

初谈系统工程

一、朴素的系统工程思想和方法

系统工程是当代正在发展和完善的一门工程技术，它把要处理的事物作为一个系统，从系统的整体出发，研究系统内部各个组成部分之间的有机联系和系统与外部环境的相互关系，采用一些科学方法使其各个组成部分相互协调与相互配合，以求得系统的最佳结果，亦即使所处理的事物从整体上获得诸如时间上较省，经济上合算，运行中可靠，技术上先进等效果。

系统工程虽然在本世纪60年代前后才开始形成体系，但朴素的系统工程思想和方法，不论在东西方，自古以来人们就在自发地运用了。

例 1 战国时期，秦国太守李冰父子设计建造了伟大的都江堰水利工程。它包括“鱼咀”岷江分水工程，“飞沙堰”分洪排沙工程，“宝瓶口”引水工程和120个附属渠堰工程。这些工程之间的依赖制约关系，处理得恰到好处，形成了一个协调运转的工程总体。在建造渠堰上，那时还没有钢筋水泥，李冰父子注意到“系统与外部环境的相互关系”，完全采用当地

现成出产的竹、木和鹅卵石构筑而成。都江堰水利工程分导了汹涌险恶的岷江，使它驯服而有节制地灌溉着成都平原上的14个县，使500余万亩农田至今受益。他们还建立了一套控制流量和养护修理制度，现在仍发挥着作用。都江堰水利工程其规划、设计和施工的科学水平与创见，即使按现代系统工程的观点来考察，仍不愧是一项杰出的大型工程建设。

例2 北宋真宗时，都城建于汴梁（今开封）。一次皇宫失火，宫殿大部分烧毁，真宗令大臣丁渭尽快地修复皇宫。当时的情况是一团糟，既有烧毁现场废弃物的处理问题，又有建筑材料的来源问题，更有运输问题（尤其是大型木石料及民工的食粮）等等。丁渭经过仔细分析研究，提出了一个施工方案：

先清理现场，但不把烧毁的废弃物搬离汴梁，而是堆积在皇城的一角；再把皇城前的大街挖掘成为深沟，用挖出的土就地烧制砖瓦，这就解决了部分建筑材料的问题；又使深沟延长，使之与城外的汴水接通从而形成河道，就可用船舶将大量的砂石、大型木石料及民工的食粮等，直接运入工地，这就大大加快了皇宫的修建速度；等到皇宫修复之后，再把原来堆置于城角的废弃物及建筑剩余的碎砖杂土填入河道，修复原来皇城前的大街。

后来按这方案具体施工的结果，工期大大缩短，工效极高。于是“丁渭修宫”的故事，就成为历史上建筑工程的佳话之一。

丁渭修宫的方案，充分体现了系统工程的整体性原则和最优化原则。它把所处理的事物（修复皇宫）作为一个整体来考虑。既分析其各个组成部分之间的关系，又注意系统与外部环境。

境的关系（如修复皇宫与汴梁城外汴水的关系等）。它不拘泥于局部的优劣（例如，丁渭清理现场的作法就受到了真宗的训斥），而着重于如何达到整体的优化（即尽快修复）。因此这是朴素的系统工程思想和方法的一次光辉实践。

例 3 古埃及金字塔的建造，以及15世纪初威尼斯兵工厂开始采用的流水作业的生产管理方法等，人们亦认为是朴素的系统工程思想和方法的应用。

在日常生活和工作中，人们也常常自发地应用着系统工程的一些思想和简单方法。

例 4 有一个摊贩，在夏季里要到文化宫内去设点出售食品。文化宫管理所规定：这种摊点只能销售冰棍或面包中的一种食品。他根据自己以往的销售经验知道：如卖冰棍，遇晴天大约每天可获利 8 元，遇阴雨天只能获利 1 元；如卖面包，晴天可获利 4 元，遇阴雨天可获利 6 元。他再根据自己长期生活在这个城市里的经验，估计这个城市在夏季里出现阴雨天或晴天的比例大致为三七开。这样他经过全面地权衡利弊（即采用只涉及算术四则运算的一种简单的系统工程方法）之后，决定自己还是在夏季里卖冰棍为好。因为如果一个夏季他设摊 90 天，那么一个季度里他卖冰棍比卖面包可望多获利 117 元（参看第四章）。

二、现代系统工程的意义

朴素的系统工程的思想和方法，虽然可以溯源久远。但作

为现代的一门独立的、应用广泛的学科，却是在本世纪内（特别是 40 年代以后）才逐渐发展起来的。它真正受到人们的重视，一般认为是从1969年阿波罗载人登月计划成功开始。

1961年5月25日，美国总统肯尼迪（J. E. Kennedy）宣布：将在60年代末期实现人类登月的计划。于是由美国国家航空与宇宙航行局（NASA）运用系统工程的方法，特别是采用PERT等新型管理技术（参看第五章），应用电子计算机进行各种仿真，确保各项试验研究准确地按期完成，终于在1969年7月16日用阿波罗11号宇宙飞船把3名宇航员送到月球上，在顺利完成科学考察任务之后，又于7月24日安全返回地面。阿波罗载人登月计划历时8年，参加研制的工程技术人员42万，2万多家公司和工厂，大学研究机构120所，使用600多台计算机，耗资240亿美元。它的如期完成，被全世界誉为人类史上的一个新纪元，是美国在系统工程方面的一个杰出成就。

此后，人们对系统工程的兴趣日益浓厚，并有意识、有计划地应用于工程和工业的各个领域中，而且也逐步应用于诸如城市建设、交通运输、通讯网络、防止公害、预防灾变等领域，甚至在社会、经济、教育、行政、生活消费等复杂而困难的各个领域，也已开始注意应用系统工程。

三、当代科学体系及系统科学

对于当代的科学体系，至今众说纷纭。其中一种比较引人注目并对我们的研究具有一定指导意义的，就是钱学森的观

点。在他看来，当代科学体系的结构可以从两方面来考察。

首先，从横向上划分，当代科学体系可分为九个部门，即：社会科学，自然科学，数学科学，系统科学，思维科学，人体科学，军事科学，行为科学和文艺理论。这些科学部门都使人们从各个特定的角度来认识客观世界和改造客观世界。它们通过进一步的综合，在思想方法上抽象和提炼，最后达到一个最高的概括，那就是哲学。

从每一个科学部门到哲学，其间都有一个中介。譬如数学科学到哲学的中介就是数学哲学，等等。

其次，对于每一个科学部门还可以从应用实践到基础理论作纵向分析。每一个科学部门都可以分为三个层次：直接改造客观世界的层次——工程技术；直接为工程技术作理论基础的层次——技术科学；在理论上进一步上升，成为认识客观世界的基本理论——基础科学。

如上所述，系统科学是当代科学体系中的九大部门之一，它是一门研究系统的类型及其一般性质和运动规律的新兴科学。在系统科学中，工程技术就是系统工程，其技术科学是运筹学、控制论和信息论，而其基础科学还是一门近十年来才开始筹建的学科，目前学科的命名是系统学（**Systematology**）。系统科学到哲学的中介就是系统论（**Systematics**）。

构筑系统学的材料，一方面来自从工程技术科学——运筹学、控制论和信息论，另一方面来自自然科学和数学科学中的系统理论成果，如冯·贝塔朗菲（**Von Bertalanffy**）的一般系统论和理论生物学，普里戈津（**I. Prigogine**）的耗散结构理论，哈肯（**H. Haken**）的协同学，艾肯（**M. Eigen**）的超

循环理论，以及托姆（**R. Thom**）的突变论等。钱学森认为，把上述两方面的材料加以融汇贯通和综合发展，就可以建立起系统学。此外，还有一些领域里的成果也将有助于系统学的研究，如物理学中的统一场论、重整化群理论和奇异吸引子理论等，哲学界关于系统科学辩证法与系统方法的研究，等等。

系 统

一、系统的概念

如前所述，系统工程是系统科学中的实用领域，而系统科学的研究对象是系统。因此，我们应该知道：系统是什么？它的基本特性有哪些？

尽管人们在日常生活和工作中，广泛地使用着“系统”（System）这个名词，但是，系统成为科学研究上几个关键性概念之一，还是近几十年的事。

朴素的系统概念，不论东方或西方，都是古已有之。可是将系统正式作为一个重要的科学概念来予以研究，最早应推美籍奥地利理论生物学家冯·贝塔朗菲。1937年他在芝加哥大学的一次讲演中正式规定：“系统是相互作用着的诸种成分的综合体。”

目前关于系统的界说已不下40余种。我们采用下列的说法：

系统是由至少两个相互联系、相互依赖、相互制约和相互

作用的要素所组成的一个具有整体功能和综合行为的统一体。

为了实现系统自身的稳定和功能，系统需要以一定的方式取得、使用、保持和传递能量、物质和信息，也需要对系统的各个构成部分进行组织。

系统无处不在。例如，原子结构是由电子、质子、中子等要素所组成的一个系统；人体是由神经、呼吸、消化、循环、运动、生殖等要素所组成的一个系统；学生素质是由其道德修养、知识与能力、健康状况等要素所组成的一个系统；规章制度是由若干条令所组成的一个系统。其他如一本书的内容、一次讲演的内容、一次思想工作、人们的知识体系、社会意识形态、一个学校、一个企业、一级行政组织、国民经济的一个部门、一个国家、地球、太阳系、银河系以至整个宇宙，无一不是系统。

从某种意义上说，任何一个我们所研究或处理的事物都可视为一个系统。因此我们说：系统是一个反映着复杂的研究性结构的概念，它反映了事物最普遍的本质联系。

正由于系统在概念上是如此的广泛，因此也就决定了系统工程在应用上的广泛性。

二、系统的要素和子系统

要素是组成系统的基本部分。凡是系统里不打算再作分解的部分就称为其要素。例如在研究物体的物理性质时，分子就是其要素；而在研究物体的化学性质时，原子就是其要素。

任何系统都可以根据人们所研讨问题的需要，将它按空间或时间或意识等进行分解。即把一个系统分成一些由一部分相互作用和相互依赖的要素所结合而成的、具有特定功能的有机整体，这些部分整体就称为原系统的子系统（或部件）。

系统和子系统的概念是相对的。任何一个系统作为一个独立的部分来看，它是一个完整的系统；但从更大范围或更高一级来看，它又必定是另一个它所从属的系统的子系统。这就是子系统概念的两重性。也就是说，如果根据某一问题的具体内容，子系统不拟再分解，此时子系统对于原系统而言就具有要素的地位和属性；若根据另一问题的需要，子系统还必须再行分解，此时子系统对于下一层次的子系统或要素而言，就具有原系统的地位和属性。例如上面例子中所述的分子，在物理问题的研究中它具有要素的地位和属性；而在化学问题的研究中它就具有子系统的地位和属性。又如某学校的评优工作，若是指评先进班，则各班就分别是各个要素；若是指评优秀学生，则全校的每个学生都是要素而各班就分别是各个子系统。

一个系统如何分解为子系统，又把哪些“东西”作为系统要素，这既与所讨论问题的性质有关，也与对问题的讨论所要求的深浅程度有关。

在运用系统的思想来分析和解决实际问题时，首先应决定要素的取舍。即找出那些对系统的性质、功能、发展、变化有决定性影响的部分作要素，而略去系统中的次要因素。其次，必须区分系统的子系统。即区分这个系统的层次结构，确定哪些定为一级子系统，哪些定为二级子系统，等等。最下层的子

系统，即由各个要素组成。最后，还要注意研究系统中各级子系统内部、同级子系统之间、上层子系统与下层子系统之间的关系，以及此系统和环境系统及相应的上层系统之间的关系。

基于子系统概念的两重性，我们以后在述及系统的组成时，常根据具体情况将其一部分或称为要素或称为子系统，而不必在该处对文字作细致的区别。

三、系统的特性

各种系统的组成部分可以千差万别，其范畴大小或复杂程度也可以极为悬殊，但它们都具有一些共同的基本性质。

（一）层次性

根据对所研讨的问题的需要，由上所述，系统可分为若干子系统。另外，从更大的范围来看，任何一个系统都可作为一个子系统包括在另一个更大的系统之中。例如太阳系是一个系统，它由行星、卫星、彗星和流星等子系统组成，而太阳系本身又是银河系这个大系统的子系统。又如一枚核导弹，是由弹头、弹体、发动机、制导、遥测、外弹道测量和发射等子系统组成的一个复杂系统；每一个子系统又由更下一层的子系统组成，如弹头子系统是由引信装置、保险装置和热核装置等组成，而核导弹本身又可以与核动力潜艇和战略轰炸机组成战略防御武器系统，即它是后者的子系统。

这种性质称为系统的层次性（或等级性）。系统的层次性往往表现为树枝状结构，这一点在复杂的大系统中尤为明显。

系统的层次性不是人为的和随意的，而是系统本身的客观特征之一。研究一个系统时，弄清楚它的系统层次或等级，弄清楚应该在哪个层次或等级上研究该系统，这一点常具有决定研究成败的重要意义。

（二）整体性

系统是由至少两个要素所构成的一个整体，每个要素具有其特定的功能。但系统并不是由这些要素简单凝合而成的一个集合，要素之间存在着一定的逻辑关系，从而它们按某种结构方式构成一个为实现系统目标的整体。

当各个要素按一定的逻辑关系构成一个整体之后，系统就产生出一种整体的功能，即通常所谓的系统功能。这种整体功能不是各要素独立存在时所能具有的，因此相对于各要素而言，这种整体功能的产生，就不仅是一种数量上的增加，更是一种质变。也就是说，系统之所以成为系统，不仅在于它是各要素的集合，而且在于它具备了一种高于各要素功能的整体功能。

例如由指针、齿轮、螺丝钉、轴杆等要素所组成的一只机械手表，它具有一种高于各要素功能的整体功能，即计时。又如由神经、呼吸、消化、循环、运动、生殖等要素所组成的一个人体，它具有一种高于各要素功能的整体功能，即生命。

从系统的功能方面而言，整体性指：一个良好的（或有生命力的、或正常发展的）系统，它的整体功能不是各部分功能的“总和”。在哲学上，这正是古希腊哲学家亚里士多德的原理：整体大于各部分之和。

例如人的两只眼睛所构成的视觉系统，其整体功能就“大

于”两只单眼的功能的“总和”。实验测定：双眼的视敏度比单眼高6—10倍，且有立体感。又如一台收录机，它是收音机和录音机有机结合起来的一个系统。收录机不仅具备收音机所有的收音功能，录音机所有的录放音功能，还具备在收音的同时，自动通过电路进行内录的功能，而这是收音机和录音机各自功能加起来所不具备的。再如教育内容可分为德育、智育、体育、美育和劳动技术等，这些部分对于培养全面发展的人，都有其侧重和必要之处。一个在德育、智育、体育、美育和劳动技术等方面都有良好表现的学生，他（或她）就具有一种综合的优秀素质，它由有德行、有创造能力、有文化教育、有劳动技能而且体格健壮等融和而成。这种优秀素质就是教育内容这一系统的整体功能。这种功能显然不是各部分教育内容的功能的简单总和，它是一种质变或升华。所以人们也说，它“大于”各部分功能的“总和”。

以上是从系统功能方面阐述了整体性。整体性还有系统的结构方面，也就是评价系统的要素其优劣的准则。

一个系统中，任何要素的存在都是为了完成一定的功能，而一个系统在结构上是否完善，不应孤立地看此要素是否优良，而应着眼于看此要素的存在是否能优化系统的整体功能。

基于这一重要观点，我们在设计或建造一个系统时，不必强调它的每个要素在功能上都很完善，我们可以允许系统中某些要素的功能不十分完善，只要它们综合起来能构成一个具有良好功能的系统就行。这也就是用系统整体最优的思想来确定其要素存在的意义，以及对要素作评价的标准。

例如评价一个工厂系统的机修车间其存在的意义。机修车

间工人的劳动生产率、设备的利用率和产品创值效益，总是保持在低水平上。但只有这样，才恰能保证工厂的生产子系统其机械设备得到适时的维修，机械故障能得到及时的排除，从而使工厂系统的生产效益达到高值。所以，工厂系统中必须保留“低创值效益”的机修车间，它的存在是必要的。工厂系统这样的结构是符合整体性的，从而是合理的。

当然也有一些系统，即使每个要素都是优良的，但由于结构不当，从而作为一个整体不具有正常的工作性能，即构不成一个完善的、有生命力的系统。这种系统必然不能久存，或则调整系统结构以产生正常的功能，或则系统逐渐消亡。例如一些内耗严重的行政系统等。

综上所述，由于系统具有整体性，部分的性质不同于整体的性质，与整体分离的部分其行为不同于整体中的部分的行为。因此，离开对整体的认识就不能全面地、正确地认识各个部分。所以，研究任何系统都必须从整体出发研究部分，而通过对部分的研究加深对整体的研究。

(三) 相关性

系统内各要素之间存在着某种相互依赖和相互制约的特定关系。某一要素的变化会影响另一些要素的变化。正是由于这些特定的关系把要素有机地结合在一起，形成一种特定的结构，才使得系统显示出其整体功能和综合行为。例如一个农业区的某种生态系统由有益鸟类、农业害虫和农作物组成，害虫种类和数量的变化会影响农作物的收成，有益鸟类又能控制害虫的生长。如果在一个农业区把麻雀等鸟类打光，就可能引起害虫成灾，甚至造成大面积农作物歉收。因此，在农业区维持

一定数量的有益鸟类（尽管它也要糟踏或吃掉一些农作物），对控制农业害虫的过度繁衍，保证形成对农业生产有益的生态平衡条件，是十分重要的。

整体性的根据就在于相关性。因此，研究系统的要素与要素、要素与系统、系统与环境之间的相互关系，就成为了解系统的一项必要的工作。

（四）目的性

任何一个系统的存在，都有其特定的目的，因而也就具有一定的功能。这正是区别此一系统和别一系统的标志。例如在筹建一所中专学校的工作中，就必须先有一个“需要培养这方面专门人才”的目的。而不同的培养目的，正是不同类型学校（即系统）差别的标志。譬如师范学校、卫生学校或财经学校等。

系统的目的既有单一的，也有多样性的。现代化系统多是多目标的系统。例如高等学校就是一个多目标系统，它要培养人才（包括研究生、大学生、进修生、代培生等），要进行科学研究，还要为社会提供服务，等等。

系统的存在是以适应环境为前提，而适应过程又是一种有目的的活动过程。系统及其要素的行为，既依赖于它们的现有状态，同时又依赖于未来的终极状态。因此，在研究系统或构造系统时不仅要弄清系统可能达到哪种终极状态，而且要依据其终极状态来了解系统的现状与发展。

（五）环境适应性

任何系统都存在于一定的外部环境之中，系统不能脱离环境而独立存在。系统和包围它的环境之间，通常总有物质、能

量和信息的交换。外界环境特性的变化往往要引起系统特性的变化，即系统的形式和发展要受到环境的制约。例如水分子随环境温度和压力的变化，呈现为固体、液体和气体三种状态。又如生物在漫长的进化过程中，随着环境的变迁，不断积累新的结构来适应新的外部环境，并通过遗传信息把这些变异了的结构传递给下一代，从而世代繁衍不息。

系统必须适应外部环境的变化，否则系统就不能继续正常存在和发展。所以，当人们在设计或建造一个系统时，必须使系统具有适应功能，这种功能使系统能保持适应环境的变化，以求恢复或调节其原有的系统功能。例如一所高等学校就应该具有适应功能，当社会的政治经济发展对于人才的需求有了新的尺度，对跨学科研究有了新的要求时，学校必须适应这种环境变化，并在变化中有所发展。因此学校在改革时必须适时地把基础科学、技术科学和工程技术等恰当地在专业设置上综合地结合起来；把教学、科研和生产恰当地结合起来；把自然科学、人文科学和技术科学恰当地结合起来；并为社会的政治、经济、技术提供有效的服务。这样，学校才能得到社会的承认和支持，才能与社会保持良好的适应状态。

总之，一个系统必须是动态的，它要经常地改变自己，以适应外部环境的变化，同时在适应环境的进程中，又能能动地改造外部环境。

四、系统结构

在前面关于系统整体性的讨论中，读者已经注意到：有些系统虽然其某些部分的功能不尽完善，但系统的整体功能却大于其各部分功能的总和；而另一些系统，尽管其各部分功能都好，但系统的整体功能却不令人满意。

为什么会出现这种现象呢？在前面我们曾指出，这涉及到系统结构是否合理的问题。那么，在设计或制造一个系统时应注意哪些问题，才能使其结构合理？我们以下的例子来加以说明。

某人要独自准备好一顿饭菜（这就是他要设计的一个系统）。他希望尽量少耗费时间（这就是此系统的系统目标）。他只有一个炉子（这就是此系统的外部环境）。为了准备好一顿饭菜，他必须完成下列各事：淘米、洗菜、切菜、烧水、煮饭、炒菜（这些就是此系统的各个要素）。如果淘米要 5 分钟，洗菜要 6 分钟，切菜要 5 分钟，烧水要 7 分钟，煮饭要 12 分钟，炒菜要 7 分钟（这些就是各要素的功能）。

把六个要素串行起来，就构成一个系统（I），如图 2.1 所示，这样准备好一顿饭菜就需要 42 分钟（这就是系统（I）的整体功能）。

除去对这些要素要有先后次序的限制（即可行性）之外，另外分析这些要素具有的其他关系，如它们有工作转换的时间间隙，有人手的忙闲等，他就可以用这六个要素再构造一个系

统（Ⅰ），亦即如图2.1所示，这样准备好一顿饭菜就只需要26分钟（这就是系统（Ⅰ）的整体功能）。

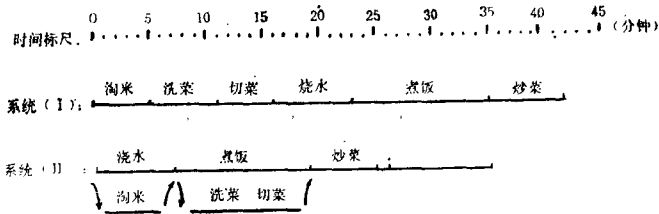


图 2.1

由上述可知：相同的要素可以构成不同的系统，如系统（Ⅰ）和系统（Ⅱ）；只要要素结构合理，就可以构成性能更为良好的系统，如系统（Ⅱ）的整体功能就优于系统（Ⅰ）的整体功能（节约38%的时间）。

如果让每个要素的功能都优于原来的要素功能，譬如，淘米时用力搓搅，洗菜时用大水冲漂，烧水、煮饭、炒菜时将炉火加旺等，使得每个“新”要素的功能都比每个“原”要素的功能减少1分钟。用这样的“新”要素按系统（Ⅰ）的串行方式结构起来成为另一个新系统（Ⅲ）。这样准备好一顿饭菜就需要36分钟，仍不优于系统（Ⅱ）。

可见，即使每个要素皆优，但若是结构不合理，这样构成的系统（如系统（Ⅲ）），其整体功能也可能不优于每个要素皆较差但结构合理的系统（如系统（Ⅱ））。

这些例子说明：一个系统要能发挥其最优的功能或效益，那么在构造这个系统时，必须注意两点。