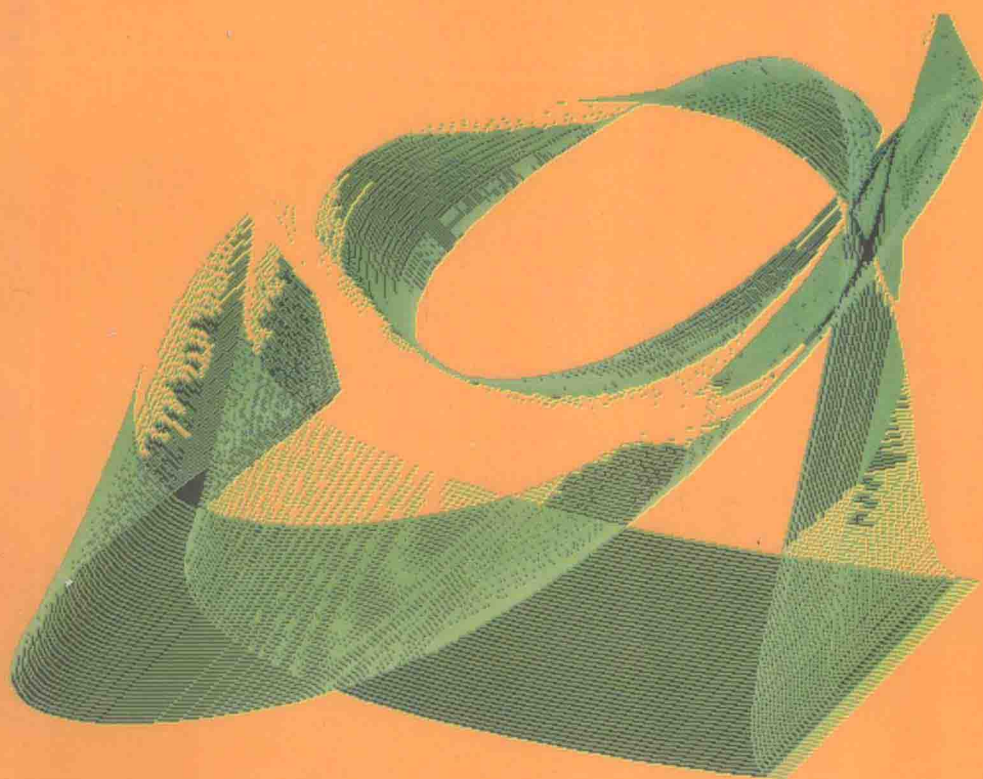


地下水系统的模拟 预测和优化管理

卢文喜 著



科学出版社

地下水系统的模拟预测和优化管理

卢文喜 著

科学出版社

1999

内容简介

本书以具有横断性质的系统科学为指导,系统地阐述了地下水系统的模拟预测和优化管理。内容包括系统科学概论、模型化方法、地下水系统的预测模型、优化模型、预测模型与优化模型的耦合集成技术、研究实例及计算机程序等,并将这些组成部分进行恰当地组装配套,使之形成一个有序的完整的技术体系。内容反映了国内外地下水系统预测与管理的新进展,既有理论基础,又有实施的技术路线和应用实例。为探讨地下水资源开发和保护的最优策略,协调人地关系,实现资源和环境的可持续发展,提供了理论依据、技术方法和思维模式。

本书可供与水资源开发利用和规划管理有关的大专院校本科生和研究生用做教材或教学参考书,也可供从事水资源、农业、环保、生态、地理等工作的科技人员参考。

地下水系统的模拟预测和优化管理

卢文喜 著

责任编辑 关元秀

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码 100717

东北师范大学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

* * *

1999年1月第一版 开本:787×1092 1/16

1999年1月第一次印刷 印张:11 3/8

印数:1—1 000 字数:260 000

ISBN 7-03-007144-1/0·1071

定价:20.00 元

前 言

没有水就没有生命。水是人类生活、经济发展和社会稳定不可缺少、不可替代的自然资源,它还是生态环境的重要组成部分。随着社会、经济的发展,人类对水资源的需求量日益增长,本世纪以来,全世界的淡水用量增长了8倍,其中农业用水增长了7倍。目前,世界淡水用量每年仍以5%左右的速度递增。但水资源并非取之不尽,用之不竭。1997年1月联合国发布的《世界水资源综合评价报告》中指出:缺水问题将严重制约下个世纪的经济和社会发展,并可能导致国家间发生冲突。目前世界上已有超过五分之一的人口生活在中等或高度供水紧张状态之中。水资源不久将成为一个严重的社会危机。

我国是世界上水资源最为紧缺的国家之一。虽然水资源总量居世界第六位,但由于人口众多,人均占有的水资源量仅2400立方米,只相当于世界人均的四分之一,排在世界的110位。联合国粮农组织将中国列为重贫水国家之一。

近年来,随着我国人口的增加,城市规模的扩大和工农业的发展,我国的水资源危机日趋严重,已经成为制约我国经济发展、损害生态环境的主要因素之一。

地下水资源是水资源的重要组成部分,特别是在干旱、半干旱的我国北方地区,有的地方地下水成为城市生活用水及工农业生产用水的主要供水水源。由于对地下水的过量开发及污染物的任意排放,在某些地方已造成地下水位持续下降及水质的不断恶化,严重地威胁着人类赖以生存的生态环境。地下水位持续下降引起了一系列环境负效应,诸如水源枯竭、地面沉降、海水入侵以及土地的沙漠化等。水质恶化大大地降低了地下水的适用性,使有限的地下水资源变得更少。此外,地下水还是全球水循环的重要组成部分,是联系大气圈、岩石圈和生物圈的纽带,是地球表层各种物理、化学和生物作用过程中最活跃的介质,是生态系统物质循环、能量传递过程中重要的传输媒介。地下水资源的枯竭及水质的恶化必会损害地下水上述作用的发挥。

因此,以具有横断性质的系统科学为指导,探讨地下水系统的模拟预测和优化管理,研究地下水资源的最优开发策略,协调人与自然的关系,使人类社会系统与水资源环境系统达到协同演进,实现资源、环境、经济和社会的可持续发展,已变得十分重要。

运用系统科学的方法,把地下水放在系统的水平上加以研究,能够提高分析问题和解决问题的能力,扩展考虑问题的思维空间,也便于把地下水的传统研究方法与现代先进技术接轨。

地下水系统的优化管理是决策科学在地下水开发利用过程中的应用。在决策分析阶段,建立和运用地下水系统优化管理模型是研制最优实施策略、实现优化目标的主要手段。从某种意义上来说,地下水系统的优化管理亦属于软科学的内容,主要目的是为各种类型及各个层次的决策提供科学依据,是促进决策科学化的重要途径之一。

地下水系统的优化管理是以地下水系统本身固有的物理规律为基础,充分分析并描述地下水系统所面临的决策环境,通过对地下水系统的人为可控输入策略的优化调控,使地下水系统的状态行为和功能效果按照所确定的目标衡量达到最优的运筹过程。而地下

水系统优化管理模型则是完成这一运筹过程的主要工具。在地下水系统优化管理的概念中包含了以下四个要点:

(1)在地下水系统优化管理的整个过程中,都必须以地下水系统本身所固有的物理规律为基础,不能违背。这些物理规律包括水均衡原理和能量守恒及转化原理,通常由描述地下水位与开采流量之间关系的地下水系统的预测模型来表达,并以适当的转换形式,反映在优化管理模型之中。

(2)地下水系统的优化管理除了考虑地下水系统本身之外,还要考虑与之有关的政治、经济、生态等因素,即还要考虑地下水系统所面临的决策环境。所谓决策环境是指与制定决策有关的各种因素构成的整体,具有动态变化剧烈、模糊性强、耦合度高的特点。决策环境通常以约束条件的形式表达在优化管理模型之中,一般包括水力状态约束、供需约束、生态约束和社会经济约束等。

(3)优化管理是一种有目的活动,使地下水系统的状态行为和功能效果按照所给定的目标达到最佳是优化管理的目的之所在。

(4)实现地下水系统优化管理目标的操作手段在于对地下水系统的人为可控输入策略的最优调控。因此,可以说地下水系统优化管理在决策分析阶段的主要目的就是运用优化管理模型寻找最优调控策略。

地下水系统的优化管理模型一般泛指赋予地下水系统管理内容的数学上的优化模型。从表现形式上看,它就是数学上的各种优化模型,包括线性规划、非线性规划、动态规划和目标规划等,只不过它所描述的内容是有关地下水系统管理的内容。从地下水系统优化管理模型的构建上来说,可以认为地下水系统优化管理模型由三个部分构成:(1)预测模型,(2)优化模型,(3)预测模型与优化模型的耦合集成技术。其中的预测模型用以描述地下水系统输入与输出之间的响应关系,即对应某个输入决策而产生的效果,是地下水系统本身固有特征的表达。优化模型用以描述地下水系统及其所面临的决策环境,除了包括地下水系统本身的因素之外,还要综合考虑与地下水系统开发利用和生态环境保护有关的政治、经济、生态等多种因素,通常以目标函数和约束条件的形式予以表达。预测模型与优化模型的耦合集成技术是运用某种技术方法把预测模型的转化形式表现在优化模型之中,实现二者之间的耦合集成,完成地下水系统优化管理模型的构建。

地下水系统优化管理模型的分类可以其三个组成部分中的任意一个作为划分依据进行分类。如以预测模型的特征作为划分依据可以划分为:集中参数优化管理模型,分布参数优化管理模型等。若以优化模型的特征作为划分的依据,可以划分为:线性规划模型,非线性规划模型,动态规划模型,目标规划模型等。如以预测模型与优化模型的耦合集成技术的特点作为划分的依据,则可划分为:嵌入法优化管理模型,响应矩阵法优化管理模型,状态转移方程法优化管理模型等。当然还可以以其它因素作为划分依据进行分类。

在决策分析阶段,建立和运用地下水系统优化管理模型的过程是,首先要全面系统地调查分析地下水系统本身及与之有关的各种因素、过程和联系,在此基础上去粗取精,去伪存真,抽象概化,建立地下水系统的概念模型,然后以概念模型为基础建立预测模型,再以预测模型为基础,综合考虑构成决策环境的其它多种因素建立优化管理模型,最后还要对由优化管理模型得到的各种决策方案进行评价,从中选择所要实施的决策方案。

从更高层次上看,人们在地下水系统预测和管理中的研究过程,可以看作是人们在进行地下水开发、利用和保护过程中的一种认识过程,是人们的主观认识(决策)向客观实际无限趋近的过程。从现实地下水系统的调查分析出发,到概念模型的建立,实现了从客观世界到观念世界的飞跃,然后再从观念世界进入信息世界。预测模型、优化模型都可看作是对信息的加工处理,然后再把从信息处理中得到的最佳决策用于指导人们的实践活动,即从信息世界返回到客观世界,变成改造客观世界的强大动力,实现认识上的另一次飞跃。人们的主观认识与客观实际总是有距离的,因此这是一个无限趋近的过程,是一个由相对真理向绝对真理趋近的过程,是永远不会穷尽的。如果认为所建立的模型和所得到的决策完美无缺,则是不正确的。明确地认清这一点,对于指导人们的实践活动,明确努力的方向,是十分有益的。

值得一提的是,有些文献将“优化”与“管理”等同起来,由此认为,优化模型就是管理模型。但事实上二者是有区别的,管理模型是管理者为控制全局和整个过程而采用的研制管理决策的工具,比优化模型具有更广泛的内涵和更高的层次,既包括定量的计算,还包括定性的描述。而优化模型是利用优化技术研制最优决策的数学模型,应属管理模型的一部分。因此将赋予地下水系统管理内容的优化模型称为优化管理模型较为合适,本书使用“地下水优化管理模型”这一概念。

本书共分七章。第一、二章分别为系统科学概论和模型论,作为地下水系统模拟预测和优化管理的方法论基础。第三、四、五章分别为预测模型、优化模型、预测模型与优化模型的耦合集成技术,是组成地下水系统优化管理模型的三个组成部分。第六章是研究实例,其中的一些技术方法是作者在从事地下水系统预测和管理的实践中为解决某些具体的实际问题而提出来的。第七章为计算机程序,为适应求解多目标优化管理模型的需要,本章给出了求解线性目标规划和非线性目标规划的两个源程序。这两个程序已经多个算例验证,可靠性和通用性强,且输入操作简便,输出表达清晰,适用性好。在结构布局方面,作者力图把本书的各组成部分进行恰当地组装配套,突出它们之间内在的逻辑联系,使之形成一个有序的完整的技术体系。

本书的撰写先后得到了林学钰院士、罗焕炎教授、房佩贤教授、曹以临教授、杨天行教授、廖资生教授的悉心指教,特别是祝廷成教授,在内容构思和结构布局方面给予了关键性的指导,李建东教授、祖元刚教授、郭继勋教授、杨允非教授、周道玮教授、林年丰教授、邹立芝教授、曹剑锋教授和高林本高级工程师给予了热心的关怀和支持,在此一并表示诚挚的谢意。

限于作者的学识水平,书中肯定存在不当之处,殷望读者不吝赐教。

作者

1998年8月9日

目 录

前言	(i)
第一章 系统科学概论	(1)
第一节 系统科学的研究对象、性质和体系	(1)
一、系统科学的研究对象	(1)
二、系统科学的性质	(1)
三、系统科学的体系	(4)
第二节 系统的性质、分类及系统分析	(4)
一、系统的概念	(4)
二、系统的性质	(4)
三、系统的分类	(5)
四、系统分析	(7)
第三节 系统科学的新进展	(8)
一、耗散结构理论	(8)
二、协同论	(11)
第四节 地下水系统	(13)
第二章 模型论	(15)
第一节 模型的概念	(15)
第二节 模拟的概念	(16)
第三节 模型的分类	(16)
第四节 数学模型的特点及其分类	(17)
第五节 建立数学模型的一般要求	(18)
第六节 建立数学模型的一般步骤	(19)
第三章 地下水系统预测模型	(20)
第一节 地下水系统的概念模型	(20)
一、地下水系统概念模型的定义	(20)
二、建立地下水系统概念模型应遵循的原则	(20)
第二节 地下水系统的预测模型——数学模型	(21)
一、描述地下水系统的偏微分方程	(21)
二、偏微分方程中的参数、定解区域和定解条件	(23)
三、地下水系统数学模型的组成	(25)
第三节 地下水系统数学模型的校正	(26)
一、数学模型校正的概念	(26)
二、数学模型校正的直接解法	(27)
三、数学模型校正的间接解法	(27)
第四节 地下水系统数学模型的解法	(28)

一、解析法	(28)
二、模拟法	(29)
三、数值法	(29)
第五节 地下水系统数学模型的运转	(29)
第四章 优化模型	(31)
第一节 线性规划	(31)
一、线性规划问题的数学描述	(31)
二、两个变量线性规划的图解法	(32)
三、线性规划问题的标准形式	(36)
四、线性规划问题的解法	(37)
第二节 非线性规划	(56)
一、基本概念	(56)
二、优化问题迭代算法的基本思想	(59)
三、一维搜索方法	(61)
四、无约束最优化方法	(64)
五、约束最优化方法	(69)
第三节 动态规划	(75)
一、多阶段决策问题	(75)
二、动态规划的基本概念	(76)
三、动态规划的基本思想及其最优化原理	(80)
四、运用动态规划解决实际问题的例子	(84)
第四节 目标规划	(87)
一、基本概念及目标规划模型的建立	(87)
二、解线性目标规划的修正单纯形法	(90)
三、解非线性目标规划的模式搜索法	(98)
第五章 预测模型与优化模型的耦合集成技术	(104)
第一节 嵌入法	(104)
一、嵌入法的基本原理	(104)
二、应用嵌入法构建优化管理模型的例子	(105)
三、嵌入法的特点及存在的问题	(109)
第二节 响应矩阵法	(110)
一、响应矩阵法的基本原理	(110)
二、线性系统	(110)
三、单位脉冲响应函数	(112)
四、地下水系统的单位脉冲响应函数和响应矩阵	(113)
五、应用响应矩阵法构建优化管理模型的例子	(116)
六、响应矩阵法在实际应用中存在的问题	(117)
第三节 状态转移方程法	(118)

一、状态转移方程法的基本原理	(118)
二、状态转移方程的建立	(119)
三、获得 Jacobian 矩阵的方法	(120)
四、大时段与其内的小时段状态转移方程间的关系	(121)
五、运用状态转移方程建立和求解优化管理模型的过程	(123)
第六章 研究实例	(125)
第一节 三维边界元与二维有限元的耦合模拟技术	(125)
一、三维边界元法	(125)
二、二维有限元法	(128)
三、三维边界元与二维有限元的耦合	(130)
第二节 地表水地下水的联合模拟	(134)
一、地表河水的模拟模型	(134)
二、地下潜水的模拟模型	(136)
三、河水与潜水的耦合方程	(136)
四、联合模拟模型的计算过程	(138)
第三节 地下水模拟预报过程中降水量的预报	(138)
第四节 中国北方岩溶水系统优化管理模型中处理大泉的方法	(141)
一、模拟预测模型	(141)
二、优化管理模型	(143)
第五节 “准三维”渗流系统的模拟预测及目标规划管理模型	(143)
一、模拟预测模型	(144)
二、优化管理模型	(145)
第七章 计算机程序	(150)
第一节 解线性目标规划的修正单纯形法程序	(150)
一、用户指南	(150)
二、计算实例	(151)
三、程序对于模型规模的限制	(152)
四、用 FORTRAN 语言编写的计算机程序	(152)
第二节 解非线性目标规划的模式搜索法程序	(158)
一、用户指南	(158)
二、计算实例	(159)
三、程序对于模型规模的限制	(161)
四、用 FORTRAN 语言编写的计算机程序	(161)
参考文献	(169)

第一章 系统科学概论

系统科学是最近四五十年来蓬勃兴起的一门新兴科学,它的诞生不仅深化了人们对于现实世界图景的认识,而且还以其特有的新颖思路,改变了人们的思维方式。系统科学包含了一组相辅相成的学科群:系统论、控制论、信息论、协同论、耗散结构理论、突变论和超循环理论等。系统科学提供了一种跨越学科界线,从整体上分析问题、处理问题的新范式、新思想和新方法,具有强烈的方法论性质和横向科学色彩,它的概念、理论、原则和方法日益渗透到科学技术的各个领域、各个层次之中,成为现代科学综合化、整体化的桥梁,从而极大地促进了不同学科的汇流和信息时代的来临,推进了科学技术的进步和生产力的发展。

第一节 系统科学的研究对象、性质和体系

一、系统科学的研究对象

每一门科学都有自己的研究对象。比如,天文学研究的是太阳系、恒星系、银河系、星系以至总星系;生物学研究的是生命系统,即各种不同层次的生物系统;物理学研究的是各类宏观的、中观的、微观的物质系统;等等。但是所有这些学科并不研究离开具体物质形态的一般系统。系统科学则不同,它不研究特定形态的、具体的系统,而是撇开系统具体的形态,特定的结构和功能,研究一般的系统,研究系统的类型、性质,以及运动的机理和规律。通过这种研究为人们提供认识现实世界中各类系统共同的性质和规律,以便按照人的目的和需要在改造、创建各种系统中进行科学的设计、管理、预测和决策。

系统科学所感兴趣的不是某个特定领域的具体的结构、功能、性质和机理,而是作为一般系统的共同的规律性、一致性和同构性。系统科学并不是把它研究的对象作为纯客观的实体,孤立地、静止地把握它。因此,可以这样说,系统科学是一种观察问题的方式。作为它的研究对象,不但系统本身各个要素的联系、要素和系统的联系,而且系统和环境的各种联系、现在的联系和状态与未来的联系和状态等等,都被纳入了考察问题的参考系之中。

二、系统科学的性质

系统科学研究对象的复杂性和研究领域的广泛性,决定了系统科学的特殊性质。这就是它的横向学科性质、综合性质、功能行为性质和方法论性质。

(一)横向学科性质

系统科学不同于研究自然界某一(或某些)物质运动形式的自然科学,例如,系统科学

中的系统论或信息论很难说是属于物理学、化学、生物学或是这些学科内容的叠加。它反映的是自然界各个领域和各门自然科学中共同的东西,也反映社会生活各个领域某些共同的东西,它所研究的系统结构的规定性、系统的类型、机理和运动规律贯穿在自然界和社会各个领域的系统之中。不论是物理世界、生命世界、工程技术和社会组织,都存在着具有一定结构和功能的系统,都有系统的动态演化,也都有系统的信息传递和控制过程。系统科学的概念、理论、方法,是从各个领域和各门科学的研究成果中抽象、概括出来的。系统科学正是基于各门学科,又撇开各种事物、现象、过程的具体特性,撇开各类系统的具体内容,用抽象的方法研究它们的共同方面、一致性和同型性,即系统结构的最一般的规定性、类型、动态机理和运动规律的。

系统科学虽然没有哲学那样高的普遍性和世界观的意义,但是,由于它的横向学科性质,从某一侧面揭示了客观世界和人类知识中共同性的东西,从而能够在各个学科、各个领域发挥它的方法论作用。

(二)系统科学的综合性质

系统科学的综合性质,首先表现在在研究方法上综合融汇了各个领域、各门科学的研究方法和方式。它综合了人类认识世界和改造世界的历史发展中所建树的重要方法与手段。

其次,系统科学的综合性质还表现在,它从方法论的侧面把各门科学整合、融汇、沟通起来,从而使它具有大科学或整体科学的特点。系统科学的综合性是与现代科学的综合化、整体化、一体化的趋势相适应的。它反映了科学理论在形式结构上和方法论上的一致性和统一性。系统科学的各个学科,特别是系统论、控制论和信息论,正是从不同方面起了这种综合和统一的作用。例如,系统论既综合了各门科学的整合的功能,又从形式结构方面把各门科学整合起来;控制论既综合了人类各门知识发展过程中的反馈控制的机制,也为各门科学在实践中的应用提供了参与、融汇、调节的方法论依据;信息论所研究的信息过程既是对各类知识、概念、范畴、公理、定律等等运演过程的综合与概括,也为各门科学知识的沟通提供了科学的方法与手段。因此,系统科学虽然不是“大一统”的科学,但却具有某种意义上的综合科学或“大科学”的性质。

(三)系统科学的功能行为性质

系统科学就其本质,可以说是研究事物的功能行为的。也就是说,它主要不是研究“这是什么?”而研究“它做什么”和“怎样做”的问题。它并不把客观事物作为纯粹的实体,深究其基质构成及其发展变化的原因,而在运动发展的过程中,在动态中研究它的功能行为。至于它的研究对象的实体是什么,物理、化学的规律是否适用,却无关宏旨。所以它所注重的是动态的方法,功能行为的方法。

系统科学的功能行为性质还表现在,它的很多分支学科,特别是应用学科,例如系统工程、运筹学、工程控制论等等,所侧重研究的主要不是“物理”,而是“事理”,不是单纯自然的、“物理”的联系,而是包含着人的因素的“事理”的联系。作为系统科学的一个分支学科——事理学,就是定量地研究特定的政治、经济、军事和社会事务或过程的基础理论。这种事理本身就带有很大程度的行为的和人为的性质。在现代社会里,没有人参与的单纯自然系统的功能是不能满足人的需要的。系统科学的产生,人们研究各类系统的目的,

就是为了寻求在人的参与下变革系统的结构,形成有利于人的系统功能的条件、程度和界限。就此而论,也可以说,系统科学具有一定程度的“人为科学”的性质。

(四)系统科学的方法论性质

由于系统科学的横向学科性质,综合性质,功能行为性质,可以看到它虽然不是哲学方法论,却具有一般方法论的意义。

系统科学的方法论性质,首先表现在它的基本原理和方法总的都是从系统观点出发的,即着重从整体与要素之间、整体与外部环境之间的相互联系、相互作用中,既综合又精确地考察对象,并定量地处理它们之间的关系,以达到最优化处理问题和解决问题的目的。系统科学各种理论中所包含的方法,如一般系统论(数学意义上的)、控制论、信息论、集合论、图论、网络理论、博弈论和决策论等等,都具有一般方法论的意义。

其次,系统科学为我们提供的是有机的、能动的或功能性的系统,充分体现了系统的目的性、选择性。系统论、控制论告诉我们:与牛顿力学中那种没有结构、没有内部外部之分的质点不同,作为系统存在的事物都是结构—功能的统一体;系统自身的结构和功能的存在,使得环境不能直接决定事物的变化,而必须以事物自身为中介。系统中的约束信息——即有一定程度的目的和组织的信息——的存在,不仅可以“记忆”过去经验,把它贮存在自身结构中,通过它来调节、协调系统的行为和各部分的关系,甚至能对环境作出“超前反应。这样,系统就能使外界环境对它们内部环境(表现为状态)的影响缩小到最小程度,从而在变化多端的环境中保护自身质的规定性,保持内部条件的稳定。对于复杂系统来说,这种稳定性调节能够扩大到外部环境——以致改变和组织外部环境去适应自己的内部结构。正是系统的这种功能特性赋予系统以相对的独立性、选择性和主动性。

第三,系统科学提供了一套具有哲学意义和方法论意义的概念和范畴。系统、信息、熵、控制、反馈、稳态、功能、结构、涨落等等,这些概念和范畴是人们长期对系统的各种联系和关系认识的成果,是对系统各个方面的本质所作的概括和反映。这些范畴的出现本身就标志着人们对世界的认识已经进入一个新的阶段,即从存在到演化,从实体到关系,从对实体和属性的认识到对功能和价值的认识的新阶段。它们是今天人们认识和掌握自然和社会之网的网上纽结。其中许多范畴,例如系统、信息、结构、功能、熵等等事实上已经具有普遍的、世界观和方法论的意义,成为现代哲学不可缺少的基本范畴。人们正是运用这些范畴认识客观事物的系统性质,为人们进一步变革系统提供了科学的思路、合理的途径和有效的方法。

例如,“熵”这个概念是1965年德国科学家克劳修斯在讨论热循环时首次引入的,当初他只把熵作为表达热力学第二定律的一个概念;熵作为“分子无序”的量度,第二定律也可以说是熵增加定律。以后,经过许多科学的研究,特别是玻尔兹曼在统计力学方面和申农在信息论方面赋予了熵以新的内容。现在熵已经在远离热力学的领域,诸如概率论、数论、信息论、语言学、生物学、生态学和环境科学以及许多社会现象中得到了运用。美国经济学家布尔丁还把熵概念引进到社会领域,提出一套“组织化理论”。布尔丁认为,生产是进化,是以形成高熵“废物”为代价而造出高度有序的低熵产品。消费意味着向无序退化,是增熵过程。矿石变成钢铁、小麦成为面包,当然是更趋于有序;而机器变成锈铁,面包变成粪便,无疑是增熵。近年来,比利时的科学家普利高津经过长期对非平衡态热力学和统

计物理学的研究,就是用熵、有序、无序、耗散、涨落等概念来解释生物高分子的结构和功能、新陈代谢、生长发育等生命现象,提出了“耗散结构”理论的。可见,像熵这样的概念对于扩大人们认识的领域,强化人们认识的能力,是有着十分重要意义的。

三、系统科学的体系

近年来,我国著名科学家钱学森,对于系统科学体系作了大量研究,提出了一套有独到之处的见解,为系统科学的建立作出了较大的贡献。

钱学森的系统科学体系与他的科学体系的总体思想是一样的,他把各个门类的科学都看作是由三个层次构成的,即工程技术、技术科学和基础科学,再上去就是哲学领域。各个层次特定质的规定是:工程技术层次——直接改造客观世界的知识,诸如土木工程、水利工程、电气工程等等;技术科学层次——工程技术共用的各种理论,是对工程技术进行理论概括而产生的、作为工程技术直接的理论基础,如建筑学、水力学、电工学等等;基础科学层次——认识客观世界的基本理论,是对技术科学的进一步概括,上升为更高层次的科学理论,就是自然科学的基础科学,如物理学、化学、生物学等等;通向哲学的桥梁——对应于该学科的哲学分论,它使基础科学上升为人类知识最高概括的哲学,如自然辩证法就是自然科学通向哲学的桥梁。按照这一标准,钱学森把现代科学技术分为九大门类:自然科学,社会科学,数学科学,系统科学,人体科学,思维科学,军事科学,文艺科学,行为科学。每一门类都分三个层次,并通过各自的桥梁通向哲学。对于系统科学而言,它也包含三个层次,这就是系统科学的工程技术层次——各门系统工程、自动化技术和通讯技术;系统科学的技术科学层次——控制论、信息论、运筹学;系统科学的基础科学层次——系统学。除此之外,还有一个系统科学与哲学之间的桥梁,即系统观或系统论。

第二节 系统的性质、分类及系统分析

一、系统的概念

“系统”这一概念是人们在长期社会实践中形成的,由来已久,古希腊的哲学家就已经使用了这个概念,但是,系统真正作为一个科学概念进入到科学领域,还是本世纪 20 年代以后的事。目前关于系统这一概念还没有一种一致的看法。按照美国的 Webster 大辞典,对系统这个概念是这样定义的:系统是组织的或组织化了的整体。在日本 JIS 工业标准中,对系统的定义是:许多组成部分保持有机的秩序,向同一目标运动,就叫做系统。我国学者钱学森的定义是:系统就是由相互作用相互联系的若干部分结合而成的具有特定功能的有机整体,而且这个系统本身又是它所从属的一个更大系统的组成部分。

二、系统的性质

从微观到宏观,从无机界到有机界,从自然界到人类社会,都普遍地存在系统。各种系统虽然千差万别,但窥其本质,它们都具有许多共同的基本特征。

(一)集合性

系统都是由两个或两个以上的要素按照一定方式组合而成的。单个要素不能构成系统,世界上的一切具体事物、现象、概念,都可以构成系统。作为构成系统的要素可以是单个事物,也可以是一群事物组成的子系统。系统的这个性质被称为系统的集合性。

(二)关联性

系统内的各要素、各子系统之间都是相互联系相互制约的,系统内的任何要素的改变都可能作用到其它要素并使其发生变化,以致影响到系统整体的状态。系统的这种性质被称为关联性。

(三)整体性

系统是由若干要素按其内在的结构特性和逻辑要求组成具有一定功能的有机整体。系统的整体功能并非是其组成部分的功能的简单叠加,而是其任何组成部分所不曾有的。系统的这种性质被称为整体性。

(四)环境性

任何系统总是存在于特定的环境之中,并与环境不断地进行物质、能量和信息的交换。外部环境的存在和发展,对系统的变化有直接的影响和作用。系统的发展和变化,也对环境产生直接的影响和作用。系统的这种性质被称为环境性。

(五)层次性

对于某个系统来说,它既是由某些要素(或子系统)组成的,同时它又是组成更大系统的一个要素(或子系统)。系统的这种性质被称为层次性。

三、系统的分类

世界上存在着各种各样的具体系统,需要根据其共同点和差异点进行分类。系统的分类方法有很多,这里仅对下述两种分类进行讨论,其一是根据现实系统的实际内容进行分类,其二是根据系统数学模型的特性进行分类。

(一)按现实系统的实际内容进行分类

1. 一般系统与具体系统。在系统科学中,“一般系统”概念作为一个专业术语,是指从各种现实系统中抽去特殊内容而得到的抽象物,实则指所谓“系统”本身。相反,含有实际内容的各种现实系统,不管它是天然的还是人造的,物质的还是概念的,生命的还是非生命的,都叫作具体系统。显然,一般系统体现各种现实系统的共性,而具体系统则是一般系统的各种表现形式,它除了具有一般系统属性外,还具有各种特殊属性,系统科学的研究对象即包括一般系统,还包括具体系统;研究一般系统,决不能脱离具体系统的研究,不仅如此,必须从具体系统中发现一般系统的一般规律。

2. 天然系统与人造系统。具体系统,根据它是不是人造的,可分为天然系统和人造系统。人造系统,是指靠人的劳动和其他活动制成的各种系统。例如,石器、房屋、机器、人造卫星、电子计算机等都是人造系统,人类文化系统、科学技术体系等也是人造系统。天然系统,是指与人类的劳动和其他活动无关而产生和存在着的各种系统,例如,地球、太阳系、银河系等都是天然系统。

3. 自然、社会与思维系统。在科学的传统上,人们把对象世界分为自然系统、社会系

统和思维系统。思维系统,是指由人的神经、心理、语言、逻辑、思维方法以及其他思维工具组成的系统。思维系统的结构与功能以及发展规律乃是思维科学的研究对象。社会系统即人类社会,是指由相互发生社会联系的众多个人组成的总体。社会系统可分为政治、经济、军事、教育、行政等子系统,这些子系统则是社会科学各分支学科的研究对象。除思维系统和社会系统之外的一切系统,被统称为自然系统。它分为生物系统和物理系统,前者为生物科学的研究对象,后者是物理科学(包括物理学、化学、天文学、地学)的研究对象。

4. 物质系统与概念系统。具体系统,根据其要素是物质还是概念,又可分为物质系统与概念系统。物质系统,是指以各种物质(和能量)作为要素而构成的系统,例如原子、分子、矿山、气象、海洋、机器、人,等等。概念系统,是指以各种概念作为要素而构成的系统,例如科学体系、法律体系、宗教体系、哲学体系,等等。

5. 生命系统与非生命系统。一切活着的物质系统,称为生命系统,其中包括生物系统和人类社会系统。它们是所谓一般生命系统理论的研究对象。除生命系统以外的一切物质系统,则称为非生命系统,如原子、分子、机器、天体等。物理科学的研究对象一般是非生命系统,但目前越来越多的物理科学家正在探讨生命系统的物理机制。

(二)按系统的数学模型进行分类

1. 封闭系统和开放系统。一个系统如果与环境有输入或输出或输入—输出关系,就称为开放系统,否则就称为封闭系统。即是说,凡具有边缘要素的系统,就称为开放系统,凡不具有边缘要素的系统,就称为封闭系统。这里所说的边缘要素,是指具有下列性质的要素:它的输出不转化或不完全转化为其他要素的输入,或者它的输入不是或不都是来自其他要素。这里需要注意的是,物理学和系统科学在用语上的区别。物理学上通常把系统分为三种:开放系统,指与外界交换物质和能量的系统;封闭(或闭合)系统,指与外界只交换能量而不交换物质的系统;孤立系统,指与外界既无能量交换又无物质交换的系统。

2. 静态系统和动态系统。静态系统,亦称无记忆系统。如果一个系统在任一时刻的输出只与该时刻的输入有关,而与该时刻之前或之后的输入无关,则称之为静态系统。相反,如果一个系统在任一时刻的输出不仅与该时刻的输入有关,而且与该时刻之前的输入有关,则称之为动态系统。动态系统显然是有记忆系统。而动态系统又可分为时不变系统(亦称定常系统)和时变系统。系统无论在何时由同样的输入得出相同的输出,就称为时不变系统,否则就称为时变系统。

3. 线性系统和非线性系统。当把系统的输入或初始状态线性叠加时,系统的输出也能线性迭加,就称该系统为线性系统。不服从叠加原理的,就称为非线性系统。严格地讲,世界上并没有真正的线性系统。实际系统一般都含有各种非线性因素,如感受器的阈值、效应器的疲劳、测量元件的不灵敏区、放大器的饱和等。即使一个线性的电阻器,当施加的电压超过一定阈值时,其物理性质发生变化,从而不满足线性要求。但是因为非线性微分方程至今没有通用的准确解法,所以在较大范围内最好用非线性模型表示的系统,当它的变量保持在一定数值范围内时,往往近似表示为线性系统,而这种线性模型通常具有很高的准确度。

4. 连续系统和离散系统。当系统的状态集 X 、输入集 U 及输出集 Y 是离散集合时,

就称之为离散系统,当 X 、 U 及 Y 是 R^K (R 为实数集) 中的开集时,就称之为连续系统。在系统研究中,十分重要的问题是从系统动态过程与时间的关系上考察系统的连续性和离散性。如果用来描述系统的时间函数 $f(t)$ 的定义域是连续的,即 $t = (-\infty, +\infty)$ 或 $(t_0, +\infty)$, 则称该系统是连续时间系统;如果 $f(t)$ 的定义域是离散的,即 $t = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, 则称该系统是离散时间系统。

在连续时间系统中,系统的输入、输出和状态变化是时间的连续函数,可用微分方程描述。但在离散时间系统中,系统的输入、输出和状态变化是各离散时刻的值,需要用差分方程表示。

连续时间系统理论已在许多领域,尤其在物理系统领域取得了很大发展。而离散时间系统理论正在广泛应于社会、经济及许多工程系统领域,如自动机、脉冲控制、采样调节、数字控制等。

5. 确定性系统和不确定性系统。考虑系统表达式

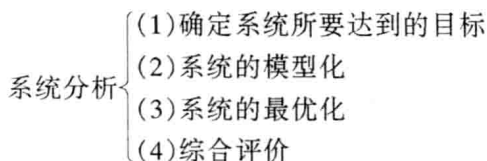
$$S = \{X, U, Y, \delta, \beta\}。$$

其中 X : 状态空间; U : 输入空间; Y : 输出空间; δ 动态(即状态转移函数); β : 输出函数。据此表示的系统可分为确定性系统和非确定性系统。确定性系统是指系统的实时输入和实时状态能明确唯一地规定下一个状态和实时输出。不确定性系统是指系统的实时输入和实时状态不能明确唯一地规定下一个状态和实时输出,即是说,被规定的是一些可能状态的集合或一些可能输出的集合。在不确定性系统中,如果根据实时输入和实时状态能确定下一状态或实时输出的概率分布,则称之为概率系统;否则就称之为非概率不确定性系统,这时被规定的不是下一状态或实时输出的概率分布,而只是其可能状态或可能输出的集合。在非概率不确定性系统中,如把 X 、 Y 、 U 的子集换为各自的模糊子集,就得到模糊系统。在模糊系统中,系统的状态不是状态空间中的点,而是它的子集;对于系统的下一个状态,不知其概率分布,只知其关于给定子集的隶属度。

6. 黑色系统、白色系统和灰色系统。系统根据其“颜色”可分为黑色系统、白色系统和灰色系统。这里,“颜色”是指研究者对系统状态(或系统内部结构与过程)的认识程度。当灰色系统理论产生之前,这三种系统被称为黑箱、白箱和灰箱。所谓黑色系统,是指我们只知道该系统的输入—输出关系,但不知道实现输入、输出关系的结构与过程。所谓白色系统,是指我们不仅知道该系统的输入—输出关系,而且知道实现输入—输出关系的结构与过程。所谓灰色系统,是指我们对于系统实现其输入—输出关系的结构与过程只有部分的知识,尚无全面的知识。

四、系统分析

国内外学者对于系统分析存在着各种不同的解释,名称也不尽相同,有的书上用系统工程,有的则称系统研究。系统分析是这样的一个分析过程:就是对系统的目的、功能、环境、效益等问题,进行充分的调查研究,在收集、分析、处理所获得的信息资料的基础上,确定系统的目标,通过模型进行仿真实验和优化分析,制定达到目标的各种方案并进行综合评价,从而为系统决策提供可靠的依据。系统分析的步骤如下:



系统的目标要依据系统存在的问题和解决问题的需要来确定,要对系统及周围的环境作周密的调查,找出系统的问题对自身和周围环境的影响。系统存在的问题搞清楚了,确定系统的目标就有了充分的依据和坚实的基础。系统的模型化是依据对系统内部结构和外部环境的分析,用一种数学的或逻辑的表达式,从整体上来描述系统的主要组成部分、各部分的相互作用以及系统与环境之间的相互关系。即运用模型来描述系统和系统的行为。系统的最优化是指在一定的环境条件下,通过对各种可控因素的调控,使系统的状态达到最佳。即使系统的结构、功能以及对周围环境的影响都达到最佳。综合评价就是根据评价的项目和评价的准则,结合考虑前提条件、假设条件和约束条件对优化结果进行评价。

第三节 系统科学的新进展

自本世纪 40 年代系统科学问世以来,作为一个新兴的学科群,它的内容得到不断的充实和丰富,新的分支学科不断派生出来,至目前为止,已不下几十个,这里仅对耗散结构理论和协同论作以简介。

一、耗散结构理论(Dissipative Structure Theory)

耗散结构理论是比利时自由大学普利高津(I. Prigogine)教授于 1969 年创立的。在 1969 年召开的“理论物理与生物学”国际会议上,他正式提出了这个理论,并荣获 1977 年诺贝尔化学奖。

为了说明什么是耗散结构,我们先来了解一下两类不同的系统:孤立系统和开放系统。

孤立系统是指与外界没有物质和能量交换的系统。这种系统的内部状态,总是随着时间的推移趋于平衡,直到不再随时间发生变化。

例如,把少许蓝墨水滴入装有清水的瓶子中,蓝墨水就向清水中扩散,直到瓶子中的水变成均匀的淡蓝色。

孤立系统内部宏观状态趋于平衡的这种现象,可用熵增大来描述。熵是系统无序程度的度量,熵增长意味着系统有序性的减小,无序性的增大。在孤立系统中,熵一直增大到最大值。也就是说,一个孤立系统会自发地从非平衡态演化到物理性质均匀的平衡态,反过来却不会自发地从平衡态返回到非平衡态,就像蓝色的墨水,不会自发地分离成墨水和清水两部分。所以孤立系统趋向平衡态是不可逆过程。

开放系统是与外界有物质和能量交换的系统。人体就是一个开放系统,每天不断地与外界进行物质和能量的交换,吸收营养和排泄废物。

有了孤立系统和开放系统的概念作为基础,我们就可以进一步说明什么是耗散结构