

系统与系统工程

丁渭造宫与系统工程

在我国古代的北宋（公元 960 ~ 1127 年）年间，有一天皇帝居住的皇城（今河南开封）因不慎失火，酿成一场大灾，熊熊大火使鳞次栉比、覆压数里的皇宫，在一夜之间变成断壁残垣。为了修复烧毁的宫殿，皇帝诏令大臣丁渭组织民工限期完工。当时，既无汽车、吊车，又无升降机、搅拌机，一切工作都只能人挑肩扛。加之皇宫的建设不同于寻常民房建筑，它高大宽敞、富丽堂皇、雕梁画栋、十分考究，免不了费时费工，耗费大量的砖、砂、石、瓦和木材等。当时，使丁渭头痛的三个主要问题是：1. 京城内烧砖无土，2. 大量建筑材料很难运进城内，3. 清墟时无处堆放大量的建筑垃圾。如何在规定时间内按圣旨完成皇宫修复任务，做到又快又好呢？聪明的丁渭经过反复思考，终于想出了一个巧妙的施工方案，不但提前完成了这项修筑工程，而且“省费以亿万计”——节省了大量金银。

丁渭是怎样做的呢？

首先，丁渭把烧毁了的皇宫前面的一条大街挖成了一条又深又宽的沟渠，用挖出的泥土烧砖，就地取材，解决了无土烧砖的第一个难题；然后，他再把皇城开封附近的汴河水引入挖好的沟渠内，使又深又宽的沟渠变成了一条临时运河，这样，运送砂子、石料、木头的船就能直接驶到建筑工地，解决了大型建筑材料无法运输的问题；最后，当建筑材料齐备后，再将沟里的水放掉，并把建筑皇宫的废杂物——建筑垃圾统统填入沟内，这样又恢复了皇宫前面宽阔的大道。

显然，这是一个非常杰出的方案。首先，丁渭就地取材烧砖，解决了近处无土烧砖的难题，避免了从更远的地方去取土烧砖；其次，利用河道运送大量建筑材料，既解决了运输难题，又能将各种建筑材料直接水运到工地，这对当时只有马车与船只的时代，节省大量的运力，意义十分重大；最后，本来要运到其他地方去的大量建筑垃圾现在统统埋进了沟中，节省了运力，节省了时间，减少了对环境的污染。这种综合解决问题的思想就是一种典型的朴素系统工程思想。

这个当时就被古人赞誉为“一举而三役济”的“丁渭造宫”，用今天的观点看来仍是值得称道的。丁渭将皇宫的修复全过程看成了一个“系统工程”，将取土烧砖、运输建筑材料、垃圾回填看成了一串连贯的环节并有机地与皇宫的修筑工程联系起来，有效地协调好了工程建设中看上去是无法解决的矛盾，从而不但在时间上提前完成了工程，而且从经济上也节省了大量的经费开支，又快又好地完成了皇宫的修复工作，实现了整个系统的最优——既省时又省钱方案。

系统工程的核心思想就是把我们所做的每一项工作或所研究的每一件事物看成了一个有机的称之为“系统”的整体，并且设法找出使这个系统变得最好、最佳、最优的方法与途径。就像丁渭修复皇宫那样，创造性地找到了使皇宫的修筑工程得以顺利进行的方法。

系统工程特征

丁渭建筑皇宫时，所使用的原材料主要是砖、砂、石以及木材等。今天，房屋建筑同丁渭那个时代相比已发生了翻天覆地的变化，但建筑材料仍是砖、砂、石、木材等为基本原材料，只是昔日的大型石块已被今朝的钢筋混凝土所替代罢了。

现在让我们来看看这些对人类发展作出了巨大贡献而默默无闻的砖、砂、石吧！

当房子建造之前，这些从四面八方运来的砖、砂、石被散乱地堆放在建筑工地上，不但不起眼，而且还有点令人看不顺眼，因为不管怎么堆放都显得乱七八糟的。然而，当建筑工人用一双灵巧的手把这些零乱的砖、砂、石按照建筑设计师的设计——有机地组合、叠砌在一起的时候，奇迹就发生了——还是那些看上去不起眼、平凡的砖、砂、石，转眼之间就变成了一幢幢高耸入云、美观漂亮、整齐别致而生气勃勃的建筑物。工矿企业、商店、医院、学校、体育馆、水电站、住宅等从空旷的荒野上冒了出来，一幢又一幢，一座又一座，像雨后春笋。

为什么同样是这些砖、砂、石，在经过建筑工人摆弄之前，就那么不起眼；而经过建筑工人的精心劳动之后，就能赋予它全新的生命力而给人们以美的感受呢？自然，你可以说出许许多多各式各样的理由，但其中最主要的原因是建筑工人按照建筑师的设计把这些本来没有生命的砖、砂、石组成了一个“有生命”的“系统”——“房屋系统”，给这些无生命的砖、石注入了永恒而不朽的“生命”。

“系统”一词，实际上我们并不陌生，不管你意识到还是没有意识到，你每天都要与这个“系统”或那个“系统”打交道。“系统”，是与我们的日常生活息息相关，而且普遍存在的。譬如，当你出门乘汽车或骑自行车或步行，你就进入了“交通系统”；当你去挂电话，你就在使用“通讯系统”；当你去学校上课，你是“教育系统”中的一员；当然，你还是你所居住的那个城市的“城市系统”中的一个“细胞”；是中华人民共和国这个“大系统”中的一个“元素”，是我们共同生活的星球这个更大系统中的一个“分子”……真是不说不知道，原来，我们生活在“系统”的世界之中，被“系统”所包围！

我们说的“系统”，是由一些（两个或两个以上的）称之为“元素”或“要素”的东西所组成的，但并不是说只要这些元素简单地堆入或集合在一块，就构成了一个“系统”，还必须要求这些元素之间存在这样或那样的关系，即元素之间必须是按一定的方式有机地结合在一起时，它们才可能组合成为一个“系统”。

像前面我们讲过的，一个房屋系统是由“砖”、“砂”、“石”这些元素按照建筑师的设计要求（即一定的方式）有机地结合在一起组合而成的。在施工前，那些堆放在工地上的“砖”、“砂”、“石”由于它们之间缺乏有机联系而无法构成“房屋系统”，更不能挡风、遮雨，尽管其元素是相同的，都是砖、砂、石。所以，只有那些经过建筑工人按“一定方式”结合在一起的砖、砂、石，我们才能称之为房屋，而那些堆放在工地上的砖、砂、石的集体，仍只能称之为砖、砂、石或建筑材料。

再如，钟表也是一个系统，它是由许多零件（元素）如齿轮、螺丝、发

条等组成，这些零件必须是按一定的连结方式有规则地装配在一起才能成为钟表，如果把这些零件随意地放在一起，哪怕就是放进一个装钟的小盒子里，无论如何这些零件都不会被认为是钟表，谁都会说，这是钟表的零件。

再来看看两句民间俗语，一句是“三个臭皮匠，赛过诸葛亮”，另一句是“一个和尚担水吃，两个和尚抬水吃，三个和尚没水吃”。为什么同样是三个普普通通的人（三个元素），前面三人可以胜过智高一筹、谋胜一筹的诸葛亮，而后面三个人弄得连水都没有喝的呢？这中间的差距怎么会这样悬殊呢？很明显，问题的关键就在于三个人的“联络方式”，即通常说的“组织”，是一个齐心协力的群体还是一个勾心斗角的团伙，最终决定了这个组织的力量。毫无疑问，前面的三人组织是一个齐心协力、协调的组织；而后面的三人组织是一个勾心斗角、没有协调的组织。

总的来说，系统必须要按一定的方式加以结合，而不是众多元素的简单堆积。

作为一个系统，除了上面讲述的两点，即系统是由两个以上的元素所组成，系统的各组成要素之间按一定的方式结合以外，还必须具有第三点，即任何一个系统都有它特定的功能。换句话说，就是任何一个系统，都具有其特殊的作用。组建一个系统时，总是有其目的而不会无的放矢。

例如，建造一幢房屋，总是有其特殊的功能即一定的目的。像建医院，就是用来治病救人，救死扶伤；建商店，就是用来出售商品，搞活流通，繁荣市场，发展经济；建学校则是为了教书育人，培养人才；建住宅，是为了给人们的生活、学习提供一个宁静、温馨的环境……尽管医院、商店、学校、住宅都是房屋建筑，但由于它们的功能作用不同，其系统内部元素之间的联系也就不同。在建筑房屋时必须依据这个“系统”的功能，在房屋的组合方式——“结构”上作些调整、考虑与安排，依据系统的目的性开展项目的建设。如建医院，就必须建病房、候诊室、手术室、药房；建商店，就必须建柜台、仓库；建学校，须建教室、教研室、阅览室、操场；建住宅，就必须建卧室、客厅、厨房、厕所，相互之间不可错乱。从上述例子可以知道，系统内各元素的组织（联系）方式是按照系统的不同功能（目的）要求而建立的。

至此，我们已比较清楚“系统”是怎么回事了。换一句简单些的话来概括，“系统”是由相互作用和依存的若干元素结合而成的具有特定功能的有机整体。

可见，任何一个系统，都有下面三个特征：

系统是由两个以上的元素组合而成的。这一特征叫做系统的“集合性”；系统各元素间按一定的方式相互联系，相互制约，各元素间存在这样或那样的联系。这一特征叫做系统的“关联性”；

系统具有一定的功能、目的。这一特征叫做系统的“目的性”。

系统除了上述三个基本特征外，还有其他一些特征，我们将在后面陆续说及。

系统工程就在我们身边

我们仔细观察就不难发现，宇宙系统是自然形成的，在人类诞生以前就早已存在。或者说，宇宙系统的产生和发展与人的活动无关！而机器就不一样了，这是由人动手造出来的，不是先天就有的。对于那些自然形成的固有系统，如宇宙、地球、太阳系、银河系等，我们把它们叫做“自然系统”；由人造出来的系统——与人类劳动和活动有关而产生的系统，叫做“人造系统”，诸如房屋、机器、火车、人造卫星、电子计算机乃至人类社会本身。系统工程重点研究的是人造系统，其主要目的是如何使人造系统更完善、更协调。改进机器是为了使机器的性能更优越，让它生产更多更好的产品；发射地球资源卫星，是为了探寻大地的奥秘，进一步认识、了解我们的生存环境，进而为人类的发展服务；研究人类社会自身，正是为了让天更蓝、地更绿、水更清、人更美，让子子孙孙过上更美好的幸福生活。

地球作为一个系统，天天都接受来自太阳的光和热，试想，假若没有太阳的温暖，地球会变得怎样？

一个工厂，每天要从厂外“输入”原材料、能源和经济信息，同时，还必须向市场“输出”所生产的产品，企业才能维持正常生产，获得经济效益，得到发展。一旦停水停电、缺乏原材料的供应，或企业产品销不出去，企业就会瘫痪。这就是说，工厂企业作为一个系统与环境存在着大量的物质、能量、信息的交换，假若没有这种交换或停止这种交流，企业将无法生存。

人也是一样，必须无时无刻地与四周环境交换物质、能量与信息。吸上一口气，就纳入了生命所必须的氧气，吐出一口气，就排出了人体不能利用的二氧化碳（CO₂）；一日三餐，吸收维持一天生命所需要的能量，还得排泄剩余的废物；读书看报、与人交谈，大脑与感知器官在与外界进行着频繁的信息交流。试想，人若停止了上述物质、能量、信息的交换，能行吗？！

一个系统如果与系统环境有物质、能量、信息的交换，就叫做“开放系统”，否则，就是“封闭系统”。地球、工厂、人都是开放系统。一只上好发条或装好电池的钟表，可以当“封闭系统”看待，在封闭的容器内进行化学反应的化学系统，也是一种“封闭系统”。

再来看看人类系统。人类系统可表示为：个人——家庭——社会——行政单位（团体）——国家——全人类等几个不同的层次。这就是说，人类系统是一个多层次的系统。人按一定的社会准则和血缘关系组成家庭；而家庭是社会的细胞，众多家庭的组合就构成了一个小社会；各级行政机关，包括乡、镇以及企业、机关等是国家的有机组成部分；全世界几百个国家和地区的总和，构成整个人类系统。在这个系统中，每一等级下属的“要素”本身也就是一个系统，如“家庭”是“社会”的细胞，但同时又是由个人所组成的系统。为区别起见，有时就把“家庭”这个系统称作上一层系统——社会系统的子系统。有时我们就把系统理解为由两个或两个以上的子系统所组成，就像社会是由两个或两个以上的家庭（子系统）所构成的一样。另一方面，我们所研究的系统又常常可以与其他系统相结合而构成更大范围的系统。如通常将某一地区的国家集合起来，构成了一个更大的系统，像“欧洲共同体”、“联合国”等等。

此外，我们还常把一切活着的物质系统，称为生命系统，如人、动物、植物以及人类社会系统等；除生命系统以外的一切物质系统，则称为非生命

系统，如原子、机器、天体等。

下面，让我们看看几个常见的系统。

电话系统

电话是当今信息时代重要的通讯工具，它是由人和设备严密组合而成的一个纵横交错的通讯网络，整个系统中的任意两点都能直接通话，从而实现信息的远距离快速传递。电话系统包括设备、电话号码簿、电话电缆、通讯卫星、总机站、公用电话和私人电话及设备的检修与维护服务等。它所以能按部就班、有条不紊地工作，就在于从一开始它就被看作是一个系统而不是互不相关的独立元素的堆积。

在电话系统中，运用了大量的系统工程思想。就一个城市的电话系统而言，“总机站”该设置在什么地方才能使整个系统的布线路径最短？城市人口的多少，决定着电话系统的“总装机容量”。这就是说，一个城市大概需要安装多少部电话，才能满足人们的需求？显然，如果电话太少，通讯不便，会影响经济发展；如果电话太多没有充分利用，又造成不必要的浪费。因此，如何确定一个恰当的数量关系是一个很值得研究的问题。

与此相关的问题还有：电话通讯网络该布设多少条电话线缆才既能保障线路畅通，又用材最少？多少位的电话号码最适合？如何维护线路畅通使用户尽快接通电话？一个城市内该建多少个公用电话岗亭？设置在什么地方最合理？这些都是通讯系统工程必须解决的问题。

交通系统

你一定乘过汽车或火车，划过小木船，见过飞机。你可知道，这一切都与系统工程有关呢！

火车、汽车在工厂制造出来后，必须修筑符合要求的公路、铁道才能有“路”可行；轮船需要有航道、码头，才能驶、停；飞机更是需要机场、灯光信号、地勤服务及空中交通管理条例才能安全起落。除此，要保障交通运输的顺利进行，还需要交通警察维护交通秩序，处理交通事故；要有技术娴熟的驾驶员、优秀合格的服务人员（售票员、维修人员、空中小姐等）。此外，在一个国家范围内，各大城市之间该开辟多少航线，才能保障经济发展的需求；根据一个地区河道的地理特点以及沿河城市的分布、人口的分布、工农业生产的发展状况如何有效地设置港口码头、码头泊位以至船舶吨位大小等，都是交通系统工程不可回避的问题。

从上可知，交通系统与其系统内的人口、经济、地理环境、工农业生产状况密切相关，甚至与员工素质、技术水平、管理意识、气象条件等也不无关系。就交通系统而言，它又包括铁道、公路、水运、航空和管道运输（一般用来输送液、气体，像石油、天然气）等五个子系统。其中任何一个子系统，又涉及到诸多的方方面面。

单就铁道系统而言，它不仅包括常见的呼啸而行的火车，像遍及全球的铁路网、沿铁路而布的车站与铁路通讯、联络信号、规章制度、铁路法院、铁路医院以及铁路、车辆的维护、检修、服务等等一切与之相关的东西都是这个巨大系统的有机组成部分。它的功能是将甲地的旅客（货物）安全、快速地运送到乙地。

铁道系统常遇到的问题有：根据经济发展的需要、人口的分布与地理环境的特点如何优化铁路系统网络？在现有的道路上如何编制车辆的运行计划才能保障火车的安全、高效？如何协调铁路运输与公路、航空、水运之间的

关系？怎样确定铁路运输的最优价格？在系统内如何设置车站、枢纽站最为有效？怎样协调客运与货运之间存在的矛盾？……上述一系列复杂问题，都可以运用系统工程的方法研究解决。

再来看看遍布城乡的公路系统。这个系统除常见的各式汽车、拖拉机、摩托车、自行车以外，还包括人、道路、车辆配件、天然油、红绿灯、驾驶执照、停车场、交通警察、加油站、交通规则等。就道路而言，又可分为国道、省道、县道与乡道。

同铁道系统一样，这个系统有许多问题可以运用系统工程的方法来解决。如怎样根据当地城乡经济发展趋势合理修筑新的道路，才能更快地促进经济发展，方便人民群众的生活？道路沿线各加油站的分布怎样才算合理？如何根据城乡之间的客流量与货运量合理安排汽车的计划？以及城市内公共汽车线路的布设，汽车站的位置选址等等。

目前，交通系统还是一个正在逐步完善的发展中的系统。这个系统还存在许多缺陷：交通堵塞在大城市屡见不鲜；交通事故层出不穷；汽车、火车、飞机、轮船排放的大量废气、发出的刺耳的噪音在污染着我们赖以生存的生态环境……因此，如何进一步调整、改造这个系统，使它更加完善、协调，有待人们的进一步努力。

系统工程的生命——开放与交流

系统科学告诉我们，一个系统要获得生存与发展，也同样必须适应系统外界环境的变化，这是因为系统和它的环境之间，通常有物质、能量和信息的交换。环境特点和性质的变化，往往会引起系统性质和功能的变化。因此，一般来说，系统要有一种特殊的功能，来适应环境的变化，保持和恢复原有系统功能。这就是系统对环境的适应性。

例如，一个企业要想获得成功，创造好的经济效益并不断发展，就必须时常注意企业外部环境（市场、原材料、资金等）的变化，倘若企业不能适应这些变化，不是产品没有销路，就是原材料供应没有保障，企业的生存将难以为继，迟早会倒闭、破产。企业只有尽力去适应瞬息万变的外部环境，并据此不断调整企业的产品结构与组织结构，制定正确的企业发展战略，才能立于不败之地，从而得到发展、壮大。

依前所说，系统必须与其环境适应，而要适应系统环境的变化，系统就必须是“开放的”，因为只有开放系统才能与外部环境进行物质、能量、信息的交换，进而实现与环境相互适应的目的。由此可见，开放是系统赖以生存和发展的必要条件，一个封闭系统自发运动发展的结果只有“死亡”。

人体就是一个典型的开放系统。人每时每刻都必须进行吸收，天天必须喝水、吃饭，这是人与环境在进行物质与能量的交换，人一旦停止吸收，生命就宣告终结；人要饮水、摄入食物才能进行生命体的新陈代谢，保持旺盛的生命力；同样，人与环境间的信息交流是必不可少的。学习、读书、交谈是人增进知识、扩充视野并不断完善、不断发展的必要过程；一个不与外界进行信息交流（不读书，不看电视，不听广播等等）的人无异于空有人的躯壳。人主要是通过眼睛、耳朵、嘴以及皮肤等感知器官来实现这一交流的，一个又聋又瞎又哑又瘫而无法与外界进行信息交换的人，是无法感知、认识大千世界的。可见“人”必须“开放”才能发展。

人类社会是以高级生命体——人作为单元组成的复杂生命系统。对于社会系统来说，系统环境（指自然环境与社会环境的总和）如果都完全封闭起来的话，人无论是作为生物学的个体还是作为社会群体之一员，均将无法生存而逐渐消亡，这就是说，开放也同样是社会系统得以发展的必要条件。

从城市与乡村这两个社会系统来看，城市由于开放程度较高，交通发达，通讯便利，与外界存在着大量的物质、能量、信息的交换，如农副产品、煤炭、电力、石油等源源不断地送到城市，城市通过输入原材料，输出加工产品以发展经济，从而使城市得到较快的发展；至于偏远乡村，开放程度较低，交通不便，信息不畅，大多仍处在自己生产、自己消费的自给自足的小农经济阶段，尽管男耕女织，田园风光富有诗情画意，但千百年来人们的生活水平就是无法大幅度提高。据此分析农村经济发展的主要途径之一是要大力加速改革开放，加强偏远乡村与城市之间的物质、能量、信息的交流。在城市与城市之间，乡村与乡村之间，也会发现，开放程度越高，经济就越发达，人们的生活水平也就越高。

总结起来，对于任何一个系统，不管是生命系统、社会系统，还是自然系统、人造系统，都是开放搞活，封闭搞死！物质、能量、信息的交流是维持一切系统生存发展的必要条件；一旦切断了这种交流，生命机体的新陈代谢、吐故纳新活动就无法维持，必然导致生命的终止。

拿破仑的系统思想

法国著名的政治家、军事家拿破仑（1769～1821）给人讲述过这样一段故事：历史上曾有 A、B 两国交战，相互动用了凶猛强悍的骑兵。其中 A 国骑兵骑术高明，剑法高超，最善于单个格斗，他们的缺点是纪律涣散，配合不佳；B 国骑兵虽然骑术并不娴熟，剑法也不甚精湛，然而他们纪律严明，步调一致，行动如一人。这样，尽管单个的 B 国的骑兵根本不是 A 国骑士的对手，但如果 1000 个 B 国骑兵联合作战，则可以打败 1500 个 A 国骑士组成的联队。

这则故事生动地说明了系统科学的整体性原理，即“整体不等于它的局部的总和”。这个意思可形象地表示为 $1+1 < 2$ ，意即局部与局部功能相加，不等于其整体的功能。

在上述故事中，10 个 A 国骑兵的整体力量小于单个骑兵作战力量之和（即 $1+1 < 2$ ），而 10 个 B 国骑兵的整体力量大于单个骑兵作战力量之和（即 $1+1 > 2$ ）。换句话说，A 国骑兵的战斗力量由于人数渐增而削弱，B 国骑兵的战斗力量由于人数递增而增强。最终 1500 个 A 国骑兵被 1000 个 B 国骑兵所战败。数量的变化，导致了质量的不同变化。

整体不等于局部之和，会出现二种情况。第一种情形是整体小于局部之和，即 $1+1 < 2$ 。三个和尚没水吃，就是属于这种情形。

第二种情况是整体大于局部之和，即 $1+1 > 2$ 。三个臭皮匠，胜过诸葛亮，是属于这种情形。

一个系统之所以会出现上述完全相反的两种情形，原因就在于系统要素存在于一定的结构之中，结构的好坏，决定其表现的系统整体功能有很大的差异。第一种情形，要素之间步调不一致，不能很好协调；后一种情形，结构良好，要素协同体现出更强的系统功能。

在现实生活中，应注意遵循系统的整体性原理，力求建立起 $1+1 > 2$ 的良性系统结构，避免 $1+1 < 2$ 的劣性系统结构。就一个集体而言，如果大家团结一心，有很强的集体荣誉感，并且互相帮助，互相学习，那么这个集体就会“众志成城”，可以办许多个人办不到的事情；相反，如果人人都自私自利，不关心他人，人与人之间相互拆台，互不信任，那么这仿佛是一盘散沙，最终只会一事无成，白白耗费可贵的时间和精力。这，难道不应该引起我们的深思吗？

系统的整体性不光表现在上述的人造系统与社会中，也体现在自然界的客观现象之中。例如在微观客体中，大量存在的各种物理现象，就体现了系统的整体效应。如将氦原子对半分，变成两个氦原子后，每个氦原子的体积都比原来氦原子的体积大；用高能粒子将质子打碎，每个碎片都可以“恢复”到原来质子的大小；用几个“夸克”组合为强子，它的质量竟比单个的“夸克”的质量还要小得多。

系统的整体不等于局部的总和，就像一栋房屋并不等于他的砖瓦、木料等部分的总和；人体并不等于他的手、脚、头等组织器官的总和一样。由此看来，有了组成系统整体的各部分，并不一定就有了整体。系统整体是各个要素按一定的方式构成的有机体，其要素作为整体的部分，要素与整体、环境以及各要素之间相互联系、相互作用，使系统整体呈现出各个组成要素所没有的新的质，因而具有局部所不具有的功能。

例如，一列客车是一个系统，它是由其车头、车厢、电路系统、供水系统以及通信系统、服务系统等要素组成，各组成要素（子系统）具有各自不同的功能，而作为系统的整体——客车，除了具备各子系统特有功能外，还具备各个子系统没有的新功能——优质、安全地运送旅客。

“T”型人才

系统科学是一门综合性学科，涉及的学科领域很多，诸如数学、物理、计算机以及经济学、管理科学等均是一个从事系统科学研究与应用的科技人员所必须涉猎的。因此，系统工程培养的是一种具有合理知识结构的“T”型人才。所谓“T”型人才，是指那些既具有比较广博的知识面——天文、地理、历史、文学、数学、物理、化学均懂一点，又同时是在某一学科造诣颇深的专家，如经济学家、数学家等，这样的人才（我们称之为“T”型人才）是从事系统科学研究与应用最为理想与适合的人才。“T”型人才具有良好的知识结构和较强的“整体优势”，为其他某一领域、专业学科的专家所不及，因之能取得更多卓有成效的成就。

当然，在实际工作中培养这类“T”型人才很不容易，为了弥补这一不足，系统科学研究通常是通过组建一个具有良好知识结构的研究小组来进行，该小组一般由社会科学与自然科学两方面的专家学者组成。这样，要求系统工程工作者重视团体的协作。如果有谁打算从事系统科学方面工作的话，请一定注意两点：一是注意有意识地调整自己的知识结构，在成为某一方面专家的同时，注意吸收其他学科的知识与营养；二是注意培养自己的集体主义精神与协作精神。因为系统工程需要协作！

毫无疑问，具有“T”型知识结构的“系统分析工程师”，将是下一世纪最令人羡慕的职业之一。

“鱼网”的科学原理

——系统结构决定系统功能

大家知道，一张网是由许许多多的网孔（单洞）编织而成的。试想，如果将一张大渔网分解成与网孔数量同样多的“单洞”，并用这一个个的“单洞”去网鱼，还能捕捞到鱼吗？毫无疑问，单洞网鱼，将一无所获。只有将这些许许多多的“单洞”编织、连接成一张大网，鱼儿即使有腿也难逃了。

这张网也是一个系统，它的元素就是那许许多多的“单洞”，只有当许许多多的“单洞”有机地连接成一张网时，由单洞构成的系统才有了捕鱼的能力。如果将这些单洞连接成一条链状的“网”或其他不成片状的“网”，都是无法网上鱼的。在单洞有机连接之前，尽管有同样数量的“单洞”，但无论如何也不具备捕鱼的功能。用系统科学的话来说，是“系统的结构决定了系统的功能”。

系统的结构与功能是系统科学的基本概念。不管什么系统，自然系统、社会系统或人造系统，无不具有一定的结构。系统的结构就是系统保持整体效应及具有一定功能的内在联系，即系统内部各组成要素之间在空间和时间方面的相互联系与相互作用的方式或顺序。

现在，让我们来看看人口系统的结构是什么。

人口系统，最简单的结构是其性别与年龄。如果说一个国家，或者一个城市的人口中，男的占51%，女的占49%，那么这两个百分数就是这个人口系统的“性别结构”；如果再从年龄方面来考虑，将总人口划分为未成年人、成年人和老年人三部分，未成年人与成年人和老年人分别占总人口的比重为30%、60%、10%的话，这三个百分数就是这个人口系统的“年龄结构”。

是否所有系统的结构都能用百分数来表示呢？不是的。例如，一张网的结构就在于“单洞”的连接方式，晶体的结构在于晶体内部原子或分子的排列方向与顺序，化合后的结构则在于其化学键的结合方式。对于具体的物质来说，它们所具有的特定的存在方式，就是物质的结构方式。从宏观天体到微观粒子的一切层次物质系统，由于其内部分子、原子结构的差异，无一例外地存在着一定的系统结构特性，如固态、液态、气态等多种物质结构形式。研究任何物质系统的这种组成关系，就是结构问题。

那么，什么又是系统的功能呢？

我们把系统与外部环境之间相互联系和作用过程的秩序和能力称为系统的功能。系统的功能体现了一个系统与外部环境之间的物质、能量和信息的输入与输出的变换关系。可表示为：



说明上述作用与原理的例子很多，就拿电视机来说，它由显像管以及许多的电子元件依据一定的秩序构成其内部结构。一般人并不清楚电视机的内部结构，只有专门修理人员、专家才知道它的工作原理与每一个零部件的具体功能与作用。但我们都知道怎么使用一台电视机，只要在电视台播放电视

节目的时间里，给电视机通上电源，选择适当的电视频道，就可以收看经电视机将无线电波转换成由“光”与“声”组合而成的电视节目了。这里，给电视机的“输入”是电台发射的无线电信号（电波）、能源“电”，它的“输出”则是我们喜闻乐见的电视节目。那么，一台电视机的“功能”就是将输入的电视信号变换成丰富多彩的电视节目。

总之，系统的结构是系统由内部各要素相互作用的秩序，而功能则是系统对外界作用过程的秩序。归根到底，结构与功能所说明的是系统的内部作用与外部作用。系统功能揭示了系统外部作用的能力，是系统内部固有能力的对外部体现。换句话说，系统的功能是由系统的内部结构所决定的，即“系统的结构决定系统的功能”。

为了说明“系统的结构决定系统的功能”这一系统科学原理，让我们来看几个有趣的例子：

在有机化合物中，有两种物质，一种是石墨，另一种是名贵的金刚石（钻石）。有趣的是，虽然这两种物质都是由碳原子组成，但由于其碳原子的排列结构不同，两种物质的性质迥然不同。金刚石由于碳原子的排列组合方式使得碳原子间分布均匀，结合紧密，成为一种无色透明、外形为八面体的十分坚硬的硬质晶体；而石墨却因为碳原子的另一方式的排列组合使得碳原子层与层之间的间距大，组合力弱，形成一种软质鳞片状晶体，其强度、塑性和韧性都接近于零。两种物质虽然都是由碳原子组成，但由于碳原子的排列秩序不同，则一“硬”一“软”，材料的功能与作用相去甚远。可见，物质、材料的特征与功能，不仅与其化学组成要素有关，而且还与要素之间的结构息息相关。

一本书如果一页一页拆开，然后打乱原有次序乱七八糟地重新装订，尽管书的单元保留无余，但由于书的结构被破坏了，就成了一堆废纸。

由此可见，对于一切系统，系统结构决定系统功能，破坏其结构，就会完全破坏系统的总体功能。

系统工程的研究对象

过去，一个泥瓦匠要建造一所住房，在弄到各种简单的建筑材料后，首先一个人进行构思（如设想房子的式样），然后按照自己的想法来建造这所房子，在建造之中可以随着不断出现的情况来修改自己原来的构思，直到房子建好满意为止。在整个劳动过程中，他既构想这所房屋的总体结构，又从每一个局部来实现房屋的建造；他既是管理者又是劳动者，两者是合为一体的。后来生产进一步发展了，房屋越建越大，参加的人越来越多，于是出现了分工。犹如一个单独的小提琴手可以自己指挥自己演出，而一个乐队就必须有乐队指挥。因此，在一切规模较大的工程中，必须有一个“总工程师”，由这个总工程师负责从整体、全局的角度来指挥、协调其他人的个人活动。这就好比乐队指挥必须指挥乐队成员统一“步调”，才能奏出和谐优美的音乐。

随着科学技术的不断发展，出现了更多庞大复杂的系统，例如联合生产企业、现代化农场、纵横交错的铁路网、通讯网以及大型的水利工程等，它们具有更加复杂的综合性的功能和目标，单纯从一门科学技术着眼已不能解决问题，需要从结构组成、技术性能、经济效益、社会效果、生态影响等多方面来加以综合考虑。从另一方面来看，由于工程装置复杂程度的不断提高，涉及的人员与因素也更多。像美国研制原子弹的“曼哈顿”计划，参加人数有 15000 多人，历时约 6 年，而参加“阿波罗载人登月计划”的各类工程技术人员达 42 万多人，历时约 10 年。直接和间接参加我国第一颗通信卫星研制和发射的有 20 个省市、30 多个部委、1000 多个单位、20 多万人，历时将近 10 年。显然，要指挥规模如此巨大的社会劳动，涉及如此广泛复杂的科学技术知识，单靠一个“总工程师”或“总设计师”的能力与知识是远远不够的。因此，如何在最短的时间里，以最少人力、物力和资金，最有效地利用科学技术的最新成就，来完成一项大型的科研、建设任务，这就是“系统工程”所要解决的问题。

导弹武器系统是现代最复杂的工程系统之一，要靠成千上万的人大力协同工作才能研制成功。研制这样一种复杂工程系统所遇到的基本问题是：怎样把比较笼统抽象的研制要求逐步地变为成千上万个研制任务参加者的具体工作，以及怎样把这些工作最终综合成为一个技术上合理、经济上合算、研制时间短、能协调运转（命中率高）的实际系统，并使这个系统成为它所从属的更大系统的有效组成部分。这样复杂的总体协调任务不可能单靠一个“总工程师”来完成，它要求以一种组织、一个集体来代替这原属于“总工”的工作，以对这种大规模社会劳动进行协调指挥。在我国，这种组织叫做“总体设计部”。

总体设计部负责设计的是系统的“总体”，即研究制订系统的“总体方案”以及实现这个方案的“技术途径”。总体设计部虽不承担具体部件的设计工作，却是整体系统研制工作中必不可少的技术单位。总体设计部把系统作为若干子系统有机结合成的整体来设计，对每个子系统的技术要求都首先从实现整体系统技术协调的观点来考虑：总体设计部对研制过程中子系统与子系统之间的矛盾、子系统与系统之间的矛盾，都首先从总体协调的需要来选择解决方案，然后留给子系统研究单位自己去实践。总体设计部的工作，体现了一种科学方法，这种科学方法就是“系统工程”。系统工程是组织、

管理系统的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法，是一种对所有“系统”都具有普遍意义的科学方法。

系统工程是一门“工程”，而且是“好工程”。与以往其他工程（如土木工程、水利工程等）相比，系统工程不仅限于“物”的建造或改造，还为完成某项任务而提供决策、计划、方案、方法和工作程序。系统工程与传统工程相比，是一门以“软”为主的技术，而传统工程则是一门以“硬”技术为主的工程技术。

系统工程最显著的特点是，以“系统”为研究对象，追求系统目标的整体优化并使实现系统目标的方法和途径最优。换句话说，即在最短的时间内，以最少的人力、物力和资金来实现系统的最好目标。

总而言之，系统工程是一门总揽全局、着眼整体的方法性学科，它要求综合运用已有学科的思想和方法处理系统内部各部分的配合与协调，并借助数学方法与计算机工具来规划、设计、组建、运行整体系统，使系统的技术、经济、社会效果达到最优。

“阿波罗”登月计划

系统工程的成功典范

嫦娥奔月是中国人民家喻户晓、妇孺皆知的神话故事。自古以来，多少人幻想着摆脱地球束缚飞奔月宫。这些神话和幻想在 20 世纪 60 年代末，终于成为现实。1969 年 7 月 21 日，人类破天荒向月球表面迈出了具有历史意义的一步。

阿波罗是古希腊神话中的太阳神。以阿波罗命名的载人登月航天飞船，由运载火箭“土星”5 号和阿波罗飞船本体两大部分组成，火箭有 85 米多高，飞船有 25 米多高。总长有 110.640 米，差不多相当于 40 层楼那样高；它们直径有 10 米；总重量有 3200 吨。飞船由登月舱、指令舱、服务舱和脱险装置 4 部分组成。带有阿波罗宇宙飞船和发射支座设备的“土星”5 号就有零部件 1500 万个。

阿波罗载人登月飞船于 1969 年 7 月 16 日发射，4 天后飞到月球着陆。两名宇航员在月球表面上活动长达 2 小时 21 分钟之久。呈现在宇航员面前的是棕色的尘土、深黑的天空、满目荒凉、没有生命气息的一个死寂的世界。25 日指令舱回地球，在太平洋西南部溅落。3 名宇航员飞行 153 万公里，安然无恙地返回人间。

美国的阿波罗载人登月飞行计划，于 1961 年提出，其系统目标是：10 年内把人送到月球表面并且安全返回地球，并要求在最短的时间内，以最少的费用，胜利完成登月计划。

阿波罗计划顺利实施，是现代系统科学研究的成功典范。此项工程组织了 2 万多个公司、120 多所大学，动用了 42 万人参加，投入了 300 亿美元的巨资，用了近 10 年的时间，终于实现了人类征服地球引力，遨游太空，登上月球探险的梦想。

整体阿波罗登月计划之所以能如期完成，关键在于运用系统方法进行有效的组织管理。

首先，建立强有力的管理组织，明其职责分工。其次，用系统方法加强对阿波罗计划整体过程的管理工作，将其管理工作全过程划分为编制计划、分析评价、控制指导及督促检查等阶段，创造性地运用了新的管理方法，推广使用了电子计算机从事生产与科研的管理，从根本上保障了阿波罗计划的顺利完成。

阿波罗计划的成功，充分显示了系统工程的作用与威力。例如在飞行设计中，科学家陷入了大量的权衡工作中。这些权衡牵涉到运载火箭和宇宙飞船的不同重量对推力的要求；每种可供选择的飞行方案所需燃料的数量（以及燃料的重量）；此外，还牵涉到经费、人员的管理与协调，阿波罗飞船的安全可靠性等等一系列问题。科学家运用系统科学的原理与方法，一一解决了工程研究中所遇到的各类复杂问题。

阿波罗飞船的登月成功，还证实了系统科学一个重要的命题——“综合即创造”。负责阿波罗计划实施的总指挥韦伯先生说过：“阿波罗计划中没有一项新发明的自然科学理论和技术，全部工作都是现有技术的运用。关键在于综合。”

日本一些专家参观了阿波罗计划中所采用的硬件设备和工艺后，均认为

日本没有造不出来的东西。实现阿波罗计划所要求的 4 个主要系统技术——大型运载火箭，在宇宙空间飞行的飞船弹道线路分析，轨道测定系统以及通讯系统——在 20 世纪 60 年代已达到成熟，但作为一种系统的思维方式和科学方法以及把它作为一个整体来处理计划、设计和管理的技术——系统工程，日本却不如美国。因此，即使日本政府作出登月计划的决策，也不可能实现这一计划。

系统工程的一个重要任务，就是综合运用现代科学技术各个领域的学术成果，如运用控制论、信息论以及工程技术、经济学、心理学等各方面的理论与应用研究成果为己所用。系统方法通常只不过是平凡的常识，每个概念、每个步骤在常识上都是合理可行的。系统方法的价值就在于它使你能够把所有这些常识性的思想汇集起来，协调一致，集中解决复杂环境中的复杂问题。

至此，我们已对“系统”和“系统工程”有了一个初步的印象。那么，系统工程作为一门技术性学科，具有哪些独特的方法与手段呢？它自 40 年代诞生以来，在哪些领域得到了成功的应用呢？当代系统科学的前沿领域又是什么呢？……

系统工程的原理和方法

系统优化思想

春秋末期（公元前 6 世纪），我国古代最杰出的军事家孙武在著名的兵书《孙子兵法》中，提出了“上兵伐谋，其次伐交，其次伐兵，其下攻城。攻城之法为不得已而用之”的指导思想。他的意思是，在战争中最好的胜利办法是利用自己的谋略去挫败敌人，不战而屈人之兵。也就是在敌人尚在计划或刚刚开始执行某项谋划时，便能窥破其计谋，揭穿其计谋并破其计谋，借此运用自己的计谋实现己方的军事目的。对一个高明而理智的高级指挥官来说，两军对垒交锋，“不战而胜”自然是他寻觅的最优方案，而“兵临城下”、血刃敌兵或一举歼灭只是在不得已的情况下才勉强为之。

古今中外的军事家都很重视“上兵伐谋”这一谋略的运用。如在公元前 204 年，历史上有名的大将军韩信在消灭赵国后，就没有直接去攻打燕国，而是按甲休兵，以胜利之师的气势炫耀军威与武力，同时遣派谋士带劝降书向燕国君臣陈晓厉害，最终迫使燕国屈从于汉，做到了不战而屈人之兵。

“上兵伐谋”这一谋略，体现了“以最小的代价，取得最大的胜利”的系统优化思想。这一思想不仅在军事上得到了广泛运用，在我们的日常生活中也时时刻刻地、灵活地运用着。如人们都向往美好的东西——漂亮的衣裳、可口的饭菜、优异的学习成绩、强健的身体、良好的社会风气、舒适惬意的生活环境……在对这些美好事物的追求过程中就有意或无意地运用了系统优化思想——用最少的精力，最短的时间，最省的花费，达到最好的效果。

有的青少年朋友就很会安排时间。他们利用早上的空暇时间学习外语，背诵课文；在零星时间里记诵外语单词；朋友们在一起不是瞎扯而是相互交流学习与体会，互相帮助，互相充实；每次课前认真预习，上课时集中精力理解和消化老师讲述的新知识，及时完成作业；余下的时间锻炼身体，参加有益且适度的文娱活动，使自己身体健康、精力充沛，反过来又促进学习效率的提高；此外，根据自己的爱好与特长，还可安排时间开辟第二课堂，参加一定的社会活动，开阔自己的思路与眼界，增长书本上学不到社会知识。他们为了实现德智体美劳全面发展的目标，选择了适合自己的最优安排，便能用最少的时间、最好的质量去完成国家和人民交给的学习重任。

历史的长河虽说是漫长无限的，但历史赋予每个人的生命却只有几十年，如何在有限的生命中完成更多的事业是每一个人都梦寐以求的事情。从物质世界看，尽管博大的宇宙无边无际，但人类的生存空间与活动空间却是十分有限的，农村的耕地有限，城市的住房、交通也很紧张，中国是这样，世界各国也是如此。目前，世界上的各种资源在急剧减少，据预测，很多地下资源的开采寿命只有几十年，如铜估计为 50 余年，锌估计 20 余年，铅估计也只有 20 余年。现在不仅矿产资源在锐减，就是不少地方连生命不可缺少的水也严重短缺。所以，人类对时间、空间、资源的利用，都要精打细算，斤斤计较，都要有最优的利用方案；要用最少的时间，最小的空间，最省的资源为人类创造最多的财富。总而言之，在有限的条件下使追求的目标达到最优、最理想的结果，就是最优化的实质。

远洋轮船爆炸的启示

——系统科学中的模型方法

1853年，英国制造的远洋轮船“大东方号”下水了。当时“大东方号”轮船的豪华气派是前所未有的。然而好景不长，“大东方号”首次航行就失败了。原来，蒸汽机的动力过小，不能满足船体运动的需要，水加器发生了爆炸，造成10人伤亡。这样，“大东方号”没有能够到达东方，后来被用来承担铺设海底电缆的任务了。

参加过“大东方号”轮船设计的工程师弗德吸取了该船的经验教训，此后他在设计新船之前，先制造一个模型船放在水槽中的铁轨上。计算模型船所遇到的阻力，然后根据这些试验数据的相似关系计算真船需要多大马力来驱动，最后再制造新船。由于真船的实际数据与由使用模型船计算出的数据十分接近，使这一方法成为造船工业上大家公认的好方法。而这种方法就是系统科学中的模型方法。

我国古代劳动人民早在4000多年前就以飞蓬草遇风转动为模型，发明了轮子。战国时期著名的木匠鲁班模仿草叶边缘锋利的小齿，在铁片边缘造出小齿，发明了今天仍在广泛使用的“锯”。东汉著名的科学家张衡根据他的实际观测认识了天体运行规律，制成了相似的仪器——“浑天仪”。宋朝的喻皓于989年在京城汴梁（现在的开封）建造8角13层的开宝寺木塔时，也是事先制造了一个小模型，进行研究、修改，然后才动工兴建。木塔塔身略向西北倾斜，可见当时喻皓已考虑了当地的主导风向对建筑物的影响并且加以防范。

从所列举的中外古今的事例，可以看出研究、设计、制造一个复杂的系统，直接利用经验的方法是不行的，而通过模型方法往往能帮助我们完成任务。

模型这个专有名词，青少年朋友听起来可能不会感到陌生。只要仔细回想一下，我们或多或少地都接触过一些模型。像幼儿园小朋友喜欢摆弄的积木玩具便是建筑物的简单模型，它形象地表达了砖、瓦、墙、柱、梁等及其组合成的各式各样的房屋整体；小汽车是男孩子们喜欢的“交通工具”，布娃娃则是陪伴女孩子们的“家庭成员”；手持各种兵器（玩具手枪、冲锋枪、大刀、匕首等）的孩童可以神气活现进行一场有模有样的“战斗”；用泥沙堆砌的山川路桥、用树枝草叶搭成的楼台庭院，可成为儿童时代理想的“家园”。这些，都是缩小了的实物模型。

地图是另一类用符号表示的某一地区的模型。从地图上，可以看出地势的高低、河流湖泊的位置、公路和铁路的分布情况、各城市的距离、矿产资源和行政区域等，有的地图还可以表示出农林状况、人口密度。每天中央电视台在天气预报中使用的气象云图，就是一种各地区天气情况的模型。

在你搬进一套新房之前，你也许会用尺子测量房间的长和宽，如果测得房间长为5米，宽为3米，你会很容易算出房间的面积：

$$\begin{aligned} \text{面积} &= 5(\text{米}) \times 3(\text{米}) \\ &= 15(\text{平方米}) \end{aligned}$$

这样，你就可以考虑合理地摆放家具了。

我们还会在测量土地、兴修水利、建造工厂、筑路架桥等工作中看到计

算正方形、三角形、圆形等各种几何的面积。这些面积的计算都有相应的数学公式来表达，我们称这些数学公式为表示系统特征的数学模型。

从上面这些例子，我们可以知道模型就是用语言文字、符号图形、实物、数学公式等来描述、模仿现实系统而成的相近或相似系统，模型应与现实系统存在一定的关系，服从相同的规律。因此，通过对模型的研究，可得到现实系统的相应信息。

电子游戏的系统思想

青少年朋友喜欢在屏幕上做电子游戏。这种游戏由电子计算机模仿出现场景，如弯弯曲曲的公路和不时出现的汽车，而你坐在屏幕前，可以像司机一样控制一辆汽车，手中的控制器就是方向盘。有了这个方向盘，你可以驾驶汽车不断随曲折的公路而变换方向，随时回避迎面扑来的车辆，安全地到达目的地；而在另一种游戏中，电子计算机又可以模拟战斗，激烈程度不亚于一场真正的战争。这些就是用电子计算机分别模仿驾驶汽车和双方交战的模拟模型。

训练飞机驾驶员是一件非常重要而艰巨的工作。驾驶飞机训练，要占用一架飞机，要消耗燃料，还需要教练员陪练及机场地面各种后勤人员的配合支持。更危险的是，如遇不测，就会使飞机受到损坏甚至出现人员伤亡。后来，人们想出一个办法，即用模拟模型输入电子计算机，模仿并显示飞机飞行驾驶中可能出现的各种情形来进行训练。飞行员可以坐在由电子计算机以及各种仪器表组成的与真飞机驾驶舱没什么两样的“驾驶舱”中，面对屏幕上显示的机场跑道与飞行信号，驾驶“飞机”升空。如果学员操作不当，屏幕上将会显示出危险的后果！当然，这对坐在模拟驾驶舱的学员来说，仅仅是“有惊无险”而已，绝不会出现那种机毁人亡的重大事故。电子模拟装置还可以模拟飞机的着陆、正常飞行、事故处理甚至空中激战等各种情形。可以想象，这种模拟模型，要比电子游戏机中的模型复杂得多了。

当你到百货商店买衣服时，如果你仔细观察一下，就会发现有人仅看看规格、选选颜色，检查一下衣服质量，便很快交完钱离柜而去，但更多的人则挑选仔细，要看颜色，讲款式，还要试穿，要花比较多的时间才离开柜台。由此产生一个问题，服装柜台需要几位售货员值班呢？如果售货员太少，顾客排队太长，浪费了顾客的时间，有的顾客可能会因此而到别的商店去买衣服，影响商店的生意。如果售货员太多，顾客虽不用排队了，但是售货员会有很多的空闲时间，造成了人浮于事的局面。为了解决这个问题，确定售货员的最佳人数，可以用计算机模拟顾客到达的人数、服务时间、排队时间，以此来决定需要多少售货员最为合适。同样，邮局、银行、售票处、电话总机房、医院、理发店等地方，都可以用计算机“模拟”服务情况，以决定工作人员值班的最佳人数。

当然，并不是所有的模拟模型都要用电子计算机来解决问题的。比如说，假如一个村庄要打一口井，向 5 个地点供水浇地，这口水井应打在什么地方，才能使整个系统所用的供水管最短？有人提出一种方法，先假定在甲地打井，计算从甲地到 5 个用水地点的供水管长度，然后相加，可得到总的供水管长度。再用同样的方法计算在乙地打井所需的总供水管长度，与甲比较。此外，还要选丙地、丁地等许多地方计算、比较，然后找出合适的打井地点。村长觉得这种方法太繁琐了，而且是不是还有其他更合适的地点也不得而知！

后来，另一个人找来一块均匀的薄板，将 5 个用水地点按比例画在板上，连成一个 5 边形并锯下来。然后，用线穿过 5 边形吊起来，这时可以找到一点，它能够使 5 边形吊起后不偏不斜与地面平行。该点叫做“重心”。与重心对应的地点就是打井最合适的地点，在这里打井，将会使总供水管长度最短。村长对这种方法十分满意。

数学题里的系统原理——线性规划模型

请看下面这个问题：

某工厂一天使用 12 吨煤、20 度电，生产甲、乙两种产品。如果生产每一吨甲产品消耗 2 吨煤、6 度电，卖出后可以净赚 4000 元，每一吨乙产品要消耗 5 吨煤、4 度电，卖出后可以净赚得 6000 元。问每天甲、乙两种产品要各生产多少吨，才能使工厂净赚的钱最多？

仔细想一想这个问题，我们不难发现乙产品每 1 吨能赚 6000 元，比每 1 吨甲产品的赢利高。如果我们把所有的煤、电尽可能地用来生产乙产品，会得到什么结果呢？从煤的角度考虑，可以计算出每天能生产乙产品

$$12 \div 5 = 2.4 \text{ (吨)}$$

从用电角度，可以计算出每天生产乙产品

$$20 \div 4 = 5 \text{ (吨)}$$

综合考虑煤、电的消耗，每天能生产 2.4 吨乙产品，相应的净收入为

$$2.4 \times 6 = 14.4 \text{ (千元)}$$

每天还会有剩余的电力

$$20 - 2.4 \times 4 = 10.4 \text{ (度)}$$

那么如果我们把每天的煤、电全部用来生产甲产品 结果又会是怎样呢？

从煤的角度，每天可以生产甲产品

$$12 \div 2 = 6 \text{ (吨)}$$

从电的角度，每天可以生产甲产品

$$20 \div 6 = 3.33 \text{ (吨)}$$

综合考虑，每天能生产 3.33 吨甲产品，净收入为：

$$3.33 \times 4 = 13.32 \text{ (千元)}$$

这时每天会有剩余的煤

$$12 - 3.33 \times 2 = 5.34 \text{ (吨)}$$

工厂对上述两种安排都不满意，因为这两种方案煤和电力资源都没有充分利用。有人认为，如果每天只生产 2 吨乙产品，则消耗煤 10 吨、电 8 度，收入 12000 元。省下了 2 吨煤，可生产 1 吨甲产品（同时耗电 6 度），可再增加收入 4000 元。这两种产品一起可收入 16000 元，比前面只安排一种产品生产的两个方案的赢利都多。除此之外，其实还可以试探其他方案，但试探的方法过于繁琐。

实际上，用线性规划模型可以解决这一类各因素成比例关系的生产安排问题。对于上述只生产两种产品，消耗两种资源的问题，因为因素少，可以用简单的作图法来解决；对于涉及因素众多的线性规划问题，要用所谓的“单纯形法”来求最优解；对于大型工厂、地区、部门，相关因素可能成百上千，这时就要借助于电子计算机来求解了。通过图形法或单纯形法解决上述工厂的问题时，可以得出：每天安排生产甲产品 2.36 吨，乙产品 1.45 吨，可得到最大收入 18180 元。

还有一类问题也可以用线性规划模型来解决。例如有甲、乙、丙、丁 4 个糖果厂，生产同一种水果糖供给 A、B、C、D4 个商店零售。若已知 4 个工厂的产量，4 个商店的需要量，而且还知道每个工厂运给每个商店 1 吨水果糖的运费是多少，又叫运输问题，是实际工作中会经常遇到的问题。这些问题，都可以用线性规划模型来解决。

如何才能赚最多的钱

——整数规划模型

一个汽车队，有甲、乙两种汽车。甲汽车每辆可装体积为 1 立方米的货物，载重量为 5 吨，可收入 500 元。乙种汽车每辆每次可装体积为 1 立方米的货物，载重量为 9 吨，可收入 800 元。由于值班司机人数、汽油燃料等条件的限制，每次车队派车运货体积总计不能超过 6 立方米，载重量不能超过 45 吨。问题是每次安排甲、乙车各多少辆，才能既满足限制条件，又取得最多的收入？

我们想一想这个问题，会发现两种汽车装载货物的体积、重量与汽车的数量是成比例关系的，而车队的收入也是与车辆数目成比例关系的。因此，用线性规划模型可以解决这一问题。应用图解法或单纯形法，可以计算出结果，每次应派甲种车 2.25 辆，乙种车 3.75 辆，总收入为：

$$5 \times 2.25 + 8 \times 3.75 = 41.25 \text{ (百元)}$$

现在新的问题又来了，这种安排是不可能实行的。2.25 辆甲种车怎么派？要么是 2 辆、要么是 3 辆，谁也不可能派出不是整数的车。乙种车也是同样要派出整数。像这种要求得到整数结果的线性规划模型通常被称做整数规划模型。

可不可以集零为整？如果把小数点后面的第一位数四舍五入，即甲种车派 2 辆，乙种车派 4 辆，这是不是上面整数规划模型的最优结果呢？通过计算会发现该结果超过了限制条件：2 辆甲车装载 10 吨，4 辆乙车可装载 36 吨，合计可装载 46 吨，但规定不能超过 45 吨。如果把小数点后的数字舍掉，就不会超出限制条件了，但这样的结果是不是符合最优要求呢？再来计算一下，每次甲种车派 2 辆，乙种车派 3 辆，总收入为：

$$500 \times 2 + 800 \times 3 = 3400 \text{ (元)}$$

这种情况下，每次派车运货的体积总量为：

$$1 \times 2 + 1 \times 3 = 5 \text{ (立方米)}$$

每次派车运货的载重量总计为：

$$5 \times 2 + 9 \times 3 = 37 \text{ (吨)}$$

可以看出还有 1 立方米体积和 8 吨载重量没有利用，还可再增加一辆甲种车，即 3 辆甲种车，这时收益为：

$$500 \times 3 + 800 \times 3 = 3900 \text{ (元)}$$

从而我们知道，四舍五入和去掉小数点后面的尾数化零为整的方法都不能求出整数规划模型的最优结果。

有人建议将条件允许的派车方案都列举出来，一一进行计算、比较，就可以找到最优结果。

对于上面汽车队的派车的问题，要计算 25 种方案。如果因素增加，解决整数规划模型的方案就可能成百上千，不仅计算复杂，光列举这些方案就会令人头晕眼花。

那该怎么办呢？现在，科学家已找到了一种解决整数规划问题的方法，叫做“分支定界法”。这种方法首先是找到相对应的线性规划问题的最优结果，这个结果是整数规划的界限（例如上述汽车队派车问题，相对应的线性规划的最大收入是 4125 元，整数规划的结果一定不会超过 4125 元）。然后

作出判断并进行计算，如果线性规划求出的结果恰恰是整数，这时可以认为已找到答案。如果线性规划求出的因素中有非整数结果，如 2.25 辆车，就要设法分别在限制条件内把各非整数因素化整，求出结果，进行比较，最后找到整数规划的最优结果。对于上面派车问题，可以找到的结果是，不派甲种车，派乙种车 5 辆，可以得到最高收入：

$$5 \times 0 + 8 \times 5 = 40 \text{ (百元)}$$

在实际系统中，存在许多因素，它们一定要用整数值来表示，如机器台数、人数、火车车厢数目、集装箱数、工厂个数、商店家数以及在某地是不是建工厂，建不建商店、学校、车站等等，这些数值都不能有分数（如建，可用 1 表示；若不建，用 0 表示）。涉及这些因素的线性规划模型，都要用整数规划来解决，用分支定界法等方法求出最优结果。

分派问题也是另一类广泛应用的整数规划问题。例如学校周末劳动，有四项工作（给树木花草浇水、打扫教室、修理桌椅、出黑板报）要分配 4 位同学去完成。这 4 位同学中，不同的人对不同的工作所用时间不一样。有人力气大，浇水快；有人写字娴熟，出黑板报花的时间少。安排得好，4 位同学总计花费的时间就会最少。还有分派不同的工人到不同的车间去工作，不同的轮船按不同的航线航行，不同的飞机去不同的城市等，都是属于分派问题。

系统工程的妙用

植树问题

某班长带领 60 位同学上山去植树，主要的工作有 3 项：挖坑、运树苗、挑水浇树。根据情况得知：用 20 或 20 以上的人挖坑，需要 20 分钟；用 20 或 20 以上的人运树苗，需要 15 分钟；用 20 或 20 以上的人挑水浇树，需 30 分钟。这样，便会有 5 种安排：

第 1 种，可以在一项工作完成以后，再进行第二项工作，最后进行第三项，这样总计要花 65 分钟时间；

第 2 种是在挖坑的同时派人去运树苗，在完成挖坑工作以后再组织人力挑水，这样需要 50 分钟；

第 3 种是在挖坑的同时就派人去挑水，在挑完水后再去运树苗，这样需要 45 分钟；

第 4 种是在挖坑的同时就派人去挑水，在挖完坑后又派人去运树苗，这样只需花 35 分钟；

第 5 种安排是 3 项工作同时开始，那么，总共只需要 30 分钟就可以完成任务了。

很显然，在人力、工具等条件都允许的情况下，第 5 种安排最省时间，其他安排费时间多，会出现“窝工”现象。

同样，对于一个生产汽车的工厂，厂长一定会安排不同的车间（分厂），分别生产汽车的发动机、轮胎、底盘、外壳、仪表、座椅、车灯、电器等零部件，最后进行总体装配，一辆辆崭新、漂亮、别致的汽车就会从流水作业线上徐徐开出来。任何一位厂长都不会安排先生产一种零部件，完成后再生产第二种，一直到最后一种零部件制造出来后，再去一一组装。这样，无疑要浪费许多时间，没有生产效率。

建筑队要盖一幢楼房，一定要打地基，运砖瓦石、水泥、钢材等建筑材料，砌砖，安门窗，装水管和下水道，粉刷墙面等，如果安排不当，就会出现窝工现象。

生活中也有许多例子，需要人们开动脑筋巧妙安排。你可能听过这样一个故事，讲的是一个人挑着一担菜，牵着一只羊，带着一条狗过河，河边只有一小小的船，因船太小，当人不在场时，不能把狗和羊留在一起，因为狗要咬羊，也不能把羊和菜留在一起，因为羊会把菜吃掉怎知办？这个人运用他的聪明才智，巧妙安排，把三者安全顺利地带过了河。你知道他是怎样干的吗？

如果在家里做饭烧菜，你一定会先煮米饭（或蒸馒头），并利用煮饭的时间去洗菜、切菜，等饭（或馒头）做好了，你的准备工作也做得差不多了，然后再烧菜，这样可节约不少时间。

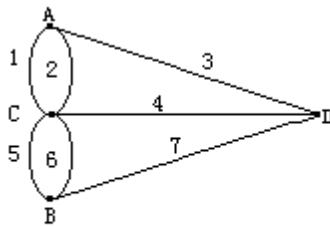
当你仔细观察一下周围发生的事情，或者回想一下你的经历，你就会了解到，生活当中有着许多精明的“管家”——他们能管理好班级，管理好企业，管理好农业生产。这里介绍的内容，就是用图和网络的方法，解决前面提到的各种问题，帮助人们统筹安排时间，精打细算，提高工作效率。

著名的哥尼斯堡七桥问题

欧洲有一座城市，叫哥尼斯堡。有一条河流经城区，河中有两个小岛，共有七座桥将河的两岸和两个小岛联接起来。图中 A、B 表示两岸，C、D 表示两个小岛，数字 1 至 7 表示七座桥。

有人提出一个问题，能不能从某一地点出发（例如 D 点），通过七座桥各一次（即不能重复过桥），然后回到出发地（也就是 D 点）？这就是有名的哥尼斯堡七桥问题。

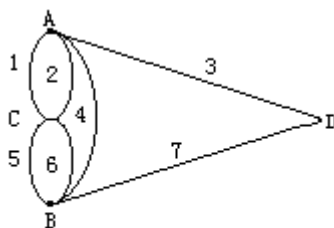
1736 年，数学家欧拉发表了一篇论文，将上面的问题用下图表示出来。同样地，图上 A、B 表示两岸，C、D 表示两个小岛，数字 1 至 7 表示七座桥。



哥尼斯堡七桥问题的“图”

图中的点叫顶点，用来表示具体的事物。图中的线叫做边，用来表示事物之间的某种关系。这种图不是按比例画出的，边长不代表真正距离或其他数量关系，顶点和边的位置也不与实际位置一一对应。这样，就可以将复杂的工程系统、运输系统、管理系统等等简化成图，来解决工程任务花费时间最少、运输距离最短、管理费用最省等最优化问题。

欧拉将哥尼斯堡七桥问题抽象成一个图，将上述过桥问题抽象成一笔画问题后，他证明，上图中的顶点都只与奇数条边相连接，因此不能将图一笔画成而不重复任一条边。假设第 4 条桥不是连接 C、D 小岛，而是连接 A、B 两岸，则可用下图表示。可以明显地看出各点均与偶数条边相连接，此图就可以不重复地一笔画成。



第一线桥连接两岸的“图”

我们再看一下架设电话线的例子。在下图中，要在各单位之间架设电话线。电话线必须将它们连接，但为了节省线路，两单位之间也可以通过其他单位接通电话，例如乙村可以通过甲村、汽车站同学校接通电话，因此不必在乙村与学校间再架设一条电话线。这种简单形式的图就是“树”。

由于每两单位之间架线的长度不同，因此，实际上要求找到所架电线最短的“树”，按这“树”的样子架线，所花时间最少、也最省钱。

架设电话线的“树”

供应问题

请看供水系统管路图，某村供水站要向新开垦的土地送水浇地，供水管路要经过东南西北 4 片地区，每段管线最大供水能力分别表示在线中边上，如供水站向南片土地每分钟最多能供应 5 立方米水，再由南片向东片最多每分钟供应 2 立方米水等等。而这种有发点（如供水站）和收点（如新开垦地）的有方向的图（从发点开始到收点为止）就组成了一个网络。研究供水站通过这个网络每分钟最多能供给新开地多少立方米的水，这就是网络最大流问题。

古代战争中就非常重视供应问题，“兵马未到，粮草先行”，说的就是这个问题。现代化的战争供应问题更加复杂。因为现代战争，是对多兵种、高技术、快速反应的全面考验，在一次战役之前，准备工作显得十分重要、紧迫。因此，战前往往要研究从后方向前线调运各种武器弹药，集结各地作战兵员和医疗、后勤保障、军事技术等各类人员，储备燃料、食品、饮用水、药品等等问题。

还有许多系统都需要研究最大质量问题。如春节期间，铁路部门要研究铁路网络最大客运能力，以便安排列车将旅客送回家过年。发电厂（还有水电站）要研究电网最大送电能力，以满足工厂、农村和人民生活用电的需要。油田和炼油厂要研究输油管网络的最大输油能力。电话局要研究电话网的最大通话容量，等等。

邮路捷径

当你收到邮递员送来的报纸、信件的时候，你一定很高兴能从报纸上了解到国内外大事，从信中知晓亲戚朋友的消息。但不知道你是否注意到，邮递员每次送信都是沿着相同的街道、相同的方向送信。你会说，这些绿衣天使熟悉这些街道，甚至熟悉许多家庭，他们习惯于沿同样的路线送信，不管酷暑寒冬、刮风下雨，日复一日，年复一年。如何为他们选一条路程最短的“邮路”，使他们能相对轻松地完成他们的工作呢？这个问题是 1962 年由我国数学家管梅谷教授提出的，国际上因此而称为中国邮递员问题。

我们看一看下图所表示的一个简单的街区路线图，数字表示街道的长度（米）。那么，假设邮递员从邮局出发，沿什么路线送完信件返回邮局，所走的路最少呢？

首先，要送完信、报等邮件，邮递员必须要经过每条街道至少一次。如果他能够每条街道只走一次而不重复，这样的路线当然就是最短路线。但在街道示意图上可以看出有 4 个交叉路口均与三条道路相连接（奇数条边），因此，这个图所表示的街道必然会有重复经过的路线。我们通过添加重复路线，使那些与奇数条边相连的点均变成与偶数条边相连。

然后，检查每一个回路，使重复路线的总长度不大于该回路总长度的一半。例如下图中，添加了 BC、CD、FG、GH 四条重复路线（在图中以弧线来表示）。检查回路 BCDE，回路总长度是 850 米，而重复边总长是 400 米，符合要求。再看 EFGH 回路，回路总长度是 750 米，重复边总长度是 350 米，也符合要求。这样，图上所有的点均与偶数条边相连接，每条原街道或者没添重复边，或者只添一条重复边。因此，上图就是邮递员所走的最小距离的“邮路”。你不妨试试看，如果不是这样的路线，其他路线均要走更长的路程。

泡茶与导弹

50年代末期，在美国海军研制“北极星”潜艇导弹过程中，接受任务的公司、研究单位和大学共有11000多个。为了完成这项复杂的任务，主管人员决定采用被称做计划评审技术的新的计划管理方法，这种方法将北极星计划用23个网络、大约3000项工作来表示，网络图长63.8米，面积为3000多平方米。由于这种新方法的应用，使北极星计划提前2年多完成，从而使这一方法迅速推广到各部门。

我国数学家华罗庚用烧水泡茶作例子，清楚地介绍了这一方法。他讲，要泡壶茶喝，要洗好水壶，灌上凉水，放在火上；在等待水开的时间里，洗茶壶、洗茶杯、拿茶叶；等水开了，用开水冲茶。这种安排是最省时间的，如果先洗茶壶、洗茶杯、找茶叶，再去洗水壶、灌凉水，放在火上烧开水，肯定时间就要长一些。一般在用图来表示时，用带箭头的线段表示某一道工序，将工序的开头和结尾用带数字的结点表示，称为事项。现将泡茶的各工序、相关事项及工序时间列于表3—1中。在复杂的工程计划中，各工序还要给一个特殊的编号。

表 3—1 泡茶的工序和时间

工 序	相关事项	工序时间（分钟）
洗水壶		1
烧开水		15
洗茶壶、洗茶杯、拿茶叶		4
用开水冲茶	1	

然后，用工序、事项及标有完成各道工序的时间数字组成网络图，各工序之间的关系就一目了然了。

画出网络图以后，还要对网络图进行分析、评价、审查抓各工序中的主要矛盾，以便节约时间提高效率。

系统分析过程

我们大家都看过激动人心的足球赛，那绿茵场上激烈的竞技、运动员娴熟的球艺、精彩而扣人心弦的临门一脚，给人以美的享受。你如果亲临赛场，一定会为运动员们呐喊助威；如果你是球迷，你一定会为你崇拜的球星所折服，为你喜爱的球队而欢呼雀跃。一场精彩而激烈的足球赛，会使不少人久久难以忘怀。

是的，足球是一门艺术，能给人以美的熏陶，也是一场意志、力量、技艺的较量，常使人激动不已。然而，你可曾知道踢足球还有系统科学的大学问蕴含其中吗？

固然，一场足球赛的胜败与球队队员的技艺、水平、整体配合以及意志密切相关，但当两支水平相当的球队狭路相逢、不得不在绿茵场上一决雌雄时，双方领队、教练的指挥调度，就成了这场竞技最关键的因素了。现在，让我们来看看双方教练、领队在赛前是如何“运筹帷幄”而决胜球场的。

首先，双方领队、教练要正确估计对手的实力、竞技状况以及可能采用的战略战术，然后，要正确估计、评价自己球队的实力与竞技状况，分析这场球赛的胜败对双方得失的影响，如有时必须战胜对手才能出线，有时只需踢成平局就可稳拿冠军。最后，依据上述情况的综合分析，决定自己球队的战略战术，是“攻”还是“守”？是以“三三三四”的阵容迎“敌”，还是以“四二四”的攻势掠阵？是以中路突破为主，还是边锋“暗渡”？只有综合分析各种方案的利弊之后，才能决定最为满意的实战方案。

当然，最佳方案制订后，还必须研究替代方案，以预防比赛中出现的各种意外，如不巧己方主力队员负伤或罚出场外，或对方拿出了“秘密武器”——名不见经传的骁将异军突起等等，只有事先估计到了各种可能出现的意外情况并制定出相应的对策，这样才能临危不乱、稳操胜券。

从以上分析可以知道，球场的激烈竞争，包含有教练、领队在赛前的大量预测、分析、对策研究与决策。这在系统科学看来，是一种较为典型的系统分析过程，即通过情况的调查与了解，以及预测分析与研究，制订出可供选择的方案、对策，然后再选择被认为是最为满意的方案去执行。

下面，我们就分别介绍一下预测分析、系统分析以及对策研究、决策分析的基本原理与方法。

预测分析

古人说得好，“凡事预则立，不预则废”，“人无远虑，必有近忧。”古代著名军事家孙子则说：“兵者，国之大事，生死之地，存亡之道，不可不察也。”这里的“预”、“虑”、“察”无不包含有预测的意思。也就是说，作为探索未来的预测活动，古已有之。

现在，预测作为一门技术已被广泛运用于军事、政治、外交、经济、文化教育、科技领域，为正确的决策和规划提供可靠的依据。60年代以来，世界各国建立了大量的预测咨询机构，到70年代初世界各国已有2500多家专门的预测咨询机构，如美国的兰德（RAND，英文“研究与开发”的缩写）公司，斯坦福国际咨询研究所，西德工业设备企业公司，人类2000年国际协会，世界未来学会以及国际应用系统分析研究所，英国伦敦国际战略研究所，日本野村综合研究所等均是国际上负有盛名的预测机构。在中国，预测工作近十多年得到了迅速的发展，目前已在国民经济发展、人口规划、科技发展战略、技术、产品、市场预测等方面取得了显著的成效（据预算，通过开展技术预测创造的新产品的盈利，相当于技术预测投资的50倍）。

预测作为一门技术学科，已得到了广泛的应用与迅速发展。80年代初期，我国科学家开展了“2000年中国”的研究，就我国2000年人口、工业、农业以及交通、能源等各方面的发展进行了预测。像这种从经济发展的角度出发，对经济未来发展趋势所进行的预测，叫做“经济预测”。此外，如果预测对象为战争的发展趋势、战争的结局以及随之可能带来的影响，这种预测被称作“军事预测”，照此类推，从预测对象出发，还有政治预测、社会预测等。

在实际预测中，根据不同的预测要求与预测对象，预测结果的表述往往又是不同的。例如在对国际形势进行预测时，主要是研究和探讨未来时期国际形势可能发生的重大变化及其发展趋势，以及随之可能产生的各种影响。又如军事预测，主要研究某一地区在短期内爆发战争的可能性以及战争的性质与规模等。对于这种着重探讨预测对象在未来时期所表现的性质的预测，被称为“定性预测”。另一类着重研究预测对象未来数量的预测，如明年工农业总产值是多少？2000年我国人口可能达到的数值规模，是12亿，还是13亿？月底汽车的销售量是多少？这类强调数与量的概念的预测，被称为“定量预测”。此外，还有一类是对预测对象未来的表现时间的确定，如某项新技术（像超导研究、人工智能计算机）能够应用于生产领域的时间，产品更新换代的时机，某项决策达到预期效果的时间等类预测，被称为“定时预测”。

丰田汽车成功的秘密——系统分析

1962年，英国与法国开始联合研究、制造超音速民用航空客机——“协和”式客机。当时他们制定的目标和标准是快速、豪华和舒适。经过十几年的潜心研究，耗资数亿元的“协和”式大型客机终于在1975年研制成功并投入生产。然而时过境迁，十几年时间流逝，乘客和航空公司因价值观念的变化以及世界形势的变化，要求飞机节能、噪音小、票价低、多载客，而对豪华和高速并没有太多的要求。致命的是，“协和”式飞机噪音高得惊人，严重超过了各国规定的噪音限制标准。这样一来，耗费巨大心血研制出来的“协和”式飞机，尽管性能先进，但由于噪音大、耗能多、价格高而无人问津，致使英法航空工业蒙受了巨大的经济损失！

反之，日本的丰田汽车公司却在竞争中获得了成功。该公司设有一个调查部，该部门早在中东石油危机之前就预料到可能发生的能源危机。他们预计能源危机将不可避免地影响到汽车市场及每个人的消费水平，只有设计出省油、价廉、废气污染少的小型汽车，才能在市场竞争中取得领先的地位。为此，包括丰田在内的日本汽车业，夜以继日地为设计和制造新型小汽车而工作。后来，果然爆发能源危机，日本汽车从此畅销世界，不仅一举打入美国市场，而且成为全世界汽车市场的霸主。今天，日本汽车已奔驰在地球的每一个角落。

从上述成功和失败的两个例子说明，正确的目标，科学的预见，严格准确的推理分析是多么重要。

自第二次世界大战以来，人们为了加强对未来系统的认识深度和驾驭能力，适应自然环境的变化，逐步摸索总结了一套分析技术——系统分析技术：就是对系统的目的、功能、环境、费用、效益等问题，运用科学的分析工具和方法，进行充分调查研究，在收集、分析、处理所获得的信息资料的基础上，确定系统目标，制订出为达到此目标的各种方案，通过模型进行仿真实验和优化分析，对各种方案进行综合评价，从而为系统设计、系统决策、系统实施提供可靠的依据。

系统分析作为一门分析技术，主要起源于美国的一些军事研究机构。早在1945年，美国的道格拉斯公司，组织了各方面的科学家，其目的是向空军方面提出有关技术和设备的建议，当时称为“兰德计划”，最初只有4个人参加，后来正式成立了兰德公司。他们没有实验室，不制造硬件，在长期的研究与开发中，发展了今天被称之为“系统分析”的科学方法，其主要目的是如何使系统的整体效应达到最优化。如今，兰德公司的研究范围已从最初的军事、外交事务扩大到经济、交通、通讯等公共事务的各个方面。系统分析方法也从改善武器装备系统，走向了经济管理、社会发展等各个域。

田忌赛马——对策论

在我国古代春秋战国时期，齐国国王有一天提出要与大将军田忌赛马，看谁的马跑得快。田忌答应后，双方约定各自出上、中、下 3 个不同等级的马各 1 匹，每次比赛各出 1 匹马，一共比 3 次，输者要付给胜者千金。

当时的情况是，齐王的 3 匹马在同一等级中都比田忌的马要好一些，即齐王的上马比田忌的上马跑得快，中马、下马也分别比田忌的中马、下马跑得快。看来，齐王赢定了。后来，田忌的谋士孙臆给田忌出了一个主意。当齐王第一轮比赛牵出上马时，田忌出下马，有意输掉第一局。第二轮比赛用上马对付齐王的中马，第三轮则用中马对付齐王的下马，连续赢了两场。田忌虽然马比齐王的差，结果却以 2 : 1 的比分赢得了赛马的最终胜利，得金 1 千。

田忌赛马，用今天系统科学的观点看来，是一种典型的“对策现象”。那么，什么是对策呢？对策是指决策者在某种竞争场合（军事、政治、经济及体育竞赛等）下作出的决策，或者说是参加竞争的各方为了自己获胜而采取的对付对方的策略。

对策论——运筹学分支之一，就是研究对策现象的数学理论与方法。由于它的研究与政治、经济、军事等有密切的联系，而且处理问题的方法又有明显特色，所以越来越引起人们的广泛重视。

在日常生活中，可以找到许许多多的“对策”现象，比如下棋、打扑克、体育竞赛等，都是相互之间的竞争。在竞争过程中，尽管各有优劣，但参赛各方都设法发挥自己的长处，尽最大可能争取较好的竞赛结果。在政治方面，国际上政府间的外交谈判，各方都想在谈判中处于有利地位，争取对自己有利的结果。在各国之间或一国内各利益集团之间爆发的战争，更是一场你死我活的生死搏斗，双方都千方百计采用各种有利于自己的策略而置对方于死地而后快。在经济领域内，各国之间的贸易谈判，各企业之间的产品竞争，就业人员为某一职位的竞争等等，都具有竞争性质。这些现象称之为对策现象或叫做对策模型。

希特勒的失败——决策论

1945年4月26日，一队美军B—26“掠夺者”轰炸机，由10多架“野马”式战斗机护航，飞临多瑙河，执行对德国工业区的轰炸任务。当时，德国法西斯在各大战场已节节败退，眼看即将灭亡，因此这一队在两万英尺高空疾飞的轰炸机群，料定第三帝国的空中抵抗力量奈何不了他们，不会再遇到多大的麻烦。然而，正当他们大摇大摆前进的时候，云层深处突然闪电般地钻出了德军战斗机，盟军飞行员还没看清楚这些不速之客是什么型号的飞机，转眼间5架庞大的“掠夺者”轰炸机便冒着浓烟坠落了下去。这疾如狂飚、火力猛烈的战斗机就是当时世界上速度最快、火力最为强大的ME262喷气战斗机——希特勒出手太晚的一张王牌。

事实上，1941年德国空军就研制出了当时举世无双、威力无比的ME262喷气战斗机，如果当时就用这种“秘密武器”装备德国空军的话，第二次世界大战史也许该重新书写。正是那个步兵伍长出身，对航空技术完全外行的独裁者希特勒，不肯听从技术专家的意见，执意认为德国空军不需要这种“喷气战斗机”，只需要精锐的喷气轰炸机，因此，他强行下令将ME262飞机的生产计划全盘更改，执意让原设计为战斗拦截机的ME262装上炸弹架，挂上炸弹，去扮演轰炸机的角色。由于ME262根本就不是轰炸机，其结果可想而知。直到1945年元月，希特勒这才意识到他的“决策”错了，立即下令成立ME262喷气战斗机作战部队，但当时距德国投降已不到5个月，实在太迟了！尽管如此，为数不多的ME262在极端劣势之下，还是取得了相当大的战果。如在1945年3月19日，美军出动轰炸机、护航战斗机1150架空袭柏林，德军出动37架ME262迎战，结果共击落美军24架轰炸机和5架护航战斗机，而ME262仅损失了两架。

尽管法西斯的最终灭亡是不可逆转的，但从这个历史事例可以发现，由于希特勒的错误“决策”，独断专行，使得一项新的技术、好的发明得不到好的应用，进而加速了自己的灭亡。试想，如果这杀人魔王听从了专家的建议，作出了正确的决策——将ME262迅速装备德国空军的话，德国空军的空中优势一时是无法被摧毁的，那么，法西斯的灭亡至少是要延长一段时日的。可见，决策失误的影响是历史性的，无可挽回的。

事实上，决策是人们日常生活和工作中普遍存在的一种活动。古往今来，人类社会发展的每段历史进程，无不烙有决策的痕迹。在我国古代，就有“运筹于帷幄之中，决胜于千里之外”之说。《战国策》、《孙子兵法》、《史记》、《资治通鉴》、《三国志》等一大批古典文献就记载了我国古代经济、政治、军事等方面的大量决策事例和决策思想。但总的来说，古代人类社会的实践活动，在其广度、深度上是有限的，是与社会的小生产方式相适应的，决策活动主要凭借于决策者个人的才智与经验，如楚汉相争时的张良、三国时的诸葛亮、元末明初的刘伯温，几乎完全是凭借个人的才学、胆识与聪明才智在历史的长河中谱写了一曲曲令后人传颂的决策佳话。20世纪以来，随着生产社会化的发展，社会生产、科学研究以及其他社会活动规模越来越大，社会系统结构愈来愈复杂，涉及因素也更多，从而使得人类决策活动的不确定因素与风险都相应地增加了许多，“差之毫厘，失之千里”，稍有不慎就可能酿成重大的决策失误。因此，世界各国越来越重视决策与决策方法的研究，历史上的个人决策也渐渐地被“群体决策”所取代。当今世界，决策在

朝着科学化、民主化的方向不断迈进。

决策作为一种现象是随处可见的。我们常常为达到某一特定的目标寻找行动的准则或措施，为了回答涌现在我们周围一个又一个的“怎么办”也常作出决择，这种貌似简单的活动，实质上就是决策。一个人自出生后不久，就会遇到人生道路的抉择。有位诗人说过，人生的道路虽然漫长，但紧要处却只有几步！上学、就业、恋爱、结婚这些必然经历的人生十字路口，无一不需要你做出重大决策，只不过习惯上我们很少使用“决策”这个大字眼罢了。又如当你进了百货商场，面对琳琅满目的商品，你一定想用最少的钱购买更多的商品，这就有赖于你正确的决策，合理安排使用手中有限的资金。节假日到了，该干些什么，如何使假期过得丰富而有意义，也需要作出你的抉择。为什么有的人能在一年半载中干好些事而有些人在一生中一事无成？这除了个人的主观努力与自身素质的差异之外，还与他在人生十字路口一次次决策的正确与否不无关系。许多人就是因为“一念之差”，鬼使神差步入歧途，毁了自己的一生。这“一念之差”，就是决策之差。

决策支持系统

古语说：“知人者智，自知者明。”一个好的决策者应该是一个明智的人，他应该具有丰富的知识，严密的逻辑思维，丰富的实践经验，敏锐的观察能力，准确的判断能力，敢于承担风险的魄力等等。一个高明的决策者除了学会用常规的科学思维方法外，还必须灵活运用“逆向的”、“非常规的”科学思维方法，这往往可以达到出其不意、出奇制胜的效果。例如我国古代楚汉相争时期，名将韩信的“背水一战”就是典型的非常规的思维方法。古代背水作战乃兵家大忌，韩信身为大将军熟读《孙子兵法》而为何一反常理呢？因为他深知“陷之死地而后生，置之亡地而后存”的道理，他的决策正是违反了常理的创造性思维，采用了人们不敢用的作战方法而达到了出奇制胜的效果。

随着社会的发展、人类的进步，现代社会系统结构日益复杂，决策分析中不可控因素越来越多，增添了决策的难度。与之相适应的决策也由个人决策向智能化、集团化、群体化决策发展，一大批决策咨询机构应运而生。例如总部设在奥地利的国际应用系统分析研究所就是一个跨国界的决策咨询机构，主要针对现代人类社会所面临的全球性问题进行各方面的分析研究，涉及的内容有能源、环境、资源、医疗、国土开发、人口、气象、城市、管理等各个方面。他们的研究成果已成为全世界各国政府决策的重要参考依据。另一方面，随着计算机学科的蓬勃发展，计算机已越来越多地进入了决策领域，一门新的称之为“决策支持系统”（DSS）的学科也随之应运而生，自70年代提出决策支持系统的概念以来，决策支持系统在理论研究和应用研究方面都取得了长足的进展。

一般地说，决策支持系统是以计算机为基础的完成信息收集、信息整理、信息处理、信息提供的人机交互系统，它利用计算机运算速度快、存储容量大等特点，应用决策理论方法、心理学、人工智能、计算机网络、数据库等技术，根据决策者的决策思维方式，从系统分析角度为决策者或决策分析人员创建一种良好的决策分析环境。在此环境下，决策者和决策分析人员可以充分利用自己的经验、知识，同时在系统的有限引导下获取有效的信息，详细了解和分析决策过程中的各主要因素及其影响，激发思维创造力，从而在决策支持系统的帮助下逐步深入地透视问题，最终有效地做出决策，即通过决策者与计算机的相互对话完成最终决策。简言之，决策支持系统不仅在内容上能对决策者提供帮助，而且也能在整体决策过程中对决策者进行问题识别、分析提供支持，帮助决策者提高决策的科学化程度。

近几年来，国内的决策支持系统开发与应用研究得到了迅速的发展，不少大中型企业为推进企业的管理现代化水平，逐步建立了自己的管理信息系统（MIS）及决策支持系统，部分省、市、县的政府部门为了迎接信息时代的挑战，加快信息的收集、加工及综合利用的步伐，建立了包括数据库、模型库、方法库、知识库等在内的决策支持系统，有力地促进了我国决策支持系统研究的深入进行。随着人们对第5代计算机——人工智能计算机研究的不断进展，以及决策科学研究的日趋深入，决策支持系统必将进一步发展与完善。

系统科学的发展

系统科学的蓬勃兴起是本世纪科学发展的重大事件之一。自 20 世纪 40 年代以来，系统科学以它独特的思想、理论和方法深深地影响了现代科学技术的发展。由于系统的普遍存在性和系统思想的广泛适应性，系统科学的原理与方法已渗透到政治、军事、经济以及社会、文化、教育等各个方面。今天，它为人们认识世界、改造世界提供了富有成效的、现代化的“新工具”。

我国的系统工程研究虽然可以追溯到 50 至 60 年代，当时主要是在导弹研制部门成立了总体设计部，负责导弹的研制、生产及其组织管理工作，并使用了网络技术系统工程方法，但大规模有组织的研究和应用系统工程是从 70 年代中后期开始的。当时，在钱学森等著名科学家的倡导下，召开了一系列有关系统工程的学术会议，并于 1980 年底成立了中国系统工程学会。从此以后，系统工程在我国得到了迅猛的发展。

首先，系统工程研究队伍从小到大，迅速扩展。在中国系统工程学会成立后不久，北京、西安、大连、上海、湖南等省市率先成立了地方系统工程学会（研究会），到 1991 年底，全国各省及主要大中城市基本上均成立了相应的地方学会（研究会），不少厂矿企业也根据自己发展的需要成立了相应的系统工程研究机构，如上海石化总厂就是较早成立厂级系统工程研究机构的企业之一。自 1979 年中国人民解放军国防科学技术大学在国内第一个设立工程专业以来，不少重点理工科大院校均先后建立了工程系、研究所或教研室，陆续培养了一大批科班出身的系统工程的学士、硕士、博士与博士后。系统工程研究队伍正朝着专业化、学科化的方向迅速发展。

其次，通过广大系统工程工作者的开拓进取，系统工程在各行各业得到了广泛应用，像军事系统工程、城市系统工程、农业系统工程、社会经济系统工程、企业管理系统工程、环境系统工程、教育系统工程、信息系统工程、法治系统工程、人口系统工程、水利系统工程、矿业系统工程、能源系统工程、交通系统工程等纷纷在中华大地破土而出。与此同时，一大批具有中国特色的系统工程研究成果相继问世，不少研究成果已被各级政府所采纳，促进了我国决策工作的科学化与民主化。

最后，从学术活动来看，中国系统工程学会成立以来，已组织召开了 7 次全国性的规模高水平的学术年会和数十次专业学术会议与若干次国际学术会议。北京的《系统工程理论与实践》、天津的《系统工程学报》、湖南的《系统工程》等专业性学术刊物已成为国内系统科学界学术交流的重要园地，不少成果由此走向世界。

为了使大家对系统工程的研究与应用有一个更完整的认识与了解，我们在系统科学的百花园里采撷了军事系统工程、城市系统工程、农业系统工程呈献给大家，从中可以窥探出系统科学百花园的浓浓春意。作为全书的结尾，我们特别集录了当代系统科学的三个前沿领域——耗散结构论、突变论与协同学，以期大家对该学科的研究与发展能有一个更高层次的了解与认识。

军事系统工程

英国雷达研究机构于1940年8月成立了世界上第一个由各类专家组成的跨学科小组，即世界上第一个运筹学小组。他们按系统观点，用系统工程的方法分析和研究作战问题。

该小组不仅研究把雷达用于防空系统，也把它作为高射炮的瞄准器，推广到陆军中去，而且还研究如何利用雷达探测船只、潜艇，从而把雷达迅速推广到了海军。后来，还在海、陆、空三军分别建立了运筹学组织，不但使英国的防空预警雷达系统充分发挥了作用，为保卫英伦三岛立下了汗马功劳，而且还为打击法西斯作出了贡献。

成功给人们很大启发，许多国家的军队都纷纷成立各类跨学科的小组，研究各种军事活动中的问题。于是，一门新的学科就这样在第二次世界大战中诞生、发展了。这就是“军事系统工程”（亦称军事运筹学）。

简单地说，“军事”就是有关打仗的事情。军事系统，是指由与打仗的互相联系的基本因素、环节、部门构成的一个有机整体，如作战指挥、武器装备研制、后勤保障、人员训练等组成的一个复杂系统。军事系统工程就是研究与打仗有关的各方面如何进行系统分析、统筹安排、综合平衡，以便最充分地发挥各个因素、环节、部门的人力、物力、财力的作用，以实现军事系统预期的目标。

换句话说，军事系统工程是系统工程的一个专业门类，即系统工程在军事上的具体应用。它主要采用运筹学、数学以及电子计算机等方法、手段从整体上研究解决军队的组织指挥、作战行动、人员训练、武器装备、后勤保障等问题，从而为部队首脑机关决策提供定量定性的科学依据。

军事系统工程的思想渊源可以追溯到远古时代，我国古代春秋末期伟大的军事家孙武所著的世界上最早的兵书《孙子兵法》就蕴含着许多杰出的军事系统思想。1914年英国工程师兰彻斯特首先应用数学方法描述两军作战的过程，从数量上论证了集中优势兵力的作战效果，并预见了战斗中可能出现的问题。他所建立的兵员耗损方程，被世人称为“兰彻斯特方程”。

第二次世界大战中，参战各国都竭力把一些先进的科学技术直接应用在军事上，美英两国军队最初把数学分析方法用在雷达搜索飞机上，后来发展到防空、潜水艇、布放水雷以及使用其他武器作战等方面，取得了一定成效。时至今日，科学技术得到迅速发展，大量的新武器不断出现。例如现在洲际导弹在半个小时之内就能袭击万里之外的任何目标，精度达几百米甚至几十米，威力与几千万吨 TNT（三硝基甲苯）当量；先进的侦察卫星和光电遥感技术不受夜幕、森林的影响，能在几百公里外发现部队、车辆的活动；大型运输机群已能把整个师的兵力连同武器装备在一天之内投送到千里之外战火纷飞的战场；隐形飞机能神不知鬼不觉地飞临敌军上空；20多年前尚不曾有过的导弹部队，今天已成为各军事强国的一支重要军事力量……总之，现代化技术已经改变了传统的战争规模和作战方式，现代战争对指挥员提出了快速、果断、高质量地有效指挥的要求；同时，现代战争的突发性、复杂性又给作战训练、后勤保障、组织管理方面带来了大量分析计算的繁重任务，因此，现代战争要求采用科学方法和先进的计算工具，以适应时代变化，对部队进行有效的组织管理与指挥。这些，极大地促进了军事系统工程的广泛应用与迅速发展。

军事系统工程现已在世界各国得到了广泛的应用。军事上的较量，实质上是一场经济与科技实力的较量。为了祖国的安宁，我们必须建立一支强大的军队，而要建立一支强大的军队，则必须有繁荣的经济与先进的科技及理论。这中间，自然离不了“足智多谋”、“运筹于帷幄之中，决胜于千里之外”的军事系统工程专家来出谋划策了。

城市系统工程

城市系统的结构，一般包括经济结构、人口结构、土地利用结构、布局结构以及能源交通结构等等。

城市布局是城市系统工程研究的重要内容之一，它是指城市在空间上的分布状况和相互关系。就全国而言，如何合理地配置城市？在一个地区范围内，相邻城市间的分布关系如何处理？哪一个以工业为主？哪一个以商业、金融业为主？就一个具体的城市来说，如何使该城市的组成部分在空间上形成合理的优化体系，更有益于城市居民的生产与生活？上述问题分属三个不同的研究层次，第一层次是全国范围内的城市布局研究，第二层次是区域性的布局研究，第三层次则是具体某个城市内的布局研究。

城市系统工程的分支之一——城市公共交通系统工程就是以道路交通系统为着眼点，着重研究解决城市内的公共交通问题。例如1983年着手的“长沙市城市公共交通系统工程研究”就是国内城市系统工程应用研究最早的课题之一。它从解决长沙市“乘车难”这一问题入手，面向乘客，开展全市的“出行”抽样调查，然后通过建立交通网络优化模型以及系统分析，优化城市的线路布局；并根据研究结果，提出了许多种切实可行的方案和建议，供政府部门决策参考。该课题首次把系统工程原理与方法运用于城市公共交通系统的研究工作，具有十分重大的意义，有力地推动了我国城市系统工程的发展。

运用系统工程的原理与方法制定一个城市的长远发展综合规划与城市建设规划，首先必须认真搜集、调查该城市以及与该城市发展相关的所有基础资料与历史数据，然后在此基础上仔细分析该城市的特点、优势、潜力与存在的问题，掌握了解国民经济长远发展规划及本地区区域发展规划在未来时间内对该城市发展所提出的具体要求与诸多限制，这样，依据该要求与约束就可以通过系统预测、系统分析、系统优化来确定该城市的发展方向和发展规模，最终制定切实可行的发展规划。

运用系统工程制定城市规划，有一个最显著的特点就是注重协调各系统之间的相互关系，即从整体性原则出发，强调系统的整体最优和全过程的最优。例如，制定城市规划一定要有各方面的专家参加，诸如经济学家、建筑师、系统分析师以及生态环境学家等等。各方面的专家对同一问题的看法往往是不一致的，甚至分歧还会很大。经济规划师研究的主要是经济发展问题，他们重点考虑工业、农业、商业以及各行各业之间经济结构的变化及其发展速度与规模，注重社会生产力的发展和经济效益的提高；建筑规划则往往从特定的空间影响出发，重视城市建设艺术布局的原则和设计方案，强调生产力的合理布局与城市的外在形象；社会发展规划师往往注重人口社会结构的变化，职业与生活方式的变化及相互影响，家庭收入及变动导致个人和社会心理变化及原因，比较重视社会道德、社会风尚与精神文明建设等；环境规划师则关注城市生态环境变化及环境与生产、生活之间的相互影响等等。显然，不同的侧重面，就有不同的价值准则，不同的价值准则，又导致

认识上的差异。系统分析师的主要任务之一，就是要充分注意吸收各种规划师的不同观点，协调其矛盾，最终提出一个各方面均能接受的较为满意的规划方案。

城市系统工程是一门新兴的综合性学科，它的主要任务是从时间和空间上研究城市的发展及其分布规律。要完成这一任务，必将涉及许多学科，需要有一个相应的学科体系。

改革开放以来，虽说城市化进程有所加快，但伴随而来的住房拥挤、交通不便、文化设施缺乏、犯罪率上升等现代城市病又在围绕着我们。在加速城市化进程的同时，如何提高现代化城市的管理水平以充分发挥其城市功能，实现各系统之间的协调运转，是当前摆在我们面前的一大难题。这一问题的最终解决，有待于城市系统工程研究更进一步的深入与突破！

农业系统工程

生态农业是运用生态经济学原理和系统科学方法，把现代科技成果与传统农业技术紧密结合建立起来的农业，它是具有合理生态、良性循环功能的一种农业现代化体系。家庭生态农业以家庭为独立单位，以家庭具体条件为出发点，运用生态经济学原理与系统科学方法，从种植业、养殖业到加工业，按照食物链、加工循环模式进行综合经营，形成物质能量多形式多层次利用的生态良性循环系统，从而实现农、林、牧、副、渔的协调发展，达到最佳综合效益。

农业系统工程，就是要兼顾农业生产与环境保护两大目标。既充分利用自然资源，发展农业生产，在较少的资源条件下获得质量好数量多的人类所需要的农副产品，又要保护好生态环境，使有限的资源不断增殖更新，使生态系统的物质循环和能量转化功能不断增强。

太阳能是我们这个星球赖以生存和发展的最主要能源。转化太阳能，分为植物生产、动物生产和微生物分解三个过程。首先通过绿色植物的光合作用，把从空气中吸收的二氧化碳（CO₂），从土壤中摄取的水分和氮（N）、磷（P）、钾（K）等无机物转化为有机物质，这一过程称为植物生产；然后通过草食动物将植物能和植物物质转化为动物能和动物物质，即动物生产；最后由微生物将动植物分解转化为沼气——甲烷和二氧化碳，同时生产出绿色植物能够吸收、利用的有机肥料，从而在生态系统中完成一次能量流和物质流的循环过程。在这一循环过程中，生产的沼气，可以把储藏的生物能（含动物能与植物能）转化为热能，其能量相当于植物所吸收的太阳能的60%以上，这样做可使太阳能的损失率降到40%以下；而如果把植物秸秆等直接燃烧，利用率不到10%，太阳能的损失率高达90%以上。上述循环过程不仅可以最大限度地利用太阳能，而且在腐熟的有机质中保存原有的氮、磷、钾等元素，提高了生态系统中能流与物流的质量，有效地保证了生态系统的良性循环。这就是农业资源综合利用，生态农业多层增值的理论依据。

80年代以来，由于系统科学和电子计算机的普及与发展，我国农业系统工程研究进入了一个崭新的阶段。农业系统工程专家、学者从农业系统整体出发，运用系统分析的观点，在研究区域农业发展战略、研究农业生态系统与结构功能、调整农村产业结构等几个不同层次问题上进行了深入探讨。如国家级大型研究项目“三江平原区域综合治理”、“黄淮海平原中低产区综合治理”、“黄土高原综合治理”等，均是以获得大面积高产稳产、降低生产成本、综合发展为目标，并取得了显著效果的研究项目。像由中国科学院主持研究的黑龙江海伦县农业现代化试点研究，就是运用系统工程的理论与方法，首先开展“海伦县自然资源的综合考察”，先后完成农业气候、地质、地貌、土地利用、土壤、生物资源、水文以及农业区域规划、农业经济等方面的系统调查，然后开展“海伦县社会经济生态技术系统总体设计及其模型系列”的研究，制订了以种植业为主，以农、林、牧、副、渔全面发展和农工商综合经济为两翼的所谓“飞鸟型”经济发展模式，以及到2000年的长远发展规划。

总之，农业系统工程的任务是顺应自然，设计一个最佳的农村产业结构，人为地创造一个高产、优质、低消耗的农业生产系统和一个稳定、合理、高效的良性循环的农业生态系统。其显著特点是从整体出发，重视信息、数据

的收集加工与处理，建立数学模型实现系统的量化与优化，运用计算机进行系统仿真（尤其是模拟田间试验，可以有效的延长农业科学的研究寿命）与政策分析，然后运用决策分析的理论，制订、选择优化方案。

耗散结构论

耗散结构的概念，是对应于平衡结构而得出的。在此之前，人们一般总认为倘若系统原先是处在一种混乱无序的非平衡状态中，是不可能非平衡状态下呈现出一种新的稳定有序结构的。但普利高津等人对此进行了 20 多年的研究后指出：一个远离平衡态的开放系统（不管是力学的、物理的、化学的、生物的，还是社会性的、经济性的系统），通过不断地与外界交换物质与能量，在外界条件的变化达到一定的阈（临界）值时，量变可能引起质变，系统能从原来的无序状态转变为在时间上、空间上或功能上的有序状态，当外部条件继续改变时，还会出现一系列新的结构状态。这种在远离平衡态情况下所形成的新的有序结构，普利高津把它称为“耗散结构”。

研究耗散结构的性质以及它的形成、稳定和演变规律的科学，称为“耗散结构论”。

耗散结构论的建立使我们对自然和人类自身有了一个更加完整、深刻的认识：在平衡态附近，系统发展过程主要表现为趋向平衡，并伴随着无序的增加和结构的破坏；而在远离平衡的条件下，发展过程可以经过突变，导致新的结构的形成和有序度的增加。普利高津由于对“非平衡态热力学”，特别是对耗散结构论的研究而获得了 1977 年度的诺贝尔化学奖。

耗散结构论是一门正在发展的新学科，其理论体系与有关概念也在不断完善之中。现在，耗散结构论已广泛应用于力学、物理学、化学、地质科学、生物科学、医学以及社会科学等领域，并取得了不少令人瞩目的成就。正如普利高津所说：“我们正是站在一个新的综合、新的自然观念的起点上。”

突变论

在自然界有两种不同的变化方式。一种是光滑的、连续不断的变化，如生命有机体的连续生长、地球绕太阳连续不断地旋转、流体（如水、油、气）的连续流动、气温的连续变化等等。对这种光滑的、连续不断的渐变现象，人们已较成功地建立了各种模型描述其发展规律。与此同时，自然界存在着另一种大量的不连续的飞跃式的变化，如水沸冰融、岩石金属的突然断裂、桥梁突然塌陷，以及火山、地震、山洪的突然爆发均属于这类变化。此外，细胞的分裂、物种的绝灭、飞机的坠毁、战争的爆发、经济危机的产生、工厂的倒闭、政权的变更等等都是事物的形态、性质、状态从一种形式突然地跳跃到根本不同的另一种形式的不连续变化，我们将这种突然之间发生的变化称之为“突变”，也有人称之为“灾变”，意指巨大的、灾难性的突然变化。

对于由于这种突变现象而造成的具有不连续过程的系统，适用于连续系统的传统分析数学已显得无能为力。那么，有没有用来描述和解决自然界和社会现象中大量存在的各种飞跃和不连续过程的数学工具呢？“山重水复疑无路，柳暗花明又一村”，以法国巴黎高级科学院著名的数学教授——1958年国际菲尔兹数学奖（世界上数学最高奖）获得者雷内·托姆博士为首一批科学家创建的“突变论”，为我们提供了一种新颖的思考方法。

突变论运用更为高深的数学理论为工具，来研究自然界和社会现象中的各种形态、结构的非连续性突变，从而引起了数学家、哲学家、生物学家、社会科学家以及系统科学家的广泛注意和极大兴趣，有人高度评价突变论是“自牛顿、莱布尼兹以来，数学界的又一次最伟大的智力革命”。因为牛顿、莱布尼兹用他们的理论——微积分解释了所有连续的、渐变的现象，而托姆的突变理论则解释了所有不连续的、突变的现象。

在突变论中，把那些作为突变原因的连续变化因素称之为“控制变量”，把那些可能出现突变的量称为“状态变量”。以水为例，给水连续不断地加热、加压，其温度和压强都是连续变化的，但当这些连续变化的量一旦达到某一临界点——沸点，即水在一个大气压下，温度达 100 时便会引起不连续的突变——水突然沸腾，转化为水蒸气。在这个水的相变（指水从液态转变为汽态）模型中，“控制变量”就是由人们控制、掌握的两个量——温度和压强，它们始终是连续变化的；而“状态变量”则是能表示水的不同形态特征的密度（密度高的状态对应着液态，密度低的状态代表气态）。显然，是控制变量温度和压强连续不断的变化，导致了状态变量密度的“突变”。

突变理论最初是由托姆在 60 年代中期发展起来的，他的意图是把数学这个“硬”工具应用于生物学这门“软”科学。托姆论证说，生物学家不能根据他们丰富的实验事实来构造一个综合理论，主要因为他们缺乏为完成这个任务所需要的数学知识。

突变论发展至今，仍旧着力于数学基础的建立以及突变现象的解释，而控制乃至预测突变难度还很大，其应用还处于初创阶段，这是因为突变论还只是一门诞生刚 20 年的新兴学科，在理论上尚不够成熟完备，是一块有待开垦的处女地。

目前，突变论已在物理、化学、地质学、医学、生态学、工程技术以及社会科学、经济决策等方面得到了广泛的应用，并取得了一批卓有成效的成

果。显然，一种新理论的诞生与发展、一项新的发现从问世到成熟，不是一蹴而就的事情，需要几代人的不断努力。“突变化”的最终“突破”，有待于 21 世纪科学家们的共同努力。

协同学

协同学一词来自希腊文，其含义是“一门关于协作的科学”，或者说“一个系统的各个部分（子系统）协同工作”。协同学是以研究完全不同的学科间存在着的共同特征为目的的一门横断学科，它以信息论、控制论、突变论等现代学科理论为基础，通过运用类比的方法，针对各学科广泛存在的无序到有序的现象建立了一整套数学模型和处理方案，从而可把在一门学科中所取得的研究成果，很快地推广到其他学科类似现象上去。

协同学与耗散结构论一样，也是研究远离平衡态的开放系统在保证与外界之间有物质流或能量交换的条件下，能够自发地产生一定的有序结构或功能行为的一种理论。它以无序到有序的转变为主要内容，不仅包括非平衡态，也包括平衡态中的相变。协同学力图揭示出各不同学科之间所存在的共同特征和共同规律，并认为自然界中各种貌似不同的现象之间具有内在的“神似”的联系。因而协同学解决问题的思想与方法同目前其他解决问题的思想与方法相比较，具有更加深远的意义。

协同学的创始人是德国著名理论物理学家赫尔曼·哈肯教授。他在本世纪60年代初从事激光理论研究，曾成功地建立了一整套的激光理论。他在研究中发现，激光在远离平衡时所发生的从无序到有序的变化与热平衡系统中所发生的相变存在着深刻的相似，从而促使他进一步研究了很多不同学科中存在的非平衡有序结构形成的现象，如在化学反应中出现的颜色由红变蓝，再由蓝变红的所谓“别洛索夫——扎玻廷斯基反应”，在生物学中竞争选择而造成的野兔数及其天敌山猫数变化的“时间振荡”等等。结果他发现，这些结构从无序到有序的形成过程，遵循着与激光的形成过程相同或相似的方程和规律。这充分说明，尽管它们的演化机制有所不同，然而它们形成的有序结构或功能的机理是相同的。这些发现，奠定了哈肯等人创立协同学的基础。

协同学主要研究一类由许多子系统构成的系统——这些子系统的性质可能截然不同，如激光系统中的原子、光子，生物系统中的动物、植物，社会系统中的党派、集团，经济系统中的厂矿、乡镇等等。子系统是系统的微观世界，而系统则表现子系统的整体行为。协同学研究这些子系统如何协作而形成系统空间结构、时间结构。协同学特别研究这种有序结构是如何通过自组织的方式形成的。

协同学力图解决的一个主要问题是，是否存在着一个一般原理，它支配着所有这些彼此协同作用的系统？协同学的主要任务是寻找某种能够支配存在于各类系统中的自组织现象的一般原理，并且该一般原理与系统组成部分（要素）的性质无关。如果有这样的原理的话，我们就可以把已知系统的规律，推广到我们尚不熟悉、尚未了解的未知系统。特别是我们可以把无生命世界中简单得多的系统的组织过程作为研究起点，而后将发现的基本原理用来阐明和解释极端复杂的生物现象，并最终研究解决生命物质的起源问题。

