

Introduction to Systems Engineering

系统工程学导论

顾凯平 郝建华 高孟宇 编著

中国林业出版社

前 言

从古代朴素的“整体论”，到近代科学思维方式——“还原论”，是人类科学技术的方法论、认识论的一大进步。但随着现代科学的发展，“还原论”已显示出“力不从心”，由此，促使了“系统论”的产生。现代科学技术的若干重大突破，又为系统科学的发展提供了基石与素材。因此，科学技术的认识论、方法论从“还原论”到“系统论”已是势在必行。

系统科学作为现代科学体系中的一大类别，与自然科学、社会科学、数学等学科齐驾并驱。这是人类科学史的一大新成就。

著名的物理学家普朗克曾说过：“科学是内在的整体，它被分解为单独的整体不是取决于事物本身，而是取决于人的认识能力的局限性。实际上存在着从物理到化学，通过生物学和人类学向社会学的连续的链条，这是任何一处都不能被打断的链条。”而系统科学正是联结这条链条的科学。

在我国，长期以来的专才式教育，更须要有一门综合性的学科，将不同学科、不同专业知识、技能进行综合。作为系统科学的技术工程——系统工程，为交叉学科的综合，学科、技术的接口提供了必不可少的工具。因此，系统工程对任何学科，任何专业的人员都是必要的。不仅作为一种方法论是必要的，而且对于提高全民的思维方式：由“还原论”走向“系统论”，由分析走向综合与分析的结合都是有极大益处的。

本书可作为各专业本科生、研究生、函授生、在职培训人员的教材，也可供其他专业人员学习使用。

作为系统工程学导论的理论完整性，本书原来共有九章，限于篇幅，删除了系统优化、复杂巨系统理论、人类工程学，以及专业领域系统工程的特例——林业系统工程的章节，有兴趣的读者可参阅有关专著。

编著者

1999年8月

目 录

第一章 系统科学概论	(1)
§ 1.1 系统科学的形成与发展	(1)
§ 1.2 系统科学的理论体系	(5)
§ 1.3 系统工程及其发展与演化.....	(10)
第二章 系统分析	(19)
§ 2.1 霍尔系统工程方法论概要.....	(19)
§ 2.2 系统分析方法论简介.....	(20)
§ 2.3 发现问题或确定结构.....	(24)
§ 2.4 价值和评价.....	(31)
§ 2.5 大系统的综合方法之一——日程安排.....	(39)
§ 2.6 大系统的综合方法之二——系统的可靠性.....	(45)
第三章 系统模型	(53)
§ 3.1 系统模型概述.....	(53)
§ 3.2 数学模型的特点与分类.....	(55)
§ 3.3 结构模型.....	(56)
§ 3.4 模糊集理论简介.....	(64)
§ 3.5 模糊模型.....	(70)
§ 3.6 统计类预测模型.....	(81)
第四章 决策科学	(94)
§ 4.1 决策科学概论.....	(94)
§ 4.2 效用理论	(103)
§ 4.3 单目标随机型决策	(108)
§ 4.4 不确定型决策	(117)
§ 4.5 多目标决策	(119)
§ 4.6 层次分析决策方法	(123)
§ 4.7 决策支持系统	(129)
§ 4.8 对策论	(134)
第五章 系统仿真	(140)
§ 5.1 系统仿真概述	(140)
§ 5.2 离散系统仿真技术之一——蒙特卡罗法	(142)
参考文献	(148)

第一章 系统科学概论

§ 1.1 系统科学的形成与发展

一、还原论 (Reducism) 思维方法的局限及一般系统论的产生

美国著名的系统论学者拉兹洛认为,在西方科学史上,早期的科学思维既是整体的,又是思辩的,因而缺乏分析;近代科学是依靠经验的而又又是还原论的思维方式达到的,它运用了分析方法。从古代的科学思维到还原论思维,是一次思维方式的转换。

澳大利亚动物病理学教授贝弗里奇,是国内读者所熟悉的科学思想和科学方法方面的通俗著述家。他认为,过去 400 多年来卓有成效的科学方法都集中于各个孤立因素的研究,复杂现象和实体被击破成了它们的组成,再对这些组成的性质进行考察,这种程序被描述为还原主义方法。

上面所说的“还原论”即“还原性研究方法”,它在现在科学发展中具有重大的科学方法论价值,分子生物学就是这种还原论方法的巨大成功。而且相对论、量子力学、基本粒子物理学所运用的方法,就其科学方法论归属来看,也是这种还原论研究方法。实际上,当今学科专业化,也正是“还原论”的研究方法的产物。但是,科学实践表明,这种方法无法说明复杂事物的性质。整体所具有的特征并不存在于分离的部分之中,统一体要比它的各个部分的简单集合包含更多的东西。贝弗里奇说:“传统的力学科学不顾及这种由组织化而实现的无形增加的‘某种东西’,因而科学思维需要基本的重新定向以帮助我们理解系统的、有组织的整体和有意义的复合体的基本本质。这已经导致了新兴学科的出现。这门新兴学科具有深远的理论意义和实际应用价值。人们叫它‘一般系统论’、‘系统科学’,或者更通常的,简称‘系统方法’”。这里的“一般系统论”就是美籍奥地利生物学家冯·贝塔朗费 30 年代(1932)提出的。贝塔朗费认为分子生物学在物理化学和分子水平上的研究,确实加深了人们对生物本质的认识,但是“有机论”生物学的必要性反而更为明显,因为自我维系、繁殖和生长这些生命特性并不发生于构成生命体的分子或原子水平上,而只发生于生命体作为整体而存在的组织水平上。因此生物学研究不仅有分子或原子水平,而且也有较高的生命组织水平。他认为“还原论”的研究方法应用有二个条件:第一个条件是“部分”之间的相互作用不存在或微弱到对某些研究任务可以不予考虑的程度;第二个条件是描述部分的行为的关系式是线性的,可以通过部分过程相加来取得总体过程。

可见系统论是“整体论”与近代“还原论”研究方法、思维方式的统一,它不是简单回到古代直观朴素的“整体论”去,而是在近代“精密科学”的基础上,在局部细节弄清楚的基础上,向整体论更高形态的发展,它是分析与综合的统一。正如拉兹洛所称“今天,我们正目睹另一场思维方式的转换:转向严谨精细而又又是整体论的理论。这就是说,要构成拥有它们自己的性质和关系集成的集合体,按照同整体联系在一起的事实和事件来思考。用这

种集成的关系集合体来看世界就形成了系统观点。这是现代的思维方法，也是继原子论、机械论和未经协调的专业化三种思维方式之后的思维方式”。

50年前，美籍奥地利生物学家冯·贝塔朗费(Von Bertalanffy L.)比较明确地认识到这一点，20世纪30年代他开始所谓理论生物学(1932)的研究，要从生物的整体，把生物整体及其环境作为一个大系统来研究。冯·贝塔朗费由此而创立了“一般系统论”(General System Theory, 1945)有人把它的基本原则归纳为一是整体性原则，二是相互联系的原则，三是有序性原则，四是动态性原则。对前两点好理解，后两点如何理解呢？这来源于观察生物和生命现象。生物体有一个有条不紊的构造，而且能有目的地生长和演化，这看来是生命所特有的。生物一死，构造立即开始破坏，生长和演化也立即停止，转入分解。所以一般系统论的核心是后两条原则，它适用于生物体，但它适用于非生命系统吗？冯·贝塔朗费等人首先认识到这个生命特有的现象与物理学中热力学第二定律说的不同。热力学第二定律中谈到，在一个孤立系统中，系统的熵是增加的。什么叫熵？在物理学上熵是系统热力学几率的函数，或者说是系统无序化程度的量度。在一个孤立系统中，系统与外界无能量、物质(对社会系统，还有一个信息量)的交换。当系统内的物理属性不平衡，于是会通过分子无规则的热运动而逐渐达到均衡，即系统内处于均衡分布的热力学几率远大于不均衡分布的热力学几率，即系统的熵是增加的。在其过程中，各种形式的可用能量将转化为分子热运动能量，变为不可用能量。然而在生命体，由于系统是开放系统，通过生命体的特殊结构及功能，可以使系统的输入熵小于输出熵，即系统的熵减少，系统的有序能量增加。冯·贝塔朗费通过生物体的研究，得到了生物体的发展与热力学第二定律描述的非生命过程相反，即有序性原则。它的重要性是把生物与生命现象的有序性和目的性同系统的结构稳定性联系起来：有序，因为只有这样才使系统结构稳定；有目的，因为系统要走向最稳定的系统结构。这个概念当然与现代科学中的控制论有关，但由于生物和生命现象的高度复杂性，理论生物学家搞一般系统论遇到的困难很大。几十年来一般系统论基本处于概念的阐发，理论的具体和定量结果还很少。

二、近代科学的最新发展对系统科学的贡献

生物生命系统中结构稳定性代表着有序性，但这个稳定性到底是怎么产生的呢？首先给出这方面线索的是普里高津(J. Prigogine)和由他率领的所谓比利时布鲁塞尔学派。他们发现了远离平衡态的稳定结构，也就是所谓“耗散结构”。并认为耗散结构就是一般系统论中要找的具有有序性的系统稳定结构。开放系统熵输出大于输入，系统保留的熵在减少，所以走向有序。布鲁塞尔学派的这些成就把理论生物学推进了一大步，使一般系统论的有序结构稳定性有了严密的理论根据。

德国物理学家哈肯(Hermann Haken)在60年代由研究激光发射机理过程开始，而最终提出他的协同学(Synergetics)理论。该理论认为有序结构的出现并不是非远离平衡态不可，系统可在热力学平衡态下，从无序状态产生有序结构。实际上系统的相空间中存在一个目的环。系统有序状态的点是随时间作往返的振荡的，那就是在相空间有一个封闭的环，这个环就是系统的目的环，若考虑随机涨落，那就是说在相空间的这种点或环不那么清晰，有些模糊了。系统只有在目的点或目的环上才是稳定的，离开了就不稳定，系统自己要拖到点或环上才罢休，这就是系统的自组织。哈肯的贡献在于具体解释上述相空间的“目的点”与“目的环”是怎么出现的。哈肯打破了热力学封闭与开放的隔阂，甩开了经典热力学概念的牵制，指出一个系统从无序转变为有序的关键并不在此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,相互协调和合作,自发产生稳定的有序结构,这就是自组织结构。这样,在不违背热力学第二定律条件下,上述理论沟通了生命系统与非生命系统之间的内在联系,指出了两类系统之间并没有真正严格的界限,表现上的鸿沟是由相同的系统规律所支配。现代科学的这一成就正是通过系统规律把过去断开的链条开始联结起来进行研究,虽然在简单巨系统层次上进行,但其意义是重大的。

另外要提一下, H. Fröhlich 等人在 1967 年开始的工作,他们认为 Haken 的激光器理论也可以用于生命现象,因为活体中存在纵型的偏振动分支,通过代谢供给之能量,即环境供给其能量,当能量超过某一阈值时,形成强激励下的单模相干振动,出现长距离的相位相关,这正是活体具有极惊人的有序性的解释。他们从细胞膜的厚度和声波传播速度得出这种振动频率大约是 $10^{11} \sim 10^{12}$ Hz, 又因为活体细胞膜上存在着由于膜两边钠离子和钾离子的浓度差异,而引起的 10^5 V/cm 的 E 振动必产生电磁波,可算出电磁波是毫米波。A. Z. Smolyamskya 和 R. L. Vilenskaya 用毫米波照射大肠杆菌,发现大肠杆菌合成菌素的活性与波长密切相关,有共振现象。在共振宽度仅 10^8 Hz 左右出现活性高峰。Fröhlich 应用毫米波辐照酵母菌,发现生长速度亦出现共振峰,共振宽度才 10^7 Hz。这些实验证实了 Fröhlich 的设想,把协同学理论直接用于细胞繁殖现象(细胞重建不同于细胞分裂,二者都为细胞繁殖,阐明细胞重建的机制就需要系统学)。

M. Eigen P. Schuster 的“超循环”(Hypercycle)理论是直接建立生命现象的数学模型。他们观察到生命现象都包含许多由酶的催化作用所推动的各种循环所组成的,而基层的循环又组成更高层次的环,即“超循环”,也可以出现再高层次的超循环。达尔文的进化论研究的对象是生物或生命系统,它的进化选择机理的基本条件是生命体的新陈代谢、繁殖(自复制)和遗传变异(突变性)。而 eigen 的超循环理论揭示了在分子层次上,同样亦出现了对于生命现象所据为特征的代谢、自复制和突变性,这就导致了分子层次的进化过程。因此,超循环理论既是一种生命起源的理论,又是一般进化论的机理研究,而且它本身亦是自组织理论的最有力支持。

由以上生命、非生命系统乃至一切系统在一定条件下相关现象研究,我们得到了系统的有序性原则或称自组织原则。

自组织实际上是系统内部、系统与环境相互作用的结果。自组织理论所阐明的系统自稳定作用的机理是负反馈,自复制和机械性稳定。

系统的目的性正是自组织性的结果。系统的目的性不是指系统带有自觉目的,而是具有自组织调节能力,通过反馈,适应环境,保持稳定,这样就呈现某种目的性。

以上的成果是自然科学和数学科学的研究成果,但他们却为系统科学的基础科学——系统学提供了重要的构筑材料。另外,再看看系统的混沌(chaos)现象,看来也有其规律性。日本《触发器》月刊文章题:混沌理论与相对论和量子力学并列为“20 世纪的三大发现”。认为是继相对论、量子力学之后,发生的一次新的科学革命。混沌的英语为 chaos,日本“国语辞典”中对混沌一词的注解是“宇宙形成初期没有天地之别模糊一团的状态”,“势均力敌者针锋相对,无法预料形势将如何变化的状态”,总之,我们暂且认为,混沌是模糊一团的状态,十分模糊而又无规则的状态,或者说是“半途中间”的状态,混沌理论在数学和物理方面深受重视,如今甚至被列为生物现象的课题。例如,水速缓慢流动时叫湍流,水的阻力不大也较容易计算出来,然而,水的流速一大,水中出现漩涡,进而形成“乱流”,在乱流状态中往

往出现“卡曼漩涡”，在这种情况下，许多秩序就会被打乱，难以计算出水的阻力，呈现混沌状态。又如天气预报不准确，这也是混沌现象，难以作长期预报是力学方面的混沌现象。要从数学上解释混沌现象，往往要运用微积分方程。如牛顿动力学方程，70年代后期至80年代后期，人们运用牛顿运动方程来研究各种运动状态，在计算过程中发现了存在“偶然性”的事实，如果加上初值进行计算，也会得出各种计算结果。根据某种计算公式进行计算，也会因给的参数变化，数据也会随之出现混乱。这样一来，原理上成立的数列就将陷入根本不能预测的混沌状态。

所以，混沌作为一个科学术语，指的是以常微分、偏微分或叠代方程描述的确定性动力系统在没有任何外部随机源的情况下，演示出的貌似随机的动力学行为。它不像通常的确定性运动具有的我们所熟悉的三种状态：平衡、周期运动和准周期运动，而是一种始终限于有限区域且轨道永不重复的局部无序而整体有序的复杂运动，它有被描述为具有无穷大周期运动或貌似随机的运动等。有人认为其实质是动力学系统对初始条件的敏感依赖性引起。

然而，随着混沌理论的发展，人们越来越认识到，这种看上去“不可思议”的无序状态实际上并非什么令人吃惊的现象，而是自然界普遍存在的现象，只不过迄今被人忽视了而已。

这样一来，人们就开始从混沌理论的角度广泛地重新看待科学和技术，范围从所有的自然科学现象到社会现象，人的心理状态等社会科学和人文科学领域。有的学者发表研究结果说，实际上，人的神经细胞在某种条件下会出现混沌状态。

把混沌与Random（杂乱）混为一谈是错误的，Random一般是指“混无计划”、“随意”、“任意”、“随机”，还有极端无秩序的“自由性”。而混沌并不是简单的无秩序。事物的现象有以下4种：①不混乱，②开始混乱，③混沌，④杂乱无章（Random），因此有文章题为“模糊之后是‘混沌’”。如果这样来表示混乱的程度，混沌就是Random的前兆，或者说是过渡状态。然而，混沌始终只是过渡状态，并非意味着向Random转化。越是尖端的科学和技术，就越难表明其含义。比如模糊理论（Fuzzy）与含意模糊（Ambiguity）的意思是大相径庭。Fuzzy并非一般所说的模糊（Ambiguity），而是指数值的境界是连续的，同时人的主观可以进入其中。因此，混沌理论和应用是十分引人注目的研究方向，它所揭示的事物性质和规律，都是系统的性质和规律。

以上所讲的现代科学的最新发展，都酝酿着一个新的学科的诞生、成长，一个与自然科学、社会科学相平行的科学，这就是系统科学，这是一门基础科学。

三、系统科学产生的深远意义

从本世纪初以来，自然科学的发展不断地改变着世界的科学图景和自然科学家的思维方式。原苏联哲学家茹可夫称：“如果说19世纪给我们提供了非亚里士多德逻辑学和非欧几里德几何学，20世纪上半叶给我们提供了量子力学和相对论，那么20世纪后半叶，则是一般系统论和理论控制论。它们都彻底地改变了世界科学的图景和当代科学家的思维方式。”从还原论的分析方法到系统论的分析与综合相结合的思维方式，这是人类科学思维方式的一次重大变革。

量子论的先驱普朗克认为：“科学是内在的整体，它被分解为单独的整体不是取决于事物的本身，而是取决于人类认识能力的局限性。实际上存在着从物理到化学，通过生物学和人类学到社会学的连续的链条，这里任何一处都不能被打断的链条”。而系统科学，例如上面谈到的自组织理论尽管在简单巨系统层次上沟通了，但其意义是重大的。在不违背热力学第二

定律的基础上, 自组织理论沟通了两类系统: 生命系统和非生命系统的内在联系, 指出了两类系统之间并没有真正的严格的界限, 主观上的鸿沟是由相同的系统规律所支配。现代科学的这一成就正是通过系统规律把过去断开的链条开始联结起来进行了研究。系统科学就是通过对简单系统、简单巨系统、复杂巨系统的研究揭示出系统所共有的、前所没有揭示出来的共同特性, 将这根链条联结起来进行研究的科学。在科学发展过程中, 这是具有重大意义的转折。

系统科学不仅引起一场科学革命, 同时还引起一场技术革命。在系统科学领域中, 系统工程就是直接用来改造世界的工程技术。现在的社会实践具有很强的综合性、复杂性和动态性, 它不允许我们孤立地和静止地处理问题。例如, 长期以来, 人类对自然界采取了征服和索取的态度, 以至严重到向大自然宣战的地步。但科学理论和实践的发展, 终于使人们明白了, 人类与自然之间应该是协调发展关系, 不是一味索取只顾今天, 不顾明天和后天, 否则人类的生存都将受到威胁, 更谈不上发展了。正是这个原因, 1992年在巴西召开的联合国环境与发展大会上, 提出了全球持续发展的行动纲领, 得到了与会各国的大力支持。

实践作为一个过程, 包括实践前形成的思想、设想、规划、计划、方案、可行性等, 都应进行科学论证, 以使实践目的性建立在科学基础上, 而不是建立在经验基础上, 更不能建立在感情和意志的基础上; 也包括在实践过程中, 要有科学的组织管理和协调, 以保证实践的有效性(效益和效率); 还包括实践后的评估和总结, 检验实践的科学性和合理性, 以便发现新问题, 发展新理论。所有这些都需要利用已有的科学理论和技术去研究和解决, 而且还要处理有可能至今我们尚未遇到和认识到的新问题。在社会实践比较简单的情况下, 上述问题并不显得突出和严重, 但面对现代社会实践的复杂性、综合性、动态性以及实践过程中的科学性、合理性和有效性等问题, 如何组织、协调和管理好社会实践活动, 以取得实践的成功, 就成为一个十分突出和迫切的问题了。如何综合运用人类知识体系(哲学的、科学的、经验的)去组织、协调和管理好社会实践全过程, 以保证实践成功, 并取得最好的效果, 这就是系统工程技术的任务。

§ 1.2 系统科学的理论体系

一、系统科学的体系结构

据钱学森教授的看法, 现代科学技术可分为4个层次: 工程技术、技术科学、基础科学, 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。这可以算是横向的划分。科学技术纵向的划分应该是自然科学、社会科学、数学科学、系统科学、思维科学和人体科学这六大部门^①, 见图1-2-1(该图摘自于钱学森教授的《再谈系统科学的体系》一文)。

物理学、化学、生物学等基础科学在自然科学中的地位与作用是众所周知的。当今的技术科学、工程技术中的最基本、最本质的定理、原理都包含在这些基础科学之中。同样, 作为系统科学的基础科学——系统学, 它也应包括一切系统的共同规律, 对系统的研究具有指导意义的原理、原则、定理等。系统学的研究着眼于系统的整体功能, 并注意系统内部子系统的关系和层次结构。从系统环境、系统结构、系统功能三者的相互关系入手研究系统

^① 钱学森教授后来又撰文将现代科学技术划分成九大部门, 除上述6个外, 再加上军事科学、行为科学和文艺理论。

的普遍规律；从分析和综合的统一性出发，研究影响和改变系统结构和系统功能的一般途径。系统学也研究系统和信息的关系。它从开放系统与外部环境的信息交换、系统内部的信息传递、存贮和变换，以及相应的信息熵的改变来研究系统的结构关系、有序性和系统演化的趋势。因为系统学是系统科学的基础科学，它从系统这个统一概念出发，将其它科学中从不同角度研究系统特性的基本理论加以总结，上升到系统科学的基础科学高度。

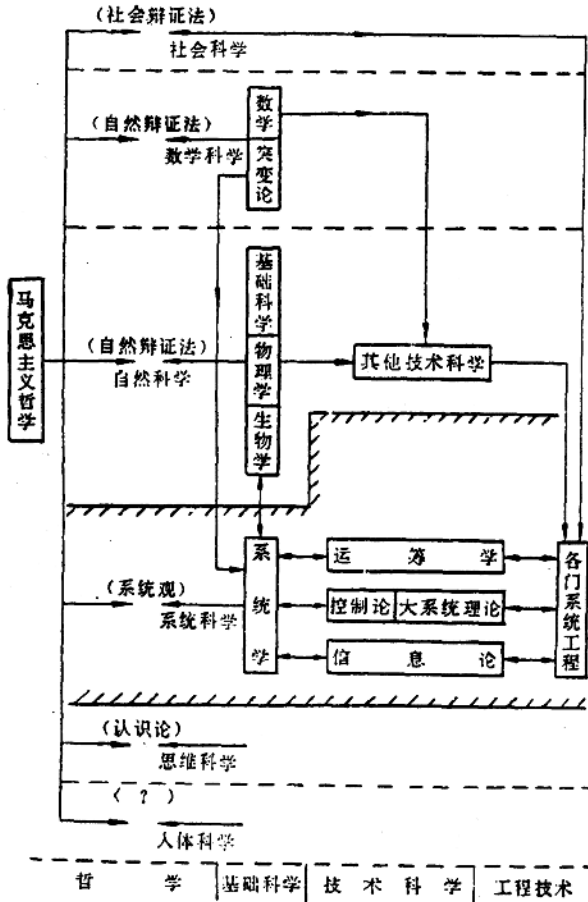


图 1-2-1 科学技术的体系结构

在基础科学的下一层次是技术科学。面对各类系统的公有的技术科学是运筹学。除此之外，各类系统离不开信息的传输与反馈，离不开对系统的控制。因此控制论、信息论也是其技术科学之一。最后的层次就是工程技术层次，即各类系统工程技术，它们除具有公共的技术科学之外，各类系统工程又以各专业的技术科学为其专业基础，例如环境保护系统工程以环境科学为其技术科学，而社会系统工程以社会学、未来学为其技术科学。

二、系统的一般概念

(一) 系统

何谓系统,由于思维角度不同,专业研究的侧重不同,所以对系统的内涵有不同的理解。我们取之大家具有共识的定义。

钱学森先生对系统所下的定义是:“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,而这个系统本身又是它所从属的更大系统的组成部分。”

由以上定义,可概括出系统中的若干概念:

- 系统与要素的关系——系统由诸要素(组成部分)组成的整体。
- 系统的结构——诸要素相互作用、相互依赖所构成的组织形式,这就是系统的结构。
- 系统的层次——系统可以划分为不同层次,层次的划分具有相对性。任何所研究的系统是更高级系统的组成要素,但任何所研究的系统的要素又是更低一级系统,即所谓“向上无限大,系统变要素;向下无限小,要素变系统。”

- 系统的功能——系统具有目的性或功能性。这是系统与环境相互作用的表现形式。
- 系统的环境和边界——一个系统以外的又与系统有关联的所有其它部分叫做环境。环境与系统的分界叫做系统边界。

在控制论中,也往往用以下集合形式来描写系统:

$$S = \{X, U, Y, \sigma, \beta\}$$

其中 X ——状态的集合,或称状态向量,它是一组相对独立的,反映系统内部性质的变量集合;

U ——输入变量的集合;

Y ——输出变量的集合;

σ ——状态函数,反映系统状态变量的变化规律,利用状态函数建立系统的状态方程;

β ——输出函数,反映输入与输出变量的关系函数,可建立系统的输出方程。

若将上述概念再进一步推广,写成

$$S = \{X, U, Y, M, \sigma, \beta\}$$

其中 M ——信息量的集合;

σ ——不仅代表状态变量的变化规律,也代表信息量的变化规律。

以上形式亦可以作为对一般系统的一种表述形式。当变量和各函数集合以不同的具体形式来表述时,就形成不同的数学模型的运用。

有时,为了形象地描述系统,亦有用图形形式描绘一般的系统及其特征,见图 1-2-2。它形象地表述系统的目标、系统的边界,系统的要素及之间的联系结构概念,系统的环境,系统的反馈关系等。

(二) 系统的特征

一般系统都有下述特性:

1. 系统的组成性或集合性

系统必须由二个或二个以上的有关连的要素组成。要素反映了人们感兴趣的实际对象的一些属性。例如,森林资源系统是由以下要素组成:林木,林地,及林区内的野生动物、植物。

要素的集合之所以能构成一个系统,是建立在各个要素之间、要素与整体之间、以及整体与环境之间有一定的相互联系——相互作用、相互影响、相互渗透、相互制约,这就是系

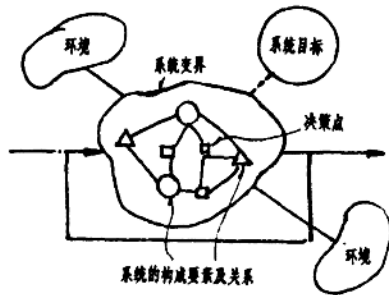


图 1-2-2 系统

统的内部或外部联系。系统联系的方式也是多种多样的,如结构联系、起源联系、信息联系、因果联系等,或概括为物质、能量、信息的联系。

2. 系统的相关性或称结构性

由于系统中要素之间、要素与整体之间,以及整体与环境之间的相关联系,而构成系统的结构。这就是相关性或结构性。由于系统的结构不同,使系统出现性质、数量、排列上的不同,即系统具有不同的类别和差异。

在系统的发展中,要素是活动的,结构则是相对稳定的,结构通过对要素的制约,使系统保持稳定。因此结构与要素相比,在系统中占有更重要的地位。通常,要素的变动是系统发生改变的原因,而结构发生变动则是系统发生质变的标志。系统的结构又决定着系统的功能。如石墨和金钢石,具有相同的要素,不同的结构,因此在性质上出现了大的差异。结构的好坏又是直接由要素间的协调作用体现出来的。优质的要素,如协调不好,形成的结构和功能都不好。反之,质量差一点的要素,如果协调得好,也可能形成较好的结构和功能。例如,土地利用中的综合经营,充分认识农、林、水三者的互相依存、互相促进的相互关系,农业是基础、水利是命脉、林业是屏障,三者相互作用、互为因果,形成一种良性结构关系。在林业产业结构中,必须调整单一的木材结构,发挥森林中多种资源的优势。因此,调整林业产业结构应当作为发展林业生产的一项重要战略措施来抓。

在这里,需要特别提到系统的结构与功能的关系。系统在特定环境中发挥作用的能力叫做系统的功能。是系统把所接受的作用(输入),通过结构转换为输出的方式。因此,结构是系统的内在构成,是横向的,相对静止的;功能是系统的外在行为,是纵向的,动态的。这种在与环境相互作用中表现出来的系统功能的过程,我们亦称为系统的行为。结构联系着要素,功能联系着环境,结构决定了功能,系统就是结构与功能的统一体。例如生物学的研究中,存在着形态学和生理学,前者研究生物体的形态与结构,其中包括分类学、解剖学、组织学、细胞学、胚胎学;后者主要研究活的生物体中发生的过程与功能,如细胞生理、代谢、行为、形态发生等。

3. 系统的相对性或称层次性

要素的组织形式是系统的结构,而结构又往往分为不同的等级层次。例如,森林生态系统内的生物层次主要由高度不同的乔木层、灌木层、草本层、地被层等4个层次组成。相应地还有不同的动物和昆虫栖息其间。林内小生境的成层性,又反作用于各层动植物种群的形成和发展,形成一个协调、稳定的生态系统。复杂系统的一个重要特征就是它的层次性。在系统的多层次结构中,高层次支配低层次,决定着系统的性质。低层次的要素不会直接对系统发生作用,它必须先作用于高层次的要素,并通过它来影响整体。

4. 系统的目的性

要素之所以能集成一个系统,在于系统的目的性。这也是区别各类系统的重要标志。要达到系统的目的,系统都表现为具有一定的功能。对于复杂系统,其目标也有层次性,因此需要一个指标体系来描述系统的目标。

5. 系统的环境适应性

系统的环境包括自然环境、经济环境、社会环境。系统必须适应环境的变化才能生存,否则只能导致系统的崩溃、瓦解。另一方面,系统也可能改变环境。系统与环境的相互作用,就表现为系统的功能。

由上述系统的特点,也可归纳出系统论的基本原则:

(1) 系统的整体性原则 这是一个很基本的原则,即整体的功能大于部分之和。系统中的要素,一旦被有机地组织起来,将获得整体的新质,系统获得了新的功能。系统的新质的秘密在于结构的有机性。系统的整体新质与规律只存在于组成它的要素的相互联系和相互作用之中。

(2) 系统的相关性原则 系统内的要素之间、要素与系统、系统与环境之间相互联系、影响、作用和制约。

(3) 系统的有序性原则(目的性原则或自组织性) 系统的结构稳定性代表着有序性。从贝塔朗费研究的生物和生命现象,到普里高津的远离平衡状态的稳定结构,到哈肯的有序结构的产生可以在热力学平衡态下产生,都证明了系统的有序性是一条适用于任何类别系统的普遍规律。

(4) 系统的动态性原则 由于系统具有自组织性,它对于环境的作用不是被动地被接受,而是通过内部活动来不断调整内部组织,以协调与环境的关系,达到有序,或称熵减少。因此系统不可能保持静态,这就形成了系统的动态性原则。

除此之外,系统的混沌理论。自组织理论和混沌理论是系统科学发展中的二个重大突破,也是系统的普遍规律研究的两个重要方向。混沌是普遍存在而又极其复杂的现象。混沌理论目前正在形成发展中。

三、系统的分类

按照不同的原则,系统可以有不同的划分方法。

1. 按人与自然关系划分 自然系统、人造系统,以及二者结合的复合系统。

2. 按系统与环境的关系划分 开放系统与封闭系统。

3. 按系统组成的物质形态划分 实物系统、概念系统。而美国行为科学家詹姆斯·G·米勒认为按系统的物质性可划分成三类系统:概念系统(不是时空中的实际系统,而是观察者、科学家或书本上的反映)、实际系统(包括生命系统和非生命系统,它们在三维空间中占据一定空间的系统)、抽象系统(社会科学家所用的一种抽象)。

4. 按专业学科研究对象的不同而划分的各类系统 如物理系统、生物系统、生态系统等。

5. 按系统的本质属性划分 从系统内子系统的关系角度可划分为简单系统与复杂系统;从子系统的数量划分,又可划分为小系统、大系统(子系统数量几十个、数百个),以及巨系统(子系统数量成千上万、上百亿、万亿)。

简单系统是指组成系统的子系统数量较少,因而它们的关系也比较简单,或者尽管子系统数量多或巨大,但之间的关联关系比较简单。简单系统也可划分为简单小系统、大系统和巨系统。对于某些非生命系统,例如一台测量仪器,可视为小系统,这一类系统用传统的数学、物理学、化学等知识可以很好地描述;一个仅考虑产品生产的普通工厂,可视为一个大系统,可以用控制论、信息论和运筹学的部分内容加以研究。总之,研究这些简单系统可以将各子系统之间的相互作用直接综合为系统整体的功能。简单巨系统的子系统数量巨大,但子系统差别较少,因而反映出此类系统的子系统种类少,关联关系比较简单。例如激光系统、中国的围棋等,对于这样的系统,由于子系统往往具有共同特点,因此可以把亿万个子系统组成的巨系统的功能略去细节,而用19世纪后半叶发展起来的统计力学进行概括处理,处理这种系统的理论近数十年来发展很快,如耗散结构理论和协同学。

另一类系统称为复杂系统。它表现在系统内部子系统数量多且之间有很强的耦合关系,反

馈结构复杂,输入与输出呈现非线性特征,因此会出现极限环甚至于混沌现象。或将上述特征简单称为高阶次、多回路、非线性。复杂系统中,如果子系统数量非常大,成亿、上百亿、千亿,而且种类很多,有层次结构,子系统之间的关系又很复杂,就称为复杂巨系统。如果系统又是开放的,与外界有能量、物质、信息的交流,这样的系统称为开放复杂巨系统。目前研究复杂巨系统的理论还处于探索阶段,方法还不很成熟。例如人体系统、地理系统、人脑系统、星系系统都是复杂巨系统。

不包括人的意识与活动在内的系统,成为自然系统。包括人的因素的系统,称为社会系统。社会系统显然是复杂系统。社会系统(例如政治、军事、科学技术,人口系统等)可称为特殊的开放的复杂巨系统。这一类系统的复杂性不仅是子系统种类多,各有其定性模型,而且子系统间及与外界存在着各种方式的信息交流和积累;子系统的结构也在随着系统的发展而不断变化。社会系统的基本单元——人,其本身就是一个复杂巨系统。人是有意识、有主观能动性的。人的行为是决定社会系统行为的非常重要的基础。这就使得社会系统中不同行为的人或者子系统之间的关系异常复杂。因此,社会系统的规律性往往复杂多变,难以把握。

从不同的角度、不同的出发点,可以对系统进行不同的分类。因此,除上述分类外,还可以进行很多的分类方法,这里就不再列举了。

§ 1.3 系统工程及其发展与演化

一、系统工程概述

用系统的思想以及定性、定量的系统方法,包括计算机、人工智能等技术处理大型复杂系统问题,无论是系统的设计或建立,还是系统的经营管理,都可以统一地看成是一类工程实践,统称为系统工程(Systems Engineering,缩写SE)。

由于系统工程是一门新兴的交叉学科,其研究领域也在扩大,下面列举国内外权威人士或著作对系统工程所作的解释,为我们认识“系统工程”提供线索和参考。

钱学森教授认为:“系统工程是组织管理系统的规划、设计、制造、试验和使用的科学方法,是一种对所有系统都有普通意义的科学方法。”

日本学者三浦武雄指出:“系统工程与其它工程学不同之处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边缘科学。因为系统工程的目的是研究系统,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。为了圆满解决这些交叉领域的问题,除了需要某些纵向的专门技术以外,还要有一种技术从横向上把它们组织起来,这种横向技术就是系统工程。换句话说,系统工程就是研究系统所需的思想、技术、方法和理论等体系化的总称。”

美国的百科全书(1975年)介绍:“系统工程研究的是怎样选择工人和机器的最适宜的组合方式以完成特定目标。”

大英百科全书(1974年)介绍:“系统工程是一门把已有的学科分支中的知识有效地组合起来,以解决综合性的工程问题的技术。”

苏联大百科全书(1976年)介绍:“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。”

从上述的各种定义,可以概括出,系统工程既是“组织管理系统”的科学方法,也是

“把已有学科分支中的知识有效地组合起来，以解决综合性的工程问题的技术。”由此，系统工程的应用涉及到一切学科领域，尤其是其交叉领域。它是把自然科学和社会科学、军事科学、经济理论、人文科学等领域的某些思想、理论、方法、策略和手段根据总体协调的需要，有机地联系起来，把人们的生产、科研和经济活动等有效地组织，应用定性、定量分析相结合的方法，以及计算机软硬件技术、知识工程技术等，对系统的构成要素、组织结构、信息交换和反馈控制等功能进行分析、设计、制造和服务，从而达到最优设计、最优控制和最优管理的目的，使局部和整体之间的关系协调配合，以实现系统的综合优化。

系统工程是一门工程技术，但它与传统的工程，例如机械工程、电子工程、水利工程等其它工程学的某些性质不尽相同。上述各门工程学都有其特定的工程物质对象，而系统工程则不同，任何一种物质系统都可以作为它的研究对象，而且还不限于物质系统，它亦可以包括社会经济系统、经营管理系统、军事指挥系统等。

系统工程在自然科学与社会科学之间架设了一座沟通的桥梁。现代数学方法、计算机技术和知识工程技术，通过系统工程，为社会科学研究增加了极为有用的定量方法、模型方法、模拟实验方法和优化方法。系统工程为从事自然科学的工程技术人员和从事社会科学研究人员的相互合作开辟了广阔的道路。

如果将上述应用称为系统工程的“软”应用，那么，系统工程作为各类工程的“接口”工程，利用多学科知识、各种技术方法的交叉结合，解决综合性的工程问题，亦可称为系统工程的“硬”应用。例如，利用生物手段解决环境问题，并产生新的能源，这是一个典型的环境系统工程问题。又如，利用计算机接口技术、各类传感器的应用，对系统各模拟量的信息采集，通过计算机与控制部件的接口实现对系统的监测、控制。

二、系统工程方法论的发展与演化

在系统科学体系中，系统工程就是直接用来改造世界的工程技术。人类是通过社会实践来改造世界的，社会实践本身就是个系统问题，具有很强的综合性、复杂性和动态性，而且是人参与的复杂物质体系。现在的问题是，如何综合运用人类知识体系（哲学的、科学的、经验的）去组织、协调和管理好社会实践全过程，以保证实践的成功，并取得最好的效果。实质上，这就是如何组织、管理系统的问题。这门组织、管理系统的技术就是前面提到的系统工程。系统工程就是组织、管理系统的研究、规划、设计、制造、试验和使用的技术，是贯穿社会实践全过程的技术。这项技术不同于已有的其它技术，它是一项综合性的整体技术。

（一）系统工程方法论的简史——第一阶段：运筹学（20世纪40年代）（Operation Researchs, 缩写 OP）

系统工程方法论是在科学发展由高度分化开始走向综合，传统的还原论思想和方法无法解决一些涉及复杂系统问题时开始兴起的。尽管最早在30年代贝塔朗费已经提出一般系统论的基本思想，但是能解决不少实际问题，而且从方法论意义上属系统研究方法最先出现的还是30年代末，40年代初的运筹学方法。它从解决一些武器、装备的合理应用的问题开始而形成自己一套方法论，它的核心是将问题化成数学模型，并寻求其最优解。

运筹学在二次世界大战期间，首先由英国应用制定作战计划，防空雷达的配置与应用等，接着美国陆军于1944年发明自动化防空火炮系统。参加这项工作的一位数学家维纳（N. Wiener）教授（信息论创始人）战后从这一发明中总结归纳出三个要素：信息、系统、控制，后来发展为被今天称之为老三论的“信息论”、“系统论”、“控制论”。

(二) 霍尔的“系统工程”三维结构

“系统工程”这一名词的最早提出是在 20 世纪 40 年代, 美国贝尔电话公司在发展通讯网络时为缩短科学技术从发明到投入使用的时间, 认识到不能只注意电话机和交换台站等设备, 更需要研究整个系统, 于是采用了一套新方法, 首次提出“系统工程”一词。

40 年代后期, 信息论、控制论的诞生和应用, 为 SE 的发展奠定了理论基础。电子计算机的出现与应用, 为 SE 提供了强有力的运算工具和信息处理手段, 成为 SE 的重要物质基础。

1957 年, 美国密执安大学的古德 (A. H. Goode) 和麦科尔 (R. E. Machal) 两位教授合作出版了第一部以“系统工程”命名的书。1958 年美国海军特种计划在研制“北极星”导弹的实践中, 提出并采用了“计划评审技术”(PERT), 使研制工作提前二年完成, 从而把系统工程推进到管理领域。1965 年, 麦科尔又编写了《系统工程手册》一书。而在 1969 年美国学者霍尔 (A. D. Hall) 提出的系统工程三维结构是影响较大而且较完善的方法, 至此, 系统工程初步形成了一个较为完整的理论体系。Hall 的逻辑维深化了运筹学的方法论, 此外把工程项目的设计、制造运算等过程都用工作维将其规范化了。同时, 霍尔的知识维 (图 1-3-1) 强调了知识的应用。系统工程最有名的应用例子大概是阿波罗宇宙飞船的设计、研制和管理。这套 SE 方法论在我国 60 年代起导弹部门实际上已经应用, 而且在组织工作方面形成我国的总体设计部门。由于它的富有成效的工作, 周恩来总理生前曾希望将该技术推广到国民经济其它部门中去。从 1978 年起由钱学森等在全国范围内宣传、推广后, 霍尔的系统工程方法论一直为我国大多数专家、学者及一些实际工作者所遵循。

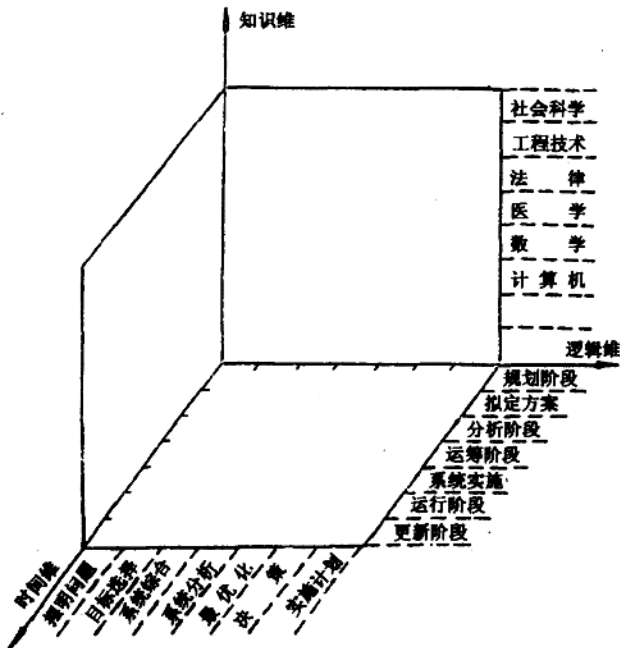


图 1-3-1 SE 霍尔三维结构方法论

(三) 系统分析 (Systems Analysis, 缩写 SA) 的方法论

与 OR、SE 大体相同时间由美国 RAND 公司 (是美国最著名的政策智囊机构, 译名是兰

德公司)在20世纪50年代提出的系统分析的方法论。从思路上看与OR和SE中逻辑维大体相同。只是由于RAND公司在50、60年代的注意力不全在工程设计,而主要解决政府和国防部门所面临一些复杂的社会政治和军事问题,其中最著名的例子可以算是麦克纳马拉提出的规划计划预算系统(PPBS)。美国国防部1961年首先应用,1965年美国约翰逊总统命令将PPBS用于联邦政府其它部门。

(四) 系统动力学 (Systems Dynamics, 缩写 SD)

最初是由美国麻省理工学院(MIT)的J. W. 福瑞斯特教授1956年在福特基金会,史隆基金会的赞助下研究出的一种新颖的系统仿真方法。它主要用于复杂系统,能方便地描述和运行多变量、多重反馈、非线性的动态系统。它是对系统结构要素间因果关系的定性分析基础上建立系统的结构模型,并对之量化成巨大的差分方程组群进行仿真运行。并可利用改变模型中对应于某些政策(经济的、政治的、技术的)的相应结构或参数进行重复仿真,以达到政策实验的目的,因此也被誉为政策实验室。著名的《世界动力学》、《增长的极限》、《趋向全球的平衡》等书,就是该方法论对世界性问题的研究成果。

早在20多年前,福瑞斯特教授运用系统动力学方法就预知美国经济将于90年代中期跌入谷底,而与美国在经济上往来密切的其它国家,亦将相继下跌。福瑞斯特教授并不比经济学家更懂经济学,而是深入思考经济变化背后的本质。

90年代畅销欧美惊动企业界及管理界的管理学巨著《第五项修练——学习型组织的艺术与实务》(The Fifth Discipline—The Art and Practice of the learning Organization)由麻省理工学院福瑞斯特教授的学生彼得·圣吉(Peter M. Senge)博士完成。该书提出了现代企业的一种崭新模式——学习型组织。并提出为到达上述目标,企业和个人必须进行五项修练:自我超越(Personal Mastery),改善心智模式(Improving Mental Models),建立共同愿景(Building Shared Vision),团队学习(Team Learning),系统思考(Systems Thinking)。作者提出“系统思考”,以破解当代片断思考的危机。并以系统思考为建立学习型组织的鹰架,将其他四项核心修练贯注其中。当此五项修练逐渐聚合,便能释放出组织中潜藏的巨大能量。而研究和训练“系统思考”的方法就是系统动力学,并配以计算机模拟技术。该书于1992年荣获世界企业学会(World Business Academy)最高荣誉的开拓者奖(Pathfinder Award),以表彰其开拓管理新典范的卓越贡献。美国商业周刊也于同年推崇作者为当代最杰出的新管理大师之一。

(五) 软系统方法论

过分的量化,过分的数学模型化难以解决一些社会实际问题,如日本计划的第五代计算机遇到的困难。人们开始反思。1984年国际应用系统分析所(IIASA)专门组织了一个讨论会名为“运筹学和系统分析过程的反思”,与会者中有人认为这些学科所以在某些问题上不能很好应用,这主要是他们的方法论不对,处理一些问题的方法太硬,定性考虑不够,把实施和分析分开了。他们认为,霍尔三维结构不适用于以建立和管理“软件系统”为目的的社会科学、管理科学等软科学领域;而适用于研制“硬件系统”为目的的自然科学,工程技术等“硬科学”领域。故有人称霍尔三维结构为“硬科学”的系统工程方法论。这里特别提到英国的切克兰德的观点,他把OR、SE、SA和SD所使用的方法论叫硬系统方法论,而在1981年自己提出一种软系统方法(SSM),他认为用他的SSM解决一些结构不良的社会性问题效果比硬的方法论要好,它是用概念模型代替数学模型,使思路更为开阔,用可行满意解来代替最优解又是价值观方面的重要变化。

与SSM同类型的还有其它一些软的方法论也都出现在70年代到80年代,例如用于对付复杂性系统的方法论有定性SD,社会技术系统设计,管理控制论和组织控制论;用于对付多元价值系统的方法论有战略假设表面化和验证(SAST),战略选择发展与分析(SODA),对话式计划(IC),社会选择(SC)等,到90年代初西方又提出关键系统思考(CSH)和整体系统干预法(TSI)。

(六) 东方系统方法论

1. 日本榎木义一等人1988年开始提出的Shinayaka系统方法论 他用于处理不良结构的系统问题。他一方面借鉴过去处理不良结构问题的许多技术和方法,另一方面利用对话和智能化的方法将人工智能和人的直接判断综合进去,他强调人和计算机的结合,但以人为中心。

2. 复杂巨系统的综合集成方法及综合集成研讨厅 这个问题笔者有专著介绍(见参考文献①),这里就不多说了。其基本思路亦是定性与定量的结合;将专家群体,数据和多种信息以及计算机技术有机结合;把多种学科的理论与人的经验知识的结合;宏观与微观研究的结合;各类人员的结合;人与计算机的结合。并进一步钱学森教授提出了“从定性到定量的综合集成研讨厅”技术来解决复杂巨系统问题。

三、国内外系统工程状况及启示

自20世纪70年代末至80年代初,系统工程在我国首次提出以来,已经过了十几个年头了。系统工程学科的发展也经历了启蒙、发展、高潮、稳定平缓的发展过程。总结我国的发展现状、了解国外的新的动向,从而描绘出当今时代系统工程的新的领域和方向,为该学科在我国的再度深入,新一轮的高涨,真正的广泛,在学术水平上更上一层楼,跟上世界技术革命的脉搏显然是有益的。

(一) 我国系统工程的现状

1980年中国系统工程学会建立以来,共召开了八届年会,先后成立了17个学术组织,还设置了学术工作、国际学术交流、编辑出版、教育与普及、青年工作、咨询工作等7个工作委员会。全国省、直辖市、自治区级成立的学会会有19个,省政府及中心城市级学会14个。发展了170多个团体会员和近7000个人会员。截至1993年底,中国系统工程学会开展国内外学术交流110余项,其中24项国际交流。在华召开国际会议7次。其研究论文每年达千篇左右,研究成果遍及各个领域。系统工程在国民经济建设中大有可为已得到充分的证明,系统科学作为一门一级学科的地位已在我国学术界所确认。

据笔者所知,全国共有31个以上的大学设有工程系或研究所,或系统工程学院。几乎所有的大学都有系统工程教研室或研究室,或开设了系统科学、系统工程类的课程。作为系统工程人员的个人的素质,应具有系统科学、系统工程的知识,某个或多个专业学科知识,以及良好的计算机应用和编程技术,这已是无可争议的事了。因此,在大学的工程系(学院)学生的课程设置方面加重了计算机课程的份量。例如长沙的中国国防科技大学系统工程专业的学生,除系统科学、系统工程类的课程,管理类的课程外,计算机课程达8~9门。

实际上,50年代以来,我国高校的专业划分思路基本还是延袭50年代初期的模式,或者说是“苏联”的模式。由于40年来教研室、教师的结构划分已形成了“既成事实”,想改也难。然而,由于各学科划分得很细,使各学科之间的协调及总体综合却留下了空白,在这种背景下,或者说在我国特殊国情下,系统工程人员的作用及地位,显得格外必要和重要。这