

系统工程

(修订版)

理论与方法

肖艳玲 编著
孙彦彬 主审

石油工业出版社

前 言

系统工程是对所有系统都具有普遍指导意义的科学理论和方法。随着科学技术的进步和社会经济的发展,事物之间的相互联系日益加强,整个世界向复杂性不断增加的方向发展,使得用“整体”的概念和“系统”的方法来处理复杂性问题变得越来越重要。因此该书对促进人们的科学思维和实践具有重要作用。

本书是作为大庆石油学院“九五”重点建设教材进行修订再版的。它系统阐述了系统工程的主要理论和方法,用实例介绍了相关理论和各类方法在实际中的应用,理论联系实际,使读者能很快理解,并力图作到详略得当。例如在概念叙述上作到了准确和详细,在举例时则尽量作到凝练简洁,对有些定理只给出了定理叙述,证明从略,以便给学生留有补充和思考的余地。

系统工程内容极为广博。编写时力图涵盖工程学的最新内容,将新近出现的灰色系统理论在系统工程理论与框架中加以介绍。与上一版比较,新版增编了“系统思想”“系统理论及其学派”,使读者了解系统工程基础理论的整体情况与发展。对系统环境分析、系统综合评价方法进行了全面改写,其余章节也进行了一定的修改和补充。另外在每章后均增写和选编了习题,以便于自学和复习。

大庆石油学院孙彦彬教授担任本书的主审,审阅了书稿,并提出了很好的修订意见,使得该书的体系和内容更加科学与合理。石油工业出版社的闫熙照同志对于本书的出版给予了大力支持。邵强、孙玉甫、郭喜江等同志对本书的修订提出了不少宝贵建议。另外,本书的编写参考了大量国内外的图书和文献。在此,我向提供意见和建议的专家学者和有助于本书出版的人员,以及所有参考文献的作者表示衷心的感谢。

由于书中很多内容现在正处于研究与发展阶段，也由于编者的水平所限，难免存在错漏之处，敬请读者和同事们批评指正。

编 者

2001 年 6 月

目 录

第一章 系统与系统工程	(1)
第一节 系统的基本概念.....	(1)
第二节 系统思想.....	(12)
第三节 系统工程的形成与发展.....	(16)
第四节 系统工程方法简介.....	(21)
第五节 系统工程在油田企业中的应用.....	(34)
思考题与习题.....	(40)
第二章 系统分析	(42)
第一节 系统分析的基本概念.....	(42)
第二节 系统环境分析.....	(57)
第三节 系统目标分析.....	(66)
第四节 系统结构分析.....	(74)
思考题与习题.....	(82)
第三章 系统评价	(84)
第一节 系统评价概述.....	(84)
第二节 系统评价方法.....	(88)
第三节 模糊评价法.....	(101)
第四节 系统层次分析法.....	(106)
思考题与习题.....	(124)
第四章 系统决策	(127)
第一节 系统决策概述.....	(127)
第二节 确定型、风险型和完全不确定型决策.....	(134)
第三节 补充完全信息和不完全信息的决策.....	(142)
第四节 效用理论.....	(151)
第五节 风险分析.....	(161)

第六节 马尔科夫决策·····	(170)
第七节 对策性决策·····	(179)
思考题与习题·····	(189)
第五章 系统模型 ·····	(192)
第一节 系统模型概述·····	(192)
第二节 解释结构模型·····	(196)
第三节 模拟模型·····	(220)
第四节 投入产出模型·····	(231)
思考题与习题·····	(247)
第六章 灰色系统 ·····	(250)
第一节 灰色系统的关联分析·····	(251)
第二节 灰色系统预测·····	(268)
思考题与习题·····	(278)
第七章 系统理论及其学派 ·····	(280)
第一节 系统理论的基本内容·····	(280)
第二节 系统理论学派及未来发展·····	(285)
思考题与习题·····	(294)
参考文献 ·····	(295)

第一章 系统与系统工程

第一节 系统的概念

一、系统的含义及其有关概念

目前，系统（System）的概念已经普及到一切学科领域，并已渗透到日常的思维、言谈和一般性的宣传之中。系统是客观存在的，可谓处处有系统，处处是系统。但是人们对系统的认识有一个发展过程，如果要追溯它的由来，无论在中国或者在西方都很早就出现了，它几乎同哲学一样古老。

随着科学技术的发展，系统被赋予进一步的含义。按照韦氏大辞典（Webster 大辞典），对系统的解释是：系统是有组织的或组织化了的总体；是构成总体的各种概念、各种原理的综合；是以有规则的相互作用或相互依赖的形式结合起来的对象的集合。在日本工业标准（JIS）中，系统的含义是“多数构成要素保持有机的秩序，向同一目的行动的事物。”国内外关于系统的定义有几十种，系统的确切定义依学科不同、使用方法不同和解决的问题不同而有所区别。

综上所述，一般定义如下：“系统是由两个或两个以上相互区别、相互依赖和相互制约的单元（或要素、组成部分）有机结合起来的具有特定功能的有机整体。”

系统的一般定义具有概括性和抽象性。一个系统具有什么组成部分，它们是如何关联和制约的，具有什么功能，只有对具体实际系统才能具体化。如一个公司、一项计划、一个工程项目、一项任务、一台设备等都是一个系统。系统没有一个绝对的规模

界限。许多子系统可以组成一个系统，许多系统可以组成一个大系统，许多大系统又可组成一个更大系统，系统是无限可分、无限包含的。

对我们所要研究的特定系统来说，系统内部相互作用的基本组成部分称为要素，它是完成系统某种功能无须再细分的最小单元。系统要素是根据系统的目的及所应具备的功能确定的。所以，系统是一个相对概念，系统要素一定是相对的，它分解到何种程度取决于系统的目的和应具备的功能。

系统的要素及其联系称为系统结构。系统结构是系统要素在时间与空间上有机联系与相互作用的方式或秩序，是决定系统功能的内因，是为功能服务的。系统组成部分相互关联、制约和作用，是通过物质、能量和信息形式实现的。具有相同组成部分的系统，由于它们的制约、作用关系不同而具有不同的系统功能。比如固态的冰、液态的水、气态的水蒸气，虽然都是氢二氧一所组成，但它们的宏观性质却大不相同。尤其值得指出的是，它们都具有其组成部分所没有的特性和功能，改变系统组成部分或改变相互关联、制约、作用关系可以改变系统功能，从而使系统具有我们所希望的功能。这就是控制论、运筹学、系统学的基本思想，也是系统工程应用的基本目的。

与系统及系统要素相关联的其他外部要素的集合称为系统环境。系统与系统环境的分界称为系统边界。我们研究具体系统时，必须把系统与环境划分开来，系统边界的划分要从要素分析开始，而系统的要素又是由系统的目的和功能决定的。

系统每时刻所处的情况称为系统状态，系统状态随时间的变化称为系统行为。系统对其环境的作用叫系统输出，环境对系统的作用叫系统输入。

系统结构和系统环境决定了系统功能。环境对系统的需求，主要是功能需求，而不是系统结构本身。系统丧失功能也就丧失了其存在的价值。系统功能是通过系统输入——输出关系表现出来的。即作为一个系统，一般具有将某种输入经过处理产生某种

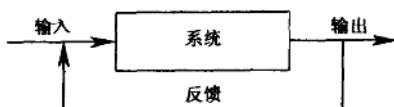


图 1-1 系统功能图

输出的特定功能，如图 1-1 所示。

输入通过系统转化为输出，输出的结果在环境中产生信息又反馈给输入，以调节输入使输出达到要求。比如生产系统是人、机、料、法的输入，经过加工转换，得到产品、利润和服务的输出；企业管理系统输入的是企业决策、计划等信息，经过指挥、执行等职能，并通过反馈控制，输出的是经营所期望的结果。

二、系统的分类

系统是无所不在、无所不包的。我们身体内部有血液循环系统、消化系统等；父母、兄弟姐妹构成家庭，众多的家庭组成了社会，由于人们在社会中的地位不同，形成了阶层、政党；人们从事不同的劳动，构成了不同的部门、企业，这些都是社会系统。我们接触的人，有的来自于石油系统，有的来自于化工系统，都属于工业系统。我们出门坐车，处于交通系统之中；到班上工作，又投身于服务系统或生产系统之中……。所以，可以说，一切都包含在某个系统之中，某个系统又属于一个更大的系统。上面所述，都是系统的具体形式，有必要对系统存在的各种形态加以分类。

1. 按系统要素的来源分

(1) 自然系统——由“自然物”（物质或客观规律）所形成的系统。如矿藏系统、生物圈等，又如各种社会规律和自然规

律，它们是客观世界在发展过程中已经存在的系统。

(2) 人工系统——人工生成的系统。它是人类为达到某种目的而建造的，即系统功能之所以存在，就是为了完成系统的特定目的，例如自行车、学校、工厂等。人类通过对自然现象和社会现象的科学认识，用人工方法研制出来的科学体系和技术体系，都是人工系统。

(3) 自然和人工的复合系统——系统中有些要素是自然形成的，有些要素是人工形成的。这类系统往往是人类在改造客观世界的过程中对自然系统加以改造而形成的。例如农业系统、地震预报系统、采油系统等。

2. 按系统要素的属性分

(1) 实体系统（硬性系统）——以矿物、生物、能量、机械、人类等实体的、物理方面的存在物为组成部分的系统，如人机系统、机械系统等。

(2) 概念系统（软性系统）——以概念、原理、原则、法则、制度、方法、步骤等非物理方面的存在物为组成部分的系统，例如一本书、科学技术体系、社会意识形态等。

(3) 实体与概念的复合系统——由物质实体和非物质实体组成的系统，如企业系统、管理系统等。实际上实体系统与概念系统是不能决然分开的，实体系统是概念系统的物质基础，概念系统是为实体系统提供指导和服务的。只有把实体系统与概念系统结合起来，人工系统才能得以建立和不断完善。

3. 按系统与环境的关系分

(1) 开放系统——系统与外部环境有交换关系的系统。例如一个教育系统与社会有物质、能量、信息的交换。

(2) 封闭系统——系统与外部环境无交换关系的系统。封闭系统只在系统内部结构中交流物质、能量及信息。由绝热材料包围的封闭气缸中的气体可以近似地认为是封闭系统。

若设 S 表示系统， E 表示外部环境， R 表示相互有关系， $\bar{R}$ 表示相互无关系，则当 SRE 或 ERS 时， S 称为开放系统，

如图 1-2 (a)。当 $S\bar{R}E$ 或 $E\bar{R}S$ 时, S 称为封闭系统, 如图 1-2 (b)。

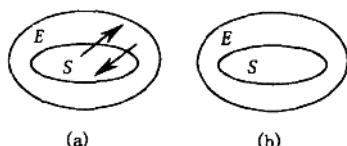


图 1-2 开放系统与封闭系统示意图

绝大多数系统属于开放系统。由于事物总是运动变化的, 没有不与外部环境发生任何联系的系统。不过在

一定的时间内不依赖于外部而且具有稳定运行能力的系统, 就可以近似看做是一个封闭系统。总之, 开放系统是绝对的, 封闭系统是相对的。

4. 按系统的状态随时间的变化与否分

(1) 静态系统——系统状态参数不随时间变化的系统, 如没有运行的仪器设备。

(2) 动态系统——系统状态参数随时间变化的系统, 如生产系统、社会系统等。

由于宇宙间一切事物都处于不断变化之中, 因此不存在真正的静态系统。然而有时为了研究上的方便, 人们把随时间变化极慢的系统, 即惯性很大的系统, 近似地看做是静态系统。

5. 按人对系统的认识程度分

(1) 黑系统——指人们当前对其要素和结构还一无所知的系统。

(2) 白系统——指人们对其要素和结构已知道得很清楚的系统。

(3) 灰系统——指人们对其要素和结构的认识若明若暗的系统。

从认识论的角度看, 黑系统向白系统的转化是在认识过程中实现的。

除上述分类以外, 还可从其他角度把系统分为控制系统、行为系统、目的系统、对象系统等等, 我们在此就不多加阐述了。

系统以不同形态存在于自然界和人类社会之中, 而且现实中

运行的系统往往都是几种系统形态的结合体，如图 1-3。我们认为，尽管系统形态种类繁多，但起主导作用而且大量存在的是由实体系统和概念系统相结合而构成的人造复合系统。在分析设计具体系统（比如一个企业）时，必须从设定的目的出发，选择对应的对象系统，并根据对象系统的特点和要求，建立其静态实体系统，辅以相应的计划、制度、程序和管理，从而使之转化为动态系统，生产出产品，并在销售系统的组织计划活动中，实现系统的目的。从上述分析可以看出：从设定目的到最后实现系统目的，是建立实体系统和概念系统的过程，又是两者顺次结合走向实现系统目的的过程。

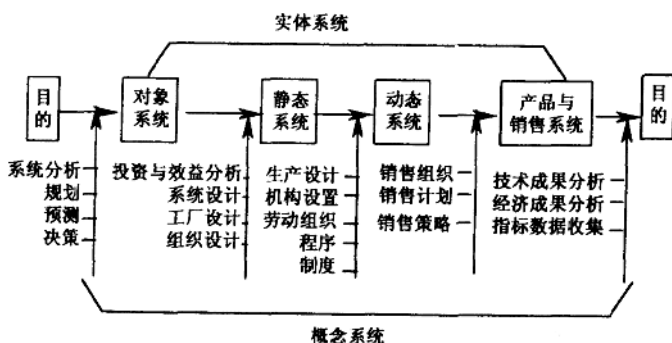


图 1-3 几种系统形态的结合

另外，应当指出的是，自然界中还存在各种黑系统，或者说潜在系统，它们需要我们去研究，人们对系统的认识并没有结束，系统的概念还在发展之中。这在讨论系统概念时必须给予注意。

三、系统的特征

系统的特征，是从各种具体的系统中抽象出来的系统的共

性。明确系统的特征是我们正确认识系统的关键。作为一个系统，一般具备五大特征。

1. 目的性

通常系统都具有某种目的。人工系统的目的是完成某种特定功能，比如，经过改造的自然农田系统，目的是为了发展农业生产，增加粮食产量；一个技术系统的目的可能是实现某种技术要求，达到给定的性能、经济和进度指标。但明确系统的目的并非易事，必须经过严格的论证，并要求提出科学的书面报告。

系统的目的一般用更具体的目标来表达。即系统目的是由系统各组成部分的目标共同作用的结果。表示为：

$$G = \{g_j / g_j \in G, j = 1, 2, \dots, m\}$$

式中 G ——系统总目标；

g_j ——系统分目标；

m ——分目标个数。

应当指出的是，人工系统必须具有目的性，否则系统不应存在。比如有的工程项目刚刚“上马”就“下马”了，主要原因就是“盲目上马”。要实现系统目的，一般要制定具体目标，在完成系统总目的的要求下，首先制定总目标及总功能，并层层分解，落实到各基层组织，明确责任和岗位，通过同时或顺次完成一系列任务来达到系统功能，以确保系统目的的最终实现。另外，分目标之间可能是矛盾的，要注意整体平衡与协调。比如设计一个工厂，它的分目标可能有“基建费最低”、“运行费最小”、“可靠性最大”，等等。显然，较低的基建投资往往导致较高的运行费，较高的安全可靠标准将使基建费和运行维修费都增加。一般地说，系统都有相互矛盾的分目标，因此采取某种形式的折衷是必要的。即要获得全局最佳结果，就要在矛盾的目标之间根据贡献大小寻找一个折衷方案。

2. 整体性

系统是由相互联系的各个部分组成的有机整体，它作为一个整体面貌存在于特定的环境之中。整体性与辩证法把事物看做是

各个对象相互联系的统一整体的观点是一致的。系统的整体性可以从以下几方面来理解：

首先，系统是一个集合。是一个由两个或两个以上的相互区别的要素结合而成，其中的要素可以是实体的，也可以是非实体的。可表示为

$$X = \{x_i / x_i \in X, i = 1, 2, \dots, n, n \geq 2\}$$

式中 X ——集合；

x_i ——集合的组成要素；

n ——要素的个数。

比如，一个简单的生产系统的集合可表达为：

简单的生产系统 $X = \{\text{机械设备 } x_1, \text{原材料 } x_2, \text{操作者 } x_3, \text{计划 } x_4, \text{利润 } x_5, \text{成本 } x_6, \text{核算 } x_7\}$ 。

其中机械设备、原材料、操作者是实体要素；计划、利润、成本、核算是非实体要素。两类要素相辅相承，而且人的要素是不可忽视的。

其次，系统整体联系的统一性。在系统中各个要素对整体的影响不是独立的，而是依赖于其他若干要素的协同作用。也就是说，系统要素的性质和行为并非独立地影响系统整体的功能或特征，而是相互影响、相互协调地来适应系统整体的要求，实现系统的功能。比如，从我国石油企业系统结构的现状来看，直接从事原油生产的采油厂，它不是完全意义上的独立结构，而仅仅是中国石油天然气股份有限公司下属的分公司中的一个子系统。长期以来，采油厂受内部和外部多种因素的影响和制约，系统的内部结构不够合理，子系统协同不佳，因而整体的力量得不到发挥。要解决这些问题，就必须从整体的目标出发，统筹兼顾，并注意提高内部诸要素的素质和功能，以谋求整体优化。

第三，系统功能的非加和性。系统要素相互区别、相互作用构成了整体，而整体具有部分集合所没有的特性和功能。即整体功能不等于各部分功能之和，这是系统的主要特性之一。构成系统的要素不一定都很完善，但可以构成性能良好的整体。反之，

即使每个要素是良好的，但组成的整体不一定具有良好整体功能，也就不能称为完善的系统。

由此可知，系统之所以产生整体性或新质，是因为系统的各个组成部分和联系服从系统的目的和要求，并形成一种协同作用。只有通过协同作用，系统的整体功能才能显现。

3. 相关性

系统的各个组成部分是相互联系和制约的，这是系统内部的相关性，如图 1-4 所示。用数学表达如下：

若 $x_i \in X_i \subset X$

$x_j \in X_j \subset X$

则 $x_i R x_j$ or $x_j R x_i$

系统中某一要素变化，就意味着其他要素也要作相应的调整和改变。因此，从这个意义上看，系统也可表示为要素和关系的二元组：

$$S = \{X/R\}$$

比如，石油工业是一个庞

大的综合性工业系统。它包括石油勘探、油田开发设计、钻井、油田地面建设、采油、加工、储运等多个层次的子系统，每个子系统又是由一系列生产环节组成，按时间划分的阶段性十分明显，阶段的衔接存在着先后顺序。除主要生产过程之外，还有供水、供电、机修、通讯、供应等辅助生产。从生产的空间分布看，各生产部门、各生产环节之间又相互交错、相互制约。譬如，采油厂要增加产能，提高油气产量，获取更大的经济效益，就必须依靠勘探、钻井、试采、油建、井下作业等系统的有机协作。

系统与环境之间也具有相关性。我们知道，系统的生存与运行几乎都要从外界环境输入，并向外界环境输出，输入与输出把系统要素与环境要素连接起来，并可能形成反馈作用，随着时间的延长，就会促进或严重影响其他系统的生存和发展。

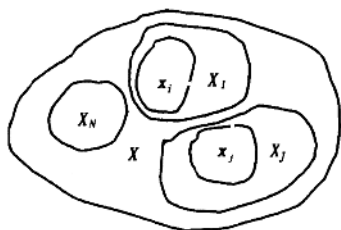


图 1-4 相关性示意图

系统工程的主要目的之一，就是找出一些反馈循环，把恶性循环消灭在初始阶段，同时促进良性循环的发展。

4. 层次性

由于客观事物的复杂性，使系统具有多层次结构。即系统从横向分解为若干子系统，每个子系统从纵向又可层层分解下去，分解为若干层次的子系统，最后层次为要素。要素是完成系统功能的最小单元。这种分解的基本标志是目标，一系列的目标要求产生一系列分系统。系统、分系统和系统要素构成了层次结构，表示为图 1-5。在层次图的底部，通常是一些结构和功能相对简单的子系统，越往上越复杂，占据顶层的则是结构和功能相当复杂的系统。对于中间层次的系统来说，它既是独立的，又与上下层系统有着密切的联系。相对上层，它处于被支配和被控制的地位；相对下层，它处于支配和控制地位。

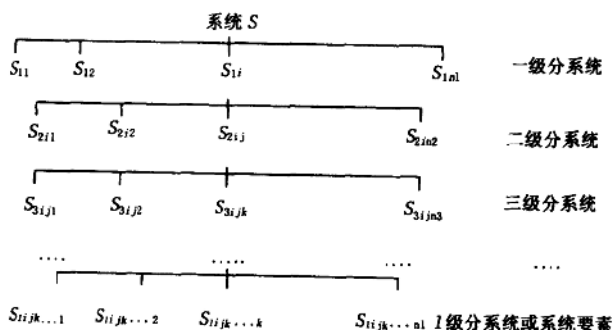


图 1-5 系统层次图

系统的层次性体现了系统目标逐级具体化和系统要素在系统结构中的位置和隶属关系。比如，采油厂作为大型复杂的系统，其内部包含很多层次，从组织角度可分为大队（厂矿）、小队（车间）、班组；从生产过程可分为联合站、中转站、计量间、

单井；从管理层次上可分为决策层、执行层、操作层。系统的层次性，要求我们在实际工作中，必须注意健全和维护系统秩序，根据各个层次的特性和不同需要，采取相应的管理方法，提出不同的管理目标、健全各个层次的管理制度，使各系统和各层次做到密切协作、有机结合、高效运转，并合理安排管理幅度，注意目标、标准和制度的配套。

5. 环境适应性

系统适应外部环境的变化，以获取生存和发展能力的性质，就是系统的环境适应性。系统与环境的作用是相互的。一方面，系统不能脱离环境而存在。系统存在于环境之中，外界环境通过与系统进行物质、能量、信息的交换，而对系统产生影响，使系统结构发生振荡。当环境变化超过了系统承受能力时，系统将解体，被新的适应环境要求的系统所代替。只有系统与环境保持最佳适应状态，才能对环境作出尽可能大的贡献。另一方面，系统又可以通过输出对环境施加影响，如人类不仅能够适应自然环境，还能够利用和改造自然环境，使其满足人类的需求。

为了使系统不断适应变化了的环境，需要不断调整系统的内部结构。

比如一个采油厂，其主要产品是石油和天然气，而石油和天然气的生产客观上受众多自然条件和社会经济条件的影响和制约。在原油生产过程中，由于油气层中的油气量及许多相关因素在不断变化，许多技术参数也在不断变化，此时开采工艺，包括注水、压裂、净化脱水、集输以及设施装备等也必须随之不断地变换和调整，否则，会由于石油储备量品位不断降低，地层压力的下降，而导致油井产量减少，油井提前报废。同时，采油厂作为相对独立的经济实体，它的系统功效常因外部社会经济环境的变化而呈现不稳定状态。如国际石油价格的涨落、国家经济政策的调整、石油产品供求关系的变化等都对采油厂有重大影响。因此要求石油企业必须加速系统内部诸要素的优化，不断提高自身素质，强化控制、反馈和调节能力，不断灵活创新，以适应环境

的变化。

上述系统的五个基本特征，是处理系统问题时，应具备的主要观点。即从总体目标出发着眼长远、整体优化的观点；从系统的内在联系分析问题的观点；考虑系统结构层次性的观点；考虑外界条件变化，使系统适应环境的观点等。在系统分析、设计、评价、决策时，这些基本观点是第一位的。离开这些基本观点，将会导致错误的结果。

第二节 系统思想

一、系统思想的形成与发展

“系统”的概念及系统思想来源于人类长期的社会实践，是人类社会实践的科学总结。从古代系统思想到辩证系统思想的演变经历了相当漫长的历史进程，其大致分为三个阶段。

1. 古代朴素的系统思想

人类很早就已经有了“系统”的概念和系统思想的萌芽，这主要体现在对整体、组织、结构、等级的认识。如我国古代天文学家为发展农牧业，很早就关心天象的变化，把宇宙看做一个整体，探讨它的结构、变化和发展，揭示了天体运动与季节变化的联系，编制出了历法和指导农事活动的二十四节气。古代朴素的系统思想还在古代哲学中得到反映。我国春秋末期的思想家老子就强调自然界的统一性。古希腊卓越的哲学家德谟克利特（Democritus）说过“世界是包含一切的整体”。古希腊著名学者亚里士多德（Aristoteles）进一步发展了朴素的系统思想，提出“整体大于各部分的总和”的思想。他以房屋为例，说明一所房屋并不等于砖瓦、木料等建筑材料的总和，指出“由此看来，很清楚，你有了各个部分，但还没有形成整体，所以各个部分单独在一起和整体并不是一回事。”亚里士多德的这一思想后来成为一般系统论的主要观点之一。