

系统工程及其理论基础

北京信息控制研究所 于景元

摘要 本文在介绍钱学森系统科学体系结构的基础上,着重讨论了系统工程的方法及其理论基础。后者主要是指系统学的建立。这是在钱学森亲自指导下的一个讨论班,关于系统学的研究对象、内容、方法的一些结论介绍。

主题词 系统工程, 系统理论。

1978年,我国著名科学家钱学森等发表了“组织管理的技术——系统工程”一文^[1]。从那以后的短短十年内,系统工程在我国得到了迅速发展。今天,不仅系统工程及其有关理论有了很大进展,取得了许多重大成果,而且对促进科技进步、经济和社会发展都发挥了重要作用。系统工程在国家各部门各单位,从微观到宏观的组织和管理、领导和决策、规划和计划、预测和可行性研究等都得到了广泛应用,并且日益显示出其巨大潜力,因而也越来越引起各级领导、决策部门、学术界以及各行各业人们的广泛注意和高度重视。目前,除了中国系统工程学会外,一些省市还建立了地方学会。在相关的一些学会中,也建立了系统工程专业委员会。有些高等院校设置了系统工程专业,开设了相应的课程。所有这些表明,系统工程及其理论基础已成为我国现代科学技术发展中一个新兴的科学技术部门。这是我国科学技术事业的重大进步,也是我国科学技术水平的明显提高。

国外的系统工程起步较早,但在概念上

很不统一,众说纷纭。在西方,就有系统工程、系统分析和系统研究之说,有的还把运筹学也放在系统工程范畴之内。他们的系统工程是指设计新系统的方法;系统分析系指系统完成给定任务的各种方案选择。如果着眼点放在成本费用方面,则叫做费用效果分析;而系统研究则是指拟制新系统的实现程序;至于运筹学则是研究已有系统如何增加其效率。

我们这里所讲的系统工程,既有和西方系统工程相同之处,也有不同点,是由我国科学家们,首先是钱学森所建立和发展起来的。本文的目的是在介绍钱学森关于系统科学体系结构的基础上,着重说明系统工程的特点、方法及其理论基础。

一、系统与系统科学

系统科学是正在形成和发展的一门新兴科学技术,已成为现代科学技术体系中一个科学技术部门。按照钱学森提出的现代科学技术体系结构,每一科学技术部门都有三个层次^[2],即:

1. 直接改造客观世界的是工程技术;

收稿日期: 1989年4月20日

2. 为工程技术直接提供理论基础的是技术科学；

3. 在技术科学和工程技术的基础上，进一步抽象概括成为认识、揭示客观事物规律的基本理论，就是基础科学。如再进一步概括，就是哲学内容了。

根据这个层次结构，钱学森提出了系统科学的三个层次：处在工程技术层次上的是系统工程；处在技术科学层次上的有控制论、运筹学、信息论等；处在基础科学层次上的是系统学^[3]。而系统科学向哲学的过渡则是系统论或叫系统观（见图1）。

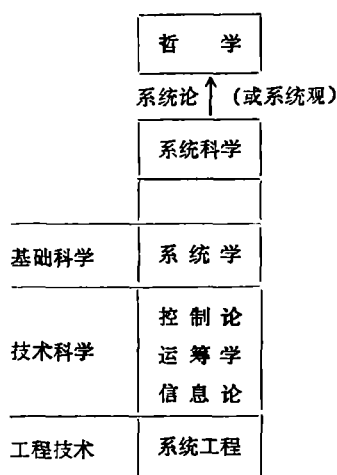


图1 系统科学体系结构

虽然其中有的学科如控制论、运筹学、信息论等都有较长的历史，但就整个体系而言是新的，是近一二十年的事情。其中系统学是正在建立的一门科学。

现代科学技术的发展，已经取得了巨大成就。今天人类正探索着空间尺度从 10^{-15} 厘米到 10^{18} 厘米（即100亿光年）和时间间隔从 10^{-23} 秒到 10^{17} 秒（即100亿年）这样巨大的时空范围内客观世界的奥秘。就整体而言，现代科学技术探索和研究的对象是整个客观世界。但从不同角度、不同观点和不同方法研究客观世界的不同问题时，现代科学技术便产生了不同的科学技术部门。例如，自然科学是从物质运动、物质运动的不同层

次、不同层次之间的关系这个角度来研究客观世界的。而社会科学是从研究人类社会的发展运动、社会内部运动、客观世界对人类社会影响的角度来研究客观世界的。数学科学是从质和量以及它们相互转换的角度来研究客观世界的，等等。系统科学作为现代科学技术体系的一个部门，究竟是从什么样的角度和观点，应用什么样的方法去研究客观世界的？这些问题是和系统及其规律的研究密切联系在一起的。

半个多世纪以来，不同研究领域的科学家们对系统的研究都作出了重要贡献。发表了大量著作和文章。30年代出现了“一般系统论”，40年代出现了“控制论”、“信息论”、“运筹学”、“管理科学”，50年代出现了“工程控制论”、“生物控制论”、“经济控制论”、“社会控制论”、“计量经济学”、“数理经济学”，60年代出现了“现代控制理论”、“模糊数学”、“微分动力体系”、“系统工程”、“系统分析”、“系统生态学”，70年代又出现了“耗散结构理论”、“协同论”、“突变论”、“超循环理论”、“泛系理论”等等。所有这些理论成就都对系统科学的发展起到了积极推动作用。70年代末80年代初，钱学森在总结、概括已有这些研究成果的基础上，从应用系统思想、观点和系统方法去研究客观世界的角度出发，首先提出了系统科学以及上述的系统科学体系层次结构。

因此，系统科学作为一个科学技术部门，不管在哪个层次上，哪一门学科，都是以系统作为研究和应用对象的。既然如此，那么系统又是什么？为此，我们要对系统给以必要的说明。

系统作为一个概念并不是现在才有的，可以追溯到古代。古代人类的实践中，在农业、工程、医药、天文等方面的知识和成就，都在不同程度上反映了朴素的系统概念。甚至在古代中国和希腊的哲学思想中，

就已有了系统思想的萌芽。例如我国春秋末期思想家老子强调自然界的统一性。南宋陈亮(公元1143—1194)的理一分殊思想,称理一为天地万物的理的整体,分殊是这个整体中每一事物的功能,试图从整体角度说明部分与整体的关系。古希腊的赫拉克利特(约公元前460—370),在“论自然界”一书中提出“世界是包括一切的整体”。另一古希腊唯物主义者德谟克利特(约公元前540—480)写过一本“宇宙大系统”的书,可惜没能流传下来。所有这些都是用自发的系统概念考察自然现象,这是古代中国和希腊唯物主义哲学思想的一个特征。

15世纪下半叶,近代科学开始兴起,力学、天文学、物理学、化学、生物学等学科获得了迅速发展。到19世纪上半期,自然科学取得了伟大成就,特别是能量转化、细胞和进化论的发现,使人类对于自然过程相互联系的认识有了很大提高。“由于这三大发现和自然科学的其它巨大进步,我们现在不仅能够指出自然界中各个领域内的过程之间的联系,而且总的说来也能指出各个领域之间的联系了,这样,我们就能够依靠经验自然科学本身所提供的事实,以近乎系统的形式描绘出一幅自然界联系的清晰图画。”^[4]这里,已经清楚地提出了系统的科学概念。20世纪中叶,现代科学技术的发展,极大地推动了对于系统的研究。奥地利理论生物学家彼塔朗非首先提出了以系统为研究对象的一般系统理论。40年代,美国数学家维纳提出了以系统为研究对象的控制论。从此,系统作为科学研究对象进入了科学技术范畴。

目前,国内外关于系统的定义有近百种。从给出系统定义方式上来看,基本上分为两类,一种是描述性定义,另一种是以集合论为基础,采用数学公理化方法定义系统,这主要是以卡尔曼^[5]和米沙洛维奇^[6]为代表的研究工作。本文所采用的系统定义,是钱

学森在文献[1]中提出的描述性定义。这是系统科学范围内的系统定义。

所谓系统是指由互相关联、互相制约、互相作用的一些部分所组成的具有某种功能的总体。这样定义的系统具有一般性、概括性和抽象性。一个系统具有什么样的组成部分,它们是如何互相关联、互相制约、互相作用的,具有什么功能,只有对实际具体系统才能具体化。例如,太阳系是一个系统。它是由太阳和九大行星所组成,通过万有引力互相作用、互相关联和互相制约,使得各个行星在各自轨道上运行,这个系统具有稳定的功能。同样,一个工厂企业是一个系统,人体是一个系统,一个家庭是一个系统,一个国家也是一个系统,等等。

互相关联、互相制约、互相作用的组成部分叫做系统结构。组成部分本身也可能是一个系统,叫做原系统的子系统。而原系统还可能是更大系统的组成部分,从而构成更大系统的子系统,这就是系统概念的相对性。系统、子系统,子系统可能还有子系统,等等,这就是系统的层次结构。不同层次的子系统构成了该系统的垂直结构,而同一层次的各子系统又构成了系统的水平结构。系统各组成部分(或子系统或叫元素)互相关联、相互制约、相互作用,是通过物质、能量和信息形式实现的。任何一个具体系统都是物质的,占有一定的空间并随时间发展而变化。

一个系统以外的部分叫做系统环境。系统和系统环境的分界叫做系统边界。我们研究具体系统时,必须明确系统边界。

系统对其环境的作用叫做系统输出,环境对系统的作用叫做系统输入。通过输入和输出,系统和系统环境进行物质、能量和信息的交换。

系统结构和系统环境决定了系统功能。而系统功能是通过系统输入-输出关系表现出来的。

系统每个时刻所处的状况叫做系统状态。系统状态随着时间的变化叫做系统行为。系统行为是通过输入——状态关系表现出来的。系统行为的外在表现（即系统输出）就是系统功能。

具有相同组成部分的系统可具有不同的系统功能。因为它们的关联、制约、作用关系不同。例如固态的冰、液态的水、气态的水蒸汽，虽然都是氢二氧一所组成，但它们的客观性质却大不相同。尤其值得指出的是，它们都具有其组成部分氢和氧所没有的性质。

改变系统组成部分或者改变相互关联、制约、作用关系可以改变系统功能，特别是使系统具有人们所希望的功能。这就是控制论、运筹学、信息论以及系统学的基本思想，也是系统工程应用的根本目的。

我们上边所定义的系统及其有关概念，在自然界、人类社会包括人类自身在内是普遍存在的。从微观的基本粒子系统到宏观的宇宙系统；有先于人类早已存在的自然系统，如生态系统，也有人们自己制造的所谓人造系统，如收音机、宇宙飞船系统等；有简单系统，也有像人体这样的复杂系统，更有像人类社会这样复杂的巨系统，等等。可见，客观世界存在着各式各样的实际系统。为了研究上的方便，可以按不同原则将系统划分为各种不同的类型。例如，按系统的形成和功能是否与人参与有关，可以划分为自然系统与人造系统；按系统结构和功能的复杂程度可以划分为简单系统和复杂系统；按系统与其环境是否有物质、能量、信息的交换，可以划分为开放系统与封闭系统。当然，真正的封闭系统，客观世界中是不存在的，只是为了研究上的方便，有时把一个实际系统近似看成封闭系统；按系统状态是否随着时间变化，可以将系统划分为动态系统和静态系统。同样，真正的静态系统，客观世界中也是不存在的，只是一种近似描述；

按系统是否含有随机因素，系统可以划分为确定性系统和不确定性系统，由于不确定性因素的性质不同，不确定性系统又分为随机系统和模糊系统；按着系统的物理属性不同，又可分为物理系统，生物系统，经济系统，社会系统；按系统中是否包含生命因素，又可划分为生命系统和非生命系统，等等。

钱学森根据组成系统的元素和元素种类的多少以及它们之间关联的复杂程度，把系统分为简单系统和巨系统两大类。简单系统是指组成系统的元素比较少，它们之间关系又比较单纯，如某些非生命系统，而巨系统则是指组成系统元素数目非常庞大的系统。如果组成系统的元素非常多，但元素种类比较少且它们之间关系比较简单，这类系统称为简单巨系统，如激光系统。如果组成系统的元素不仅巨大而且种类也很多，它们之间关系又很复杂，并有多层次结构，这类系统称为复杂巨系统，如人体系统和生态系统。在人体系统和生态系统中，元素之间关系虽然复杂，但还是有确定规律的，而另一类复杂巨系统，称为社会系统，组成这个系统的元素是人。由于人的意识作用，使得元素之间关系不仅复杂而且带有很大的不确定性，这是迄今为止最复杂的系统了。系统的这种分类，清晰地刻划了系统复杂性的层次，对系统科学研究具有重要意义。

关于系统性质及规律的深入讨论，放在第三节里进行。

二、系统工程的方法与特点

根据上述系统科学体系结构，我们知道系统工程是处在工程技术层次上，属于技术范畴。那么，系统工程到底是一种什么技术，如何应用。

最早给出系统工程明确概念，界定应用对象、内容和范围的，是钱学森、许国志、

王寿云在文献[1]中首先提出来的。按照他们的定义,系统工程是组织、管理系统的规划、研究、设计、制造、试验和使用的技术。从这个定义中可以看出,系统工程是组织管理技术,它的应用对象是各种各样的系统。由于系统存在的普遍性,也就注定了这门技术应用的普遍性和广泛性,是对一切系统都适用的技术。各种系统不同,就有各种不同的系统工程。例如,工程系统工程是指工程系统的组织管理技术,科技系统工程是指科技系统的组织管理技术,军事系统工程是指军事系统的组织管理技术,等等。应用系统的组织管理技术,使系统具有我们所希望的功能,这就是系统工程应用的目的。

在我国,最早应用系统工程并取得显著成就的,一个是华罗庚倡导的统筹方法,另一个是航天系统总体设计部。在航天系统中,每一种型号都有一个总体设计部。实践证明它是很有效的。钱学森曾指出“总体设计部的实践,体现了一种科学方法,这种科学方法就是系统工程”^[1]。

周恩来总理生前曾提出,把航天部总体设计部的经验推广到国民经济系统。1980年左右,钱学森提出由社会科学工作者与自然科学工作者、工程技术人员相结合组成国民经济总体设计部的建议,就是试图把系统工程应用到国民经济系统中去,实践经济系统工程。十年改革的经验和教训都证明了,这是科学的有远见的建议,对于决策科学化、管理现代化具有重要意义。

上一节已经指出,社会系统是以人为元素而构成的复杂巨系统。人本身也是个复杂巨系统,所以,社会系统是以复杂巨系统为子系统的复杂巨系统(形象地说,是二次复杂巨系统)。研究人这个复杂巨系统,可以看作是社会系统的微观研究,而社会系统的宏观研究,根据马克思创立的社会形态概念,任一社会都有三种社会形态,即经济的社会形态,政治的社会形态,意识的社会形态,

可把社会系统划分为三个子系统,即社会经济子系统,社会政治子系统,社会意识子系统。

经济子系统包括生产力、生产关系(生产、消费、流通、分配)子系统;政治子系统包括政治体制、法律制度、军事制度等子系统;意识子系统包括文化、思想等子系统。这三个子系统之间关联、制约、作用关系,在马克思主义理论中,已有许多定性描述(见图2)。

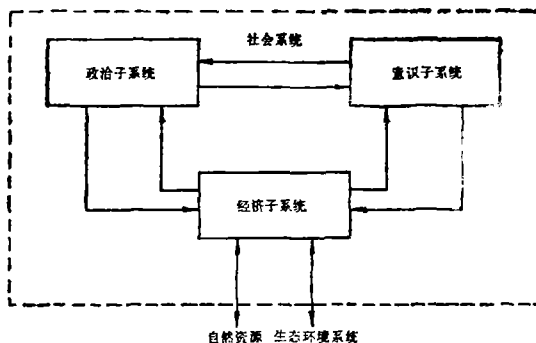


图2

从社会系统这个划分中,按照系统工程的定义,我们可以看出,所谓经济系统工程就是组织管理经济系统的技术;政治系统工程是组织管理政治系统的技术;意识系统工程是组织管理意识系统的技术;而社会系统工程则是使三个子系统之间以及社会系统与其环境之间协调发展的组织管理技术,即组织管理社会系统的技术。

从我国改革的现实来看,不仅需要经济系统工程,更需要社会系统工程。单纯进行经济体制改革,不注意另外两个子系统的关联制约作用,经济体制改革难以成功。例如“官倒”、党内某些腐败现象、社会风气不正,等等,都对经济体制改革造成了严重影响,以致不得不来治理经济环境,整顿经济秩序。这都证明了“解耦”改革是不行的,改革需要配套,要有总体设计和协调,这就是社会系统工程对我国改革的现实意义。

最近,钱学森指出,相应于三种社会形态,应有三种文明建设,即物质文明建设(社会经济形态)、精神文明建设(社会意识形态)、政治文明建设(社会政治形态)。社会主义文明建设,应是这三种文明建设的协调发展。这是从理论角度来讲的,如果从实践角度来看,保证三种文明建设协调发展的,就是社会系统工程。

既然系统工程是技术,就要用来改造客观世界并取得实际成果,这就是工程学的实践性特点,而不是一种“空谈”或者仅仅是一种“观点”。

系统工程是组织管理系统的技术,就应有一套科学技术方法。那么,系统工程的技术方法是什么呢?钱学森在总结了国内外已有经验的基础上,提出了定性定量相结合的系统工程技术,概括起来包括以下六个方面:^[7]

1. 系统建模,
2. 系统仿真,

3. 系统分析,
4. 系统优化,
5. 系统运行,
6. 系统评价。

系统建模是指将一个实际系统的结构、输入-输出关系、系统功能,用数学模型、逻辑模型等描述出来。用对模型研究来反映对实际系统的研究。

有了系统模型后,借助于计算机就可以模拟系统行为和功能,这就是系统仿真。它相当于在实验室内,对实验系统作实验,即系统实验研究。

通过系统仿真,可以研究系统在不同输入下的反应、系统动态特性以及系统未来行为的预测等等,这就是系统分析。

系统优化目的是要找出为使系统具有我们所希望的功能的最优、次优或满意的策略和政策。

系统运行是指决策的实施过程,也就是系统的实际运行过程。在这个过程中,同样

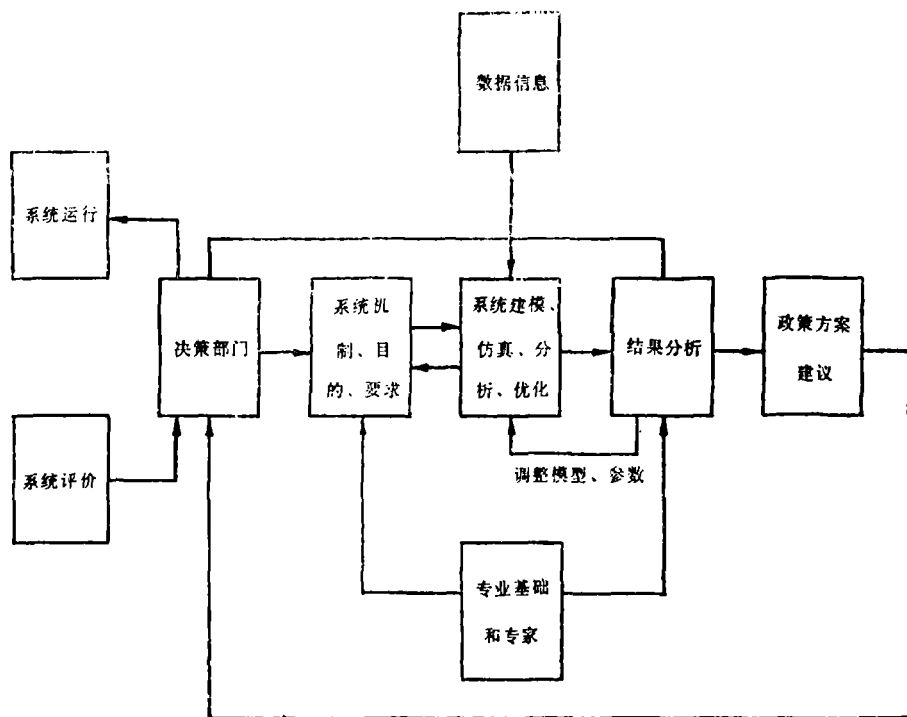


图3 系统工程的应用

有组织管理问题,同时,也是对决策的实践检验过程。

系统评价是对系统决策和决策的实施进行全面评价,找出问题,提出新的目标并开始下一个循环。

我们可以把以上各个方面关系表示在图3中。

从这个图中,可以看出系统工程的一些特点:

1. 多学科交叉性研究和应用

为了明确起见,我们用图4来表示这个特点。

任何组织管理问题,从系统科学角度来看,都是一个系统决策问题。然而,对一个具体系统的认识,如对系统结构、系统环境、系统行为和功能、系统输入-输出关系的了解,必须有与该系统有关的科学理论支持。例如,经济系统需要有经济学,军事系统需要有军事科学,生物系统需要有生物学,等等。只有对实际系统有了认识和了解之后,我们才能应用系统工程,例如建模、仿真、分析和优化等。形象点说,一个系统决策问题如同三维空间一个点(见图4),第二维(系统科学)给出系统思想和系统理论支持;第三维(现代科学技术各部门)给出具体系统的有关科学理论支持;第一维给出系统方法和技术的支撑。这样,才能完成一个决策问题的系统研究。所以,在讨论系统机制、目的、要求时,除有决策部门管理专家、系统工程专家参加外,还要有有关专业

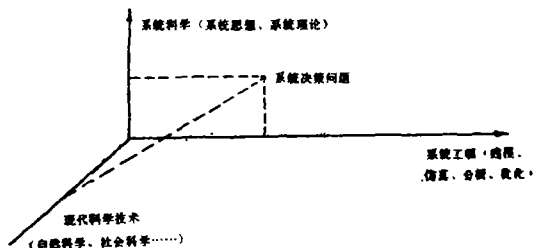


图4 系统工程交叉性特点

的专家参加。例如,研究经济系统决策问题时,要有经济学家参与,这一步定性讨论对明确系统边界、确定建模思想、模型要求和功能具有重要意义。同样理由,在讨论结果分析时,也是如此。

2. 定性研究和定量研究相结合

一般说来,定性研究是基础,定量研究是在定性研究基础上的精密化,这两者是相辅相成的。这里要强调指出的是,系统建模是系统工程应用的重要一步。有了模型再借助于计算机,就可以把一个在实践中根本无法进行实验的系统在计算机上进行模拟和仿真。这一点对经济、社会系统具有特殊重要意义。但是,对模型也有不同看法,有人认为模型是不准的,计算结果也是靠不住的。因为实际系统那么复杂,根本不是用模型所能描述的。这可能是一种误解。其实,模型是对实际系统的一种近似描述,我们不可能也没有必要把实际系统的所有因素都在模型中反应出来,如果真的做到了这一点,那也不是系统模型而是系统实体了。我们只能抓住主要因素在模型中反映出来,只要模型精度满足所要研究问题的精度要求,就可以用模型来研究想要探索的问题。如果精度不够,还可以改进模型和调整参数,直到精度满足要求为止。就目前而言,有两个主要因素使系统建模遇到了困难,以致对相当一些系统,我们还不能甚至还会建模。一个是系统实际运行机制还不十分清楚(即所谓黑箱或灰箱问题),即使有辨识理论和方法,但对复杂系统,这些理论和方法仍有局限性。另一个是有些系统其机制虽然都清楚或比较清楚了,已是白箱问题,但数学工具不够,人们也无法描述它们。这些困难正是需要我们去克服和探索的,而不是由此而否定模型的科学作用。当然,我们也不能把模型绝对化,以为只有模型才是唯一出路。实际上,人们也在探索其它方法,例如,专家系统、人工智能、决策支持系统和层次分析法、情景分析

法等,实践已证明,这些也是很有效的方法。

总之,系统建模是一种科学方法,应积极研究和应用,另一方面,它也有局限性,我们还要研究其它方法。

3. 决策部门、统计部门和研究部门相结合

这三者是处在不同层次上的。统计部门要提供高质量的统计数据。研究部门要提供可靠的科学结论,供决策部门参考。决策部门特别是主要决策者,对研究部门的成果应采取正确的态度是至关重要的。有的决策者对凡“合吾意”者大加赞扬,不合意者便打入地下,至于研究结果是否科学则不管不问。对研究部门来说,有的研究人员以决策者的“喜、怒、哀、乐”为唯一标准,甚至不惜采取凑数的办法来迎合决策者的意图,这是危险的,也是缺少科学道德的表现。高明决策者应对这类研究人员持警惕态度。

总之,系统工程的成功应用,就在于发挥这三者的大力协同和密切合作,而决策部门起着关键性作用。

4. 整体性和综合性的系统技术

系统工程研究实际上是把专家群体、统计数据、计算机有机结合起来,把各个学科的知识有机结合起来,它本身也构成了一个系统。系统工程的成功研究,就在于发挥这个系统的整体优势、综合优势。所以,系统工程是一种整体性和综合性的系统技术,这是它不同于其它技术的一个显著特点,也正是因为这样,它才有可能去解决象社会系统这样复杂巨系统中的问题。

5. 科学方法与经验知识的结合

对于复杂系统的系统工程,还要把科学技术方法与经验知识结合起来。经验知识虽不属于科学技术范畴,属于前科学,但对认识、研究复杂系统仍有着重要作用。例如,人的心理和行为方面的因素,虽然有心理学、行为科学的研究,但对研究社会系统来说远不能满足需要,在这种情况下,人的经

验知识对社会系统工程来说,是必不可少的。

从上述系统工程及其特点的讨论中,可以看出,系统工程对决策科学化、民主化、管理现代化具有重大实际意义。我国正在进行全面体制改革,在这个过程中,逐步由过去以经验决策为主转移到以科学决策为主的情况下,系统工程的广泛应用尤有现实意义。改革需要系统工程,同时也为系统工程的应用提供了广阔天地。我们应该大力推动系统工程的应用,加速系统工程的发展,促进改革顺利地进行,这是我们系统科学工作者的光荣使命。

三、系统工程的理论基础

系统工程的迅速发展和广泛应用,是与其理论基础有着密切关系的。作为技术科学层次上的控制论、运筹学、信息论等为系统工程提供了越来越多的理论方法,计算机技术的飞速发展又提供了强有力的技术手段。如运筹学中的线性规划、非线性规划、整数规划、动态规划、组合优化、博弈论、排队论、对策论、图论等,都是很好的理论方法。现代控制理论是以系统模型为基础,研究系统结构、参数、性能和行为之间的定量关系,因此,适用范围很广^[4]。

以上这些理论都是以系统为研究对象的技术科学。按照钱学森的系统科学体系结构,处在基础科学层次上的是系统学。系统学应该是研究系统普遍规律的科学,那么,系统有没有共同规律?有哪些共同规律?如何认识和利用这些规律去推动技术科学和系统工程的发展从而在更大范围内更深刻地影响和改造客观世界?

奥地利理论生物学家彼塔朗非是探索系统普遍规律的第一位科学家。在其著作《一般系统论》这本书中^[5],他曾提出,系统“在不同领域中表现出结构上的相似性或同构

性”。他对系统共性作出了以下几点概括:

1. 系统整体性 也就是亚里斯多德的著名论断“整体大于各孤立部分之和”。前面我们曾经指出,系统具有其组成部分所没有的功能。我们常说“三个臭皮匠凑成一个诸葛亮”。三个臭皮匠所组成的系统具有诸葛亮的功能,而它的组成部分只有臭皮匠功能。

2. 系统的关联性 系统关联性表现为组成系统各部分之间以及系统和其环境之间相互关联、相互制约、相互作用。系统关联性决定了系统整体性。

3. 系统动态性 从时间角度来观察和研究系统时,系统无时无刻都在变化和运动,这就是系统的动态性。系统动态性和关联性有密切关系。一方面系统结构随着时间而变化,另一方面,系统开放性使它和环境时刻在交换能量、物质和信息。这就是产生系统动态性的内部条件和外部原因。

4. 系统有序性 系统关联性在空间上所表现出来的层次结构,以及系统动态性在时间上所表现出来的演化方向,结果使得系统在空间、时间和功能上表现出有序性质。越有序的系统其组织化程度越高。一个实际系统,从产生、发展到消亡,就是系统从无序到有序再到无序的过程。

5. 系统预决性 系统的有序性使得系统自动导向它的终极状态,即“目的点”或“目的环”。这一特点在生命和生物系统中表现得尤为明显。

彼塔朗非的一般系统理论,虽然想建立各种系统共同规律的科学,但仅限于定性描述,思辨性研究居多,而真正属于科学技术范畴的内容则很少。

60年代末70年代初,理论物理、化学、理论生物学、数学和控制论,都有了新的突破。例如,普里戈金的远离平衡态耗散结构理论^[10]、哈肯的协同论^[11]、托姆的突变论^[12]、斯美尔-廖山涛的动力体系理论^[13]、艾肯的超循环理论^[14]以及现代控制理论

等。所有这些理论突破,都揭示了系统的更深刻性质和普遍规律。

大家知道,长期以来不同领域的科学家早已注意到,在生命系统和非生命系统之间表现出似乎截然不同的规律,非生命系统通常服从于热力学第二定律。系统总是自发地趋于平衡态和无序,系统的熵达到极大。系统自发地从有序变到无序,而无序却决不会自发地转变到有序,这就是系统的不可逆性和平衡态的稳定性。

但是,生命系统却相反,生物的进化,社会的发展总是由简单到复杂、由低级到高级越来越有序。这类系统能够自发形成稳定的有序结构。这两类系统表现出的矛盾有没有内在联系呢?

彼塔朗非和维纳虽然都注意到了这个问题,但他们都回答不了这些问题。后来,在物理化学中的一些进展,特别是物理化学试验,例如化学振荡实验、化学钟、本纳德花纹等,都证明了在非生命系统中也能自发形成有序结构。这些事实启发人们,两类系统表观上的鸿沟很可能由相同的规律所沟通。普里戈金的耗散结构理论和哈肯的协同论为解决这个问题提供了一个科学的理论框架。

普里戈金理论认为,热力学第二定律所揭示的是孤立系统(和环境没有物质和能量的交换)在平衡态和近平衡态(线性非平衡态)条件下的规律。但生命系统通常都是开放系统,并且是远离平衡态(非线性非平衡态)。在这种情况下,系统通过和环境进行物质和能量交换引进负熵流,尽管系统内部产生熵,但总的熵在减少,在达到一定条件时,系统就有可能从原来的无序状态自发转变为在时间、空间和功能上有序状态,产生一种新的稳定的有序结构,普里戈金称其为耗散结构。这样,在不违背热力学第二定律的条件下,耗散结构理论沟通了两类系统内在联系,说明在两类系统之间并没有真正严格界限。所以,普里戈金在其著作中指出,复杂

性不再仅仅属于生物学了,它正在进入物理学领域,似乎已经植根于自然法则之中了^[15]。耗散结构理论对物理学、化学、理论生物学、生态学等都具有重要意义。然而,耗散结构理论所真正揭示的恰恰是开放系统的运动规律。这就是这个理论能在这么多不同类形学科中均有理论意义的原因所在。

耗散结构理论是对系统宏观性质的研究,还没和系统的微观性质联系起来。如何打通从微观到宏观的道路,使系统在宏观上表现出来的规律能和微观层次上运动联系起来?统计力学的方法解决了热力学中从微观分子运动到宏观规律的过渡,其关键在于引用了统计方法。哈肯的协同学正是用这样的观点来研究系统的。他吸收了概率论、信息论、控制论、突变论的有关理论进一步研究了系统的自组织理论。60年代,哈肯在研究激光系统时发现,激光是一种典型的远离平衡态时由无序转化为有序现象。后来他又发现就是在平衡态时也有类似现象。例如超导现象和铁磁现象。一块磁铁从微观上看,是由许多小磁体组成,在高温下,各个小磁体的指向不规则,是杂乱的,磁矩相互抵消,所以整个磁铁在宏观上不呈磁性。但是,当磁铁温度降到临界温度以下时,小磁体就整齐排列起来,结果在宏观上表现出磁矩来。这就表明,系统有序结构出现并不是一定要远离平衡态。因此,一个系统从无序转化为有序的关键并不在于系统是平衡和非平衡,也不在于离平衡态有多远,而是由组成系统的各个子系统,在一定条件下,通过它们之间的非线性作用,互相协同和合作自发产生在时间、空间和功能上稳定的有序结构,也就是说,系统本身自动趋向稳定的有序结构,这就是自组织结构,这类现象叫做自组织现象,这类系统叫作自组系统。

哈肯还建立了所谓支配原理:系统在临界点附近的行为仅由少数变量所决定,这些变量决定了子系统的行为,代表了系统的慢

运动称为序参量。系统快运动是受慢运动支配的。在此基础上,还提出了所谓绝热消去法,从而使这一理论可以达到实用的程度。

哈肯在其著作中,明确指出,使许多科学家惊奇的是,当大量的这类系统从无序状态变为有序状态时,它们的行为显示出引人注目的相似性,这一点有力地表明,这类系统的功能作用遵循同样的基本原理^[16]。由此可以看出,哈肯协同学所揭示的仍是系统的基本规律。一项很有意义的研究是H. Fröhlich 1967年开始的,他提出哈肯的激光器理论可以应用于生命系统,试验证实了H. Fröhlich的设想,把协同学理论直接用于生命系统中的细胞繁殖。

如果说协同学是先研究物理系统的自组织现象,然后推广到生物系统,那么,几乎与协同学产生的同时,艾肯的超循环理论则是直接从生命系统来研究自组织问题,为生命的产生和在环境中的演化提供了理论根据。艾肯应用控制理论中大系统理论,提出生命现象超循环结构模型。通过循环、超循环结构说明生命起源和发展在化学阶段和生物进化阶段之间,有一个分子自组织阶段,认为“进化原理可以理解为分子水平上的自组织”^[17]。这个理论给予我们的启发在于,一个复杂系统是如何产生的。一个系统总有个产生、发展到消亡的演化过程。今天,已有人研究通过自组织理论来说明系统的这个发展过程。

另一方面,现代控制理论(如大系统理论)和现代数学的发展,也为系统自组织理论提供了数学基础。例如,动力体系理论中的分支理论、结构稳定性理论、吸引子理论等等。

如果我们用多维空间几何理论来研究系统自组织现象,系统行为在相空间就表现为一随时间变化的轨迹。所谓有序结构就是相空间中一个点或一个环甚至一个区域。系统自动地趋于这些点、环或区域,它们是系

统目标。系统在给定环境中,只有在这些点、环和区域上才是稳定的,离开了它们系统就不稳定,系统本身一定要把自己拖到这些点和环上才能罢休,这就是系统自组织。这些点、环就是系统的吸引子。

在物理、化学和大气中所出现的混沌现象,在动力体系中的奇异吸引子理论都证明了,出现混沌是系统普遍性质。

我们这里只是简略地介绍了一来自其它科学技术部门有关系统研究的进展。应该说,他们的成就不仅仅属于所在领域和学科,实际上有着更广泛更深刻的意义。在不同领域工作的这些科学家们,都为解决本领域的前沿命题进行着研究和探索,但他们可能未必意识到,他们在理论上的这些突破,正孕育着一门新学科——系统学的诞生。正是系统的概念、思想和方法及其普遍规律,把这些不同领域学科的成就联系和统一起来。这就是系统学产生的科学背景。

系统学的建立一方面有来自系统工程的实践基础,另一面还有运筹学、控制论、信息论以及上面我们所讲到的来自其它学科理论的进展。它们都在不同程度上揭示了系统更深刻的性质和规律,使得人们对系统有了更深入的认识。例如,系统的发展在时间上具有不可逆性,系统过去和将来之间存在着对称破缺;系统具有自组织性,在涨落作用下,能自发形成稳定的有序结构,有序是系统自组织和子系统协同的结果;系统包含有复杂的反馈机制,反馈是有序之本;系统在一定条件下,可以从有序变成混沌,也可以从混沌变成有序,还可以从一种有序变为另一种有序状态而导致状态突变;混沌是系统对初始条件和边界条件异常敏感产生的貌似无序的运动。混沌现象表明,确定性系统可以产生随机行为。卡姆定理证明,在封闭系统中,三维以上非线性系统出现混沌是普遍的。对开放系统,动力体系理论也证明了类似事实。混沌是一种吸引子,不过不是平衡

点、极限环这类具有整数维的正常吸引子,而是分数维的奇异吸引子,具有复杂的几何结构;系统普遍存在着李雅普诺夫稳定性和结构稳定性;非线性系统中分岔现象是普遍发生的,分岔是新状态和多样性之源,……。

钱学森对这些分布在不同学科中的科学成就,从系统观点进行概括和统一,揭示了系统普遍规律和深刻性质,奠定了系统学的理论基础。

钱学森提出,系统学是研究系统结构与功能(包括演化、协同和控制)一般规律的科学^[18]。

关于系统学的研究方法,对于简单系统和简单巨系统,自然科学的理论方法,包括运筹学、控制论、信息论、数学以及耗散结构理论、协同论、突变论等,是可以很好地描述和研究的,20世纪70年代以来也有人把上述理论方法应用到复杂巨系统,也取得了一定成功,如超循环理论。但对整个复杂巨系统的研究,特别是对社会系统的研究,上述理论方法有很大局限性。例如对策论,就其理论框架而言,是研究社会系统的理想工具。但对对策论今天所取得的成就,还不能处理社会系统的复杂性。原因在于对策论中已把人的社会性、复杂性、心理和行为的不确定性大大简化了,以致把复杂巨系统问题变成了简单巨系统或简单系统的问题了。

为了寻找研究复杂巨系统的有效方法,钱学森根据国内外近年对复杂巨系统的研究经验,提出了定性定量相结合的系统研究方法。这个方法是在以下三种复杂巨系统的丰富实践基础上,提炼、概括和抽象出来的。这就是:

(1)社会系统中,由几百个或上千个变量所描述的定性定量相结合的系统工程技术对社会经济问题的研究和应用;

(2)在人体系统中,中西医相结合的临床方法的大量研究和应用;

(3)在生态环境系统中,地理区域规划

方法的研究和应用。

定性定量相结合的系统研究方法,具有以下特点:

(1)根据复杂巨系统的复杂机制和变量众多的特点,把定量研究和定性研究有机结合起来;

(2)根据复杂巨系统的层次结构,把宏观研究和微观研究结合起来;

(3)根据系统思想,把多种学科结合起来进行交叉研究;

(4)由于系统复杂性,还要把科学技术和经验知识结合起来。

以上这些特点表明,这个方法不仅对解决复杂巨系统问题具有重要现实意义,而且对发展系统学的理论具有深远的科学意义。

系统学的任务从根本上说是两个方面,一个是对系统规律的认识,另一个是在认识系统规律的基础上,如何控制系统。第一个方面是关于系统结构、子系统协同以及系统功能在系统环境作用下的演化规律。第二个方面则是把控制思想和理论引入到系统学。如同认识客观世界是为了更好地改造客观世界一样,人们认识系统也是为了更好地控制系统。

系统学的建立和发展不仅对系统科学本身具有重要意义,而且必将影响和促进其它科学的发展。因此,建立和发展系统学具有重大的科学意义。正如钱学森所说:“我觉得系统学的建立,实际上是一次科学革命,在科学史上的意义不亚于相对论和量子力学”。

参 考 文 献

- [1] 钱学森、许国志、王寿云,《组织管理的技术——系统工程》,文汇报,1978年9月27日
- [2] 钱学森,《现代科学的结构》,哲学研究,1982年第3期。
- [3] 钱学森,《再谈系统科学的体系》,系统工程理论与实践,1981年第1期。
- [4] 钱学森,《系统思想和系统工程》,钱学森等著,《论系统工程》,湖南科技出版社,1988年,第73—86页。
- [5] R.E. Kalman et al, "Topics in Mathematical System Theory", McGraw-Hill, 1969.
- [6] M.D. Mesarovic and Y. Takahara, "General Systems Theory: Mathematical Foundations", Academic Press, 1975.
- [7] 于景元,《系统工程在决策中的作用》,钱学森等著,《论系统工程》,湖南科技出版社,1988年,第619—635页。
- [8] 于景元,《控制论和系统学》,系统工程理论与实践,1987年第3期。
- [9] 彼塔朗菲,《一般系统论——基础、发展与应用》,社会科学文献出版社,1987年出版。
- [10] 普里戈金,《从存在到演化》,上海科技出版社,1986年出版。
- [11] H. Haken, "Advanced Synergetics", Springer-Verlag, Berlin, 1987.
- [12] R. Thom, "Structural Stability and Morphogenesis", Addison-Wiley, New York, 1975.
- [13] 廖山涛,《微分动力系统》,北京大学讲义。
- [14] M. Eigen and P. Schuster, "The Hypercycle", Springer-Verlag, 1979.
- [15] 尼科里斯、普里戈金,《探索复杂性》,四川教育出版社,1986年出版。
- [16] 哈肯,《信息与自组织》,四川教育出版社,1988年出版。
- [17] 梯田孝司,レーザーと“生命现象”,レーザー研究,7, No. 3. 1979, pp. 241—250, 译文见《激光与生命现象》,国外激光,1980年第9期。
- [18] 于景元,《系统学》,中国大百科全书,《自动控制与系统工程》卷条目。

SYSTEMS ENGINEERING AND ITS THEORETICAL BASIS

Yu Jingyuan

Beijing Institute of Information and Control

This article provides an overview of the architecture of system science developed by Qian Xuesen, with a particular stress laid upon the methodology and theoretical basis of systems engineering. The latter refers mainly to the establishment of systematology. Presented here is an introduction to some conclusions on the object, content and method of systematology study that have been reached by a seminar under the personal direction of Qian Xuesen.

Subject terms: System engineering, System theory.

SYNERGETICS AND ITS APPLICATIONS IN COMPUTATIONAL SYSTEMS AND SOCIAL SYSTEMS

Go Zhian

Dalian Railway Institute

Tan Shuming

Northern Jiaotong University

Synergetics is a novel discipline-intercrossing science. The first book of synergetics was published in 1977^[1]. Since then the concepts and methods have been extensively used in many fields of natural sciences and social sciences. This paper makes a brief introduction to synergetics and investigates tersely the perspective of its applications in computational systems and social systems.

Subject terms: Synergetics, Self-organization, System theory.