

第5章

系统工程

【学习重点】

- (1) 理解系统的定义、模型、特征和分类。
- (2) 理解系统分解与集成的思想和方法。
- (3) 理解系统科学与系统工程的基本概念、知识体系和系统工程分析方法。

本章从系统的基本概念开始,介绍系统的定义、模型、特征和分类,以及系统科学与系统工程的基本概念与系统工程分析方法论,重点阐述了系统科学与系统工程的定义、系统分解与集成的思想与方法、系统工程方法论。

5.1 系统

5.1.1 系统的定义



视频讲解

系统(System)一词来源于古代希腊文,意为部分组成的整体,已经为人们所熟知。系统广泛存在于自然界、人类社会和人类思维的描述之中。人们在自然界和人类社会中所见到的各种事物都可以看作是一个系统,系统在实际应用中总是以特定系统出现的。例如,生态系统、行政系统、教育系统、生命系统等。系统是普遍存在的,从基本粒子到河外星系,从人类社会到人的思维,从无机界到有机界,从自然科学到社会科学,系统无所不在。

在数字信号处理的理论中,人们把能加工、变换数字信号的实体称作系统。由于处理数字信号的系统是在指定的时刻或时序对信号进行加工运算,因此这种系统被看作是离散时间的,也可以用基于时间的语言、表格、公式、波形4种方法来描述。从抽象的意义来说,系统和信号都可以看作序列。但是,系统是加工信号的机构,这点与信号不同。人们研究系统、设计系统、利用系统加工信号和服务人类。除上文的4种描述方法,描述系统的方法还有符号、单位脉冲响应、差分方程和图形。

系统的定义应该包含一切系统所共有的特性。一般系统论创始人贝塔朗菲认为,系统是相互联系、相互作用的诸元素的综合体。该定义仅仅描述系统的组成要素和关系,没有给出系统的作用。

美国国家标准协会将系统定义为各种方法、过程或技术结合在一起,按照一定规律相互作用,构成的一个有机整体。该定义强调了整体的概念和集成的思想。

国际标准化组织定义系统为内部相互依赖的各个部分,按照某种规律为实现某一特定

目标而联系在一起的合理的、有序的组合。该定义强调部分的有机依赖和有共同目标,也没有指出系统的作用。

我国著名学者钱学森给出一个较为全面的系统定义:系统是相互作用和相互依赖的若干组成部分或要素结合而成的具有特定功能的有机整体。

根据系统的概念,本书列出了关于系统的3个要点。

(1) 系统有特定的目标。每个系统都实现一个特定的目标,否则系统就没有存在的价值。例如,办公自动化系统的目标就是提高办公室工作的效率。

(2) 系统有一定的结构。部分或要素是组成系统的基础,它们为实现系统的目标按照某种结构密切地组合在一起。系统组成要素之间存在着各种联系,并且相互作用和相互依赖。

(3) 系统都有特定的功能。每个系统作为一个整体实现系统的目标,必然需要由各个组成部分相互作用所表现出的功能来达到。例如,一个事务处理系统由输入、输出和处理3部分配合完成数据的录入、分类、计算、分析、汇总和存储等功能,以提高事务处理的准确性和高效性等。

5.1.2 系统的模型

如5.1.1节所述,任何系统都有一定的结构。一个系统是其构成要素的集合,这些要素相互联系、相互制约。系统内部各要素之间相对稳定的联系方式、组织秩序及失控关系的内在表现形式,就是系统的结构。例如钟表是由齿轮、发条、指针等零部件按一定的方式装配而成的,但一堆齿轮、发条、指针随意放在一起却不能构成钟表。人体由各个器官组成,单个各器官简单拼凑在一起不能称其为一个有行为能力的人。

1. 系统的一般模型

一个简单的系统,其一般模型包含输入、处理和输出3部分。对于稍微复杂一些的系统,往往还有反馈部分,如图5.1所示。



图 5.1 带有反馈的系统的一般模型

图5.1是带有反馈的单输入单输出的系统,有些系统有多个输入和多个输出。

2. 系统的普遍模型

一个系统既有简单的,如细胞系统,也有复杂的,如生命系统等。在研究一个复杂系统时,人们往往需要对系统进行分解,例如子系统,而每一个子系统相对于整个系统必然相对简单,也容易研究和分析。因此,一个复杂系统可以根据不同的要求分解成不同的子系统,而每个子系统也可以再次分解,直到能够有效理解为止。子系统之间通过分解的输入、输出进行联系,从而将一个复杂的系统简化为相互联系的多个子系统的组合,这就是系统的普遍模型,如图5.2所示。例如,系统分为子系统1、子系统2和子系统3共3个子系统,子系统1进一步分为子系统1.1和子系统1.2,而子系统1.1还可以再次细分等。

系统都有边界,用来定义系统的内部与外部关系,利于描述一个系统的特征组成。边界

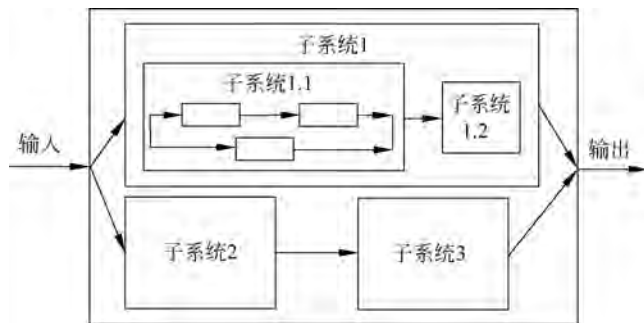


图 5.2 系统的普遍模型

之内是系统自身,边界之间是环境。系统的子系统由子系统的边界界定,子系统之间通过某种关系连接起来,这就是接口,也是子系统之间的约束。系统之间通过接口进行联系,系统就可以分开进行研究和分析。

5.1.3 系统的特征

系统论认为,开放性、自组织性、复杂性、整体性、关联性、等级结构性、动态平衡性、时序性等是所有系统的共同的基本特征。这些基本特征既是系统所具有的基本思想观点,又是系统方法的基本原则。本书归纳系统的基本特征如下。

(1) 目的性。任何一个系统都存在目的性。没有目的的系统难以发展,最终会消亡。

(2) 整体性。整体性是系统最基本与本质的特征。系统是多方面复杂因素的综合。系统与要素间的相互规定的相互作用,使得它们都获得了整体意义上的全新规定性。系统整体的存在方式具有一定的规律性。系统的结构是由不同层次的子系统组成,并且各层次间互相制约和影响。

(3) 适应性。系统能够与其所处的外界环境进行物质、能量和信息的交换。外界环境的变化会引起系统功能和组成要素相互关系的变化,这种变化使得系统逐步适应环境,并保持最佳的状态,也是最理想的系统。这种适应性也反映了系统具有动态变化特性,即系统的内部结构随系统与外界的物质、能量和信息的交换而变化,并向某个方向发展。这种发展是一个动态过程。

(4) 开放性。任何一个系统都不是封闭的,都要与外界环境中的其他系统交互。尽管系统具有一定的独立性,但是单系统作为一个整体又会与其他系统相互关联、相互影响。当然,系统具有一定的自我调节功能,能够在一定范围内自我调节,从而保持和恢复原来的有序状态、结构和功能。

(5) 动态性。开放系统与外界环境有物质、能量和信息的交换,系统内部结构也可以随时间不断变化。

5.1.4 系统的分类

由于系统的形态千变万化,按照不同的标准对系统进行划分就有不同的分类。例如,按照系统的形成,可以将其分为自然系统和人造系统;按照系统状态是否随时间变化,可以将其分为动态系统和静态系统;按照系统要素的多少,可以将其分为简单系统和复杂系统;

按照系统的功能,可以将其分为社会系统、经济系统、企业管理系统等。这说明了系统具有多样性特征。下面介绍几种系统分类。

1. 系统的基本分类

系统的基本分类是按照系统的形成与功能分类,可以将其分为自然系统、人工系统、复合系统和生理学概念 4 类。

自然系统是指系统内的个体按自然法则存在或演变,产生或形成一种群体的自然现象与特征。自然系统包括生态平衡系统、生命机体系统、天体系统、物质微观结构系统以及社会系统等。

人工系统是指系统内的个体根据人为的、预先编排好的规则或计划好的方向运作,以实现或完成系统内个体不能单独实现的功能、性能与结果。人工系统包括立体成像系统、生产系统、交通系统、电力系统、计算机系统、教育系统、医疗系统、企业管理系统等。

复合系统是自然系统和人工系统的组合。复合系统包括导航系统、交通管理系统和人机系统等。维纳在创立控制论的过程中,把动物、机器的通信和控制看作一个系统。为了明确研究的对象,人为地将物质或空间与其余物质或空间分开,被划定的研究对象称为系统。在热学中,通常把一定质量的气体作为研究对象,此研究对象就称为系统。在流体力学中,众多流体质点的集合称为系统。

生理学概念是指一些在机能上有密切联系的器官联合起来完成一定的生理机能即可称为系统。例如,口、食管、胃、肠及各种消化腺,有机地结合起来形成消化系统。高等动物体(或人体)内有许多系统,如皮肤系统、骨骼系统、肌肉系统、消化系统、呼吸系统、循环系统、排泄系统、内分泌系统、神经系统和生殖系统。这些系统又主要在神经系统和内分泌系统的调节控制下,彼此相互联系、相互制约地执行其不同的生理机能。只有这样,才能使整个有机体适应外界环境的变化和维持体内外环境的协调,完成整个的生命活动,使生命得以生存和延续。

2. 按照系统的复杂程度分类

按照系统的复杂程度分类,可以将其分为底层、中层和高层 3 个层次。底层系统属于物理系统,中层系统属于生物系统,高层系统属于最复杂的人类社会和宇宙系统,如图 5.3 所示。



图 5.3 基于复杂程度的系统分类

(1) 物理系统。框架结构、钟表结构和控制装置等属于物理系统,如机床、汽车、计算机等。它们的共同特点是由一些无生命的物理元器件构成。这类系统虽然还可以进一步按照复杂程度细分,但在总体上这里系统的复杂程度较低。

(2) 生物系统。顾名思义,凡是有生命的系统都属于生物系统。从微生物到植物,从植物到动物,它们的共同特点是由不同的细胞构成。事实上,细胞本身也是一个生物系统,细胞虽小,但却比任何物理系统都高级,也更复杂。

(3) 人类社会和宇宙系统。人类社会是指由一定的经济基础和上层建筑构成的人类生存环境的整体,包括文化、艺术、宗教、法律、政治等多方面。例如,管理信息系统就是一个具有明显的社会文化特征,并且包含软硬件系统要素的复杂社会系统。宇宙系统包括地球等所有已知和未知的星球。

3. 按照系统的抽象程度分类

按照系统的抽象程度,可以将其分为概念系统、逻辑系统和实在系统。在信息系统开发过程中,为了更好地理解系统,往往在系统开发的不同阶段构建不同的抽象模型。

(1) 概念系统。概念系统是由概念、原理、原则、制度、方法、程序等非物质实体组成的系统,如各种科学技术体系、法律、法规等。人们在系统分析的初始阶段,根据系统的目标进行抽象并构造系统的概念模型。概念模型是对概念系统的目标、使命和主要功能的图形描述。概念模型关注系统的结构,尤其是通过输入、输出来表示系统的功能和目的。概念模型只关心系统的输入、输出信息与处理的关系,而对系统如何将输入变换为输出无须知道,目的是弄清楚各部分之间的关系。例如,超市收银管理系统的输入包括客户信息、商品信息、支付信息,输出的是购物清单信息、财务信息、发票信息、库存信息和销售信息等。图 5.4 是超市收银管理系统的概念模型。

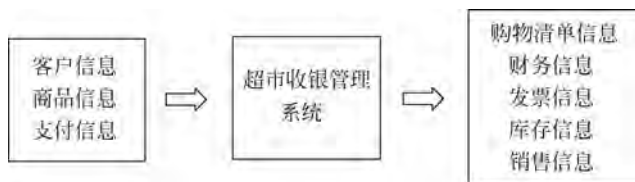


图 5.4 超市收银管理系统的概念模型

(2) 逻辑系统。逻辑系统是在概念系统的基础上构造而成的理论上可以实现的系统。逻辑系统考虑了系统整体的合理性、结构的逻辑性和实现的可能性,能够根据系统所规定的要求,给出实现系统的要素、功能、方法和规程,是一种摆脱了具体实现细节的合理系统。系统的逻辑结构可以通过逻辑模型来表达。

逻辑模型描述了系统输入、处理和输出之间的逻辑关系。逻辑模型关注系统的实现方案,即逐步深入系统的内部,考虑系统的处理过程。图 5.5 所示的是超市收银管理系统的逻辑模型。

系统的输入数据有客户信息(客户号、级别、积分、有效期)、商品信息(商品号、数量、单价)、支付信息(付款方式、卡号、密码),输出数据有购物清单信息(单号、客户号、日期、商品列表、总价、付款流水号)、账务信息(付款流水号、金额、付款方、付款方账号、收款方、收款方账号、付款方式、销售单号)、发票信息(发票号、付款方名称、付款方账号、付款方电话、收款

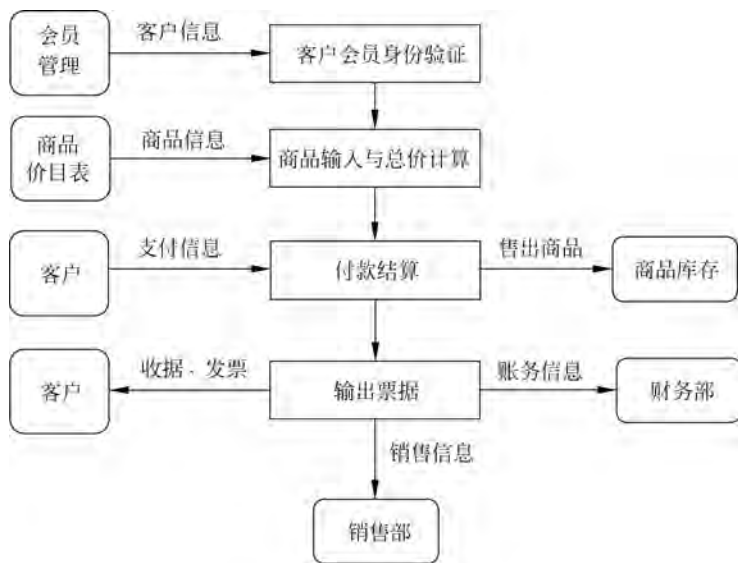


图 5.5 超市收银管理系统的逻辑模型

方名称、收款方账号、发票明细、发票总额、税金、发票代码、开票人、复核人、开票日期等)、库存信息(商品号、库存量)和销售信息(销售单号、日期时间、客户号、商品明细、总价、支付流水号)。

(3) 实在系统。实在系统是指客观存在并可以实际运作的系统,通常也称为实体系统或物理系统。它是系统在物理上的实现。对于信息系统来说,就是指把逻辑模型变成可运行的软件。一个实在的超市收银管理系统通过计算机运行,收银员可以输入客户会员号、商品明细,系统能够计算总价和完成支付后打印购物清单和发票等信息。

5.2 系统分解与集成

系统论的基本思想方法,就是把所研究和处理的对象当作一个系统,分析系统的结构和功能,研究系统、要素、环境三者的相互关系和变化的规律性,并从优化系统的观点看问题。世界上任何事物都可以看成是一个系统,系统是普遍存在的。大至浩瀚的宇宙,小至微观的原子,一粒种子、一群蜜蜂、一台机器、一个工厂、一个学会团体……都是系统,整个世界就是系统的集合。

正如前面所述,系统一般由若干子系统组成。对于复杂的系统,如果把它作为一个整体来理解则会非常困难。如果把它分解成一系列子系统,而每个子系统都是一个简单系统,不仅便于理解,还容易实现。当然,如果一个子系统还不能完全理解,就说明该子系统还是很复杂,需要进一步分解成更小的模块。分解过程一直进行,直到所有的子系统或模块都能理解为止。信息系统与一般的系统一样,也可以分解成许多的子系统,然后逐个进行子系统的设计,最后反向进行系统集成,实现完整的系统。

5.2.1 系统分解

分解是把复杂问题趋于简单化处理的有效策略,即“分而治之”。若一个复杂问题分解

成若干容易解决的小问题,就能够减少解决问题所需要的总工作量。当然,分解必须是科学而合理的,否则反而可能会增加解决问题的难度和工作量。如何合理地分解系统,得到可行的系统组成结构,需要用到抽象的思想。

抽象是人类在认识或求解复杂问题的过程中,科学而合理地进行复杂系统分解的基本策略之一。抽象是概括一些事物中存在的相似的方面。抽象的主要思想是抽取出事物的本质特性,而暂不考虑它们的细节。这是一种分层次的渐进过程。分解与抽象是系统方法学中广泛采用分层次的从抽象到具体的逐步求精技术。建立模型是系统分解最常用的方法和技术之一。模型是一个方法或过程的合理而规范的框架。研究和建立模型必须运用抽象概括和创造思维,进行综观全局的科学总结。

对于系统的分解,采用分层次的逐步求精技术,就可以将系统的分解过程一直进行到易于理解和易于实现的子系统或模块,形成一个层次化的系统组成结构,如图 5.6 所示。

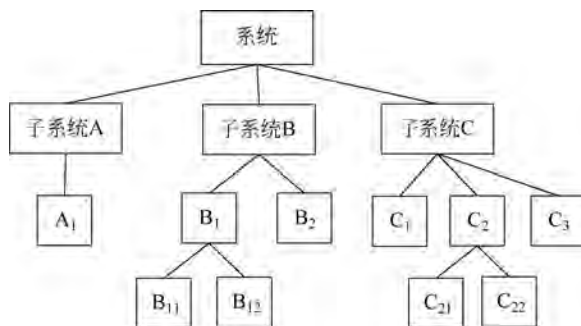


图 5.6 系统分解的层次结构

图 5.6 所示的系统分解的层次结构,上级子系统或模块调用下一级子系统或模块,下级子系统或模块返回结果给上一级子系统或模块。例如,子系统 B 有两个下一级子系统 B_1 和 B_2 ,而子系统 B_1 又有两个下一级子系统 B_{11} 和 B_{12} 。子系统或模块之间通过接口进行通信和传递数据。

对于管理信息系统的分解可以从不同的角度进行。对于上层的分解,可以从职能的角度将企业的管理信息系统分解成生产、后勤、财务、市场等子系统。从管理活动的角度可以将企业的系统分为作业计划控制、管理计划和战略决策 3 个子系统。

综上所述,在面对一个复杂而又庞大的系统时,无法通过一张图表就把系统所有元素之间的关系描述清楚,这就要将系统按一定的原则分解成若干子系统。分解后的每个子系统,相对于总系统而言,其功能和结构的复杂程度都大大降低。对于较复杂的子系统,我们还可以对其进一步分解,直至达到要求为止。用自顶向下、从抽象到具体的方式分解过程,不仅可以使系统的结构非常清晰,容易设计,便于阅读和理解,也增加了系统的可靠性,提高了系统的可修改性。一般来说,系统分解需要考虑以下原则。

(1) 可控性原则。系统内部的元素一般是可以控制的,而系统外部的元素则是不可控制的,因而把系统中的若干元素划分为同一子系统时,该子系统应能管理和控制所属的所有元素。

(2) 功能聚合原则。在系统内部的元素通常按功能聚合原则来进行子系统划分。系统由若干模块构成,而模块具有各自的功能。若干模块按功能聚合构成子系统。评价聚合结

果好坏的准则是：高内聚低耦合。

(3) 接口标准化原则。系统在分解的过程中,需要定义大量的接口。接口是子系统之间的连接点,即子系统输入和输出的标准规范。在信息系统中接口的功能是十分重要的。通过接口可以完成过滤、编码/解码、纠错、缓冲等方面的工作。

5.2.2 系统集成

系统集成是为了达到系统目标将可利用的要素、资源或子系统有效地组织起来综合为统一的系统的过程。系统集成包含以下 5 大要素。

(1) 客户行业知识。要求对客户所在行业的业务、组织结构、现状和发展趋势有较好的理解和掌握。

(2) 技术集成能力。技术集成能力,即从系统的角度,为客户需求提供相应的系统模式,以及实现该系统模式的具体技术解决方案和运作方案的能力。

(3) 产品改进能力。对供货商提供产品的性能、技术指标应有全面的掌握,并能够对其性能进行适应性改进。

(4) 系统评价技术。应能够对所提出的系统方案的性能及可靠性、可用性、可维护性和安全性,以及与其他系统的匹配性、兼容性和对环境的影响进行量化的评选。这些评选将贯穿于整个项目的生命周期。

(5) 系统调试技术。为单系统调试和系统间的互联、互通调试提供标准、内容、程序及技术手段。

系统集成商为用户提供从方案设计开始,经过产品优选、施工、软硬件平台配置、应用软件开发,到售后培训、咨询和技术支持等一揽子服务,使用户能得到一体化的完整的解决方案。

系统集成有以下几个显著特点。

(1) 系统集成要以满足用户的需求为根本出发点。

(2) 系统集成不是选择最好的产品的简单行为,而是要选择最适合用户的需求和投资规模的产品和技术。

(3) 系统集成不是简单的设备供货,它更多的是体现设计、调试与开发的技术和能力。

(4) 系统集成包含技术、管理和商务等方面,是一项综合性的系统工程。技术是系统集成工作的核心,管理和商务活动是系统集成项目成功实施的可靠保障。

(5) 性能性价比的高低是评价一个系统集成项目设计是否合理和实施是否成功的重要参考因素。

总而言之,系统集成是一种商业行为,也是一种管理行为,其本质是一种技术行为。系统集成可以按不同的方式进行分类。

(1) 按照优化程度可以将系统集成分为联通集成、共享集成和最优集成。联通集成是指保证系统设备能够互相联通。联通性是指计算机和其他设备在无人干涉的情况下,能够实现互相通信和共享信息的功能。联通性不只是联网,同时也要实现硬件和软件的兼容性、可移植性和互用性。共享集成是指整个系统的信息能够为系统中的所有用户所共享。最优集成是理想状态的高水平集成,一般只有在新建系统时才能达到。新建系统时,根据确定的目标,全面合理地规划信息系统的功能和流程,使系统各部分的集成达到最优。实际上随着

时间的推移、环境的改变,原来认为最优的系统也会偏移,需要不断地进行调整。

(2) 按照经济活动的内容可以将系统集成分为技术集成、管理集成和技术与管理的综合集成。技术集成是指达到技术上的联通,如信息系统集成中的网络集成和硬件集成。管理集成是指达到企业业务管理上的联通,如供应、加工和销售的集成等。技术和管理的综合集成是指考虑技术和管理上的综合联通,如信息系统集成除了包括网络集成和硬件集成以外,还包括软件集成、信息集成、业务集成、人与组织机构的集成等。

(3) 按照系统抽象程度可以将系统集成分为概念集成、逻辑集成和物理集成。现实问题经过人的表达,并根据经验和知识,就可以为要实现的系统进行概念集成,然后在规则和规律的支持下,将系统转换为逻辑集成模型,接着将逻辑集成模型和现实状况进行比较,以确定集成方案能否很好地解决现实问题,最后再进行物理集成,形成满足现实问题要求的系统。

【例 5.1】 建筑系统集成

建筑内的子系统包括安防、中央空调、给排水、消防、照明、机电等各专业子系统。建筑系统集成是通过将建筑内的有关系统设备集中进行管控的一种重要的技术手段。它能够实现各个相对独立运行系统的集中控制,包括弱电子系统以及建筑物内的重要运行项目,还能实现各个单体建筑之间的信息共享等。集中的管理系统代替传统的管理模式,从而实现管理的系统化、集成化。由于在这一过程中涉及的设备、软硬件众多且不具备统一性,为了达到统一调配管理的目的,需要运用一定的技术手段进行资源的整合、数据的处理、系统的兼容即系统集成,相比单独的几项弱电工程要繁复得多。集成系统除了具有强大的管控功能之外,各项关键的软件技术和支撑的硬件配置、各个独立系统之间的信息传递与共享,是集成系统正常运行的重要基础。

5.3 系统科学与系统工程

5.3.1 系统科学

1. 系统科学的概念

系统科学是一门总结复杂系统的演化规律,研究如何建设、管理和控制复杂系统的科学。以系统为研究对象的基础理论和围绕应用开发所涉及的学科群,着重考察各类系统的关系和属性,揭示其活动规律,探讨有关系统的各种理论和方法。

狭义地讲,系统科学是指一门科学,它包括理论基础和实践应用两部分。其理论基础是指对系统的特性和规律进行阐明的系统论,其实践应用则是指系统工程,即将系统分析与工程技术结合起来,解决管理中的规划、设计、研究、制造、试验和使用的科学方法。广义地说,系统科学是指一组学科群,是在当代科学发展的前沿所产生的一组揭示自然界和社会、无机界、有机界、非生命界和生命界物质运动的普遍联系和共同规律的横向学科群。其代表性学科是控制论、信息论和系统论。

信息论以通信系统的模型为对象,以概率论和数理统计为工具,从定量的角度描述了信息的传输和提取等问题。信息论的研究领域扩大到机器、生物和社会等系统,发展成为一门专门利用数学方法来研究如何计量、提取、变换、传递、存储和控制各种系统信息的一般规律

的科学。

控制论运用信息、反馈等概念,通过黑箱系统辨识与功能模拟仿真等方法,研究系统的状态、功能和行为,调节和控制系统稳定地、最优地趋向目标。控制论充分体现了现代科学整体化和综合化的发展趋势,具有十分重要的方法论意义。

系统论运用完整性、集中性、等级结构、终极性、逻辑同构等概念,研究适用于一切综合系统或子系统的模式、原则和规律,并力图对其结构和功能进行数学描述。系统强调整体与局部、局部与局部、整体与外部环境之间的有机联系,具有整体性、动态性和目的性 3 大基本特征。作为一种指导思想,系统论要求把事物当作一个整体或系统来考察,符合马克思主义关于物质世界普遍联系的哲学原理。

2. 系统科学知识体系

系统科学知识体系的结构根据其理论概括程度的高低,可以划分为 3 个层次。

(1) 系统的基础理论。奥地利生物学家贝塔朗菲创立的一般系统论、比利时物理学家和化学家普利戈金与布鲁塞尔学派提出的耗散结构理论、德国物理学家哈肯倡导的协同学,分别从生物学、物理学和化学等不同学科出发,探讨共同的系统理论,正在形成系统的基础理论学科——系统学。

(2) 系统的技术科学。其是指运筹学、系统方法和计算机科学技术等。运筹学包括数学规划、博弈论、排队论、库存决策理论、搜索论和网络技术等。系统方法是合理地研究和处理有关系统的整体联系的一般科学方法论。系统方法在唯物辩证法的指导下,运用系统理论,为研究和设计各种系统客体提出基本的原则,引导人们有效地解决各种现实课题。现代计算机科学技术主要是计算机的应用,这是系统研究和开发的必要工具,它使复杂系统的大量数据的定量分析得以实现。系统的技术科学层为系统的基础理论运用于系统工程技术提供了重要的方法和手段,具有应用理论学科的性质。

(3) 系统工程技术。其是指系统工程或系统分析,国外称为广义的系统分析。狭义的系统分析则是一种决策方法,用于决策阶段,而系统工程则用于管理活动全过程,国内统称为系统工程。系统工程是组织管理的技术和方法,具有应用学科的性质。

5.3.2 系统工程

管理学的观点认为,系统工程学实际上是一种组织管理技术。系统工程学通过人和计算机的配合,能充分发挥人的理解、分析、推理、评价、创造等能力的优势,又能利用计算机的高速计算和跟踪能力,依此来实验和剖析系统,从而获得丰富的信息,为选择最优的或次优的系统方案提供有力工具。

工程学的观点认为,系统工程是一个用于实现产品的跨学科方法。其能够把每个产品作为一个整体来理解,更好地构建产品的规划、开发、制造和维护过程。企业利用系统工程来对一个产品的需求、子系统、约束和部件之间的交互作用进行建模和分析,并进行优化和权衡,在整个产品生命周期中做出重要决策。在整个生命周期,系统工程师利用各种模型和工具来捕捉、组织、优先分级、交付并管理系统信息。例如,通过面向质量的设计、质量屋、六西格玛设计、TRIZ 以及其他技术,系统工程能够捕捉并对客户要求优先分级,然后采用功能建模、面向对象方法、状态图进行评估、功能分析和物理划分等。

我国著名科学家钱学森认为,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方法。

系统工程是运用系统思想直接改造客观世界的一大类工程技术的总称。系统是由互相关联、互相制约、互相作用的若干组成部分构成的具有某种功能的有机整体。人们对于系统的认识,即关于系统的思想来源于社会实践,人们在长期的社会实践中逐渐形成了把事物的各个组成部分联系起来从整体角度进行分析和综合的思想,即系统思想。系统工程是以研究大规模复杂系统为对象的新兴边缘科学,是处理系统的一门工程技术。对新系统的建立或对已建系统的经营管理,采用定量分析法(包括模型方法、仿真实验方法或优化方法)或定量与定性分析相结合的方法,进行系统分析与设计,满足整个系统预定的目标。

系统工程的研究范围已由传统的工程领域扩大到社会、技术和经济领域。例如,任何一种社会活动都会形成一个系统,这个系统的组织建立、有效运转就成为一项系统工程。因此,系统工程可以解决的问题涉及改造自然,提高社会生产力,增强国防力量,直至改造整个社会活动。

可以看出,系统工程不仅研究对象广泛,而且是一门交叉学科。系统工程是自然科学和社会科学的交叉,其不仅要用到信息科学、控制论、计算机科学、工程科学、应用数学等自然科学,还要用到社会学、心理学、经济学、管理学等与人的思想、行为等有关的社会科学,如图 5.7 所示。

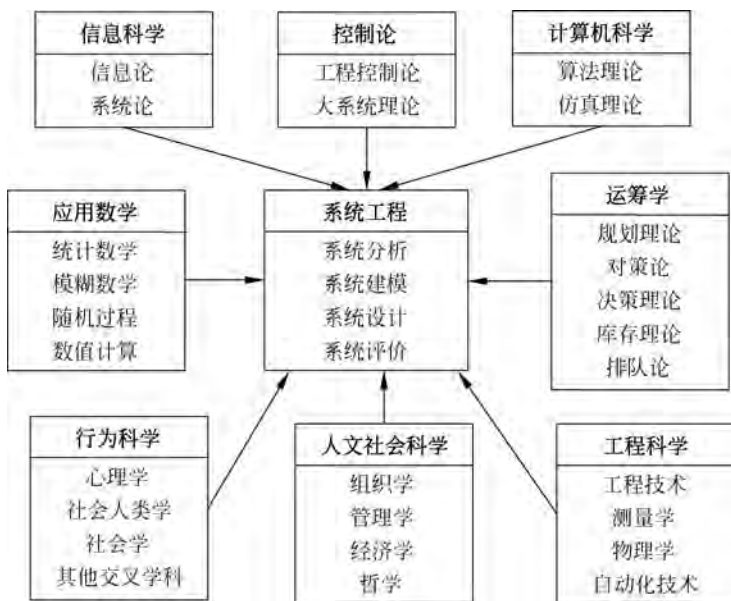


图 5.7 系统工程的学科交叉关系

系统工程是关于生产、建设、交通、储运、通信、商业、科学研究以及人类其他活动的规划、组织、协调和控制的科学方法。系统工程以系统为对象,从系统的整体观念出发,研究各个组成部分,分析各种因素之间的关系;运用数学方法,寻找系统的最佳方案,使系统总体效果达到最佳。

系统工程在我国建设事业、生产管理、商业经营、资源利用、环境保护、经济体制改革和科学研究等诸多领域均已取得了显著成效,其重要作用已被人们所广泛认识和接受。

5.4 系统工程方法论

方法论是进行研究和探索的一般途径,是对方法如何使用的指导。系统工程方法论是用于解决复杂问题的一般程序、逻辑步骤和通用方法。从系统方法论来看,系统工程是结构、功能和历史等方法的统一,它有一套独特的解决复杂系统问题的工具和技巧,如双向因果环、反馈、流位和速率等概念。系统工程模型中能容纳大量的变量,它是一种结构模型,通过它可以充分认识系统结构,并以此来把握系统的行为,是实际系统的实验室。

本节主要介绍系统工程方法论中几个具有代表性的方法论。

5.4.1 霍尔三维结构方法论

霍尔三维结构又称霍尔的系统工程,与软系统方法论对比,其称为硬系统方法论。霍尔三维结构方法论是霍尔等人在大量工程实践的基础上,于1969年提出的一种系统工程方法论。其内容反映在可以直观展示系统工程各项工作内容的三维结构图中。霍尔三维结构集中体现了系统工程方法的系统化、综合化、最优化、程序化和标准化等特点,是系统工程方法论的重要基础内容。

霍尔三维结构是将系统工程整个活动过程分为前后紧密衔接的7个阶段和7个步骤,同时还考虑了为完成这些阶段和步骤所需要的各种专业知识和技能,就形成了由时间维、逻辑维和知识维所组成的三维空间结构,如图5.8所示。其中,时间维是指系统开发的各个阶段,用T轴表示,表示系统工程活动从开始到结束按时间顺序排列的全过程,分为规划、拟订方案、研制、生产、安装、运行、更新7个时间阶段。逻辑维是指时间维的每一个阶段内所要进行的工作内容和应该遵循的思维程序,用L轴表示,表示包括明确问题、确定目标、系统分析、系统综合、优化设计、决策、计划与实施7个逻辑步骤。知识维用K轴表示,列举出

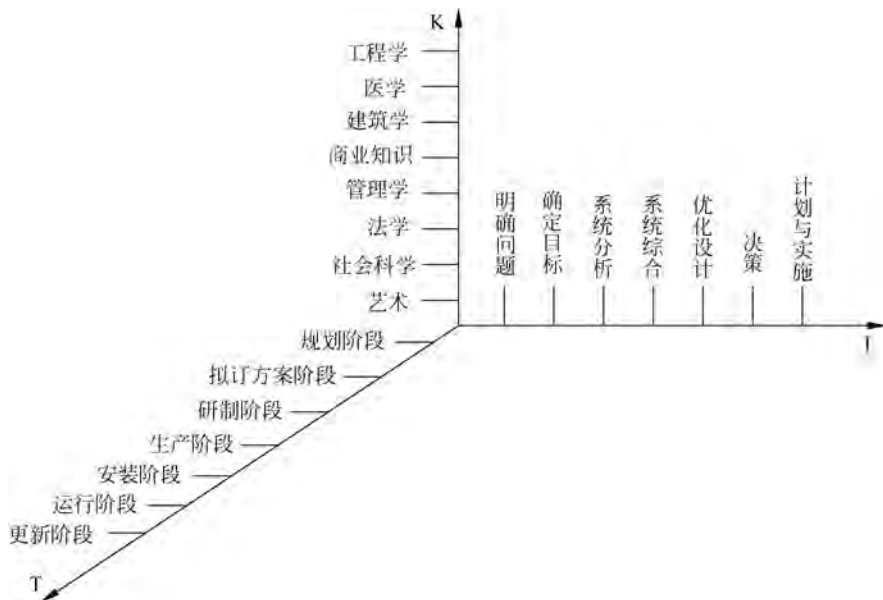


图 5.8 霍尔三维结构

需要运用的各种知识和技能,包括工程学、医学、建筑学、商业知识、管理学、法学、社会科学、艺术等。

霍尔三维结构体系形象地描述了系统工程研究的框架,对其中任一阶段和每一个步骤,又可进一步展开,形成了分层次的树状体系。下面将逻辑维、时间维和知识维逐项展开讨论,可以看出,这些内容几乎覆盖了系统工程理论方法的各个方面。

1. 逻辑维

逻辑维是指解决问题的逻辑过程。运用系统工程方法解决某一大型工程项目时,一般可分为7个步骤。

(1) 明确问题。由于系统工程研究的对象复杂,包含自然界和社会经济各方面,而且研究对象本身的问题尚不清楚,如果是半结构性或非结构性问题,也难以用结构模型定量表示。因此,系统开发的最初阶段首先要明确问题的性质,以便正确地设定问题。设定问题的方法主要有直观的经验方法、预测法、结构模型法和多变量统计分析法。

(2) 确定目标。提出目标,制定原则。选择目标过程使用价值体系。行之有效的价值体系方法有效用理论、费用/效益分析法、风险估计和价值工程等。

(3) 系统分析。不论是工程技术问题还是社会环境问题,系统分析首先要对所研究的对象进行描述,常采用的方法有建模方法和仿真技术。对难以用数学模型表达的社会系统和生物系统等,也常用定性和定量相结合的方法来描述。系统分析的主要内容涉及系统变量的选择、建模与仿真和可靠性工程等。

(4) 系统综合。系统综合是在给定条件下,找出达到预期目标的手段或系统结构。一般来讲,按给定目标设计和规划的系统,在具体实施时,需要通过对问题本质的深入理解,做出具体解决问题的替代方案,或通过典型实例的研究,构想出系统结构和能实现目标要求的实施方案。系统综合的过程常常需要有人参与,计算机辅助设计和系统仿真可用于系统综合,通过人机的交互作用和人的经验知识,使系统具有推理和联想的功能。近年来,知识工程和模糊理论已成为系统综合的有力工具。

(5) 优化设计。在系统的数学模型和目标函数已经建立的情况下,可用最优化方法选择目标值最优的控制变量值或系统参数。所谓优化,就是在约束条件规定的可行域内,从多种可行方案或替代方案中得出最优解或满意解。实践中要根据问题的特点选用适当的最优化方法,目前应用最广的仍是线性规划和动态规划,非线性规划的研究很多,但实用性尚有待改进,大系统优化已开发了解解协调的算法。组合优化适用于离散变量,整数规划中的分支定界法、逐次逼近法等的应用也很广泛。多目标优化问题的最优解处于目标空间的非劣解集上,可采用人机交互的方法处理所得的解,最终得到满意解。当然,多目标问题也可用加权的方法转换为单目标来求解,或按目标的重要性排序、逐次求解,如目标规划法。

(6) 决策。决策就是管理,决策就是做决定。人类的决策管理活动面临着被决策系统的日益庞大和日益复杂的问题。决策又有个人决策和团体决策、定性决策和定量决策、单目标决策和多目标决策之分。战略决策是在更高层次上的决策。在系统分析和系统综合的基础上,人们可根据主观偏好、主观效用和主观概率做决策。决策的本质反映了人的主观认识能力,因此,就必然受到人的主观认识能力的限制。近年来,决策支持系统受到人们的重视,系统分析者将各种数据、条件、模型和算法放在决策支持系统中,该系统甚至包含了有推理演绎功能的知识库,使决策者在做出主观决策后,力图从决策支持系统中尽快得到效果反

应,以求得到主观判断和客观效果的一致。决策支持系统在一定条件下起到决策科学化和合理化的作用。但是,在真实的决策中,被决策对象往往包含许多不确定因素和难以描述的现象。例如,社会环境和人的行为不可能都抽象成数学模型,即使是使用了专家系统,也不可能将逻辑推演、综合和论证的过程做到像人的大脑那样,有创造性的思维,也无法判断许多随机因素。群决策有利于克服某些个人决策中主观判断的失误,但群决策过程比较长。为了实现高效率的群决策,在理论方法和应用软件开发方面,许多人做了大量工作。例如,多人多目标决策理论、主从决策理论、协商谈判系统和冲突分析等。

(7) 计划与实施。制订计划有了决策就要付诸实施,实施就要依靠严格的、有效的计划。以企业为例,为实现生产任务和发展战略目标,就要制订当年的生产计划和未来的发展规划。企业还要按厂级、车间级和班组级分别制订实施计划。一项大的开发项目,涉及设计、开发、研究和施工等许多环节,每个环节又涉及组织大量的人、财、物。常用的制订和实施计划的方法由计划评审技术和关键路线法。

2. 时间维

时间维是指工作进程。对于一个具体的工作项目,从制定规划起一直到更新为止,全部过程可分为7个阶段。

(1) 规划阶段。即调研、程序设计阶段,目的在于谋求活动的规划与战略。

(2) 拟订方案阶段。该阶段提出具体的可行的实施方案。

(3) 研制阶段。该阶段要做出研制方案及生产计划。

(4) 生产阶段。该阶段组织企业生产,生产出系统的零部件及整个系统,并提出安装计划。

(5) 安装阶段。该阶段将系统安装、组装完毕,并完成系统的运行计划。

(6) 运行阶段。该阶段按照预期的用途运行系统和开展业务或服务。

(7) 更新阶段。该阶段进行系统试运行,并在达到要求后,可以取消旧系统而代之以新系统,或改进原有系统,使之更加有效地工作。

3. 知识维

知识维就是系统从计划、开发到运行中所涉及的专业科学知识。系统工程除了要求为完成上述各步骤、各阶段所需的某些共性知识外,还需要其他学科的知识 and 各种专业技术,霍尔把这些知识分为工程学、医学、建筑学、商业知识、管理学、法学、社会科学和艺术等。各类系统工程,如军事系统工程、经济系统工程、信息系统工程等,都需要使用其他相应的专业基础知识。例如,管理信息系统的规划阶段,要确定规划信息系统目标,要使用管理学、工程学和商业知识等。

霍尔三维结构模式的出现,为解决大型复杂系统的规划、组织、管理问题提供了一种统一的思想方法,因而在世界各国得到了广泛应用。

5.4.2 切克兰德软系统方法论

霍尔三维结构方法论不适用于以建立和管理“软系统”为目的的社会科学、管理科学等科学领域,而适用于以研制“硬件系统”为目标的自然科学、工程技术等“硬科学”领域,所以有学者称霍尔三维结构方法论为“硬科学”的系统工程方法论。系统工程越来越多地用于研究社会经济发展战略和组织管理问题,涉及的人、信息和社会等因素相当复杂,使得系统工

程的对象系统软化,并导致其中的许多因素又难以量化。许多学者在霍尔三维结构方法论的基础上,进一步提出了各种软系统工程方法论。20世纪80年代中前期由切克兰德提出的方法比较系统且具有代表性。

切克兰德认为完全按照解决工程问题的思路来解决社会问题或“软科学”问题,会碰到许多困难,尤其在设计价值系统、模型化和最优化等步骤方面,有许多因素很难进行定量分析。切克兰德把霍尔三维结构方法论叫硬系统方法(Hard System Method, HSM),并在1981年自己提出了一种软系统方法(Soft System Method, SSM),也称为“调查学习”法。

以大型工程技术问题的组织管理为基础产生的硬系统方法论,扩展其应用领域后,特别是在处理存在利益、价值观等方面差异的社会问题时,遇到了难以克服的障碍。人们对问题解决的目标和决策标准(决策选择的指标)这些重要问题,甚至对要解决的问题本身是什么就有不同的理解,即问题是非结构化的。对这类问题,或更确切地称为议题,首先需要的是不同观点的人们,通过相互交流,对问题本身达成共识。与硬系统方法论的核心是优化过程相比较,切克兰德称软系统方法论的核心是一个学习过程。软系统方法论认为,对于偏重社会问题、机理尚不清楚的心理和事理型的系统,如社会经济发展战略和组织管理等问题,这些问题和系统涉及人、信息和社会等相当复杂的因素,使系统工程的对象软化,且具有不良结构。解决此类问题的核心不是寻求“最优化”,而是“调查、比较”或者说是“学习”,从模型和现状比较中,学习改善现存系统的途径,是很明显的反馈调节思想。

切克兰德软系统方法论的工作过程如图5.9所示。

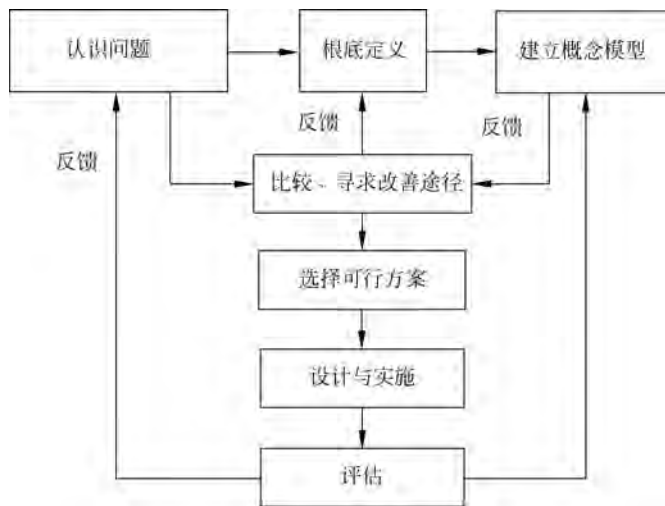


图 5.9 切克兰德软系统方法论的工作过程

(1) 认识问题。收集与问题有关的信息,表达问题现状,寻找构成或影响因素及其关系,以便明确系统问题结构、现存过程及其相互之间的不适应之处,确定有关的行为主体和利益主体。

(2) 根底定义。初步弄清、改善与现状有关的各种因素及其相互关系。根底定义的目的是弄清系统问题的关键要素以及关联因素,为系统的发展及其研究确立各种基本的看法,并尽可能选择出最合适的基本观点。

(3) 建立概念模型。在不能建立精确数学模型的情况下,用结构模型或语言模型来描

述系统的现状。概念模型来自根底定义,是通过系统化语言对问题抽象描述的结果,其结构及要素必须符合根底定义的思想,并能实现其要求。

(4) 比较、寻求改善途径。将现实问题和概念模型进行对比,找出符合决策者意图且可行的方案或途径。有时通过比较,需要对根底定义的结果进行适当修正。

(5) 选择可行方案。针对比较的结果,考虑有关人员的态度及其他社会、行为等因素,挑选出现实可行的改善方案。

(6) 设计与实施。通过详尽和有针对性的设计,形成具有可操作性的方案,并使得有关人员乐于接受和愿意为方案的实现竭尽全力。

(7) 评估与反馈。根据在实施过程中获得的新的认识,修正问题描述、根底定义及概念模型等。

切克兰德软系统方法论应用于任何复杂的、组织化的情境和问题,并包含有大量的社会、政治以及人为活动因素。

切克兰德方法与霍尔三维结构的主要不同点如下。

(1) 对象不同。霍尔三维结构主要以工程系统为研究对象,而切克兰德方法更适合对社会经济和经营管理等软系统问题进行研究。

(2) 核心内容不同。霍尔三维结构的核心内容是优化分析,而切克兰德方法的核心内容是比较学习。

(3) 方法不同。霍尔三维结构更多地关注定量分析方法,而切克兰德方法则强调定性与定量的有机结合。

随着近代处理问题的复杂度的上升,系统工程方法在不断地发展。钱学森先后提出“从定性到定量的综合集成方法”,以及它的实践形式“从定性到定量的综合集成研讨体系”,将系统方法论具体化,形成了一套行之有效的体系和实践方式。

5.4.3 系统工程方法

系统工程方法是一种现代的科学决策方法,也是一门基本的决策技术。系统工程方法把要处理的问题及其有关情况加以分门别类、确定边界,又强调把握各门类之间和内部诸因素之间的内在联系和完整性、整体性,否定片面和静止的观点和方法。在此基础上,没有遗漏地有区别地针对主要问题、主要情况和全过程,运用有效工具进行全面的分析和处理。

系统工程的基本方法是系统分析、设计和综合评价(性能、费用和时间等)。系统工程的应用日趋广泛,至20世纪70年代已发展成许多分支,如经营管理系统工程、后勤系统工程、行政系统工程、科研系统工程、环境系统工程、军事系统工程等。用定量和定性相结合的系统思想和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,都可以统一看成是一类工程实践,统称为系统工程。

系统工程中使用各种方法包括系统分析、系统设计、系统控制、建模仿真、系统评价、系统预测、可行性分析、敏感性分析等。在这些方法中,系统分析、系统设计和系统评价是最重要的方法。

1. 系统分析

系统分析是指把要解决的问题作为一个系统,对系统要素进行综合分析,找出解决问题的可行方案的咨询方法。系统分析是一种研究方略,它能在不确定的情况下,确定问题的本

质和起因,明确咨询目标,找出各种可行方案,并通过一定标准对这些方案进行比较,帮助决策者在复杂的问题和环境中做出科学抉择。

系统分析是一个有目的、有步骤的探索和分析过程,通过对不同方案的分析、比较,得出有效的决策信息,供决策者做出正确决策。系统分析的目的在于解决 5W1H 问题,即为谁(Who)、为什么(Why)、何时(When)、何地(Where)、做什么(What)、怎样做(How),而且每一步都应对这 6 个问题进行反复分析。

系统分析是咨询研究的最基本的方法,可以把一个复杂的咨询项目看成系统工程,通过系统目标分析、要素分析、环境分析、资源分析和组织分析,可以准确地诊断问题,深刻地揭示问题起因,有效地提出解决方案和满足客户的需求。

2. 系统设计

系统设计是根据系统分析的结果,运用系统科学的思想和方法,设计出能最大限度满足目标的新系统的过程。系统设计内容包括确定系统功能、设计方针和方法,产生理想系统并做出草案,通过收集信息对草案做出修正产生可选设计方案,将系统分解为若干子系统,进行子系统详细设计并进行评价,对系统方案进行论证并做出性能效果预测。

在系统设计时必须采用内部设计与外部设计相结合的思考原则,从总体系统的功能、输入、输出、环境、程序、人的因素、物的媒介各方面综合考虑,设计出整体最优的系统。进行系统设计应当采用分解、综合与反馈的工作方法。不论多大的复杂系统,首先要分解为若干子系统或要素,分解可从结构要素、功能要求、时间序列、空间配置等方面进行,并将其特征和性能标准化,综合成最优子系统,然后将最优子系统进行总体设计,从而得到最优系统。在这一过程中,从计划开始到系统满意为止,都要进行分阶段及总体综合评价,并以此对各项工作进行修改和完善。整个设计阶段是一个综合性反馈过程。

系统设计是一个综合的过程,有时称为系统综合。其目的在于最大限度地利用系统分析的各种结果,设计出最大限度满足要求的系统设计书。首先,用系统分析的思想来研究、编制、评选和确定系统设计方案和方法;其次,对系统分析的各种结果,进行理解、研究和分析,在此基础上进行数据收集、整理;再次,基于这些信息设计各子系统和系统集成,并设计本系统实现的方案;最后,编写系统设计报告。

系统设计通常应用归纳法和演绎法两种方法。

(1) 归纳法也称为归纳推理,是一种由个别到一般的推理,由一定程度的关于个别事物的观点过渡到范围较大的观点,由特殊具体的事例推导出一般原理、原则的解释方法。归纳法进行系统设计的过程:首先尽可能地收集现有的和过去的同类系统的系统设计资料,在对这些系统的设计、制造和运行状况进行分析研究的基础上,根据所设计的系统的功能要求进行多次选择,然后对少数几个同类系统做出相应修正,最后得出一个理想的系统。

(2) 演绎法是一种公理化方法,即先从普遍的规则和原理出发,根据设计人员的知识和经验,从具有一定功能的元素集合中选择能符合系统功能要求的多种元素,然后将这些元素按照一定形式进行组合,从而创造出具有所需功能的新系统。

在系统设计的实践中,这两种方法往往是并用的。

3. 系统评价

系统评价是对新开发的或改建的系统,根据预定的系统目标,用系统分析的方法,从技术、经济、社会、生态等方面对系统设计的各种方案进行评审和选择,以确定最优或次优或满

意的系统方案。

系统评价所依据的是系统的效能、成本、影响和进度。系统设计中制定出好几套系统设计方案。系统评价时应该优选有效性高、成本低、良性循环、进度快的系统设计方案。评价指标通常有可靠性、安全性、敏感性、通用性、灵活性、可扩展性、相容性、适应性、价值性、持久性和社会性等。

系统评价的过程包括明确系统方案的目标体系和约束条件、确定评价项目和指标体系、制定评价方法并收集有关资料、可行性研究、技术经济和综合评价。根据系统所处阶段来划分,系统评价又分为事前评价、中间评价、事后评价和跟踪评价。

系统评价方法有专家评价、技术经济评价、模型评价和系统分析 4 类。专家评价由专家根据本人的知识和经验直接判断来进行评价。常用的方法有德尔菲法、评分法、表决法和检查表法等。技术经济评价以价值的各种表现形式来计算系统的效益而达到评价的目的,如净现值法、利润指数法、内部报酬率法和索别尔曼法等。模型评价用数学模型在计算机上仿真来进行评价,如可采用系统动力学模型、投入产出模型、计量经济模型和经济控制论模型等数学模型。系统分析对系统各方面进行定量和定性的分析来进行评价,如成本效益分析、决策分析、风险分析、灵敏度分析、可行性分析和可靠性分析等。

5.5 本章小结

本章首先介绍了系统的概念,重点讨论了系统的定义、模型、特征和分类等;然后介绍了系统分解与集成的思想,重点讨论了系统分解与抽象的原理、分解原则、系统集成要素与特点;接着介绍了系统科学和系统工程的概念,重点讨论了系统科学的概念和知识体系,系统工程的定义、学科交叉关系等;最后介绍了系统工程方法论,重点讨论了霍尔三维结构、切克兰德软系统方法和系统工程方法等。

习题

1. 什么是系统? 简述系统的概念的 3 个要点。
2. 简述系统的普遍模型和基本特征。
3. 举例说明系统基本分类。简述概念系统、逻辑系统和实在系统的关系。
4. 简述系统论的基本思想方法。什么是分解? 什么是抽象?
5. 什么是系统集成? 简述系统集成的要素与特点。
6. 什么是系统科学? 简述系统科学的知识体系。
7. 什么是系统工程? 简述系统工程的学科交叉关系。
8. 简述霍尔三维结构和切克兰德软系统方法。举例说明霍尔三维结构和切克兰德软系统方法的区别。
9. 系统工程方法包括哪些方法? 举例说明 5W1H 问题。
10. 简述系统设计的归纳法和演绎法的特点,举例说明系统评价的指标。