

XITONG FENXI

系统分析

汪树玉 刘国华 等编著

浙江大学出版社

ISBN 7-308-02920-4



9 787308 029209 >

ISBN 7-308-02920-4/N · 005

定价：36.00 元

系 统 分 析

汪树玉 刘国华等 编著

浙江大學出版社

图书在版编目(CIP)数据

系统分析 / 汪树玉, 刘国华等编著. —杭州: 浙江大学出版社, 2002. 5

ISBN 7-308-02920-4

I. 系... II. ①汪...②刘... III. 系统分析—高等学校—教材 IV. N945.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 002569 号

责任编辑 李桂云

出版发行 浙江大学出版社

(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

(E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)

排 版 浙江大学出版社电脑排版中心

印 刷 浙江上虞印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 26.75

字 数 691 千

版 次 2002 年 5 月第 1 版 2002 年 5 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-308-02920-4/N·005

定 价 36.00 元

前言

系统论的观念与思想是人类从千百年来社会活动和生产实践中孕育出来的,亦是人们认识世界和改造世界的经验总结,但直到上世纪中叶才逐步上升为比较完整的一门新学科。由于它突破了形而上学和机械论的束缚,能正确反映客观事物间相互联系、相互制约、整体协调和动态发展等特点,使人们的观念和思维模式进入更符合实际的科学境界,故在各个领域中得到广泛的应用,并取得显著成效。熟知的研制原子弹的曼哈顿工程、阿波罗登月计划,以及早在秦代就建成的都江堰水利枢纽(直至今日仍能很好发挥作用)等都是系统论应用和系统工程实践的范例。

当前随着人口急剧膨胀、资源枯竭和全球环境的日益恶化,迫使人们不得不进一步提高对事物全局性及整体规律的认识,并据此规范自己的认识和客观活动中的行为与决策。正是这一外界环境和社会的需要,促使系统科学和工程应用迅速发展和进一步深化。

在水利、土木工程领域,其工程项目,例如大型水利水电枢纽、区域性灌溉用水设施、国土资源开发利用、城市建设规划、交通运输网络等,均规模宏伟、投资巨大、涉及因素众多,而且要保障工程寿命周期内人民生命财产的安全、社会经济可持续发展和保护生态环境等,这就更应该从系统论思想出发,整体协调和动态多层次地综合考虑。因此,目前完全有必要与可能向这些专业的大学生和技术人员介绍与阐述系统论的思想、观念和系统分析的理论与技术,以便他们在今后工作中能运用这方面的知识进行项目的分析论证、规划设计、施工和管理;能建立系统模型,模拟系统运行;寻求有效解集;进行综合评和风险分析;最后作出正确决策。

本书是在对研究生、大学生近十年的教学基础上撰写而成的。除了介绍系统论思想、系统工程方法论等概念外,着重讲述系统分析中的定量化方法与技术,包括如下主要内容:概论,数据收集与分析,系统建模,预测技术(回归分析、随机型时间序列分析和概率预测技术),优化原理与方法(线性与非线性规划、动态规划、多目标优化、离散变量优化和遗传算法),网络模型和分析技术,系统综合评价(模糊评判、层次分析法),决策分析(风险型决策、贝叶斯决策、效用理论)等。

系统分析的生命力在于应用,故最后一章是作者所从事的若干案例。另有一

些例子已被分解到相关章节中作为解释用例。配合教学内容,书中附有一定数量的练习题。此外部分章节末尾,还对当前该问题的研究热点作了简介,以便于读者扩大视野。书中打*的内容,可能偏深或过于专门化,初学时可暂不学。

本书内容属于基础技术性知识。针对有关专业工程的系统分析的完整案例,因涉及专门知识众多,限于篇幅未列入,不过这方面现在已有若干专业性书籍可供参考。应该指出的是,由于作为其基础理论的系统科学尚未形成一个完整的共识框架,在系统观念指导下的系统工程理论和系统分析技术亦有待逐步深化与完善。

本书第一、六章由汪树玉、周坚编写,第二、四章由汪树玉、李富强编写,第三、八章由汪树玉、刘国华编写,第五章由汪树玉、刘国华、包志仁编写,第七章由汪树玉、包志仁编写,第九章由刘国华等编写。全书由汪树玉负责统稿。

上海交通大学建筑工程和力学学院黄金枝教授对本书进行了审校,提出了不少宝贵建议与意见,作者在此深表感谢。

本书可作为大学生、研究生学习这一课程的教学用书,也可供从事这方面工作的科技人员参考之用。限于作者学识水平,书中难免存在许多缺点与错误,恳请读者批评与指正。

作 者

2001.10

目 录

第 1 章 概述	(1)
1.1 系统的概念	(1)
1.2 系统的特征与分类	(3)
1.3 系统论思想的发展	(6)
1.4 系统科学体系	(9)
1.5 系统工程方法论	(11)
1.6 系统分析技术及其一般步骤	(16)
第 2 章 数据收集与分析	(23)
2.1 数据收集	(23)
2.2 统计推断	(31)
2.3 方差分析	(39)
2.4 因素分析法	(42)
2.5 关联度分析	(50)
2.6 聚类分析	(56)
第 3 章 系统建模	(63)
3.1 建模的基本概念	(63)
3.2 系统结构模型	(68)
3.3 状态空间模型	(79)
3.4 输入、输出变量模型	(83)
3.5 灰色系统模型	(89)
3.6 系统动态学模型	(94)
第 4 章 预测技术	(103)
4.1 概述	(103)
4.2 回归预测技术	(104)
4.3 时间序列预测技术	(130)
4.4 灰色预测	(152)
4.5 概率预测技术	(160)
4.6 贝叶斯预测模型	(169)
第 5 章 优化方法	(177)
5.1 基本知识	(177)

5.2	线性规划	(187)
5.3	非线性规划	(203)
5.4	动态规划	(227)
5.5	多目标优化	(238)
5.6	离散变量优化与遗传算法	(247)
第 6 章	网络模型与分析技术	(266)
6.1	概述	(266)
6.2	最短路问题	(268)
6.3	网络最大流问题	(271)
6.4	最小费用流问题	(276)
6.5	工程项目计划方法——网络计划技术	(279)
第 7 章	系统综合评价	(297)
7.1	系统评价的一般方法	(298)
7.2	模糊综合评判	(302)
7.3	层次分析法(AHP)	(316)
第 8 章	决策分析	(329)
8.1	概述	(329)
8.2	不确定型决策	(331)
8.3	风险型决策	(334)
8.4	贝叶斯决策方法	(339)
8.5	效用理论及其应用	(343)
8.6	多准则决策	(349)
第 9 章	应用示例	(352)
9.1	水电站洪水预报系统	(352)
9.2	大坝观测数据分析	(361)
9.3	拱坝多目标优化设计	(370)
9.4	供水保证率计算	(382)
9.5	工程项目管理模式选择	(385)
习 题		(395)
附 录		(412)
参考文献		(420)

第 1 章 概述

1.1 系统的概念

1.1.1 系统的定义

从自然界到人类社会存在着各种各样的系统,如宇宙中的天体系统,地球上的生态系统,社会生活中的商业系统、交通系统等等。“系统”已成为人们熟悉并广泛应用的词汇。举例来说,凡是生物体内由几种细胞、组织、器官所组成的能共同完成某种生理机制和功能的总体,就称为某生理系统,如呼吸系统、消化系统等;一个由弹头、弹体、发动机、制导系统、外弹道测量和发射等部件组成的进攻性武器,称为弹道导弹系统;而由挡水建筑物(堤坝)、水库、溢洪设施、水力发电厂、输变电装置等组成,能将水能转变为电能的总体,称为水力发电系统。上述这几个系统的组成与功能虽完全不同,但若抛开它们的具体物质组成、运动形态和功能,从整体和部分间的相互关系与作用来看,则它们都是由若干个部分或要素,以一定的结构相互联系而成的有机整体,并具有各组成部分本身所不具有的新的整体功能。因此一般系统论的奠基者 L. V. 贝塔朗费(L. V. Bertalanffy)给出的系统定义为“相互作用的诸要素的综合体”,亦有学者称“系统是有目的的要素组合”。日本 JIS 工业标准中对系统的定义是“许多组成要素保持有机的秩序,向同一目的行动的东西。”虽然目前对系统的定义并不完全统一,但基本上可以归纳如下:系统是指由若干个可以相互区别、相互依存、相互联系与作用的要素(或部分)所组成,具有某种结构和特定功能,处在一定的环境中,以达到某种预定的目标的有机整体。

1.1.2 系统的组成

一个系统的组成有如下几个要点:

(一) 要素

要素是指构成系统的基本单元或部分。应有两个或两个以上的要素才能构成系统,要素可以是单个事物,亦可以是一群事物组成的小系统。例如对银河系统而言,太阳系是它的一个组成要素;而这一要素是由太阳、九大行星及卫星、小行星群等,按照一定的相互关系和运行规律组成的一个小系统。总之,要素是相对于系统而言的,一个大系统往往是由若干个小系统和要素所组成的。

(二) 结构

指系统内部各组成部分或要素之间在空间、时间等方面的有机联系、相互作用的组织机构、方式和秩序。显然系统不是要素的简单组合,要素间只有存在一定的相互关系(结构)才能构成系统。任何系统的整体性都是在某种结构基础上的整体性,系统的结构愈严密,有序性愈高,整体性也就愈强。图 1.1.1 为系统组成示意。

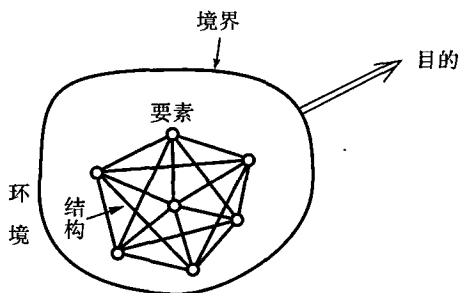


图 1.1.1 系统组成示意

系统结构具有相对稳定性、多层次性、相对性和适应性。所谓稳定性是指在一定条件下系统总是趋向于保持某一状态,从而要求保持相应的结构形态;由于系统是有层次的,故其结构亦是分层次的,低层次的结构相对于高层次的结构作为系统的要素起作用,而高层次的结构相对于低层次结构则是作为系统的整体起作用;所谓适应性是指由于系统与变化着的外界环境的相互作用,当外界环境发生大的改变时,系统结构相应的亦有所变异。

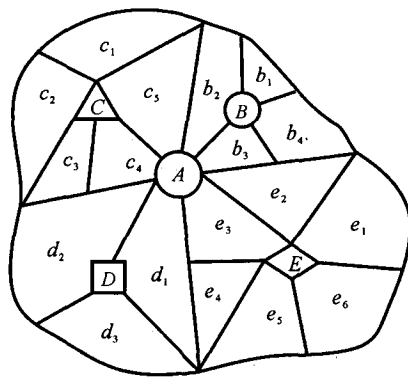
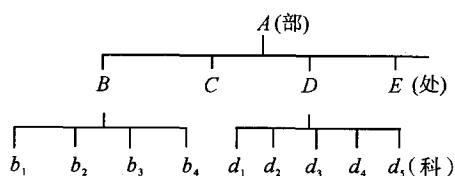


图 1.1.2 子系统组成系统的示意

(三) 功能

功能是指系统诸要素在一定结构下形成的效应。系统功能是由系统结构所规定的,并通过系统整体的运动表现出来。例如水电站系统各要素在它特定的结构下形成的是水力发电功能(见图 1.1.3);而道桥系统各要素在它特定的结构下形成的是交通运输功能。因此“结构”表示系统构造形式的特征,而“功能”表示系统的行为特征,并主要由系统内部的结构所决定;另一方面,系统功能是系统与外部环境相互联系和作用的能力,体现了它们间的物质、能量和信息

的输出、输入关系。

(四) 行为

行为是指实现系统目标所进行的活动,亦是系统功能的外部表现。

(五) 环境

任一系统在时间与空间上都是有限的,系统以外的其他与之有关的事物就是系统的环境,它是系统行为的外部制约条件。从一个角度看,环境对系统的作用表现为系统的输入,而系统对环境的作用表现为系统的输出,系统在特定条件下对输入进行工作就产生了输出,因此又可把系统看作为将输入加工为输出的转换机构。当然环境是相对于系统而言的,有时某一系统及环境的结合可能构成另一个新的系统。

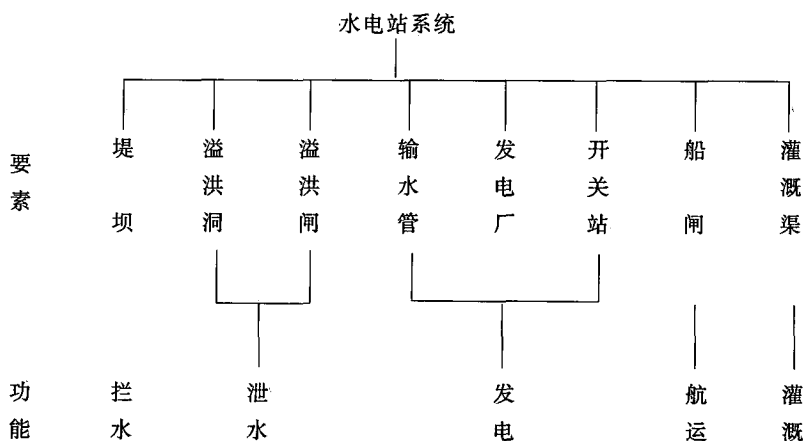


图1.1.3 水电站系统的要素与功能

1.2 系统的特征与分类

1.2.1 系统的特征

系统具有如下特征,这亦是剖析系统或构造新系统应遵循的基本原则。

(一) 相关性

系统论强调系统与其各要素、系统与环境、要素与要素间存在着普遍联系、相互依存、相互作用与制约的特性。以人体系统为例,每一个器官或子系统都不能离开人体这个整体而存在,各个器官和组织的功能和行为影响着人体整体的功能和行为,而且它们的影响都不是单独的,而是在其他要素的相互关联中影响整体的,系统的相关性正是系统具有结构性的表现。

（二）目的性

这是系统具有特定功能的表示,它提供了设计、建造或改造系统的目标与依据,反映了系统功能与行为具有的方向性。系统整体及其要素的行为不仅取决于现有状态,而且也依赖于系统未来的终极状态并受其制约。例如战争中交战双方的行为与决策不仅要考虑现有状态,而且更须服从“取胜”这个终极状态,“不争一城一地的得失,消灭敌有生力量”的战略思想便是从目的性出发的范例。

（三）等级秩序性(阶层性)

生物学研究表明,有机生命系统是按照严格的等级组织起来的:生物细胞→大细胞→器官→生理子系统→个体→群体→生态系统。宇宙和人类社会亦是如此。系统可以分解为若干子系统,子系统又可再分成子子系统直至要素,而每一系统又往往隶属于一个更大的系统。这样,在系统的整体与部分中形成许多等级,称为等级秩序性或阶层性。阶层性是系统相关性的一种特殊属性,可以表现为:支配要素通过各种手段对下属要素的领属关系,下层要素从属于或受控制于上层某些要素的从属关系,以及表示要素间存在物质、能量和信息等交换的相互作用关系。阶层性不仅指空间尺度上可划分为不同的等级层次,而且无论从结构还是功能看都存在等级性。系统的等级概念包含着系统的结构概念。研究分析一个系统,应首先确定系统的等级,即应在哪一级或哪一层次上研究这个对象。

（四）整体性

这是指组成系统的具有独立功能的要素,它们之间的相关性和阶层性等,在系统整体上进行逻辑统一和协调。这个整体将具有不同于各组成要素的新功能。系统的整体性是系统的核心,亦是协调侧面来说明相关性和目的性的特征。系统的整体功能不等于各个要素功能之和,而是强于它们的和,例如人体的功能不等于各个组织器官的功能之和。这正是古希腊哲学家亚里士多德所说的“整体大于部分之和”。一个具有良好功能的最优系统,其组成的各个要素往往不一定是最优的。研究系统整体性是为了在实现系统目标的前提下,使系统各要素间的相关性和阶层性等总体结合效果最佳。

（五）环境适应性

任何系统都存在于一定的环境中,环境与系统间发生着各种物质、能量和信息的交换,这种交换称为系统的输入与输出。环境提供并限定了系统的运行条件,因此系统只有适应外界环境的变化时,系统才会具有生命力。系统这种自动调节自身的结构、活动以适应环境变化的特性又称为系统的自组织性。

（六）动态性

这是指系统发展过程与时间进程有关的性质。例如工程建设系统,它包括工程投资的前期研究、可行性分析、规划、设计、施工、使用、维护和更新等阶段,系统的不同阶段呈现不同的形态与特征,暴露出不同的矛盾与问题,需要有不同的处理方法与手段,故研究系统要从系统的整个生命周期,分清所处的阶段来考察与分析。

1.2.2 系统的分类

世界上的系统,其形态各种各样,一般可按下列标准划分为不同的类别:

(一) 按自然属性分类

系统按其自然属性可分为自然系统和人造系统。前者的构成要素是自然物和自然现象,如太阳系、海洋、气象等;而后的要素是人造或在人参与下形成的系统,如社会、经济、科学技术、工程建设等。

(二) 按物质属性分类

系统按其物质属性可分为实体系统和概念系统。实体系统是由各类物质实体组成的系统,如生物、建筑物、电子计算机等;概念系统是由人的思维创造的、非物质的观念性东西(原理、概念、方法、程序等)所构成,如法律、伦理道德和信息系统等。实体系统可以是自然系统,也可以是人造系统,而概念系统一定是人造系统。有时也将实体系统称为硬系统,而将概念系统称为软系统,如城市设施系统为硬系统而城市管理法规为软系统。

(三) 按运动属性分类

系统按其运动属性可分为静态系统和动态系统。前者的系统状态、内部结构和参数等不随时间的变化而改变,例如城市供水管网系统和建筑物的结构系统在一定使用期限内是不变的,属静态系统;后者的系统状态、内部结构和参数等随时间进程而有较大的改变,如生命系统。动态系统内又视系统随时间而改变的同步程度,分为非时滞系统和时滞系统。

严格地说,静态系统是难以找到的,但如果在我们所考察的时间范围内,系统受时间变化的影响很小,就可以近似地当作静态系统看待。

(四) 按与环境的关系分类

根据与环境的关系,系统可分为开放系统和封闭系统。当系统与环境之间有物质、能量、信息等交互作用时,称开放系统;而当系统与环境之间无明显的交互作用时,称封闭系统。严格的封闭系统是难以找到的,但当上述的交互作用很弱、能被忽略时,可以当作封闭系统看待。因此封闭系统是开放系统的某种近似或简化,目的是便于分析研究。开放系统又可分为开环系统和闭环系统。如果系统的输出能反过来影响系统的输入,则称该系统具有“反馈”特性。能增强原输入作用的反馈称“正反馈”;而削弱原输入作用的反馈称“负反馈”。没有反馈的系统称开环系统;而具有反馈特性的系统称闭环系统,如图 1.2.1。

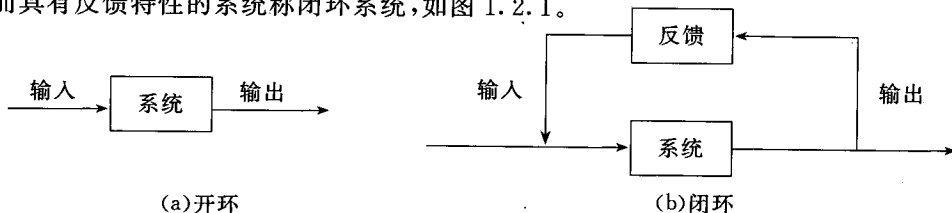


图1.2.1 开环与闭环系统

(五) 按系统状态变化分类

按系统的状态变化情况可将其分为确定性系统、不确定性系统和随机系统。

(六) 按规模大小和复杂程度分类

根据系统规模大小和复杂程度的不同,可分为大系统和小系统,简单系统和复杂系统。虽然大和小、简单和复杂间难以有明确的判别标准,但一般而言,大系统具有要素众多、结构复杂、功能多样、综合性强,以及用传统方法不易解决等特点。

还有别的一些分类标准,如按系统特定标志分,有因果系统、目的系统、控制系统、行为系统等。按照上述分类标准,任一系统总可归属于不同的系统类别内,如水电工程系统属于人造、实体、动态、开放的系统;然后选择相应的合适方法加以研究,例如随机系统需采用数理统计的方法,不确定系统宜采用模糊数学的方法,对于静态系统则表征系统运动规律的数学模型中将不含时间变量。

1.3 系统论思想的发展

系统论的思想和系统分析技术虽然近半个多世纪才发展起来并上升为比较完整的一门新学科,其实它源于人类千百年来的社会和生产实践,是人类认识世界和改造世界的点滴经验总结。古希腊人在观察事物的相互联系与组合时就提出过统一的物质本原的看法,把自然界当作一个统一体,提出整体、组织和秩序等概念。古希腊的唯物主义者德谟克利特(公元前 540—480 年)写过一本“宇宙大系统”的书;赫拉克利特(公元前 460—370 年)在“论自然界”一书中提出“世界是包括一切的整体”等思想。我国春秋时期思想家老子(公元前 6—5 世纪)强调自然界的统一性,他写的《道德经》中就含有朴素的辩证思想。我国传统的阴阳五行学说亦蕴含着将事物看成相互联系与制约(相生相克)、有秩序与组织的整体的思想。

这些朴素的系统思想的萌芽,限于当时社会生产力低下,缺乏对事物总体和细节的认识能力,因而这些观点和统一性的认识是不完整的和不深入的。15 世纪随着欧洲文艺复兴运动的出现,近代科学亦逐步兴起,发展出研究自然界的分析、实验、解剖和观察考证等方法,把自然界的细节从总的自然联系中抽出来,分门别类地加以研究,形成物理学、化学、天文学、力学、生物学等科目,并取得迅速的进展。人们认识事物的能力有了质的提高,但同时为了便于研究,往往把事物割裂出来单一、静止地考察。这种孤立、静止、机械和被动的思维方式,形成所谓形而上学的方法论,却又反过来堵塞了把握整体、洞察普遍联系、了解生动多样的自然界的道路。

19 世纪上半叶,随着自然科学巨大进步和产业革命的发生,特别是能量守恒与转化、细胞学和进化论的出现,人们对自然过程相互联系的认识有了很大提高。正如恩格斯在《路德维希·费尔巴哈和德国古典哲学的终结》(1888 年)中指出:“直到上一世纪末,自然科学主要是搜集材料的科学,关于既成事物的科学,但在本世纪,自然科学本质上是整理材料的科学,关于过程、关于这些事物的发生和发展,以及关于把这些自然过程结合为一个伟大整体的联系的科学”,“能够依靠经验自然科学本身所提供的事实,以近乎系统的形式描绘出一幅自然界联系的清晰图画”。马克思、恩格斯创建的辩证唯物主义就是根据丰富的自然科学进展,认为物质世界

是由无数相互联系、相互依存、相互制约与作用的事物和过程所形成的统一体,并且它是能动地发展着的。“自然界不是存在着而是生成着并消逝着”(恩格斯《自然辩证法》1886年)。显然,这种认为物质世界普遍联系、相互制约及其统一性的观点就是系统论的思想,或者说蕴含着系统论的思想。此外,在系统论思想的实际发展过程中有两件较重要的事值得着重叙述一下。

(一)“一般系统论”的思想

奥地利理论生物学家 L. V. 贝塔朗费把哲学中的协调、联系、秩序和目的性等概念用于对有机体的研究上,主张把有机体作为一个整体或系统,从生物与环境相互关系的观点来说明生命现象的本质,并于 1937 年提出了“一般系统论”的思想。其要点有如下四点:

(1)整体性原则

生物体是在有限时空中具有复杂结构的一种自然整体,任何部分都不能离开这个整体而存在,从中分割出来的每一部分将截然不同于生物体中发挥作用的那一部分。而且生物体是一个开放系统,生命的本质不仅要从生物体各个组成部分的相互作用中去认识,还应从生物体和环境的相互作用中来说明。

(2)动态结构原则

生物体是一种动态结构,以组成物质的不断代谢、不断变化为其生存条件,生物体与其说存在着,不如说是发生和发展着。

(3)能动原则

生物体不是被动系统,而是能动系统,如心跳、呼吸等不光是对外界环境刺激的反应,而主要是维持自身生存的内在要求的一种能动机制。

(4)组织等级性原则

生命问题本质上是个组织问题,而生物体的组织是有层次的、有序的。因此研究生命现象必须在生物体各个层次上进行:如物理化学层次、基因层次、细胞层次、器官组织层次、个体以及群体层次。每一层次的存在,总是以它的下级层次的生长、衰老和死亡为前提的。

1972 年,贝塔朗费临终的一年,他还发表了《一般系统论的历史和现状》,试图将系统论思想推广应用到其他方面,并对“一般系统论”重新定义。他指出,在不同的科学领域里存在相似性或同构性,存在着走向一体化的总趋势,这种一体化看来都汇集在系统的总理论中。他说,一般系统论可以作为一个新的科学规范,广泛应用到各个学科的研究领域中,内容包括三方面:

①关于系统的科学和数学系统论,即对各种不同的科学系统进行理论研究和要求运用精确的数学语言加以描述;

②系统技术,即包括系统工程、系统分析方法及其在科学系统和社会系统中的应用;

③系统哲学,即系统本体论、认识论、价值论、人与世界的关系等。

贝塔朗费曾明确指出:“虽然起源有所不同,一般系统论的原理和辩证唯物主义的类同是显而易见的。”

(二)系统工程学的概念

另一种关于“系统”的概念是人们在实际的生产与工程活动中逐步发展起来的所谓“系统工程学”。早在 1911 年美国泰勒(F. W. Taylor)在《科学管理原理》著作中就总结并提出了具有现代含义的系统概念。泰勒为了提高工厂劳动生产率,将工人劳动过程划分为三方面加以研究:

- ①解决操作工序划分和组成的合理性(工序分析);
- ②解决完成各工序的合理动作问题(动作分析);
- ③解决除操作时间以外的其余时间的合理利用问题(时间分析)。

正是将问题分解分类,既有定性分析又有定量分析,使劳动组织达到科学与合理,才形成了一套科学管理法。其后,法国的法约尔对管理职能提出了“计划、组织、指挥、协调与控制”五大要素,这是近代系统工程的萌芽。20世纪40年代,美国贝尔电话公司在微波通讯网络的研究中为缩短科学发明到实际应用的时间间隔,采用了一套较为科学的方法,并用“系统工程(Systems Engineering)”来命名这套方法。50年代起该公司向有关研究人员开设系统工程方法论的课程。1957年美国学者H. H. Goode等出版了第一部名为《系统工程》的书。60年代起系统工程逐步形成一门独立的工程技术。

还需指出的是,在第二次世界大战中,英国为了战胜法西斯德国,组织多学科专家进行战术战略研究,产生了运筹学(Operational Research 或 Operations Research)。他们运用自然科学和工程技术方法在处理防空、反潜、港口利用、商船护航、水雷布设等问题上都取得了良好的效果。战后,运筹学被进一步应用于经济生产领域,成为领导管理部门对其控制下的各种业务活动采取策略而提供定量依据的科学方法,亦为系统思想方法的量化建立了数学理论基础与方法,而电子计算机则为量化系统方法的实际应用提供了强有力的工具。

从逻辑上说,系统工程是一般系统论的应用与拓展,它是按系统论的观点和方法解决工程问题的。这里的工程是广义概念,即不仅包含对物质世界的利用、改造等工程问题,还包含对社会、经济、文化、法律等方面作为广义工程处理的问题。另一方面,系统工程亦可理解为从工程角度去看待系统、用工程方法去建立和改造系统,即用近代数学、有关的科学方法和工具来研究系统的规划、设计、组织、管理、运行、评价等问题的学科。这样,把系统概念和广义工程概念相结合,大大丰富了系统工程的内容,推动了系统论思想和系统技术的广泛应用。

正如前面指出,系统论与系统工程学都是人们在大量的生产和科学实践中逐步提炼和形成的。实践要求人们在处理问题时从事物整体目标和利益出发,通过分工协调与综合,最终在总体上达到合理、有效与经济的目的。特别是近代工程体系和科研项目,其规模和复杂性日益增长,更加需要这样做。美国在20世纪40年代研制原子弹的“曼哈顿工程”上,就利用了大系统的递解分层协调原则,把研究课题逐级分为大量小课题,由相应的小组负责,并及时从整体上加以协调,使全部课题的组合与实施达到最优。更为著名的阿波罗登月计划,从1961年5月到1972年12月前后历时11年,耗资300多亿美元,参加研制的美国 and 外国企业近两万多家,大学与研究机构120所,参与的工作人员多达400万,其中高级工程技术人员约42万。整个工程在计划进度、质量检验、可靠性评价和管理过程等方面都采用了系统工程与分析的方法,并且创造了“计划评审技术(PERT)”和“随机网络技术(GERT)”,实现了时间进度、质量技术与经费管理三者的统一。1969年7月21日,宇航员乘坐阿波罗11号实现了人类第一次登月,后来又多次发射阿波罗飞船登月,开展科学考察活动。如此规模巨大、参与单位和人员众多,为了一个目标而进行的繁复的集体协作中,每一部分的工作质量和进度,相互间的配合和协调都成为影响整个工程成败的关键。美国宇航局(NASA)正是采用了工程的分级综合计划管理等技术与措施,才使得登月计划按时顺利实现。阿波罗计划是公认的系统工程应用范例。

在我国,除了古代的哲学思想中包含有不少的朴素的系统论观点外,劳动人民在与大自然斗争中亦自觉或不自觉地运用系统思想创建了不少著名工程,其中最有名的是都江堰水利枢纽工程与开封的宋皇城的修复工程。

公元前 250 年秦太守李冰及其子李二郎为解决岷江洪灾和成都平原的灌溉问题,在灌县都江堰修建水利工程。工程主要有三大部分:鱼咀分水工程,将岷江分流为内江和外江;宝瓶口引水工程,将玉垒山劈开引水入灌溉渠;飞砂堰分洪排砂工程,处于分流后的内江末端,进行分洪与排砂;加上一系列灌溉渠系。这样汛期洪水由外江排泄,所需灌溉用水由鱼咀流入内江,经宝瓶口引入渠系,进入内江的多余水量和泥沙则由飞砂堰再排入外江。整个工程各部分有机配合,兼有防洪、灌溉、漂木、行舟等多种功能,达到整体最优。此外,还能考虑水利设施的运行维修,总结出“深掏滩、低筑堰”六字口诀的岁修养护制度。都江堰工程体现了整体、优化、开放、发展的系统思想,二千多年来能一直造福于四川人民,不愧是世界史上一项宏伟的系统工程典型例子。

宋皇宫修复工程,北宋真宗时期(公元 998—1022 年),由于皇城失火,宫殿全部被烧毁。负责修复工程的丁渭,统筹考虑了材料制备、运输、修复等整个过程,提出了如下施工方案:首先将皇宫旧址前的一条大街挖掘成沟渠,挖出的土用于烧砖;再将京城附近的汴水引入沟内,以便砂石木料的水运;皇宫修复后,排除沟水,并将建筑废弃物填入沟内,恢复原有大街。整个方案将皇宫修复的全过程作为一个系统,划分为许多并行与交叉的作业,从而多快好省地完成了修复工作。

我国在 20 世纪 60 年代初期就对系统工程开展了研究与应用,例如当时的导弹研制部门成立了总体设计部,负责导弹的研制、生产、试验和运行的组织管理工作,同时使用了国际上应用的一些系统工程方法,如计划协调技术(PERT/CPM)。有关的几个重要支柱,如运筹学、控制论、管理科学和信息论等的发展历史可追溯到 50 年代甚至更早。70 年代中期,以钱学森为代表的部分专家在各种场合开展系统工程的推广与应用,如他撰写的《组织管理技术——系统工程》(1978.9)产生了很好的影响。在这前后,教育部、航空学会、自动化学会等召开了一系列有关系统工程的会议,为随后的推广应用与队伍组织作了准备。1980 年 11 月,中国系统工程学会正式成立。其后北京、上海、湖南、大连、西安等地亦纷纷建立了系统工程学会,积极开展宣传普及和应用推广工作。目前我国的系统工程应用已涉及到各个领域,如军事、社会、经济、能源、农业、矿业、水利、环境、交通、人口、大型工程项目管理、企业管理和教育等方面,并取得不少成效,在社会进步与经济建设中发挥越来越重要的作用。

1.4 系统科学体系

自 20 世纪 40 年代以来,随着系统论及其思想的传播,人们在研究系统演变和发展的规律、量化方法和实际应用中,出现了很多分支学科,形成了一个学科体系——系统科学体系。

系统科学是以系统及其机理为研究对象的一种元科学,属于横向科学性质,它着重探讨许多学科的研究对象中的共同方面,诸如系统构成、组织结构、秩序、信息传递、控制与反馈以及演化发展等,抽取其中的机理、性质和过程特征,用统一的精确的科学概念、数学模型和方法加以描述与分析。钱学森等同志认为系统科学体系包括以下几个层次与内涵:

(一) 系统学或一般系统论

它研究各种系统,特别是复杂系统的共同本质与特征,揭露其运动和演进规律,并找出适