

高等学校交通运输与工程类专业规划教材

Basic Methodology of Traffic Engineering

# 交通工程基础方法论

臧晓冬 主编

非  
外  
借



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

高等学校交通运输与工程类专业规划教材

Basic Methodology of Traffic Engineering  
**交通工程基础方法论**

臧晓冬 主 编



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co.,Ltd.

## 内 容 提 要

本书从方法论的角度系统介绍了交通工程专业需要掌握的理论和方法。全书共分10章,包括系统工程方法论、控制论、交通流基础理论、交通流的统计分析方法、车辆跟驰理论、连续交通流模型、排队理论、元胞自动机模型、系统评价方法和可靠性理论。

本书可作为高等院校交通工程专业、交通运输工程专业教材,也可供初涉交通工程领域的专业人士参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

交通工程基础方法论 / 臧晓冬主编. —北京:人民交通出版社股份有限公司, 2017. 11

高等学校交通运输与工程类专业规划教材

ISBN 978-7-114-14299-4

I. ①交… II. ①臧… III. ①交通工程学—高等学校—教材 IV. ①U491

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 264044 号

高等学校交通运输与工程类专业规划教材

书 名: 交通工程基础方法论

著 者: 臧晓冬

责任编辑: 李 晴

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.cpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 14.5

字 数: 351 千

版 次: 2017年11月 第1版

印 次: 2017年11月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-14299-4

定 价: 38.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

# 前言

交通工程学发展到今天,面临的科学问题越来越突出,交通工程学科的综合性和交叉性越发凸显。从人才培养的角度,学生需涉猎的专业知识也越来越广泛。在人才培养过程中专注学科发展主线,掌握主动学习的脉络,对于新时期交通工程专业人才的培养至关重要。

交通工程专业的学生一入学就会提出“交通工程专业到底学什么”的疑问,本教材的主旨是将交通工程专业涉及的基础理论知识进行梳理,从方法论的角度介绍本专业所要掌握的理论和方法,理清知识层次和主线,以达到答疑解惑的目的,同时也为学生进一步学好高等数学、概率论与数理统计、计算机基础等基础课程和其他专业课打好基础。

本教材共分 10 章,包括系统工程方法论、控制论、交通流基础理论、交通流的统计分析方法、车辆跟驰理论、连续交通流模型、排队理论、元胞自动机模型、系统评价方法和可靠性理论,主要讲述各种方法论的基本思想和主要方法,教材的难易适合本科生教学,也可供初涉交通工程领域的专业人士参考。

本教材由广州大学臧晓冬教授任主编,并编写第三章交通流基础理论、第十章可靠性理论。其他章节的参编人员如下:广州大学秦钟编写第二章控制论,广州大学郭香妍编写第九章系统评价方法,并与杨俊恒共同编写第一章系统工程方法论,广州大学龚华炜编写第四章交通流的统计分析方法和第七章排队理论,广

州大学罗强编写第六章连续交通流模型和第八章元胞自动机模型,广州市城市规划勘测设计研究院吕连恩编写第五章车辆跟驰理论。

本教材是广东省质量工程项目“交通工程专业综合改革试点”的研究成果,是在提高人才培养质量、提高人才创新能力、提高实际应用能力培养目标指导下的实践成果。

本教材的编写参考了大量前人的研究成果和相关教材,在此一并表示感谢!

编 者

2017年6月

# 目录

第一章 系统工程方法论	1
第一节 系统	1
第二节 系统理论概述	6
第三节 系统工程	13
练习题	20
第二章 控制论	22
第一节 控制论基本概念	22
第二节 自动控制系统的类型和组成	30
第三节 控制系统模型	36
第四节 神经网络系统	39
第五节 智能控制方法	48
第六节 自主车辆与交通控制	53
练习题	55
第三章 交通流基础理论	56
第一节 交通流基本参数	56
第二节 流量—速度—密度三维关系模型	60
第三节 突变理论模型	61
练习题	64
第四章 交通流的统计分析方法	65
第一节 交通流的统计分布特性	65
第二节 交通流离散型分布分析方法	66
第三节 交通流连续型分布分析方法	77

练习题 .....	94
<b>第五章 车辆跟驰理论 .....</b>	<b>95</b>
第一节 车辆跟驰理论的基本假设 .....	95
第二节 线性车辆跟驰理论 .....	96
第三节 线性跟驰模型实例分析 .....	98
第四节 稳定性分析 .....	101
第五节 跟驰理论与交通流模型 .....	106
第六节 加速度干扰 .....	115
练习题 .....	119
<b>第六章 连续交通流模型 .....</b>	<b>120</b>
第一节 简单连续交通流模型 .....	120
第二节 交通波理论 .....	128
练习题 .....	136
<b>第七章 排队理论 .....</b>	<b>138</b>
第一节 排队理论的基本概念 .....	138
第二节 排队过程分析 .....	140
练习题 .....	148
<b>第八章 元胞自动机模型 .....</b>	<b>150</b>
第一节 概述 .....	150
第二节 元胞自动机的定义、构成和特征 .....	151
第三节 单车道元胞自动机模型 .....	154
第四节 单向多车道元胞自动机模型 .....	164
第五节 双向双车道元胞自动机模型 .....	169
第六节 城市路网交通流中的元胞自动机模型 .....	172
练习题 .....	176
<b>第九章 系统评价方法 .....</b>	<b>177</b>
第一节 概述 .....	177
第二节 系统评价指标体系 .....	180
第三节 系统综合评价方法 .....	185
练习题 .....	206
<b>第十章 可靠性理论 .....</b>	<b>208</b>
第一节 可靠性理论基本概念 .....	208
第二节 常用的分布形式 .....	212

第三节 常见系统可靠性分析.....	215
第四节 交通系统可靠性分析.....	219
练习题.....	222
参考文献.....	223



## 第一章

# 系统工程方法论

## 第一节 系 统

### 一、系统的定义

系统一词来自拉丁语 *systema*, 即“群”或“集合”的意思。在韦氏 (Webster) 大辞典中, “系统”一词的定义为“有组织的或被组织化的整体”, 是“形成集合整体的各种概念、原理的综合”, 是“以有规律的相互作用或相互依存形式结合起来的对象的集合”, 等。

一般认为, 系统是由相互作用和相互联系的若干组成部分 (要素) 结合而成的、具有特定功能的有机整体。它包含三层意思:

(1) 系统必须由两个以上要素组成。要素是构成系统的最基本的单元, 是系统存在的基础。

(2) 要素之间存在着有机的联系和相互作用的机制, 从而形成一定的结构或秩序。

(3) 系统都具有一定的功能或特性, 而这些功能或特性是它的任何一个部分都不具备的。这种新功能是由系统内部的有机联系或结构所决定的。

在自然界和人类社会中, 许多事物都与其他事物相互联系、相互作用, 因而几乎所有的事

物都可以被视为系统。人们在认识和改造客观世界的过程中,用综合分析的思维方式看待周围的事物,根据事物内在的、本质的、必然的联系,从整体的角度进行分析和研究,那么这类事物就被看作为一个系统。

在客观世界中,一个系统中的任何组成部分可以被视为一个子系统,而每一个系统又可以被视为一个更大规模系统中的一个组成部分。系统与环境是一对范畴。任何一个系统都处于一定的环境中。

## 二、系统的特性

### 1. 集合性

集合性是指系统是由两个或两个以上可以相互区别的要素组成的集合体。如简单的制造系统,一般由工作机、操作者、工具、材料、图纸、工艺卡、电力等要素组合而成。复杂系统则是由许多要素、单元体和活动过程等组成的集合体。如一个工厂通常是由各种类型的设备、各种原材料、能源、生产过程、经营以及各类人员等要素或子系统组成的集合体。

### 2. 相关性

相关性是指系统内部要素之间的某种相互作用、相互依赖的特定关系。以交通运输系统为例,其基本构成要素包括载运工具、通路、场站、动力、控制与通信、人员及经营管理六大部分。它们之间的相互联系和相互作用密切,任何要素的变化都将影响到其他要素。某一要素发生了变化就意味着其他要素也相应地改变和协调。

过去由于人们在改造自然的过程中对相关性的认识不够,一味地向自然索取,结果受到了大自然的报复和惩罚。例如 20 世纪 70 年代初期,埃及在尼罗河上游修建了阿斯旺水库。水库修成后,曾给埃及人民带来了一定的效益,基本上控制了尼罗河的水灾,又可以获得廉价的电力。但是,由于在建设大坝时,没有考虑到可能出现的各种不良影响和后果,结果由于尼罗河的泥沙和有机质大量沉积到水库底部,从而使尼罗河下游两岸的农田失去了肥源,土壤日趋盐碱化,农作物大面积减产;由于尼罗河河口供沙不足,使河口三角洲平原由向地中海中延伸变为向大陆退缩,结果使一些沿海工厂、港口国防工事有陷入地中海的危险;由于缺乏陆地的盐分和有机物,致使盛产沙丁鱼的渔场毁于一旦;更为严重的是,由于大坝阻隔,使尼罗河下游原来奔腾不息的活水变成了相对静止的“湖泊”,从而为血吸虫和蚊子的繁殖提供了条件,使水库一带居民的血吸虫发病率高达 80% ~ 100%。这一切使埃及人民付出了沉重的代价,蒙受了巨大的损失。

### 3. 目的性

目的性是指系统有明确的目的或目标。系统工程的研究对象一般为人工系统,而人工系统都具有一定的目的性。例如,企业经营管理系统的目的就是在限定资源和现有运行机制的作用下,完成或超额完成生产经营计划,实现规定的质量、品种、成本、利润指标等。而一个生产技术系统的目的,则是实现某种技术要求,达到规定的性能、经济和进度指标等。

为了实现系统的目的,系统必须具有控制、调节和管理的功能。管理的过程就是使系统有序化的过程,使系统进入与其目的相适应的状态。

### 4. 阶层性

阶层性是指系统各组成要素之间具有层次结构。系统作为一个相互作用的诸要素的集合

体,可以分解为一系列的子系统,并且这些子系统存在于一定的层次结构中。例如,生物系统是分层次的,从活的分子到多细胞个体,再到超个体的聚合体,层次分明、等级森严。又如,整个自然界犹如一座巨大的建筑物,其中各层次系统逐级地组织起来,成为越来越高级、越来越庞大的系统。再如,构成交通运输大系统的公路、铁路、水路、航空、管道既是交通运输系统的五个基本要素,又分别构成了公路、铁路、水路、航空、管道五个子系统。

系统的层次结构,通常呈金字塔形,如图 1-1-1 所示。在塔的底部,通常是一些结构和功能相对简单的子系统,越往上越复杂,而占据塔顶的则是结构和功能相当复杂的系统。对于中间层次的系统来说,它既是独立的,又与上下层次的系统有着密切的联系。相对上层,它只是要素或子系统,处于被支配和被控制的地位;相对下层,它又是系统,处于支配和控制的地位。

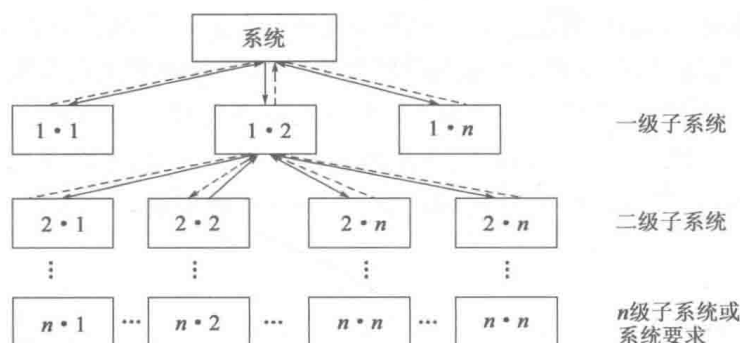


图 1-1-1 系统层次结构

## 5. 整体性

系统的整体性主要表现为系统的整体功能或特征,系统的整体功能或特征不是各组成要素功能或特征的简单叠加,也不是组成要素功能的简单拼凑,而是呈现出各组成要素所没有的新功能或特征。一般系统论的创始人贝塔朗菲把这一特性概括为:“整体大于它的各个孤立部分之和”。意思是说,系统整体的特征与组成它的要素的特征相比,好像是“新增加的”“多出来的”。

系统的整体性具体可以从以下几个方面来理解:

(1) 系统整体联系的整体性。在系统中各个要素对整体的影响不是独立的,而要依赖于其他若干个要素的协同作用。也就是说,系统要素的性质和行为并非独立地影响系统整体的功能或特征,而是相互影响、相互协调地来适应系统整体的要求,实现系统的功能。因此,任何一个要素都不能脱离整体,要素的联系和作用也不能离开整体的协调。例如,人体的每个器官的性质和行为都会影响到人体系统的功能和行为,但它们并非独立地影响人体的功能和行为,而是相互影响的。如心脏对人体系统的影响又依赖于肺脏等。因此,人体的任何一个局部都不能脱离人体而独立存在,否则其功能将不复存在。

(2) 系统功能的非加和性,即系统的整体功能不等于各要素功能之和。系统作为诸要素的集合体永远具有一定的特性,而这些特性不是它的任何一个要素所能具备的。系统是一个不可分割的整体。如果把系统分割开,那么它将失去其原来的性质。

(3) 构成系统的要素不一定都很完善,但可以构成性能良好的整体。反之,即使每个要素是良好的,但组成的整体不一定具有良好的整体功能,也就不能称为完善的系统。

系统之所以产生整体性或新质,是因为组成系统整体的各个部分或要素相互联系和相互

作用,形成一种协同作用。只有通过协同作用,系统的整体功能才能显现。

### 6. 环境适应性

环境适应性是指系统适应外界环境变化的能力。所谓环境,是指系统的外部条件,也就是系统外部对该系统有影响、有作用的诸因素的集合。在一个大系统中,对于某一个特定的子系统来说,其他子系统就是它的环境。环境是一种更高级、更复杂的系统。

系统与环境是密切联系的,系统必然要与外部环境产生物质的、能量的和信息的交换,外界环境的变化必然会引起系统内部要素的变化。系统必须适应环境的变化。能够经常与外部环境保持最佳适应状态的系统才是理想的系统,不适应外部环境变化的系统是没有生命力的。自然界一些系统本能地存在着适应外部环境的特性。生物进化过程就是系统不断适应外部环境的过程,适应者生存,不适应者被淘汰。同样,一个工业企业必须适应市场的变化,不断调整和完善企业的经营策略,只有这样,才能在激烈竞争的市场经济中生存和发展壮大。

系统与环境的作用是相互的。一方面,系统不能脱离环境而独立存在。环境对系统有很大的影响,甚至在某种情况下会限制系统功能的发挥。另一方面,系统又可以通过输出对环境施加影响。人类一方面不仅能够适应自然环境,另一方面还能够利用和改造自然环境,使其满足人类的需求。

## 三、系统的分类

系统不仅普遍存在,而且形态也是多种多样的。为了对系统进行研究,揭示不同类型系统之间的联系,人们按照不同原则将系统划分为各种类型。

### 1. 自然系统和人工系统

自然系统是指由自然物(矿物、植物、动物、海洋等)构成的系统,其特点是自然形成的。人工系统是指为了达到人类的某种目的,由人类设计和建造的系统。工程技术系统、经营管理系统和科学技术系统就是三种典型的人工系统。工程技术系统是由人们对自然物等进行加工,用人工方法建造出来的工具和机械装置等所构成的工程技术集合体。经营管理系统是人们通过规定的组织、制度、程序、手段等建立的经营与管理的统一体。科学技术系统是人们对自然现象和社会现象的科学认识,概括和总结研究出来的科学与技术的综合体。系统工程研究与处理的对象主要是人工系统和经人们加工了的自然系统,即复合系统。在这类系统中往往包括人的因素,是由人参与的复杂系统。

### 2. 实体系统和概念系统

实体系统是指由矿物、生物、能源、机械等实体组成的系统。其组成要素是具有实体的物质,如水电站、工厂和楼房等。概念系统是指由概念、原理、原则、方法、制度、程序等非实体物质所组成的系统,如经济管理体制、法律系统、教育体系、程序系统等。

实体系统与概念系统有时是交织在一起的,是不可分割的,如一座水电站是实体系统,而修建水电站的方案、规划和程序等则属于概念系统。所以,实体系统是概念系统的基础和服务对象,而概念系统则是为实体系统提供指导、方案和服务的,两者是不可分的。

### 3. 封闭系统和开放系统

封闭系统是指与外部环境没有任何联系的系统,即系统与环境没有物质、能量和信息的交换。现实生活中任何系统都与外部环境有着各种各样的联系,不存在绝对的封闭系统。有时

为了研究的方便,把某些与外部环境联系很少的系统,忽略其外部影响,近似地看作封闭系统,如自给自足的小农经济、闭关锁国的封建国家等。开放系统是指系统与外部环境存在相互联系,有物质、能量、信息交换的系统。系统从环境中获得必要的物质、能量或信息,经过加工,转化成新的物质、能量或信息而输出。环境对系统的作用,一方面,给系统提供必需的物质、能量或信息;另一方面,对系统也会产生干扰和限制作用。因而,围绕系统在外环境影响下的行为方式和活动来认识、识别系统,是研究系统特性的有效途径。

#### 4. 静态系统和动态系统

静态系统是指系统的状态和功能在一定的时间内不随时间而改变的系統。它没有既定的输入和输出,在系统运动规律的表征模型中不包含时间因素。如城市规划布局、企业平面布置等都属于静态系统。动态系统是指系统的状态随时间变化的系统。它有输入和输出及转换过程,其状态变量为时间的函数。如社会系统、企业生产系统和管理信息系统等都是动态系统。

#### 5. 控制系统和行为系统

控制系统是指具有控制功能和手段的系统。所谓控制就是为达到一定目的给对象系统所施加的必要动作。控制对象要由控制装置操纵,使其达到规定目的。当控制系统由控制装置自动进行时,则称为自动控制系统。行为系统是以完成任务的行为为构成要素而形成的系统。所谓行为就是为达到某一确定目的而执行某特定任务的作用,这种作用对外部环境能产生一定的影响。区分行为系统的不是系统的组成部分及其结构特征,而是行为特征的内容。也就是说,尽管有些系统的组成部分及有关内容是相同的,但如果其执行特定功能的作用不同,那么它们也不属于同一类系统。行为系统一般需要通过组织体系来体现,如工程指挥系统、企业经营管理系统等。

#### 6. 简单系统、简单巨系统和复杂巨系统

系统按复杂程度可分为简单系统、简单巨系统和复杂巨系统。简单系统是指组成系统的子系统(要素)数量比较少,而且子系统之间的关系也比较简单的系统,如一个工厂、一台设备等。

简单巨系统是指组成系统的子系统数量非常多、种类相对也比较多(如几十种,甚至上百种),但它们之间的关系较为简单的系统,如激光系统等。研究处理这类系统的方法不同于一般系统的直接综合法。于是,人们就想到20世纪初统计力学的巨大成就。这种方法把亿万分子组成的巨系统的功能略去其细节,用统计方法加以概括,从而获得了成功。耗散结构理论和协同学理论在这方面做出了突出贡献。

复杂巨系统是指组成系统的子系统数量很多,具有层次结构,它们之间的关系又极其复杂的系统,如生物体系统、人脑系统、社会系统等。其中社会系统是以有意识活动的人作为子系统的,是最复杂的系统,所以又称为特殊的复杂巨系统。这些系统又都是开放的,所以也称为开放的复杂巨系统。

## 四、交通运输系统

交通运输系统是由公路运输系统、铁路运输系统、水路运输系统、航空运输系统、管道运输系统构成的一个复杂大系统。交通运输系统的基本结构如图1-1-2所示。

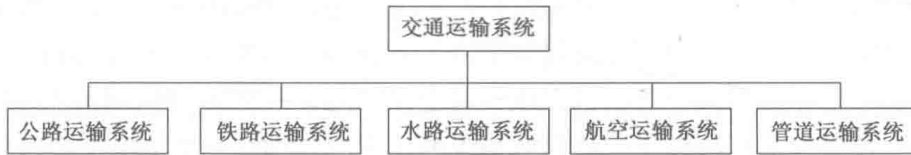


图 1-1-2 交通运输系统的基本结构图

交通运输系统的五种运输方式都有其适用区域,其在交通运输系统纵向上分化细密,横向上重叠交错。在满足人或物的空间位移的要求上具有同一性,但它们所采取的技术手段、运输工具和组织形式等都不相同。因此,各运输子系统所形成的技术性能(如速度,质量,连续性,保证货物的完整性和旅客的安全、舒适性等)、对地理环境的适应程度和经济指标(如能源和材料消耗、投资、运输费用、劳动生产率等)都是不同的。

## 第二节 系统理论概述

系统论、信息论、控制论等学科从不同侧面揭示了客观事物的本质联系和内在运动规律,由于它们从本质上讲都是研究系统的理论,所以统称为系统理论。

系统理论扩大了人们研究问题的广度和深度,极大地提高了人们认识世界和改造世界的能力,同时推动了系统科学的形成和发展,成为系统工程的重要理论基础。

### 一、系统论

一般系统论是奥地利生物学家贝塔朗菲在 20 世纪 40 年代提出来的。他在谈到一般系统论时曾指出:“存在着适用于一般系统或子系统的模式、原则和规律,而不论其具体种类、组成部分的性质和它们之间的关系或‘力’的情况如何。我们提出一门称为一般系统论的新学科。它属于逻辑和数学的领域,它的任务是确立适用于各种系统的一般原则”。

现在,我国学术界对系统论的研究取得了很大进展。一般认为:系统论是研究一切系统的一般模式、原则和规律的理论体系。它包括系统概念、一般系统理论、系统方法论和系统方法的应用等,其任务就是确定适合于各种系统的一般方法论及原则。

#### 1. 一般系统论的产生

一般系统论产生的直接原因,可追溯到 20 世纪初生物学界对机械论和活力论的批判。当时在生物学领域中围绕“生命的本质”存在着机械论和活力论之争。机械论认为人和动物都是机器,并把生命归结为物理和化学过程。它虽然正确地指出要弄清楚生命现象必须研究它赖以发生的机械的、物理的和化学的过程,但不能说明生命现象的整体属性,如一个正常的活的动物与一个死的动物的区别。活力论则认为生物体内存在着一种特殊的超物质的“活力”,这种活力支配着整个生命过程。后来,德国生物学家杜里舒(H. Driesch)通过海胆胚胎实验,又提出了新活力论。他认为生物体内存在着类似灵魂的活力因素,它控制着生物体按预定目的形成一个有机整体。这一实验对机械论是个沉重打击。这时,一些生物学家和哲学家认为只有把生命看成是一个有机整体,才能解释生命现象,并提出用机体论代替机械论和活力论。在此期间,贝塔朗菲多次发表文章,指出用机械论模式不能解决生物学中的理论问题和现代科

学技术提出的实践问题。他强调要把有机体当作一个整体或系统来考虑,认为生物学的主要任务就是发现生物系统中不同层次的组织原则。他还把这一思想应用到生物学以外的其他领域,并于1945年发表了一篇文章——“关于一般系统论”。但是,由于当时正处战争期间,这一理论几乎不为人知,直到1947年和1948年贝塔朗菲在美国讲学期间,再次阐述他所倡导的系统概念,这时一般系统论才为人们所认识。

## 2. 一般系统论的基本观点

贝塔朗菲总结了机体论发展的成就,并把协调、秩序、目的性等概念用于研究有机体,提出了下列三个基本观点:

(1)系统观点。一切有机体都是一个整体(系统),这个整体是由部分结合而成的,其特性和功能不等于各部分特性和功能的简单相加。贝塔朗菲认为,系统是“相互作用的诸要素的复合体”,系统的性质取决于复合体内部的特定关系。我们不仅要知道它的组成部分(要素),而且还必须知道它们之间的相互关系,才能确定系统的性质。

(2)动态观点。一切有机体本身都处于积极的运动状态。贝塔朗菲认为一切生命现象始终处于积极活动的状态。生物的基本特征是有组织,有机体之所以能有组织地处于活动状态并保持其活的生命运动,是由于系统与环境不断地进行物质和能量交换的结果。他把这种能够与环境进行物质、能量交换的系统称为开放系统,认为生命系统本质上都是开放系统。任何一个开放系统,都能在一定条件下保持其自身的动态稳定性。

(3)等级观点。各种有机体都是按严格的等级组织起来的。贝塔朗菲认为生物系统层次分明、等级森严,通过各层次逐级组合,而形成越来越高级、越来越庞大的系统。处于不同层次上的要素具有不同的功能,而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。

贝塔朗菲的上述观点,不仅适合于有机体,而且适合于经济、社会和科学技术等一切系统,现已发展成为一般系统论的主要内容。

一般系统论用相互关联的综合思想来取代分析事物的零散思维,突破了以往分析方法的局限,如实地把对象作为一个有机整体加以考察,从整体与部分相互依赖、相互制约的关系中揭示事物的特征和运动规律。一般系统论给各门学科带来新的动力和新的研究方法,使许多学科面目焕然一新,并为系统工程的发展,使人类走向系统时代奠定了理论基础。

## 二、控制论

控制论是美国数学家、生理学家维纳(N. Wiener)在20世纪40年代创立的。第二次世界大战以后,由于自动化技术、导弹和电子计算机的发展,要求自然科学在理论上进行系统研究和科学总结。1948年,维纳在总结前人研究的基础上创立了控制论这门学科。

维纳在他所著的《控制论》中写道:“控制论是研究动物和机器全过程的控制和通信的科学理论。”我国学者钱学森认为“控制论的对象是系统”,“为了实现系统自身的稳定和功能,系统需要取得、使用、保持和传递能量、材料和信息,也需要对系统的各个构成部分进行组织”,“控制论是研究系统各个部分如何进行组织,以便实现系统的稳定和有为的行为”。由此可见,控制论是研究系统的调节与控制的一般规律的科学,它是自动控制、无线电通信、神经生理学、生物学、心理学、电子学、数学等多种学科互相渗透的产物。

在实际应用中,控制论的具体内容包括以下4个方面:

### 1. 最优控制理论

这一理论是现代控制论的核心。随着现代社会的发展和科学技术的进步,各种控制系统日益复杂化与大型化,不仅工程技术、工具和手段更加科学化、现代化,而且各类控制系统对应用技术的要求也越来越高,这就促使控制论进入多输入和多输出系统控制阶段,因而产生了最优控制理论。这一理论通过数学方法,科学、有效地解决大系统的最优设计和控制问题,强调采用动态的控制方式和方法,以满足各种多输入和多输出系统的控制要求,它在工程控制系统、社会经济系统中得到广泛的应用和发展。

### 2. 自适应、自学习和自组织系统理论

自适应系统是一种前馈控制的系统。所谓前馈控制是指在环境条件还没有影响到控制对象之前,通过预测而进行控制的一种方式。自适应控制系统能够按照外部条件的变化,自动调整自身的结构或行为参数,以保持系统原有的功能,如自寻最优点的极值控制系统、条件反馈性的简单波动自适应系统等。随着信息科学和现代计算机技术的发展,自适应理论得到了进一步完善和深化,并逐步形成一种专门的工程控制理论。

自学习系统是指具有能够按照系统运行过程中的经验来改进控制算法能力的系统,它是自适应系统的一种延伸和发展。自学习系统理论也是用于工程控制的理论,它有“定式”和“非定式”两类。前者是根据已有的答案对机器工作状态做出判断,由此来改进机器的控制,使之不断趋近于理想的算法;后者是通过各种试探、统计决策和模式识别等工作,来对机器进行控制,使之趋近于理想的算法。

自组织系统是指能够根据环境变化和运行经验来改变自身结构和行为参数的系统。自组织系统理论主要是通过仿真,模拟人的神经网络或感觉器官的功能,探索实现人工智能的途径。从控制论观点来讲,系统不仅能被组织,而且能够自组织。对自组织系统模型的探索和研究,将给组织系统(如人工组织系统、组织与有机体系统)的控制,带来大的影响和变革。

### 3. 模糊理论

模糊理论是在模糊数学的基础上形成的一种新的数理理论,主要用来解决一些不确定的问题。模糊数学包括模糊代数、模糊群体、模糊拓扑等。在复杂系统中,往往有许多不确定的问题需要处理,对此仅用一般的数学模型是难以完成的,必须根据模糊理论来求得解决问题的结论。

### 4. 大系统理论

大系统理论是现代控制论的一个新的重要领域。它以规模庞大、结构复杂、目标多样、功能综合、因素繁多的大系统的控制问题为研究对象,所研究的问题主要是系统的最优化问题。其内容有大系统分析、大系统综合和大系统模型化等。对大系统进行模型化,通常都是采用“分解—协调”的方法,即根据所给条件,把整个系统分解为若干层次的子系统,建立子系统与系统整体以及各子系统之间的关系,通过对各子系统的分析和综合求得局部最优化,再根据大系统的总任务和总目标的要求,使子系统相互协调配合,找出系统整体的运动规律,实现大系统的整体最优。大系统理论的研究和应用涉及工程技术、社会经济、生物生态等诸多领域,如城市交通系统、社会系统、生态环境保护系统、大规模信息自动检索系统等。

控制论是一门跨学科的具有方法论性质的交叉学科。现在,控制论已形成以理论控制论为中心的四大分支:工程控制论、生物控制论、社会控制论(包括管理控制论、经济控制论)和



智能控制论。它横跨工程技术领域、生物领域、社会领域和思维领域,并不断向各门学科渗透,促进了自然科学和社会科学的紧密结合。

### 三、信息论

信息论是一门研究信息传输和信息处理一般规律的学科。它起源于通信理论,是由美国科学家申农(L. E. Shannon)在1948年提出的。信息论的基本思想和方法完全撇开了物质、能量的具体运动形态,而把任何通信和控制系统都看作是一个信息的传输和加工处理系统,把系统有目的的运动抽象为信息变换过程,通过系统内部的信息交流使系统维持正常的有目的的运动。事实上,任何实践活动都可以简化为多种流:人员流、物流、资金流和信息流等。其中信息流起着支配作用,它调节着其他流的数量、方向、速度和目标,通过系统内部信息流的作用才能使系统维持正常的和有目的的运动,因此,可以说信息论是控制论的基础。

申农把信息定义为“不确定性的减少”。他认为,信息量是把某种不确定性趋向确定的一种度量,信息量的大小,取决于消息的不确定程度。消息的不确定程度大,则发出的信息量就大;消息的不确定程度小,则发出的信息量就小。

设某事物具有 $n$ 个独立的可能状态 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ,每一状态出现的概率分别为 $P(x_1), P(x_2), \dots, P(x_n)$ ,且

$$\sum_{i=1}^n P(x_i) = 1 \quad (1-2-1)$$

则为了消除这些不确定性所需的信息量为:

$$H(x) = -K \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_a P(x_i) \quad (1-2-2)$$

式中: $K$ ——常数,单位为比特(bit)或奈特、哈特等。

特别地,若定义 $K$ 为1比特,当对数的底数为2,且 $n=2, P(x_1) = P(x_2) = \frac{1}{2}$ 时,

$$H(x) = -K \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2} = K = 1 \quad (1-2-3)$$

因此所谓1比特信息量就是含有两个独立等概率状态的事物所具有的不确定性被完全消除所需要的信息量。按这一单位制,式(1-2-2)可改写为:

$$H(x) = - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_a P(x_i) \quad (1-2-4)$$

维纳指出:“信息量是一个可以看作几率量的对数的负数,就是负熵。”所以,信息量和熵(系统无序状态的度量)相反,表示系统获得信息后无序状态减少甚至消失的程度。

目前,信息论的研究与应用已超出通信领域而广泛渗透到其他学科,特别是进入对大系统和复杂系统的信息研究领域。因此,需要从更为广泛的领域来探讨其一般特征、规律和原理,形成更为一般性的理论。这就导致了信息科学的产生。信息科学是以信息论为基础,与计算机和自动化技术、生物学、数学、物理学等学科相交叉而发展起来的一门新兴学科,它把信息论的研究和应用推向更高的阶段、更新的范畴。

### 四、耗散结构理论

耗散结构理论是比利时物理学家普里高津(I. Prigogine)于1969年在一次“理论物理与生物学”的国际会议上提出的一种系统理论,主要讨论开放系统从无序向有序转化的机理、条件