

系统工程普及讲座汇编

(上)

5
2

中国科协普及部

编者按：系统工程是一门发展中的学科，我国科技工作者已着手进行实验，将系统工程用于工程计划的协调与平衡、工业企业全面质量管理、人口控制计划以及军事装备规划等方面，并已取得可喜的成绩。系统工程已同我国现代化建设各个领域的组织管理工作紧密联系在一起。

党中央号召要不断提高广大职工的管理水平与科学技术水平。我们根据中国科协与中央电视台联合举办的电视科技讲座第二讲《系统工程普及讲座》的讲稿整理汇编成这本《系统工程普及讲座汇编》。全部讲座是由中国自动化学会、中国航空学会、中国铁道学会、中国系统工程学会等单位承担。

《汇编》中所讲的内容仅做为目前我国各级领导干部、管理人员以及广大科技工作者学习系统工程的人门。

由于我们的水平有限、编辑时间紧迫，如有不当之处望广大读者批评指正。

目 次

I 概括介绍

系统思想与系统工程	1
系统工程的一些基本概念、观点和方法步骤	7
农业系统工程	14
军事系统工程	21

II 系统工程的方法

系统工程的工具及方法	30
计划协调技术	44
大系统理论的对象、内容和方法	101

系统思想和系统工程

钱学森 王寿云

今天是中央电视台系统工程讲座的第一讲,题目叫《系统思想和系统工程》,是个开场白,稿子是王寿云同志和我写的,由我来讲。

系统作为一个概念既不是人类生来就有,也不是象有些外国人讲的那样,是二十世纪四十年代突然出现的東西。系统概念来源于古代人类的的社会实践经验,所以一点也不神秘。人类自有生产活动以来,无不在同自然系统打交道。《管子》《地员》篇、《诗经》农事诗《七月》、秦汉氾(音四)胜之著《氾胜之书》等古籍,对农作与种子、地形、土壤、水分、肥料、季节、气候诸因素的关系,都有辩证地叙述。齐国名医扁鹊主张按病人气色、声音、形貌综合辨症,用砭(音边)法、针灸、汤液、按摩、熨贴多种疗法治病;周秦至西汉初年古代医学总集的《黄帝内经》,强调人体各器官的有机联系、生理现象和心理现象的联系、身体健康与自然环境的联系。战国时期秦国李冰设计修造了伟大的都江堰,包括“鱼咀”岷江分水工程、“飞沙堰”分洪排沙工程、“宝瓶口”引水工程三大主体工程 and 一百二十个附属渠堰工程,工程之间的联系关系处理得恰到好处,形成一个协调运转的工程总体。我国古天文学很早就揭示了天体运行与季节变化的联系,编制出历法和指导农事活动的廿四节气。所有这些古代农事、工程、医药、天文知识和成就,都在不同程度上反映了朴素的系统概念的自发应用。人类在知道系统思想、系统工程之前,就已在进行辩证地系统思维了,这正如恩格斯所说,“人们远在知道什么是辩证法以前,就已经辩证地思考了”(《马克思恩格斯选集》,第三卷,第182页)。

朴素的系统概念,不仅表现在古代人类的实践中,而且在古中国和古希腊的哲学思想中得到了反映。古中国和古希腊唯物主义思想家都从承认统一的物质本原出发,把自然界当作一个统一体。古希腊辩证法奠基人之一的赫拉克利特(约公元前460—370),在《论自然界》一书中说过:“世界是包括一切的整体。”古希腊唯物主义者德谟克利特(约公元前540—480)的一本没有留传下来的著作名为《宇宙大系统》。公元前六世纪至五世纪之间,我国春秋末期思想家老子强调自然界的统一性(见《老子》二十五章);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(见任继愈主编《中国哲学史》第三册,第273页)。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。古代辩证唯物论的哲学思想包含了系统思想的萌芽。

古代朴素唯物主义哲学思想虽然强调对自然界整体性、统一性的认识,却缺乏对这一整体各个细节的认识能力,因而对整体性和统一性的认识也是不完全的。恩格斯在《自然辩证法》中指出:“在希腊人那里——正因为他们还没有进步到对自然界的解剖、分析——自然界还被当作一个整体而从总的方面来观察。自然现象的总联系还没有在细节方面得到证明,这种联系对希腊人来说直接的直观的结果。这里就存在着希腊哲学的缺陷,由于这些缺陷,它在以后就必须屈服于另一种观点”(《马克思恩格斯选集》,第三卷,第468页)。对自然界这个统一体各个细节的认识,这是近代自然科学的任务。

十五世纪下半叶,近代科学开始兴起,力学、天文学、物理学、化学、生物学等科目逐渐从混为一体的哲学中分离出来,获得日益迅速的发展。近代自然科学发展了研究自然界的独特的分析方法,包括实验、解剖和观察,把自然界的细节从总的自然联系中抽出来,分门别类地加以研究。这种考察自然界的方法移植到哲学中,就成为形而上学的思维。形而上学的出现是有历史根据的,是时代的需要,因为在深入的、细节的考察方面它比古代哲学是一个进步。但是,形而上学撇开总体的联系来考察事物和过程,因而它就“以这些障碍堵塞了自己从了解部分到了解整体、到洞察普遍联系的道路”(恩格斯,《马克思恩格斯选集》,第三卷,第468页)。

十九世纪上半期,自然科学已取得了伟大的成就。特别是能量转化、细胞和进化论的发现,使人类对自然过程的相互联系的认识有了很大提高。恩格斯说:“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。描绘这样一幅总的图画,在以前是所谓自然哲学的任务。而自然哲学只能这样来描绘:用理想的、幻想的联系来代替尚未知道的现实的联系,用臆想来补充缺少的事实,用纯粹的想象来填补现实的空白。它在这样做的时候提出了一些天才的思想、预测到一些后来的发现,但是也说出了十分荒唐的见解,这在当时是不可能不这样的。今天,当人们对自然研究的结果只是辩证地即从它们自身的联系进行考察,就可以制成一个在我们这个时代是令人满意的‘自然体系’的时候,当这种联系的辩证性质,甚至迫使自然哲学家的受过形而上学训练的头脑违背他们的意志而不得不接受的时候,自然哲学最终被清除了。”(《路得维希·费尔巴哈和德国古典哲学的终结》,《马克思恩格斯选集》,第四卷,第241页)十九世纪的自然科学“本质上是整理材料的科学,关于过程、关于这些事物的发生和发展以及关于把这些自然过程结合为一个伟大整体的联系的科学”(引文同上),这样的自然科学,为唯物主义自然观建立了更加坚实的基础,为马克思主义哲学提供了丰富的材料。马克思、恩格斯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。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,也就是系统思想。系统思想是辩证唯物主义的内容,绝不是国外一些人所说那样是二十世纪中叶的新发现和现代科学技术独有的创造。

当然,现代科学技术对于系统思想方法是有重大贡献的。第一个贡献在于使系统思想方法量化,成为一套具有数学理论、能够定量处理系统各组成部分联系关系的科学方法;第二个贡献在于为量化系统思想方法的实际应用提供了强有力的计算工具——电子计算机。这两大贡献都是在二十世纪中期实现的。

社会实践活动的大型化和复杂化,要求系统思想方法不仅能定性,而且能定量。解决现代社会种种复杂的系统问题,对材料的定量要求越来越强烈,这尤其表现在军事活动中,因为战争中决策的成败关系到国家民族的生死存亡。第二次世界大战是定量化系统方法发展的里程碑。这次战争在方法和手段上的复杂程度较以往的战争有很大增长,交战双方都需要在强调全局观念、从全局出发合理使用局部、最终求得全局效果最佳的目标下,对所拟采取的措施和反措施进行精确的定量分析,才有希望在对策中取胜。这样一种强烈的需要,以极大的力量把一大批有才干的科学工作者吸引到拟订与评价战争计划、改进作战技术与军事装备使用方法的研究工作中,其结果就是定量化系统方法及强有力的计算工具电子计算机的出现。并成功地应用于作战分析。战后,定量化系统方法开始广泛地用来分析工程、经济、政治领域的大型复杂的系统问题。一旦取得了数学表达形式和计算工具,系统思想方法从一种哲学思维发展成为专门的科学。

现在我们把以上所说的再小结一下。恩格斯说:“思维既把相互联系的要素联合为一个统一体,同样也把意识的对象分解为它们的要素。没有分析就没有综合。”(《反社林论》,《马克思恩格斯选集》,第三卷,第81页)系统思想是进行分析与综合的辩证思维工具,它在辩证唯物主义那里取得了哲学的表述形式,在运筹学和其它系统科学那里取得了定量的表述形式,在系统工程那里获得了丰富的实践内容。古代农事、工程、医药、天文方面的实践成就,建立在这些成就之上的古代中国和希腊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,由此产生的形而上学自然观(把自然界看做彼此隔离、彼此孤立、彼此不相依赖的各个事物或各个现象的偶然堆积);十九世纪自然科学的伟大成就,以及建立在这一成就基础之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统一整体,其中各个事物、现象是有机地相互联系、相互依赖、相互制约着的);二十世纪中期现代科学技术的成就,为系统思维提供的定量方法和计算工具;这就是系统思想如何从经验到哲学到科学、从思辩到定性到定量的大致发展情况。

二

下面我们来讲讲系统工程,也就是处理系统的工程技术。

从二十世纪四十年代以来,国外对定量化系统思想方法的实际应用相继取了许多个不同的名称:运筹学(OPERATIONS RESEARCH)、管理科学(MANAGEMENT SCIENCE)、系统工程(SYSTEMS ENGINEERING)、系统分析(SYSTEMS ANALYSIS)、系统研究(SYSTEMS RESEARCH),还有费用效果分析(COST-EFFECTIVENESS ANALYSIS)等等。他们所谓运筹学,指目的在于增加现有系统效率的分析工作;所谓管理科学,指大企业的经营管理技术;所谓系统工程,指设计新系统的科学方法;所谓系统分析,指对若干可供选择的执行特定任务的系统方案进行选择比较;如果上述选择比较着重在成本费用方面,即所谓费用效果分析;所谓系统研究,指拟制新系统的实现程序。现在看来,由于历史原因形成的这些不同名称,混淆了工程技术与其理论基础技术科学的区别,用词不够妥当,认识也不够深刻。国外曾经有人试图给这些名词的涵义以精确区分,但未见取得成功。

用定量化的系统方法处理大型复杂系统的问题,无论是系统的组织建立,还是系统的

经营管理,都可以统一地看成是工程实践。工程这个词十八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。从后一涵义引伸出一种更普遍的看法:把服务于特定目的各项工作的总体称为工程,如水利工程、机械工程、土木工程、电力工程、电子工程、冶金工程、化学工程,等等。如果这个特定的目的是系统的组织建立或者是系统的经营管理,就可以统统看成是系统工程。国外称运筹学、管理科学、系统分析、系统研究以及费用效果分析的工程实践内容,均可以用系统的概念统一归入系统工程;国外所称运筹学、管理科学、系统分析、系统研究以及费用效果分析的数学理论和算法,可以统一地看成是运筹学。

在科学技术的体系结构(见钱学森:“大力发展系统工程,尽早建立系统科学体系”,《光明日报》,1979年11月10日)中,系统工程属于工程技术。正如工程技术各有专门一样,系统工程也还是一个总类名称。因体系性质不同,还可以再分为门类,如工程体系的系统工程叫工程系统工程,生产企业或企业体系的系统工程叫经济系统工程,国家行政机关体系的运转叫行政系统工程,科学技术研究工作的组织管理叫科研系统工程,打仗的组织指挥叫军事系统工程,后勤工作的组织管理叫后勤系统工程,计量体系的组织叫计量系统工程,质量保障体系的组织建立与管理叫质量保障系统工程,信息编码、传输、存贮、检索、读出显示系统的组织管理叫信息系统工程。系统工程不是一类系统的组织管理技术而是各类系统组织管理技术的总称。各类系统工程,作为工程技术的共同特点在于它们的实践性,即要强调对各类系统问题的应用,强调改造自然系统、创造社会生活各方面人所需要的系统,强调实践效果。

在科学技术的体系结构中,工程技术的理论基础是技术科学。例如,水力工程的理论基础是水力学、水动力学、结构力学、材料力学、电工学等。什么技术科学是系统工程的共同理论基础呢?是运筹学。我们所说的运筹学,沿用的是二次世界大战出现的名词运筹学,但在内容和范围上又有所区别。二次世界大战时的运筹学,包含了一些我们今天所说的军事系统工程的内容,当时叫军事运筹学(MILITARY OPERATIONS RESEARCH)。我们今天所说的运筹学属于技术科学,不包括军事系统工程的内容,只包括系统工程的特有数学理论:线性规划、非线性规划、博弈论、排队论、库存论、决策论、搜索论等。除了运筹学,系统工程的共同理论基础还有计算科学。不仅各类系统工程有共同的理论基础,每门系统工程还有其特有的专业理论基础。工程系统工程特有的专业基础是工程设计,科研系统工程特有的专业基础是科学学,企业系统工程特有的专业基础是生产力经济学,信息系统工程特有的专业基础是信息科学和情报科学,军事系统工程特有的专业基础是军事科学,经济系统工程特有的专业基础是政治经济学,环境系统工程特有的专业基础是环境科学,等等。

控制论的奠基人维纳曾经说过:“把自然科学中的方法推广到人类学、社会学、经济学方面去,希望能在社会领域取得同样程度的胜利”,这是一种“过分的乐观”(维纳,《控制论》,科学出版社,第162—163页)。系统工程的现代发展,证明维纳在一九四八年的这番预言是保守的。系统工程在自然科学、工程技术与社会科学之间构筑了一座伟大的桥梁。现代数学理论和电子计算机技术,通过一大类新的工程技术——各类系统工程,为社会科学研究加添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。系统工程应用于企业经济管理已成为现实,并将应用于更巨大的社会系统。系统工程为自然科学、工程

技术工作者同社会科学工作者的合作,开辟了广阔的前景。我国系统工程工作者与社会科学工作者合作,已经在全面质量管理、人口控制计划管理方面取得了可喜的成绩。

马克思说:“一切规模较大的直接社会劳动或共同劳动,都或多或少地需要指挥,以协调个人的活动,并执行生产总体的运动——不同于这一总体的独立器官——所产生的各种一般职能”(《马克思恩格斯全集》第二十三卷,第362—363页)。社会主义社会具有高度的组织结构,共同劳动的组织程度和规模远较马克思时代高得多、大得多。任何一种社会活动都形成一种系统,复杂的系统几乎无所不在。每一类系统的组织建立、经营运转,就成为一项系统工程;组织管理社会主义建设的技术就是社会系统工程,简称社会工程(见钱学森、乌家培,《组织管理社会主义建设的技术——社会工程》,《经济管理》,1979年第1期)。各类系统工程可以解决的问题,涉及整个社会。领导艺术是一种离开数学领域的才能,它能从大量事物的复杂关系中判断出最重要最有决定意义的东西。实现四个现代化,是极其伟大的社会工程。领导这一工程的任何决策,不仅需要领导艺术,更需要领导科学;不仅需要定性的材料,更需要定量的材料。用科学方法产生这些定量材料,并提供领导抉择参考,是我国现代化建设必不可少的一个专门行业。这个行业,是为国民经济建设各级领导机关特别是中央一级机关当参谋的。这个行业所从事的科学研究活动,是综合利用自然科学、社会科学、工程技术特别是系统工程,为国民经济建设的重大抉择问题提出可供选择的方案。我国社会主义社会对于系统的需要,犹如十九世纪中叶资本主义社会对于工程技术的需要一样。那时,因为自然科学的发展,使千百年来人类改造自然的手艺上升成为有理论的科学,出现了工程技术。由于资本主义社会对工程技术的自觉应用,从而爆发了一场生产力发展的大变革。今天,系统工程的自觉应用将对我国社会生产力的发展产生变革作用。这或迟或早成为现实,取决于我们的认识。

三

下面我再讲讲系统工程工作在我国的发展。

运筹学在我国的发展始于一九五五年。那时,这样一个认识已经形成;我国有计划按比例的经济建设十分需要运筹学。一九五六年,在中国科学院力学研究所建立了我国第一运筹学研究组;一九六〇年底,中国科学院力学研究所与中国科学院数学研究所的两个运筹学研究室合并成为数学研究所的运筹学研究室。华罗庚教授从六十年代初期起在我国大力推广“统筹法”,并取得显著成就;在这同时,随着国防尖端技术科研工作的发展,我国在工程系统的总体设计组织方面也取得了丰富的实践经验。一九六六年至一九七六年,我国发生了十年动乱,也就说不上在这方面还能存在什么发展。粉碎“四人帮”后,系统工程的推广应用出现了新局面,一九七八年五月中国航空学会在北京召开了军事运筹学学术会议。一九七八年九月,我国科技工作者提出了利用系统思想把运筹学和管理科学统一起来的见解,提出了系统工程是组织管理技术的思想,一九七九年六月,中国管理现代化研究会在天津召开了系统工程学术交流会;一九七九年七月,中国自动化学会在芜湖召开了系统工程学术讨论会;一九七九年十月,中国科学院、教育部、社会科学院、一、二、三、四、五、六、七、八机部、总参、总后、军事科学院、军事学院、国防科委和军兵种的一百五十名代表,在北京举行了系统工程学术讨论会,国务院副总理耿飚、王震,总参副总长

张爱萍、李达,以及各有关部门领导同志十余人,出席了这次讨论会的开幕式,体现了党和政府对系统工程在四化建设中作用的重视。这次会上我国 21 名知名科学家联合向中国科协倡议成立中国系统工程学会。西安交通大学、清华大学、天津大学、华中工学院、上海交通大学、大连工学院、上海化工学院、上海机械学院、哈尔滨工业大学、北京工业学院、国防科技大学相继成立了系统工程的研究室、研究所或系;上海机械学院和国防科技大学已招收系统工程专业的本科生。中国航空学会举办了系统工程和运筹学讨论班;中国自动化学会成立了系统工程专业组。一九八〇年二月二十六日,中国科学院系统科学研究所举行了成立大会,方毅副总理和中国科学院领导到会表示热烈祝贺。一九八〇年三月二十二日,包括西安地区国防工业系统、高等院校与工交财贸系统七十余名会员的西安系统工程学会成立。一九八〇年下半年,中央人民广播电台将首次举办全国性的系统工程广播讲座,由九位知名科学家播讲。现在,全国科协和中央电视台又联合举办这次系统工程电视讲座,内容包括系统工程基本概念及系统工程在四化建设中的应用、系统工程方法、系统工程理论基础和系统工程人才培养等四个方面,全部讲座由中国自动化学会、中国航空学会、中国铁道学会和中国系统工程学会共同承担。我国科技工作者已经认识到:系统工程同现代化建设各个领域的组织管理工作是紧密联系在一起的。他们已着手进行实验,将系统工程应用于工程计划的协调与平衡、工业企业全面质量管理、人口控制计划以及军事装备的规划。以上这一系列活动表明,我国科技工作者对系统工程的应用是有认识的,他们正在作出实际努力!我们希望中央电视台的这一系列广播能进一步推动系统工程在我国的发展,为我国社会主义的四个现代化做出贡献。

系统工程的一些基本概念、观点和方法步骤

顾 基 发

一、系统工程的基本概念和观点

(一) 系统的概念

“系统”这个名词含义很广。如果要追溯它的来由,不论在中国或者在西方很早就出现了,它几乎同哲学一样古老。但是在系统科学或系统工程中所要研究的系统有它自己的含义,可是目前对系统的定义却很多。这里想采用钱学森等同志提出的定义:“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的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”^[1]。这样的系统具有下面几个特点:

1. 它是人工制造的系统或者是经过改造的自然系统。这就把宇宙中太阳系等非人造的且无法加以控制的系统划出去了;
2. 系统是很大的。表现在系统是由很多分系统组成的,而且是多层次的,每一个分系统内要考虑的因素(变量)是很多的,它区别于一些很小的系统;
3. 系统的结构是很复杂的。表现在总系统与各分系统之间和各分系统之间的关系,还有系统的功能与系统内结构及参数之间的关系非常复杂。有的还带有不确定因素和竞争性因素在内,这就有别于一些简单的系统;
4. 系统是有组织的。所有各部分都是为了一个共同目的而形成的有机整体,它区别于一些杂乱无章、彼此没有共同目的而合成的系统。

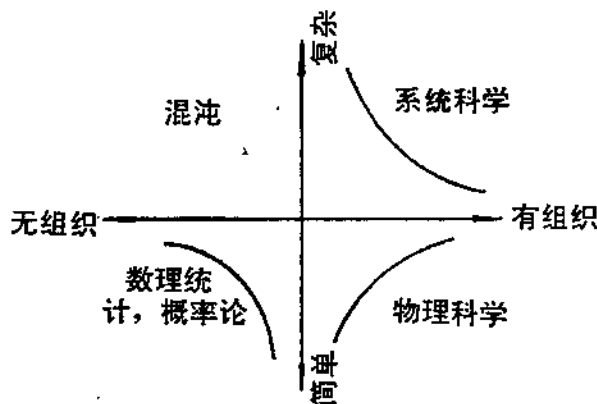


图 1

有了上述这些认识后,我们也可以适当区分系统科学和其它科学所要研究的系统。我们用图来表示,横坐标表示系统组织化的程度,纵坐标表示系统繁简的程度(见图1)。图中混沌既表示所研究的系统复杂又没有组织,也表示目前尚未有成形的科学办法来对付它。当然这个划分也只是相对而言的。

(二) 系统科学(系统工程和系统分析)

系统科学作为一个体系来理解是很广泛的,以至把系统工程和系统分析作为它的方法论的一部分。关于系统工程和系统分析各自的含义已在第一讲中提到了。这里着重介绍系统科学理论方法体系,它包括五个方面的内容:系统概念、一般系统理论、系统理论分论、系统方法论(系统工程、系统分析)和系统方法的应用。按照从抽象到实际的程度有人把它排成金字塔的形式(图2)。其中系统概念已介绍过,一般系统理论是指用数学公理的形式描述和确定系统的结构与行为的纯数学理论。系统理论分论是指为了解决各种特定系统结构与行为的一些专门学科,例如帮助认识和表示系统的结构的图论,为了达到

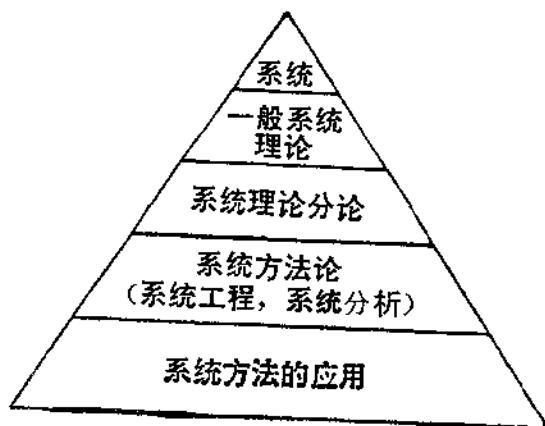


图 2

系统最佳功能而使用的最优化方法,在决策时使用决策论和博弈论,为了解决各种随机的排队系统而使用的排队论等等。系统方法论是指为了对系统对象进行分析、计划、设计和运用时所采用的具体应用理论及技术的方法和步骤,主要是指系统工程和系统分析。最后,系统方法的应用是指将系统科学思想和方法用到各个具体实际领域中去。本讲着重介绍系统工程。

(三) 系统工程的一些基本观点

在应用系统工程处理问题时应注意下述一些观点:

1. 全局性(系统性、整体性)

由于系统是由很多部分组成的,同时系统的目的或特定功能也是由很多目标或指标形成的,因此不能单从某一个部分,某一个指标来思考和解决问题。例如美国喷气推进实验室早就在研究喷气发动机,其性能不错,后来陆军希望他们搞一个“下土”导弹,因为导弹不光要发动机,还要弹头、弹体、控制系统等部件,由于开始没有从总体考虑而只是把现有部件拼凑凑,虽然能飞但很贵,而且维修不便。这说明虽然部件是好的,但合起来的

总体不一定好。后来又要他们搞“中土”导弹,他们提出要求有全权参与导弹的整个设计,并要求了解最终使用情况。这使后来研制出来的“中土”导弹各方面的功能都有很大改善。美国阿波罗计划是应用系统工程取得成功的极好例子。据说日本一些学者参观了阿波罗计划中所采用的硬设备和工艺后,认为没有日本造不出来的东西,但作为一个整体的计划,设计和管理的技术——系统工程,日本却不如美国。又例如导弹所需要的电子系统要求可靠性极高,有的要求达到 0.9999,而构成这些系统的电子管等元器件,却很难都达到这样高的可靠性,有的只有 0.9。这时适当利用系统的思想,将四个可靠性只有一个 9 的元件并联起来就可达到四个 9 的可靠性[注: $R_{\text{系统}} = 1 - (1 - R_{\text{元件}})^4 = 1 - (1 - 0.9)^4 = 0.9999$]

2. 关联性

由于系统各个组成部分本身及它们互相之间都有着相互关联的关系,如系统的输入与输出之间有关系,还有系统的所有组成部分中的参数和变量与系统的特定功能之间的关系都表示着系统的相互作用和相互依赖。我们必须进一步设法描述这种相互关系——关联性。而且要用明确的方式(例如用定量的或者用图、表等方式)来表示它们。例如用“投入——产出”分析的方法可以很好地描述国民经济系统中各个部门的生产和分配的关系;还可使用数理统计中的回归分析方法来讨论系统中某些功能与系统中某些部分的变量之间的关系;而结构模型解析法(ISM)则是利用图论的一些知识把系统各个部分的结构关系更清晰地表达出来;控制论中用线性微分方程组和输出方程式,可以很好地描述某些线性系统的输入与输出之间的关系等等。

3. 最优性(满意性、情意性)

我们设计、制造和使用系统的最后目的是要它完成特定的功能。而且总希望完成功能的效果最好,这就有所谓最优计划、最优设计、最优控制和最优管理和使用等,或者简言之,应该选择最优的系统方案。这里需要使用最优化方法、最优控制理论和决策论等等。值得提到的是近年来关于多目标最优性的讨论,由于考虑的功能很多,有的系统方案在这方面的功能较好,而另一方面较差,很难找到一个十全十美的系统,因此,在一些互相矛盾的功能要求中有时就必须找一个合理的妥协和折衷,再加上定性目标的考虑有时很难定量的最优化。所以,近年来有人开始提出“满意性”的观点,即不一定追求真正的“最优”,只要这个系统大家认为满意就行了。这种寻找“满意性”的系统方案的方法,虽然不如某些找“最优性”方案的方法那么严格、精确,但是它却比较灵活、省劲。因为使用严格的最优化方法,本身往往要化出很大的劳动,寻找“满意性”方案的方法则可以把人们一些经验判断吸取进来,这类方法有启发式方法及某些数字模拟方法等。最近一些年,由于某些系统工程涉及很多人的因素,因此又出现了“情意性”的观点,这就是考虑到将来采用的系统应适合系统的决策者(主要是领导)和受系统影响的人(主要是群众)的情意。例如有些工程项目尽管设计得各方面性能都良好,如果领导不喜欢,或者由于污染等社会原因遭到群众的反对,往往得不到实现。例如美国的核能发电,科学家们已从技术上多方论证其合理性,但由于人们害怕污染,尽管能源紧张,但目前仍得不到很大的发展。

4. 综合性

由于近代复杂的大系统涉及面广,不但有技术因素,还有经济因素,社会因素等,因此光靠一二门学科的知识是不够的,需要诸如数学、运筹学、经济学、工程、控制论及心理学

等各方面学科知识。由于一个人很难门门精通,所以用系统工程解决问题时,非常强调组成学际小组,由各方面的专家、领导和有经验的工人参加,共同讨论研究并解决问题。

5. 实践性

系统工程是非常着重实用的,如果离开具体的项目和工程,也就谈不上系统工程。因此,系统工程是改造客观世界的,是要实践的。^[2]当然这丝毫不排斥对系统工程本身理论和规律的探讨。

二、系统工程的方法、步骤

在从事系统工程的研究工作中,长期以来逐步形成了一套科学的工作方法和步骤。这些步骤的划分也并非绝对,有的把一个步骤分成几步来做,有的则反之。^[3,4,5]这里着重介绍霍尔的方法。^[6,7,8]

(一) 思维过程(逻辑维)

对一个大型项目,在使用系统工程方法来思考和解决问题时,可分成下面七个步骤:

1. 摆明问题(问题阐述)
2. 目标选择(系统功能指标设计或目标函数)
3. 系统综合(形成可能的系统方案)
4. 系统分析(建立模型)
5. 系统选择(最优化)
6. 系统发展(决策)
7. 实际研制(实施计划)

下面就这些步骤略作进一步解释。

〔摆明问题〕

日本曾对打开女手表销路问题进行研究。过去认为要改进手表的功能总不外从计时准确、耐用等方面着手。但是他们进一步调查后,发现不少妇女带表不仅为了计时、耐用,而且更注意时髦、漂亮。因此往往带几年就不想带了,所以搞得耐用十年、廿年没有多大意义,相反在便宜、漂亮和式样新颖上下功夫,却能争得销路。日本人明确了这个问题后,果然打入了国际市场。

〔目标选择〕

在问题搞清后,应该选择具体的评价系统功能的目标(指标),以利于衡量所有备择的系统方案。例如第二次世界大战期间,对于商船上装高射炮是否合理的问题,曾引起争论。有的人用击落敌机率作为指标,经统计,高炮装在商船上击落敌机率只有4%,效率很低,似乎装上并不合理,但有人提出商船装高炮主要为了保护商船,因此应以商船被击沉率作为指标来评价应否装高射炮,经统计,装高炮的商船被敌人击沉率从原来不装时的25%下降到10%,争论即告平息,安装有利。又例如,为了改善环境质量,减少污染,首先要有一系列的污染指标来表示环境质量。从大类来讲有大气污染(又细分为颗粒物、SO₂、CO、NO₂、O₃等指标);水质污染(又细分为悬浮固体物、生化需氧量[BOD]溶解氧[DO]等指标),还有土壤污染等。对于评价国民经济系统的指标体系就更为复杂,日本

搞了个福利指标体系,提出 10 个社会目标,分成 27 个构成因素,又细分成 368 个指标。

【系统综合】

主要是按照问题性质及总的功能(目标)要求形成一组(有限个,也可能是无限个)备选系统方案,方案中要明确所选系统的结构和相应参数。例如能源系统工程中,为了要满足将来能源需要,就要考虑哪几种能源可供选择(如石油、煤、核能、太阳能、地热和沼气等)。其中有的能源,如煤,可以直接提供燃烧,也可让它去发电转化成电能,也可让它气化;每一种能源又涉及决定其直接开发量及需要转换的数量等等。当然这些方案的选择,首先应是可行的,即技术上能达到,资源上有保证,设备能力可提供的方案。

【系统分析】

为了对众多的备选方案进行分析比较,往往通过形成一定模型,把这些方案与系统的评价目标联系起来。关于模型在第三部分还要谈到。

【系统选择(最优化)】

在一定的限制条件下,我们总希望选择最优的系统。在评价目标只有一个定量的指标,而且备选的方案个数不多时,容易从中找出优者。但当备选方案数很多(甚至无限个),我们无法简单的加以列举比较时,就要使用一些单目标最优化方法来选出优的系统。当评价目标有很多个,而且彼此间又有矛盾,要选出一个对所有指标都优的方案,一般是不可能的,必须在各个指标间有一定的妥协,这时就需使用多目标最优化方法以选出优的系统。

【决策】

有时最优方案可能有好几个,或者除了定量目标外,还要考虑一些定性目标(涉及一些人和社 会因素),这时必须由领导根据更全面的要求,最后决策(抉择)一个或极少几个方案来试用。

【实际研制】

这是根据最后选定的方案,将系统具体实施。如果实施中,比较顺利或者遇到困难不大略加修改即可得到实施,那么整个步骤即告一段落。如果问题较多,这就需要回到前面几个步骤中的一个,重新做起。

以上这些步骤的进行,其时间先后,要求并不一定很严格,而且它们经常会出现反复。

(二) 工作阶段(时间维)

对于一个具体工程,从规划起一直到更新可以分成七个阶段:

- A. 规划(调研)阶段(程序设计)
- B. 初步设计(具体计划阶段)
- C. 研制阶段(系统开发)
- D. 生产阶段
- E. 安装阶段
- F. 运行阶段
- G. 更新阶段

例如一个新型号战略导弹武器系统就应该经过以上七个阶段。关于这方面的经验不单在国外,而且在我国也积累了不少^[4]。由于这些阶段大家比较熟悉,这里不拟作进一步

解释,只用一个美国贝尔电话公司研制 TD-2 无线电接力系统的例子来描述。规划阶段是从 1940 年对系统调研开始的,调研内容包括了解技术可能性(有没有新的设想及实现设想的技术准备情况)和市场需要的情况。了解了这些情况后就进入初步设计阶段,对系统进行进一步理论论证,提出一些初步要求,并用简单模型初步探讨系统应具有的一些功能和指标,但还有很多因素不清楚。在 1945 年就先着手建立一个实验系统 TD-X。1946 年开始试制阶段,在试制前先建立评价系统的指标,并讨论其可行性,对成本进行估计,并在试制中收集新数据(包括实验系统的数据)为今后改进系统之用,同时进行生产。到 1949 年进入安装阶段,向制造厂商提供详细生产图纸、用户的实际操作和维护说明书等。1950 年 TD-2 系统正式运行。在运行后数月内,使用专门设备检查系统运行情况,寻找系统薄弱环节,提出了不少改进。整个工作从 1945 年到 1958 年化费了一千五百万美元。

把思维过程和工作阶段综合起来可以用一个表(二维结构或叫活动矩阵)来表示(表 1)。表中“B1”表示在初步设计阶段来摆明问题,“C6”表示在研制阶段进行决策的活动等等。

表 1

	1 摆明问题	2 目标选择	3 系统综合	4 系统分析	5 系统选择 (最优化)	6 决策	7 实际研制
A. 规划	A1	A2	A3	—	—	—	A7
B. 初步设计	B1	—	—	—	—	—	—
C. 研制	C1	—	—	—	—	C6	—
D. 生产	—	—	—	—	—	—	—
E. 安装	—	—	—	—	—	—	—
F. 运行	—	—	—	—	—	—	—
G. 更新	G1	—	—	—	—	—	G7

(三) 专业知识(知识维)

系统工程除有某些共性的知识外,还使用各种专业知识,霍尔把这些知识分成工程、医药、建筑、商业、法律、管理、社会科学和艺术等^[7]。按钱学森同志对系统工程的分类^[2],如 a) 工程系统工程[工程设计], *b) 科研系统工程[科学学], c) 企业系统工程[生产力经济学], d) 信息系统工程[信息学、情报学], e) 军事系统工程[军事科学],……等等,各类系统工程都需使用其相应的专业学科基础知识。如果把这些专业知识称为知识维,霍尔把逻辑维、时间维和知识维合起来形成一个三维矩阵,它们由一些小箱所组成,每一个小箱上编上相应符号如“A2a”,“C6d”……等,符号中前两个符号在表 1 中已有解释,第三个符号即表示所用到的专业知识或者某一类系统工程。因时间关系,这里就不准备画出这个三维矩阵了。

三、系统工程经常使用的工具和方法

(一) 用模型代替系统,用模拟和其它数学方法来代替系统的运行(试验)

由于系统工程要处理的系统,或者因其大或者因其复杂往往无法直接分析和试验,一

* 这里 a) 和后面的 b), c), d)……等的在方括弧中的内容表示该类系统工程所特有的专业基础。

般是利用模型(实物型、非实物型)来代替真实系统,然后加以种种分析。用的最多的是非实物型模型(数学模型、逻辑模型等)。有些模型可以直接计算,更多的要通过电子计算机来进行计算。有些系统要通过大量实物运行试验才能发现系统中的不协调之处,但实物试验或者不可能,或者太昂贵,这时往往利用模拟方法或其它数学方法在计算机(或者其它的代替实验设备)上代替实物进行大量试验以获得分析和改善系统的目的,最后再作少量的实物系统、或者局部的实物系统的试验。

(二) 大量使用电子计算机

对于复杂的大模型,要求获得一个好的系统方案或者分析好一个系统,往往需要电子计算机的帮忙,它可以对大量的数据进行快速的整理、分析和计算,还可以代替某些系统进行计算机试验。近年来发展的人机对话的方式,使计算机还能吸收人类的直观判断的能力。

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“大力发展系统工程,尽早建立系统科学的系统” 1979 年 10 月全国系统工程学术讨论会上的报告。
- [3] Goode, H. H., and R. E. Machol, "System Engineering: An introduction to the design of Large Scale Systems," McGraw-Hill, New York, 1957.
- [4] Machol, R. E., "System engineering handbook" 1963.
- [5] 秋山賴,西川智登,“システム工学” 1977。
- [6] Hall, A. D. "A Methodology for Systems Engineering" Van Nostrand, Princeton, N. J., 1962.
- [7] Hall, A. D. "A three dimensional morphology of Systems engineering", IEEE G-SSC Trans, Vol 5, NO2, Apr., 1969, pp156—160.
- [8] Sage, A. P., "Methodology for large-scale systems" McGraw-Hill New York, 1977.

农业系统工程

张沁文 钱学森

今天这一讲的题目是农业系统工程，也就是系统工程在社会主义大农业中的应用。由我们两写稿，由我来讲。

在讲具体内容之前，我们首先要搞清农业系统工程的词义。有那么一种学科归类方法，把农业系统工程归在“农业工程学”范围内，是否合适呢？我们认为是不对的。在前面几讲，我们已经说明系统工程有它特有的学科理论基础，总称为系统科学，而系统科学是一个独立的体系，在系统工程改造客观世界的实践中，将提炼出专门研究系统的基础科学以及从这一类基础科学出发，结合其它基础科学，形成一系列研究系统共性问题的技术科学，而直接搞改造客观世界的学问就是各门系统工程。所以，各门系统工程在其学科归属上，只能理解为系统科学体系中的一个专业，一个分支，不能和其它工程学科混为一谈。“农业工程学”是搞技术手段的，可以说是“硬科学”。而农业系统工程是研究组织管理的，是既搞技术手段，又搞组织管理，既有“硬科学”，又有“软科学”的工程技术，性质和农业工程学有所不同。

我们首先讲讲什么叫农业系统。

农业是一个巨大而复杂的系统，这大家不会有什么异议。习惯上我们就有这么个叫法：农业系统或农林系统。但是为什么在农业生产中要应用系统工程呢？

首先，我们来讲什么是农业？农业就是利用太阳光的能量，通过生物转化，生产人们需要的东西，即人们所需要的食物、工业原料和生物能源（如有机质发酵搞沼气、薪炭林）；又通过生物本身的存在（如森林、草地），改造自然，创造一个人类和生物本身所需要的理想的环境。这就是农业的定义。

农业的范围很广阔，它究竟包括哪些内容呢？我们认为，除了传统的农林牧副渔而外，现代农业还要加上虫业和微生物业。这就是说，广义的农业应包括以下内容：

农业：指种植业，即狭义的农业，分为粮食作物和经济作物两大类，包括粮、棉、油、麻、糖、菜、烟、药、杂……等；

林业：分为用材林、经济林、薪炭林、防护林、水土保持林等；

牧业：包括牛、羊、猪、兔、马、驴、骡等；

禽业：包括鸡、鸭、鹅、火鸡等；

渔业：习惯称为渔业，其实应包括许多水产养殖，如虾、蛙、珍珠、牡蛎、海带、紫菜、莲