

N.5
2475

系统科学讲义之一

系统工程概论 模型论

王毓云

中国科学院系统科学研究所编印

未经允许·不准翻印

1985年2月

系统工程概论

(一) 引言.....	(1)
(二) 历史背景.....	(2)
(三) 四十年代以前的努力.....	(4)
(四) 运筹学的产生.....	(5)
(五) 运筹学的发展.....	(7)
(六) 系统分析与系统工程 (S.E.)	(8)
(七) 系统科学.....	(13)

模型论

第一章 模型与思考	(15)
§ 1.1 概论.....	(15)
§ 1.2 直接分析.....	(17)
§ 1.3 比拟思考.....	(21)
§ 1.4 启发性思考.....	(25)
第二章 规划模型	(33)
§ 2.1 线性规划模型.....	(33)
§ 2.2 非线性规划模型.....	(45)
§ 2.3 动态规划与多阶段决策模型.....	(51)
§ 2.4 梯级系统模型.....	(55)
第三章 随机模型	(59)
§ 3.1 排队与拥挤模型.....	(59)
§ 3.2 存贮与更新模型.....	(63)
第四章 对策和决策模型	(71)
§ 4.1 对策模型.....	(71)
§ 4.2 决策模型.....	(75)
第五章 经济模型	(83)
§ 5.1 预测模型.....	(83)
§ 5.2 数量经济模型.....	(87)
§ 5.3 时间序列模型.....	(89)

系统工程概论

(一) 引言

最近几年来,国内对系统工程的兴趣越来越浓,从工程、工业、交通、城市、地区、环境、经济以及社会等领域,对系统工程发出了越来越高的呼声,对它寄托着厚望,殷切希望通过它的应用,解决各领域自身范围长期存在的问题,因此,系统工程与系统几乎成了普通的口头词汇,引起了社会上很大的反响。

尽管存在着如此大的社会反响,对于系统工程本身的背景、性质、方法与体系的了解与认识,很难说是明确了。各方面对它作出了说明与解释,力求使系统工程与系统的概念明确一些。然而,对它的认识与了解,实际上还存在含混与模糊。一则因为系统工程本身还在发展中,国际上也存在着各种看法;二则因为系统工程在我国出现不久,而且综合性强,对象也非常广泛,方法体系也很错综,不似其它学科单纯。因此,在相当的时间里,存在一定的含混模糊,也是难免的,也是认识的发展规律。但是,毕竟系统工程这个词,早在五十年代就见诸文献书籍了,它本身的发展也具备了一定形态,有了眉目,有了轮廓。因之,对它的看法与认识,在国际上,尽管存在着不同的注释,都自然地在一的方向上大致集中。

人们思想的飞跃,不能完全脱离历史与现实,只有这样,才能更高更远地驰向未来。因此,我们的认识,最好顺着历史发展的线索,沿着科学技术发展的路径,沿着生产与社会发展的轨道,逻辑地演绎出发展的方向,所以我们讲系统工程的情况,需得讲运筹学的情况,需得讲系统科学的情况。从系统运用与开发的历史讲,我们需得考虑,生产社会发展的背景与科学发展的历史与背景,从十九世纪以前如何演变到二十世纪,二次大战前进行了怎样的努力,大战中运筹学如何诞生和成长,大战后如何发展,系统工程在怎样的条件下出现等等。

我们就是希望本着这样一种想法来讨论。首先,我们初步了解一下系统与运用的基本涵义。

系统工程虽然是近代产物,系统这个词很古远的时候就有了。在语源方面,可以说是出自拉丁语的 Systema,是“共同”这个接头词与“放在…位置”这个动词词干构成的复合词。一般认为是“群”与“集合”的概念。

Webster 词典定义为,系统是有组织的又被组织化了的整体,是“形成集合整体的各种概念、原理的结合”;是“以有规律的相互作用或相互依存形式结合起来的对象的结合”。

从形式上看,所谓系统,就是相互具有有机联系与作用的元素的集合,是作为整体去完成特定功能的诸元素的有机结合体。

具体地讲,系统有时意味着具有某种‘系统性质’的存在的客体,由物质、能量、生态,人类按一定的概念、法则、原理与程序所构成的一种存在形式。

抽象地讲,系统意味着一种独立的思考方法。所谓系统的观点(System Point of View)或系统的方法(System Approach),都是意味着一种独特的思考方法,即指用“系统性质

的思考方法抓住对象，分析对象，综合对象，设计和使用对象”。这是一种特殊的思考方法。

所以系统有时是实体系统 (Physical System)，所谓实体系统，就是像人-机系统或机械系统那样，其组成元素是以物理状态的存在作为组成元素，它是把矿物、生物、能量、机械、人类等实体的存在作为组成元素的，与此相反，概念系统是由概念、原理、法则、规律、方法、制度、程序、手续等非物理性的实体作为组成元素的系统，实际系统往往是这两者的结合体。

系统最简单的性质就是它由具有有机联系与作用的元素组成，元素之间具有有机的关系。这就是说，系统分解为元素以后，“系统”就不复存在了。自然科学的发展，曾经出现过古代希腊的“整体主义”(Wholism)，这就是说，自然乃是浑然一体，不得分解开来。自然科学从中世纪的经院哲学的羁绊中解脱出来以后，自然科学家如牛顿、莱布尼茨开始运用分析的方法，认为自然界的认识完全可以通过对分解的单元的分析认识来达到。笛卡儿的 (Reductionism) 就是这一原则的体现。但是对于系统，它的核心的概念存在于有机的结合中，将一个系统分解为单元，系统的蕴含就不复存在了，所以系统不是单纯的集合的概念，而是按一定规律相互依存的那种结合的内涵的概念。我们因此说，系统是现代化科学的概念。

所以系统不是元素简单的拼凑，拼凑不可能得到系统那种整体的有机的特定的功能与性质。系统的元素也许各各不是最优，但一旦以系统方式构成结合为系统，就能起出色的作用。反之，元素各各都是最优，结合为系统，却不一定起良好的作用。

系统是由各自独立且具有独立的功能的多个元素结合在一起的，其相互间的关系是使系统作为整体去完成总体的特定功能。这种相互关系的依存形式就是系统的结构 (Structure) 或组织 (Organization) 根据这种总体的关系，展开各元素的和它们相互之间相互关系的活动并把它们综合起来，就形成了系统整体的有机的、统一的活动。这种系统整体的活动叫做系统行为 (System Behavior) 或系统运用 (Operations of Systems)，所以，运用的概念总是离不开系统，运用意味着一连串的行动，一组决策的执行，一个过程的行动等等。

运用 (Operations) 这个词，原意是“手术、作战、操作、运用、运行”。Operations Research 原意是运用的研究，作战的研究，译作运筹学，就其内容借古意以命新名。从前面的讨论，可知运用不只是一般意义的运行范围，而是从系统这一现代化概念衍生出来的概念。

系统与系统运用的概念是在运筹学、系统工程的发展中形成的现代化科学的概念。这个系统的概念，也是从十九世纪末由比较模糊的概念逐渐演变进化到现在的情况。七十年代提出了系统科学，这系统科学的系统的概念从外延与内涵来看，又是运筹学与系统工程的系统概念的一个发展与延伸。离开了发展，抛开了科学与生产的历史，是不容易认清这些问题的。

我们就是从历史的发展过程中，考查如何逐渐出现了对系统与系统运用的研究，探讨在怎样的基础上，在四十年代以后形成运筹学与系统工程，又怎样在运筹学与系统工程的基础上 (七十年代) 提出了系统科学。

(二) 历史背景

十八世纪的欧洲，迈过了中世纪的黑暗，社会经济开始了大踏步的发展。1776年，英国

经济学家亚当斯密写了一本经济学的著作“国富论”（“The Wealth of Nations”），强调国富不在金银，而在于一个决定性的因素——发展生产，强调注重生产力。他的思想有两个出发点，第一点，那时欧洲，认为发展经济，重点在发展商业，国富在金银，欧洲不产金银，上策是发展国际贸易，发展海军，掠夺世界，而欧洲通过黑暗时代，物质匮乏，只有增加生产，才能够改善人们的生活，光有金银是没有用处的；第二点，十八世纪末，欧洲处于工业革命，工业革命的影响，生产快速发展，所以生产最重要。亚当斯密的著作是经济学作为一门科学的开始。

工业革命所提供的机器技术和用之不竭的廉价劳力及不断需求的市场，使工业得到极大的发展。当时的情况，只要增加机器，增加劳力，生产可以自然发展劳力机器技术自动引伸利润，生产供给自动引伸市场的需求，生产的规模空间与时间的尺度较小，自动消除了对环境影响的注意，生产技术设备人力的性质单纯、自动引伸协调与综合，人力的供应不竭与能源的富裕以及能源转换的单一性，自动消除了能源的种种问题。因此生产的综合与协调被忽略了。

到了十九世纪下半叶，生产的规模日渐扩大，联合工业因生产的需要和竞争的需要开始出现，电力代替了蒸气动力，石油得到了开发，对劳力的榨取趋于饱和，生产的物质开始丰富，需要考虑市场的需求，交通与通信的规模必须大规模的扩建，电气化与化学工业的出现，生产技术设备日趋复杂，生产与经营天然的协调与综合开始消失，必须开始考虑科学的协调与综合。这就逐渐引起了系统的概念的产生。

于是，科学的力量开始注意这一类型问题的研究。

我们知道，经典物理学从伽里略的加速度开始，逐渐摆脱中世纪经院哲学的禁锢，到吉布斯的统计热力学经过了几个世纪漫长的发展道路，希腊朴素的自然辩证法，脱离对物质的分析，逐渐成了中世纪空洞的玄学。经典物理学大大地发展了对物质进行深入的分析的方法，发展了向纵深局部个体剖析的思考方法，笛卡儿（Descartes）提出了可分解性，即自然科学的问题可以分解为若干小的局部问题进行研究。经典物理学分解为力学、光学、声学、电学、热学，各自日不旁顾向纵深突进分析。十九世纪下半叶，电磁波和波动与粒子的矛盾，引起了对横断面的注意，特别是统计热力学奠定了经典物理学的最后一块砖石，导致了系统的概念的产生。

经典物理学的完成，显示了经典数学的力量。培根说，数学使人深刻。客观现象成功的数学描述，使有可能深入分析物质的本质，使有可能通过巧妙深遽的推理，了解对象的构成机理与各种变异。经典物理学的完成，使人们不仅认识到物理学需要从横断面辩证地运用分析与综合的方法，同时使有可能想到运用物理学的方法，数理的方法，运用数学模型与分析的方法，综合研究物理学以外的对象，生物的与社会的以及生产为主的系统的运用。

在这种思想指导下，客观的启发，使数理科学开始向经济学渗透。十九世纪埃杰维斯的合同曲线与华尔拉斯的经济系统平衡模型，就是在这种情况下一律必然的尝试。一八九〇年贝尔发明自动电话，第一次提出了自动电话机能的协调与组织和电话服务与需求平衡的问题，第一次在生产中提出了超设备人力技术性质的问题。这个世纪初，丹麦数学家埃尔朗（A.K.Eriang），在吉布斯热力统计平衡的思想影响下，运用比拟的思维（By Analogue），建立了电话系统统计平衡模型，成功地显示了数理方法向其它领域的渗透，同时，也通过电话系统显示了系统的概念。

到二十世纪初，生产力的发展与科学的发展已经提出了系统运用的问题，同时自然科学特别是数理科学也开始了向这一个方向的摸索。

（三）四十年代以前的努力

系统这个词及其观点、方法在后来科学技术界带着一种独特的含义采用，是在埃尔朗的电话系统统计平衡模型中和泰勒的著作中出现的。1911年泰勒（F.W.Taylor）的“科学管理的原理”（“Principles of Scientific Management”）一书问世，就出现了“泰勒系统”。他继承了Gibert对工时的研究（Time and Motion Study），从一个新的角度来研究提高劳动生产率。通过实验与观察，他发现减轻劳动强度能获致劳动生产量的成倍数的增加，说明合理的运用生产因素——人力，可以获得生产量的增加。他发现计件工资的好处和超产奖励的优点。在他的书中，他发挥了这一思想，形成了所谓的“泰勒系统”。

一九二〇年，贝尔研究所（Bell Laboratory）的休哈特（Schwart）发明了控制图（Control Chart），第一次提出了不是单纯通过提高设备人力的技术来提高质量的方法，这就是质量控制的开始。

三十年代，发展了从埃尔朗开始的电话系统话务理论，通过统计平衡方程的计算，美国贝尔公司的马林那（Molina）与威尔金逊（Wilkinson）创造了一套计算电话系统分级复联的科学方法，同时发明了概率模拟实验的设备，通过理论的计算与实验的验证，使达到最佳质量通话服务。通过欧美电话研究者的努力，形成了一套比较完备的理论，这就是排队论的前身。

三十年代，瑞典数学家巴尔姆，苏联数学家欣金，对电话呼叫过程进行了深入的数学分析，发掘了呼叫的微观本质特征，提出了呼叫的普通性，平稳性，有限性与无后效性等四个特征，并把它称做普通流。这样就在严格的数学基础上，奠定了系统随机聚散的基础理论——排队论。这样，数学的功用，不仅在于求得系统运用的数学解答，还在于通过灵巧迂迴的技法，缜密严谨的思维，剖析数学模型所蕴含的内在机理本质。排队论的很早建立，说明了数理科学向系统运用研究领域渗透的极大成功。

本世纪以来，许多经济学家继承十九世纪的传统，探索对经济学运用数理科学方法的可能性。度量经济学和经济数学就是在这几十年当中逐步建立起来的。

三十年代，华·列昂节夫在斯卢茨基的指引下，力图把瓦尔拉斯供求模型的平衡方程应用到集中的计划经济的情况，创造了一个华氏平衡模型的一个变异——投入产出模型。投入产出模型在三十年代的美国得到了学术上的承认，二次大战后，通过对美国经济的成功分析与预测，应用极为广泛，成了系统分析生产的重要工具。一九七二年他获得了经济学诺贝尔奖。

三十年代初，荷兰物理学家丁伯根，目睹当时描述性经济学教条主义的泛滥，看到分析推断经济现象的过程中存在着很大的任意性，愤然改行研究经济，立意使经济研究度量化，向经济学引进物理构模和数学推论与计算的方法，和其他许多学者一道，建立了度量经济学，他与挪威的佛列希一起，因此获得诺贝尔经济学首奖。现代经济学基本上的度量化，说明了数理科学向经济系统运用研究渗透的成功。

一九二八年，数学家封·诺以曼和维也纳经济学家讨论研究经济问题中的竞争现象的博

奕对策,提出了博弈问题并证明了 Minmax 定理,后来他和经济学家摩根斯坦因合作,1944年发表了“博弈论及经济行为”(“Game Theory and Economic Behavior”)。一九三六年封·诺以曼与瓦尔德先后发表了经济平衡方程与不动点原理的文章,把华氏经济系统平衡建立在严谨的抽象的数学基础上,从而导致了后来的深刻严谨剖析经济系统基本运用现象的数理经济学。

一九三九年,苏联数学家康托洛维奇发表了“生产组织与计划的数学方法”,在苏联工业界与数学界引起了很大的反响。他认为提高工业部门的工作效率的途径有两条:一条是技术方面的改进,即增加新的机床设备,改变工艺过程,寻找新的优质的原料等等;另一条是在生产组织计划方面求得改进,正确分配设备,正确分配订货,正确分配原料与燃料。即在运用最新技术的同时,科学地进行生产组织与计划,他的数学方法就是解乘法,与经典数学分析的极值求解方法迥然不同。他的这一工作和后来他进行的价格不平衡问题的经济数学研究,在三十年后得到承认,1974年,他和美国库普曼一起被授予诺贝尔经济学奖。

综观二次世界大战以前的科学努力,可以看出,研究系统随机聚散现象的排队论,研究系统竞争现象的博弈论,都已奠定了相当的基础。度量经济学与数理经济学刚刚起步不久,由于苏联的封闭,康托洛维奇的工作,很久以后才为世界所晓。泰勒的著作,虽有创造,但毕竟缺乏数学方法的表示,所有这一切表明,虽有卓著,毕竟孤立分散,虽有大树,尚未成林。只有二次世界大战,运筹学(O.R.)的诞生,才使这一切改观。

(四) 运筹学的产生(O.R.)

二次世界大战开始,运筹学(O.R.)应运而生。当时英国陆军失败,保卫英伦三岛,成为英国举国上下一致的任务。当时英国有一支训练良好的空军,有部署的技术最新的雷达系统,为了有效地使用这一系统,英国国防部门在一九四〇年八月成立一个跨学科的十一人小组,称为O.R.小组,由物理学家布赖克特(Blackett)领导,其中包括两名数学家,四名物理学家以及其他五人。多学科的研究正好是运筹学与系统工程的特点,然而在那时还是稀有罕见的,军方有的人便讥之为科学杂技班子。这个小组卓有成效的工作,不但使其成为战争中不可缺少的组织,而且显示了它极其重要的作用。

英国O.R.小组的工作与经验,使得美国感到有必要成立类似的机构。一九四二年三月,美国海军反潜部队成立了以M.I.T.物理学家摩尔斯为首的十七人小组,其中一半为数学家,其余大多是物理学家。英国运筹学的名称是Operational Research,而美国叫做Operations Research。

我们知道,二次大战以前,有关作战的问题,从来是军事人员的工作对象,忽然出现了科学工作者的参与,当时O.R.研究的对象,乃是武器系统的运用及效率的评估,而这些研究工作参与者,大多是卓有名望的自然科学家。一个象英国这样处于生死存亡危急之秋的国家,当然会毫不吝惜地动员她的精华,优秀的科学家去做这样特别重要的事情。自然科学家,处理这种问题时,自然地带着探讨自然规律的倾向与气度,所以在O.R.中,深深地刻下了他们的脚印与足迹,使之成为学术气味相当浓郁的学科。同时,O.R.小组还有这样一个经验,即要使武器系统运用充分有效,必须到现场去与使用者共同研讨实战中这个系统能够发挥什么样的作用,在战争中应用科学分析改进作战,需要某种从实践中锻炼出来的特殊

眼力与手段。

一般讲，O.R. 的成功运用，往往导致三倍，十倍或十倍以上的改进。许多武器系统的运用之所以与其理论上的最佳状况相差甚远，皆因其中一个关键环节有毛病，卡住了脖子，这就是所谓瓶颈 (Bottle Neck)。一个系统的运用，消除了这个瓶颈，解除了卡脖现象，效率就能够几倍地增加。任何系统运用的最初研究，都是致力于寻找这种可能导致改进的巨大倍数。这种思考方法称之为半贝思考。半贝定义为以10为底的对数标量单位。半贝相当于10的平方根，大约相当于3。在一般科学分支中，半贝思考都是非常有效的，许多有成就的科学家都惯于利用它。在运筹学中它更加特别有用。

一个简单的例子是部队刷洗餐具的洗盆的配置，原来有两个洗盆，两个涮盆。运筹学工作者发现洗比涮慢3倍，于是排起了长队。他建议四个盆子三个洗一个涮，这样不仅只是缩短了队长，而且几乎在大多数情况下，根本不出现排队现象。

反潜战是O.R. 小组最注重研究的问题。一个明显的事实是：潜艇可畏，无非是能潜入水中，不易暴露，所以应当先研究搜索，这一研究就发展成为后来的搜索论 (Theory of Search)。其中，著名数学家库普曼 (B.O. Koopmans) 发挥了很大的作用。搜索首先要衡量效果，这就需要制订指标，量度一架载雷达飞机的搜索效果。这个指标就是著名的扫率 (Sweep Ratio)

$$Q_{OP} = \frac{C \cdot A}{N \cdot T}$$

这里C——遇到敌潜艇的次数，

A——搜索的面积，

N——搜索区域内可能存在的敌潜艇数，

T——总的搜索时间，

显然，这里量纲是平方英里/小时。理论搜扫率

$$Q_{th} = 2RV \text{ 平方英里/小时，}$$

R = 有效侦察侧距，

V = 搜索飞机的均速。

Q_{OP} 与 Q_{th} 之比不仅依赖我方装备的效力，而且依赖于敌方躲避侦察的效力。根据理论与实际扫率的比差，可以判断出了什么原因，从而采取反措施。

搜索发现敌艇不是反潜战的最终目标，最终目标是击沉。飞机投弹原来用普通炸弹，只能在水面上爆炸，即使击中，很难击穿耐压船壳，显然效力不高，后来象海面舰只一样，改用深水炸弹，在水下爆炸，保证对舰室的破坏性大，问题是在水下爆炸的深度取多深为好。参加制定标度的著名物理学家肖克莱 (Shockley, 一九五六年诺贝尔奖获得者)，经过科学的定量分析，发现在25英尺处深度爆炸，能使平均袭击成功的机会加大三倍。德国潜艇遭到重大损失后，惊呼英美发明了一种爆炸力大几千倍的炸药，这就是半贝思考的物质效果。

潜艇对鱼雷的防御，曾经考虑装置鱼雷侦察传声器，潜艇在侦知鱼雷后，即时采取转向躲避动作，使艇首尾对着鱼雷前进方向。经过建立模型进行数学分析，结论是：如果侦察器能侦知2000码以外的鱼雷，就能即时采取躲避动作，大大减小击中概率。美国装置了这种传声侦察器以后，至少保全了四艘潜艇免遭击沉。

直布罗陀海峡飞机巡潜，是措施与反措施，战术与反战术的博弈对策问题。飞机在海峡

巡逻，应与海峡垂直飞行，飞机的策略，在海峡哪一点飞行，而潜水艇的策略，是应在海峡哪一段潜水，哪一段浮出。应用封·诺以曼的博弈理论，可以研究种种不同情况的对策与反对策。

二次世界大战期间，美国经济学家库普曼 (T.C.Koopmans) 为了战争的需要，研究了运输问题，用最好的方法进行空运，把作战物质空运到前方各条战线。库普曼把这个问题纳入他所从事的度量经济研究工作——“活动分析”的范畴。同时，四十年代，美国空军有最优规划的算法研究项目，在这个研究项目中，但泽格发明了线性规划的单纯形法，所有这一切均是国防问题的推动。这样他们就和康托洛维奇一起建立了线性规划。一九七四年，经济学诺贝尔奖金就授予康托洛维奇与库普曼二人。

第二次世界大战，O.R. 成功地解决了许多重要作战问题，显示了科学的巨大物质威力，为O.R. 后来的发展铺平了道路。世界大战以后，O.R. 工作者一部分回到原有的专业，如物理学家肖克莱，数学家泰勒，一部分转向了和平的应用，如摩尔斯，特别是，很大的注意力转向了理论。

O.R. 的特殊经验是什么呢？首先，O.R. 所面对的问题，其性质与其说与物理学的大多数问题接近，还不如说多少与生物学和经济学的的问题相近些。数据少，现象复杂。然O.R. 对付数据与事实的态度，必须象物理学家那样需要准确性与可靠性。其次，O.R. 的方法论重视理论分析，这就是必须尽可能快地搜集到的事实与经济数据变成普遍的理论，然后通过数学方法巧妙地加以处理。每一门科学的理论都始于研究大大简化了的特殊情况。只有完全深入剖析了这种简单情况，将其与复杂情况相比较，我们能够引入较复杂的情形，进而研究具有实际重要性的复杂问题。自由落体是一个很普通的力学现象，正由于对这一极其简单的事实的研究，并把它与天文学资料对比，就推动了力学的发展。

为了进行理论分析，就不能满足于定性的描述，必须强调数量化。如果仅有原始的数据与事实，而无模型，就不能数量化，更无法推理分析。因此，模型构造的方法自然被引进了来。二次世界大战产生的O.R.，可以说是一个里程碑，确实地说明了数理科学方法研究系统运用与机理问题的成功，这样也说明了从十九世纪下半叶开始的这一渗漫的合理性。

从十九世纪末到二次世界大战结束，总结起来，人们利用数理科学方法，研究了系统的聚散，配置，竞争与平衡的系统运用机理问题。一九五〇年，在美国运筹学会成立的那个时候，摩尔斯就把排队论、规划论和博弈论正式列为运筹学的范畴。三十年以后，运筹学在和平领域继续取得成效。运筹学的各个分支，在二次大战O.R. 的基础上向广度向深度发展，逐渐建立一套理论，使其在发展中长成为科学大树的茁壮的一支。

(五) 运筹学的发展

五十年代以来，各方面情况发生了巨大变化，生产的规模空前扩大。由于新兴和恢复的推动，科学技术迅速发展，使机器设备日新月异，社会需求多样性日益增强，生产与服务的社会性空前加强。生产与服务的专业分工愈细，设备人力在空间与平面的散布愈广，使得纵横两向的联系更趋复杂。交通拥挤问题日趋严重，社会环境公益制约更严，人与机器有机联系与接口愈加密切重要。所有这一切复杂的相互关联，相互影响的因素，环环相扣，节节关联，这一切使得生产与服务的系统运用变得十分困难。同时在系统运用过程中，常常潜伏着

不可逆料的偶然因素，在意料不到的时候涌现出来，难以应付处理，所有这些说明，单凭直觉与信估，势难避免碰壁，招致失败，人们乃不得不寻求科学的系统运用方法，所以二次世界大战后的运筹学就自动地成了开门的芝麻。

五十年代初期，埃迪（Edie）研究纽约港桥梁和隧洞的车流交通拥挤问题，他运用电话排队论的理论，研究了交通收费亭的延迟和车流堵塞与通过手续处理时间的关系，他的理论储备来自贝尔电话公司的经验，经过仔细的实地考察和统计数据，发现左侧弯的堵塞比右侧弯情况好，因为左侧弯的处理拖延时间比较短，因而导致堵塞的可能性与严重性小得多，此后，美国广泛采取了左侧弯的方法，埃迪这一杰出工作，得到了美国的兰彻斯特奖金。

美国堪萨斯城环境污染问题，也是运筹学应用成功的一例，本来的情况是，堪萨斯城环境污染管理部门规定各工厂减少其污染之一半，总共需花2600万美元，这样能将污染限制在允许的污染标准之下，加州大学校长希奇（Hitch）领导的运筹小组，研究了这个问题，建议将非铁铸造工业的污染减掉98%，化学工业减少38%，则达到同样允许的标准，只需花费700万美元，这就得到一个半贝的改进。

有机化学合成技术，利用煤、石油和天然气原料，合成基本有机产品，加工后制成合成纤维，合成橡胶与塑料，合成同一有机产品往往存在着大量不同的流程，其经济效益有时相差十分悬殊，如工业中大量需要的丙烯晴，美国原来采用氧乙炔加氰氢酸和乙炔加氰氢酸两种流程，到七十年代，全部用俄亥俄公司的丙烯加氢的流程所替代，从而使丙烯晴的价格，从每磅38分降到12分，这一发明是卡内基大学运筹小组应用数学规则，根据经济效益，原料供应，环境污染等限制，对大量流程进行自适应选择研究出来的。

一种新技术的采用，往往冒着一定的风险，运筹学对于一种新技术的评估，象战争时期对侦察传声器的评估一样，有着特殊的效力，英国煤矿业曾经多次考虑采用石油勘探中广泛采用的地震法，帮助决定开采面的方向，但不敢贸然行事，最后，通过运筹学工作者运用运筹模拟实验，发现地震法这一新技术具有很好的效力，于是决定采用。

水力发电问题，常常是一个综合性利用水力资源的问题，对于径流的处理，是比较棘手的，五十年代美国的力托（Little）把年径流分成小时间区段来处理，发现了适当的划分，可使具有离散的马尔可夫过程的性质，从而使采用马氏决策过程处理水力发电的综合问题。

运筹学在五十年代以后得到了广泛的利用，大抵是对现有的系统进行系统运用的研究，对于系统配置，聚散，竞争的运用机理深入的研究，发展了比较完备的一套理论：排队论，规划论（线性与非线性，静态与动态），博弈论，存贮论，决策论，图与网络以及运筹模拟。

早在五十年代，管理科学（Management Science）出现了，实际上它是运筹学 O.R. 在战后渗透到管理工程领域的结果，管理科学的杂志所发表的文章基本上与运筹学杂志没有区别，所以 M.S. 与 O.R. 很难区分开来，所以有时候，人们用 O.R./M.S. 表示这是一回事。

（六）系统分析与系统工程（S.E.）

二次世界大战，武器系统设计人员，常常与 O.R. 工作者一起到战场上去考察武器系统的运用，这样就逐渐发展为系统分析，成为国防研究的重要手段，一九四五年，美国国防部

与科学研究开发署与道格拉斯飞机公司订了一个合同，称为兰特计划(Rand Project)。最初，只有少数人，工作是为美国空军研究洲际战争，要求提出有关技术和设备的建议。其第一个报告是“实验性环球空间飞行器的初步设计”，可以说是典型的系统工程师工作。到了一九四七年，在福特基金会的财政支持下，成立了非营利的兰特公司。在多年的研究经验累积下，形成了后来的兰特的系统分析，兰特把它称为运筹学的姊妹学科。

兰特的研究项目，许多是对既定目标的不同方案进行费用与后果的经济评价，帮助对重大的研究发展计划进行决策。兰特观点是，防务开支可以作为资源配置的经济问题加以研究，使可资利用的资源发挥最大的作用。兰特主要从事长期的研究与分析……有助于战略和技术的规划和运行。兰特没有实验室，兰特不制造硬件，因而有别于工业界中通常使用的系统工程一词。兰特型的系统分析大致如下：

1. 期望达到一个或多个目标；
2. 藉以达到目标的可资选择的技术与设备；
3. 可望选择的系统所需要费用与资源；
4. 几个数学模型，藉以表达目标、技术与设备，环境及资源之间的相互关系与作用；
5. 关联资源与目标的判别准则，藉以选择最优方案。

兰特的系统分析与我们下面所讲的系统工程实际上是有着一些不同，可以看做是并行地发展起来的。因为兰特的人员有些是运筹学家，有些是经济学家，所以对于把经济与运筹交叉研究的一些科目分支发展得很透彻，这样就为发展系统科学提供了基础。

我们所讲的系统工程(System Engineering (S.E.))最初是与导弹系统的发展联系在一起。二次世界大战后，美国C.I.T.的喷气推进研究所，是美国喷气动力学及空间研究的一个中心。他们在研制下士导弹(Corporal Missile)时，遭遇了失败，总结经验，发现失败的根本原因，在于没有从系统的观点出发，对各种可供选择的方案进行系统分析比较，从而采取正确的方案，而是采用已经制成的发动机，采用了手边将就可用的部件，结果下士导弹制成后，虽然也能运行，但效率低，造价昂贵，并且后勤供应量极大。通过这一失败教训，从而得到两条经验：(1)一个复杂系统由未受过很好科学技术教育训练的人操纵时，对人-机系统接口的相互作用必须充分了解；(2)为了解决一个技术问题而研究一个硬件的优化问题时，必须从系统观点出发，明确系统的目标与制约。只有这样，优化的结果才能有利于达到系统底目标。后来，在研制下一代的中士导弹(Sergeant Missile)时，就将系统分析的观点明确起来。一方面对系统负有整个全权；同时明确了使用者的要求与制约，确定了系统的目标与约束，承担了研制、生产与初步实战的运用。这就是说，承担了系统工程全过程，结果证明中士导弹是成功的。后来他们从事水手号空间系统研制时，就全面按照系统工程的步骤与方法行事，这与贝尔公司霍尔(Hall)的“系统工程方法论”一书所讲的步骤方法没有什么两样，基本上大同小异。

实际上系统工程这一词是来源于贝尔电话研究所。早在四十年，他们打算建立一个贯穿美国东西部的微波接力通信系统，提出了系统工程的研究。这一系统因为二次世界大战而被耽误了下来，一九四四年开始研制实验的系统(TD-X)，于一九四七年完成。商业性的TD-2系统计划始于一九四六年，一九五一年开放业务。这样，贝尔电话实验室正式于这个时候提出系统工程的名称，表明这一系统的顺利建设完成，是由于有了系统工程的缘故。

一九五七年，Goode与Machol发表了“系统工程”一书。他们是从一九四七年起开始，

在密执根大学为美国空军研究导弹系统而研究系统工程。这本书除描述一般复杂的电讯与导弹系统外，主要讲述了系统工程中所使用的科学方法：概率统计、运筹学各分支，信息论，伺服理论与计算机。这是第一本系统工程的书籍。

一九六二年，霍尔发表了“系统工程的方法论”，在这本书里他强调创造性思考的重要性，提出了系统的需求与价值理论；重视经济理论与系统工程的关系，首次提出了技术的优越性与系统经济性的矛盾问题。

按霍尔的说法，系统工程的步骤是这样：

1. 问题确定 (problem Definition) ——就是说明分析系统运用情况，使用要求、经济考虑，政策，可能的系统输入与输出。
 2. 选择目标 (Selecting Objectives) ——就是研究确定目标，据之探索各种可行的方案。
 3. 系统综合 (System Synthesis) ——综合各种满足目标要求的各种系统。
 4. 系统分析 (System Analysis) ——对假设的系统的指标、价格、质量与市场进行推理与分析，讨论各种可能的后果。
 5. 选择最优系统 (Selecting the Best System) ——从可供选择的系统中，选择最有前途的系统。
 6. 系统发展 (System Development) ——进行探索性的研究，一直研制样品的阶段。
 7. 实际研制——样品阶段以后的工作，包括监视，修改以及将信息反馈到实际部门。
- 系统工程就是通过这样的步骤把研究与工程有机地结合起来。

下面是一个系统工程的实例。

这个研究实例，是关于美国纽约市的供水网的扩建。六十年代后期，考虑到纽约市往后四十年人口的增加，随之而带来的供水量的增加；同时考虑到供水网络年久失修，需加扩建。

纽约市供水系统是一个梯级网络，分为水库，输水系统和配水系统等子系统。配水系统又分一级、二级和三级。此次扩建系初级，而三级水网的端点即与用户相联接。

纽约市供水委员会对此扩建计划作了设计，总投资为十亿美元，投资大，故引起争论，于是问题交给 M.I.T. 的系统工程部研究。

纽约市供水委员会的基本设计指标如下：

1. 三级水网络端点水压40磅/时²；
2. 设计水平四十年，扩建后保证到2010年的水的需求；
3. 不用加压水泵站，利用天然落差。

M. I. T. 系统部基本上按霍尔的步骤研究了这一问题。

一、问题的说明

从系统工程的观点说，一个城市的自来水用户，对供水系统的要求简单地归结为40磅/时²未免过于简单化，对供水的要求，通常是多目标的。例如居民对供水，对卫生、色、味、嗅有一定要求，工业用水对化学成份有要求，消防部门关心水源的可靠性，而市政部门则要求市内各区的供水有均匀性。权衡考虑，选定以下四个目标：

1. 系统的综合效益；

2. 供水的均匀性;
3. 可靠性;
4. 基建与运行费用.

二、效果衡量指标的选择

根据四个目标, 需要择定衡量达到目标的程度。这是判别准则, 而不是目标定义, 所以有挑选余地。

综合效益, 可用加权平均水压表示。假设通过水网各点的水量与水压分别为 q_1, q_2, \dots, q_N 和 p_1, p_2, \dots, p_N , 则

$$P = \frac{p_1 q_1 + p_2 q_2 + \dots + p_N q_N}{q_1 + q_2 + \dots + q_N}$$

为加权平均水压。

可靠性在这里是考虑水网某一关键管道失灵关闭的系统效益。不能用通常概率方法计算, 而是采取失灵/安全的方法。

三、系统综合

系统综合就是产生不同的可供选择的方案, 由四种因素划分:

- ① 系统管长与管径;
- ② 网络构型;
- ③ 用否加压水泵;
- ④ 设计水平。

四、系统分析

系统综合, 根据不同的考虑方法, 计算了250种方案, 就各种指标进行了分析。

由图 a 可知, 投资增加到一定数目时, 再增加投资, 增加的综合效益就很小, 说明A点以后边际效用很低。

图 b 也表明从端点水压看在A点合适。不同方案的可靠性计算结果如图 c。A点的环路系统可靠性指标十分良好。

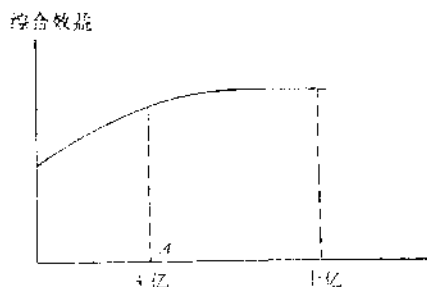


图 a

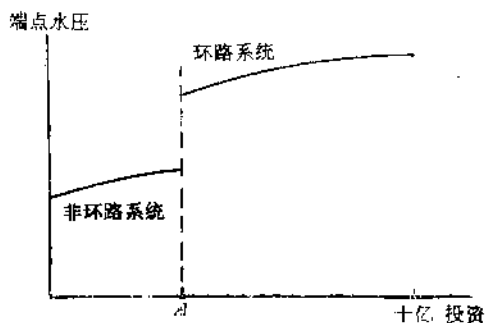


图 b

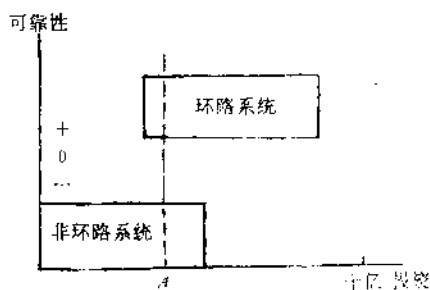


图 c

以上三个目标的估计，即综合效益，供水均匀性和可靠性，均考虑40年设计水平。

图 d 表明管径为原方案管径 D 的 $\frac{4}{5}$ 为最好。

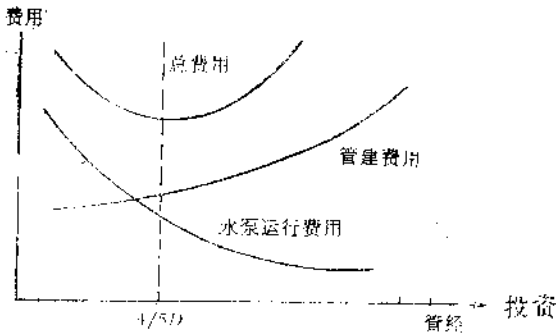


图 d

系统选择，从道理上应该选择最优系统，但对于多目标的问题，最优的含义不同，需要种种权衡。这一方案最后采用管径20—24呎，由原来26—27呎降到此值。第一期工程费用由3亿降到2.23亿。从经济上说，这当然是一大节约。这项工作，由于成功的实行，受到重视。成为系统工程的一个特别重要的例子。

系统工程的高峰，当然是阿波罗登月计划，这样一个耗资惊人的巨大计划，若无系统工程，就会成为不可想象的事情。例如，在登月舱发射之前，必须测检整个系统有无障碍，如有障碍，障碍在哪里，这样一个问题，在一个元件部件不多的系统里，是容易解决的，但是对于包含上亿个单元的系统，问题就非常棘手了。所以日本人参观阿波罗登月舱后说，阿波罗计划中所有元件设备与工艺，日本无一不能，唯独系统工程日本不行。由此可见阿波罗计划中系统工程的成就。

总的来说，系统工程与电机工程等一般工程不同。首先，一般工程的一个基本特点是“生产物质”，而系统工程不限于以特定范围工程的物质对象为对象；其次，工程的意思是运用数学、物理、化学等基础自然科学，还运用生物学、心理学、社会学和经济学，特别是自然科学数理科学方法渗透到这些学科所产生的现代化结果，如度量经济学，社会物理学，心理数学，生物数学以及人类工程学等。

系统工程有“系统”与“工程”的两个侧面，系统这个侧面是指系统的观点，是指多科性综合的研究，是指研究任何系统的“系统”。所以系统工程是一种研究，事事需要以研究探索的态度去对待，需要创造，不是就事论事，不能指望简单的按图表公式计划。所以系统工程的书籍，常常特别强调创造性思考，系统工程的另一侧面是“工程”，意味着实践的观点，不是纸上谈点，不是空发议论，而且要把系统研究的结果付诸实施。这两个侧面合并起来，便有机地结合为系统工程。

总结起来，运筹学与系统工程研究的系统具与以下的性质：

①系统是人-机系统；

关于设计水平，一般工程规模越大越经济，规模越大，单位出率投资数就越小。公用工程一般需要量逐年增加，建成以后，亦不会满负荷，因有投资积压问题。规模越大，投资积压越大。这就要在规模年限与投资积压之间权衡。投资积压用利息表示，图 e 表示了设计年限与投资积压的关系，对应2%的年增长率，利息介于5%与6%之间，则设计水平以25年为佳。

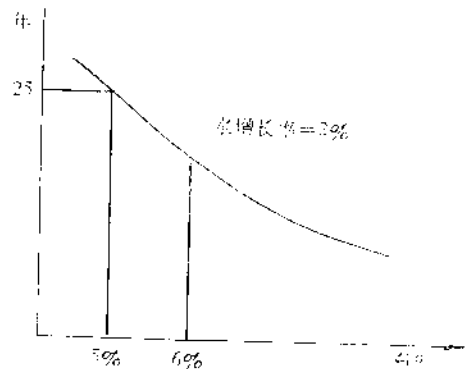


图 e

- ②系统包含计算机的元素；
- ③系统是复杂的，即元素间相互作用与相互依存的关系十分复杂；
- ④系统是有组织的、有序的结构；
- ⑤系统是随机的，是宏观可计量的；
- ⑥系统有时是竞争的，也时刻是合作的；
- ⑦系统有时有聚散的现象。

因此系统工程的人才，是一种崭新的人才，它具有系统的思考方法，它具有实践的能力。他是所谓的Generalist，而不是单纯的Specialist，但是他应当博而不泛，专而不悖，他把系统当作一切的首要，但他不空发议论，不仅能够细致地运用系统分析方法，手把解剖刀进行解剖分析，又能巧妙地将系统诸元综合为良好的系统。这样的人才就是典型的系统工作者，我们叫他作Generalist。

(七) 系统科学

四十年代，维纳发明了控制论 (Cybernetics)，香农发明了信息论，这二者和封·诺以曼的博弈论以及二次世界大战中出现的运筹学，便成为研究系统的最初四根支柱。通过五十年代以后运筹学与系统工程的发展，系统的概念大大地加深和大大地推广了，度量经济学，数理经济学，心理数学，生物数学和生物物理的成熟发展以及对系统运用机理的研究，使得运筹与系统工程有可能成功地把这些结果吸收过来，营养自己，壮大自己，于是这许多学科的交界越来越广，逐渐以系统为核心集中起来。七十年代，普里哥津与哈根的合作现象理论，又进一步使系统概念扩大深化，逐渐便出现了研究广义概念的系统科学前景。

系统工程与运筹学的发展中，人们发现，系统的结构与存在的形式，越来越复杂，而科学的力量也越来越神奇，于是科学的系统概念也跟着扩大深化。

在系统工程与运筹学发展中，由于系统的复杂性与组织性增强，我们发现，系统往往有一个外部的系统存在，称做环境。如果系统与外界可以分隔，这种系统，我们称为闭系统 (Closed System)；否则，称作开系统 (Open System)。因为系统都是在围绕它的外部环境下运用，一般系统多系开系统，而这种开系统的研究，大大地发展了系统的概念。

由于系统是人-机系统，其结构形式与运用机理十分复杂，出现了系统的梯级结构 (Hierarchy) 与自适应、自组织以及自学习的运用概念。同时也因此出现了因果系统 (Causal System) 与目的系统 (Teleological System)。由于人的出现，必须研究人际关系以及人机接口，于是行为系统 (Behavioral System) 出现了。所有这些种都表明系统在演变。

从开始我们就提到经济平衡，电话系统平衡。由于普林斯顿学派德·布纽与阿尔诺的贡献，系统平衡的概念出现了，这是一套比较完善的经济数学的理论，很容易移植推广到一般的系统平衡里来。

比利时的化学物理学家普里哥津，研究统计热力学的无序有序结构，很容易推广到一般的系统的序结构方面来。这就是近代的合作现象理论。

再看看系统工程与运筹学的发展中，由于实际的需要，要求研究系统的需求，系统的价值，系统的障碍侦破，系统的识别。因为我们需要引用度量经济学的理论，需要引用数理经济学的理论，需要引用数学心理学的理论，为了研究系统与环境的冲突，需要冲突分析的理论。所有这些都是从运筹学的主体以外的学科中分离引入的。

七十年代，系统科学的前景已经开始从地平线上出现：出现了系统科学的杂志，出现了美国各大学的系统科学系。这说明科学者已经严肃地认为系统科学在萌芽出土。我国就是在这种背景下（一九八〇年初）建立了系统科学研究所。

但是我们认识到，广义的系统对象，广义的系统概念，广义的系统方法，广义的系统运用机理，比原来的系统概念，必然更难处理，但我们又认识到，这是历史的一个必然，系统科学在系统概念自身逻辑演变中，在生产社会发展与科学发展的必然道路上，将发展起来，完备起来。

十九世纪经典物理学的发展中，数学起了极大的作用，产生发展起了极大的推动力。现在同样的形势摆在系统工作者面前，从系统研究与应用的蓬勃生春的现在来看，可以预见，它必将有一个更加辉煌的未来。