

国家自然科学基金项目·管理科学与工程系列丛书

多方法建模原理与应用

马 峻 著



科学出版社

国家自然科学基金项目·管理科学与工程系列丛书

多方法建模原理与应用

马 峻 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以系统分析中的建模理论与方法为研究对象,在分析离散事件系统、系统动力学以及多智能体建模基本理论与方法基础上,阐述多方法建模的基本原理和方法。主要包括:综述系统、模型、建模和仿真的基本概念、基本理论以及基本方法;在论述离散事件系统、系统动力学以及多智能体基本建模理论基础上,分析比较了三种建模方法的差异性,并对离散事件系统、系统动力学以及多智能体建模过程中基本方法、步骤和流程进行阐述;以离散事件系统建模、系统动力学建模以及多智能体建模为基础,阐述多方法建模的基本原理和基本实现方法,同时对三种建模方法实现过程进行了比较,结合实例分别展示多智能体与系统动力学联合建模、多智能体、系统动力学与离散事件系统联合建模的具体实现过程。

本书可作为高等院校管理科学与工程类、经济社会类、工商管理类、安全科学与工程类专业高年级本科生以及研究生的参考书,也可供企事业单位相关管理人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

多方法建模原理与应用 / 马峻著. —北京: 科学出版社, 2016.8

ISBN 978-7-03-049676-8

I. ①多 II. ①马 III. ①建立模型 IV. ①O141.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 201846 号

责任编辑: 马 跃 王景坤 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 8 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2016 年 8 月第一次印刷 印张: 17 1/2

字数: 350 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

现代分析求解的系统往往具有时空层次性、时空动态性、决策自主性、状态混合性、演化复杂性等特点,采用传统的建模方法很难全面地刻画系统状态动态变化过程,随着现代计算机技术和先进建模理论的发展,在传统的离散事件系统建模、系统动力学建模和多智能体建模基础上发展出多方法建模理论和方法,为全面而深刻地描述复杂系统提供了有效的方法。

笔者在清华大学从事博士后研究工作过程中,在恩师肖田元教授指导下,对系统建模与仿真有了一个全新的系统认识,出站后由于研究方向变化,在教学和科研中接触到许多社会学、经济学、管理学和安全领域的问题,而从系统工程角度看,这些问题往往都具有多学科领域交叉特性,对于这类问题的分析和求解,采用传统单一建模方法很难进行全面刻画,笔者在北京市教委科技重点项目、北京市自然科学基金、国家自然科学基金等项目资助下,所开展的一系列研究工作中发现,多方法建模可有效地解决此类问题。

离散事件系统建模、系统动力学建模、多智能体系统建模已经在不同领域得到广泛的应用,建模作为分析和解决问题的基础,不仅需要掌握一定的理论和方法,同时还需要掌握一些技巧,因此建模活动是一项技术性和艺术性相结合的科学活动。本书在系统介绍各种建模理论和方法的同时,结合实例阐述了建模活动中一些技巧性和技术性问题,同时采用对照式表述方法,力图从基本概念、基本理论、基本方法上说明多方法建模中不同建模方法的区别和联系,从理论和实践两个视角指出多方法建模的科学性和实用性。

本书以建模为主线,各章主要内容如下:第1章综述建模与仿真的基本理论,分别从系统、模型、建模和仿真四个方面,阐述系统、模型、建模和仿真的基本概念、基本理论以及基本方法,并对系统、模型、建模和仿真所涉及的方法进行分类比较。第2章离散事件系统建模,在总结离散事件系统建模基础上,论述离散事件系统建模的基本方法,分析比较离散事件系统仿真的三种策略,通过相应实例展示离散事件系统建模的基本过程。第3章系统动力学建模,通过总结系统动力学建模的基本原理,分析比较不同系统行为模式与系统结构,详细说明系统动力学建模的基本方法、步骤和流程,同时以社会经济协同发展为例展示系统动力学建模的基本过程。第4章多智能体系统建模,在分析比较多智能体与多智能体系统基础上,阐述多智能体建模的基本思想、基本思路、元模型以及建模方法,比较多智能体建模与面向对象建模,并介绍常用的多智能体系统建模软件的基本

原理和基本结构，最后分别引入相应的实例说明多智能体建模的基本过程。第5章多方法建模，以离散事件系统建模、系统动力学建模及多智能体建模为基础，阐述多方法建模的基本原理和基本实现方法，同时对三种建模方法进行比较，结合实例分别展示多智能体与系统动力学联合建模，以及多智能体、系统动力学与离散事件系统联合建模的具体实现过程。

全书系统地阐述多方法建模的基本原理和方法，尤其是对于许多复杂的逻辑过程，在撰写过程中通过采用图模型的方法很直观地展现出来，便于理解。

本书的完成得益于国家自然科学基金项目（编号：71471121）、北京市自然科学基金 B 类重点项目和北京市教委科技重点项目（编号：KZ201210038038）的资助，同时还得益于笔者的学生王伟、王爽、居希宏、李晟晗、车一鸣等，他们协助完成了部分实例的程序设计与调试运行工作，另外笔者还参考了 AnyLogic 公司提供的资料，在此一并表示衷心的感谢！

本书是笔者多年来在科研教学中的一些体会总结，由于学术水平有限，一些学术观点的不足之处，恳请专家、学者指正，书中文法的欠妥之处，恳请广大读者指正。

马 峻

2016 年 6 月

目 录

第 1 章 系统建模与仿真	1
1.1 系统	1
1.2 模型	13
1.3 建模	21
1.4 仿真	43
第 2 章 离散事件系统建模	74
2.1 离散事件系统建模基础	74
2.2 离散事件系统建模技术	77
2.3 离散事件系统仿真策略	91
2.4 离散事件与事件对象	106
2.5 离散事件建模实例	109
第 3 章 系统动力学建模	122
3.1 系统动力学建模基础	122
3.2 系统行为模式与系统结构	129
3.3 系统动力学建模技术	131
3.4 系统动力学建模实例	141
第 4 章 多智能体系统建模	161
4.1 多智能体与多智能体系统	161
4.2 多智能体建模技术	166
4.3 多智能体建模平台	173
4.4 多智能体建模实例	184
第 5 章 多方法建模	242
5.1 多方法建模理论	242
5.2 多方法建模技术	247
5.3 多方法建模实例	250
参考文献	273

第1章 系统建模与仿真

系统是一切事物存在的方式之一，因此可以采用系统观点来描述事物。构建模型是求解系统的通用方法，简单系统可以用数学方法求解，但对复杂系统而言数学方法往往面临很大困难，因此用仿真技术对复杂系统建立仿真模型，通过对仿真模型运行结果的分析来求解复杂系统，是一个有效的方法。

1.1 系 统

1.1.1 系统概念

系统概念来源于人类长期的实践活动，人类很早就认识到事物的发展不是孤立的、割裂的、互不联系的，而应将其看成是相互联系、相互作用、相互制约的统一整体。系统泛指由许多相互关联的个体组成，基于一定的规则，能完成单个个体不能单独完成的工作的有机组合体。

系统论创始人贝塔朗菲这样定义：“系统是相互联系相互作用的诸元素的综合体。”这个定义强调元素间的相互作用以及系统对元素的整合作用。可以表述为如果对象集 S 满足下列两个条件：

- (1) S 中至少包含两个不同元素。
- (2) S 中的元素按一定方式相互联系。

则称 S 为一个系统， S 中的元素为系统的组分。

这个定义指出系统的三个特性：多元性，系统是多样性的统一，差异性的统一；相关性，系统不存在孤立元素组分，所有元素或组分间相互依存、相互作用、相互制约；整体性，系统是所有元素构成的复合统一整体。

系统的本质特征包括：

- (1) 群体性特征：系统是由系统内的个体集合构成的。
- (2) 个体性特征：系统内的个体是构成系统的要素，没有个体就没有系统。
- (3) 关联性特征：系统内的个体是相互关联的。
- (4) 结构性特征：系统内相互关联的个体是按一定的结构框架存在。
- (5) 层次性特征：系统与系统内的个体之关联信息的传递路径是分层次的。
- (6) 模块性特征：系统的内部可以分成若干子块。
- (7) 独立性特征：系统作为一个整体是相对独立的。

- (8) 开放性特征：系统作为一个整体又会与其他系统相互关联相互影响。
- (9) 发展性特征：系统是随时演变的。
- (10) 自然性特征：系统必遵循自然的、科学的规律。
- (11) 实用性特征：系统是可以被研究、优化和利用的。
- (12) 模糊性特征：系统与系统内的个体之关联信息及系统的自有特征通常是模糊的。
- (13) 模型性特征：系统是可以通过建立模型进行研究的。
- (14) 因果性特征：系统与系统内的个体是具有因果关系的。
- (15) 整体性特征：系统作为一个整体具有超越于系统内个体之上的整体性特征。

任何系统的研究都需要关注三个方面的内容，即实体、属性和活动：

实体：组成系统的具体对象。

属性：实体所具有的每一项有效特性(状态和参数)。

活动：系统内对象随时间推移而发生的状态变化。

组成系统的实体之间相互作用而引起的实体属性变化，通常用“状态”的概念来描述。研究系统，主要就是研究系统状态的改变，即系统的进展或演化。

关于系统的实体、属性、活动、事件及状态变量的实例如表 1-1 所示。这里只提出部分系统成分的列表。除非知道研究的目的，否则无法开发出完整的列表。根据研究的目的，确定关注的系统不同方面，才能确定系统成分。

表 1-1 系统和成分实例

系统	实体	属性	活动	事件	状态变量
银行	顾客	经常账户余额	存款	到达、离去	出纳台忙的数目；顾客等待的数目
高速铁路	乘客	出发地、目的地	旅行	到达站；到达目的地	每站等待的乘客数；运输的乘客数
制造	机器	速度、容量、故障率	焊接、冲压	故障停机	机器的状态（忙、闲、停机）
通信	信息	长度、目的地	传输	到达目的地	等待传输的数目
仓储	仓库	容量	出货	需求	库存水平、订货量

从边界的因素来看，系统的活动可分为以下几种。内生活动：系统内部实体相互作用产生的活动。外生活动：系统外部环境的影响产生的活动。仅考虑内生活的系统称为封闭系统。既考虑内生活动又考虑外生活的系统称为开放系统。

任何系统都具有一定的结构，没有无结构的系统。作为系统论的一个基本范畴的结构，指的是系统内部各组成实体之间在空间(包括数量比例)或时间方面的有机联系与相互作用的方式或顺序。系统有序性越高，结构越严密。所以，任何

系统所具有的整体性，都是在一定结构基础上的整体性，仅有实体，还不能组成系统，必须在实体的基础上，以某种方式和关系相互作用，才能形成系统结构。

系统与外部环境相互联系和作用过程的秩序和能力称为系统的功能。系统功能体现了一个系统与外部环境之间的物质、能量和信息的输入与输出的变换关系。系统的结构与功能是一对不可分割的范畴，系统的结构是完成系统功能的基础。结构与功能分别说明了系统的内部作用和外部作用。功能是一个过程，它反映了系统对外界作用的能力，是由系统的结构所决定，由系统整体的运动表现出来的。

系统具有的三种特性：整体性、相关性和隶属性。

(1) 整体性。系统中的各部分(子系统)不能随意分割，系统的整体性直接影响系统功能与作用。

(2) 相关性。系统中的各部分(子系统)以一定的规律和方式相联系，由此决定了系统所具有的性能。例如，相同的零部件，不同的组合得到的产品性能存在差异性。

(3) 隶属性。根据系统的定义，在确定系统边界的情况下，可以分辨系统内和系统外，有效和明确地确定系统界限，便于系统模型的抽象映射。

一个系统可以被定义成下面的七元组集合结构：

$$S=(T, X, \Omega, Q, Y, \delta, \lambda)$$

其中， T 为时间基； X 为输入集； Ω 为输入段集； Q 为内部状态集； Y 为输出集； δ 为状态转移函数； λ 为输出函数，具体含义如下：

(1) 时间基。 T 是描述时间为事件排序的一个集合。通常， T 为整数集 I 或实数集 R ，则系统也分别称为离散时间系统或连续时间系统。

(2) 输入集。 X 输入集代表系统外界作用于系统，可以认为系统在任何时刻都受输入流集合 X 的作用，而系统不直接控制集合 X 。

(3) 输入段集。一个输入段描述某时间间隔内系统的输入模式。当系统嵌套在一个大系统中时，输入模式由系统的环境决定。当系统处于孤立的情况下，环境被一个段集所替代。考虑到系统重构，该段集应该包括系统所能接收到的所有输入模式。因此，一个输入段集是片段的一个特例，同时它又是这样一个映射： $\omega:(t_0, t_i) \rightarrow X$ ，其中 (t_0, t_i) 是时间基中从初始时刻 t_0 到终止时间 t_i 的一个区间，所有上述输入片段构成的集合记作 (X, T) ，输入段集 Ω 是 (X, T) 的一个子集。

(4) 内部状态集。内部状态集 Q 是内部结构建模的核心表示系统的记忆，即历史的遗留物，它影响着现在和将来内部状态集的响应。

1.1.2 系统分类

系统科学对系统的分类并不是依靠系统内包含子系统数目的多少，而是依靠系统内子系统组成的层次关系。系统科学从系统局部与整体出发研究系统，按照

复杂程度将系统分成四大类：简单系统（包括小系统和大系统，以及几个子系统到几百个子系统）、简单巨系统、复杂巨系统、特殊复杂巨系统（社会系统）。

（1）简单系统。当系统是一个简单系统的时候，虽然它也包括许多子系统，但由于这些子系统的相互作用比较小或者说是相互独立的，可以分别研究这些子系统的性质，进而得到整个系统的性质。

（2）简单巨系统内所有子系统都在同一层次上进行相互作用，每一个子系统都以相同的概率和其他所有子系统进行作用。复杂巨系统则不同，复杂巨系统中的子系统是以层次结构的形式组成系统。

（3）组成系统的元素不仅数量大而且种类也很多，它们之间的关系又很复杂，并有多层次结构，这类系统称为复杂巨系统。

（4）组成社会系统的元素是人。由于人的意识作用，系统元素之间关系不仅复杂而且带有很大的不确定性，这类系统称为特殊复杂巨系统。

按宏观层面分类，它大致可以分为自然系统、人工系统、复合系统。

（1）自然系统。系统内的个体按自然法则存在或演变，产生或形成一种群体的自然现象与特征。自然系统包括生态平衡系统、生命机体系统、天体系统、物质微观结构系统以及社会系统等。

（2）人工系统。系统内的个体根据人为的、预先编排好的规则或计划好的方向运作，以实现或完成系统内个体不能单独实现的功能、性能与结果。人工系统包括立体成像系统、生产系统、交通系统、电力系统、计算机系统、教育系统、医疗系统、企业管理系统等。

（3）复合系统。复合系统是自然系统和人工系统的组合。复合系统包括导航系统、交通管理系统和人-机系统等。

同时还有许多分类方法如下：

（1）以尺度规模和范围为标准分为：胀观系统、宇观系统、宏观系统、微观系统、渺观系统。

（2）以要素间的相互关系为标准分为：线性系统、非线性系统。

（3）以与环境间交换的内容差异为标准分为：孤立系统、封闭系统、开放系统。

（4）以是否具有静止质量为标准分为：实物系统和场态系统。

（5）以相对静或动的关系为标准可分为：运动系统和静止系统。

（6）以运动模式稳定性程度分为：平衡系统和非平衡系统。

（7）以运动方式的复杂程度分为：机械系统、物理系统、化学系统、生物系统、社会系统。

（8）以人的加工改造程度分为：自然系统、人工系统、自然与人工的复合系统。

（9）以存在的大领域为标准：自然系统、社会系统、思维系统。

（10）以认识程度为标准：白系统、黑系统、灰系统。

(11) 以主客观的关系为标准：客观系统、主观系统。

(12) 以系统熵值大小为标准：平衡态系统、近平衡态系统、远离平衡态系统。

1.1.3 系统分析

系统分析是运用现代科学的方法和技术对构成现实事物的系统各个要素及其相互关系进行分析，比较、评价和优化可行方案，从而为研究者深入开展研究提供可靠的依据的分析方法。系统分析是一种根据客观事物所具有的系统特征，从事物的整体出发，着眼于整体与部分、整体与结构及层次、结构与功能、系统与环境等方面的相互联系和相互作用，以获得系统与环境、系统内各个组成部分相互作用关系的分析方法。

1. 系统分析的基本内容

系统分析的基本内容包括：整体分析、结构分析、逻辑分析及环境分析。

1) 整体分析

系统是由两个以上不相同的要素或单元相互联系相互作用形成的集合体。它是作为一个统一的整体而存在的，各部分的独立机能和相互关系只能统一和协调于系统的整体之中。整体性是系统的一个最基本属性。整体由部分构成，部分隶属于整体。任何系统都是由众多子系统构成，子系统又是由不同要素或单元所构成。

2) 结构分析

系统的结构指的是系统内部诸要素的排列组合方式。结构性是系统有机联系的反映，系统之所以成为有机整体，就是因为系统各要素和单元之间是按照一定的方式结合在一起的。系统的各要素虽然相同，但由于排列组合方式不同，就可能使系统具有完全不同的性质、特征和功能。结构分析作为系统分析的一个重要组成部分，是寻求系统合理结构的途径和方法，其目的是找出系统结构上的层次性、相关性和协同性等特征，使系统的组成要素及其相互关联在分布上达到最优组合和输出。对于系统各要素和单元之间的结合方式，可以进行层次分析、相关分析和协同分析。

3) 逻辑分析

系统逻辑分析方法是揭示系统逻辑结构的方法。其基本内容包括：

(1) 目标，即为解决公共问题所要达到的目的和指标，它是系统目的的具体化，具有针对性、可行性、系统性、规范性和具体性等特点。为了解决问题，要确定出具体的目标，它们通过某些指标来表达，而标准则是衡量目标达到的尺度。系统分析是针对所提出的具体目标而展开的，由于实现系统功能的目的是靠多方面因素来保证的，因此系统目标也必然有若干个。在多项目标条件下，要考虑各项目标的协调，以防止出现相互抵触或顾此失彼的情况。

(2) 备选方案，即为实现目标而设计的具体措施和方案，并对此进行可行性论证。

(3) 模型,即按照原有方案设想建构分析模型,以找出说明系统功能的主要因素及其相互关系,包括系统的输入、输出、转换关系,系统的目标和约束等,具体有图式模型、数学模型、仿真模型、实体模型等方式。通过模型的建立,可确认影响系统功能和目标的主要因素及其影响程度,确认这些因素的相关程度,目标的达成途径和约束条件等。

(4) 效果,即所设计方案的实施在社会环境里产生的反应和结果。

(5) 评价,即按照一定价值标准对政策方案进行的价值评估。就是在以上分析的基础上,再考虑各种定性因素,对比系统目标达到的程度,用标准来衡量。

(6) 优化,即为实现最优效果而对政策方案进行的优化排序和选择决策。

4) 环境分析

系统存在于环境之中,与环境相联系、相作用,又与环境相区别。环境是指系统之外的所有其他事物或存在,即系统发生、发展及运行的生态条件或背景。

环境因素主要有:

(1) 物理技术环境,即由于事物属性所产生的联系而构成的因素和处理问题中的方法性因素,包括现存系统、技术标准、自然环境和科技发展因素等。

(2) 社会经济环境,即大范围的社会因素以及影响系统经济过程和经营状态的因素,包括社会组织、政策、政府作用、产品价格结构、经营活动等。

(3) 文化心理环境等。

一个系统总是处于更大的系统之中,成为更大系统的子系统,而更大系统也就构成了该子系统的生态环境。系统与环境的相互联系和作用表现在:一方面,环境向系统输入各种资源和要求,环境是系统存在和发展的前提,环境影响、制约,甚至决定着系统的性质和功能;另一方面,系统也向环境输出产品,系统的存在和发展同样影响着环境的变化。

2. 系统分析基本方法

系统分析的基本方法包括:定性分析和定量分析。

常用的定性分析方法包括:因果分析法、KJ法、目标-手段分析法等。

1) 因果分析法

因果分析法是利用因果分析图来分析影响系统的因素,并从中找出产生某种结果的主要原因的一种定性分析方法。系统某一行(结果)的发生,绝非一种或两种原因所致,往往是由于多种复杂因素的影响所致。为了分析影响系统的重要因素,找出产生某种结果的主要原因,系统分析人员广泛使用了一种简便而有效的定性分析法——因果分析法。

2) KJ法

KJ法是一种直观的定性分析方法,是从很多信息中归纳出问题整体含义的一

种分析方法。它的基本原理是把每个信息做成卡片，将这些卡片摊在桌子上观察其全部，把有“亲近性”的卡片集中起来合成子问题，依次做下去，最后求得问题整体的构成。这种方法把人们对图形的思考功能与直觉的综合能力很好地结合起来，不需要特别的手段和知识，不论是个人或者团体都能简便地实行。因此，KJ法是分析复杂问题的一种有效方法。

3) 目标-手段分析法

目标-手段分析法，就是将要达到的目标和所需要的手段按照系统展开，一级手段等于二级目标，二级手段等于三级目标，依此类推，便产生了层次分明、互相联系又逐渐具体化的分层目标系统。

根据决策类型的不同将定量分析技术分为确定性分析和随机分析两类。

1) 确定性分析

所谓确定性分析是指那些可用于只有一种势态，并在作出可接受的假定之后其变量、限制条件、不同的选择都是已知的、确定的，并按一定的统计置信度可以预见的方法或技术。通常的确定性分析方法和技术如表 1-2 所示。

表 1-2 确定性分析方法和技术

方法和技术	应用	基础知识
线性规划	解决在商业、交通、库存、建筑、后勤及网络中的配置、分配和优化问题	计算机科学、敏感性分析、代数解法、单纯形表、经济学
排队论	人或事物或事件的等待服务问题	蒙特卡罗法、模拟、统计学
规划管理技术	生产和建设计划	网络分析(CPN)、决策树
马尔可夫分析	销售经营、预测	矩阵代数、经济学
对抗分析	商业、心理学、国防研究	博弈论
质量保证	工业、国防	科学、技术
损益分析	资源分配	经济学、统计学

2) 随机分析

随机分析是不确定性或风险决策的分析方法和技术，通常随机分析方法和技术如表 1-3 所示。

表 1-3 随机分析方法和技术

方法和技术	应用	基础知识
动态规划	在生产、配置活动中的多阶段决策	计算机科学和概率论
计算机模拟	系统内部的相互作用	计算机科学和蒙特卡罗法
随机库存论	需求或提前时间是随机的情况	概率论和期望值统计量
随机模型	计算系统转换的概率	矩阵代数、微积分
回归、指数平滑	系统总体特性问题	统计学和概率论
贝叶斯定理	条件概率下的预测、相关和因果分析	代数、概率论以及有关先验概率和知识
损益分析	资源分配	经济学和统计学
决策树	系统行为	代数和统计学

1.1.4 复杂系统

1. 复杂性

复杂性可以狭义地认为是指系统由于内在元素非线性交互作用而产生的行为无序性的外在表象。从国内外自然科学、工程技术科学、管理科学和人文社会科学等领域关于“复杂性”“非线性”的研究状况来看,复杂性是涉及不同科学领域的共同问题,对此问题的研究工作分布在不同领域里,因此,复杂性概念在不同的学科领域,研究对象和采用的分析方法不同,对复杂性概念的定义也不相同,所以到目前为止对复杂性还没有一个严格定义。复杂性的产生可以从以下几个方面去理解:

(1) 源于系统结构的复杂性。组分的多样性和差异性造成组分之间相互关系的多样性和差异性,是系统复杂性的根本源泉。对于产生复杂性而言,结构效应比规模效应重要得多。因为组分的差异越大,把它们整合起来的难度就越大。

(2) 源于开放性即环境的复杂性。封闭系统没有复杂性,复杂性必定出现于开放系统。开放性也是复杂性的重要根源,系统与环境相互关系的复杂性是系统复杂性的重要表现。

(3) 源于动力学特性的复杂性。动力学因素可以忽略不计的系统,或者动力学因素可以作为静态模型的干扰因素来对待的系统,一定是简单系统。动力学过程可能产生无穷的多样性、差异性、丰富性、奇异性(包括分叉、突变、混沌等)、创新性,是产生复杂性的重要机制,复杂性只能出现于动力学系统,复杂性一定是某种动力学特性。动力学因素是产生复杂性最重要的物理学根源。

(4) 源于非平衡态的复杂性。平衡态不可能产生复杂性,处于平衡态的系统都是简单的。非平衡态也不一定产生复杂性,所谓近平衡态的系统特性原则上可以使用平衡态的处理方法,或加以小的修正。复杂性只能出现于远离平衡态,在这种条件下系统通过自组织形成耗散结构,即自组织地产生出复杂性。

(5) 源于不可积性的复杂性。保守的可积系统没有复杂性,复杂性只能出现于不可积系统。但弱不可积系统,即近可积系统,与可积系统没有定性区别,用可积系统加不可积性扰动的办法即可处理,这里也不可能出现复杂性。

(6) 源于不可逆过程的复杂性。可逆过程没有复杂性,还原论方法足以解决问题。复杂性只能出现于不可逆过程。

(7) 源于非线性的复杂性。哲学家早已指出,事物发展变化的终极原因是相互作用,但相互作用有线性和非线性之分。线性意味着单一、均匀、不变,不具备产生复杂性的根源,线性系统都是简单系统,线性相互作用产生的是简单性,无法造就复杂性。非线性意味着无穷的多样性、差异性、可变性、非均匀性、奇

异性、创新性。元素之间、子系统之间的非线性相互作用是系统产生复杂性的根本内在机制，复杂性只能出现于非线性系统。但非线性自身包含极大的差异性。弱非线性，或非本质非线性，仍然不可能产生复杂性，可以作为扰动因素处理，特别是系统的局部性质，用线性模型加微扰的方法往往可以有效描述。只有强非线性，特别是本质非线性，才可能产生复杂性。

(8) 源于不确定性的复杂性。确定性连通简单性，不确定性连通复杂性。首先是源于随机性的复杂性。但随机性也不是产生复杂性的充分条件，平稳随机过程属于简单系统，非平稳过程才可能出现复杂性。另一种重要的不确定性为模糊性，它既是复杂性的来源，又是复杂性的表现或结果。

(9) 源于主动性、能动性的复杂性。作用者与被作用者、原因与结果界限分明的是简单系统。不同组分之间、系统与环境之间互为因果，互动互应（所有组分都既是被作用者，又是主动作用者），一连串的、相互交叉的、网络式的因果联系，才能产生复杂性。特别是当组分有一定的自适应能力时，在不断适应环境的行为过程中必然产生出整体的复杂性。

(10) 源于系统组分智能的复杂性。由非智能组分构成的系统（如耗散结构论和协同学研究的贝纳德流、固体激光器等），即使通过自组织这种主动过程产生出复杂性，一般也是较为初步的、低级的，总有办法对付，属于初级复杂性。由具有智能的组分构成的系统能够辨识环境，预测未来，在经验中学习，以形成好的行为规则，使自身发生适应性变化，因而必定是复杂的。

(11) 源于人类理性的复杂性。以人作为构成要素的系统，其行为必须考虑人的理性因素的作用。尤其在竞争性系统中，博弈者的理性（智慧、谋略等）是产生复杂性的重要来源。但在完全理性（无限理性）假设下，复杂性的根源被抛弃了，博弈方能采取最大最小策略，这种系统仍然是简单的，可按照运筹学处理，不完全理性即有限理性才可能产生复杂性。

(12) 源于人类非理性的复杂性。非理性，如人的感情、意志、偏好等，必然带来至少现在的科学还无法描述的行为特征，这也是复杂性的重要根源。

基于上述复杂性产生的根源，综合起来与复杂性相关的概念有以下几个：

(1) 随机性。随机现象是系统内涵不确定而外延确定的表象。随机性并不复杂，历史上不少复杂性的定义其实针对的是随机性，复杂性介于随机和有序之间，是随机背景上无规则地组合起来的某种结构和序。

(2) 模糊性。模糊现象是系统内涵确定而外延不确定的表象，可以运用模糊数学的方法减少外延的不确定性。

(3) 混沌边缘。这是指一个复杂自适应系统运行在有序和无序之间的相变过程中出现的有界非稳定性的一种形式，但这并非复杂性的全部。

(4) 突现。突现是指复杂系统中的行为个体（agent）根据各自行为规则相互

作用所产生的没有事先计划但实际却发生了一种行为模式。由于产生突现的系统是确定系统,因此,突现并非随机现象。在偶然事件中整体行为模式不能根据其个体行为规则进行预测,也可以表述为整体模式不能还原其个体行为。但“突现”只是复杂性的一种表现形式,并非复杂性的全部。

(5) 简单性和复杂性。简单性一向是现代自然科学的一条通则。许多科学家相信自然界的基本规律是简单的。爱因斯坦曾是持这种观点的突出代表者。虽然复杂现象比比皆是,但人们还是努力要把它们还原成更简单的行为主体或过程。虽然的确有不少复杂的事物或现象,其背后确实存在简单的规律或过程,但是也存在大量的事物和现象不能用简单的还原论方法进行处理。事实上简单性与复杂性是客观事物的两种不同表现形式。

2. 复杂系统

复杂系统的出现与复杂性问题研究有密切关系,同时由于复杂系统存在的广泛性,造成复杂系统概念的多样性,一般来说具有以下几个特点的系统就应当看成复杂系统:组成系统的个体之间存在强烈的非线性相互作用;系统具有不可逆性和敏感性;系统具有层次,个体在低层次的相互作用可以在高层次涌现出全新的性质;组成系统的子系统存在强耦合现象;不可以将系统分成几个小部分单独进行研究,然后简单地汇集各部分知识以达成对总体的理解。

关于复杂系统的定义也没有一个统一表述,有代表性的如下:

- (1) 复杂系统就是混沌系统(混沌学派);
- (2) 复杂系统是具有自适应能力的演化系统(Santa Fe);
- (3) 复杂系统是包含多个行为主体(agent)具有层次结构的系统;
- (4) 复杂系统是包含反馈环的系统(stacey);
- (5) 复杂系统是任何人不能用传统理论与方法解释其行为的系统(John Warfield);
- (6) 复杂系统是动态非线性系统。

虽然目前关于复杂系统的认识与定义尚未统一,但是复杂系统的特征总结起来具有以下几个特点:

(1) 自适应性/自组织性(self-adaptive/self-organization)。系统是由时空交叠或分布的组件(有时也称为主体)构成的。这些组件具有自适应、自学习、自聚集、自组织等能力,组件能够通过不断地学习,调整自身的结构和行为,以适应外部和内部的变化。组件之间、组件与环境之间会发生各种各样的交互作用,正是组件的自主性,以及组件间交互的复杂性,使得整个复杂系统呈现复杂性,同时也是复杂系统不断演化的驱动力。

(2) 不确定性(uncertainty)。不确定性与随机性相关,而复杂系统中的随机因素不仅影响状态,而且影响组织结构和行为方式。而复杂系统的自适应性使得

组件可以自学习，能记住这些经历，并“固化”在自己以后的行为方式中。不确定性还与混沌相关，混沌简单地可以说成“确定的随机性”。“确定”是因为它由内在的原因而不是外来的噪声或干扰所产生，即过程是严格确定的；而“随机性”指的是不规则、不能预测的行为。混沌把表现的无序与内在的决定论机制巧妙地融为一体，在表面的有序背后隐藏着一种奇异的混沌，而在混沌的深处又隐藏着一种更奇异的秩序。

(3) 涌现性 (emergence)。肩负不同角色的组件通过多种交互模式、按局部或全局的行为规则进行交互，组件类型与状态、组件之间的交互以及系统行为随时间不断改变，系统中子系统或基本单元之间的局部交互，经过一段时间之后在整体上演化出一些独特的、新的性质，形成某些模式，这便体现为涌现性。子系统之间的相互作用，可产生与单个子系统行为显著不同的宏观整体性质。

涌现是有层次的。不同的层次将产生不同的涌现效果，上一层次的涌现必由下面层次的涌现产生。涌现应具备以下一些特征：一是必须由系统产生，该系统由多个组分（子系统）组成；二是系统具有一定的自适应能力，能够通过不断地学习，调整自身的结构和行为，以适应外部和内部的变化；三是通过适应改变系统的结构和行为形成演化，具备新系统的整体功能，从而产生涌现。涌现的思想反映了宏观和微观的有机联系，是微观行为展现的宏观效应。

涌现性也体现为一种质变。主体之间的相互作用开始后，系统能自组织、自协调、自加强，并随之扩大、发展，最后发生质变，即发生了涌现。

(4) 预决性。复杂系统的发展趋向取决于系统的预决性，预决性是系统对未来状态的预期和实际状态限制的统一。事实上，任何有生命的物质，都具有预期或预测的能力，从而影响系统的运动方向。

(5) 演化。复杂系统对于外界环境和状态的预期—适应—自组织过程导致系统从功能到结构的不断演化。这种演化运动在物理系统中是不存在的。物理系统一般由多个已有的元素组成，功能和结构都不会改变。而复杂系统一般是由简单的元素组合，经过不断的演化而发展成为功能和结构更为复杂的系统。从低级到高级，从简单到复杂，不断演化，是复杂系统最本质的特性。

(6) 开放性。系统与外部环境以及子系统之间存在能量、信息或物质的交换，就系统与环境的关系而言，开放表现为最复杂与最常见的不确定的、动态连续的环境类型。复杂性不仅体现在系统本身，而且体现在环境中。

系统的无序度是用熵来描述的，熵的变化大于零，因此一个孤立系统的内部熵将随时间不断增加，最终熵达到最大值，此时系统趋向于无序。开放系统与孤立系统不同，它与外界环境之间不断进行着能量、物质和信息的交换。这种交换使它可能从外界环境输入负熵，从而使系统的总熵减小或控制为某种缓慢的增长速度，其结果是增加了系统的有序性（这种自发地增加系统有序性的性