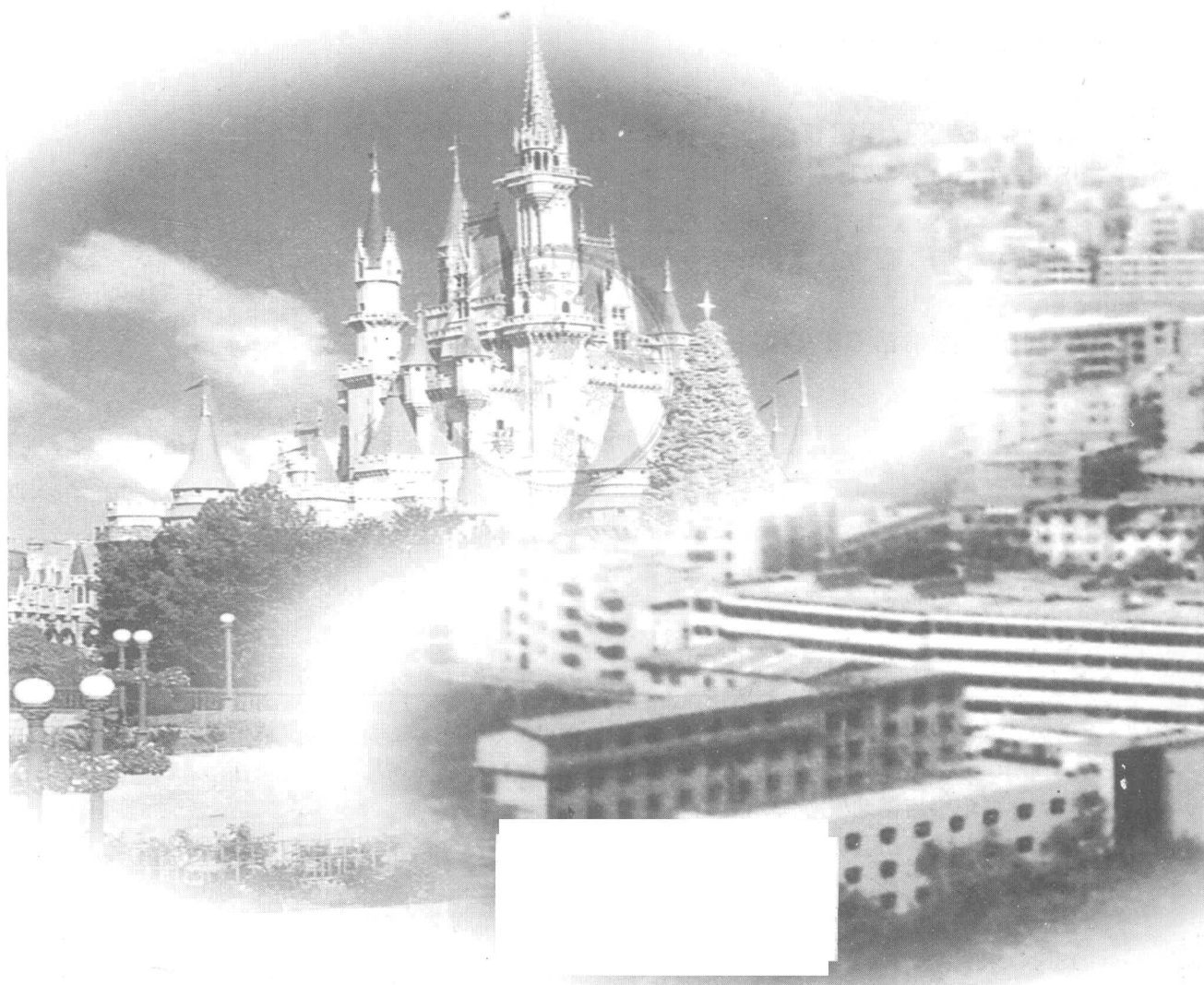
程建权 编著



武汉大学出版社

城市系统工程

程建权 编著



武汉大学出版社

内容提要

本书是根据新技术应用类城市规划专业城市系统工程的课程要求而编写的教材。主要内容包括城市系统工程的基本概念、基本原理、针对各种城市现象的建模方法及其在城市规划与管理中的应用等方面。重点介绍建模方法的原理与应用。

本教材内容丰富,叙述严谨流畅,逻辑性强,理论与实践并重,便于学生理解和掌握。可作为城市规划及相关专业本科生及研究生的教材或教学参考书,也可供城市研究者与工作者参考使用。

本书的出版得到荷兰政府 DSO 教育援助项目及武汉测绘科技大学教材出版基金的资助。

图书在版编目(CIP)数据

城市系统工程/程建权编著. —武汉:武汉大学出版社,1999.6
ISBN 7-307-03221-X

I. 城… II. 程… III. 城市—系统工程 IV. F29

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 14049 号

责任编辑:徐 方 封面设计:曾 兵

出版:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:wdp4@whu.edu.cn 网址:www.wdp.whu.edu.cn)

发行:新华书店湖北发行所

印刷:湖北省通山县印刷厂

开本:787×1092 1/16 印张:14.625 字数:356 千字

版次:1999 年 6 月第 1 版 2001 年 5 月第 2 次印刷

ISBN 7-307-03221-X/F·693 定价:19.00 元

版权所有,不得翻印;凡购我社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题者,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

计划经济向社会主义市场经济的转变,刺激和促进了我国城市化的全面发展,城市的规模和数量、城市的物质空间和社会经济结构都发生了巨大变化,城市系统的复杂化程度和内部的矛盾冲突也日益增强。实践证明传统的城市规划、管理方法和手段已难以适应时代发展和市场机制的需要,这就迫切要求我国的城市研究者和工作者改变观念、革新方法,在马克思主义哲学指导下,从系统科学的战略高度去发现问题、研究问题和解决问题。

而近年来,随着系统科学、数学科学的进一步发展,以及信息革命的进一步推进,各种新思想、新方法和新技术层出不穷。这就为我国逐步将传统规划和传统管理转向现代规划和现代管理提供了有利的机遇,也为城市系统工程学的研究和应用创造了条件。

马克思曾经说过“一种科学,只有在成功地应用数学时,才算达到了完善的地步。任何一门科学,只有当它真正和数学联系起来时,才算真正发展起来。”和力学、天文学等自然科学一样,城市科学也将逐步地由定性分析而发展过渡到定量分析阶段。

概括地说,城市系统工程学就是基于系统科学和城市科学理论,以城市系统和子系统为对象,综合应用系统工程学的原理、观点和方法,借助数学建模和计算机技术,实现对城市问题研究的定量化(半定量化)、模型化以及最优化(满意化),为现代城市规划、管理和建设提供决策依据,并以最终实现城市的可持续发展为目标的一门新兴交叉学科。但由于本学科涉及范围很广,理论和技术正处于不断发展和完善之中,加之作者学识浅薄,时间仓促,书中错误在所难免,敬请批评指正。

本书的原始讲义曾作为城市规划和城镇建设本科专业的选修课使用过多年,在此基础上,作者做了大量修改和补充,使之系统性、技术性和实用性更强。不仅可作为相关专业的高年级教材,也可作为硕士研究生和实际工作人员的参考书。在内容组织上,本书以城市规划和管理为对象,按照由抽象到具体、由理论到应用的思路编排了12章,主要包括了城市系统工程学基本原理(第1~2章),城市系统建模方法(第3~11章,由概念模型→结构模型→专题数学模型,由空间现象→确定性现象→随机现象→灰色现象→模糊现象→复杂系统)和城市系统分析总结(第12章)。在使用过程中,应根据学时数和学生基础,酌情取舍。

在该书的计划、编著和出版过程中,得到了我院领导的热情鼓励和大力支持,特别是杨仁教授、蓝运超教授和詹庆明教授,并得到了荷兰政府DSO教育援助项目及武汉测绘科技大学教材出版基金的资助。同时,本书的面世得到了武汉测绘科技大学出版社的大力支持。在此一并致以衷心的感谢!

编著者 程建权

一九九八年十二月于武汉

目 录

第一章 系统工程学概论	(1)
第一节 系统的基本概念	(1)
第二节 系统科学	(5)
第三节 系统工程	(10)
第二章 城市系统与系统工程	(18)
第一节 城市的系统性	(18)
第二节 城市系统工程	(22)
第三节 城市系统规划	(25)
第四节 城市系统建模	(31)
第三章 概念模型与方法	(37)
第一节 概念形成与方法	(37)
第二节 专家会议法	(39)
第三节 德尔非法	(42)
第四章 结构模型与 ISM 法	(45)
第一节 结构模型概述	(45)
第二节 解释结构模型法	(47)
第三节 结构模型应用案例	(51)
第五章 城市空间系统建模	(55)
第一节 空间分布测度	(55)
第二节 劳瑞模型	(60)
第三节 单约束引力模型	(61)
第四节 双约束引力模型	(68)
第六章 运筹学建模	(72)
第一节 线性规划模型及其应用	(72)
第二节 运输问题模型及其应用	(87)
第三节 整数规划模型	(89)
第四节 0-1 型整数规划模型	(93)
第七章 概率统计建模	(99)
第一节 回归分析	(100)
第二节 主成份分析	(110)
第三节 时间序列分析	(116)
第八章 层次分析法	(122)
第一节 AHP 法基本原理	(122)
第二节 层次分析模型	(130)
第三节 层次分析法的改进及其应用	(136)
第九章 灰色系统建模	(139)

第一节	灰色关联分析	(139)
第二节	灰色系统建模(GM)	(143)
第三节	灰色局势决策	(152)
第十章	模糊数学建模	(156)
第一节	模糊集合论	(156)
第二节	模糊关系和聚类分析	(161)
第三节	模糊变换和模糊综合评判	(170)
第十一章	系统动力学	(180)
第一节	系统动力学概述	(180)
第二节	系统动力学基本概念	(182)
第三节	系统动力学建模	(189)
第十二章	城市系统分析	(196)
第一节	城市系统目标分析	(196)
第二节	城市系统环境分析	(198)
第三节	城市系统结构分析	(202)
第四节	城市系统预测分析	(204)
第五节	城市系统评价	(207)
第六节	系统决策与模拟仿真	(213)
第七节	决策支持系统介绍	(218)
参考文献		(223)
附录		(225)

第一章 系统工程学概论

第一节 系统的基本概念

一、系统的定义与属性

目前,国内外关于系统(System)的定义至少有 40 多种。《牛津英语词典》对“系统”的解释是“由相互连接成相互依存的成套事物或集聚的事物所形成的复杂统一体,根据某种方案或计划有秩序地安排各个部分而组成的一个总体”。一般系统论的创始人,V. L. 贝塔朗非(L. V. Bertalanffy)定义“系统”为:“相互作用的诸要素的综合体”,美国著名学者阿柯夫(R. L. Ackoff)认为“系统是由两个以上相互联系的任何种类的要素所构成的集合”。

因此,简单而概括地说,系统是由相互依存、相互作用的若干元素构成并完成某一特定功能的统一体。大到星罗棋布的城市群、浩渺无际的宇宙,小到分子、原子等都是系统。

作为系统必须具有以下基本属性,也是构成系统的几个条件:

1. 整体性

整体性也叫集合性,这是系统最基本的属性。系统是全部元素的集合,即系统具有综合性,它是为达到系统基本功能要求所必须具有的组成要素的集合。构成系统的各要素虽然具有不同的性能,但它们是根据逻辑统一性的要求而构成的整体。当然,系统并不是各元素的简单集合,否则它就不具有作为整体的特定功能。如俗语中“三个臭皮匠顶个诸葛亮”、“三个和尚没水吃”,都是三个元素,由于素质不同,效果差别悬殊,所以系统并不是简单的数量相加,整体大于部分之和也是系统所具有的主要特征之一。

2. 关联性

关联性,或者说相关性,指构成系统的各元素之间是相互联系、相互作用、相互影响的。例如构成人体的呼吸、消化、循环、排泄、神经等各组成部分,它们之间通过特定的相互依存、相互制约关系,而有机地结合在一起,才使人成为一种具有特殊高级功能和高度智慧的高等动物。如果某一器官出现了问题,就会影响其它部位器官的正常运行,人便会有不舒服的感觉。

3. 功能性

功能性也叫目的性,是指系统所具有的特定的功能,这是区别不同系统的主要标志。如高等学府是高等教育与科学研究的基地,城市是一定区域内的政治、经济和文化中心。

4. 环境适应性

与系统或系统元素相关联的其他外部元素的集合称为环境。而任何一个系统都存在于一定的环境之中,而且不断地要与外部环境进行物质的、能量的和信息的交换,外部环境的变化必然会引起系统的内部结构的变化,系统必须适应外部环境的变化。

从哲学意义上讲,唯物辩证法的物质观、运动观、时空观的进一步综合即系统观。系统既是物质的存在形式,又是物质的运动形式。系统的运动必然伴随着系统在时间和空间上的动态发展。采用科学的系统方法去定性或定量地描述、分析、研究设计、试验、组织、选择、生成、规划、决策、控制一个系统,归根结底,就是用系统观点掌握和运用辩证法的三个基本规律:质量互变规律,对立统一规律,否定之否定规律。

二、系统的描述

描述或表达任何一个系统均须了解:

1. 系统结构

是指组成系统的元素、元素间的相互关系以及系统间的层次关系等,是系统元素在时间与空间有机联系与相互作用的方式,是系统内部的描述,是决定系统功能的内因,也是系统功能的保证。元素间的相互作用及其联系表现为物质的、能量的及信息的流动。这些流动通过系统的有机结构而作功——即完成系统的功能。系统元素相同、结构不同,对应的系统将不同,表现出的功能将会产生差异,所以说系统是结构和功能的统一体。

元素之间的联系是有向的,即单向、双向、直接、间接之分。元素之间的联系按其作用形式又可分为影响关系、从属关系、制约关系、协同关系、对抗关系、因果关系等,按函数关系有线性与非线性之分。由于客观事物的复杂性,使系统具有多层次结构。任何系统都是更大系统的一个元素,而系统本身又可分解为若干子系统,每个子系统又可层层分解,分解为更细小的子系统,最后层次为元素,元素是完成系统功能的最小单元。如当进行城市小区规划时,可把规划对象当作一个系统看待,它包括建筑物、活动场所、道路、绿化……等子系统。而住宅、粮店、邮局、幼儿园、树木花草、主次干道……等即为规划系统的元素。在小区规划中,住宅是最小的单元即元素。因为只要考虑每个住宅在小区内的平面和空间布局就可以了,没有必要再对住宅内部的房间组合,室内装修,管道布置……等进行详细考虑。但当考虑住宅设计时,住宅又成为一个系统,它又可分解为若干子系统(如建筑、结构、水暖电设备、技术经济指标……)等,直至最低层——要素(如房间分隔、门窗布置、室内装饰、采光、通风、管道设备布置等)。

2. 系统功能

是指系统与外部环境相互作用过程的能力。功能是系统对外部的影响,是系统对环境的作用和输出。功能也是系统结构的结果,即有了结构然后才具有功能。系统结构是完成功能的保证,功能是系统在环境中所能起的作用。如建筑物是个系统,它包括建筑设计、结构设计、水暖电设计以及技术经济等子系统,这些子系统又分别由若干元素构成。这些元素的相互依存和相互影响的有机联系,便构成了建筑物的空间结构。建筑物所应具备的功能:承受包括抗震在内的各种荷载,以及防雨、隔热、隔音、通风、采光等要求,便是由建筑物的空间技术结构所决定的。当然,建筑物使用功能的改变,也会引起空间结构的变化。又如城市系统的功能集中体现在政治、经济、文化、教育、民族、宗教、历史等各个方面,甚至包括它的国际影响能力和灾害承受能力等。

3. 系统行为

系统存在于环境之中,输入表现为环境作用于系统,系统受环境刺激作用,产生响应或

反作用于环境,即系统的输出。系统的各种活动及其周围环境的影响,即称为系统的行为。它是一系列输入与输出活动的集合。如城市系统的行为表现在两大建设——物质文明和精神文明。城市系统的行为也受到周围环境的制约,如区域发展战略和国家政策的影响等。

4. 系统环境

系统外界事物及诸要素的集合。如建筑物(系统)的环境有自然环境、工程技术环境、社会经济环境。自然环境如场地、地质、地形、气候(温度与日照等)都会影响建筑物的位置、朝向、基础类型、深度及大小,以及墙的厚度及层高等;工程技术环境影响建筑材料、室内外装修、水电设备质量及安装技术及机械化施工水平等;社会经济条件包括国家政策、法令、法规、经济状况(投资)、城市规划对建筑物的立面及层数要求、环境保护法对污染控制的规定以及建筑物所在地的民族风俗、习惯、历史、文化水平等都会影响建筑物的内容和外形。更大系统中的元素(或子系统)又往往是下一级系统的环境。如在小区规划系统中,子系统如道路、其他建筑物、室外活动场所、绿化等是住宅系统的环境,所以系统与环境也是相对的。系统与环境相互作用,一般表现为环境对系统的输入和系统对环境的输出。如在建筑物的规划设计阶段,输入的是上级下达的指令要求(投资、规模、工期、地点等)及有关数据,它们以信息流为主,通过人的思维活动输出方案、工艺、图纸等设备文件等。又如城市系统的环境包括它的历史(时间边界)、地理位置(空间边界)、邻市邻区域的状况(环境约束)、区域发展战略以至国土规划影响等。

如城市公共交通系统一般来讲是由人、车、路三个子系统构成,每一子系统又由若干元素构成(如图 1-1 所示的层次结构)。同时公共交通作为城市这一巨系统的一个子系统,必然和其它子系统间存在着复杂的相互联系(如图 1-2 所示),因此在研究城市公共交通系统优化和交通规划时必须从系统的角度来考虑和处理问题。

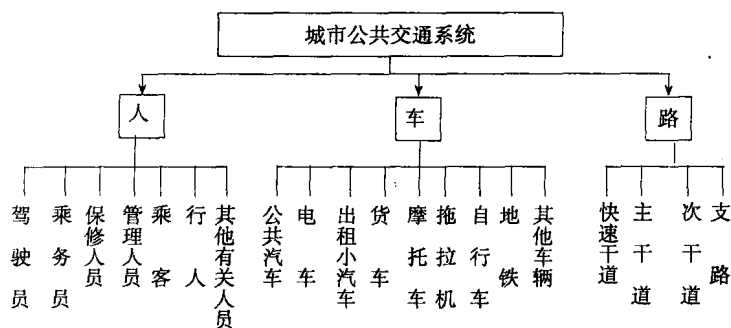


图 1-1 城市公共交通系统的内部结构

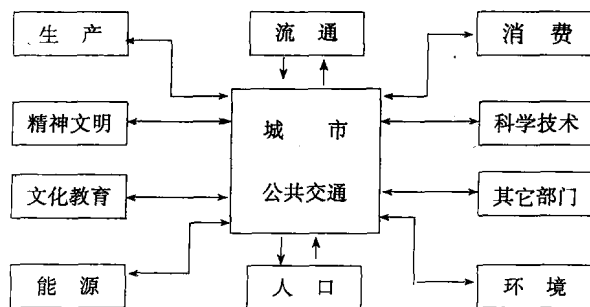


图 1-2 城市公共交通与其他系统的联系

三 系统的分类

根据系统的结构、功能、行为和环境,一般地可作如下分类:

1. 自然系统和人工系统

由自然物所自然形成的系统,称为自然系统。如一座山就是由奇松、怪石、温泉、花草等自然物组成的一个自然系统。反之,由人工造成的各种元素所构成的系统,则名之为人造系统。如宇宙飞船,它的每一个零件都是人类高度文明与科技进步的产物。实际上,大多数系统都是自然系统与人造系统的复合系统,如城市系统。

2. 实体系统与概念系统

凡是以看得见摸得着的具体实体为元素所构成的系统,则称之为实体系统,又称为硬系统。反之,由一些概念、原理、方法、制度、程序等概念性的元素所构成的系统,为概念系统,又称为软系统。如一个城市的道路系统,城市规划专业的课程体系等分别为实体、概念系统。

3. 封闭系统与开放系统

系统客观存在于环境之中,互相进行物质、能量及信息的交换,这种与环境相互发生联系的系统称之为开放系统。反之,若系统不与环境发生联系,那么这个系统就称之为封闭系统。封闭系统可以在系统内部结构中交换物质、能量及信息,而与环境不发生关系。若某区域利用水资源发电,只供本区自己使用,在水资源相当固定并无变化的情况下,可把它当作一个系统来看待,而不视为环境的输入,那么这个小区发电、输电、用电系统也可以认为是一个封闭系统。系统绝大多数属于开放系统,只有系统与环境不断地、广泛地交换物质、能量和信息,不断地输入、输出,系统才更具有生命力。绝对的封闭系统是鲜见的。

4. 静态系统与动态系统

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而变化。它只是动态系统的一种极限状态,即处于稳定的状态。

5. 简单系统与复杂系统

简单系统是指组成系统数量很少,因而它们之间的关系也比较简单,或尽管子系统数量多或巨大,但之间关联关系比较简单,则称为简单系统。按照子系统的数量级,简单系统还可分为小系统(子系统数量为几个、十几个),大系统(子系统数量为几十个、上百个),以及简单巨系统(子系统数量成千上万,上百亿、万亿等)。处理这种系统的理论近二十年来发展很快,如耗散结构理论和协同学。另一类系统称为复杂系统。它们最主要的特征是具有众多的状态变量,反馈结构复杂,输入与输出呈现非线性特征,或者说是高阶次、多回路、非线性的。若复杂系统中的子系统数量极大,种类又很多,它们之间的相互关系又很复杂,则称为复杂巨系统。尽管这类系统具有客观的确定规律,但子系统的差别造成了规律的多样化。如人体系统、地理系统、城市系统等都是复杂巨系统。目前研究复杂巨系统还处于探索阶段,方法还不成熟。

6. 黑色系统与白色系统以及灰色系统

信息完全明确的系统称为白色系统,信息完全不明确的系统称为黑色系统,信息部分明

确、部分未知的系统即称为灰色系统。如把学校看作一个系统,显然学校内的教工数,学生数,固定资产等信息完全明确,即为白色系统。相反,遥远的星球,也可看作一个系统,虽然知道其存在,但体积多大,质量多少,距地球多远等信息完全不知道,就像是一个“黑洞”,这类系统即为黑色系统。而介于两者之间的,例如城市系统,有多少行业,多少就业人员等是已知的,但其他一些参数如流动人口、经济发展与交通规划,与环境保护之间的相互关系等尚未完全明确,因此这是灰色系统。

第二节 系统科学

一、系统科学含义

国外有的学者将现代科学技术分为自然科学、社会科学及系统科学(System Science)三大类。根据我国著名科学家钱学森教授的研究成果,现代科学技术,从纵向来看,可划分为九大部分:自然科学、社会科学、数学科学、系统科学、思维科学、人体科学、文艺理论、军事科学、行为科学。其中系统科学是从系统的观点来研究客观世界。从横向来看,整个科学技术可分为四个层次。处于最高层次的是马克思主义哲学;第二个层次是基础科学;第三个层次是技术科学;第四个层次是工程技术。工程技术是指直接服务于改造世界的社会实践的技术。而技术科学是实践经验和技术的理论概括和总结,是直接为工程技术服务的。技术科学的理论、原理的进一步抽象、概括、总结、提炼而形成基础科学。基础科学通过一定的桥梁提取出世界观、方法论以及各类范畴等,就属于哲学的内容。就系统科学而言,第四个层次,即系统科学的工程技术部分,称为系统工程。第三个层次,为系统工程应用提供理论的技术科学包括运筹学、控制论、信息论、统计学、模糊数学等。第二个层次,系统科学的基础科学是系统学。它是从系统这个统一的概念出发,将其它科学中从不同角度研究系统特性的基本理论加以总结,并上升到一门基础科学。其研究方法着眼于系统的整体功能,并注意系统内部子系统的相关关系和层次结构,从系统环境、系统结构、系统功能三者的相互关系入手研究系统的普遍规律;从分析和综合的统一性出发,研究影响和改变系统结构和系统功能的一般途径。如一般系统论、非平衡系统论、协同学、超循环理论等。系统科学形成于 70 年代,是运筹学、控制论、信息论、现代数学、计算机科学、生命和思维科学等全面发展的结果,是自然科学与社会科学的交叉产物,属于软科学的研究范围。

二、系统学基本概念

1. 动力学状态、热力学状态与涨落

(1)动力学状态。动力学系统的状态是描述系统的最小一组变量,只要知道在 $t = t_0$ 时刻的这组变量和 $t > t_0$ 时的输入,那么就完全能确定系统在任何时间 $t \geq t_0$ 的行为,这组变量叫做状态。例如,描述空间中一个质点的状态,需要该点的三个坐标上所在的位置和该点在三个方向的速度。显然,若系统包含 N 个质点,那么就需要 $6N$ 个状态变量才能决定系统的状态。

(2)热力学状态。如果把上述力学中关于系统状态的定义照搬到热力学所考虑的系统是很不方便的,而且也是不必要的。因为在标准条件下, 1cm^3 气体含有 2.7×10^{19} 个分子,每个分子用三个坐标值和三个动量分量来描述,则 1cm^3 气体的状态量就有 1.6×10^{20} 个变量。为了研究热力学系统的状态,提出了热力学状态的概念问题。对于热力学系统,由于分子不断地无规则地运动,可认为它有无穷多个力学状态。于是我们可宏观地从统计平均量去观察热力学系统。当一个热力学系统处于平衡态时,所有分子都在不停地运动着,只是运动的某一些统计平均量不随时间变化而已,所以热力学状态是无穷多个力学状态总体的平均统计量。如描述一定容积气体的状态,用其所具有的压力 P 和温度 T 这两个变量就可以了。所以系统的热力学状态变量数目远远小于系统的力学状态变量的数目。当然,系统的热力学状态远不足以决定系统的力学状态。

(3)涨落。一个热力学系统由千千万万个粒子组成,我们所能测量到的宏观量,如温度、压力等,是反映这众多微观粒子的统计平均效应。由于人们不可能完全控制微观粒子的运动过程,所以系统在每一时刻的实际物理量并不能精确地处在这些平均值,而是或多或少有些偏离,这些偏离就叫“涨落”。涨落是杂乱无章的、随机的。在正常情况下,涨落相对于平均值来说是很小的,即使偶尔有大的涨落也会被耗散掉,于是系统再回到平均值附近。由于这些涨落不会对宏观量的实际测量产生影响,因而经常被忽略掉。然而,在临界点附近,情况就不相同了,这时涨落可能不被耗散,甚至还可能被放大,导致系统宏观变化,最后促成系统达到新的宏观状态。

2. 平衡态与非平衡态

热力学系统按其所处的热力学状态的不同,可以区分为平衡态系统和非平衡态系统,而形成平衡态热力学和非平衡态热力学。

若系统的热力学状态参量不随时间变化,这时系统达到定态;若在定态系统内部,不存在物理量的宏观流动(如热流、粒子流等),则称该热力学系统处于平衡态。凡是不具备上述任何一个条件的状态,则称为非平衡态。

3. 对称与对称破缺,无序与有序

所谓对称性指的是所描述的现象无论在时间上的反演,即 $+t$ 和 $-t$,空间上的互换位置,即 $+r$ 或 $-r$,或对于所有的变换,如正变换或反变换,对观察者来说,都保持不变性,则称这个现象具有对称性。当描述的现象,失去满足上述对称性条件的任何一个,则称其为对称破缺。对称性意味着时间上、空间上是均匀的,没有差别的,因而也就没有提供任何信息;而出现对称破缺,意味着差别的出现,不均匀性的出现,因而提供了信息,所以对称破缺是产生信息的先决条件。

序指的是系统要素间关系所具有的次序。当系统是对称的,也就是说系统各向同性时,系统是无序的。例如,一个封闭容器中,注入一定量气体,随着时间的延续,最终气体分子分布呈现均匀,这时的状态就是无序的。再例如,一滴墨水滴入一杯水中,随着时间的延长,最后呈现的是一杯均匀的蓝色液体,这时它就是无序的。反之,系统一旦出现对称破缺,则是有序的。例如,磁铁矿石被磁化之前,它的各个磁畴磁极呈现的是杂乱无章的分布状态,是无序的;一旦磁化之后,各磁畴按磁性规则排序,出现对称破缺,就呈现出有序的状态。

4. 可逆过程与不可逆过程

自然界的运动过程人为地可分为可逆过程和不可逆过程。可逆与不可逆所说明的是运

动过程的方向性。

经典力学和量子力学中的基本定律,对于时间都是对称的,把 t 换成 $-t$ 代入公式中,其形式不会发生变化,所以可以说,这些定律的基本方程对时间是可逆的,时间向前运动和时间向后运动都是一样的。同样,在空间上也认为是均匀的,即各向同性,平移和旋转不改变对物理世界的描述,这种对称性,导出系统运动过程是可逆的。应该指出,这种可逆过程是一种理想过程,实际的变化过程从来没有完全可逆的。正如受力过程,不可能没有摩擦,所以实际运动过程都是不可逆过程。不可逆过程指出了运动过程的方向性,正如时间不能反演,热量不可能自发地从低温传向高温,一杯混合均匀的蓝色液,不可能自发地分为一滴墨水和一杯清水等等。

5. 熵

熵是物理学家克劳修斯(R. Clausius)于 1865 年研究热力学过程中提出来的概念。熵的数学意义是热量 Q 被温度 T 除得的商。相同热量,温度高则熵小,温度低则熵大。熵的英文名是 entropy,出自希腊语 τροπή,其意思是变化、转变、演化。熵用 S 表示,它的一般数学表达式为:

$$dS = \frac{\Delta Q}{T}$$

这样定义的熵又称为热力学熵。

在统计物理中,玻尔兹曼(L. Boltzmann)从分子运动论的角度研究了熵,并对熵作出了微观解释。他指出熵反映了分子运动的混乱程度,是无序度的度量。揭示了熵在不可逆过程中增加的本质,系统总是自发地向着热力学中熵概率分布大的方向进行。熵值越大,对应的宏观态越加无序。

在信息论中,申农(C. E. Shannon)将熵作为一个随机事件的不确定性或信息量的量度,这种熵常称为信息熵或申农熵。在实验前,它是实验结果不确定性的量度;在实验完成后,它是我们从该实验中所得到的信息的量度,即信息量。

对熵理论的研究还在不断深化与发展,比如宇宙学对黑洞的研究,提出了黑洞熵的概念,在混沌现象研究中,引入了 Kolmogorow 熵等等。

三、系统学基本内容

1. 一般系统论(General System Theory)

一般系统论是由美籍奥地利生物学家贝塔朗菲(L. Von. Bertalanffy)于 1947 年提出。其重要论著有 1945 年的《关于一般系统论》和 1968 年的较完整阐述其系统论思想的代表作《普通系统论的基本发展和应用》,他曾明确指出马克思和恩格斯的辩证法是其一般系统论的思想来源之一。贝塔朗菲从理论生物学角度总结人类系统思想,运用类比同构的思想方法,建立了开放系统的一般系统论,提出了生命现象的有组织性、有序性和目的性。但没有对有序性、目的性作满意回答。通过将协调、秩序、目的性等概念用于研究有机体,他提出了下列三个基本观点:

(1)系统观点:即系统是“相互作用的诸要素的复合体”,系统的功能不是各部分功能的简单相加,而是取决于复合体即系统内部元素之间的相互关系,即结构决定功能。

(2)动态观点:即一切有机体本身都处于积极的运动状态。有机体之所以能有组织地处于活动状态并保持其活力的生命运动,是由于系统与环境不断地进行物质与能量的交换,他把这种能与环境进行物质和能量交换的系统称之为开放系统,生命系统本质上都是开放系统。

(3)等级观点:即各种有机体都按严格的等级组织起来,处于同一层次的事物,尽管形态各异,但都具有类似的结构和功能,系统就是由结构和功能组成的统一体。

一般系统论用相互关联的综合性思维来取代分散思维,突破了以往分析方法的局限性,即从系统观点来认识和分析客观事物。

2. 耗散结构论(Dissipative Structure)

耗散结构论是以物理学家普里高津(I. Prigogine)为首的比利时布鲁塞尔学派于1969年创立的。普利高津本人亦因此于1977年获诺贝尔奖,耗散结构论将经典热力学第二定律与生物进化论相统一,进一步指出自然界和社会都存在从无序走向有序的发展趋势,并说明了一个远离平衡态的开放系统,在外界条件变化达到某一特定阈值时,量变可能引起质变,系统通过不断地与外界交换能量与物质,就可能从原来的无序状态转变为一种时间、空间或功能上的有序状态,这种远离平衡态的、稳定的、有序的结构即称之为“耗散结构”。在这一理论中,普利高津着重阐述了以下几个基本观点:

(1)开放系统是产生耗散结构的必要前提。根据耗散结构论,系统的熵 ds 是由两部分组成,即: $ds = des + dis$

其中 des 是系统与外部环境进行物质、能量和信息交换而引起的熵流, des 可以大于、等于也可以小于零。而 dis 则是系统内部自发产生的熵,对任何系统都有 $dis \geq 0$,因此,要想使系统进入相对有序状态,就必须使系统总熵 ds 减少,即要求 $des < 0$,不断给系统以足够的负熵流。因此,要使一个系统产生和保持耗散结构,必须首先为系统创造充分开放的必要条件。显然,在开放状态下,当 $des > 0$,即正熵流,系统不仅不能形成有序的耗散结构,反而会更快地趋于混乱。

(2)非平衡态是有序之源。开放系统是形成耗散结构的必要条件,但绝不是充分条件。耗散结构只有在系统保持“远离平衡”的条件下,才有可能出现。所谓非平衡态即指系统远离平衡态的状态,平衡态和近平衡态都被排除在外。因为系统在平衡态和近平衡态(线性区),系统是处于稳定状态或趋于稳定状态,系统总的倾向是趋于无序或趋于平衡。

系统在到达平衡态之后,只有将其孤立起来,设法使它与外界隔绝,才能保持不变,所以出现耗散结构的另一重要条件,是外界必须驱动开放系统越出平衡线性区,到达远离平衡态的非线性区。

(3)涨落导致有序。在平衡态和近平衡态,涨落是一种破坏稳定性的干扰,起消极作用。但这些涨落不会对宏观行为产生影响,常被忽略掉。在远离平衡态,它是系统由不稳定状态形成新的稳定有序状态的杠杆,起着积极的建设性作用。当系统处于远离平衡态时,在临界值附近,随机的小涨落可以通过非线性的相互作用和连锁效应被迅速放大,形成系统整体上的“巨涨落”,从而导致系统发生突变,形成一种新的稳定有序状态。此时,涨落对耗散结构的形成起了一个触发和激化的作用,即偶然的随机涨落为耗散结构的形成提供了良好的条件。

耗散结构论揭示了开放系统的一种宏观的规律性,即可以通过与外界的物质、能量和信

息交换而使熵不断地减少,系统不断地由无序走向有序。至于这种交换如何使熵不断减少而使系统不断由无序到有序的,并没有作出进一步的说明。

3. 协同学(Synergetics)

协同学是西德斯图加特大学理论物理学家哈肯(Hermann Haken)于1969年创立的。它以现代科学理论中最新成果(信息论、控制论)作为基础,吸取了耗散结构理论的论点,采用统计力学的考察方法来研究开放系统的行为,解决了普里高津遗留的问题,进一步找到了复杂系统如何从无序向有序转变的机理,并把这一理论推广至封闭系统和热平衡态,以至于经济与社会系统。协同学认为,任何一个包括有大量子系统的复杂系统,在与外界环境有物质、能量和信息交换的开放条件下,通过各子系统之间的非线性相互作用,就能产生子系统相互合作的协同现象,使系统能够自动地在宏观上产生空间、时间或功能的有序结构,出现新的稳定状态,这就是著名的论断“协同导致有序”。哈肯还进一步发现在系统演化过程中,不同的状态变量所起的作用不一样,有的起作用大些,有的起作用小些,起作用小的变量不仅决定了系统相变的性质和特点,而且决定了其它变量的变化,只要分析清楚了这些变量的演化规律,其它变量的演化特点也就随之了解了。哈肯对这类现象加以总结,提出支配原则(或称支配原理)。支配原则认为任意系统的状态可由多个变量描述时,其中必然存在少数几个随时间变化慢的变量,称为慢变量,也即所谓的系统序参量,而其余变量随时间变化快,称为快变量。慢变量的变化决定了系统的相变,而快变量如何变化却与相变无关,快变量本身的变化要受到少数慢变量的支配。这样,我们在分析系统演化规律时,可以只考虑慢变量,而用绝热近似消去法将快变量排除掉。值得注意的是,支配原则有一定的适用范围,并不是说系统任意时刻的状态变化都可以应用支配原理,只有在临界点附近,才符合此规律。而在远离临界点时,系统状态的变化不仅取决于慢变量,也取决于快变量,需同时考虑。

协同学理论所研究的从无序到有序的临界转变,深刻地反映了自然界和人类社会不断发展与演化的机制,这种理论不仅对自然科学的研究做出了一定的贡献,近年来对现代经济管理、城市规划、系统工程方面的研究,愈来愈显示出它的重要作用,成为系统科学的重要理论基础。

由以上分析可知,协同学与耗散结构论有很多共同之处,都是讨论在远离平衡态的非线性系统的演化、突变的规律,都是利用微分方程的稳定性理论来分析反映系统演化的宏观方程,如在耗散结构论中提出的很多概念、如涨落、分岔、临界点等,在协同学中也存在,而且定义一样,但协同学不像耗散结构论,采用宏观的系统演化方程,而是直接采用随机层次的主方程,在建立方程时考虑系统微观的作用机制,利用概率守恒写出随机微分方程,然后再对方程的随机变量进行平均,得到系统的宏观方程,进行求解,当然由于社会系统非常复杂,很多情况下不能列出方程求解,而是采用定性分析方法得到所需的结论。

4. 突变理论(Catastrophe Theory)

突变论是由法国著名数学家托姆(R. Thom)于1972年创立的,他发表的“结构稳定性和形态发生”一文提出了突变的有关概念、模型和分类。概括地说,突变现象指的是系统状态在短时间内突然发生较大的变化。如物理中的相变、生物形态的发生、地质方面的地震及火山喷发、工程中的桥梁坍塌、经济中的股市暴跌、政治风云的突变等等,都是突变现象。简单地讲,突变论就是研究突变现象的数学理论,即系统在连续作用下如何导致不连续的突变结果,初等突变论研究的是有势系统的突变模型及其分类。有势系统对环境参数或控制参

数连续作用下,系统动力学方程也将随之改变。当环境参数达到某个临界值时,系统状态将会发生非连续的变化。通过研究,托姆归纳出控制参数不大于 5,状态变量不大于 2 的突变模型有以下 11 类(表 1-1 所示)。目前突变论在社会科学中已开始应用,尝试用突变论来说明经济危机、市场行情变动、预测股市动向等问题,它是一种在方法论上具有重要意义的数学分析工具。

表 1-1 突变模型的势函数

序	突 变 名 称	势 函 数	状态 变量数	控制 参数
1	折叠(fold)	$x^3 + ax$	1	1
2	尖角(cusp)	$\pm x^4 + ax^2 + b$	1	2
3	燕尾(swallow - tail)	$x^5 + ax^3 + bx^2 + cx$	1	3
4	蝴蝶(butterfly)	$\pm x^6 + ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx$	1	4
5	印第安人茅舍(wigwan)	$x^7 + ax^5 + bx^4 + cx^3 + dx^2 + ex$	1	5
6	椭圆脐点(elliptic umbilic)	$x_1^3 - x_1x_2^2 + a(x_1^2 + x_2^2) + bx_1 + cx_2$	2	3
7	双曲脐点(hyperbolic umbilic)	$x_1^3 + x_2^3 + ax_1x_2 + bx_1 + cx_2$	2	3
8	抛物脐点(parabolic umbilic)	$x_1^4 + x_1^2x_2 + ax_1^2 + bx_2^2 + cx_1 + dx_2$	2	4
9	符号型脐点(symbolic umbilic)	$x_1^3 \pm x_2^3 + ax_1x_2^2 + bx_2^2 + cx_1x_2 + dx_1 + ex_2$	2	5
10	第二椭圆脐点(second elliptic umbilic)	$x_1^2x_2 - x_2^3 + ax_2^3 + bx_2^2 + c_1x_1^2 + dx_1 + ex_2$	2	5
11	第二抛物脐点(second parabolic umbilic)	$x_1^2x_2 + x_2^3 + ax_2^3 + bx_2^2 + c_1x_1^2 + dx_1 + ex_2$	2	5

第三节 系统工程

一、系统工程基本概念

1. 系统工程的产生和定义

系统工程是系统科学的工程技术部分,是 20 世纪 60 年代初才开始形成的新兴交叉学科。1945 年,美国成立的兰德(Rand)公司开始采用定性分析与定量分析相结合的系统分析方法研究若干军事课题,成为今天系统工程的摇篮。1957 年,第一本系统工程学著作(System Engineering)由 H. H. Goode 和 R. E. Machol 合写,标志着系统工程学的正式诞生。70 年代,在维也纳附近的 Luxembury 成立了有 17 国合作支持的国际应用系统分析研究所(IIASA),系统工程作为一门独立学科开始受到世界各国的普遍重视。近 20 年来,IIASA 完成的大量研究中,几乎一半以上属于区域开发,地区社会-经济协调发展,城市发展规划等课题,并已大部分付诸实施,使很多国家地区受益匪浅。

在系统工程学的形成与发展过程中,运筹学和计算机的发明发挥了巨大作用。本世纪 40 年代,第二次世界大战期间运筹学的产生和发展,为系统优化提供了理论和方法。40 年代计算机的诞生,为量化方法的实际应用提供了强有力的运算工具和信息处理手段。

由于系统工程是一门新兴的技术,尚处于不断发展之中,至今还没有统一的定义,例如下面是一些国内外具有代表性的定义:

(1)“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,并使各部分能够最大限度地相互协调”(1967年美国切斯纳)。

(2)“系统工程是为了更好地达到系统目的,对系统的构成元素、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 JIS8121)。

(3)“系统工程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委员会)。

(4)“系统工程是为了合理进行开发、设计和运用系统而采用的思想、步骤、组织和方法等的总称”(1971年日本寺野寿郎)。

(5)“系统工程是一门把已有学科分支中的知识有效地组合起来,用以解决综合化的工程技术”(1974年大英百科全书)。

(6)“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)。

总之,系统工程是用科学的方法规划和组织人、财、物力,通过最佳途径的选择,使工作在一定期限内收到最合理、最经济、最有效的效果。

广义定义:系统工程学是为了合理进行系统的研制、设计、运行等工作所采取的思想、程序、组织、方法等的技术,其中包括了思想方法、组织与管理等。

狭义定义:系统工程学是对系统的分析、综合、模拟优化等的工程技术。相对于广义定义,狭义定义中只是着重于在系统研究过程中所应用的各种具体方法等技术部分。

但概括性地讲,系统工程是以研究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,对系统的构成元素、组织结构、信息交换和反馈控制等功能进行分析、设计和服务,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。

2. 系统工程的特点

系统工程和传统工程技术一样,都要从实际条件出发运用基础科学和技术科学的基本原理,以改造客观世界使其符合人类需要为目的。它们间的主要区别体现在:

(1)内涵不同:传统工程技术的“工程”概念,是指自然科学原理和方法应用于实践、设计和生产出诸如大桥、铁路、建筑物、车辆等有形实体的技术过程,即为制造“硬件”的工程。而系统工程中的“工程”概念不仅包含“硬件”的设计与建造,还包含了与其紧密相关的“软件”,如规划、计划、方案、程序等活动过程,即为硬件与软件的复合工程。这样就扩展了传统的“工程”的含义。

(2)对象不同:传统工程技术是把各自特定领域内工程实体对象作为研制目标,有具体的、确定的对象。而系统工程则是以“系统”为研究对象,不仅包括各种工程技术中的实体对象,还包括了社会、经济、管理等非实体即概念对象在内。即系统工程的研究对象是一个表现为普遍联系,相互影响,规模和层次都相当复杂的综合系统。

(3)任务不同:传统工程技术是用来解决某个特定专业领域中的具体技术问题,而系统的任务是解决系统的全盘统筹问题,这就是要解决系统内部各子系统之间,系统与外部