

# 从系统工程到系统学

于景元

(北京信息与控制研究所)

现代科学技术发展突飞猛进。从学科角度看,有两种趋势是很明显的:一种是学科越分越细,新的学科分支越来越多;另一种是综合趋势,交叉学科不断产生。过去看来不太相关的学科,今天却相互交叉走向一体化的方向。这后一趋势更引人注目,其中尤以自然科学与社会科学的交叉正吸引着广大科学技术工作者。所有这些发展都标志着人类对自然界、社会和人类自身的认识愈来愈深化、愈来愈自觉,这是人类不断进步和走向文明的标志。

科学技术是生产力,科学技术进步必将对社会、经济、生态环境产生重大影响。在这个过程中,我们应该不失时机地把握住那些对我国现代化具有重要意义的新学科、新技术,大力促进迅速发展它们,以加速我国四个现代化的进程。

本文论及的就是正在形成和发展的一门新兴科学技术——系统科学。

目前,国内外关于系统科学的概念、理论和方法等的认识还很不一致,尤其国外更为混乱。这也从一个侧面反映了这门学科是新的一个特点,因而这种现象是自然的。

在众说纷纭情况下,我国著名科学家钱学森先生,总结概括已有科学技术分支并根据现代科学技术发展的特点,首先提出了一个符合科学技术发展规律的清晰的现代科学技术体系结构,并在此基础上又提出了系统科学体系结构。

## 一、现代科学技术结构

钱学森先生提出的现代科学技术结构是一个纵横交错的矩阵式结构,纵的方向有三个层次:(1)直接改造客观世界的是工程技术;(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,这就是基础科学。如再进一步概括,就是马克思主义哲学内容了。

从横向划分到目前为止有九大部门:(1)自然科学;(2)社会科学;(3)数学科学;(4)系统科学;(5)思维科学;(6)人体科学;(7)行为科学;(8)军事科学;(9)文艺理论。今后随着科学技术的发展,还会增加新的学科部门。上述可表示如图1的形式(详见钱学森等著:《论系统工程》,湖南科技出版社,1983年)。

本文于1987年6月17日收到。

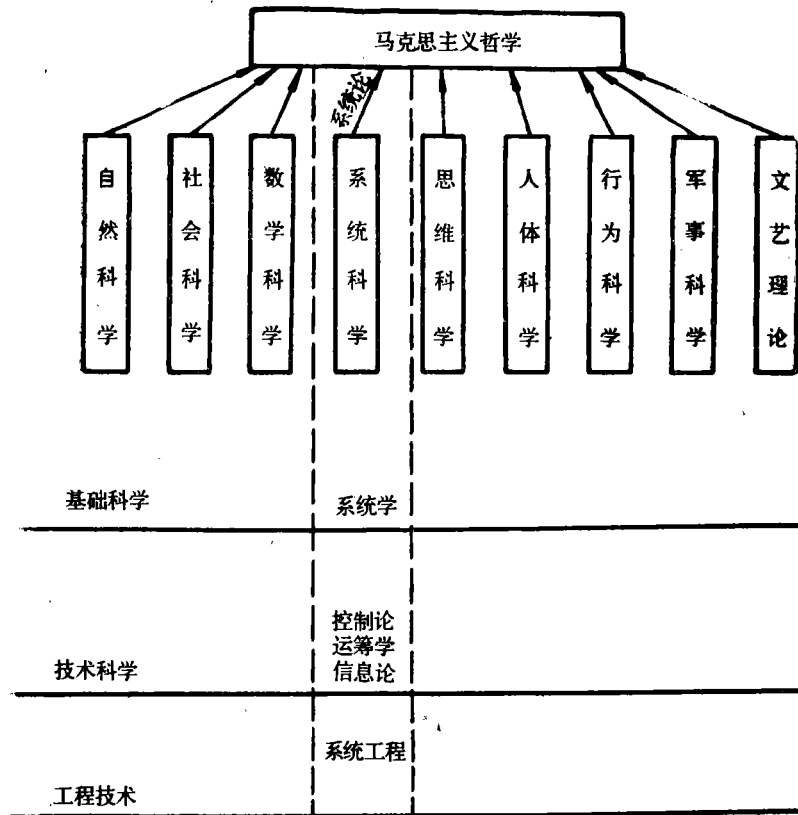


图 1

## 二、系统科学体系结构

系统科学是现代科学技术体系中一个科学技术部门，它自然也由三个层次构成（见图 1），虽然其中有的学科如运筹学、控制论、信息论等有较长的历史，但就整个体系而言是新的，是近些年的事。其中处在基础科学层次上的系统学是正在建立的一门科学。

任何一门学科都有其研究对象。自然科学是研究物质运动规律的；社会科学研究人类社会活动规律的……等等，那么系统科学的研究对象是什么呢？回答是明确的。系统科学作为一门科学技术体系，不管在那个层次上，那一门学科，都是以系统为研究和应用对象。那么系统又是什么呢？系统科学体系不同层次上的学科研究系统的内容又是什么呢？

## 三、系统及其有关概念

国内外关于系统有几十种定义，各有各的说法，很不一致。大体上有两种情况：一种是描述性的；另一种是数学公理化叙述方法（主要以卡尔曼、米沙洛维奇为代表）。下边采用描述性方法。

所谓系统是指由互相关联、互相制约、互相作用的一些部分组成的具有某种功能的总

体。这样定义的系统具有概括性和抽象性。一个系统具有什么组成部分,它们是如何关联、制约、作用的,具有什么功能,只有对具体实际系统才能具体化,如太阳系是一个系统,人体是一个系统,一个工厂企业是一个系统,一个国家也是一个系统。

互相关联、互相制约、互相作用的组成部分叫作系统结构。组成部分本身也可能是一个系统,叫作原系统的子系统。而原系统对可能是更大系统的组成部分,这就是系统概念的相对性。

一个系统的以外部分叫作系统环境,系统和系统环境的分界叫作系统边界。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作系统输出,环境对系统的作用叫作系统输入。

系统结构和环境决定了系统功能。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情况叫作系统状态,系统状态随时间的变化叫作系统行为。

具有相同组成部分的系统可具有不同的系统功能,因为它们关联、制约、作用关系不同。例如固态的冰、液态的水、汽态的水蒸汽,虽然都是氢二氧一所组成,但它们的宏观性质却大不相同。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,特别是使系统具有我们所希望的功能。这就是控制论、运筹学、系统学的基本思想,也是系统工程应用的基本目的。

系统组成部分相互关联、制约和作用,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,占有一定空间并随时间发展而变化。

系统在自然界、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宇宙系统;有先于人类早已存在的自然系统,如太阳系、生态系统;也有人们制造的所谓人造系统;有简单系统,也有象人类社会这样复杂的大系统。

系统存在的普遍性是有其马克思主义哲学基础的。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所形成的统一整体,马克思主义的这些哲学思想对发展系统科学具有指导作用。反之,系统科学的研究成果又将为马克思主义哲学的发展提供丰富材料。由系统科学向马克思主义哲学过渡的桥梁,钱学森先生称作系统论(或系统观)。

客观存在的实际系统种类繁多。按最一般划分方法有:物质系统与思维系统;自然系统与人造系统;物理系统与非物理系统(社会系统、经济系统等);简单系统与复杂系统;封闭系统与开放系统;静态系统与动态系统;确定性系统与不确定性系统(包括随机系统与模糊系统)。

## 四、系统工程及其应用

系统工程是组织和管理系统的规划、研究、设计、制造、试验和使用的技术(见钱学森等著:《论系统工程》),这是对一切系统都适用的技术,具有应用的普遍性和广泛性。各种系统不同,就有各种系统工程,如工程系统工程,经济系统工程,社会系统工程等等。这里需要明确的是,首先系统工程是属于技术范畴,应用的对象是系统,用来组织管理系统,使系统具有我们希望的功能。这项技术不同于其它技术的最明显特点,在于它是软技术。国内目前



定量研究的重要一步。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试验的系统在计算机上进行模拟和仿真,这一点对社会经济系统具有特殊重要意义。但也有人认为模型是不准的,计算结果是靠不住的,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,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。一个是系统的实际运行机制还不十分清楚,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。另一个是有些系统机制虽然都比较清楚了,已是白箱问题,但数学工具不够,人们也无法描述它们。这些困难正是我们需要克服和探索的,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,人们也正在探索其它方法,例如专家系统、人工智能和决策支持系统等,实践已经证明都是很有效的方法。另外,近些年来欧洲共同体的科学家们发展起来的情景分析法也是很有前途的方法。

### 3. 决策部门和研究部门相结合,这一点是显然的。

在我国,最早应用系统工程并取得显著成就的是航天系统。每一个型号都有一个总体部,实践证明它是非常有效的。钱学森先生曾说:“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”。

周恩来总理生前曾提出,把航天部总体部的经验推广到国民经济系统。1980年左右,钱学森先生提出的社会科学工作者与自然科学工作者、工程技术人员相结合的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。七年的时间过去了,实践证明,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。

党的十一届三中全会以来,系统工程已得到了广泛应用,取得了显著成绩。它对国家各部门各单位,从微观到宏观的组织管理、领导和决策、规划和计划、预测和可行性研究等都起着日益重要的作用,并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重视。这是我国科学事业的重大进步,也表明了我国人民科学水平的明显提高。

尤其值得重视的是,在我国正在进行的体制改革过程中,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更具有特殊重要意义。人们常说,改革是一项综合性的复杂的社会系统工程,改革方案要配套、要充分地进行科学论证;既要有预测分析又要有可行性研究等等。这些建议都说明,改革需要系统工程,同时也为系统工程的应用提供了广泛用场。这里使我们再一次想起国民经济总体设计部的重要意义和作用。随着体制改革的进行和发展,必将推动系统工程的应用和发展,从某种意义上说,它可能孕育着一场软技术革命,这是十分令人鼓舞的。

## 五、系统工程的理论基础

系统工程的迅速发展和广泛应用,与其理论基础的发展有着密切关系。作为技术科学层次上的运筹学、控制论、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。例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、图论等等,都是十分有用的理论方法。近30

年来,控制论发展得也很快。除维纳的控制论外,后来又相继产生了工程控制论、生物控制论、经济控制论和社会控制论。50年代末60年代初,又相继出现了所谓现代控制理论。现代控制理论以系统模型为基础,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。

以上这些理论都是以系统为研究对象的技术科学。按照钱学森先生的系统科学体系结构,再往上一个层次,即系统科学的基础科学又是什么呢?换句话说,各种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?如同利用门捷列夫元素周期表预见新元素的存在一样,钱学森先生根据对系统科学体系研究,已预见到这门基础科学的存在,并提出现在已经到了建立这门学科的时候了。这门科学就是钱先生提出的系统学(Systematology)。

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《一般系统理论》这本书中,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”。他对系统的共性作出了以下几点概括:

1. 系统整体性,即亚里斯多德的著名论断“整体大于各孤立部分之和”。或者换句话说,系统具有其组成部分所没有的功能。人们常说三个臭皮匠凑成一个诸葛亮。这句话的寓意就是系统的整体性。

2. 系统的关联性,即指系统组成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,即从时间维来观察系统时,系统无时无刻都在变化和运动。真正的静态系统是没有的,而动态系统是绝对的。

4. 系统的有序性,即系统关联性在空间上所表现出来的结构层次,以及动态性在时间上所表现出来演化方向,使得系统具有在空间、时间和功能上的有序性质,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,就是从无序到有序再到无序的过程。

5. 系统的预决性,即系统的有序性使得系统自动导向它的终极状态。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,概念的阐发,哲学的味道多些。而真正的理论成果和定量方法还很少。这可能与他所处时代的科学技术水平有关。

60年代末70年代初,在理论物理、化学、理论生物学、控制论和数学等都有了新的突破,例如普里戈金的耗散结构理论,哈肯的协同学,托姆的突变论,斯美尔-廖山涛的动力体系理论,艾肯的超循环理论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,长期以来科学家们早已注意到,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有序,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。这一方面说明了这个过程的不可逆性,另一方面也说明平衡态又是稳定态。

但是,生命系统却相反,生物的进化,社会的发展总是越来越复杂。这类系统能够自发形成有序结构。这两类系统表现出的矛盾有没有内在的联系呢?一些物理化学实验和事实,

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。这些事实都启发人们,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学为解决这个问题提供了很好的理论框架。

普里戈金的理论认为,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,系统通过和环境的物质与能量交换引进负熵流,在达到一定条件时,就有可能使系统从原来的无序状态自发转变为时间、空间和功能上的有序状态,产生一种新的稳定的有序结构,普里戈金定称其为耗散结构。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的内在联系,说明了两类系统间并没有真正严格的界限。

哈肯的协同学更进一步指出,系统从无序到有序转化的关键并不在于系统是平衡和非平衡,或者离平衡态有多远,而是由于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出有序结构,即自组织结构。这种现象叫作自组织现象,这类系统叫作自组织系统。

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的变量所决定。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,系统的快运动是受慢运动支配的。并提出绝热消去法,从而使这一理论可以达到实用的程度。有些作者已应用这个理论去建立系统模型,例如城市模型等。

现代数学的发展,又为上述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。

以上我们简单地回顾了一些学科的进展,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。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。系统学就是研究系统结构、演化、协同和控制的一般规律的科学。上述提到的那些理论成就都为建立这门科学提供了丰富材料。例如,物理、化学和大气中所出现的混沌现象,以及动力体系中的奇怪吸引子理论,都说明了系统中出现混沌是普遍性质。钱学森先生说,“我看‘耗散结构理论’、‘协同学’……都是过往云烟,留下的将是系统学。当然创造耗散结构理论和协同学的普里戈金和哈肯是大有功劳的”。又说,“我认为把运筹学、控制论和信息论同贝塔朗非、普里戈金、哈肯、弗洛里希、艾肯等人的工作融会贯通,加以整理,就可以写出《系统学》这本书”。

系统学的建立和发展也必将影响和促进其它学科的发展。因此,建立和发展系统学具有重要的科学意义。正如钱先生所说,“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”。