

吴今培 李学伟 著

系统科学 发展 概念

AN INTRODUCTION TO
DEVELOPMENT
OF SYSTEMS SCIENCE

清华大学出版社



吴今培 李学伟 著

系统科学 发展 概论

AN INTRODUCTION TO
DEVELOPMENT
OF SYSTEMS SCIENCE

清华大学出版社
北 京

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

系统科学发展概论/吴今培,李学伟著.--北京:清华大学出版社,2010.4
ISBN 978-7-302-22173-9

I. ①系… II. ①吴… ②李… III. ①系统科学—研究 IV. ①N94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 033186 号

责任编辑:贺岩

责任校对:王荣静

责任印制:杨艳

出版发行:清华大学出版社

地址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn> 邮编:100084

社总机:010-62770175 邮购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印刷者:清华大学印刷厂

装订者:北京市密云县京文制本装订厂

经销:全国新华书店

开本:148×210 印张:8.875 字数:261 千字

版次:2010 年 4 月第 1 版

印次:2010 年 4 月第 1 次印刷

印数:1~3000

定价:28.00 元

产品编号:036138-01

系统科学经过半个多世纪的发展取得了丰硕的研究成果,界定了明确的研究对象,构筑了系统的理论结构并建立了较为完备的方法论框架。待到 20 世纪 80 年代中叶,系统科学以跨学科性、综合性的研究进路,探索不同复杂系统的共性,构建系统复杂性涌现和演化的一般性理论及思维范式,标志着人类科学研究又进入了一个新的历史时期。可以说,一场激动人心的科学观念的革命瞬间照亮了各个学科领域,其中科学思想的变革更是深远和广泛。

我国著名科学家钱学森院士曾经指出:“不管哪一门学科,都离不开对系统的研究。系统工程和系统科学在整个 21 世纪应用的价值及其意义可能会越来越大,而其本身,也将不断发展,如现在的系统科学已经上升到研究复杂系统,甚至是复杂巨系统了。像人的大脑、互联网等,就是复杂巨系统。这在国外也是一个热门,叫复杂性科学研究。”现今《系统科学发展概论》一书的出版恰逢其时,它既是系统科学发展轨迹的勾勒,又对进一步的研究方向有所引导。

本书作者多年从事系统科学的教学与科研工作,在撰写本书的过程中,致力于把系统科学的专业理论写得既不过于艰深,又不陷于一般的科普,易读又不失严密,体现了三方面的特色。

一是深入浅出地论述了系统科学发展进程中所遇到的一些重要课题,以及科学家们为解决这些问题提出的思想、理论和方法。从系统科学产生的背景开始,按其简繁程度有层次推进,揭示热点和前沿。虽不是论述某一方面的专门研究成果,但概括了作者的理解和研究,构建了一个比较简练而又规整的结构体系。

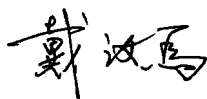
二是与系统科学的专著不同,书中没有铺陈深奥的数学知识。

因此,本书可以面向更为广泛的读者。既可作为初学者的入门书,也可供渴望学习系统科学,又难“寒窗十年”的其他学科或行业的专家阅读参考。对于希望了解系统科学的人文社会科学工作者,本书也适其用,可以从中感受到系统科学文化的魅力。

三是本书向读者显示了某些与系统学科密切相关的前沿,虽然有些内容尚未成熟,但可引导读者从教科书所未涉及的领域去学习、研究,产生新的思想火花,为探索未来的攀登者提供一个起步的台阶。

我相信《系统科学发展概论》的出版,将会为传播系统科学思想和系统方法发挥积极作用;同时,我也相信读者们的批评和建议同样会得到作者的热情欢迎,以共同推进我国系统科学的发展。

中国科学院院士、中国自动化学会理事长

A handwritten signature in black ink, appearing to read '戴海马' (Dai Haima), the name of the Chinese Academy of Sciences Academician and President of the Chinese Society of Automatics.

2010年3月于北京

远自古希腊,人们笃信和向往的世界是稳定的、有序的、平衡的、对称的、确定的、线性的……随着科学研究的进展,人们越来越认识到:从弥漫的星云物质到星系、太阳系、地球、生命、人类社会,就是一个平衡性、对称性、稳定性不断破缺的过程;我们所处的大千世界也就是从混沌到有序,从简单到复杂,从低级到高级不断演化的过程。特别是20世纪横断科学蓬勃兴起,一批重大理论的创立与发展,包括40年代以研究存在为主要目标的他组织理论:一般系统论、控制论、信息论;70年代以研究演化为主要目标的自组织理论:耗散结构论、突变论、协同学、混沌学、分形理论等;80年代以研究复杂性为主要目标的复杂性科学。这些理论从更深更广的范围揭示了客观世界的发展变化规律,使人们的认识从平衡态到非平衡态、从确定性到非确定性、从线性到非线性、从无序到有序、从他组织到自组织、从简单到复杂推进。

系统科学把横断科学提出的一些基本概念,诸如系统、结构、层次、信息、控制、反馈、分岔……合理吸收过来,提炼出来,作为丰富和发展自己的养料,使其在一个和谐的框架中运行,并且从各种不同学科所出现的问题出发,说明系统观点的必要性,从而又显现出与其他学科不同的一些特点。

今天,系统科学思想正以空前的广度与深度向人类几乎所有的知识领域渗透,以其跨学科性、综合性和普适性影响并促进当代科学的发展。可以说,人类社会的方方面面,政治的、经济的、文化的、军事的、生态的、管理的,等等,都需要从系统科学中寻找理念、思路和方法。

本书深入浅出地论述了系统科学发展进程中所遇到的一些重要课题,以及科学家们为解决这些问题提出的思想、理论和方法。与系统科学的专著不同,本书面向更为广泛的公众,希望更多的读者走进系统科学,了解系统理论,接受系统思维的熏陶,感受系统科学文化的魅力。本书是从讲座中产生的,作者曾向不同专业的研究生讲授过。听者普遍认为,通过讲座可以引导他们从教科书达不到的地方去学习、研究,产生新的思想火花。对于人才的成长,如果局限于一个专业的圈子里,很少能发现树外还有森林,难免迷失方向。在科技日新月异的今天,向广大公众传播系统思想和系统方法,这已越来越成为一种社会需要了。

本书的出版得到很多人士的帮助与支持,在此表示衷心的感谢!首先,感谢中国科学院院士、中国自动化学会理事长戴汝为教授为本书写序,并给予热心的支持与指导;感谢我国著名系统工程学家、中国航天科技集团公司博士生导师于景元教授审阅了部分章节的书稿,并提出了使作者受益匪浅的意见;感谢我国著名数学家、中南大学博士生导师侯振挺教授建议作者撰写本书,并提出宝贵意见;感谢中国科学院院士、华中科技大学博士生导师杨叔子教授对作者研究工作的一贯关心与鼓励。其次,我们还要感谢清华大学出版社的相关领导与本书的责任编辑,是他们的鼎力相助才让本书得以顺利出版。

作者在撰写本书过程中,参考、引用和融合了大量国内外有关领域的文献论著及研究成果,同时也加进了作者多年从事教学科研工作的一些思考成果。作者在此对书中所涉及的专家、学者表示衷心的感谢!

在研究系统科学发展的道路上,本书只是一块问路之石,引玉之砖。期望能得到每一位读者的赐教与指正。

作 者

2009年11月3日

第 1 章 系统科学发展概观	1
1.1 系统科学的产生和发展	2
1.1.1 “老三论”	3
1.1.2 “新三论”	7
1.1.3 复杂系统论	8
1.2 系统科学的研究对象	10
1.2.1 简单系统	10
1.2.2 复杂系统	11
1.2.3 复杂网络	11
1.2.4 大型集成系统的体系	12
1.2.5 复杂任务	13
1.3 系统科学的社会意义	13
1.4 系统科学的发展前景	17
1.4.1 系统科学发展的前沿和趋势	18
1.4.2 系统科学的统一理论	19
1.4.3 系统科学跨学科、交叉性的研究进路	21
1.4.4 系统科学的哲学提升	22
参考文献	23
第 2 章 从确定性到不确定性	24
2.1 两种对立的科学观：机械决定论与辩证唯物论	26
2.2 不确定性的数学描述	28
2.3 随机不确定性的数学处理方法	33

2.4	模糊不确定性的数学处理方法	39
2.5	粗糙不确定性的数学处理方法	44
2.6	结语	50
	参考文献	52
第3章	从线性到非线性	53
3.1	线性理论	54
3.2	非线性理论	58
3.2.1	耗散结构论	59
3.2.2	突变论	61
3.2.3	协同论	63
3.2.4	混沌动力学	67
3.2.5	分形理论	75
	参考文献	83
第4章	从他组织到自组织	84
4.1	自组织现象	86
4.2	自组织的概念与特征	88
4.3	自组织的条件与机制	90
4.3.1	自组织的条件	90
4.3.2	自组织的机制	96
4.4	自组织理论的建立与发展	104
4.4.1	自组织理论的建立	104
4.4.2	自组织理论的发展	108
4.5	自组织理论研究的启示	110
4.5.1	自组织理论的哲学思想	110
4.5.2	经济系统的自组织理论	111
4.5.3	自组织理论对管理思想发展的影响	114
	参考文献	117

第 5 章 从时间的可逆性到不可逆性	118
5.1 牛顿力学中的时间可逆性	119
5.2 爱因斯坦相对论的时间观	120
5.3 量子时间	123
5.3.1 量子的提出	124
5.3.2 新的力学——量子力学	126
5.4 时间之箭：热力学	128
5.4.1 热力学第二定律的诞生	129
5.4.2 什么是熵	131
5.4.3 熵的推导式	132
5.4.4 熵如同“时间箭头”	134
5.4.5 无情的增熵	137
5.4.6 热力学第二定律与生物进化论相悖吗	139
参考文献	140
第 6 章 从简单性到复杂性	141
6.1 复杂性	142
6.2 复杂性科学	145
6.2.1 圣塔菲(SFI)理论	145
6.2.2 开放的复杂巨系统理论	147
6.2.3 复杂适应系统理论	150
6.3 复杂系统	156
6.3.1 复杂系统的涌现理论	157
6.3.2 复杂系统的研究方法	160
6.3.3 复杂系统的建模与仿真	162
6.4 复杂性科学与现代管理	165
6.4.1 经济是一个复杂适应系统	167
6.4.2 企业管理的发展趋势——自组织化	168
6.4.3 分形企业	169
参考文献	170

第 7 章 从复杂系统到复杂网络	172
7.1 复杂性探索从复杂系统到复杂网络	172
7.2 复杂网络研究概要	174
7.2.1 复杂网络的表述方式和主要特征度量	175
7.2.2 复杂网络的发展历程	178
7.2.3 复杂网络的分类	186
7.3 小世界网络与无标度网络的建模及仿真	187
7.3.1 小世界网络的建模与仿真	187
7.3.2 无标度网络的建模与仿真	190
7.4 复杂网络研究中的若干问题	193
7.4.1 网络演化	193
7.4.2 网络加权	195
7.4.3 网络同步	197
7.4.4 网络传播	199
7.5 复杂网络研究对系统科学发展的意义	201
参考文献	203
第 8 章 从最优到满意	205
8.1 优化理论中的令人满意准则	205
8.2 科学决策从最优到满意	210
8.3 满意决策原理	213
8.3.1 最优决策	213
8.3.2 满意决策	214
8.4 满意度方法	218
8.4.1 传统满意度方法	218
8.4.2 可能满意度方法	220
8.4.3 其他满意度方法	221
8.5 满意理论的发展与应用前景	221
参考文献	223

系统科学发展概观

系统科学的概念是中国学者较早提出的,这对理解和解决现代科学,推动它的发展是十分重要的。中国是充分认识到系统科学巨大重要性的国家之一。

系统科学和系统工程在当代中国科学中的地位至关重要,我在访问中国期间已觉察到这一点。在访问中,中国人思考和解决问题的方式一再给我留下深刻印象。我确信,这种思考方式将在全世界传播开来。

——哈肯

不管哪一门学科,都离不开对系统的研究。系统工程和系统科学在整个 21 世纪应用的价值及其意义可能会越来越大,而其本身,也将不断发展,如现在的系统科学已经上升到研究复杂系统,甚至是复杂巨系统了。像人的大脑、互联网等,就是复杂巨系统。这在国外也是一个热门,叫复杂性科学研究。

——钱学森

20 世纪 40 年代以来,系统科学作为一门新兴学科的产生,和以往几次重大科学革命一样,标志着人与社会、人与自然之间又开展了一场新的对话。这场对话的主要内容之一,就是用系统思想、系统原理和系统方法去观察和研究事物,革新传统的科学认识和方法,建立

人类思维的新模式。

1.1 系统科学的产生和发展

当我们去追溯系统科学的研究进路,就能发现它是在现代科学技术高度综合的大趋势下产生和迅速发展起来的。它至少是受到三个方面科学研究影响和推动的结果。

第一,物理学和数学的发展。特别是 19 世纪末统计力学和 20 世纪 20 年代量子力学的建立,把统计规律引入许多学科。与动力学规律不同,统计规律表现出明显的不确定性。统计规律一般涉及由大量元素组成的宏观物体。元素的数目之多,不可能直接求解它们的方程,而必须采用统计方法求大量元素数据的平均值。而在动力学规律中,甚至把一个天体看做一个质点,根据运动规律所建立的微分方程,只要给定初始条件,即可由微分方程的积分导出物体运动的轨迹,每一时刻的物体运动状态都是确定的。

概率统计理论的发展与成熟,及其被引入各个学科特别是物理学中,打破了动力学规律独霸天下的局面,正如德国物理学家玻恩所说:“物理学中的一个新的转折就是原子论和统计学的引入。”

统计规律的实质是概率性的,涉及自然界的随机现象。热力学第二定律中的熵直至信息概念的提出,就是这一研究的逐步深入。

第二,生物学和生命科学的进展。科学研究告诉我们,生物界不是一个用牛顿理论所描绘的确定性机械世界。另一方面,生物个体行为也不能用统计力学和量子力学所用的统计定律来刻画。生命的活动中既有或然性,也有必然性。生命是怎样把必然与偶然统一起来的? 20 世纪三四十年代,生物学家提出了“内稳定”概念,意味着人类对这一问题的认识已推进到新的阶段,它直接为控制论的诞生奠定了基础。

第三,计算机的迅速发展,为人类探索复杂性提供了必备的、强有力的技术工具。系统复杂性的特点就是其内涵极其丰富,所以不能过分简化,但又不能用有效处理高度随机性的办法来进行研究。因此,在计算机技术尚不发达之前,对于系统复杂性的研究无法有效

开展。随着计算机技术水平的提高,推动了人类对思维规律的探讨,刺激了人工智能的新发展,也开拓了系统科学新方法论的可能性。

一门新学科的产生必须是社会发展的需要。这一点从技术与人的关系这个角度来看很清楚。技术与人的协调问题是非常复杂的,由于以前各门学科各自发展,人类社会的复杂性,学科之间的互补性与知识的统一性都没有合乎逻辑地表达出来。作为沟通的媒介物和新的方法论,系统科学就应运而生了。它的发展大致经历了三个阶段,即 20 世纪 40—60 年代:系统科学的形成;70—80 年代:自组织理论的建立;80 年代中期以来:复杂系统科学的兴起。

1.1.1 “老三论”

系统科学的产生始于一般系统论、控制论和信息论。它们分别是美籍奥地利生物学家贝塔朗非(L. V. Bertalanffy)、美国数学家维纳(N. Wiener)和申农(C. E. Shannon)创立的,这是第二次世界大战后横向科学蓬勃兴起的标志性成果。在我国把一般系统论、控制论和信息论统称为“老三论”,其影响极其广泛,具有很高的知名度。

“老三论”为系统科学创立了三个核心概念:系统、信息与控制。

1. 系统

任何事物,不管是石头还是生物,是人类社会还是别的什么,我们都可以把这个整体看做是一个系统。所谓一般系统乃是对系统的共性做出了一定的概括,如系统的整体性、层次性、关联性、动态性、有序性、目的性,等等。而一般系统论就是适用于一切系统而不是某类特殊系统的理论。简言之,一般系统论研究的对象不是具体系统(如机械系统、生物系统)而是抽象的一般系统。这就告诉我们,系统科学的研究内容也主要是揭示一般系统的“同构性”问题。所谓系统的同构性,是指各个不同性质的系统之间所表现出来的存在方式和运动方式上的一致性,即所有系统共同遵守的规律。

系统论用系统概念来把握研究对象,始终把对象作为一个整体来看待,并强调系统结构与功能的研究,以及系统、要素、环境三者的相互关系和变动的规律性研究。在思维方式上把分析和综合辩证地结合起来,使系统方法形成了如下模式:首先,从整体出发进行系统综

合,得到各种可能的系统方案;其次,系统地分析各个要素及其关系,建立数学模型;最后,对数学模型进行优化选择并重新综合成整体。

系统论以其思维方式的变革改变了传统的机械分析的思维方式,开启并形成了系统综合的思维方式,为人类理性认识客观世界提供了一种新的科学视角。

2. 信息

什么是信息?通俗地讲,信息是人们直接或间接感知的一切有意义的东西。在申农创立信息论之前,人们认为信息是无法定量描述的,比如一篇文章,一幅绘画或者一段音乐,谁也不敢告诉我们它们包含的信息量是多少。申农确立信息量的大小,引用了一个非常重要的概念——概率。概率是用来表示各种可能性实现的机会大小的一个量,人们把必然发生的事件的概率规定为1,把绝对不可能发生的事件的概率规定为0。我们可以通过概率来精确地计算信息量的大小。申农严格证明,如果某事物具有 n 种独立的可能状态: $x_1, x_2, \dots, x_n$,每一状态出现的概率分别是 $p(x_1), p(x_2), \dots, p(x_n)$,且有关系 $\sum_{i=1}^n p(x_i) = 1$ (即归一化),则该事物具有的信息量为

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \lg p(x_i)$$

式中 $X = \{x_i\} (i=1, 2, \dots, n)$ 。当对数的底取2(二进制),且 $n=2, p(x_1)=p(x_2)=\frac{1}{2}$ 时,则 $H(X)=1$,并以此为信息单位——比特(bit)。1比特就是含有两个独立的,等概率可能状态的事件所具有的不确定度被消除时所需要的信息量。

要使一个系统从杂乱走向有序就要有信息,而信息的丧失则意味着杂乱程度的增加。可见,信息对于揭示事物的组织结构程度、研究物质和能量的时空分布不均匀程度以及系统的演化方向等问题,有着重要的意义。

信息概念丰富了科学认识的范畴,为科学家认识客观事物的本质联系提供了新的重要思维工具,并使科学向着新的方向和更高的

水平发展。

例如,用信息概念来考察人的视觉,可知视觉是通过光信号进行的通信及接受过程。从信息传输来看,光信号包含振幅和频率两种信息,可是通常的照相只接收和处理其中的振幅信息,因此照出的像是平面的。当发现这种“失真”乃是信息不全所引起时,便产生了“完全信息”的思想,导致全息照相术的诞生。

用信息方法揭示各种复杂系统的共同属性,使得生物系统中的生命现象;神经系统中的记忆与指挥;技术系统中的通信、控制、导航、计算机;人类社会系统中的生产过程、经济管理、交通调度等,其物质构成和运动形态都极不相同,运用传统方法很难发现它们之间的联系。而信息方法则把它们统统看成通信和控制系统,通过研究它们共同存在的信息接收、存贮、加工和传输的变换过程,就能揭示其信息联系和共同属性。

信息概念引入基因理论,把传输和反馈特性同控制论的思想相结合,使基因理论朝着揭示生物遗传奥秘的方向迈进了一大步。这引起分子遗传学乃至整个现代生物学发生了深刻的变革。

今天,人类正进入信息时代,全球信息化是历史的必然。信息科学的迅速发展,将使人类的社会经济开始迈入一个崭新的时期。现在“信息”这个名词,几乎家喻户晓,信息就是数据、密码、情报。或者较准确地说信息是经过处理的数据,是知识的总称。在市场经济中,信息就是市场信息,其中最主要的是市场供求关系和市场价格情况。商品的更新要根据社会需求来安排生产。经济要发展,预测市场形势是十分重要的,而信息是预测的依据,也是决策的前提。

在现代管理中信息管理具有极为重要的作用。管理过程就是系统的主客体以信息为中介,进行相互作用和相互联系的过程,也是主体对客体进行调控与协调的过程。信息及时有效的反馈和沟通,对于实现人、财、物等要素的良性循环,达到管理目标和优化管理效果,协调主体与客体、内部与外部的关系都具有特别重要的意义。

信息是现代管理的中介,对个人来说“信息是机会,信息是财富”。信息意识的强弱,利用信息能力的高低,已成为衡量一个人或一个企业是否具备竞争力的重要标志之一。