

兵器系统工程

魏世孝 编著

729374

国防工业出版社

前 言

系统工程是在当代科学技术高度发展的基础上，迅速成长起来的一门综合性的组织管理技术。正以其考虑问题的全局性，研究方法的科学性，以及应用的广泛性，吸引着越来越多的人去学习它、研究它、应用它。

优化是科学技术永恒的主题，系统工程强调全局（总体）优化。这正是军事科学技术显著特点之一。所以在军事领域，它起步最早，规模最大，成效显著。系统工程在武器装备的研制生产中应用最多，在战场分析、指挥决策、模拟训练、战斗保障、国防经济等方面亦得到广泛应用。

本书宗旨是倡导用系统工程的理论和方法服务于兵器系统工程，并针对兵器系统效能分析的直接需要，介绍有关系统观念（第一章）和系统工程方法（第二、三、四、五、六章）。第七章为综合运用前面几章所介绍知识的范例。由于数学规划、系统仿真、管理信息系统等另设课程，这方面的专著亦多，故未编入。参考教学时间为50~60学时。具有线性代数，概率统计与随机过程初步知识的读者均可阅读。

本书是根据原兵器部第二教材编审委员会火控与系统工程编审小组审定的大纲，在作者以往教材和科研成果基础上写成的。第五章由熊焕新编写。教材已经系统工程专业的本科生、研究生多次应用并作了必要修改补充。书稿由机械委二〇七所研究员级高级工程师刘志伟负责审阅，并提出了许多宝贵意见。本专业教研室同志对本书编写给予了许多支持和帮助，华东工学院绘图室为本书描绘了插图，在此一并致谢。在编写过程中，参考了很多文献专著，特向有关作者深表谢意。

由于系统工程涉及面广，且作者水平所限，书中欠妥和错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

编著者

目 录

第一章 概述	1
§ 1.1 系统观念及其发展	1
§ 1.2 系统	5
§ 1.3 系统工程	8
§ 1.4 系统工程的方法、步骤	12
§ 1.5 兵器系统工程	17
习题一	25
第二章 随机服务系统	27
§ 2.1 随机服务系统概述	27
§ 2.2 到达间隔时间 T 和服务时间 U 的分布	28
§ 2.3 生灭过程	32
§ 2.4 标准的 $M/M/1/\infty$ 系统	36
§ 2.5 $M/M/1/K$ 系统	39
§ 2.6 顾客源有限的 $M/M/1$ 系统	41
§ 2.7 集团防空兵器系统对集群敌机的服务概率	42
§ 2.8 情报指挥 C^3I 系统的服务概率	46
习题二	52
第三章 系统可靠性	54
§ 3.1 可靠性的特征量	55
§ 3.2 无维修系统的可靠性特征量	61
§ 3.3 马尔可夫型可 (计) 维修系统的可靠性特征量	67
§ 3.4 系统可靠性的工程预估法	74
§ 3.5 可靠度分配	78
§ 3.6 小高炮连的系统可靠性	82
习题三	87
第四章 小口径高炮系统的射击效率	89
§ 4.1 命中击毁定律	89
§ 4.2 目标投影面积	92
§ 4.3 射击误差	96
§ 4.4 弱相关误差的近似分解	107
§ 4.5 炮连点射击毁概率	109
§ 4.6 炮连航路 (多次点射) 击毁概率	119
习题四	122
第五章 战斗过程的动态描述	124
§ 5.1 引言	124
§ 5.2 射击流	124
§ 5.3 兰彻斯特第一线性定律	125

§ 5.4 兰彻斯特第二线性定律·····	127
§ 5.5 兰彻斯特平方定律·····	129
§ 5.6 合成军交战时的兰彻斯特方程·····	131
§ 5.7 军备竞赛的动态描述·····	132
第六章 多目标决策 ·····	134
引言·····	134
§ 6.1 基本概念·····	135
§ 6.2 各种意义下的解集·····	138
§ 6.3 效用函数法·····	143
§ 6.4 非劣解法·····	149
§ 6.5 对话法·····	151
§ 6.6 效用函数的收敛性·····	156
§ 6.7 目标函数规范化与权系数的确定·····	158
§ 6.8 多目标决策在管理系统和兵器系统中的应用举例·····	163
习题六·····	180
第七章 高炮团情报指挥系统效能、费用分析 ·····	184
§ 7.1 基本想定·····	184
§ 7.2 效能、费用指标体系·····	184
§ 7.3 系统效能主要数学模型·····	185
§ 7.4 作战效益、损耗费用模型·····	190
参考文献 ·····	192

第一章 概 述

§ 1.1 系统观念及其发展

系统思想 辩证唯物主义认为,物质世界是由无数相互联系、相互依赖、相互制约、相互作用的事物和过程形成的统一整体。辩证唯物主义体现的物质世界普遍联系及其整体性的思想,就是系统思想。

一、系统观发展简史

系统作为一个观念,既不是人类生来就有的,也不是象有些外国人讲的那样,是20世纪40年代突然出现的。系统观念来源于古代人类的实践。系统工程作为一门科学技术,它是千百年来人类生产实践活动的总结之一。

古代系统思想及应用范例 古代朴素的系统思想,早在公元前几世纪在我国就已相当完整。在大量古代名著中可以看到不少有关系统思想的火花。《孙子兵法》集当时时代系统思想之大成,全篇充满了系统和辩证的哲学思想。《黄帝内经》、老子的哲学思想中,都有明显的系统观念。在我国悠久的历史上,运用系统思想的成功事例很多。如公元前250年的战国时期,秦国李冰父子带领四川人民修筑伟大的都江堰,包括“鱼嘴”岷江分水工程,“飞沙堰”分洪排沙工程,“宝口瓶”引水灌溉工程等三大主体工程 和 120 多个附属渠堰工程。工程之间的相互关系处理得恰到好处,形成了一个协调运转的总体工程,分导了汹涌澎湃的岷江激流,灌溉川西平原500多万亩农田,沿用至今,成效显著,为形成天府之国作出巨大贡献。

又如北宋真宗时,皇宫失火,大臣丁谓主持修复,其中清理废墟,挖土烧砖,运输建筑材料等工作都很繁重。丁谓采用了一种优化施工方案,在皇宫前的大街上,挖沟取土烧砖,解决了就近取土问题;再放水入沟,用船运输材料,解决了困难的运输问题;竣工后再将废砖碎瓦回填,修复大街,解决了废墟清理问题。这种一举三得的施工方案,是一种有效的全局优化的系统工程方法的应用。

在国外,古代思想家中,具有朴素系统思想的也不乏其人,如有名的古希腊哲学家亚里士多德(公元前460—370年)就说过:“世界是包括一切的整体”,他还提出“整体大于部分简单之和”的著名论点。直至今日,这一论点仍为现代系统科学工作者广泛运用。可用符号语言将它表述为

$$1 + 1 \geq 2$$

若系统内部不协调,互相扯皮,内耗很大,则总体效益可能小于部分效益之和,形成“三个和尚没水吃”的困境,系统工程研究的宗旨和组织管理者的责任,就在于如何合理组织协调各组成部分的关系,以寻求系统综合效益大于部分之和。

近代系统科学的发展 现代工业和科学技术对于系统思想的发展是有重大贡献的。第一个贡献在于使系统思想、方法定量化,使它成为一套具有数学理论,又能处理各种

物理系统或事理系统复杂实际问题的科学方法。第二个贡献在于为量化(或定性定量相结合的)系统思想方法的实际应用提供了强有力的信息处理工具——电子数字计算机。所以,有人把系统工程和计算机的密切关系比喻成形与影的关系。这两大贡献都是在20世纪中期实现的。当实际问题取得了数学表达形式和有了先进的计算工具后,系统思想方法就从一种哲学思维发展成为一大门类科学技术了。

系统工程作为一门科学技术,还是在本世纪中期,经过二次大战的推动,以及战后经济和尖端技术大发展的促进下迅速发展起来的。它萌芽于1930年,美国兰德公司在发展电视广播过程中,初步形成了“系统观点”及“系统化处理”。贝尔电话公司在四十年代初期,首先采用“系统工程”这一名词。1957年,H.Goode和R.E.Machol,在美国出版了第一本以《系统工程学》为题的书籍。一般把1969年登月成功的阿波罗工程时期称为系统工程发展的全盛时期,该工程的成功引起了世界各国对系统工程的极大兴趣。1969年7月21日,美国成功发射“阿波罗”飞船,首先载人登月。这是一个规模十分庞大的工程,其总目标是“在60年代末将人送上月球”。共投入资金244亿美元,有120多个大学和科研机构的42万多科技人员参加,由国内外两万多个公司(工厂)分别承制七百多万个零部件,而这些零部件都要按规定日期集中到肯尼迪宇航中心进行组装。从1961年5月起,经过九年多的努力,圆满实现了计划的总目标。这个庞大的载人登月计划得以成功,关键在于整个工程的组织、管理和实施过程中,采用了系统工程方法。正如类似庞大的“哈曼顿”计划的总指挥韦伯所讲,象这样庞大复杂的计划,任何一个天才的指挥都是无法胜任的,只有靠系统工程来实现其组织指挥。

70年代开始,系统工程又大量渗透到管理领域,特别在经济管理方面影响最大。美国从1964年起,每年都召开系统工程年会。到1974年,已经有40多所大学,设有系统工程系或课程。进入80年代,随着计算机技术的发展,还在进一步向社会生活的各个领域渗透,所以有人说:“80年代将是系统的时代”。

国内系统科学的发展 我国最早有系统、有组织地应用系统工程是从60年代初开始的。当时一些导弹研制部门和其它一些军工部门成立了总体设计部,负责导弹(其它军品)的预研、研制、生产、试验和运用的组织管理工作,同时使用了计划协调技术等一些系统工程方法。而它的几个重要支柱如运筹学、控制论、管理科学和信息论等在我国发展的历史,却要追溯到50年代和60年代。但是,更大规模的研究和应用系统工程是从70年代中期才开始的。70年代中期,我国部分专家已注意到系统科学在我国发展的前途,在各种场合进行了宣传,其中以钱学森等1978年9月在文汇报上发表的《组织管理的技术——系统工程》^[1]文章影响最大。在这前后,教育部、航空学会、自动化学会、管理现代化研究会等,也召开了一系列系统工程方面的会议,在系统工程的宣传、推广和队伍组织方面都做了很好的准备工作。1980年11月中国系统工程学会正式成立,迄至1984年,已先后成立了军事、社会经济、模糊数学和模糊系统、系统理论等专业委员会,各部门和地方学会也纷纷成立,其中,中国兵工学会兵器系统工程学会亦于1986年正式成立,其它兄弟学会中设立工程专业委员会的也不少。除了学会组织外,截至1984年6月止,从事系统工程研究的单位全国将近180个,有关研究工作者已达3000人。近年来又出现了一些新动向:一是国家的军、政、科研、教育等部门纷纷成立相应机构,这将为系统工程的应用和研究走向正规化打下良好的基础;二是地方上县一级机构以及地

方科协一些单位对系统工程的应用和推广很感兴趣，这将为未来应用的群众化打下良好的基础；三是受到系统工程训练的队伍日益壮大，我国一些大学成立了系统工程或有关专业的系、所、教研室，开设了系统工程专业课程，培养出了一批本科生，硕士、博士研究生，将为有专业训练的系统工程专家队伍打下良好的基础。

显然，领导的支持是我们的有利条件，1983年3月赵紫阳总理指出：“现在的问题是要用系统工程的方法，全面统筹，综合论证。”还有一些中央领导，就系统工程的应用作了不少重要指示，既鼓舞了我国系统工程工作者，也促使了一些部门要求应用系统工程。当前，我国进行的改革就是一大社会系统工程。

由此显见，系统工程正以其考虑问题的全局性，研究方法的科学性，以及它应用的广泛性，吸引着越来越多的人去学习它，研究它和应用它。但是，有些领导想把系统工程作为改进管理的唯一手段，所以系统工程专家需要提醒人们，系统工程同样有其局限性，它只是改进管理的重要手段之一，而不能包打天下。

二、系统科学体系正在发展形成过程中

其实，无产阶级的革命导师恩格斯，早在1886年就对系统观念作了精辟的论述。恩格斯在《路德维希·费尔巴哈和德国古典哲学的终结》一文中就曾指出：“旧的研究方法和思维方法，黑格尔称之为‘形而上学’的方法，主要是把事物当作一成不变的东西去研究，它的残余还牢牢地盘据在人们的头脑中，这种方法在当时是有重大的历史根据的，必须先研究事物，而后才能研究过程。必须先知道一个事物是什么，而后才能觉察这个事物中所发生的变化。自然科学中的情形正是这样。认为事物是既成的东西的旧形而上学，是从那种把生物和非生物当做既成事物来研究的自然科学中产生的。而当这种研究已经进展到可以向前迈出决定性的一步，即可以过渡到系统地研究这些事物在自然界本身中所发生的变化的时候，在哲学领域内也就响起了旧形而上学的丧钟。”^①恩格斯还把这一认识上的飞跃称为：“一个伟大的基本思想，即认为世界不是一成不变的事物的集合体，而是过程的集合体，……”^②这里，恩格斯所讲的过程的集合体，正阐明了系统的哲学观念，它说明了系统中各个组成部分的相互作用和整体的发展变化。现代科学技术使这一系统观念具体化了，并且提供了分析系统的理论、方法和工具，正在发展形成完整的系统科学体系。

象科学按所研究系统的具体形式划分为物理学（狭义的）、化学、生物学、社会学等一样，还可按研究方法将科学划分为两大部门。这就是简单系统理论和复杂系统理论，前者是应用物理主义方法论的广义物理学，后者则是应用系统方法论的系统学。19世纪出现的近代科学标志着科学发展史上的一场革命，其特点就是：彻底抛弃了古代科学中的目的范畴；强调把数学方法与实验方法结合起来；并广泛采用还原论作为方法论。近代科学在研究简单系统的运动方面取得了重大成就，但在复杂系统提出的各种问题面前却无能为力。系统学的研究对象是复杂系统，它要揭示复杂系统的客观规律。系统学是系统科学的基础科学，它在系统科学中的地位就象物理学在自然科学中的地位相当^{〔21〕}。

① 引自《马克思恩格斯选集》第四卷第240~241页。

② 引自《马克思恩格斯选集》第四卷第239~240页。

从方法论的角度来看,系统学与广义物理学有显著区别:

1. 思辩原则代替实验原则

从物理主义的观点来看,传统的自然科学可以分成经验(实验)和理论(数学)这两个部门,然而系统学却彻底地改变了关于这两个传统部门的观点。马克思曾经指出,当研究这样的复杂系统时,“既不能用显微镜,也不能用化学试剂。两者都必须用抽象力来代替。”[●] 为了分析研究复杂系统,传统意义下的实验员的作用是由在电子计算机上模拟这些对象的数学家来完成的,而理论家的作用则是由精通被研究对象并能解释计算机模拟结果的经验家来完成的。

这类思辩实验之所以需要,不是由于实验设备不完善,而是由于复杂系统进行经典意义下的实验是不可能的。如生物圈、社会、经济等系统,它们在空间上广阔无限,在时间上漫漫长河,而结构极其错综复杂,并有人类的重要影响。又因为还原论不适用于复杂系统,所以不能用对系统的局部实验来代替对整个系统的实验。

2. 整体论代替还原论

物理主义的基本原则之一就是还原论。还原论指出,研究整体时先将整体分解(还原)成诸部分,然后研究诸部分的性质,就可以确定整体的性质。复杂系统与简单系统的一个重要区别就在于,它不遵从还原论。

3. 目的论代替因果论

物理主义建立在自然定律基础上。这些因果定律是由对简单系统进行大量实验的结果中总结出来的,并且通常表述为简单的数学关系。因此,为了推翻某一定律,只要有一个不符合该定律的实验事实就足够说明问题。近代科学发现的还只是自然界的一些简单的自然定律,这是由于简单系统的仿真模型与系统本身相符。但是复杂系统却不一样,因为复杂系统中至少包含一个决策系统作为子系统,它必然涉及人、社会的影响,它的许多特性是互相关联的,因而反映系统个别特性的模型与系统本身是不相符的,或者是不完全能建立系统模型的。这就出现了一个问题:系统学的定律是什么?苏联学者B.C. 佛列依斯曼认为,只有作出关于复杂系统目的性行为的假定,才有可能对复杂系统进行简单的解释,从而得到用数学形式表述的定律。

系统论——亦称系统观,是系统学到马克思主义哲学的过渡。系统工程学、运筹学、控制论、信息论等技术科学,和系统工程这一大门类工程技术,就构成了一个完整的系统科学体系。其中的许多领域,仍处于创立、形成、发展和应用的不同阶段中。

三、系统观发展过程综述

建立在古代生产实践基础上的古中国和古希腊等朴素的唯物主义自然观,以抽象的思辩原则来代替自然现象的客观联系;近代自然科学的兴起,由此产生了形而上学的自然观,把自然界看成彼此隔离、彼此孤立、彼此不相依赖的静止的堆积;十九世纪自然科学的成就,以及建立在这一成就基础上的辩证唯物主义自然观,以实验材料来说明自然界是有内部联系的、运动变化的统一整体;20世纪中期现代科学技术的大发展,为系统思维提供的定量方法和计算工具,就迅速发展成为系统科学。这就是系统思想如何从

● 引自《马克思恩格斯全集》,第二十三卷,第8页,人民出版社,1972年。

经验到哲学到科学，如何从思辨到定性到定量的大致发展过程。简述于表1-1。

表1-1 系统观念发展过程

时 代	唯物主义阶段	系统观念阶段
古 代	朴素自然观	经验（思辨）
近 代	形而上学	哲学（定性）
19世纪前期	辩证法	哲学（定性）
20世纪中期	辩证法（+ 运筹学 + 计算机 + ...）	系统科学（定量）

系统思想是进行分析与综合的思维工具，它在辩证唯物主义那里取得了哲学的表达形式，在系统科学体系里取得了定量的表达形式，在系统工程里获得了丰富的实践内容。系统科学与唯物辩证法之间的关系似乎只有定量与定性之别。定量的描述和分析法是以定性的原则为根据的，但定量分析的展开势必比定性的原则性的概括在内容上更丰富、更生动，也更具体。随着系统科学的发展，也可能从中抽象出某些新的哲学结论，局部或个别地丰富和发展辩证唯物论的体系，但不能超越其目前的定性前提的总范围。所以系统论最早的提出者，美籍奥地利学者贝塔朗非就指出：“虽然起源有所不同，普遍系统论的原理和辩证唯物论的类同是显而易见的。”^①美国麦奎里和安贝吉在其《马克思和现代系统论》里说过：“马克思确实可以看作是一位早期的系统论者。他的理论工作的主要部分都可以看作是富有成果的现代系统方法研究的先声。”波兰的希通卡、苏联的勃劳别尔格等也先后指出，“可以把马克思称为社会科学中现代系统论方法的始祖”，并称他“是解决具体认识问题过程中体现系统思想的第一个典范”，而“《资本论》乃是体现系统性原理的第一部科学著作”。

§1.2 系 统

一、系统的概念

系统指的是由相互作用和相互依赖的若干组成部分（要素）结合而成的具有特定功能的有机整体。L.V.贝塔朗非把系统定义为“相互作用的诸要素的综合体”。广义地可以认为客观世界都是系统。

一般系统与具体系统 “一般系统”是从各种现实系统中抽去特殊内容的共性系统，即指“系统”本身。而含有实际内容的各种现实系统，都叫具体系统。一般系统体现各种现实系统的共性，而具体系统则是一般系统的各种表现形式，它除了具有一般属性外，还具有各种特殊属性。

系统的结构和功能 系统是结构和功能（行为）的统一，是由结构和行为决定的，结构和行为就象物理学中的空间和时间一样，是一种极为基础的概念。结构是诸要素的秩序，可理解为对系统要素间的联系在时间上不变的规定。系统结构随时间的变化可看作是系统的演化，结构与要素具有相对独立性，从而结构具有等级性。系统的行为可理解为系统随时间的动作，而功能是诸要素活动的秩序。功能与要素活动具有相对独立性，

① 引自社任之：“现代西方著名哲学家述评”，第482页。

从而功能亦具有等级性。结构等级与功能等级辩证地统一成为系统等级。系统的等级性乃是一般系统的基本性质之一。

子系统—系统—超系统 原则上,系统可分成无穷多个等级(层次),为避免混乱,向下的等级序列,称子系统序列,即系统→第1级子系统→第2级子系统→…→第*n*级子系统→要素;向上的等级序列称超系统序列,即系统→第1级超系统→…→第*n*级超系统→总系统。要素为当所研究系统不能或不必要再细分的基本单元(子系统)。总系统是指所考虑问题不能或不必要再与其它系统结合构成更大系统的总体系统。一般系统工程问题*n*取1到2级亦就可以了。

子系统与分系统 系统也可以定义为抽象集上的关系,即

$$S \subset X \{V_i | i \in I\}$$

其中*S*为系统,*X*表示笛卡尔积,*V_i*表示诸关系,*I*为指标集。由此定义,可得分系统概念。所谓分系统,是指系统的各子系统(要素)在某些侧面具有重要意义的某些关系组成的系统。例如大学的分院、系、教研室、教师为大学的各级子系统(要素),而教学、科研、人事、总务,生产等部门为其分系统。

复杂系统与简单系统 B.C.佛列依斯曼根据现实系统的行为复杂程度,把各种系统分为自动系统、决策系统、自组织系统、预见系统和转换系统。把自动系统看作简单系统,如太阳系,原子,钟表等。其余系统看作是复杂系统。亦有人称包含决策子系统的系统为复杂系统。如涉及人的决策行为的社会、经济、管理系统都属复杂系统。

二、系统的基本性质^[2]

1. 整体性

亦称系统性,通常表述为“整体大于部分之和”。其实质是指系统的质(属性数目)不同于要素的质(属性数目)或各要素的质(属性数目)的简单相加,系统还有它自身的属性或特性。但对于系统的某一具体属性来说,由于要素间的不同关联情况,则系统的某一具体效能可能出现大于、等于或小于要素该属性和的不同情况。这种不同的组织效果,反映各系统不同的组织管理效能。系统观念特别强调整体(全局)观念,这是系统观念的精髓。寻求系统全局优化、综合效益,是组织管理工作的主要目的。

2. 等级性

亦称层次性。由于客观世界的层次结构,某个系统本身既是它所从属的一个更大系统(称超系统)的组成部分,而该系统的要素(称子系统)本身又是一个具有诸要素的系统,无论在系统结构和功能方面都具有层次性。如图1-1所示的地面高炮防空武器系统,从研究该武器系统的有效性这个目的来说,它的结构层次性可分为,地面防空总系统→地面高炮防空武器系统→第1级子系统(火控、火力子系统)→要素(火控子系统的要素有雷达、测距机、指挥仪等,火力系统的要素有高射炮、弹、药、引信等)。

它的功能层次性可分为,地面防空效能→地面高炮防空武器系统的有效性→第一级子效能(系统可靠性,系统维修性)→功能要素(分别为各结构要素的可靠性、维修性等)。

3. 稳定性

这是一个系统作为本身存在的本质特性。稳定性是指系统的结构和功能在外界环境干扰作用下的恒定性,亦即系统的输入输出关系或系统状态或状态序列在干扰作用下的

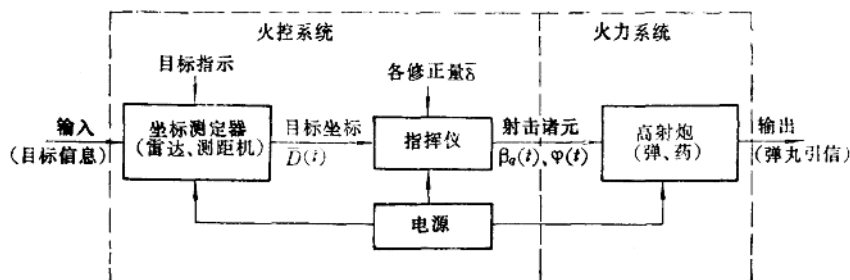


图1-1 地面高炮防空武器系统框图

 $\bar{D}(t)$ —距离向量; $\beta_q(t)$ —未来方位角; $\varphi(t)$ —射角。

恒定性。

4. 历时性

任何系统的要素及它们之间的相互关系都不是一成不变的，而是随着时间的推移而变化，当这些变化达到一定程度时就发生旧系统的瓦解和新系统的建立。

5. 适应性

系统随环境的变化而改变其结构和功能以适应其环境的能力，叫做适应性。系统的适应性或者由稳定性体现，或者由可靠性体现，或者由稳定性和可靠性共同体现。系统总是存在于一定环境之中，必须适应环境而生存，并与环境不断进行物质、能量、信息的交换，亦不断受到环境的影响和干扰。

三、系统的分类

通常将千差万别的各种系统按不同属性分类如表1-2。系统工程研究的对象大多是人造的闭环动态系统。

表1-2 系统分类表

分类标准	名称	含义	特点与相互关系	实例
按自然属性	自然系统	天然形成的系统	1. 自然形成 2. 是人造系统的基础	海洋系统 生态系统
	人造系统	人造或经人改造的系统	1. 人造或经人改造 2. 一般有人参加	武器系统 管理系统
按物质属性	实体系统	由物质实体组成	1. 以硬件为主 2. 以物质产品为主 3. 是概念系统基础	飞机、舰船、坦克、 运河、灌溉系统
	概念系统	由概念、原理、方法、 制度等组成	1. 以软件为主 2. 以软成果为主 3. 为实体系统服务	各种程序、图书、资 料、法律、制度等
按运动属性	静态系统	状态不随时间改变的系统	1. 没有输入与输出 2. 是动态系统的基础	封存的仪器、设备、 车间平面布置
	动态系统	状态随时间改变的系统	1. 有输入、输出及转换过程 2. 需概念系统配合	武器、生产、服务等系统
按反馈属性	开环系统	输出对输入没有直接影 响的系统	1. 没有外反馈 2. 系统性能较低 3. 适应性较差	火炮、火箭武器，程 序控制机床
	闭环系统	输出对输入有直接影响的 系统	1. 有外反馈 2. 适应性强 3. 性能较高	导弹系统，自动控制 系统

§ 1.3 系统工程

一、什么叫工程

工程这个词18世纪在欧洲出现的时候,本来专指作战兵器的制造和执行服务于军事目的的工作。从后一种涵义引伸出一种更为普遍的看法,把服务于特定目的各项工作的总体称为工程。如果就词意来解释,当这个特定的目的是系统的组织建立或者系统的经营管理,就是系统工程,那就显得太包罗万象、广阔无垠了。

二、何谓系统工程

关于系统工程的含义,迄今国内外还没有形成统一的看法。这一方面是由于系统工程的理论和方法,是在工程规划设计、管理、控制这三个领域向纵深发展,并相互渗透,产生了一些共同性的问题需要解决的形势下发展起来的,从事不同专业的人,对系统工程自然会有不同的理解;另一方面是因为系统工程要综合运用新的科学理论与方法,所以很难划清界限。我们先列举一些国外学者的看法,以供参考。

(1)“系统工程是为了更好地达到系统目标,而对系统的构成要素、组织结构、信息流动和控制机构等进行分析与设计的技术”(1967年日本工业标准)。

(2)“系统工程学是应用科学知识设计和制造系统的一门特殊工程学”(1969年美国质量管理学会系统工程委员会)。

(3)“系统工程学是为了合理地开发、设计和运用系统而采用的思想、程序、组织和方法的总称”(1971年日本寺野寿郎)。

(4)“系统工程是一门把已有的科学分支中的知识有效地组合起来用以解决综合性的工程问题的技术”(1974年大英百科全书)。

(5)“系统工程研究的是怎样选择工人和机器最适宜的组合方式以完成特定的目标”(1975年美国百科全书)。

(6)“系统工程是一门研究复杂系统的设计、建立、试验和运行的科学技术”(1976年苏联大百科全书)。

(7)“系统工程与其它工程学不同之点在于它是跨越许多学科的科学,而且是填补这些学科边界空白的一种边缘学科。因为系统工程的目的是研制系统,而系统不仅涉及到工程学的领域,还涉及到社会、经济和政治等领域。为了适当解决这些问题,除了需要某些纵向技术以外,还要有一种技术把它们从横的方向组织起来,这种横向技术就是系统工程。也就是研制系统所需的思想、技术、方法和理论等体系化的总称”(1977年日本三浦武雄)。

(8)日本东京工业大学的市川悖信在《系统工程学》一书中(1979年版)^[23],则用笛卡尔坐标系描述系统科学和系统工程在科学领域中的地位和关系。横坐标描述事物的有序性(或组织程度),原点的左侧表示无序,越往左其无序程度越大;原点的右侧表示有序,越往右表示有序程度增加。纵坐标表示事物的复杂性,原点以上表示事物的复杂程度增加;原点以下,则表示事物趋向简单,越向下越简单。四个象限可作下面的解释:左下象限是属于简单事物,处于无序之中,这类事物一般可用统计概率的方法来解

决：右下象限属简单事物处于有序之中，这类事物既简单而又有序，可以找到规律，自然科学中的单学科属于这类；左上象限的对象既比较复杂，又无秩序，这类事物很难描述，简直可以说是一片混沌。系统工程和系统科学的任务，就是应用系统观点及其各种现代化手段，包括数学方法和计算技术等，来认识清理和组织这些混沌中的事物，使之逐渐地量化，用一般人可以认识的方式表达出来、模拟出来或描述出来，然后根据设想，或该事物的可能情况，构成若干替代方案，进行优化，最后找出最优（或满意）方案。所以系统科学和系统工程是一门致力于把无序的复杂事物，逐渐变成有序化的组织管理科学和技术。

国内学者近年来，对系统工程亦作了一些解释性定义，列举几个有影响的描述如下。

（1）1978年，著名科学家钱学森教授在文汇报上发表文章《组织管理的技术——系统工程》一文中指出：“把极其复杂的研究对象称为系统，即由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合成具有特定功能的有机整体，而且这个系统本身又是它所从属的一个更大系统的组成部分…。‘系统工程’则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科学方法。…是一大门类工程技术。”^[1]

（2）1979年哈尔滨工业大学姚德民在光明日报上发表文章指出：“系统工程学就是系统的观点，信息的理论，控制的基础，现代数学的方法和电子计算机技术，融合和渗透而成的一门综合性管理工程技术。”

（3）1985年上海机械学院朴昌根在《系统工程理论与实践》上发表‘论系统科学体系’文中，给出了形式化定义：“系统工程学=系统方法+运筹学+电子计算机技术。”^[22]

三、解释何谓系统工程的主要异同点

由于系统科学和系统工程是一门新兴的科学技术，目前尚处于发展阶段，还未形成一个统一的定义和解释，从很多书本、辞典和手册上可以列出几百条角度不同而内容大致相似的解释。从上面列出有代表性的解释亦可看出，国内外对何谓系统工程问题有比较一致的看法——系统工程是普遍适用的科学方法；亦存在主要分歧——系统工程属于理论性的学科还是属于实践性的工程技术。

1. 系统工程是普遍适用的科学方法

这类科学方法从时间上贯穿于系统从规划到运行到更新的全过程中。从空间上（如图1-2所示），它既包含在以物质为对象的工程过程（其目的是组织系统）中，亦包含在以资源（人、材、物、信息）为对象的管理过程中。

所以，系统工程是包含在工程过程和管理过程中的共同性的、普遍适用的科学方法，而又不能取代工程和管理自身的各种科学技术。

2. 主要分歧

系统工程属于学科还是属于工程技术？

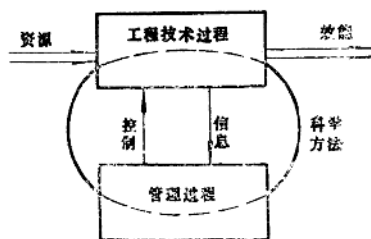


图1-2 系统工程范围

1976年美国科学院邀请一些专家编写了一个报告,讲述了几个颇具实效的案例,但最后对这个报告的命名却产生了分歧,不得不采用妥协性命名“运筹学/系统分析”。英国曾出版《国际系统工程学报》,问世不久,改名为《国际系统分析学报》。我国教育部曾组织专家赴美、日作系统工程专题考查,在1980年4月提出的考查报告中都采用“系统工程或学科”的称谓。

四、当代科学技术体系

钱学森教授的系统科学思想和对系统工程的理解,首先表现在他提出了一个清晰的现代科学技术的体系结构^[41]。如图1-3和图1-4所示。

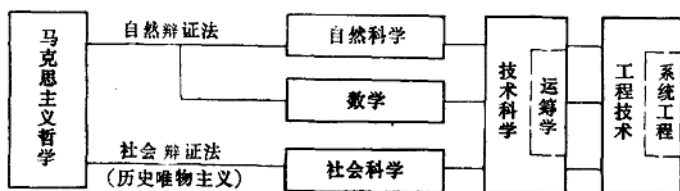


图1-3 科学技术体系框图

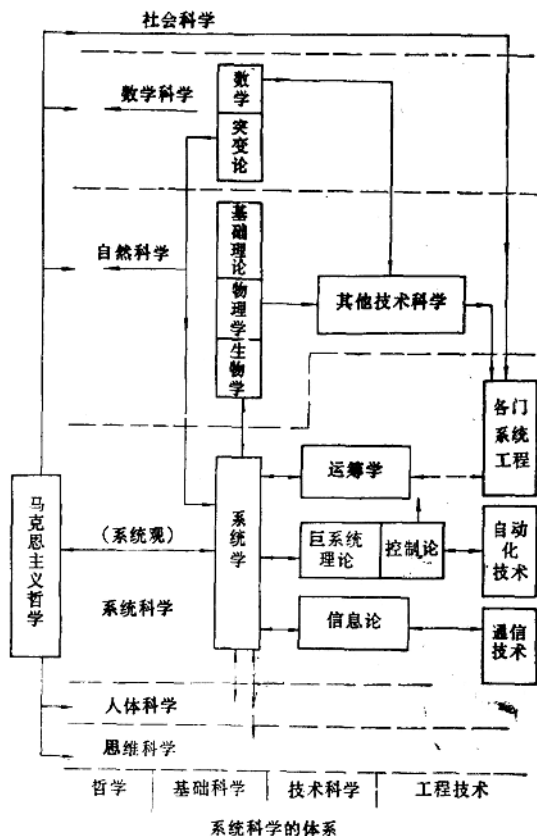


图1-4 当代科学技术体系图

由图1-3、图1-4可见,从应用实践到指导一切的哲学,现代科学技术可以分为四个层次:首先是直接用于改造客观实践的工程技术这一层次;然后是直接为工程技术作理论基础的技术科学(应用科学)这一层次;再就是基础科学这一层次;最后通过进一步综合、提炼达到最高概括的马克思主义哲学。整个科学技术包括社会科学、自然科学、哲学科学、系统科学、思维科学和人体科学这六大部门。钱学森教授还提出了一个清晰的系统科学结构。作为现代科学技术六大部门之一的系统科学,是由系统工程这一大门类工程技术,系统工程的理论基础象运筹学、控制论和信息论这类技术科学,以及系统的基础理论系统学等组成的一个新兴科学技术部门。

科学理论与工程技术的主要区别在于:

- (1) 科学理论有单一的研究领域,而工程技术总是综合应用多种学科的成果;
- (2) 工程技术直接改造客观世界,而科学理论通过指导工程技术间接改造客观世界。

所以,国外称的运筹学(Operations Research,指目的在于增加现有系统效率的分析工作)、管理科学(Management Science,指大企业的经营管理技术)、系统分析(Sestems Analysis,指对若干可供选择的执行特定任务的系统方案进行比较)、费用效果分析(Cost-Effectiveness Analysis,着重在费用效能方面对可供选择的系统方案进行比较)以及系统研究(Systems Research,指拟制新系统的实现程序)等的工程实践内容,均可以用系统的观念统一归入系统工程,而其数学理论和算法,可以统一地看成是运筹学。所以作为技术科学的运筹学,是系统工程的主要的理论基础。

五、系统工程与相关科学的关系

1. 系统工程与运筹学

运筹学中的“运”是运算的意思,“筹”就是筹划。运筹学就是应用数学的方法,来制定一个规划或方案,使得在有利的时候,能取得最大的效果,而在不利的时候,避免可以避免的损失。运筹学的主要分支有规划论,排队论,决策论,对策论,图论,搜索论,库存论等。运筹学是工程学的起源和主要支撑学科。国内外均有人对二者不加区别,如联合国工业发展组织总把它并列为运筹学(OR)/系统工程(SE)。亦有人认为,运筹学处理战术性问题,着重于研究已经存在的系统,而系统工程处理战略性问题,侧重于分析、设计和控制未来的系统。英国曾规定,国防部以上的分析为系统分析,军兵种以下的则称运筹学。运筹学仅仅用定量分析,而系统工程既用定量分析,也用定性分析。钱学森在当代科学技术体系中,明确划分了两者的关系,运筹学属技术(应用)学科层次,系统工程属实践性的工程技术层次,运筹学是系统工程的主要理论基础之一。

2. 系统工程与系统分析

系统分析是进行系统研究的一种方法,它侧重于系统投产、运行前的预先分析研究。常有系统效能、费用分析,系统可行性分析,风险分析,可靠性分析等。它是在选定若干评价准则(多目标或多属性)下,分析系统和诸要素之间的相应功能关系,建立模型,利用定量方法提供可用的数据,借以从可行方案中,选取满意的方案,并推断可能产生的效果,以期寻求对系统整体效益最大的策略。所以系统分析对于系统目标的设定、方

法的选择, 有限资源的最佳调配, 以及行动策略的决定等, 都是有效的工具。国内外亦有人认为系统分析与系统工程无实质性差别, 而不加以区别。

3. 系统工程与现管理科学

管理学是一门社会科学, 是研究管理问题的各个学科的综合。从控制论的角度出发, 管理过程是信息的汇集与处理以及把处理的结果以新的信息 (即决策与指示等形式) 输出的过程。用现代科学技术于这些过程就称为现代管理。当代最新的管理学派是系统理论学派, 即采用系统工程的方法进行组织管理。

4. 系统工程、系统论、系统学和系统科学

根据钱学森对系统科学体系的划分, 系统工程是一门组织管理技术; 系统学是系统科学的基础学科; 系统论亦称系统观, 是系统学到马克思主义哲学的过渡; 系统科学则是包括上面所述的系统论、系统学、运筹学 (还有信息论、控制论、计算机科学等) 和系统工程等的完整科学体系。

§ 1.4 系统工程的方法、步骤

一、霍尔三维方法结构^[8]

自二十世纪六十年代以来, 许多学者对系统工程的方法, 进行了大量的探讨工作。当然, 企图找到能够处理所有问题的一个标准方法的想法是不现实的, 也是不可能的。然而, 总可以找到能适应各种问题的方法思路 (方法结构)。人们曾经提出过许多方法结构, 但影响最大、比较完善的是最早对系统工程命名的贝尔电话公司的霍尔 (A. D. Hall) 提出的三维结构, 如图1-5所示。

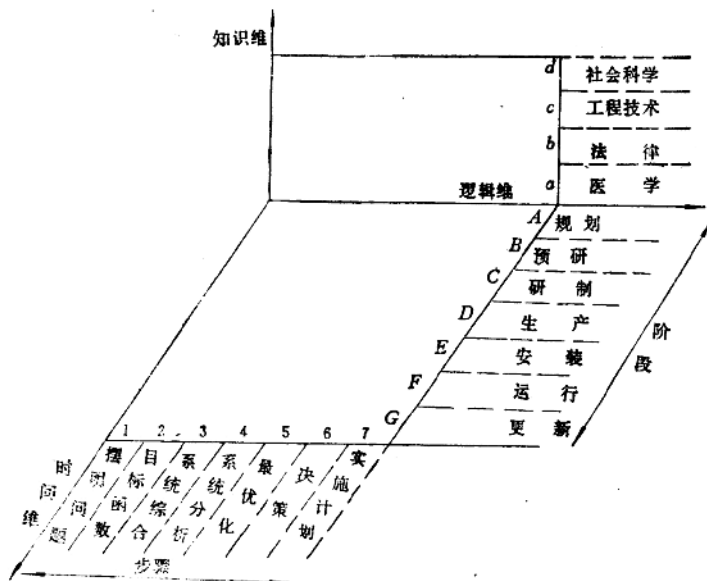


图1-5 霍尔三维结构

霍尔三维结构概括地表示出系统工程的阶段（时间维），步骤（逻辑维）和该阶段该步骤所涉及到的知识范围（知识维）。现分别简述如下。

1. 时间维（工作阶段）

对于一个具体工程，从规划起直到更新止，一般可以分成七个工作阶段。

（1）规划阶段 常分为远景规划，中期规划、短期规划和年度计划。借以制定国家、地区和企事业单位的发展目标、方针、政策、方案和措施等。这在我们计划经济为主的社会主义国家，是尤为重要的影响深远的阶段。

（2）制定方案 根据系统发展的目标要求，和环境资源等约束限制条件，从前人和今人积累的知识和经验中，形成多个可行的方案，经过分析、优化等多种运筹，制定出一个技术上合理、经济上合算、研制周期短、能协调运转的满意方案。

（3）系统开发 通过工程实践实现系统的研制方案。型号研制通常要作出样品，经过试验、试用，完成设计定型或技术鉴定。

（4）系统生产 生产出系统的零部件及整个系统。大批量生产的军工产品，一般还要经过生产定型，才能正式投产。

（5）安装试验 大型复杂的系统才需要在运行场所进行安装试验。

（6）运行阶段 系统为预定的目的服务。

（7）更新阶段 取消旧系统，以新系统代之，或将原系统改进，使之更有效地运行。

2. 逻辑维（工作步骤）

指实施系统工程的每一个阶段所需经历的工作步骤。一般分为七个步骤。

（1）问题定义 即弄清问题的实质。通过尽量全面地搜集有关资料和数据，说明类似问题的历史、现状和未来的趋势，从而为解决目标问题提供可靠的根据。

（2）系统设计 即弄清并提出为解决问题需要达到的目标，并制定出达到目标的标准。也有人概括为“评价系统设计”或“价值系统设计”。

（3）系统综合 把可能入选（满足约束条件）的能够达到预期目标的政策、活动或整个系统，进行概念化、条理化，并组织、综合形成各种备选方案。

（4）系统分析 即通过建立模型等途径，按照达成的目标、解决的问题和满足需求的情况，去加深理解所提出的政策、活动、控制或系统的相互关系、性能及特点。

（5）最优化 即通过建立数学模型、仿真模型，定量分析比较，精心选择备选方案的组成、关系和参数，使其成为满足约束条件和目标要求的最优方案。

（6）决策 从多种可行方案（政策、措施、控制等）中，按照某个或某些目标要求，选择一种（或一些）最优的（满意的）方案（政策、措施、控制等）。

（7）计划实施（或执行下一个阶段） 不断修改完善上述六个步骤，并把它们确定下来，反映到下一阶段的工作计划中，以保证系统工程顺利地进入下一个阶段。

3. 知识维

是指完成上述各阶段、步骤的工作，所需要的各种专业知识和技术素养而言的。亦有人说是系统工程的应用领域^[30]。

当霍尔三维方法结构不纳入知识维时，即成为二维的霍尔结构矩阵，如表1-3所示。