

X S J D N X X L J C

新世纪大农学系列教程

主编/ 官春云
主审/ 袁隆平

农业系统工程学

NONGYE XITONG GONGCHENGXUE

编著/ 陈金湘



湖南科学技术出版社

Hunan Science & Technology Press

X S J D N X X L J C

新世纪大农学系列教程

主编/官春云

主审/袁隆平

农业系统工程学

NONGYE XITONG GONGCHENGXUE

编著 / 陈金湘



湖南科学技术出版社

Hunan Science & Technology Press

新世纪大农学系列教程

农业系统工程学

主 编:官春云

主 审:袁隆平

编 著:陈金湘

责任编辑:陈澧晖

出版发行:湖南科学技术出版社

社 址:长沙市湘雅路 280 号

印 刷:湖南农科院印刷厂

(印装质量问题请直接与本厂联系)

厂 址:芙蓉区马坡岭农科院内

邮 编:410125

出版日期:2001 年 8 月第 1 版第 1 次

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:18.5

字 数:469000

书 号:ISBN 7-5357-3249-6/S·430

定 价:28.00 元

(版权所有·翻印必究)

前 言

农业是国家的基础行业,进入 21 世纪,农业与各行各业的联系日益紧密,人们所面临的农业系统越来越庞大,越来越复杂,一些大系统、复杂系统乃至巨系统出现在我们面前。面对这些系统,传统的农业思想与方法已显得束手无策,而兴起于 20 世纪末的农业系统工程,在系统科学思想的指导下,运用现代农业生物技术方法、现代工程数学方法和工业上比较成熟的系统工程技术,伴随着计算机科学的发展,成为了从根本上解决农业系统问题的指导思想和有效武器。因此,农业系统工程作为解决农业的宏观问题和具体的工程技术问题的科学工具,已引起了农业及其与此相关行业的决策者、管理者、科学工作者、经济工作者,推广人员的广泛兴趣和空前重视。为此,本人集十多年的科研实践和教学体会,编著了本书,供读者参阅。

本书是 21 世纪大农学系列教程之一,既可作为高等农林院校各理科类专业本科生的教材,亦可作为农业技术人员、农业经济师、农业管理与决策人员的工作手册与指南,还可作为大农学专业研究生的参考书和教材。书中的思想方法与具体工程技术,也许还可用来解决读者所面临的农业系统以外的其他问题。

全书共分十二章,第一章系统概述,第二章系统工程概述,第三章农业系统与农业系统工程概论,第四章农业系统分析,第五章系统预测,第六章线性规划,第七章整数规划,第八章网络计划技术,第九章决策,第十章系统模型与仿真,第十一章农业系统最优设计,第十二章农业系统工程应用实例。书中第八章由黄进编写,第十章由陈炉山编写,其余各章节均由陈金湘执笔完成。在本书的编著过程中,得到了湖南省农村工作部陈吉芳副部长,黄永明高级经济师的大力支持和关心,特别是刘海荷推广研究员对本书稿样的编录与校对,做了大量艰苦细致的工作,在此,谨表衷心的感谢。

由于时间仓促,作者水平有限,书中难免存在许多缺点和错误,恳请读者指正。

编者

2001 年 7 月

目 录

第一章 系统概述.....	(1)
第一节 系统的概念.....	(1)
第二节 系统分类.....	(4)
第三节 系统的结构与功能.....	(6)
第四节 系统科学理论简介.....	(7)
第二章 系统工程概述	(11)
第一节 系统工程的定义	(11)
第二节 系统工程的形成与发展	(12)
第三节 系统工程的主要特点	(14)
第四节 系统工程的内容体系	(15)
第五节 系统工程方法论	(15)
第六节 系统工程人才培养	(19)
第三章 农业系统与农业系统工程概论	(21)
第一节 农业系统	(21)
第二节 农业系统工程	(25)
第四章 农业系统分析	(30)
第一节 农业系统分析概述	(30)
第二节 系统定性分析方法	(35)
第三节 目标价值分析	(40)
第四节 农业系统的技术经济分析	(49)
第五章 系统预测	(54)
第一节 系统预测概述	(54)
第二节 定性预测方法	(56)
第三节 平滑预测法	(60)
第四节 回归分析预测法	(66)
第五节 马尔柯夫预测技术	(99)
第六节 灰色系统预测.....	(104)
第六章 线性规划.....	(112)
第一节 线性规划问题及其数学模型.....	(112)
第二节 线性规划问题的几何意义.....	(120)
第三节 解线性规划问题的单纯形法.....	(123)
第四节 单纯形法的计算步骤.....	(132)
第五节 单纯形法的进一步讨论.....	(135)
第六节 应用实例.....	(140)

第七章 整数规划	(152)
第一节 整数规划问题的提出	(152)
第二节 分支定界解法	(153)
第三节 割平面解法	(155)
第四节 0—1 型整数规划	(160)
第五节 指派问题	(164)
第八章 网络计划技术	(169)
第一节 网络图的组成及绘制	(169)
第二节 网络图的参数与计算	(175)
第三节 网络图的调整与优化	(182)
第四节 网络图的时间—费用分析与优化	(185)
第九章 决策论	(191)
第一节 决策概述	(191)
第二节 确定情况下的决策	(195)
第三节 风险情况下的决策	(196)
第四节 不确定情况下的决策	(206)
第五节 系统决策者与系统工程师	(210)
第十章 系统模型与仿真	(214)
第一节 系统模型概述	(214)
第二节 系统模型的分类	(215)
第三节 系统建模方法学	(217)
第四节 系统动态仿真概述	(219)
第五节 系统动态仿真技术	(221)
第十一章 农业系统最优设计	(238)
第一节 回归试验设计及其应用概述	(238)
第二节 一次回归正交设计	(239)
第三节 二次回归正交设计	(244)
第四节 二次回归旋转组合设计	(249)
第五节 回归设计试验结果的系统分析与应用	(261)
第六节 最优设计	(266)
第十二章 农业系统工程应用实例	(281)
第一节 湖南棉花规范化栽培技术研究实例	(281)
第二节 作物施肥计算机专家系统研究实例	(285)
第三节 洞庭湖治理问题的研究实例	(288)
参考文献	(292)

第一章 系统概述

第一节 系统的概念

一、系统的定义

系统(System)是人类认知对象的划分。系统概念来源于人类长期的社会实践。系统存在于自然界、人类社会以及人类思维、概念描述的各个领域。自然界中的银河系、太阳系、植物群、动物群、微生物群、植物的光合系统、呼吸系统等,人类社会中的国家、民族、城市、村镇、学校、医院等,人类思维中的概念、制度、思想体系、法律、法规、工程计划、研究项目等等。分析起来,它们都是由有一定结构、相互作用的若干部分(元素)结合而成的统一体,它们具有特定的功能或目的,它们都作为一个整体而存在。在人们的日常生活中、认识实践过程中,系统一词被广泛应用。因此,有必要给出一个较为完整、统一的科学定义。

钱学森认为:所谓系统,是相互依存、相互作用的若干元素结合而成的具有特定功能的综合体。

这一表述说明了系统的三个基本特征:第一,系统是由若干元素组成的;第二,这些元素是相互作用、相互依存的;第三,由于元素间的相互作用,使系统作为一个整体而具有特定的功能。

在美国的《韦氏(Webster)大辞典》中,“系统”一词被解释为“有组织的或被组织化的整体;结合着的整体所形成的各种概念和原理的结合;由有规则的相互作用、相互依存的形式组成的诸要素集合”。在日本的JIS标准中,“系统”被定义为“许多组成要素保持有机的秩序向同一目的行动的集合”。前苏联《大百科全书》中定义“系统”为“一些在相互关联与联系之下的要素组成的集合,形成了一定的整体性、统一性”。以上描述,都以不同方式体现了系统的三个基本特征。

系统工程研究的对象是系统。某种特定的系统,通常是自然科学和社会科学某一学科的研究对象。例如太阳系由天文学研究,生态系统由生态学和生物学研究,植物及植物群由植物学研究,动物及动物群由动物学研究,社会制度由历史学和社会学研究等等。

二、系统的属性

从系统工程的研究出发,由系统的定义可知,系统一般具有以下几个主要属性:

(一) 整体性

系统的整体性是系统概念的精髓。系统的整体性说明,具有独立功能的系统要素,以及要素间的相互关系是根据逻辑统一性的要求,协调存在于系统整体之中。研究一个系统,首先必须明确它作为一个总体或整体所体现的目的与功能。系统的任何组成元素或环节都不能离开

总体去研究,局部的问题必须放在全局中才能有效地解决。元素的功能和元素之间的关系都必须服从总体的目的,它们共同实现系统总体的功能。在一个系统整体中,即使每个要素并不都很完善,但它们也可以协调、综合成为具有良好功能的系统。相反,即使每个要素都是良好的,但作为整体却不具某种良好的功能,也就不能称之为完善的系统。在农作物生产中,某一作物一整套的栽培技术,即使其中的单项技术都很好,甚至是最优的,但整体效果往往不是最优的,甚至是令人不满意的。在对某个作物进行施肥试验时,如果我们进行的是单因子试验,即使可以确定单个肥料因子的最佳施肥量,而一旦将这些单个的最优值组合在一起,其综合效果,也就是说整体功能并不能达到最优,作物仍难以获得最高经济产量和最大收益。因而在肥料试验中,往往需进行多因子综合试验以获得较好的整体效果,使各因子之间相互协调,综合成为最优整体。又如我们在研究棉花棉铃虫的为害时,必须把棉铃虫放到棉田害虫群体和棉田植株群体中去进行研究和观察,而一旦将棉铃虫从棉田里分离出来,放在实验室或大田隔离网内进行观察和研究,其为害行为就不能代表自然状态下棉铃虫为害的整体行为,或是为害加重,或是为害减轻。

(二) 集成性

系统的集成性,是指组成系统的元素(或部分,或元件,或环节)至少有两个,并按一定的层次、一定的秩序、一定的关系有机地结合在一起。显然,单个元素不能叫系统,混沌也不能称之为系统。比如,一辆结构完整的自行车,如果将其零部件拆卸下来,随意地堆成一堆,尽管元件依旧,但已不是一个完整的系统了。又如在农作物生产中,一块农田,构成一个农田生态系统,如果不按比例、不按秩序和结构而杂乱无章地混播几种不同类型的作物,那么农田生态系统就会失去其功能,农田就会变为荒芜的土地,结构有序的农田生态系统不复存在,混沌导致颗粒无收。因此,系统的集成性,不是简单的集合性,而是两个以上元素的有序的结构性。例如,良好的农田生态系统体现了系统的集成性,农田生态系统包含有旱土和水田,水田是由田埂、田块和排灌沟渠组成。在农田中人们种植作物,但也天然生长着一些杂草,还有一些地块没有被作物完全覆盖,形成株间空地和行间空地,当然还有一些其他农田生物。而在农田中的作物种类很多,种植方式也不一样,有间作、套作等形式的立体种植结构,也有作物间的轮作换茬等等,如图 1-1 所示。

高效农田生态系统,表现为层次分明,结构合理,各元素之间相互协调,系统目的性强,功能良好。

(三) 相关性

一个系统,自然系统或人工系统各元素与整体、元素与元素之间总是以一定的关系相互依存,相互制约,有机联系在一起的,我们把这种现象称之为相关性。系统内部、系统与环境之间某种要素发生了变化,必须影响其他要素和其他方面也要相应地改变和调整。系统各元素之间的关系,不是机械论中的简单叠加关系,也不是简单的线性因果关系。即系统与元素之间不全是 $1+1=2$,也可能是 $1+1\geq 2$,还可能是 $1+1\leq 2$,一个因素与另一个因素之间也不会简单地表现为 $y=a+bx$ 的直线相关。

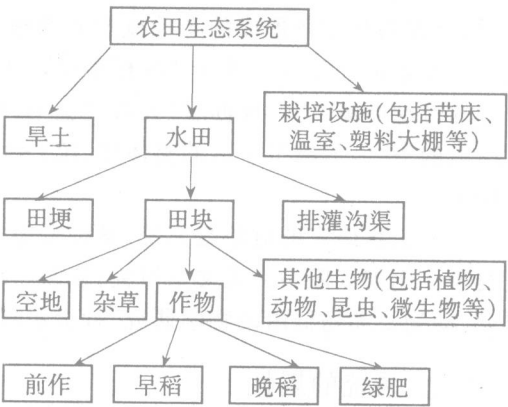


图 1-1 农田生态系统的结构图

相关性在植物系统发育和生长分化中,表现出有正相关和负相关。在植物生理方面,植物的顶端优势表现在顶芽形成后,可以产生激素,抑制下部芽的生长,以保持顶端的生长优势。如果去掉顶芽,则其下部相邻部分又可长芽。所以生产上给作物去顶芽,正好去掉了顶端优势,使它下面的芽长得更快。顶芽去掉,侧芽生长加快,这种现象就是植物系统发育的相关性。去叶枝也是这样,去掉一个叶枝,其他叶枝可能长得更快些。如棉花植株表皮组织分化成的气孔、叶毛细胞都有一定的距离,这也是一种相关性,称为位置效应。这里有两种学说,一种认为形成一个气孔后把周围营养物质消耗掉了,因此必须隔一定的距离才能再长出另外的气孔,这是营养学说;另一种认为气孔长出之后,它即分泌一种激抗素,要经过一定的时间,激抗素才能消失,方可再长出第二个气孔。尽管有两种不同的学说,但体现的是植物系统内部的相关性。又如我们给作物施肥,如果施单一种肥料,当施用量很少时,作物增产不明显,随着施用量的增加,起初以线性相关方式增长,达到一定的施用量后,简单的线性相关没有了,出现了拐点,再增加施肥,增产停止或者开始下降,这是农田生态系统中,施肥与作物产量的相关性。如果施用的肥料种类超过一种,就有可能出现拮抗作用,相关性就变得更加复杂。人们对系统相关性的认识,采用了简单相关分析法、复相关分析法和灰色相关分析等方法。

(四) 层次性

系统是由多元素(多部分)构成的有机整体,系统总是由若干较低价的子系统(要素)所组成,任一系统本身又是更大系统的一个单元(或子系统),从而构成了系统的层次性。

如在生物科学中,从生物大分子到细胞器、细胞、组织、器官、个体、种群、群落、生态系统,这是个很典型的自然系统层次。贝塔朗菲提出宇宙是一个巨大的层次系统,密尔萨姆(T. H. Milsum)将人类系统分为 11 个层次,如图 1-2 所示。

不同层次上的系统运动具有不同的规律性,但各层次上的系统它们是相互联系、相互渗透、不可分割的,系统的层次是相对的。因此,在研究系统时,不能孤立地就系统而研究系统,必须了解系统的层次性,正确划分系统的边界,从较大的系统出发,分析联系这一系统所处的上下左右的关系。

(五) 目的性

系统的目的性指系统在向终极状态发展过程中的方向性。所有的人工系统都有很强的目的性,如教育系统是以培养人才为目的的,医疗卫生系统是以人类的健康为终极目的的,企业的经营管理系统,是以达到规定的质量和成本利润指标为目标。在自然系统中,生物的生长是以繁衍后代为终极目的,生态系统则是以维持其良好的系统平衡为终极目的。从系统的目的性可知,尽管系统的发展都是从各自不同的初始条件、不同的方式方法和不同的途径开始,但都是为了达到相同的最终状态,有人把这一特性称为系统的等终极性。

(六) 环境适应性

系统要获得生存与发展,必须适合外界环境的变化,这就是系统对于环境的适应性。不能适应环境变化的系统是没有生命力的,只有能够经常与外界环境保持最优适应状态的系统,才是具有不断发展势头的理想系统。系统必须适应环境,就像元素必须适应系统一样,因为,系统

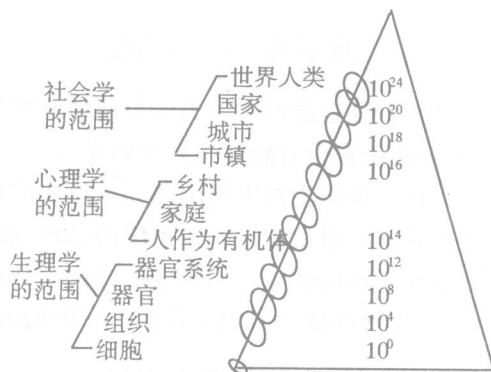


图 1-2 人类系统的层次结构

+环境=更大的系统。这就要求我们研究系统时必须放宽眼界,不但要看到整个系统本身,还要看到系统的环境或背景。只有在一定的环境中研究系统,才能有效地解决问题。

系统对于环境的适应性,主要靠反馈来实现。一个企业系统要获得成功,必须建立完善的反馈机制来适应瞬息万变的外界变化,例如市场情况、产品销路、原辅材料来源、能源供应状况等等,企业倘若不能适应这些变化,则难以生存,以致必须关、停、并或破产倒闭。

生物的进化与淘汰就是系统适应性最为典型的事实。巴甫洛夫认为“适应就是复杂系统的各个要素彼此间的精确联系以及它们整个集团与四周环境的精确联系”。生活在陆地上的植物,有坚韧的机械组织,有完善的输导系统,细胞间隙小,而渗透压一般都很高,有利于水分的吸收,以适应陆地环境。沙漠地区生长的植物还具备了一套抗旱组织,具有高度的抗旱性。与此相反,生活在水中的植物,其机械组织很不发达,或完全缺少,没有输导组织,细胞间隙大,液胞多而大,而渗透压也很低,适应水生环境。

第二节 系统分类

自然或社会系统尽管千差万别,但也存在着千丝万缕的联系,为了对系统的性质加以研究,需要对系统进行分类。按系统的自然属性,可将系统分为自然系统与人造系统;按系统的物质属性,可将系统分为实体系统与概念系统两大类;按运动属性,可将系统分为动态系统与静态系统两大类;按系统与环境的关系来分,可将系统分为开放系统与封闭系统两类;按系统规模大小与复杂程度分,可将系统分为大系统与小系统两类。

一、自然系统与人造系统

自然系统是指没有人类参与制造而客观存在着的系统。如银河系、太阳系、海洋、原始森林等,这类系统是由自然过程产生的系统。

人造系统是指在人类的参与下形成的系统。是人们将有关元素按其属性和相互关系组合而成的系统。但是大量人造系统的出现,破坏了自然系统的平衡,造成严重的环境污染和生态系统良性循环的破坏。如长江上游的森林遭到破坏,结果导致水土流失,不仅原有的森林资源毁灭了,泥沙冲刷又淤积了长江中下游的河床,使长江中下游地区水患加重。

二、实体系统与概念系统

实体系统是指物质实体构成的系统。如建筑物、机床、计算机、农田生态系统、海洋生态系统等等。实体可以是自然系统,也可以是人造系统。

概念系统指人的大脑思维构造出来的系统。如概念、原理、原则、方法、制度、程序等,凡是由概念性的非物质实体构成的系统都叫概念系统。在实际生活中,实体系统和概念系统在多数情况下是结合的,实体系统是概念系统的物质基础。概念系统一定是人造系统。

三、动态系统和静态系统

系统的动态是绝对的,而静态则是相对的。所谓动态系统是系统的状态变量随时间变化而变化,即系统的状态变量是时间的函数。农田生态系统、动植物群落、人体呼吸和循环系统、企业系统、村、镇等等都是动态系统,这些系统处于经常变动的状态之中。而严格意义上的静态系

统是难以找到的,只是有些系统在我们考察的期间内,其内部结构参数随时间变化不大,为了研究简便起见,我们假设系统是静态的。

四、开放系统与封闭系统

开放系统是指与外界环境之间发生着物质、信息、能量等流动的系统。如果系统与环境之间不发生上述流动的,称之为封闭系统。事实上,严格意义的封闭系统是不存在的,只是为了研究问题的方便,才将一些较少的流动现象忽略不计,近似地看成为“封闭系统”。

对于开放系统而言,系统与环境的流动现象有两类:一类是由环境向系统的流动,如对植物系统而言,植物从土壤中吸收肥料和水分,从空气中接受太阳光能和吸收 CO_2 ,这种流动我们称之为系统的“输入”;另一类是由系统向环境的流动,如植物的呼吸,释放氧,根系分泌有机酸等,我们称其为系统的“输出”。开放系统是具有生命力的系统。系统的状态、系统的功能与效应,取决于系统的开放程度。众所周知,一个国家是一个巨系统,与国外的物质、能量、信息等的交往,标志着国家的开放程度,越是开放搞得越好,开放面越广,国家就越能得到快速发展。

在开放系统中,按反馈属性分,可将系统分为开环系统与闭环系统两大类。所谓反馈是指系统的输出对系统的输入产生影响的现象,我们将增强原输入作用的反馈称之为“正反馈”;将削弱原输入作用的反馈称之为“负反馈”。没有反馈的系统称之为开环系统,具有反馈的系统称之为闭环系统,如图 1-3 所示。

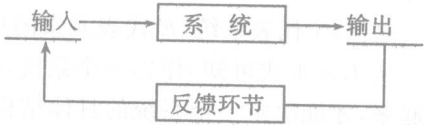


图 1-3 闭环系统

由于开放系统与封闭系统是按系统与环境的关系来划分的,因此,必须首先确定系统边

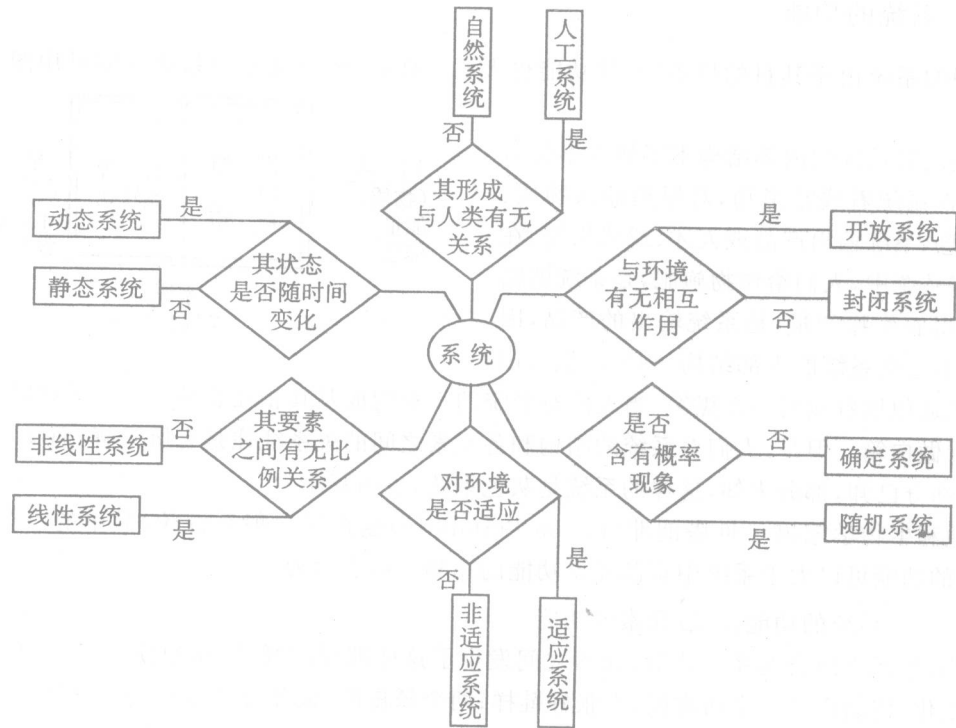


图 1-4 系统分类图

界,研究边界上物质、能量和信息的交流情况。系统边界确定之后,所有跨越边界进入系统的流动都是系统的输入,跨越边界离开系统的流动都是系统的输出。一般地说,封闭系统具有刚性的、不可贯穿的边界,而开放系统的边界具有可渗透性。对于自然系统,其边界比较容易确定,社会系统其边界的定义比较困难。系统分类的示意图见图 1-4。

第三节 系统的结构与功能

一、系统的结构

系统的结构是指系统内部各要素之间相互联系的方式和程序,是系统保持整体性并具有一定功能的内在根据。结构影响功能,功能凭借结构来完成。各种系统的具体结构是不一样的,但系统的结构从一般意义上衡量可以用以下式子表示:

$$S=\{E,R\} \tag{1.3.1}$$

这里, S 代表系统, E 代表元素的集合, R 表示元素之间的各种关系的集合。

从 1.3.1 式可知,作为一个系统,必须包括其元素的集合与元素之间关系的集合,两者结合起来,才能决定一个系统的具体结构与特定功能。如一植物群落中的一个植株,是一个生命系统,它是由根、茎、叶、枝、花、果、种子等部分构成,如果把各部分分割开来,堆成一堆,尽管器官(元素)仍然存在,但由于各部分彼此失去了联系,没有了结构,结果植株原有的功能也就不复存在了。

二、系统的功能

不同的系统由于其目的性不同,其功能也大不一样,一般意义上的系统功能可用图 1-5 表示。

当我们对系统的内部结构不了解或不明白时,我们把系统看成是黑箱,对黑箱输入物质、能量、信息,系统输出产品或人才、或成果等。在农田生态系统中,人们给作物施肥,是系统的输入,而获得农作物产量,是系统输出的产品,因此,如果不考察系统的内部结构,则可以把农田生态系统近似地看成为一个黑箱。当人们对系统的元素构成及其相互联系有透彻了解时,可以把系统看做白箱。但是,人们对系统的结构和各元素之间的关系往往是有所了解,而又不完全了解,即部分已知,部分未知,这样的系统是灰色系统,也叫灰箱。

奥地利生物学家冯·贝塔朗非(L. von Bertalanffy)创造了一般系统论,其中的一个观点是:系统的功能可以大于系统中全部元素功能的总和。即表示为:

$$\text{系统的功能} \geq \sum \text{元素的功能} \tag{1.3.2}$$

这是因为,当元素组合为系统之后,元素之间发生了这样那样的联系,从而使系统的功能发生了质的变化。俗话说,“一个巧皮匠,没张好鞋样;两个笨皮匠,彼此有商量;三个臭皮匠,赛过诸葛亮。”但是如果结构不合理,系统各元素之间适应性不好,就可能出现:

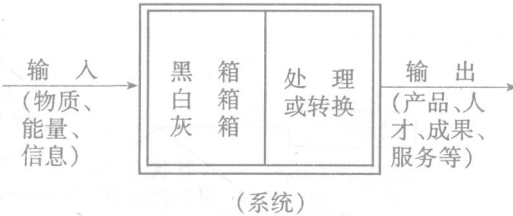


图 1-5 系统的功能

系统的功能 $\leq \sum$ 元素的功能

(1.3.3)

即所谓的“一个和尚挑水吃,两个和尚抬水吃,三个和尚没水吃”。

由此说明,系统功能的好坏,关键在于元素之间的关系,在于系统的结构。系统的功能或总体效果最优,并不要求系统的所有组成元素都孤立地达到最优。反之,系统所有组成元素都孤立地达到了最优,并不意味着一定能获得系统功能或总体效果最优。

第四节 系统科学理论简介

系统工程是建立在系统科学理论的基础上的。系统工程研究的对象是系统,系统概念是系统工程核心的与基本的概念。人类认识世界的系统观点,早在古代就开始萌芽了。我国春秋时代的思想家老子(公元前 580~前 500 年)强调自然界的统一性。孔子(公元前 551~前 479 年)在《大学》篇里,阐述国与家的关系时指出,“一家仁,一国兴仁;一家让,一国兴让;一人贪戾,一国作乱。”表明了构成国的部分或元素(家)与整个国家的关系,治国必须治家,治家必须治人的整体与局部的治国方略。南宋陈亮(公元 1143~1194 年)提出“理一分殊”思想,称“理一”为天地万物之总体,“分殊”是这个总体中每一事物的功能,试图从总体角度说明部分与总体的关系。古希腊唯物主义者德谟克利特(公元前 540~前 480 年)著了一本《宇宙大系统》。古希腊辩证法奠基人之一的赫拉克利特(公元前 460~前 370 年)在《论自然界》一书中说,“世界是包括一切的整体”。

到 19 世纪下半叶,马克思、恩格斯明确提出了系统概念和系统思想,马克思在他的著作中多次使用“系统”、“有机系统”、“系统发展为整体性”等概念。恩格斯指出,“宇宙是一个体系,是各种物质相互联系的整体。”

建立在 19 世纪自然科学成就基础上的辩证唯物主义所体现的物质世界普遍联系及其整体性的思想,就是系统科学思想。系统科学思想的出现改变了世界科学技术的发展图景和科学家的思维方式,使人们在改造自然和改造社会的进程中,逐步揭示出客观事物的本质联系和内部规律,从而到 20 世纪 20 年代,由系统思想逐渐发展形成了系统科学理论。最有影响的系统科学理论有:一般系统论(General System Theory),耗散结构理论(Dissipative Structure Theory),协同论(Synergetics Theory)。

一、一般系统论

一般系统论是由奥地利理论生物学家贝塔朗非(L. V. Bertalanffy)创立的,1925 年他提出了生物学的基本概念;1937 年在芝加哥大学查尔斯·莫莱(Charles Morry)主持的哲学研究班上首次提出一般系统论;于 1945 年公开出版了《关于一般系统》一书;1968 年贝塔朗非出版了《一般系统论:基础,发展,应用》一书,全面总结了一般系统论的基本要点。在他看来,一般系统论是一种与机械论相对立的生物学理论。贝塔朗非认为,在对有机体的认识中,机械论的错误观点主要有三个:①简单相加的观点,即把有机体分解为各个要素,并简单地相加来描述有机体的功能和属性。②“机器”观点,即把生命现象简单地比作机器,认为“动物即机器”、“人即机器”。③被动反应的观点,认为有机体只有受到刺激时才能作出反应,否则便静止不动。

贝塔朗非指出,这种机械论的观点完全不能正确解释生命现象。贝塔朗非一般系统论有以下两个明确的观点。

(一) 系统思想原则

贝塔朗非把“马克思和恩格斯的辩证法”列为一般系统论的思想来源之一。一般系统论研究系统与系统以及系统与环境之间的普遍联系,研究各类系统运动带有共同规律性的思想、理论、方法和工具。系统思想原则包括:

1. 整体性原则 生物的机体是一个整体,生物分子水平的功能和属性的简单相加,并不等于细胞水平的功能和属性,两者有本质的区别。引申到一般系统论的普遍性的整体性原则表明,系统是由两个以上的能够相互区别的要素(或子系统)所组成的集合体,但系统又是一个不可分割的整体。

2. 结构性原则 凡系统必有结构,系统结构决定系统功能,破坏结构,就会破坏系统的总体功能。在高山云雾的悬崖峭壁上生长的青松,有针一样的叶,鳞甲一样的树皮,枝干挺立,根系深扎于岩土之中。如果断其根,去其叶,它就失去了吸收功能、光合功能,失去继续生存的能力。

3. 有序性原则 系统都是有序的,系统与无序或混沌相对立,系统是由较低阶(级)的子系统组成,而该系统自己又是更大的系统的一个子系统,层次有序。对生命现象的研究必须在生物体组织所有层次上加以考察,如物理化学层次、分子层次、细胞层次、器官组织层次、个体层次、群体层次以及群体与环境的关系。每一层次的存在,总是以其次级层次的生长、衰老和死亡为前提的,这正是生命的表现形式和生物的繁衍途径。如水稻植株,伴随着叶片衰老、茎秆枯黄、稻穗形成、种子成熟,得以生存繁衍,有序进行。

(二) 系统开放性原则

1. 开放系统的基本概念 开放系统(Open Systems)与封闭系统(Closed Systems)相对立。开放系统是一种与外界有物质和能量(及信息)交换的系统。农田生态系统就是一个开放系统,有人工、种子、化肥、农药、畜力的投入,有雨水、霜、雪的降落,有病菌、昆虫、杂草的入侵,同时也有物质(如产品、秸秆等)的输出,养分的挥发、淋失,雨水的流失、渗漏,昆虫的迁飞,病菌的扩散等都离不开农田生态系统。

封闭系统是指与外界没有物质、能量、信息交换的系统,因此封闭系统是相对的。原则上讲,一切系统都具有不同程度的开放性,只是为了研究方便,把个别物理系统当做封闭系统看待。所有的生物系统和人类社会系统都是开放系统。

系统都具有边界,开放系统的边界为柔性边界,具有可渗透性,允许物质、能量、信息交流。而封闭系统的边界一般为刚性边界,不具渗透性,封闭系统存在于物理、机械系统中。

2. 开放系统与熵 熵的概念来源于热力学第二定律。熵是一个系统的状态函数,在热力学中用它度量有序程度的大小和组织程度的高低。封闭系统是无序系统,其熵值只朝着一个方向变化,只增不减,而熵越大,系统越无序。开放系统从一个平衡态到另一个平衡态的一切过程使系统熵值与环境熵值之和增加,开放系统维持“低熵”状态。生物有机体和生态系统都是开放系统,是相对有序的,它们不断与环境进行着物质、能量的交换,通过光合与同化,引入负熵值,通过呼吸,把正熵值输出环境。普里高津(Prigogine)把这种通过与环境交换物质和能量的有序系统结构称为耗散结构,并给出了熵的数学表达式: $ds = dis + des$,熵变 ds 由系统内部因不可逆过程所引起的熵值产生的 dis 和系统环境间进行物质、能量交换的熵流(Entropy flow) des 组成。只有熵没有熵流的系统是封闭系统,有熵流的系统则为开放系统。系统熵的增加,使系统走向无序。系统出现负熵使系统保持活力,系统出现负熵使系统从一个平衡状态转为另一个平衡状态。

3. 开放系统的等结果性 所谓系统的等结果性,是指对于不同的初始条件,系统采用不同的路径和方式,可能产生相同的结果。系统的等结果性也称为等目的性,系统向终极状态发展,以实现系统的最优化。如社会系统、经济管理系统,都有很强的目的性,可能是完成和超额完成生产计划,达到规定的质量和成本利润指标,也可能是满足社会的需要。可以采取多种发展途径,实现相同的目标。

二、耗散结构理论

耗散结构理论是比利时的布鲁塞尔学派,以普里高津(L. Prigogine)为首的理论物理学家创立的。耗散结构理论以研究系统从混沌向有序转化的机制、条件和规律为目的。在1969年召开的“理论与物理生物国际会议”上,由普里高津提出了耗散结构理论,由于该理论在化学、生物学等研究领域取得了成功,被誉为20世纪70年代化学的辉煌成就之一,他本人也因此荣获1977年诺贝尔化学奖。

耗散结构,是指在一个远离平衡的开放体系(力学的、物理的、化学的、生物的)中,当外界条件达到某一阈值时,系统即可通过与外界交换能量和物质等而从原来的无序状态转变为一种时空或功能上的有序状态。

克劳修斯的热力学第二定律认为,世界是朝着消灭信息、产生混乱增熵的方向发展的。而达尔文的进化论则认为世界是朝着由简单到复杂,由低级到高级,产生信息,增加信息,产生有序负熵的方向发展的。两个相互矛盾,又似是而非的问题,普里高津用耗散结构理论把两者统一在更为广泛、更为普遍的理论之中。

普里高津认为,系统总熵由两个部分组成:

$$ds = dis + des$$

dis 永远为正,是系统本身由于不可逆过程引发的熵变。 des 可正可负,是系统与外界交换物质、能量、信息而引起的熵变。在开放系统(Open System)中,系统与外界环境进行物质和能量交换产生负熵流,非平衡系统通过自组织(Self-Organization)过程中产生新的有序结构。

例如,物理学中的贝纳德(Benard)现象。当从下面加热静止的液体时,起初只有热传导存在,当上下温差达到一定值后,液体的状态不稳定了,突然出现许多规则的六角形对流花纹,被称为贝纳德花纹,它是大量分子在温度梯度的驱动下表现出宏观尺度上一致性结构,是在一定条件下系统远离平衡状态而“自己组织起来”的。又如,当棉花叶片受轮纹斑病菌的危害时,由病斑中心开始形成一个又一个保护圈,以限制病斑的扩大,于是病菌只能隔一定的距离侵染棉叶的其他部分,形成新的病斑,最终在生长的棉叶上形成一个个规则有序的轮纹斑。这些病斑的形成实际上是棉叶对病菌浸染的一种自卫反应(或植物细胞、化学物质的自组织过程)。而无生活力的或生活力不强的叶片自组织能力很弱,或根本没有,一旦得病,病斑迅速发展,很快连成一片。

根据耗散结构的形成条件和研究对象,耗散结构可以概括为以下特点:

(一) 开放性

耗散结构产生于远离平衡状态的开放系统中,它要靠外界不断提供物质、能量和信息才能维持。如活的生物体要保持有序,不吃东西是绝对不行的,生命活动只有与外界不断进行物质、能量、信息交换才能维持。因此,具有生命活动的有机体是一个开放系统,具有耗散结构,必须进行新陈代谢。

(二) 非平衡性

普里高津认为,非平衡是有序之源。有序结构只有在非平衡条件下才能形成。一块土地,如任其杂草丛生,自生自灭,年复一年保持一种自然的无生产力的平衡。若人们开垦了这块土地,种植作物,施用肥料,人工灌溉,破坏了原有的平衡状态,在非平衡状态下,变为一个有序的开放的农田生态系统,我们获得了经济效益。

(三) 突变性

在耗散结构中,指一组元素(或广义粒子)从一种杂乱无章的状态向一种协调一致的状态的自发转变,只有当控制参量达到一定阈值时新的有序结构才能突然出现。

(四) 高稳定性

耗散结构是在变化中平衡,变化中稳定,虽然是旧状态不稳定的产物,但它一旦形成就具有相当高的稳定性,不被任何小的扰动所破坏,服从于惯性或涨落回归原理。

三、协同论

1977年,西德著名物理学家哈肯(H. Haken)创立了协同论。协同论研究的对象也是开放系统。协同论是研究和比较不同领域中多系统元素间合作效应(Cooperative effect)的理论。协同论运用子系统之间或大量粒子之间的协调和同步作用来研究。

协同论以无序到有序的转变为主要内容,不仅包括非平衡态中的相变,也包括平衡态中的相变;协同论的普适性比耗散结构理论更强。协同论的数学模型和处理方案根本不受热力学概念的限制,它可以应用到没有热交换的相当宽广的领域。它阐明了开放系统形成新的有序结构的原因和条件,揭示了协同和有序的因果关系,并对受多种因素影响的复杂事物的发展过程做出了明确的数学描述。

协同论认为,系统有序结构的出现,关键不在于热力学平衡与否,也不在于距离平衡多远,而是在一定条件下,由于子系统或要素间的相互作用或协同,使系统形成时空的或功能的有序结构。协同论的自组织理论认为,系统的开放性是产生有序结构的必要条件,而非线性则是产生有序结构的基础,因此只有子系统间的协同性才是产生有序结构的直接原因。协同是有序的原因,有序是协同的结果。

第二章 系统工程概述

第一节 系统工程的定义

20 世纪 40 年代出现的“系统工程”(Systems Engineering)一词,是对当时一些工程实践中卓有成效的新观点、新方法的命名,它产生于对量化系统思想方法在工程实践中的应用。国外学者对这种方法相继有不同的命名,如运筹学(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)和费用效应分析(Cost-Effectiveness Analysis)等。从上述不同命名中,体现出了系统工程是组织管理系统的规划、研究、分析、设计、试验和使用的科学方法的总称,同时也丰富了系统工程的内涵,为系统工程的发展奠定了广泛而坚实的学科基础。

系统工程是一门新兴科学,它作为一门独立的学科,其研究对象是一些庞大复杂的工程系统。随着人类社会的进步,人们在解决极其复杂的系统性问题的过程中,社会科学与自然科学、技术科学互相渗透、互相融合、互相促进,从而产生了一门边缘的新学科,这就是系统工程。

关于系统工程的定义,国内外学者结合自己的研究、应用领域给出了不同的定义。

(1)钱学森在《组织管理的技术——系统工程》一书中指出,“系统工程是组织管理系统的计划、设计、制造、试验和使用的科学方法,是一种对所有系统都有普遍意义的科学方法。”

(2)美国 H. 切斯特努特在《系统工程方法》中认为,“系统工程是为了研究由多个子系统构成整体系统所具有的多种不同目标的互相协调,以期系统功能的最优化,最大限度地发挥系统组成部分的能力而发展起来的一门科学。”

(3)日本工业技术标准 JIS-Z8121 表述,“系统工程是为了更好地达到系统目标,对系统的构成要素、结构组织、信息流动和控制机构等进行分析与设计的一种技术。”

(4)美国质量管理学会所属的系统工程技术委员会表述,“系统工程是应用科学知识设计和制造系统的一门特殊工程学。”

(5)日本的寿野寺男在《系统工程》一书中写到,“系统工程是为了合理地开发、设计和运用系统而采用的思路、程序、组织和技艺的总称。”

(6)英国《不列颠百科全书》中写到,“系统工程是一门把已有学科分支中的知识有效地组织进来用以解决综合性的工程问题的技术。”

(7)沈泰昌在《系统工程基础》中写到,“系统工程是从系统的观点出发,跨学科地考虑问题,应用工程的方法去研究和解决各种系统问题。”

(8)日本日立公司的三浦武雄认为,“系统工程与其他工程学不同之点在于它是跨越许多学科的科学,而且是填补这些学科边界空白的一种边缘学科。因为系统工程的目的是研制系统,不仅涉及到工程学的领域,还涉及社会、经济和政治等领域,为了圆满解决这些交叉领域的问题,除了需要某些纵向的专门技术以外,还要有一种技术横向把它们组织起来,这种横向技