

北京理工大学“十二五”规划教材

# 系统工程学 及应用

李惠彬 张晨霞 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

北京理工大学“十二五”规划教材

# 系统工程学及应用

李惠彬 张晨霞 编著



机械工业出版社

本书是北京理工大学“十二五”规划教材之一，是工程类和管理类的基本教科书。作者总结了多年本科生系统工程课程教学经验，融合了参与国家自然科学基金项目及与企业科研合作项目的科研成果，并注意吸收国内外系统工程领域研究的新成果。

本书系统地介绍了系统思想、系统工程学理论和方法论、系统建模、系统分析、系统预测、系统评价与决策和系统战略概述，以及系统工程在解决现代社会及工程问题中的应用，通过对若干社会、工程问题的案例分析，说明系统工程学理论的应用。本书取材广泛、内容新颖，既注重概念的准确性、条理性、层次性，又注重理论和方法的实际应用，并特别注重人文学科知识与工程技术的交汇。本书对当今社会培养T型复合型人才有一定的借鉴和帮助。

本书可供交通工程、交通运输、工业工程、管理工程、机械工程、车辆工程、建筑工程、土木水利工程、能源以及航空航天等专业的本科生使用，也可供有关专业的研究生、本科生、企业管理人员或系统工程师参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

系统工程学及应用/李惠彬，张晨霞编著. —北京：  
机械工业出版社，2013.8  
北京理工大学“十二五”规划教材  
ISBN 978-7-111-43378-1

I. ①系… II. ①李…②张… III. ①系统工程—  
高等学校—教材 IV. ①N945

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第160383号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑：徐巍 责任编辑：徐巍 责任印制：乔宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2013年9月第1版第1次印刷

184mm×260mm·22.25印张·551千字

0001—3000册

标准书号：ISBN 978-7-111-43378-1

定价：59.80元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010)88361066 教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售一部：(010)68326294 机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：(010)88379649 机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010)88379203 封面无防伪标均为盗版



## 前言

系统工程(Systems Engineering)是20世纪60年代初形成的一门学科,是正在发展和逐步完善的一种新型工程技术。它以系统为对象,把要研究的事与物用概率、统计、运筹学、模拟及其他方法,经分析、判断、推理等程序建立某种系统模型,进而以计算机为工具求得系统最佳效果或比较满意的结果,并使系统各组成部分相互协调、相互配合,以获得技术先进、经济合理、运行可靠、节约时间和保护环境的良好系统。在当今社会,世界经济全球化、区域经济一体化、国家之间的领土争端与政治军事博弈、人口急剧增长与人口老龄化、资源枯竭与生态环境的日益恶化和可持续发展、大都市交通拥堵与治理、产业升级与经济结构转型、T型复合型人才与创新人才的培养等等,这些问题的解决迫切需要决策者进一步提高对事物全局性及整体规律的认识,并规范和完善决策者的认识,从而提高行为与决策的准确性和有效性。

本书主要介绍系统工程学基本理论,力求避免简单重复运筹学课程内容,以适应更多、更广的读者。本书介绍了系统思想、系统工程学理论和方法论、系统建模、系统分析、系统预测、系统评价与决策和系统战略概述,以及系统工程学在解决现代社会及工程问题中的应用。

作者是在总结多年本科生系统工程学课程教学经验,融合了作者参与国家自然科学基金项目及与企业科研合作项目的科研成果,并注意吸收国内外系统工程学领域研究的新成果基础上编写完成的。

本书共分12章。

第1章介绍了系统工程思想的形成及促使系统工程学诞生的重大理论。

第2章阐述了系统及系统工程的基本知识,内容包括系统的定义、系统的形态与分类、系统的特性、系统的结构与功能、系统工程的基本概念及系统工程的理论基础。这章内容是系统工程学理论的基础。

第3章介绍了系统工程方法论,内容包括系统工程方法论的定义和基本原则、三维结构方法论、切克兰德软系统方法论、并行工程方法、物理—事理—人理系统方法、螺旋式推进系统方法及系统工程方法论最新发展。

第4章介绍了系统模型及建模方法,重点介绍了系统模型的定义、系统建模方法与技术、系统定量分析模型——状态空间建模法、系统定性分析模型——系统结构模型解析法、复杂系统建模方法。

第5章介绍了系统分析理论及方法,包括系统分析定义、系统分析内容与步骤、系统环境分析、系统目标分析、系统分析的定性方法、系统分析的定量方法和系统分析案例等。

第6章介绍了系统预测理论与方法,包括预测定义、定性预测方法、定量预测方法,并介绍了交通预测问题。

第7章介绍了系统模拟与仿真实论和方法,内容包括系统模拟与仿真基本知识、连续系



统仿真、离散事件系统仿真、蒙特卡罗模拟方法、模拟与仿真应用案例。

第8章介绍了作业网络规划,内容包括网路图的组成及绘制、网路图时间参数的计算、规定总工期的概率评价和网络图的调整与优化。

第9章介绍了系统评价,内容包括系统评价概述、系统评价体系的建立、系统评价指标数量化的方法、系统评价指标综合的主要方法、常用的系统评价理论和方法以及系统评价的案例。

第10章介绍了系统决策理论与方法,内容包括系统决策概述、确定型决策、风险型决策、不确定型决策、基于决策树的多阶段决策、决策支持系统、冲突分析和系统决策的案例。

第11章介绍了战略基本知识,内容包括战略研究概述、企业战略选择、企业战略管理过程、柔性战略、可持续发展战略、新世纪交通发展战略。

第12章通过解决我国住房困局、城市交通拥堵与治理、车辆人机工程学设计及评价的三个案例,介绍了系统工程学的应用。

本书在编写过程中,参阅了国内外同行专家许多宝贵的研究成果与资料,在此谨向他们致以衷心的感谢。

高利教授仔细地审阅了书稿全部,并提出了十分有益的修改意见。本书的出版得到了北京理工大学“十二五”规划教材出版基金的资助,作者在此表示衷心的感谢。

本书的出版得到了北京理工大学教务处和机械工业出版社汽车分社的热忱支持。作者对他们表示诚挚的敬意和衷心地感谢。

本书可供交通工程、交通运输、工业工程、管理工程、机械工程、车辆工程、建筑工程、土木水利工程、能源、航空航天等专业的本科生使用,也可供有关专业的研究生、本科生、企业管理人员参考。

研究生张晨霞绘制了书中全部插图。由于作者水平所限,本书的错误和不妥之处在所难免,恳请各位同行、使用本书的教师、学生以及广大读者提出宝贵意见!

作者 E-mail 地址: [huibinli@bit.edu.cn](mailto:huibinli@bit.edu.cn)

作 者



# 目录

## 前言

## 第1章 绪论 1

- 1.1 系统工程思想的形成 1
- 1.2 系统工程的发展 3
- 1.3 促使系统工程诞生的重大理论 4
- 1.4 系统工程应用启示 20
- 复习与思考 22

## 第2章 系统与系统工程基本知识 23

- 2.1 系统思想的演变 23
- 2.2 系统的定义 26
- 2.3 系统的形态与分类 29
- 2.4 系统的特性 33
- 2.5 系统的结构与功能 38
- 2.6 系统工程的基本概念 43
- 2.7 系统工程的理论基础 46
- 2.8 系统科学研究的主要内容 53
- 复习与思考 54

## 第3章 系统工程方法论 55

- 3.1 系统工程方法与方法论 55
- 3.2 系统工程方法论的基本原则 55
- 3.3 三维结构方法论 56
- 3.4 切克兰德软系统方法论 59
- 3.5 并行工程方法 60
- 3.6 物理-事理-人理系统方法  
(简称 WSR) 63
- 3.7 螺旋式推进系统方法 65
- 3.8 系统工程方法论最新发展 66
- 3.9 方法论的应用案例 67
- 复习与思考 72

## 第4章 系统模型及建模方法 73

- 4.1 系统模型 73
- 4.2 系统建模方法与技术 76
- 4.3 系统定量分析模型——状态空间

建模法 80

- 4.4 系统定性分析模型——系统结构  
模型解析法 82
- 4.5 复杂系统建模方法探索 88
- 复习与思考 91

## 第5章 系统分析 92

- 5.1 系统分析概述 92
- 5.2 系统分析内容与步骤 97
- 5.3 系统环境分析 99
- 5.4 系统目标分析 102
- 5.5 系统分析的定性方法 103
- 5.6 系统分析的定量方法 109
- 5.7 系统分析案例 113
- 复习与思考 114

## 第6章 系统预测 116

- 6.1 预测概述 116
- 6.2 定性预测方法 122
- 6.3 定量预测方法 137
- 6.4 交通量预测 165
- 复习与思考 167

## 第7章 系统模拟与仿真 169

- 7.1 系统模拟与仿真基本知识 169
- 7.2 连续系统仿真 172
- 7.3 离散事件系统仿真 175
- 7.4 蒙特卡罗模拟方法 188
- 7.5 模拟与仿真应用案例 191
- 复习与思考 196

## 第8章 网络计划 197

- 8.1 网络计划概述 197
- 8.2 网路图的组成及绘制 198
- 8.3 网路图时间参数的计算 204
- 8.4 规定总工期的概率评价 208
- 8.5 网络图的调整与优化 211

|                          |     |                                      |     |
|--------------------------|-----|--------------------------------------|-----|
| 复习与思考 .....              | 221 | 复习与思考 .....                          | 291 |
| <b>第 9 章 系统评价</b> .....  | 223 | <b>第 11 章 战略基本知识</b> .....           | 293 |
| 9.1 系统评价概述 .....         | 223 | 11.1 战略概述 .....                      | 293 |
| 9.2 系统评价体系的建立 .....      | 228 | 11.2 企业战略及选择 .....                   | 300 |
| 9.3 系统评价指标数量化的方法 .....   | 232 | 11.3 企业战略管理过程 .....                  | 306 |
| 9.4 系统评价指标综合的主要方法 .....  | 233 | 11.4 柔性战略 .....                      | 316 |
| 9.5 常用的系统评价理论和方法 .....   | 236 | 11.5 可持续发展战略 .....                   | 318 |
| 复习与思考 .....              | 260 | 11.6 21 世纪交通发展战略 .....               | 320 |
| <b>第 10 章 系统决策</b> ..... | 262 | 复习与思考 .....                          | 325 |
| 10.1 系统决策概述 .....        | 262 | <b>第 12 章 系统工程学的应用</b> .....         | 326 |
| 10.2 确定型决策 .....         | 271 | 12.1 系统工程在破解我国城市居民<br>住房难题中的应用 ..... | 326 |
| 10.3 风险型决策 .....         | 272 | 12.2 系统工程在破解我国城市交通<br>拥堵中的应用 .....   | 328 |
| 10.4 不确定型决策 .....        | 276 | 12.3 车辆人机工程学设计及评价 .....              | 337 |
| 10.5 基于决策树的多阶段决策 .....   | 280 | 复习与思考 .....                          | 347 |
| 10.6 算法讨论 .....          | 283 | <b>参考文献</b> .....                    | 348 |
| 10.7 决策支持系统 .....        | 283 |                                      |     |
| 10.8 冲突分析 .....          | 286 |                                      |     |



### 1.1 系统工程思想的形成



李冰(公元前 302—235 年)



泰勒(1856—1915)

众所周知,科学技术促进了社会的发展,社会的发展也推动了科学技术的进步,可以说它们两者是相辅相成的。19 世纪以来,由于大工业、大工程、大科学、大组织的不断涌现,研究和处理这些复杂系统问题时,仅仅依靠传统科学理论和方法是远远不够的,因而需要新的科学理论和方法。系统工程正是在这种情况下孕育而生,它是一门组织、管理和协调大工业、大组织的技术。

系统工程思想萌芽阶段,可以追溯到距今天 2300 多年前的战国时期李冰父子主持的驰名中外的四川都江堰水利工程和 20 世纪初美国泰勒管理制度。都江堰水利工程不仅在施工时间上有一套管理方法,而且建立了持续不断的岁修养护制度,使得该水利工程经久不衰。正是由于李冰的创业,才使成都不仅成为四川而且是西南政治、经济、交通的中心,同时成为全国工商业和交通极为发达的城市。泰勒(Frederick Winslow Taylor),1856 年出生于美国宾夕法尼亚州费城的一个律师家庭,中学毕业后他考上了哈佛大学法律系,因眼疾而辍学。1875 年他进入费城一家小的恩特普里斯水压工厂当模具工和机工学徒,1878 年他转入费城米德瓦尔钢铁厂当工人,并一直在该厂工作到 1890 年。在这 13 年期间,他的角色有:车间管理员、小组长、工长、技师、制图主任和总工程师。他利用业余时间学习,获得了机械工程学士学位。通过钢铁厂实践,泰勒感到:一方面,企业管理当局不懂得如何使用科学方法进行管理,不懂得工作程序、劳动节奏和疲劳因素对劳动生产率的影响。另一方面,工厂的工人由于缺少训练,没有掌握正确操作方法,也没有适用的劳动工具,因而劳动生产率受到很大影响。为改进管理,泰勒在米德瓦尔钢铁厂进行了各种工作效率实验。泰勒从合理安排

工序、协调各工序间关系、提高工作效率入手,研究管理活动行为与时间关系,探索了科学管理基本规律。1893年至1901年期间,泰勒以顾问身份受雇于美国第二大钢铁公司——伯利恒钢铁公司继续从事管理研究,并与怀特(Munsell Wright)一起共同发明了高速钢专利(1898年)。1901年以后,他离开伯利恒钢铁公司,不再同任何工业公司来往,只从事不收取报酬的管理咨询、写作和演讲工作,推广科学管理,宣传他提出的一套管理理论——“科学管理”,即“泰勒制”,并为科学管理理论在美国和国外传播做出了开创性的贡献。

可以这么说,泰勒的系统工程思想的形成是从任钢铁厂工长开始的。特殊经历,使得他能在工厂生产第一线系统地研究劳动组织与生产管理问题,亲身体验并发现生产效率不高是由于工人们“故意偷懒”、“磨洋工”造成的,于是着手解决该问题。从1881年开始,他进行了一系列金属切削实验,研究每个金属切削工人一个工作日合适的工作量。经过两年时间的初步实验,他给工人制定了一套工作量标准。在泰勒开展的一系列科学实验中,要数1898年进行的“搬运生铁块实验”和“铁锹实验”最闻名。在搬运生铁块实验中,有公司的五座高炉产品搬运班组约75名工人参加。实验目的就是研究改进操作方法和训练工人。实验结果令人大吃一惊,因为改进而使生铁块搬运量提高了3倍!铁锹实验首先系统研究铲上负重应为多大;其次研究各种材料能达到标准负重锹形状与规格问题,还研究各种原料装锹最好方法。此外还对每一套动作的精确时间进行研究,得出了“一流工人”每天应完成的工作量。其研究结果非常出色,堆料场劳动力从400~600人减少为140人,平均每人每天操作量从16t提高到59t。当然,每个工人日工资也从1.15美元提高到1.88美元。管理业界认为,米德瓦尔实验是工时研究的开端。泰勒一生致力于“科学管理”研究,但他的做法和主张并非一开始就被人们所接受,而是日益引起社会舆论议论。在这样的背景下,美国国会1912年举行了对泰勒制和其他工场管理制听证会,泰勒在听证会上作了精彩证词,并向公众宣传科学管理原理及其具体方法和技术,在社会各界引起极大反响。

泰勒的科学管理系统将工人的潜能发挥到无以复加的程度,有人形容在实行泰勒制的工厂里,找不出一个多余的工人,每个工人都像机器一样一刻不停地工作。泰勒制将整个社会的生产效率提高到前所未有的程度。但是当时却遭到来自各方面的非议,工会和社会工作者说泰勒制把工人变成了奴隶,让资本家最大限度地榨取血汗,而一些依靠经验毫无创新的管理人员则抱怨科学管理取代了他们的作用,让他们面临失业。尽管有这样那样的不同意见,但是泰勒制还是以不可遏制的势头在全世界推广开来。在泰勒以后,科学管理理论得到不断补充和完善,但是泰勒制的局限性也逐渐显现出来。泰勒理论的前提是把作为管理对象的“人”看做是“经济人”,利益驱动是该学派用以提高效率的主要法宝。科学管理学派研究的重点是管理的科学性、严密性和纪律性,因而很少去考虑人的因素。

到了20世纪20年代,系统工程思想萌芽就逐步形成了工业工程,当时主要研究生产在空间和时间上的管理技术。要说谁第一次提出了“系统工程”一词,那当属1940年在美国贝尔电话公司实验室工作的E. C. 莫利纳(Molina)和丹麦哥本哈根电话公司工作的A. K. 厄朗(Erlang),他们在研制电话自动交换机时,意识到不能只注意电话机和交换台设备技术研究,更需要从通信网络总体系统研究出发,并把研制工作分为规划、研究、开发、应用和通用工程等五个阶段。在这之后他们又提出排队论原理,并应用到电话通信网络系统中,推动了电话事业飞速发展。在20世纪40年代,又相继诞生了控制论和信息论,运筹学也进入了经济、管理领域和国防系统、宇航系统以及交通、电力、通信等大规模系统,运筹学所要解

决的问题,就是在给定条件下,对管理工作进行合理筹划,以达到预期最优效果。当然,运筹学问题的求解,需要通过复杂运算。在进入20世纪50年代以后,随着电子计算机投入使用,使得运筹学得到广泛应用,也为系统分析提供了方法,从而产生了“系统工程”概念,系统工程思想也就得到了真正发展。

## 1.2 系统工程的发展

随着人类社会不断向前推进,人们所面临处理的系统日益庞大与复杂,在这种背景下,系统工程在世界各地得到广泛应用,并不断得到发展。

### 1.2.1 系统工程在西方国家的发展

在20世纪60年代,系统工程真正被重视是在美国阿波罗登月计划中。阿波罗计划由地面、空间和登月三部分组成,这是一项复杂庞大的工程计划,涉及火箭技术、电子技术、冶金、化工、通信和计算机等多种技术。工程目的是把人安全送上月球,了解宇宙空间物理环境、月球构造和形状。参与研制该工程的单位与企业有2万多家、40多万人、零件百万件,共花费300亿美元,前后历时11年。在项目研制过程中,需要考虑每一部分之间配合和协调,估算各种未知因素带来的影响。很显然,一个“总工程师”或“总设计师”的智慧和实际经验是无法解决这些问题的,复杂的总体协调任务也不可能靠一个人来完成。因为他不能精通整个系统所涉及的全部专业知识,也没有足够时间完成数量惊人的技术协调工作。因而需要一个总体规划部门,运用一种科学组织方法,综合考虑统筹安排来解决问题。这种科学的组织管理方法就是系统工程。阿波罗登月计划工程正因为出色地应用了系统工程,使得项目顺利完成。

自20世纪70年代以来,随着微型计算机的发展,出现了分级分布控制系统和分散信号处理系统,因而扩展了系统工程理论方法的应用范围。系统工程发展的趋势是应用领域继续向社会、经济、生态等方面扩展,并发展应用软系统工程方法论。1972年在一些国家科学院的倡议下,在奥地利维也纳成立了国际应用系统分析研究所。它是一个用系统工程方法研究复杂的社会、经济、生态等问题的国际性研究机构。该机构先后选择了能源、环境、生态、城市建设、资源开发、医疗、工业生产等研究课题,在推动系统工程的发展和应用方面产生了重要影响。

近年来,社会、经济与环境综合性系统问题日益增多,如环境污染、人口老龄化、交通拥堵和领土争端等。许多技术性问题带有政治、经济因素,如典型的北欧跨国电网供电问题。该电网有水、火、核等多种能源,规模庞大。电网调度本身在技术上相当复杂,而且还受各国经济利益冲突、地理条件限制、环境保护政策制约和人口迁移状况影响,因此,负荷调度目标和最佳运行方式评价标准十分复杂,涉及北欧多个国家社会经济因素。该电网系统分析者要综合这些因素,对一定限额的电力做出合理并能被接受的调度方案,然后提交各国讨论、协调和决策,这个问题就是一个典型系统工程问题。

综上所述,系统工程是人类社会生产实践和科学技术发展必然产物,它的形成与发展有一定历史背景和条件:

- 1) 产生系统工程的客观基础:自然界、社会、政治和经济管理等各个方面,结构日趋

复杂,出现综合性高、相互制约和相互联系的系统,突破了以往的区域性、行业性和学科性的界线,而过去一直使用的比较狭隘、孤立的方法是不能解决的。

2) 现代应用数学、计算技术和计算方法发展促进了系统工程发展。

3) 通信技术、网络技术和信息科学发展,使社会生产过程和整个经济过程的各个环节能有机、迅速地联系起来,处理效率提高,能在最短时间内对综合、复杂问题做出判断和决策,因而推动了系统工程发展。

### 1.2.2 系统工程在我国的发展

我国近代系统工程研究可追溯到 20 世纪 50 年代。1956 年,中国科学院在钱学森、许国志教授倡导下,创立了第一个运筹学小组。在 20 世纪 60 年代,著名数学家华罗庚大力推广应用统筹法、优选法。与此同时,在著名科学家钱学森的领导下,我国在导弹等现代化武器总体设计组织方面取得了丰富经验,国防尖端科研“总体设计部”取得了显著成效。自 1977 年以来,系统工程推广和应用出现新局面。1980 年成立了中国系统工程学会,并与国际系统工程界进行广泛的学术交流。钱学森在 20 世纪 80 年代初期提出了国民经济建设总体设计部的概念,坚持致力于将航天系统工程概念推广应用到整个国家和国民经济建设,并从社会形态和开放复杂巨系统的高度,论述了社会系统。他发展了系统学和开放的复杂巨系统的方法论。近年来,系统工程在各个领域取得了许多成果。



钱学森(1911—2009)

系统工程在我国当代的发展趋势:

- 1) 系统工程作为一门交叉学科,日益向多种学科渗透和交叉发展。
- 2) 系统工程作为一门软科学,日益受到人们重视。
- 3) 当代系统工程应用领域日益广泛,进而推动系统工程理论和方法不断向深化发展。

## 1.3 促使系统工程诞生的重大理论

系统工程的产生与相关学科的发展密不可分。军事、社会、经济和技术的发展为系统工程的诞生提供了条件,而一般系统论、控制论、信息论、耗散结构理论、协同学理论、突变理论和运筹学等相关学科和重大理论的发展为系统工程的诞生提供了理论基础。

### 1.3.1 一般系统论

一般系统论通过对各种不同系统进行科学理论研究而形成关于适用于一切种类系统的学说。一般系统论主要创始人是奥地利理论生物学家贝塔朗菲。他在 1947 年提出一般系统论时,明确提出要把马克思和恩格斯辩证法列为一般系统论思想来源之一。贝塔朗菲指出:把孤立各组成部分的活动性质和活动方式简单相加,是不能说明高一级水平活动性质和活动方式;了解各组成部分之间全部关系



贝塔朗菲  
(1901—1972)

后,则高一阶水平活动才能从各组成部分推导出来;为了认识事物整体性,既要了解其各组成部分,更要了解它们之间的关系。一般系统论来源于机体论,是一种与机械论相对立的生物学理论。

贝塔朗菲认为机械论有三个错误的观点:

- (1) 相加的观点 把有机体分解为各要素,并以简单相加来描述有机体功能。
- (2) 机械的观点 把生命现象简单地比作机器,认为“人即机器”。
- (3) 被动反应的观点 有机体只有受到刺激时才能反应,否则便静止不动。

贝塔朗菲认为机械论观点完全不能正确解释生命现象;贝塔朗菲总结有机体论发展成就,把协调、秩序、目的性等概念用于研究有机体,并提出了他自己的三个基本观点:

(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,其特性和功能不只是各部分特性和功能的简单相加的总和。

(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,生物的基本特征是组织。有机体之所以能有组织地处于积极活动状态,并保持其活力生命运动,是由于系统与环境不断地进行物质与能量交换——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动态稳定性。

(3) 等级观点 各种有机体都按严格等级组织起来。

贝塔朗菲认为生物系统层次分明、等级森严,通过各层次逐级的组合,而形成越来越高级、越来越大的系统。处于不同层次的要素具有不同功能。而处于同一层次事物,尽管形态各异,但都具有类似结构和功能,系统就是由结构和功能组成的统一体。

贝塔朗菲在论述这门学科性质和任务时指出:一般系统论是一门新学科,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,这个原则既不能局限于“技术”范围内,也不能当做一种数学理论来对待,因为有许多系统问题不能用现代数学求出解答,而要从系统观点来认识和分析客观事物。

运用一般系统理论,可帮助我们摒弃那种用简单方法来解决复杂系统问题习惯,如实把对象作为一个有机整体来加以考察,从整体与部分相互依赖、相互制约关系中揭示系统特征和运动规律。

一般系统理论研究领域十分广阔,几乎包括一切与系统有关的学科和理论,如管理学、运筹学、信息论、控制论、科学学、哲学以及行为科学等等。可以说,一般系统论给各门学科带来了新动力和新研究方法。一般系统理论为系统工程发展、使人类走向系统时代奠定了理论基础。

### 1.3.2 控制论

具体说,控制论是一门以数学为纽带,把研究自动调节、通信工程、计算机和计算技术以及生物科学中的神经生理学和病理学等学科共同关心的共性问题联系起来而形成的边缘学科。控制论奠基人是美国数学家维纳和英国生物学家艾什比(William Ross Ashby)。1948年维纳在总结前人经验基础上提出了该理论。控制论另一奠基人艾什比的主要科学著作《控制论导论》和《大脑设计》于20世纪50年代出版后,一再重版。书中提出的思想在今天已成为控制论的基本概念。



维纳(1894—1964)



艾什比(1903—1972)

维纳 1894 年 11 月 26 日生于美国密苏里州的哥伦比亚市, 1964 年 3 月 18 日在瑞典斯德哥尔摩讲学途中因心脏病去世。维纳天资聪颖, 并在他的父亲影响下, 11 岁就上了大学, 学的专业是数学, 但喜爱物理、无线电、生物和哲学, 14 岁考进哈佛大学研究生院学动物学, 后学哲学, 18 岁获得哈佛大学数理逻辑博士学位。1913 年博士刚毕业, 维纳就去了欧洲向罗素、哈代和希尔伯特数学大师们学习数学。正是多种学科在他头脑里的汇合, 才结出了控制论这颗综合之果。

维纳在其 50 年的科学生涯中, 先后涉足哲学、数学、物理学和工程学, 最后转向生物学, 在各个领域中都取得了丰硕成果, 称得上是恩格斯颂扬过的、20 世纪多才多艺和学识渊博的科学巨人。在二次世界大战期间, 为对付德国空中优势, 英美两国急需提高防空体系性能。维纳两次参加美国研制防空火力自动控制系统工作, 当时高射炮弹速度比德国飞机快不了多少, 而德国飞机飞行又有一定随机性, 这就要求盟军的高射炮在瞄准时不能直接对准目标或只是有个大约提前量, 而要预测飞机将要飞到的精确位置, 以使炮弹击中目标。这就产生了自动控制问题。维纳将概率论和数理统计等数学工具用于火炮控制系统, 并提出了一套最优预测方法。但这只能给出一种可能性最大预测, 并不能给出百分之百击中率。为此, 他开始把早年学的动物学知识用了起来, 并成功地设计了防空火炮的自动控制系统。

1943 年, 维纳与别格罗和罗森勃吕特合写了《行为、目的和目的论》的论文, 从反馈角度研究了目的性行为, 找出了神经系统和自动机之间的一致性。这是第一篇关于控制论的论文。1943 年底在纽约召开大会, 参加者有生物学家、数学家、社会学家和经济学家, 他们从各自角度对信息反馈问题发表了意见。以后又接连举行了这样的讨论会, 对控制论的产生起了推动作用。控制论的真正诞生是在 1947 年的春天, 维纳参加了在法国举办的调合分析问题的数学研讨会。在法国逗留期间, 维纳结识了法国赫曼书店的弗里曼。弗里曼直截了当的要求维纳把他关于控制论的思想写出来, 而在此之前美国竟然没有一家书店愿意出版维纳有关控制论的著作。维纳接受了这一请求, 于 1947 年底完成了《控制论》一书的写作, 并于 1948 年正式出版。《控制论》一书的出版, 标志着控制论作为一门崭新学科诞生了。《控制论》一书的副标题是“关于在动物和机器中控制和通信的科学”。《控制论》一书尽管还包含了不少未解决的问题, 甚至有不完备和错误的思想, 但在现代科学方法论研究上却实现了真正的突破, 它预示了“建立一个介乎各门科学之间的科学部门的计划”就要得以实现了。一般控制系统框图如图 1-1 所示。

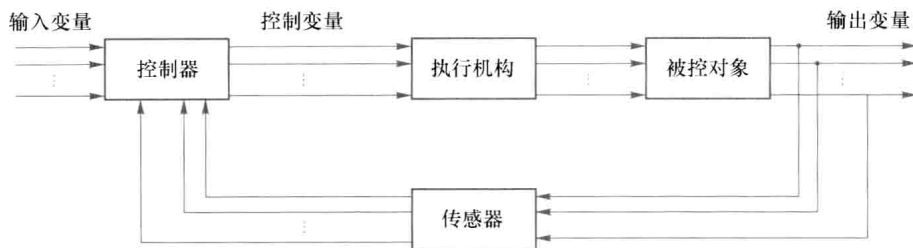


图 1-1 控制系统框图

### 1.3.2.1 控制论的定义

控制论创始人维纳对控制论给出的定义是：控制论是关于在动物和机器中控制和通信的科学。

控制论的另一创始人艾什比认为控制论就是一种机器的理论。这里必须注意，艾什比认为控制论虽然是作为一种“机器的理论”而存在着，但它实际研究的是一切“可能的机器”，至于其中有的机器是否被人或自然界创造出来，对它倒是次要的。换言之，控制论研究的不是物体而是动作方式，它并不深究这是什么东西，而要研究它做什么……控制论本质上是研究机能和动态的。正因为如此，控制论才能够超脱具体机器、生物体以及社会的具体构造性，能够突破工程与非工程的界线，甚至跨越自然科学和社会科学两大领域，为人们对这些系统的研究提供了一种横断的方法。

与艾什比的定义相类似的还有一些。如前苏联学者茹科夫就认为控制论不是普通的专门科学，它是研究物质运动某种形式范围内科学发展的一种新的方法，甚至应该首先把功能方法本身当做控制论对象。即控制论是研究组织界的各种功能系统的科学。前民主德国的哲学家克劳斯在其《从哲学看控制论》一书中也认为“控制论不仅研究现存的和已知的机器的行为方式，而且要成为关于可能的机器的行为方式的理论”。

从维纳和艾什比的定义中可以看出，它们在总的方面不矛盾，但其侧重点并不一样。维纳等人的定义基本上是从具体的控制系统的控制形式上考虑问题，他们认为控制论的研究重点在于控制系统的控制和调节的一般规律。艾什比等人则把控制论理解为研究某种过程的方法。从方法论的角度，它们首先把功能方法本身当作了控制论的研究对象。他们认为，控制论不是沿着把它作为独立学科进行教学的路线进行，而应当是在生物科学、社会科学和技术科学中揭示和考虑控制论的方法。

钱学森给出的控制论定义：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；控制论研究系统各个部分如何组织，以便实现系统的稳定和有针对性的行为。

综合国内外学者的研究成果，控制论可以定义为研究系统的调节与控制的一般科学，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、医学和数理逻辑等多种学科互相渗透的产物。

### 1.3.2.2 控制论的发展

控制论一词是从希腊文演变而来的。在古希腊有些文献中用这个词表示掌舵人，在柏拉

图的《高尔吉亚》文中,又用来指驾船术或操舵术。有时,柏拉图也用这个词来表示管理人的艺术。柏拉图的学生亚里士多德在其《政治学》第五册中进一步发展了柏拉图的思想。他认为管理一个政治团体或一个国家就如同驾驶一艘船一样,必须实行控制。近代著名的法国物理学家安培,也认为“控制论”就是管理国家的科学。维纳在创立控制论之初就提出控制论不仅应该是一种机器理论,而且应该能够运用于社会领域。而控制论一词,恰好贴切地反映了维纳的这一思想。于是,维纳在为他所创立的这门学科命名时,就选择了控制论一词。

自1948年控制论作为一门新兴科学诞生以来,无论在理论上还是在应用上都有很大的进展。从理论上讲,维纳1961年出版的第二版《控制论》中,维纳新补充了两章,内容主要涉及自学习、自生殖机器和自组织系统。1962年他发表的《上帝和高兰合股公司》,又一次讨论了自组织系统问题。这些新增内容充分反映了控制论在理论上的进展。当然,从控制论诞生以来的40多年来看,控制论的进展更突出地表现在应用领域。按照现在的一般观点,控制论在应用领域主要有四个分支,即工程控制论、生物控制论、智能控制论和社会控制论。按照控制论的研究对象、提出任务、分析方法和工具的不同,我们通常将工程控制论的发展划分为以下三个阶段:

1) 1948年—20世纪50年代末期,经典控制理论阶段。该阶段主要研究单输入单输出的线性控制系统的一般规律,建立系统、信息、调节、控制、反馈、稳定性等控制论的基本概念和分析方法。研究重点:反馈控制,核心装置是自动调节器,主要应用于单机自动化。当然,学术界比较一致的看法,是认为我国学者钱学森1954年在美国发表的《工程控制论》应作为该阶段的奠基性著作。

2) 20世纪50年代末期—20世纪70年代,现代控制论阶段。该阶段主要研究多输入多输出的线性、非线性控制系统。研究重点是最优控制、随机控制和自适应控制,主要应用于机组自动化和生物系统。

在20世纪60年代前后,由于美国和前苏联等国家在空间技术、导弹系统、人造卫星、航天系统等科学技术的迅速发展,对自动控制提出了更高性能和更高精密度的要求。因而,控制论的研究对象发生了变化,它必须从理论与方法上研究和解决多输入多输出的控制系统,参量随时间变化的时变系统以及非线性系统,而且还要解决最优化以及如何适应环境变化的问题。出现的新问题要求控制论有新理论与方法来处理。

现代控制理论形成主要标志是匈牙利裔美国数学家卡尔曼(Rudolf Emil Kalman)提出的状态空间方法和能控性与能观测性等新概念,以及与最优控制有关的前苏联学者庞特里雅金等人提出的极大值原理和美国数学家贝尔曼提出的动态规划方法等。

状态空间方法在经典控制理论中早就使用了,但在现代控制理论中,这种方法被加以推广和发展,并成为一种主要的有效的方法。从数学方面来说,对于多输入、多输出的系统,由于关系复杂,只有导入状态变量才能使方程的阶数降低。虽然方程阶数越高带来微分方程的个数越多,但在数学上可以用矢量与矩阵来表示。因而它不仅适用于复杂的线性系统,而且可以推广应用于非线性系统、时变系统以及稳定性的分析与研究,并且便于在计算机上使用。

状态空间方法与能观测性、能控性分析和研究也是密切相关的。能观测性是根据系统在适当时间的输出,是否能以所需要的精度来测定系统内部的状态或反应的问题。而能控性则

是用现有的控制手段,能否对系统施加影响到所需要的程度问题。也就是能否通过控制使系统达到预定目标的问题。在现代控制理论中,给出系统的状态方程以后,可以推导出完全能观测和能控制的充分必要条件。根据能观测性和能控性的功能,可以证明任意一个线性系统都可以分解为能控又能观、能控不能观、不能控能观和不能控又不能观的四个子系统。其中后三种子系统中的隐蔽振荡现象用传递函数来分析与处理就很困难,只能用定性分析的方法来处理。

最优控制理论是现代控制理论中另一个重要的理论和方法。最优控制理论是用以确定使受控系统或运动过程的给定性能指标取极大或极小值的最优控制的主要方法。最优控制问题有四个要素:

① 受控系统或过程的数学模型。通常采用状态方程的形式,它是状态向量  $x$  的一阶微分方程

$$\dot{f} = f(x, u, t) \quad (1-1)$$

式中,  $u$  是控制向量;  $t$  是时间变量。

② 容许控制。

③ 目标集。在控制作用下系统状态所要达到的目标区。这个目标区可以是一个给定的点,也可以是一个给定的区域。

④ 性能指标。性能指标的形式由实际问题来决定,通常有两种类型:表示系统在末时刻状态的性能指标称为末值型性能指标,记为  $S(x(t_f), t_f)$ ; 用特定函数的积分表示系统运动过程中的性能指标称为积分型性能指标。

最优控制问题可表述为寻求一个容许控制  $u(t)$ , 以使受控系统从某个给定的初始状态  $x(t_0) = x_0$  出发, 在末时刻  $t_f$  达到目标集, 并且使性能指标泛函  $J[u(\cdot)]$  达到极小值或极大值。据此定出最优控制  $u^*(t)$  的关系式后, 最优控制问题的求解就归结为对运动方程及其初始条件  $x(t_0)$  和伴随方程及其末时刻条件  $\lambda(t_f)$  联合求解, 这种问题称为两点边值问题。更一般形式的最优控制问题(包括受控过程为时变系统、性能指标为积分型指标或混合型指标、末状态的约束方程为更复杂的形式等情况)的极大值原理的结果都可由上述基本形式导出。

极大值原理是20世纪50年代中期前苏联学者庞特里亚金提出的, 在工程领域中很大一类最优控制问题都可采用极大值原理所提供的方法和原则来定出最优控制的规律。

3) 20世纪70年代末期至现在, 属于大系统理论阶段。该阶段主要研究对象是众多因素复杂的控制系统(如宏观经济系统、资源分配系统、生态和环境系统、能源系统等)。研究重点是大系统的多级递阶控制、分解—协调原理、分散最优控制和大系统模型降阶理论等。

自20世纪70年代以来, 人们已不再满足现代控制理论中对一般多变量系统的研究, 而是希望解决数目更大的多变量系统所涉及的问题。比如宏观经济系统、资源分配系统、生态和环境系统、能源系统等这样的大系统或巨系统。以计算机为运算工具, 采用现代控制论的概念和方法来研究大型工业企业的管理系统、生态系统、经济系统和社会系统已成为可能。正是大系统理论的出现, 使工程控制研究扩展到生物领域, 并进而深入到社会领域和思维领域。

大系统具有以下特点:

- ① 规模庞大, 元件、部件多, 包含着许多子系统。
- ② 结构复杂, 各元件、部件、子系统之间的联系复杂。

③ 功能综合, 往往具有多个目标, 其中的某些目标之间还可能是相互对立或矛盾的。

④ 多输入、多输出、多干扰的多变量的系统。在有的大系统中, 不仅包含“物”的因素, 而且包含“人”的因素, 如工厂、城市或国家。

大系统在控制与管理之间很难找出一条明确的界限。它既可以从控制的角度来分析与管理, 也可以从管理科学的角度来分析与管理。

大系统理论分析主要采用模型化方法来进行定性与定量的研究。首先建立大系统的数学模型, 用数学表达或来规划系统的各种性能。其次, 建立它的网络模型, 并作出必要的网络图、流程图、程序框图和计划评审图等。最后, 还要建立仿真模型。这是因为大系统往往与技术指标、经济效益和社会影响有关。分析与设计一个大系统, 通过建立仿真模型, 以便进行大系统仿真。在建立模型的过程中, 逻辑方法起着很重要的作用。从控制论方法来看, 一个大系统可能是黑箱、灰箱或白箱。在建立模型时, 要根据不同的情况, 运用演绎和归纳相结合的方法求出模型。

由于因素众多和结构复杂使得即使是确定型的大系统数学模型, 其方程的阶数一般也是较高的, 大大超过经典控制理论所常见到的二阶或三阶的范围, 甚至可能达到几十、几百甚至上千阶的高度。同时出现的方程个数也可能是大量的。这些情况甚至使得高速度的计算机都无能为力。现代控制理论与大系统理论研究模型的降阶问题, 或称为模型简化的问题, 就成了大系统控制理论研究的一个重要问题。模型简化主要有两种方法: 一种是聚合法(Aggregation), 另一种是摄动法。聚合法只能适用于线性系统, 而摄动法则不仅适用于线性系统, 还能应用于非线性系统, 因而是一种更有用的数学工具。

大系统的控制结构大体上可以分为三类: 第一种类型是多级控制或递阶控制, 即对不同的递阶实行不同的控制。一个大的控制系统分为三级递阶结构, 一级是运用一些调节装置进行局部控制级, 二是实现过程的最优化进行递阶控制级, 三级是协调与组织管理称为协调控制级。第二种类型是多层控制。即按任务或功能分层, 在各层次之间存在着不同的分工。一般来说, 层次越高, 任务或功能越复杂, 干扰的变化也较慢; 反之, 低层的任务或功能较单纯, 干扰的变化也较快。例如电子系统为了保证安全供电, 其任务往往分为预防层、恢复层和紧急层, 以对付各种影响安全的扰动。第三种类型是多段控制, 即按被控制对象的时序分段。例如, 导弹的弹道可以分解为主动段、惯性飞段和末制导段。

### 1.3.2.3 现代控制理论的主要内容

现代控制理论主要利用计算机作为系统建模分析、设计乃至控制的手段, 适用于多变量、非线性、时变系统。它在本质上是一种“时域法”, 但并不是对经典频域法的从频率域回到时间域的简单再回归, 而是立足于新的分析方法, 有着新的目标的新理论。现代控制理论研究内容非常广泛, 主要内容包括: 线性系统理论、最优控制、随机系统理论和最优估计、系统辨识、自适应控制、模糊理论、非线性系统理论、鲁棒性分析与鲁棒控制、分布参数控制、离散事件控制、智能控制、大系统理论、生物控制论和社会控制论。

#### 1. 最优控制理论

它是现代控制论核心, 它通过数学方法, 科学、有效地解决大系统设计和控制问题。它强调采用动态控制方式和方法, 以满足多种多输入多输出系统控制要求, 实现系统最优化。最优控制主要在工程控制系统、社会控制系统等领域得到应用和发展。