



21世纪高等院校教材·工业工程系列

系统建模与仿真

刘思峰 方志耕 编著
朱建军 沈 洋

编著



科学出版社

21 世纪高等院校教材·工业工程系列

系统建模与仿真

刘思峰 方志耕 编著
朱建军 沈 洋

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是在作者数十年研究应用数学模型和仿真技术,讲授相关课程的基础上,针对经济类、管理类专业的特点,并广泛吸收国内外优秀系统建模与仿真教材的成果凝练而成的。书中系统地阐述了系统建模、系统仿真的基本概念、基本原理、基本方法及其应用步骤与实现过程,主要内容包括系统建模理论与方法、系统仿真方法与技术、连续系统建模与仿真技术、离散事件系统建模与仿真、灰色系统建模方法、学习和进化模型、基于 Simulink 的系统仿真和系统动力学模型与仿真技术等。每章末尾均配有一定数量的习题与思考题,并在附录中提供了课程实验。

本书不仅可以用作经济类、管理类专业高年级本科生和研究生的教科书,同时对于系统建模与仿真技术有兴趣的读者,也是一本适宜的自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

系统建模与仿真/刘思峰等编著. —北京:科学出版社,2012

21 世纪高等院校教材·工业工程系列

ISBN 978-7-03-034494-6

I. ①系… II. ①刘… III. ①系统建模-高等学校-教材②系统仿真-高等学校-教材 IV. ①N945.12②TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 109641 号

责任编辑:兰 鹏 林 建 / 责任校对:张凤琴

责任印制:阎 磊 / 封面设计:蓝正设计

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京华正印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2012 年 6 月第一次印刷 印张:14 1/2

字数:323 000

定价:29.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前言

系统建模与仿真是一门综合运用数学建模的理论、方法和现代计算机仿真技术,研究各类系统(本书主要面向经济、管理系统)数学模型和仿真系统构建原理与实现过程的科学,是经济类、管理类专业的一门重要专业基础课程。本书是在作者数十年研究应用数学模型和仿真技术,讲授相关课程的基础上,针对经济类、管理类专业的特点,并广泛吸收国内外优秀系统建模与仿真教材的成果凝练而成的。书中系统阐述了系统建模、系统仿真的基本概念、基本原理、基本方法及其应用步骤与实现过程,主要包括系统建模理论与方法、系统仿真方法与技术、连续系统建模与仿真技术、离散事件系统建模与仿真、灰色系统建模方法、学习和进化模型、基于 Simulink 的系统仿真和系统动力学模型与仿真技术等。

本书主要特色是强调系统建模与仿真的基本原理、基本方法,突出实际应用,对那些专业性强、难度大的内容作了慎重处理,力求使之更为通俗化。在阐述方式上力求简明扼要、深入浅出、通俗易懂,运用大量的实例来说明常用系统建模与仿真技术的具体应用,致力于提高读者的实际动手能力,为研究解决经济与管理系统中出现的多种问题提供有力的工具、方法、技术。每章末尾均配有一定数量的习题与思考题,并在附录中提供了课程实验,帮助读者在理解和掌握系统建模与仿真的基本原理、方法和技能的同时,学会多种新型数学模型和仿真软件的实际操作和应用;培养读者运用数学模型和仿真软件工具模拟、分析和解决社会经济管理领域中实际问题的能力。

全书共分 9 章,其中第 1 章、第 2 章、第 6 章和附录中实验三、四、五由刘思峰执笔,第 3 章、第 4 章和附录中实验一由朱建军执笔,第 5 章、第 9 章和附录中实验二由方志耕执笔,第 7 章、第 8 章和附录中实验六、七、八由沈洋执笔。管理定量方法课程团队研究生刘勇、李亚平、徐锐婷等多位同学参与了资料收集、排版、校对工作。全书最后由刘思峰负责统稿和审定。

本书的编写得到了管理定量方法课程群国家级教学团队和江苏省优秀教学团队建设

基金、南京航空航天大学教材出版基金及精品课程建设基金资助，在此，作者向支持本书出版的领导、专家和同学表示深深的谢意！

限于作者水平，书中难免有不足之处，殷切期望有关专家和广大读者批评指正。

作 者

2012年3月1日

目 录

前言

第1章

导论	1
1.1 系统	1
1.2 系统建模	9
1.3 系统仿真	16
1.4 系统建模与仿真技术的应用	20
习题与思考题	23

第2章

系统建模理论与方法	24
2.1 系统模型及其分类	24
2.2 系统建模的原则	27
2.3 系统建模的基本方法概述	28
2.4 系统建模的途径与步骤	31
2.5 关于模型的有效性	35
习题与思考题	37

第3章

系统仿真方法与技术	38
3.1 系统仿真技术的分类	38
3.2 系统仿真的一般过程	41

3.3 系统仿真技术的应用·····	43
3.4 系统仿真技术的特点·····	47
习题与思考题·····	47

第4章

连续系统建模与仿真技术·····	48
4.1 连续系统的数学建模方法·····	48
4.2 常(偏)微分方程的数值求解·····	53
4.3 基于MATLAB进行数值仿真·····	58
4.4 连续系统建模与仿真的实例分析·····	61
习题与思考题·····	68

第5章

离散事件系统建模与仿真·····	70
5.1 引言·····	70
5.2 离散事件系统描述·····	70
5.3 常用离散事件系统建模·····	74
5.4 离散事件系统仿真·····	81
5.5 蒙特卡罗仿真方法·····	102
习题与思考题·····	108

第6章

灰色系统建模方法·····	110
6.1 灰色预测模型·····	110
6.2 灰色评估决策模型·····	120
习题与思考题·····	132

第7章

学习和进化模型·····	135
7.1 人工神经网络·····	135
7.2 遗传算法·····	155
习题与思考题·····	163

第 8 章

基于 Simulink 的系统仿真	164
8.1 Simulink 基础	164
8.2 Simulink 动态系统仿真	173
习题与思考题	186

第 9 章

系统动力学模型与仿真技术	187
9.1 系统动力学概述	187
9.2 DYNAMO 语言	189
9.3 系统动力学仿真主要环节与建模步骤	196
9.4 系统动力学仿真实例	199
习题与思考题	202

参考文献	204
------------	-----

附 录

课程实验	206
实验一 导弹运行系统的 MATLAB 仿真	206
实验二 多服务台排队系统的 MATLAB 仿真	208
实验三 灰色系统建模软件下载与安装	211
实验四 灰色预测模型	215
实验五 灰色评估决策模型	215
实验六 使用 MATLAB 遗传算法工具箱解决管理问题	218
实验七 基于 Simulink 的“Follow-the-Leader”交通流仿真	221
实验八 使用 Ithink 软件进行系统动力学仿真	223



导 论

1.1 系 统

1.1.1 人类早期的系统思想与系统实践

系统思想源远流长,系统实践在人类文明史上写下了不胜枚举的光辉篇章。古希腊的“Syn-histanai”一词,意为归拢起来使之站立,已经具有“系统”的含义。亚里士多德(Aristotle)“整体大于部分之和”则是其具有整体论和目的论内涵的系统观的高度概括。德谟克利特(Democritus)的系统思想通过其对宇宙构成的认识表达得十分清晰,他认为独立、不变、不可分的“原子”是组成宇宙系统的基本粒子。柏拉图(Plato)则赋予系统以完美的静止状态或永恒的“理想”形式的内涵。

中国的《黄帝内经》中,已包含有朴素的系统思想。《黄帝内经》通过对经络、脉象、穴位等的研究,深化了对人体“系统”的认识。中药的“辨证处方”,则是系统思想的集中体现。一付中药一般由“君、臣、佐、使”4个部分组成:“君药”对主病起主要治疗作用,用量较大;“臣药”辅助“君药”加强治疗作用;“佐药”用来抑制“君药”可能产生的副作用;“使药”对各种药物起调和作用。“君、臣、佐、使”合理配伍,一付中药就是一个具有“健身祛病”功效的药物“系统”。中国古代的系统思想在老子的《道德经》中得到高度概括和提炼。《道德经》中的“道”或“一”超越了时空界限,“独立而不改,周行而不殆,可以为天下母”。老子认为,只有按照“道”的原则,才能实现既定的目标。“天得一以清,地得一以宁,神得一以灵,谷得一以盈,万物得一以生,侯王得一以为天下正”,这里的“道”或“一”在某种意义上可以和“系统”划等号。

散布于尼罗河下游地区的金字塔,建于公元前3000年左右,其中最大的一座胡夫(Hoove)金字塔,高146.5m,塔基边长230多米,共用重2.5t左右的巨石230万块。建造这座金字塔几乎动用了埃及的全部人力,每10万人一组轮流工作,干了20年才完成。如此浩大的工程没有系统思想指导是难以完成的。再如希腊人建造的雅典卫城,马其顿人在亚历山大港的法罗斯岛上建造的高100多米的巨大灯塔,罗马人建造的长190m、宽

155m、外墙高 48m 的圆形大剧场,法国人历时 100 年而建造的凡尔赛宫和巴比伦人建造的“空中花园”等,都是人类系统实践的奇迹。

公元前 250 年,中国战国时期的秦蜀郡太守李冰设计并主持修建的都江堰大型水利工程,由都江堰鱼咀、飞沙堰和宝瓶口三大工程配套而成。都江堰鱼咀建于岷江中心,把岷江水一分为二,内江灌溉,外江分洪;飞沙堰建于内江西岸,用于溢洪排沙;宝瓶口位于内江东岸,配合飞沙堰调节水量。三项工程浑然一体,巧妙地控制了岷江激流,兼收防洪、灌溉之利。都江堰渠道总长 1165km,共有 520 多条支渠,2200 多道分渠,灌溉农田 300 多万亩。这项 2000 多年前中国人系统实践的伟大成果,至今仍在发挥其防洪、灌溉的功效。2008 年“5·12”汶川大地震,距震中仅 20 多公里的都江堰市受损严重,而建于 2000 多年前的都江堰水利工程依然完好。公元前 240 年,水工郑国主持开凿的郑国渠,宽 24.5m,堤高 3m,深 1.2m,西起仲山、瓠口,东至高平、蒲城,全长 300 多里,由高至低,自流灌溉,受益面积 400 万亩。像中国秦朝修筑的万里长城、阿房宫、秦始皇陵及兵马俑,气势宏大,规模空前,凝结了无数人的智慧和血汗。没有系统组织和设计,断难完成。

1015 年,中国宋朝皇宫毁于火灾。宋真宗命丁谓主持修复工程。为解决工程中烧砖和填地基用土及大量建筑材料运输难题,丁谓令工役当街开沟取土,烧砖填地基;同时取土开挖的大沟,与汴河接通,船队可将各种建筑材料一直运到皇宫门前,节省了大量劳力;完工后再把废弃砖石填入沟内,复原街道。取土烧砖、材料运输、余土处理一举三得,堪称人类运用系统思想组织大型建筑工程施工的光辉典范。

1.1.2 当代的系统研究进展

1.20 世纪中叶兴起的系统运动

1925 年,美籍奥地利生物学家贝塔朗菲(Ludwig von Bertranffy)提出了生物系统论的思想,他的视野很快超出了生物学范畴,并于 1937 提出一般系统论原理,为系统论奠定了理论基础。1954 年,贝塔朗菲与持有相同观点的另外三位著名学者——经济学家鲍尔丁(Kenneth Boulding)、生物学家杰拉德(Ralph Gerard)和生物数学家拉波波特(Anatol Rapoport)发起成立了“一般系统研究会”,此 4 人被认为是系统运动之父。他们在加利福尼亚帕罗奥托行为科学高等研究中心合作共事,提出了系统科学研究 4 个主要目标:①研究不同科学领域中概念、规律、模型的相似性,并致力于从一个领域向另一个领域移植;②鼓励理论探索;③尽可能减少不同领域中的重复研究;④促进科学家之间的交流,强化科学研究的协调性。研究会每年组织召开一次年会,出版一本年刊,吸引了大批科学家,在西方学术界产生了很大影响,随之而来的是轰轰烈烈的系统运动。

20 世纪 50 年代和 60 年代,西方国家先后建立了一大批专门的系统科学研究机构,许多高等学校竞相开办系统科学系或专业,出版机构积极支持系统科学著作的出版,创办了一批系统科学学术刊物。据 1950~1980 年 30 年的资料统计显示,系统科学论著每 4 年翻一番。随着系统运动的发展,各国学者联合成立了国际性的系统科学组织。

大批具有系统科学头脑的高级人才进入管理、研究和工程技术领域,使人类应付和处理高度复杂的组织、决策、工程项目等问题的能力大大增强。如美国国家航空航天局组织

完成的阿波罗计划,耗资 300 亿美元,动员了 120 所大学、2 万家工厂和公司的 42 万名科学家和工程师参加研究。如此庞大的工程,必须运用系统科学的思想、方法进行组织管理。阿波罗计划从总体目标出发,把整个计划划分成许许多多的子系统,如飞船系统、火箭推进系统、飞行制导系统等,每个子系统再细分成若干次级子系统。各级子系统协调配合,完成计划总目标。

人类成功地登上月球,并安全返回地球,可以说是当代系统实践的伟大成果。

2. 西方各式各样的系统观

由于人们所处的领域不同,看问题的视角不同,因而在系统运动中形成了各种不同的系统观。主要有:

(1) 类比系统观——把系统视为抽象结构,即像在数学、逻辑学、统计、计算机科学和自然科学中那样,把系统定义为“具有某种关系的集合”。这种系统观相当普遍。

(2) 行为逻辑系统观——把系统看成是由机能、控制论和互联反馈过程说明的范例。这是控制论专家和系统动力学家的观点。

(3) 生物学系统观——把系统及其部分划分为有机确定的子系统。这是米勒(James Grier Miller)的观点,被称为“生命系统论”。

(4) 辩证系统观——视系统为演说、论证、说明、决议及实际或隐喻交谈等人类活动的中心。帕斯加(Gordon Pask)的“辩证论”是这种观点的一个典型。

(5) 动态逻辑系统观——认为系统与变化、增长、发展等特定概念有关。许多管理顾问持这种观点。

(6) 生态学系统观——认为系统与生物物种栖息地、合作、交互作用等有关。持此观点者常常用“环境”代替“系统”而造成混淆。一般环境学家倾向于此观点。

(7) 认识论系统观——认为系统主要与探索、学习、关于学习的学习及当我们自认为已知时检验掌握的程度等有关。这种观点是由丘奇曼(C. West Churchman)及其追随者提出的。

(8) 观念逻辑系统观——认为系统是绝对理想意义下的具体化。阿考夫(Ackoff)及其追随者信奉此观点。

(9) 纯粹逻辑系统观——认为系统由人们对分割、分类、界定、定义、差别认定等感性认识的解释而产生。研究一般系统哲学的人往往持这种观点。

(10) 方法论系统观——把系统看成系统化的方法,即在“问题求解”、管理等过程中应用的方法。许多“软系统方法论”的支持者持这种观点。

(11) 形态学系统观——用结构、形式、机器及其各部分之间的关系表示系统,把系统定义为具有某种属性的事物和事物及其属性之间关系的集合。工程界、“系统分析”及传统“一般系统论”的支持者持这种观点。

(12) 本体论系统观——认为系统是适合客观检验的外在实物。自然科学和系统分析专家比较典型地坚持这种观点。

(13) 心理学系统观——认为系统是信念的臆造物,是完全虚构的、抽象的。后现代派和一些激进的构成派成员持此观点。

(14) 符号学系统观——把系统视为由某种意义的归属和符号主义解释产生的事物。佩斯(Charles Sanders Peirce)的追随者和其他符号学家持这种观点。

(15) 社会学系统观——认为系统是由实际的文化、伦理、政治等“问题”和“答案”之源中派生出来的。社会学家持此观点。

(16) 秩序系统观——把系统看成是在某种情形下,按照其对于环境和感觉的作用、形式、内容、控制等方面划分等级、层次的方式。这是近来出现的一般系统世界观的翻版。

(17) 技术系统观——把系统视为由几个相互联系的部分、特别是以计算机作为其组成部分而构成的装置。这种观点目前在实业界和整个大众文化中最为流行。

(18) 目的论系统观——认为系统是根据人类的目的、价值、前提等确定边界、执行计划的途径。目的系统论者持此观点。

(19) 神学系统观——认为系统是由上帝制定的绝对法则。这是原教旨主义各派的观点。

(20) 拓扑学系统观——认为系统主要考虑事物之间的基本联系,而无视其表现的形态、形状和状态。这种观点与一般系统世界观大体一致。作用与过程论的支持者和某些控制论专家持此观点。

3. 西方主要系统流派

在系统运动中,西方出现了许多不同的系统流派。限于篇幅,这里仅列出影响较大的主要流派。

(1) 以麦萨罗维克(M. Mesorovic)为代表的数学系统学派。

(2) 以霍尔(Arthur D. Hall)等为代表的系统分析学派。

(3) 以阿考夫(Russell L. Ackoff)为代表的运筹学派。

(4) 特洛卡勒(Len Trocale)创立的耦合命题学派。

(5) 福雷斯特(Jay W. Forrester)创立的系统动力学学派。

(6) 以奥杜姆(Howard T. Odum)为代表的系统生态学派。

(7) 以比尔(Stafford Beer)为代表的活力系统学派。

(8) 以亚伯拉罕(Ralph Abraham)为代表的动态系统学派。

(9) 以维纳(Norbert Weiner)为代表的伺服控制学派。

(10) 以特琴(Valentin Turchin)为代表的超越系统跃变学派。

(11) 米特琴(James Grier Miller)创立的“生命系统”派。

(12) 贝塔朗菲创立的一般系统学派。

(13) 以科宁(Peter A. Corning)为代表的协作系统学派。

(14) 以弗拉德(Robert Flood)为代表的总系统干预学派。

(15) 以沃菲尔德等为代表的多态系统干预派。

(16) 以明杰斯(John Mingers)为代表的多方法论派。

(17) 帕斯加(Gordon Pask)创立的辩证系统学派。

(18) 以英斯蒂托德(Santa Fe. Institute)为代表的复杂适应系统派。

- (19) 以阿考夫(Russell L. Ackoff)为代表的交互作用规划派。
- (20) 以切柯兰德(Peter Checkland)为代表的软系统方法论学派。
- (21) 杰克逊(Michael C. Jackson)创立的临界系统思维学派。
- (22) 以贾罗斯(Gyuri Jaros)为代表的目的系统学派。
- (23) 系统发展与系统工程学派。
- (24) 以邓肯(Daniel Duncan)为代表的组织设计派。
- (25) 由丘奇曼(West Churchman)创立的探索系统学派。
- (26) 以巴内西(Bela H. Banathy)为代表的学习系统派。
- (27) 以尼尔森(Harold Nelson)为代表的全系统设计派。
- (28) 以范吉克(John P. Van Gigch)为代表的超越系统建模派。
- (29) 以拉兹洛(Ervin Laszlo)为代表的横断学科统一论学派。
- (30) 以萨比利(Hector Sabelli)为代表的过程系统派。
- (31) 以特利斯特(Eric Trist)等为代表的评价系统与社会生态学派。
- (32) 以维因伯格(Gerald Weinberg)为代表的一般系统思维派。
- (33) 以福雷斯特(Heinz von Forester)为代表的(二阶)社会控制学派。
- (34) 以艾伦(Peter Allen)为代表的复杂系统进化论派。
- (35) 以麦克尼尔(Donald H. McNeil)为代表的系统逻辑派。
- (36) 普利高津(I. Pringogine)创立的耗散结构理论学派。
- (37) 哈肯(Hermann Haken)创立的协同论学派。
- (38) 托姆(R. Thom)创立的突变论学派。

4. 中国的系统科学研究与应用

20 世纪 50 年代中期,钱学森和许国志把运筹学从西方带到中国,他们在中国科学院力学研究所组建了我国最早的运筹学教研组。此后,钱学森又开创并领导了我国的国防系统分析研究工作。50 年代末期,我国科学家开始将运筹学应用于国民经济发展。华罗庚从运筹学方法中提炼出可直接用来解决系统管理、优化问题的“优选法”和“统筹法”。他带领一批青年科学家在全国范围内推广“双法”,指导工农业生产实践,取得了巨大的社会效益和经济效益,同时还总结出“图上作业法”、“打麦场设计法”等我国独特的系统科学方法。

20 世纪 70 年代,在钱学森、宋健、许国志等的大力倡导下,我国出现了新的系统科学研究热潮。一批在数学、工程、经济等领域有影响的专家率先转入系统科学研究。到 80 年代,中国科学院及有关部委相继组建了系统科学或系统工程研究所,不少高等学校如清华大学、天津大学、西安交通大学、上海交通大学、华中理工大学、哈尔滨工业大学、大连理工大学等设置了系统工程或管理工程专业,建立了研究机构,并开始招收和培养系统工程、管理工程专业的本科生、硕士生和博士生。同时,组建了中国系统工程学会、中国优选法统筹法与经济数学研究会、中国未来学会、中国科学学与科技政策研究会、中国自然辩证法研究会等学术团体。系统科学思想和系统工程方法应用于我国各级管理决策、发展战略、区域规划及重大建设工程项目的论证,取得了一批重要成果。如“国家 12 个重要领

域技术政策”的制定,参加单位有 670 个,动员了 3500 多位各个领域的专家,历时 6 年完成,并于 1986 年 5 月 24 日,由国务院颁布实施。“2000 年的中国”、“世界新技术革命及对策”、“国家经济发展战略”等许多系统科学应用成果,都对我国的发展产生了积极的影响。在中国导弹和航天等复杂系统的规划、研究、设计、制造、试验、运行过程中,系统工程方法得到广泛的应用。中国的系统科学方法论研究也有较大的发展,其中包括运筹学、系统工程和软系统方法论等。华罗庚提出的解决国民经济大范围优化问题的“产综正特征矢量法”,钱学森提出的“综合集成方法”,都极大地丰富了系统科学方法论。20 世纪 70 年代末 80 年代初,中国学者创立了一批系统科学新学科,其中邓聚龙创立的“灰色系统理论”、吴学谋提出的“泛系理论”和蔡文创立的“物元分析”,都在国际上产生了一定影响。尤其是“灰色系统理论”,不但思想是全新的,而且以其能够解决各领域科研、生产实际问题的独特方法,获得大范围的推广和应用,并为国际系统科学界所接受。

1.1.3 系统的定义、特性与分类

1. 系统的定义

基于不同的系统观,不同的系统流派对系统的解释和定义也不完全相同。我们参照《中国大百科全书·自动控制与系统工程卷》的解释,给出本书的系统定义如下。

定义 1.1 系统是由若干相互联系、相互制约、相互依存的部分构成的具有特定功能的有机整体。

例 1.1 波音飞机公司民航客户服务系统(图 1.1)。

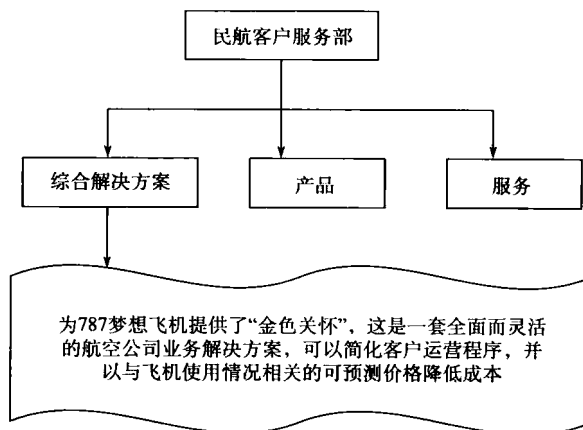


图 1.1 波音飞机民航客户服务系统示意图

在波音飞机民航客户服务系统中,各部门之间相对独立,同时又在民航客户服务部的协调下密切配合,为客户提供综合解决方案,实现客户和公司利益的最大化。在某种意义上可以说,正是一流的客户服务,为波音公司赢得了稳定的全球市场。

例 1.2 闭环控制系统(图 1.2)。

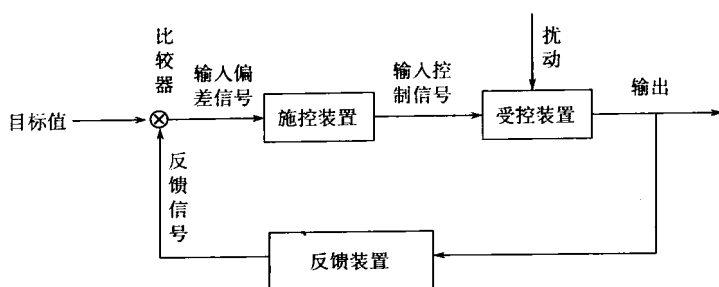


图 1.2 闭环控制系统

闭环控制系统通过输入以及输出的回输共同作用来实现控制。其突出特点是抗干扰能力强,其输出能够始终围绕预定目标摆动。因此,闭环控制系统具有某种稳定性。

再如区域城市社会经济系统、技术创新系统、武器装备系统、军事指挥系统、战场信息系统、企业组织系统、流域生态系统等,都是由若干相互联系、相互制约、相互依存的部分构成的具有特定功能的有机整体。

2. 系统的特性

1) 整体性

“整体大于部分之和”。整体性(wholeness)是系统存在的基石。系统不是其组成部分的简单叠加或拼盘。单个要素或组成部分不能独立于系统之外。比如单独一个施控装置或受控装置,如果不被整合到一个控制系统中就不可能发挥其应有的功能。单独的服务机构完全独立于波音飞机公司民航客户服务系统之外也难以找到用武之地。由成千上万个零部件组装起来的飞机能够翱翔蓝天,拆开的零部件却飞不起来。孤立的组成部分及其简单叠加或拼盘原本没有的某些特性,组成系统后整体涌现(whole emergence)出来了,表明系统整体与其组成部分相比有了本质性的提升和飞跃。

系统的整体涌现性是其各组成部分之间相互联系、相互制约、相互依存而产生的组织相干效应。由科学家群体组成的研究团队通过分工协作能够产生巨大的团队效应。分工与协作随着社会化大生产的形成而出现,人类社会实践证明其具有推动生产效率不断提高的涌现性。现代科学技术在高度分化的基础上高度综合的大趋势,使得创新活动的集成化程度大大提高,创新项目的规模越来越大,过去那种以单兵作战为主的个体创新已经难以适应现代科技发展的需要。大规模集成创新和大兵团作战必须进行合理分工和高效协作。合理分工使每一个成员能够全身心地投入某一特定的专门领域,较快地完成知识、经验、技能的积累,创新效率迅速提高。团队成员之间的通力合作可以使每一个个体在知识、经验、技能等方面的缺陷或不足得到有效弥补,共同完成任何单个体所难以胜任的创新任务。这是研究团队整体涌现性的产物。

当然,系统的整体涌现性并不总是表现为正效应。不合理的组织结构可能产生负面效应,使整体小于部分之和。人们常说的组织“内耗”就是典型的负效应。再如经济全球化在为人类造福的同时也使爆发全球金融危机的风险大大增加,1997年发生的亚洲金融危机和2008年由美国次贷危机引发的全球金融风暴都是全球经济一体化“涌现”出来的

负效应。

系统科学就是关于整体性的科学。研究系统整体涌现性发生的条件、机制和演化规律,利用系统的这一特性为人类造福是系统科学的首要任务。

2) 层次性

由若干相互联系、相互制约、相互依存的组成部分构成的系统具有层次性。直接由要素(组成部分)构成的系统是最简单的系统。如果系统的组成部分又由若干次级要素构成,这样的组成部分就成为系统与要素之间的中间层次,通常称为子系统。复杂系统往往由多层子系统按照一定的空间结构构成,层次结构是复杂系统的基本特性。

高层次系统(子系统)包含低层次子系统并支配低层次子系统的行为,低层次子系统隶属于高层次系统(子系统)并对高层次系统(子系统)起支撑作用。

一个系统可以划分为多少不同的层次?每个层次都包含哪些不同的子系统(要素)?系统的不同层次之间有何本质区别?高层次与低层次如何衔接?低层次到高层次怎样过渡?同一层次或不同层次的子系统(要素)之间如何相互联系、相互影响、相互作用?这些都是系统分析要回答的问题。

3) 相关性

组成系统的各子系统(要素)之间是相互联系、相互影响、相互作用的,子系统(要素)之间相互联系、相互影响、相互作用的方式及其演变规律决定了系统的特性。

如在农业生产系统中,作物的播种面积、种子、化肥、灌溉和劳动力技术水平、自然环境、气候条件、市场行情等要素之间的联系及其对产量、产值的影响;生物防治系统中害虫与其天敌、害虫与饵料、天敌与饵料、某一天敌与别的天敌、某一害虫与别的害虫之间的关系等对生物防治效果的影响;在价格体系的调整或改革中,常常需要掌握民众心理承受力的信息,以及某些商品价格变动对其他商品价格影响的确切信息;在证券市场上,即使最高明的系统分析人员也难以稳操胜券,因为人们难以准确测算金融政策、利率政策、企业改革、政治风云和国际市场变化及某些板块价格波动对其他板块的影响的确切信息。

研究子系统(要素)之间相互联系、相互影响、相互作用的机制,根据系统整体目标协调子系统(要素)行为,是提高系统整体运行效率的需要。

3. 系统的分类

按照不同的研究视角和立足点,可以将系统划分为不同的类别。

根据层次结构的复杂程度,可以将系统分为简单系统和复杂系统。

定义 1.2 直接由要素构成的两层次系统称为简单系统;由多层子系统按照一定的空间结构构成的系统称为复杂系统。

按照状态变量随时间变化的特性,可以将系统分为静态系统和动态系统。

定义 1.3 状态变量随时间变化的系统称为动态系统,否则称为静态系统。

动态系统的状态变量与时间因素有关,静态系统的状态变量则不含时间因素。通常我们所研究的系统都是随时间变化的动态系统。在状态变量变化相对平稳的情形下,有时为简化起见而将动态系统近似地看作静态系统。

按照时间和状态变量的取值特性,可以将系统分为连续系统、离散系统或混合系统。

定义 1.4 状态变量随时间连续变化的系统称为连续系统;时间变量和状态变量均只取有限个或可数个可能值的系统称为离散系统;兼具连续和离散成分的系统称为混合系统。

本书第4章和第5章将分别介绍连续系统和离散事件系统的建模与仿真技术。

按照系统要素之间关系或模型的形式,可以将系统分为线性系统和非线性系统。

定义 1.5 要素之间的关系能够用线性数学模型描述的系统称为线性系统,否则称为非线性系统。

基于系统与环境之间的关系,还可以将系统分为封闭系统和开放系统。

定义 1.6 与环境之间存在物质、能量或信息交换的系统称为开放系统,否则称为封闭系统。

开放系统是有生命力的活的系统,具有自适应、自调节能力,能够通过调整系统内部子系统的行为和作用方式适应环境变化。封闭系统的边界完全封闭,与环境之间没有任何物质、能量或信息交换发生。内部要素或子系统之间保持均衡关系是封闭系统能够持续运行的基本条件。封闭系统的内部均衡关系一旦破坏,往往难以修复。人们所研究的系统一般都与环境之间存在一定的物质、能量或信息交换,因此都是开放系统。当系统与环境之间的物质、能量或信息交换十分有限时,可以近似地将其视为封闭系统。

1.2 系统建模

1.2.1 模型

系统模型是对系统特性与变化规律的抽象描述。模型作为实际系统的替代物或模仿品,通常借助文字、符号、图表、实物或数学表达式等提供关于系统要素、要素间关系以及系统特性或变化规律等方面的知识和信息,是人们赖以研究系统、认识系统的重要手段或工具。

系统模型通常分为物理模型、概念模型和数学模型三类。

1. 物理模型

定义 1.7 以实物或图形直观地表达对象特征所得的模型称为物理模型。

物理模型是根据一定的规则对系统进行简化、描绘或按照一定比例缩小、放大而得到的仿制品。通常要求物理模型与实物高度相似,能够逼真地描述实物原型。

如风洞实验所用的飞行器外形和船体外形、飞机模拟驾驶系统、人工模拟太空环境以及人工制作或绘制的DNA分子双螺旋结构模型,真核细胞三维结构模型等都是用来描述实物原型的物理模型。在大型水利工程、土木工程项目设计、施工或飞行器、轮船研制过程中,常常要运用物理模型。

2. 概念模型

定义 1.8 对现实世界及其活动进行概念抽象与描述的结果称为概念模型(concep-