

N94
957

363916



● 顾凯平 高孟宁 李彦周 著
● 重庆出版社出版

复杂巨系统 研究方法论

第 一 篇

复杂巨系统研究方法的理论



第一章

复杂巨系统研究方法

第一节 开放的复杂巨系统

世界充满着形形色色的系统。所谓系统，是指一个具有某些特定功能的有机整体，它的各部分必须是相互影响、相互依赖，形成一定的结构与层次。

系统最重要的特征是它的整体性、功能性与层次性。系统并非其各部分的简单拼凑，而是按一定的必然性或逻辑上的统一性将其各部分有机地组织在一起，其结果是使系统本身产生了优越的功能，大于其各部分各自功能的和。

系统的功能性指系统行为的过程与结果的有效性。

系统的层次性指系统的纵向结构关系。系统具有子系统，同

时本身又是更高一层系统的子系统。

系统的种类很多。可以依据不同的原则对系统进行分类，例如：

自然系统与人工系统，以及自然系统与人工系统相结合的复合系统。

开放系统、封闭系统与孤立系统。

静态系统与动态系统。

实物系统与概念系统。

物理系统、生物系统、生态系统，等等。

对我们特别有意义的是，根据系统的本质属性，从系统内子系统的关联关系角度可划分为简单系统与复杂系统；从子系统的数量划分，又可划分为小系统、大系统、巨系统；对于巨系统又可划分为简单巨系统与复杂巨系统。无论是自然界、人自身以及人类社会，都广泛存在着复杂巨系统。

简单系统是指组成系统数量较少，因而它们之间的关系也比较简单，或尽管子系统数量多或巨大，但之间关联关系比较简单，则称为简单系统。按照子系统的数量级简单系统还可分为小系统（子系统数量为几个、十几个）、大系统（子系统数量为几十个、上百个），以及简单巨系统（子系统数量成千上万、上百亿、万亿）。对于某些非生命系统，例如一台测量仪器可视为一个小系统，这一类系统用传统的数学、物理学、化学可以很好地描述；一个仅考虑产品生产的普通工厂可视为一个大系统，可以用控制论、信息论和运筹学的部分内容加以研究。总之研究这些简单系统可以将各子系统之间的相互作用直接综合为整体系统的功能。简单巨系统的子系统数量巨大，但子系统差别较少，因而反映出此类系统的子系统种类少，关联关系比较简单。例如激光系统就是简单巨系统。中国的围棋也可视为简单巨系统。这类系统无法用研究简单小系统和大系统的方法解决，连巨型计算机也不够使用。对于这

样的系统，由于子系统往往具有共同特点，因此可把亿万分子组成的巨系统的功能略去细节，而用十九世纪后半叶发展起来的统计力学进行概括处理。处理这种系统的理论近二十年来发展很快，如耗散结构理论和协同学。

另一类系统称为复杂系统。它们最主要的特征是系统具有众多的状态变量，反馈结构复杂，输入与输出呈现非线性特征，或将上述特点简单称为高阶次、多回路、非线性。如果复杂系统中的子系统数量极大，种类又很多，它们之间的关联关系很复杂，就称为复杂巨系统。尽管这类系统有客观的确定规律，但子系统的差别造成了规律的多样化。目前研究复杂巨系统还处于探索阶段，方法还很不成熟。例如人体系统、地理系统、人脑系统、星系系统都是复杂巨系统。这些系统在结构、功能、行为、演化等方面，十分复杂，至今仍有大量问题还不了解。

对于复杂巨系统，如果它与外界有能量、信息与物质的交换，则称为开放的复杂巨系统，本书研究的就是该类系统的方法论。

不包括人的意识及其活动在内的系统，称为自然系统。包括人的因素的系统，称为社会系统，社会系统显然是复杂系统。钱学森教授认为，社会系统（例如经济、政治、军事、科学技术、人口系统等）可称为开放的特殊复杂巨系统。这一类系统的复杂性不仅是子系统种类多，各有其定性模型；而且子系统间及与外界存在着各种方式的信息交流和积累；子系统的结构也在随着系统的发展不断变化。社会系统的基本单元——人本身就是一个复杂巨系统。人是有意识、有主观能动性的。人的行为是决定社会系统行为的非常重要的基础。这就使得社会系统中不同行为的人或者子系统之间的关系异常复杂。因此社会系统的规律往往复杂、多变，难以把握。对于森林资源系统，如果没有人的干预活动，仅是林木的自然生长和死亡过程，那么可以用研究简单系统的方法予以解决。然而实际上资源问题离不开人的干预活动，这就使

森林资源系统实际上是与各种社会、经济因素密切相关的—个资源-社会-经济系统。对它的分析表明,它具有高阶次、多回路、非线性的特征,为实现对该系统的定量描述,建立的信息采集点在全国就达数千个,更不必提及信息采集点的结构及系统涉及的人了,并且它不断与外界交换着能量流、信息流、物质流,并且根据信息的获取与再实践人类不断“自学习”、“自组织”(即调整目标、政策、方案的一个不断反馈、执行的循环过程)。因而,它是一个开放的特殊复杂巨系统。

第二节 开放的复杂巨系统的 研究方法和特点

一、开放的复杂巨系统研究方法

在上一节中,我们讨论了复杂巨系统的特征,其主要表现在高阶次、多回路、非线性以及子系统的数量巨大,类别繁多,多重反馈,结构复杂。复杂巨系统的上述特征,反映到研究过程,就表现为涉及学科知识多种多样,信息来源各不相同,有的定量有的定性,而且信息精度不均衡,系统参数敏感性很不一致,系统高层次结构较清晰与低层次结构难描述。针对上述情况,经过长期的探索,我们对开放的复杂巨系统采取了特殊的研究方法。

设开放的复杂巨系统A的边界如图1-2-1所示。根据该系统和系统的层次特点,将其层次画在边界内示意。

(一)对低层次子系统集成“组”进行“宏观性”处理。

由于系统是复杂巨系统,其系统层次多且关系复杂,子系统数目巨大。对如此巨大的系统,我们不可能从最基本的子系统开始进行结构分析。对有些庞大的子系统,人类目前还没有这种能力去研究其微观机制,因此我们可以将子系统按其功能特点、结构特点予以划分,将具有共同属性的子系统归于同一子系统组,形

成高一层次的子系统。对该子系统(组)我们侧重其输入、输出特性的研究,而不侧重其内部结构的分析。该子系统(组)的状态(或称为该子系统(组)的输出变量)可视为整个复杂巨系统的一个或一组参数。于是,对于上述分类后的子系统(组),尽管组间存在着各种关联乃至反馈关系,然而任一子系统组的元素与其它子系统组的元素相对来说具有独立性。我们采取了略去其结构的微观细节,抓住其主要属性,在宏观上对各类别的子系统(组)分别进行研究的办法,根据实际情况,应用人类一切已有的信息处理技术,进行定性定量相结合的研究。这些方法可以是:

1. 采用简单巨系统的研究方法,运用统计方法对它进行整体研究;

2. 运用各种抽样方法对实际系统的实际信息进行采集,然后再进行统计归纳;

3. 对实际系统中原来已有的,可能是零乱的、分散的信息资料进行各种技术处理和分析,以得到子系统(组)的状态数据;

4. 有的可以根据专家或有经验的实际工作者给以预见性分析、推算,进而得到定量的数据,必要时可建立智能专家系统。

5. 有的子系统(组)相对来说具有较系统、完整的历史数据,于是可以采用各种数据型的模型技术,如回归、平滑、灰色模型、投入产出分析、马尔科夫预测及其它矩阵预测;

6. 根据各学科具体的理论公式进行研究;

7. 运用计量经济学、经济控制论或其它各种控制论模型进行研究;

8. 建立仿真模型。

总之要根据模型研制者所掌握的信息多少,种类、精度,以及实际子系统(组)具体情况,由模型研制者研究分析、判断、选择。人类为了认识系统可以采用各种方法并配合人的定性判断,即将科学理论、经验知识和专家判断相结合,提出经验性假设或

述的较低层次的子系统及处理成有限个类别的子系统组。图1-2-2是开放的复杂巨系统研究方法的结构框图，上述描述的内容见图1-2-2的左边参数确定方法库部分的内容。以上所述各种模型技术将在第三章中讲述。

在研究中要精细地研究其结构，详细地描述各部分的反馈关系。如图1-2-1中，系统A的层次结构图中子系统若用子系统(组)的状态变量的定量结果代替，剩余部分显然层次较高，子系统(组)数也少了，这样形成的系统人类将比较容易掌握其主要的结构特点及主要的矛盾关系。此时，我们可以建立上述系统的系统

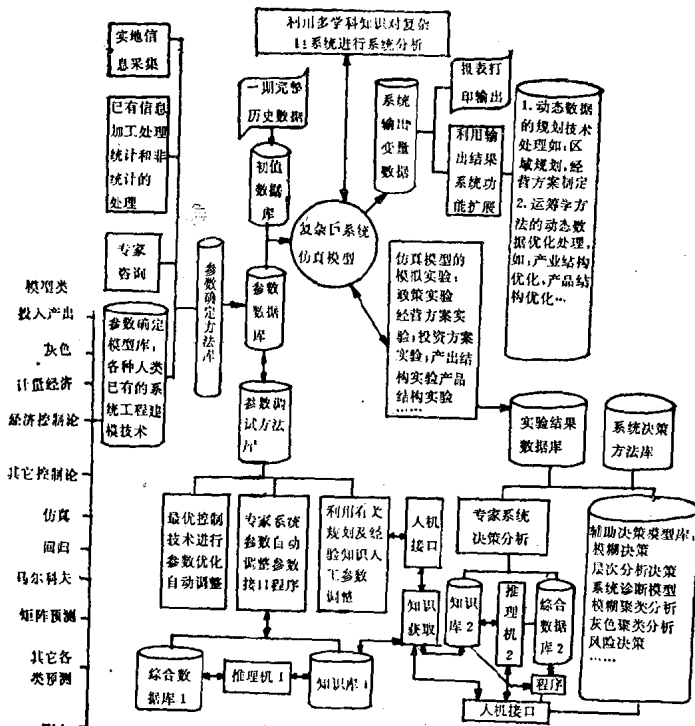


图1-2-2 复杂巨系统方法论结构框图

仿真模型，该模型是开放复杂巨系统的主体模型，原来子系统（组）的状态是该主体模型中的参数。该主体模型应实现以下功能：

1. 原来子系统（组）间的关联关系应在主体模型中体现出来；
2. 原来子系统的各种处理方式产生的子系统状态变量值应能动态地、自动地输入到主体模型中；
3. 主体模型中还要能够反映出较高层次系统变量间的各种复杂的关联关系；

4. 主体模型应包括相对于系统目标来说所需要的全部系统变量；

5. 主体模型中还要能够反映出复杂巨系统内的各种反馈关系，由于这种反馈关系，使大多数参数具有不敏感性。参数的不敏感性不仅是实际系统所具有的真实特点，同时也弥补了各子系统(组)由于信息来源不同、方法不同而导致的各参数的精度不同的问题；

6. 主体模型还应能够进行各种模拟实验；

7. 主体模型还应能够很方便地实现与环境及相邻其它系统的信息交换与物质交流，扩大系统边界后不必对原模型结构进行修改；

8. 主体模型在计算机上实现时应能与其它各种语言编制的模型实行良好的程序接口与数据接口。人类已发明了这种建模技术，这就是我们第二章要讲述的内容。在进行系统建模之前，同样需要建模者将科学理论、经验知识和专家判断相结合，提出系统行为模式的参考曲线，然后将模型仿真结果与参考模式反复对比、修改、运行，以得到最后的结果。图1-2-2中处于中心位置的是上述的开放的复杂巨系统高层次结构部分的仿真模型。为了使该模型能有效地描述整个系统的行为，必须利用多学科知识对系统进行综合的、整体的系统分析，弄清其结构层次，以及与环境的关系。各层次之间在何处分界，如何选择子系统(组)的层次位置等，这要根据数据与信息的掌握情况及实际系统的结构，由研制人员与用户之间对话，经过思维、判断实现。对决定建立仿真主模型的部分进行一系列的分析，确定主要变量，主要矛盾，主要反馈机制等等，具体内容见第二章。

在这里，还想谈谈以下两个问题。其一，曾经有人错误地认为仿真模型只能用来描述确定性系统。这不全面。首先，将系统简单地划分成确定性系统和随机性系统两种显然是过于简单化

了。对于复杂系统、复杂巨系统又怎么往里归类呢？任何一个复杂系统，它其中可能有随机因素，而仿真模型正是如实地抽象、描述系统的各主要变量、主要因素结构关系，仿真语言中设计的随机函数，正是描写某些随机因素的表述工具之一。另一个问题是关于仿真运行的累计误差问题。由于仿真是指计算机的数据计算过程，不可避免地将产生计算累积误差，如果研究目的仅在于规律的一般研究，对数据精度要求不高，那么这种累积误差不管也无妨，如果数据要求有一定精度(尽管仿真模型本身并没有提供精度计算方法，但可通过一段过程的实测数据比较，而得到模型的经验精度，本书第二篇中实例部分，正是采取这种方式得到的模型精度)，必须要设计可行的方法弥补这种累积误差，本书第二篇的《森林资源监测系统》采取同一结构多层次建模的方法来消除这类误差，效果很好。

(三) 通过系统连结，扩大系统功能。

开放系统与外界不断进行着信息、能量、物质的交换，以这些要素为纽带，可以对系统与系统进行连结，使系统功能扩大。例如，利用资源-经济系统的输出结果，与林产品生产加工系统相连结，进行产品结构优化与规划设计。又如某系统输出作为与它相关的另一个系统的输入，反过来另一个系统的输出又作为该系统的输入。这样一来，这两个系统就可能形成一个更大的开放复杂巨系统，如图1-2-1中点实相交线所围的部分。图1-2-2中的右上部标示了系统的某些新的应用领域：例如区域规划、产品、产业结构优化，投入产出分析等。用户可以根据情况，应用运筹学方法和系统工程、价值工程、知识工程技术扩大系统功能和边界。

(四) 进行系统主模型的参数调试。

为了适应系统信息来源的多样性、信息量的差异性、处理方法的灵活性和参数精度的不均衡性，我们在调试时必须认真分析

系统特点。

上面我们已经讲到子系统(组)的状态是主模型的参数,因此可以采用图1-2-2中参数确定方法库中任何一种方法实现对子系统组的描述,确定的参数将有不同的精度,尽管主体模型的多重反馈结构设计使大部分参数具有不敏感性,即部分弥补了上述缺陷,然而对于投入生产实践应用的模型来说,系统模型的调试是一个保证模型真实性的重要步骤。图1-2-2的左下部描述的参数调试方法库中的各种方法可任选或互相结合使用,在这里离不开人的定性判断,因此专家系统是一种较好的方法,显然它也是复杂巨系统下的一个子系统。图1-2-2中所列出的方法有,

1. 利用最优控制理论进行仿真模型的参数优化调试,使计算机自动反复进行调整,其原理可参阅本书第三章第七、八节及第九章第五节内容。

2. 利用专家系统并结合计算机接口程序使计算机反复调整。本书第四章将介绍人工智能与专家系统的有关内容。

3. 利用人工与计算机有关接口程序,反复进行调整。实际上2.是将3.的内容进行机器智能化的结果。

(五) 适应复杂巨系统所使用的方法的广泛性、技术的集成性,对系统采用的各种计算机语言,各种数据文件进行接口。计算机接口技术在复杂巨系统的研究中起了极其重要的作用。这部分内容将在第五章中介绍。

(六) 实现与知识工程技术(尤其是专家系统)相结合。

由前面的分析读者可以发现,无论在子系统组内,还是子系统组间,还是整个巨系统,都存在大量的依据于人的知识及人的推理、分析而作出的指导与决策行为,或者是专家知识的直接选配应用,因此运用人工智能学科中的专家系统,可以有效地部分代替上述的工作。知识工程技术广泛地用于复杂巨系统研究中的各部分,既可用于各子系统组的数据处理,模型选择,又可以用

于主体模型的参数调试，又可用于决策分析，甚至于在未来也可对复杂巨系统整体实行智能控制与管理。当然，人的作用即使在未来也不可能全部由智能机器代替。从上述亦可看出，专家系统、智能机器也是复杂巨系统中的一个子系统。

(七) 定性定量方法结合。

在系统认识、分析信息的采集及处理、各种模型的建立、参数的调试、模拟实验、决策分析以及系统控制过程中都要体现这种结合，特别是在模型建立前的定性的行为模式判断、模型运行后的结果比较及结构修改，参数变动、定型的过程中更要注意。

定性定量相结合的综合集成的方法被实践证明是研究开放的复杂巨系统，特别是开放的特殊复杂巨系统的有效方法。它不是将这种系统设法简化为简单系统，仅用成熟的定量方法处理，也不是仅做思辩性的空谈，只给予定性描述，而是充分重视系统具有变量众多、机制复杂，有层次结构的特点，将多学科知识、经验知识综合集中起来，进行定性定量有机结合的研究与处理，最终使多方面的定性认识上升到定量认识。

二、开放的复杂巨系统研究方法的特点

由上述方法可归纳出开放的复杂巨系统研究方法的特点。概括来说就是思想方法上的四个结合，技术方法上的五个综合。我们可以将其称为定性定量相结合的综合集成方法。

在思想方法上做到：

- (一) 多学科知识结合；
- (二) 定性研究和定量研究结合；
- (三) 科学理论知识与经验知识结合；
- (四) 宏观性研究与微观性研究结合。

在技术方法上做到：

- (一) 将原来简单系统的分类研究变成对大系统、巨系统的综合研究。即使对于几个复杂巨系统，原先是分别研究的，根据

系统的开放性，仍然可以综合成更大的巨系统。

(二) 将原来各简单系统的分类运行变成复杂巨系统的综合运行。

(三) 将原来各种建模技术，系统工程技术，运筹学方法，专家系统等等的单独运用变成各种技术、方法的综合运用。包括专家系统也属于复杂巨系统下的一个子系统。

(四) 实现计算机接口技术的综合运用。

(五) 人类对客观系统星星点点知识、各类分散的、孤立的数据、信息的综合应用。

借用钱学森教授的话，我们可以将这种方法称为定性定量相结合的综合集成方法。

第三节 开放的复杂巨系统方法论 在系统科学中的地位与作用

国外有的学者将现代科学分为自然科学、社会科学及系统科学三大类。我国著名科学家钱学森将现代科学技术结构划分为九大门：自然科学、社会科学、数学科学、系统科学、思维科学、人体科学、文艺理论、军事科学、行为科学。系统论是系统科学和哲学之间的中介理论。系统科学的基础科学是系统学，为应用提供理论的技术科学是运筹学，控制论，信息论，大系统理论等，应用科学(工程技术)是系统工程。

顾基发在《系统学》^①一文中介绍系统学的研究方法：“系统学的研究有定性研究和定量研究两个方面，最终总是用数学形式表现出来，但是数学不是唯一的工具。系统学从系统的内在机理或者从输入和输出反映出来的系统外部特性出发建立系统的抽象模

^① 顾基发：《系统学》，见《软科学的崛起》(第9册)地震出版社1988年第一版。

型，并借助数学方法和计算机技术进行模拟、分析和综合。系统学的研究方法着眼于系统的整体功能，并注意系统内部子系统的相关关系和层次结构，从系统环境、系统结构、系统功能三者的相互关系入手研究系统的普遍规律；从分析和综合的统一性出发，研究影响和改变系统结构和系统功能的一般途径。系统学也研究系统和信息的关系。它从开放系统与外部环境的信息交换、系统内部的信息传递、存贮和变换，以及相应的信息熵的改变来研究系统的结构关系、有序性和系统演化的趋势。总之，系统学是一门崭新的学科。它从系统这个统一的概念出发，将其它科学中从不同角度研究系统特性的基本理论加以总结，上升为系统科学的基础科学。”

技术科学是为应用提供理论的。系统科学的技术科学为进行系统分析，提供了理论及许多技术手段与方法。我们经常面对一个复杂的社会经济系统，需要对它进行结构功能分析，预测分析，优化分析，综合评价分析，决策分析等。运筹学，信息论，控制论，大系统理论等为此提供了理论，同时也提供了方法。人们已运用这些理论与方法，解决了大量实际问题，积累了丰富的经验。

关于系统工程，国内外学者的论述很多，目前没有统一的定义。日本学者寺野寿郎认为“系统工程是为了合理进行开发，设计和运用系统而采用的思想、步骤、组织和方法的总称。”^①我国著名科学家钱学森认为“系统工程则是组织管理系统的规划、研究、制造、试验和使用的科学方法，是一种对所有系统都具有普遍意义的科学方法。”^②系统工程以系统为研究对象，以系统学理论为指导，综合有关专业知识，以数学和计算机技术为手段，进行规划，

① [日]寺野寿郎：《系统工程学导论》，电子工业出版社1983年出版。

② 钱学森：《论系统工程》，湖南科学技术出版社1982年第一版。

管理和决策，以达到使系统优化的目的。每一门类的系统工程都有它的专业理论基础学科相对应，例如环境保护系统工程以环境科学为其专业理论学科，社会系统工程以社会学、未来学为其专业理论学科等等。

系统科学以系统为研究对象，而开放的特殊复杂巨系统属于系统分类的最高层次。

长期以来不同领域的科学家早已注意到，在生命系统和非生命系统之间表现出似乎截然不同的规律。后者遵从热力学第二定律，系统总是自发地趋于平衡态和无序，前者却与之相反。直到本世纪60年代，耗散结构理论和协同学的出现，为解决这个问题提供了一个科学的理论框架。这样，在不违背热力学第二定律的条件下，耗散结构理论沟通了两类系统的内在联系，说明两类系统之间并没有真正严格的界限，都是由相同的系统规律所支配。著名的德国物理学家、量子论的先驱普朗克认为：“科学是内在的整体，它被分解为单独的整体不是取决于事物的本身，而是取决于人类认识能力的局限性。实际上存在着从物理到化学，通过生物学和人类学到社会学的连续的链条，这是任何一处都不能被打断的链条。”而人类正是在不断地探索与寻找这一类的系统规律。在这里，首先遇到的问题是方法论的问题。上述耗散结构理论和协同学理论的创立及推导，其实是首先从简单巨系统开始的，其方法也主要适用于简单巨系统。尽管目前许多学者将这种理论用于复杂巨系统，用于社会系统，然而长期以来几乎没有人能把上述理论的定量模型直接用于开放复杂巨系统。即使试用于社会系统，实际上一般也只能是进行定性的比拟，或者说仅是一种框架性的建构。今天，系统科学的研究领域已进入了开放的复杂巨系统，已超过了对简单巨系统的研究。如能突破，其意义将更重大。原因在于：一是它的难度显然已远远超过前者，二是它的实用价值更大。有人说，20世纪下半叶发展起来的系统科学的意义至少