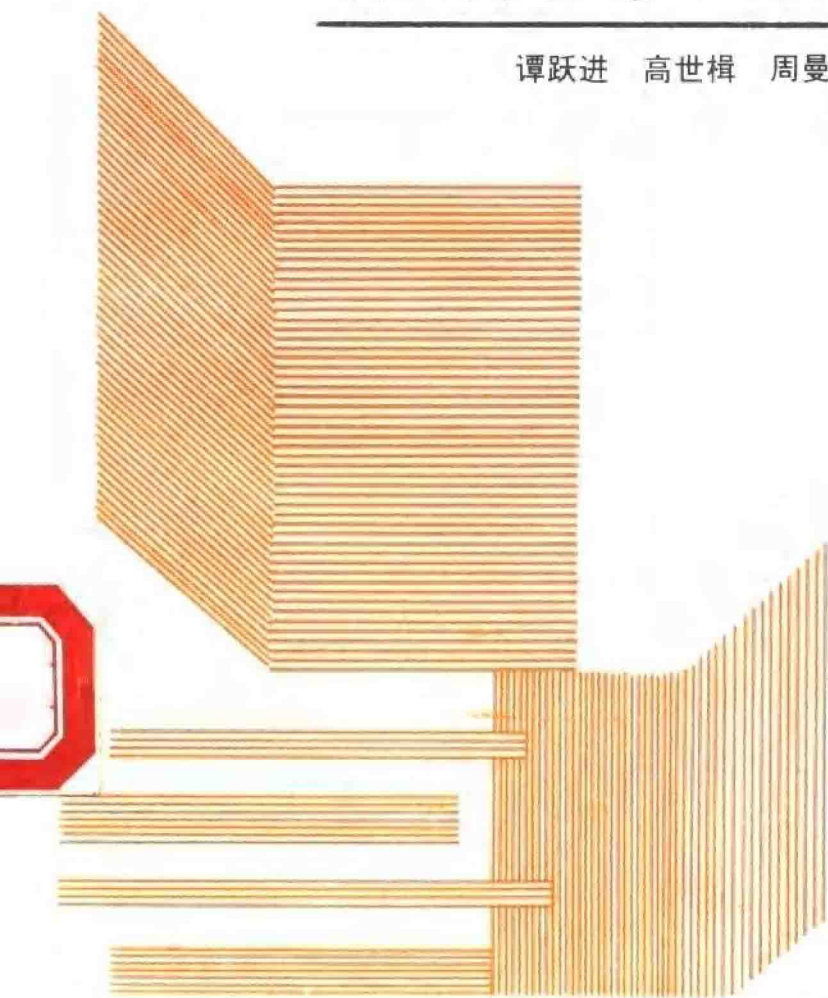


● 研究生教材 ● 研究生教材

系统学原理

谭跃进 高世楫 周曼殊 编著



■研究生教材■

GF23/16

谭跃进 高世楫 周曼殊 编著

系统学原理

国防科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

系统学原理/谭跃进;高世楫;周曼殊编著—长沙:国防科技大学出版社,1996.11

ISBN 7-81024-394-2

I 系统学原理

II 谭跃进;高世楫;周曼殊

III ①系统理论②系统工程

IV N94

责任编辑:罗 青

责任校对:何 晋

封面设计:陆荣斌

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4555681 邮政编码:410073

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本:850×1168 1/32 印张:9.5 字数:238千

1996年11月第1版第1次印刷 印数:1—3000

ISBN 7-81024-394-2
N·4 定价:14.00元

前 言

随着科学技术的进步,生产力的提高,构成客观世界的三个基本要素——物质、能量和信息不断丰富,其结果使得“空间狭窄”、“时间缩短”,事物之间的相互联系加强。因此,整个世界朝着复杂性不断增大的方向发展,这是不依人的主观意志为转移的客观规律。正如一般系统论创始人冯·贝塔朗菲所指出的,“无论如何,我们被迫在知识的一切领域中运用‘整体’或者‘系统’来处理复杂性问题,这将对科学思维的一个根本改造。”这就是当代系统学出现并且不断发展的原因。

运用系统学的理论和方法研究复杂性问题,应当有哪些特点呢?

第一,封闭系统将事物与其周围环境相互隔绝,这种研究方法是简化论的思维方法;相反,开放系统考虑到系统与其环境之间的物质、能量或信息交换,更能反映客观世界的真实性。

第二,线性系统有唯一解,满足迭加原理,这是简化论的数学表现形式;相反,非线性系统具有多解、多稳态,能够描述稳定性交换与结构演化,更能追踪客观世界的多样性与复杂性。

第三,整体与局部之间的突现行为。“突现”刻划了系统整体特征的产生,描述了由千千万万个元素(或广义粒子)组成的复杂系统从无序到有序或者从有序到混沌的自发突变。“突现”的概念提供了一条从不同的层次分析系统行为演化的途径。当前,对突现性的研究是与系统的结构演变相联系的,新结构的形成称作“自组织”。系统自组织的数学描述是通过非线性动力学来实现的。

根据以上特点,本书围绕整体性这一主题,从多个侧面、以多种形式,通过各类吸引子的突现,研究系统的结构演化和自组织。多个侧面是指从开放性、非线性和随机性三方面对主题进行讨论。

多种形式是指通过确定性与不确定性、连续与离散等多种形式的动力学系统对主题进行研究。

当前,应用方面的一个难点是将系统科学正确地运用于解决社会、经济、军事或生态等领域的问题。钱学森教授把这些领域归结为开放的极其复杂的巨系统。他还指出,现阶段唯一能够有效处理复杂巨系统的方法,就是定性与定量相结合的综合集成方法。本书之所以围绕整体性主题,从多侧面、以多种形式进行讨论,正是对于综合集成的一种尝试。

本书由谭跃进、高世楫、周曼殊合写,由谭跃进统稿。书中大部分内容曾作为研究生学位课程的教材,为国防科技大学系统工程、管理工程等专业的学生讲授过多遍,是在作者们多年的研究与教学实践的基础上,经多次讨论修改后写成的。本书除可作为研究生或大学高年级本科生的教材外,还可作为对系统学有兴趣的科技工作者和管理技术人员学习的参考书。

在写作出版过程中,得到了国防科技大学研究生院、教保处和系统工程与数学系有关领导和同志们的热诚支持和帮助,中南工业大学系统所陈赫教授对该书进行了认真的评审并提出了很好的建议,在此一并表示衷心的感谢!

系统学仍是一门正在发展还未成熟的新学科。在这种情况下,要编写一部系统的教材是比较困难的。特别是我们试图用数学的概念和模型来描述和解释系统学的思想内涵,乃是一项探索性的研究工作。书中的缺点和错误难免,欢迎读者批评指正。

编者

1996年9月

目 录

第一章 绪论

- § 1 一般系统论及其学派 ()
- § 2 系统与系统科学 (8)

第二章 开放系统

- § 1 开放与封闭 (19)
- § 2 牛顿时间与柏格森时间 (21)
- § 3 有序与无序 (24)
- § 4 地球、生命、熵 (30)
- § 5 物质、能量和信息开放 (37)

第三章 分岔与突变

- § 1 Morse 引理 (47)
- § 2 单变量函数和分裂引理 (53)
- § 3 系统稳定性 (58)
- § 4 结构稳定性 (66)
- § 5 分岔 (72)
- § 6 Zeeman 突变机构 (85)
- § 7 初等突变 (94)
- § 8 突变理论的应用 (103)

第四章 随机系统

- § 1 随机过程与随机涨落 (115)
- § 2 随机行走模型与主方程 (124)
- § 3 福克-普朗克方程 (132)

§ 4	社会舆论的形成和演化模型	(146)
-----	--------------	-------

第五章 系统自组织

§ 1	支配原理	(163)
§ 2	激光	(173)
§ 3	布鲁塞尔器(Brusseletor)	(181)
§ 4	生存竞争与进化	(194)
§ 5	组织的自瓦解	(206)

第六章 混沌吸引子

§ 1	周期倍化通向混沌	(209)
§ 2	二维海诺(Henon)迭代	(216)
§ 3	混沌的特征	(232)
§ 4	Lorenz 方程的混沌现象	(241)
§ 5	李亚普诺夫指数	(254)

第七章 自动器网络模型

§ 1	网络模型	(260)
§ 2	元胞自动机	(265)
§ 3	布尔网络	(271)
§ 4	神经网络	(275)
§ 5	L-系统	(284)
§ 6	模拟战争环境的元胞自动机模型	(289)

参考文献

第一章 绪 论

§ 1 一般系统论及其学派

§ 1.1 一般系统论的历史回顾

作为不同科学思想的实例,回顾一下 18 世纪物理学与生物学的情形。理论物理学首先得到了发展,牢固地建立了力学的数学基础,无论从理论的严密性或实证角度看,力学的完备性都不亚于几何学。相反,生物学则处在完全描述性阶段,依靠试验和归纳法。生命的本质由超自然的活力所主宰,很少有人用物理学解释生命现象,物理学与生物学之间存在一条鸿沟。生物学中一些提法,如机体、生存、再生、发展、进化、行为、衰老、死亡等,在物理学的研究中是没有地位的。

力学是物理学中最早成熟起来的一个分支。关于宇宙万物的发生与发展的学说中,机械论是渊源已久的学术思潮。到了 19 世纪中叶,由于热力学定律的发现和化学的进展,使得物理学与生物学相隔绝的状态起了变化,生理学者开始用物理、化学原理研究生命现象。结果发现,生命现象与发生在无生命事物中的过程并没有本质的区别,物质、能量守恒定律同样支配生物界。从物理学观点看,生命组织也是机器,于是简化论又抬头了。

简化论的实质是从最简单和最基本的层次上揭示规律,用来解释高层次上复杂的生命活动。将化学现象简化为物理过程所取

得的成功,使得简化论者有理由认为,将生理现象简化为化学和物理过程是很自然的和有意义的。但是,解释生命组织的简化论观点,遭到持活力论者(vitalism)的反对。他们认为,生物体内存在的活力是根本不同于物理、化学的力,活力支配生物的有目的运动;生物机体所表现的等终极性与多途径是力学规律的因果论和决定论无法解释的。

简化论与活力论都只有部分的真理性。简化论正确地寻找生命与无生命之间的联系,但又混淆了简单运动形态与高级生命运动形态质的区别;活力论正确地区别两种运动形态的差异,但又将两者截然分隔,从超自然的活力来填补这两种运动形态之间的鸿沟。

活力论者用来反对简化论的论据:一是生命活动具有目的性或等终极性;二是热力学第二定律解释不了生命活动的有序现象。但是,如果接受活力论的观点,就等于承认灵魂主宰生命,这是对科学的嘲笑。简化论与活力论的争论持续到 20 世纪 20 年代。正是这个争论使得奥地利生物学家贝塔朗菲(Bertalanffy, L.)在 1925~1926 年建立了一般系统论的早期框架,提出了生物学的机体概念,并在 1928 年出版的著作《现代发展论》和 1932 年出版的《理论生物学》中进行了全面总结,由生物学的机体概念发展成生物学的一般理论,进而合乎逻辑地发展为机体系统论即一般系统论。1937 年在芝加哥大学查尔斯(Charles)的哲学研讨班上,贝塔朗菲首次提出了一般系统论,并在 1945 年正式公开发表。

贝塔朗菲强调指出:化学反应中存在封闭系统与开放系统的区别。对于封闭系统,满足物质守恒定律,达到平衡态后,物质的相对浓度只与反应物的初始浓度有关,系统的终态只取决于初始条件;对于开放系统,要考虑系统与环境间的相互作用,系统将达到稳态,处在稳态下的物质浓度与初始条件无关。而且,当稳态受到干扰时,例如加入或者移走某一数量的反应物,系统将重建稳态。

对实验观察者来说,系统显示等终极性以及维持稳态的倾向性就是系统的目的性。贝塔朗菲发现具有等终极性的系统原来就是开放系统,而古典热力学并不研究开放系统。

从本来意义讲,一般系统论的“一般”是指比较古典热力学的封闭系统,开放系统是更一般的系统,前者是后者的特例。贝塔朗菲建立的一般系统论是能够适合机体组织一切层次的系统理论。它之所以适合于一切层次上的“一般”系统,原因在于不同系统间的同构现象。系统同构是一般系统论追求“一般”而又区别于简化论的显著标志。

20 世纪 40 年代以来,工程技术有了巨大进步,动力工程(蒸汽机、电机)朝控制工程发展,出现了计算机和其他许多自动机器,从家用恒温器到导弹。技术的进步,迫使人们考虑的不是孤立的一台机器,而是由多台机器组合而成的系统。对于单一的蒸汽机、汽车、无线电接收机的研制,这是各个专门领域的工程师所能胜任的;对于研制导弹或宇宙飞船,则是由很多不同专门技术的部件所组成的,其中包括机械、电气、化学等部件。同时,人和机器的关系的问题也提了出来。另外,第二次世界大战的爆发,还促使了系统研究各分支的发展,出现了控制论、运筹学、信息论等学科,并在指导工程技术进步中发挥了巨大作用。到了 20 世纪 60 年代,系统工程又把工程技术中的综合化、系统化的趋向推向新的高度,硬技术转向软技术,有形产品转向无形产品,使得系统科学日益朝社会科学渗透,成为沟通、连接自然科学与社会科学的桥梁。总之,系统科学具有明显的交叉学科的性质。在这种场合下,以研究生命机体起家,并以寻求机体一切层次的一般理论为宗旨的一般系统论,很自然地受到了很大的鼓舞与推动。1954 年,贝塔朗菲与保尔丁(Boulding, K.)、拉波波特(Rapoport, A.)、杰拉德(Gerard, Ralph)等一起,建立了一般系统论学会(The Society for the Advancement of General Systems Theory)(1956 年改名为一般系

统研究学会(Society for General Systems),80年代末又改名为国际系统科学学会(International Society for the Systems Sciences)),开始出版一般系统年鉴(General Systems Yearbook)。该学会在美国各中心城市设有分会,随后又在西欧各地建立研究机构。1968年,贝塔朗菲在广泛吸取系统工程、系统科学的现代成就基础上,出版了《一般系统论:基础,发展,应用》一书,全面总结了他一生为之建立并发展的一般系统论的基本要点。

一般系统论与系统科学其他分支的关系十分密切,并行不悖,互相补充,互相促进。一般系统论对于系统思想的开发、方向性的提示贡献较大,而在定量的具体成果方面虚多实少,不如控制论、运筹学等学科那样研究的深入、具体。对于以生命活动为特征的复杂系统,过去是以定性研究为标志,像生物学、生态学、行为科学、组织管理科学、社会学等,在其中一般系统论得到了广泛的应用。贝塔朗菲在总结系统研究的情形时指出:“……我们将被迫在知识的一切领域中运用‘整体’或者‘系统’来处理复杂性问题,这将对科学思维的一个根本改造。”

§ 1.2 沿开放系统论发展

普里高津(Prigogine, I.)和由他领导的布鲁塞尔学派,从研究非平衡热力学出发,经过几十年的工作,建立了耗散结构学说。普里高津是从线性非平衡热力学研究开始的。所谓线性非平衡是指在平衡态附近的非平衡区域中,流(热流、质量流等)和力(温度、浓度梯度等)的关系可用线性关系近似描述。线性非平衡热力学以昂塞格(Onsager, L.)的“倒易关系”和最小熵产生原理作为理论基础,发现这个区域内系统的基本特征是趋向平衡,不可能形成有序的稳定结构。系统只能在非线性区域、远离平衡的条件下,才能呈现新的结构。因此,普里高津强调“非平衡是有序的起源”,耗散结构只能通过连续的物质和能量流来维持。这样,耗散结构成为普

里高津发展开放系统论的重要具体成果。

热力学从宏观研究问题的方法虽然可信,总给人隔靴搔痒之感。如果深入微观,从亿万个分子、细胞开始研究,又太繁琐,无法取得具体结果。统计力学提供了从微观过渡到宏观的理论,奥秘在于:并不需要知道每个分子的运动才能知道整体气体的性质,不求知道每个分子的运动,只求得到整体的统计行为。

哈肯(Haken, H.)正是用这样的观点研究系统行为。宇宙间许多不同的事物之间存在着惊人的相似。基于这个事实,哈肯研究了系统从无序到有序转变的一般规律和特征,特别是研究有序结构的自组织原理。所有系统均可分为若干子系统,子系统的类型是任意的,可以是原子、分子、细胞、动物、植物,也可以是机器的部件、工厂的车间等等。由于子系统间互相协同(合作),通常表现出有目的性,这种合作导致宏观的空间或时间有序结构。通过研究这种有序结构自组织过程的共同规律,哈肯建立了协同学。

在建立协同学的努力中,哈肯广泛应用了概率论、信息论、控制论的有关知识,还得力于汤姆(Thom, R.)的突变论。因此,协同学是综合了现代科学的多方面成就的产物,也是一般系统论关于开放系统的深入研究和新的发展。

艾根(Eigen, M.)的超循环理论是直接建立生命机体自组织的数学模型。从观测得知:生命现象包含许多由酶的催化作用推动的各种循环,而基层的循环又组成高层次的循环,即超循环,也可以形成更高层次的超循环。超循环中可以出现生命现象所具有的新陈代谢、繁殖和遗传变异。艾根把控制论中的巨系统理论应用于生命现象,建立了具体的结构模型,在生物大分子的层次上,为达尔文的进化论,即生命在生存环境中的演化机制提供了理论基础。

普里高津多次强调:他一生都在研究时间。维纳(Wiener, N.)控制论的第一章就是牛顿时间和柏格森时间,这表示构成控制论基础的时间概念是何等重要。经典物理学是被可逆和重复的牛顿

时间所支配。柏格森(Bergson, H.)强调指出,物理学时间和进化论及生物学时间不同,前者是可逆的,其中没有新生事物出现;后者是不可逆的,其中不断地出现新生事物。生物系统是积聚能量而不是消耗能量;是创造差别而不是使之趋于平均化;是建立秩序、结构和组织,而不是造成混乱、衰退和无组织。低熵趋势是生命机体的一个主要特征。

一般系统论来源于生物学的研究,正是这个低熵趋势使得研究复杂系统的理论物理学者普里高津、哈肯、理论生物学者贝塔朗菲和控制论的创始人维纳走到一起来了。不能认为这是偶然的,开放系统与低熵将是一般系统论、控制论和理论物理学关于复杂系统研究的发展和相互交叉的重要核心。

§ 1.3 形式系统和系统哲学

在一般系统论的发展趋向中,另一个有代表性的主张认为只有脱离具体内容的完全数学形式化的理论才是最一般的系统理论。

处在最高层次的是抽象系统的数学理论,一般系统的数学理论是早期一般系统论研究中一个活跃的领域,出现了好多不同的分支和方法。

曼萨洛维克(Mesarovic, M. D.)方法的特点是抽象的公理方法,一般系统定义为抽象集合族上的任一关系。曼萨洛维克将系统变量分为输入和输出两类,并用以下两种方法刻划一般系统的行为:

(1) 输入—输出(终结、因果)表征:一般系统的行为,当作两个不相交集合族的卡的迹积上定义的二元关系;

(2) 目的一寻求(目的、决策)表征:从上述二元关系隐含地转化为目的一寻求的描述。

从上述两点出发,曼萨洛维克研究了抽象系统的形式表现,进

而讨论状态空间存在定理、最小维数状态空间、动态系统的因果性、线性系统的实现、可控性和稳定性等问题。

吴莫尔(Wymore, A. W.)提出的滑脱尔特(Wattled)系统论,将离散自动机和由微分方程描述的系统论归结为一体。系统的定义建立在状态转移结构基础上,这样一来,它和有限自动机的定义十分相似,并将后者推广到既不要求有限状态数,又不同于有限个输入数的连续函数。这种理论适应于同时包含连续和离散变量的混合系统,并适合于定义在无限集合上的系统。此外,还引用系统同态(把系统同构作为特例)的概念,推导出建模与仿真的原则。

无论曼萨洛维克或吴莫尔方法都属于演绎法,他们从公理出发定义系统。相反,克立尔(Klir, G. J.)采用归纳法,在定义系统之前先识别系统的特征,这种识别来源于对不同学科领域,如自然科学、社会科学、工程、数学等。据此,克立尔建立了五种基本定义,由此构成系统定义的系列,系列中每一个定义相应于系统类问题的一个特殊类。同时,将系统特征区分为初级和次级特征,初级特征是由问题给出,次级特征是问题的一个等价类。因此,这一系列系统定义为一般系统方法提供广泛基础。

形式系统论发展的一个重要倾向是建立元理论,它能起到统一不同方法的作用。劳夫格伦(Lofgren, L.)提出一般系统有关元理论的若干观点。他强调在一般和特殊方面形式理论的意义,采用数学逻辑和可计算性理论,研究了理论的可交流性、句法信息和将一种理论简化还原为另一种理论的可能性。劳夫格伦还就某些新近研究的系统,例如学习系统、自再生系统和演化系统的推演,进行了探讨。劳夫格伦是一般系统公式化的积极鼓吹者,他认为,凡是能够有效地解释的事物都能够公式化。

一般系统论和任一范围比较广泛的科学理论一样,具有哲学方面的性质。按库恩(Kuhn, T.)的提法,系统的概念是一种新的范式。贝塔朗菲认为,系统观是新的自然界的哲学,是把世界看作

一个巨大组织的机体主义观点,这完全区别于把世界看作被盲目法则统治的机械论观点。

当人们定义客观现实系统与概念系统时,不可避免地会遇到一系列关于感性认识、理性认识以及这两者相互关系的问题,这是系统认识论的问题。逻辑实证主义认识论是由物理主义和知识的照相机理论决定的。古典科学分析程序是把客体分解为组成单元或单途径和线性因果关系;相反,系统观主张研究多变量的有组织整体,强调相互作用、调整、组织、目的性。

从哲学家的观点来看,一般系统论的“一般”,只有在世界观方面,即在它具体研究相应的哲学原理那一部分中,才是普遍的。至于谈到本来意义上的系统规律性,对于现实的不同层次,都是各不相同的。

原苏联的学者倾向于把一般系统论作为唯物辩证法和各门专业学科之间的一个中介,完成一定的方法论的功能。例如,在乌约莫夫(A. И. уюмов)的著作《系统方式和一般系统论》中,把一般系统论看作是辩证法具体的哲学基础,建立用数学形式化语言描述的参量型一般系统论,进而揭示出一般系统的若干规律,并把这种方法应用于国民经济。乌约莫夫认为:贝塔朗菲的一般系统论是以系统同构原理为基础的,本质上属于类比型一般系统论,而他自己的是参量型一般系统论。我国系统论学者乌杰将系统思想与唯物辩证法结合,提出了“系统辩证论”,探索系统哲学研究的新思路。

§ 2 系统与系统科学

§ 2.1 物性与系统性

兴起于 20 世纪 40 年代的系统运动,极大地丰富了人类对自然和自身的认识。从某种意义上讲,由此而产生的系统科学从根本

上改变了现代科学知识的结构体系,即产生了由传统学科如理、化、天、地、生为一维,以新兴的系统科学为另一维的二维科学体系。如果进一步将每一学科划分为哲学、基础科学、技术科学和工程技术四个层次,那我们就得到一个现代科学体系的三维结构,其三维分别为传统学科维、横向学科维(系统科学)和层次维^[38]。

系统科学研究系统的运动规律,探讨系统分析的方法和系统逻辑的具体应用。按照钱学森对系统科学体系的划分,系统学在系统科学中属于基础科学层次,主要讨论系统的概念、特征、分类及演化规律。我们将在这样一个概念框架下探讨系统科学的一些基本问题。

长期以来,关于系统概念的定义和系统特征的描述没有统一规范的定论。虽然系统一词频繁出现在学术讨论和社会生活中,但往往不同的人或同一个人在不同的场合会对它赋予不同的含义。系统一词包罗万象的外延,使之成为逻辑上空无一物的概念,即内涵为零。这给系统科学研究带来一定的困难。概念上的混淆是许多对系统科学持批评态度的人用以非难系统科学的焦点之一。我们并不打算在此对系统下一个一劳永逸的定义,而是试图从不同的角度讨论系统的基本特征并寻找一种较为通用的描述方式,在此基础上阐述我们对系统科学的一些思考。

作为讨论的起点,我们采用钱学森给出的对系统的描述性定义^[66]:系统是由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合成的、具有特定功能的有机整体。这个定义,与类似的许多定义一样,指出了作为系统的三个基本特征。第一,系统是由若干元素组成的;第二,这些元素相互作用、互相依赖;第三,由于元素间的相互作用,使系统作为一个整体具有特定的功能。虽然系统的定义形形色色,但都包含了这三个方面,即这三点是定义系统的基本出发点。

正如罗森(Rosen, R.)指出的那样,系统一词几乎从不单独使用,而往往与一修饰词组成复合词,如“自然系统”、“物理系统”、

“生物系统”、“社会系统”、“公理系统”、“一般系统”等^[31]。这种使用方式的本身,就体现了现代科学体系的二维特征:前面的修饰词,如“自然”、“生物”、“社会”、“一般”等,描述了研究对象的物质特征,即“物性”(thinghood);而“系统”一词,表征了所述对象的系统或整体特征,即“系统性”(systemhood)。对某一具体对象的研究,既离不开对其物性的讨论,也离不开对其系统性的阐述。必须将两者结合起来,才能准确、全面地弄清所研究的对象,这正是现代科学两维特征的体现。

如前所述,传统学科按研究对象的实体、物质特征分类研究物性,如物理、化学、天文、地理等。系统科学研究所有实体作为整体对象的特征,即研究系统性,如整体与部分、结构与功能,稳定与演化等。

然而,对“系统”一词在上述意义下的广泛使用,引起了系统科学研究中的一些争议。切克兰德(Checkland, P.)指出,在系统科学研究中,所讨论的系统,既代表了现实中可观察到的作为一个复杂整体而存在的实体,如“生物系统”、“教育系统”、“法制系统”,此时“系统”表达了一种本体的概念;同时系统的概念还用作描述一个抽象的整体^[3]。这样,当系统作为一个整体的抽象概念使用时,它是一个认识工具,可以用它来感知和表示现实世界中的系统。Checkland认为,在早期的系统科学研究中未能区分系统一词的这两种不同的使用范畴,是当前系统科学研究中概念混乱的主要原因。他认为,应当使用考斯特勒(Koestler, A.)提出的整元(holon)的概念来描述一个抽象的整体,用以区别日常语言中用来描述现实实体的“系统”一词,他还进一步提出了建立在核心“整元”基础上的系统认识论。

整元一词,较恰当地描述了一个系统在一个层次结构中的特性。其英文单词“holon”,词根来源于希腊文 holos=whole(整体),加后缀“on”表示“部分”,即“元”的意思。整元用以表达这样一种认