

综合集成模型方法与技术

熊才权 著



科学出版社

综合集成模型方法与技术

熊才权 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书较为系统地介绍作者近年来从事综合集成法、辩论模型和综合集成研讨环境设计与实现等研究的主要成果。首先介绍面向复杂问题求解的综合集成法、综合集成研讨厅、综合集成研讨环境的基本概念,在分析综合集成法和群体思维特性的基础上,提出群体研讨过程框架;其次重点介绍不同研讨模式的研讨模型与算法,包括群体智慧涌现模型、劝说研讨模型、协商研讨模型、决策研讨模型和群体一致性分析等;最后讨论综合集成研讨环境设计与实现中的关键技术问题及解决方案。

本书可供思维科学、计算机科学与技术、系统科学、智能信息处理等专业的高年级本科生、研究生和科技人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

综合集成模型方法与技术 / 熊才权著. —北京: 科学出版社, 2019.8

ISBN 978-7-03-062033-0

I. ①综… II. ①熊… III. ①系统科学 IV. ①N94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 167558 号

责任编辑: 任 静 / 责任校对: 王 瑞
责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 迷底书装

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 8 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2019 年 8 月第一次印刷 印张: 14

字数: 260 000

定价: 86.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

熊才权的专著《综合集成模型方法与技术》即将顺利出版之际我很开心。这部专著是在钱学森院士学术思想指导下，经过十多年的艰苦探索，结合实际系统研发写成的。高兴之余，我觉得要较好地理解这部专著的成果，很有必要了解它的来龙去脉，因为历史是一部最好的教科书。

20世纪70年代末，我的恩师——我国杰出贡献科学家钱学森从我国“两弹一星”事业的第一线领导岗位上退下来。从那时起，他又一次展开了对国家民族的利益影响更加深远的波澜壮阔的科学探索。现将其中一个方面的过程简述如下。

1. 现代科学技术体系的理论

20世纪70年代末80年代初，钱学森提出现代科学技术体系的理论。这是继恩格斯在19世纪中后叶对人类科学技术体系分类后，第二次进行了分类。钱学森将2500多门学科分为十几个大部门（如社会科学、自然科学、数学科学、系统科学、人体科学、思维科学、行为科学、地理科学、环境科学、建筑科学、军事科学、文学艺术等）。这十几个大部门几乎覆盖了人类社会的所有方面和所有层次，每一个大部门从顶至下又分为哲学层、桥梁层、基础科学、技术科学、工程技术和前科学六个层次。各大部门哲学层是人类各类科学知识的最高概括和总结，是最正确的哲学思想——马克思主义哲学。桥梁层将马克思主义哲学同各大部门主体联系起来，实际上是部门哲学思想的总结。例如，大部门同马克思主义哲学的桥梁有自然科学-自然辩证法、社会科学-历史唯物主义、数学科学-数学哲学、系统科学-系统哲学、思维科学-认识论等。而前科学是亿万人民从事各领域实践工作积累的经验、体会、心得、资料等尚未纳入科学体系的丰富多彩的知识。钱学森指出我们要充分运用这个马克思主义哲学指导的现代科学技术体系，来认识世界、改造世界、建设社会主义、实现共产主义。

2. 倡导建立系统科学、人体科学、思维科学并组建学会

20世纪70年代末80年代初，钱学森倡导建立我国系统科学、人体科学、思维科学等学科大部门，组织起一批崭新的科学技术方面军，开展了新的探索。这些学科为我国国民经济和国防建设做出了重大贡献，培养出了一大批人才。

3. 开放复杂巨系统的科学概念

20 世纪 80 年代中后期，钱学森站在世界科学技术发展的潮头和高峰之上，深邃地观察、研究人类社会发展的现状和未来，透彻地认识到复杂系统问题的重要性。实际上，人类的政治、经济、军事、外交、文化、科技与社会发展、社会管理等问题都是典型的复杂系统问题。钱学森等比西方学者更科学地提出“开放的复杂巨系统”这一科学概念。

4. “从定性到定量的综合集成方法”这一根本方法论

到 20 世纪 90 年代初，全世界并没有明确的方法来处理开放的复杂巨系统问题。没有能获得问题解析解的可用的统一的数学方法。钱学森、于景元、戴汝为等于 80 年代末 90 年代初提出“从定性到定量的综合集成方法”这一根本方法论。钱学森斩钉截铁地指出：“这是当今唯一可行的根本途径”。时任中国科学院院长周光召认为“从定性到定量的综合集成方法不仅是研究开放的复杂巨系统的方法论，实际上是所有科学技术发展的方法论”。

5. 人机结合，人网结合，以人为主的综合集成研讨厅

20 世纪 90 年代初，钱学森、于景元、戴汝为等又继续前进，在总结几十年科学研究工作经验，“两弹一星”研发管理经验，国外 C³I、C⁴ISR 军事指挥控制系统，特别是以毛泽东同志为核心的党的第一代中央领导集体实行民主集中制，实行“从群众中来，到群众中去”的群众路线，“集大成，得智慧”，在延安窑洞和西柏坡简陋的指挥所里领导中国革命取得成功的宝贵精神财富之后，认为要解决开放的复杂巨系统的问题，要想更好地采用“从定性到定量的综合集成方法”，应该充分利用当代计算机科学技术、通信技术、网络技术、人工智能、计算机仿真模拟技术、数据库、知识库、专家系统等一整套的信息科学技术，构造“人机结合，人网结合，以人为主的综合集成研讨厅”。这种综合集成研讨厅的实质是将现代科学技术体系中的“知识体系”“专家体系”和“计算机网络软硬件体系”，简称为“机器体系”，三者有机地结合起来；在信息系统支持下，在各种计算资源的协助下实现从定性到定量的认识转化，逐步完成系统建模；在这种条件下使人的大脑得到最大限度的激发，通过群体研讨，产生创造性地解决问题的方案；又运用计算机仿真模拟系统对解决办法、方案进行仿真模拟的“预实践”；方案经“预实践”验证可行，就投入实施；若仿真发现有问題，就再修改方案，直到通过。研发并采用“人机结合，人网结合，以人为主的综合集成研讨厅”就有可能使我们的决策和研究更科学、更符合实际。

6. 大成智慧工程与大成智慧学

钱学森于 1992~1993 年又进一步发展了前述的科学探索,将我国传统文化中的“集大成,得智慧”的思想结合综合集成研讨厅的学说,提出大成智慧工程和大成智慧学。他指出:“大成智慧工程(meta-synthetic engineering)的特点和实质就是从定性到定量的综合集成研讨厅体系(hall for workshop of meta-synthetic engineering),把各方面有关专家的思维成果和智慧、理论、知识、经验、判断以及古今中外有关的信息、情报、数据等与计算机、多媒体技术、灵境技术、信息网络设备等有机地结合起来,构成人机结合的智能系统,同步快速地对各种类型的复杂性事物(开放复杂巨系统)进行从定性到定量,从感性到理性再到实践,循环往复,逐步深入与提高的分析和综合。在此过程中,不断以学术讨论班(seminar)的方式启迪参与者的心智,激发群体智慧,发展现代科学技术体系知识共享的整体优势,集古今中外智慧之大成,使人获得新的知识、新的观念,丰富人的智慧,提高人的智能,特别是创造性思维的能力,从而找出从总体上观察和解决问题的最佳方案”^①。

这样的大成智慧工程,实际上是把计算机通过信息网络的信息处理,与集体人脑思维的信息处理两者紧密地结合起来,形成一个人为的开放复杂巨系统。在这个知识系统中,通过各种信息和生动的形象以及模拟的预想现象等,可以拓宽人们的视野,使人接触到广泛的世界,“感受到从前不能感受到的东西,大至宇宙,小至分子、原子,人都能审视感触”,从而能打开思路,更准确地把握各种复杂巨系统的微观与宏观、现象与本质、相对稳定与持续发展的内在规律等。做到“在定方针时居高远望,统揽全局,抓住关键;在制定行动计划时又注意到一切因素,重视细节”。使决策系统既具有战略意义又符合实际,切实可行,有所前进,有所创新。

钱学森在 2001 年 3 月 20 日接受文汇报记者采访时深情地说:“结合现代信息技术和网络技术,我们将能集人类有史以来的一切知识、经验之大成,大大推动我国社会物质文明和精神文明建设的发展,实现古人所说‘集大成,得智慧’的梦想。智慧是比知识更高一个层次的东西了,如果我们在 21 世纪真的把人的智慧都激发出来,那我们的决策就相当高明了”,“我相信,我们中国科学家从系统工程、系统科学出发,进而开创的大成智慧学在 21 世纪一定会成功”。

7. 社会主义事业总体设计部

1995 年,钱学森向中央政治局常委全体同志提出关于建立社会主义现代化事

^① 戴汝为. 现代科学技术体系与大成智慧. 中国科学工程, 2008, 10(10): 4-8.

业总体设计部的建议。他多次提出要从整体上把握社会主义事业的全局，要有长远大战略。他又提出“社会系统工程”“社会工程”等理论框架，创立了组织管理社会主义现代化建设的科学方法。他给我们党和国家的科学发展出了一个金点子，具有重大的现实意义和深远的历史意义。

钱学森等的理论框架一经提出，便引起国内外学者的广泛关注。信息科学领域的工作者很自然地将工作的重点放到人机结合、人网结合、从定性到定量的综合集成研讨厅的研究上来了。戴汝为、于景元率先进行实践，分别在国家自然科学基金和原航空航天工业部的支持下研制出两个应用系统。

我们这个研究团队从 2004 年开始，在军队科研单位的支持下，开展综合集成研讨厅的研发，组成了一个长期、稳定、跨单位的“综合集成联合科学实验室”，十几年来开展了一系列工作，取得了重要进展。熊才权是这个实验室最早的成员和当前的主要负责人之一。

在艰苦的研究实践中，我们从工程实现的角度观察，认识到解决开放的复杂巨系统问题的综合集成研讨厅可以具体化为五个要素：综合集成研讨环境、多元信息支撑环境、计算资源支持环境、计算机仿真系统和计算机网络软硬件系统。而综合集成研讨环境是这类研讨厅系统的核心部分，它是人类专家同研讨厅其他要素结合的枢纽。它是各类信息、计算资源及计算结果、仿真结果和过程的汇集地。它是激发专家群体创造性的所在，它是研讨结果涌现之处。而综合集成的思维模型（即社会集体思维的重要组成部分）是这一要素的核心机理。

早在熊才权攻读博士学位时，我就将综合集成研讨环境的研究定为主攻方向，并就综合集成研讨环境的定义、要素、构成、关键问题进行了共同的研究和探索，完成了军用综合集成研讨厅、综合集成研讨环境的研究与开发工作。博士毕业后，熊才权继续参加“综合集成联合科学实验室”的科研工作，参与完成了“群决策作业平台”“研讨式教学系统”“军事战略综合集成研讨厅”“战略论坛支持系统”等一批研讨厅项目。熊才权一直主持这些项目中的综合集成研讨环境方面的工作，做出了重要贡献。

熊才权在深入系统地研究国内外类似综合集成研讨厅研究成果的基础上锲而不舍，富有创造性地进行研究工作，形成了这部专著。这部专著以思维科学和综合集成法为基础，以综合集成模型与算法为核心，以综合集成研讨环境设计与实现为目标，全面阐述综合集成研讨环境的理论、方法和技术。首先根据综合集成法和群体思维特性，提出一种能满足复杂问题求解和决策的群体研讨过程框架。其次，以辩论模型为理论基础，提出针对不同研讨模式的研讨模型与算法，包括协商研讨模式中的群体共识涌现模型和基于 IBIS 的协商对话模型，劝说研讨模式中的扩展辩论模型和基于可信度的不确定性辩论模型，决策研讨模式中的多偏好信息集结和群体一致性分析方法，表决研讨模式中的多方式投票模型等。最后对

综合集成研讨环境设计与实现中的关键技术问题进行研究，并给出解决方案。

据我所知这部专著是国内第一部专门论述综合集成研讨模型和实现技术的著作，对于从事这个领域研究的工作者在理论和实践两个方面均有参考价值。

这部专著结构合理、逻辑严密、论述深入，适合从事思维科学、计算机科学与技术、系统科学、智能信息处理等研究的高年级本科生、研究生和科技人员阅读参考。

我们清醒地认识到今天所做的一系列研究工作离钱学森指出的宏伟目标还有很大的距离。此时此刻毛泽东同志的诗句是我们心情的写照：

雄关漫道真如铁，而今迈步从头越！

华中科技大学 人工智能研究所所长 李德华

2019年1月

前 言

为了解决开放的复杂巨系统问题，我国科学家钱学森提出了“从定性到定量的综合集成法”，以及这一方法的实现技术——综合集成研讨厅体系。综合集成研讨厅的目标是为专家群体提供一个处理开放的复杂巨系统的可操作平台，通过这个平台可以搜集专家经验、智慧，并利用平台提供的工具对专家意见进行建模、仿真、验证，最后通过综合集成得到最终的决策意见或问题求解方案。综合集成研讨厅从逻辑上看可以分为专家体系、知识体系和机器体系三个部分，而从物理实现上看可以分为综合集成研讨环境、多元信息支持系统和模型与工具支持系统等三个子系统，其中综合集成研讨环境是综合集成研讨厅的核心部件。

综合集成研讨环境是人机交互的接口，是人机结合的关键部件，它一方面将专家的知识、经验和智慧收集到机器系统中，提升机器的“性智”；另一方面，机器系统对收集到的专家经验和智慧进行智能处理，并将处理结果呈现给专家，进一步激活专家的思路，提升专家的“量智”，真正实现人帮机、机帮人的效果。综合集成研讨环境的设计与实现需要解决许多理论、方法与技术问题，一是群体研讨过程框架，包括研讨模式与研讨流程编辑、研讨过程控制等；二是不同研讨模式的模型与算法，能对专家输入的信息进行建模和计算，自动得出专家意见共识值；三是人机交互设计，一方面要便于专家输入意见信息，另一方面要实时可视化展示计算结果；四是研讨信息存储与查询，研讨信息智能处理等。

本书较为系统地介绍作者近年来从事综合集成法、辩论模型和综合集成研讨环境设计与开发等研究的主要成果。全书共 11 章，大致可分为三个部分。第一部分（第 1 章和第 2 章）介绍复杂系统与复杂性科学、面向复杂问题求解的综合集成法、综合集成研讨厅、综合集成研讨环境的基本概念。在分析综合集成法和群体思维特性的基础上，提出群体研讨过程框架，该框架包括协商研讨、劝说研讨、决策研讨和表决研讨等四种研讨模式，将这四种研讨模式进行组合和编辑可形成多种研讨流程，分别用于解决不同的复杂决策问题，其中“协商研讨（劝说研讨）→决策研讨→表决研讨”是全研讨过程框架，能支持从定性到定量的综合集成。第二部分（第 3~10 章）介绍辩论模型基本概念和各研讨模式的研讨模型与算法，包括面向协商研讨模式的群体智慧涌现模型和基于 IBIS 的协商研讨模型，面向劝说研讨模式的扩展辩论模型和基于可信度的不确定性辩论模型，面向决策研讨模式的多偏好信息集结和群体一致性分析方法等，以及协商研讨和劝说研讨中的研

讨文本分析方法，并用实验验证这些模型与算法的有效性；第三部分（第 11 章）介绍综合集成研讨环境的设计与实现技术，首先对综合集成研讨环境进行功能需求分析，确定系统软件体系结构，然后对研讨过程控制、研讨信息可视化、资料信息智能推送、协同编辑和人机界面设计等关键技术问题进行深入研究，给出解决方案。

本书工作得到了国家重点研发计划项目（项目编号：2017YFC1405403）、国家自然科学基金面上项目（项目编号：61075059）、湖北工业大学绿色工业科技引领计划项目（产品研发类）（项目编号：CPYF2017008）、湖北省自然科学基金项目（项目编号：2007ABA025）、湖北省教育厅科技计划重点项目（项目编号：D20101402）的资助，在此表示衷心的感谢。

在本书课题研究和撰写过程中，作者的导师华中科技大学李德华教授给予了悉心指导，提出了许多建设性意见，并欣然为本书作序。综合集成联合科学实验室的研究人员陈世鸿、丁义明、赵彤洲、阮军、黄雪娟、王改华、陈磊、刘侃，合作单位的专家韩韧、孙党恩、苏喜生、林松，以及作者的同事刘春、邓娜、閻大海、梅清等给予了大力支持和帮助。作者指导的学生张玉、朱建军、李元、李焯、吕可、郭攀峰、陈诗雨、董奕、王昊、尉远方等参与了部分研究或程序编写工作。在此，一并表示衷心的感谢。此外，本书参考了国内外相关研究文献，谨向相关作者表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请专家和读者批评指正。

作 者

2019 年 1 月于武汉

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 复杂系统与复杂性科学	1
1.2 综合集成方法论	4
1.3 综合集成研讨厅	5
1.4 综合集成研讨环境	8
1.4.1 综合集成研讨环境的基本概念	8
1.4.2 综合集成研讨环境的工作目标	12
1.4.3 综合集成研讨环境的实现途径	13
1.5 本书研究目标、技术路线及主要内容	15
1.6 本章小结	19
参考文献	19
第 2 章 群体研讨过程框架	23
2.1 概述	23
2.2 群体思维特性	24
2.3 群体共识	26
2.3.1 共识的基本概念	26
2.3.2 综合集成研讨厅中的共识	28
2.4 研讨过程框架	29
2.4.1 研讨模式	29
2.4.2 研讨流程编辑	36
2.4.3 同步研讨与异步研讨	38
2.5 本章小结	39
参考文献	40
第 3 章 辩论模型基本理论	42
3.1 概述	42
3.2 对日常辩论建模	43
3.3 基于辩论的形式化系统建模	47

3.4 抽象辩论框架	49
3.4.1 抽象辩论框架的基本概念	49
3.4.2 抽象辩论框架的语义扩充	51
3.4.3 基于语义扩充的争议评价	61
3.5 辩论模型的应用	62
3.6 本章小结	63
参考文献	64
第4章 群体智慧涌现模型	67
4.1 概述	67
4.2 群体智慧涌现	67
4.2.1 知识的产生	67
4.2.2 群体智慧涌现技术	69
4.3 研讨信息组织模型	72
4.3.1 研讨信息结构	72
4.3.2 共识涌现图	73
4.3.3 共识值计算	74
4.4 实例分析	75
4.5 本章小结	77
参考文献	78
第5章 扩展辩论模型	80
5.1 概述	80
5.2 扩展辩论模型的形式化描述	80
5.3 争议评价算法	83
5.4 实例分析	87
5.5 本章小结	90
参考文献	90
第6章 基于可信度的辩论模型及争议评价算法	91
6.1 概述	91
6.2 可信度方法	92
6.3 基于可信度的辩论模型	93
6.3.1 基本辩论框架	93
6.3.2 争议可信度表示	94
6.4 基于可信度的争议评价算法	96
6.4.1 争议结论可信度计算	96
6.4.2 可信度合成	98

6.4.3 可信度传递	99
6.4.4 一致性与可行性分析	101
6.5 实例分析	102
6.6 相关工作比较	104
6.7 本章小结	106
参考文献	107
第 7 章 基于 IBIS 的协商研讨模型	108
7.1 概述	108
7.2 协商研讨框架	109
7.3 协商研讨模糊 Petri 网	112
7.3.1 辩论推理与模糊 Petri 网	112
7.3.2 将协商研讨框架映射为模糊 Petri 网	113
7.4 基于模糊 Petri 网的争议评价算法	115
7.4.1 托肯值合成计算	115
7.4.2 托肯值更新算法	116
7.4.3 算法讨论	118
7.5 实例分析	118
7.6 相关工作比较	122
7.7 本章小结	125
参考文献	125
第 8 章 研讨文本分析方法	128
8.1 概述	128
8.2 文本预处理	129
8.3 文本聚类分析	131
8.4 文本摘要算法	132
8.4.1 基于 TextRank 的文本摘要算法	132
8.4.2 TextRank 算法改进	134
8.5 应用效果分析	135
8.5.1 实验设计	135
8.5.2 实验过程	136
8.5.3 效果评估	139
8.6 本章小结	141
参考文献	141
第 9 章 决策研讨模型	144
9.1 概述	144

9.2	偏好信息表达	146
9.2.1	问题描述	146
9.2.2	常见偏好信息表达形式	147
9.2.3	偏好信息规范化	149
9.3	群体一致性分析	153
9.3.1	偏好矢量相似度	153
9.3.2	群体一致性定义	154
9.4	决策共识达成过程	154
9.5	实例分析	155
9.6	本章小结	159
	参考文献	159
第 10 章	基于保护少数人意见的群体一致性分析	162
10.1	概述	162
10.2	少数人成员特性及少数人意见的重要性	162
10.3	专家意见聚类分析	163
10.3.1	问题描述	163
10.3.2	现有聚类算法	164
10.3.3	启发式聚类算法	166
10.4	基于聚类的专家意见一致性分析	167
10.4.1	群体一致性分析指标	167
10.4.2	基于聚类分析的研讨反馈机制	169
10.5	基于平行坐标法的聚类结果可视化	170
10.5.1	平行坐标法	171
10.5.2	专家聚类可视化	171
10.6	算例分析	172
10.6.1	决策共识达成实验	172
10.6.2	聚类效果分析	174
10.7	本章小结	176
	参考文献	177
第 11 章	综合集成研讨环境实现技术	178
11.1	概述	178
11.2	系统功能分析	179
11.2.1	研讨 workflow	179
11.2.2	系统功能结构	179
11.2.3	系统体系结构设计	182

11.3 研讨过程控制	185
11.3.1 研讨过程控制中的问题	185
11.3.2 WebSocket 技术	186
11.3.3 基于 WebSocket 的研讨过程控制	187
11.4 研讨信息可视化	189
11.4.1 研讨信息可视化的必要性	189
11.4.2 D3 技术	189
11.4.3 基于 D3 的研讨信息可视化组件设计	190
11.5 在线协同编辑	193
11.5.1 协同编辑涉及的主要问题	194
11.5.2 协同编辑实现方法	194
11.6 资料信息智能推送	196
11.6.1 获取推荐数据	197
11.6.2 推荐算法	197
11.7 研讨环境设计	199
11.7.1 协商研讨环境	199
11.7.2 决策研讨环境	200
11.7.3 表决研讨环境	200
11.8 本章小结	202
参考文献	203

第1章 绪 论

1.1 复杂系统与复杂性科学

随着科学技术的飞速发展和进步，越来越多的复杂事物和现象进入人们的视野，如宏观经济运行问题、军事战略问题、生态环境问题、生命系统与人工生命、免疫系统以及人类社会活动等，迫切需要一种新的理论来指导与这些复杂问题相关的研究和实践。

复杂性是复杂系统的基本特性^[1]。从狭义的角度可以定义复杂性为“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”。复杂性的最明显表现是人们不容易通过局部来认识整体。复杂性有以下三种形态。①动态复杂性，又称作行为复杂性，是指系统行为随时间而变化的特性。系统是不断发展变化的，系统与环境关系密切，与环境之间存在物质、能量和信息的交换，并能自我调节适应环境变化，系统本身对未来的发展变化有一定的预测能力。现有复杂性科学的研究大多针对动态复杂性，主要目标是解释系统的自调整行为的特点，探索系统的历史演化规律。如耗散结构理论以熵理论为基础研究系统的自组织行为，协同学从子系统间有规律的协同作用解释系统由无序向有序状态的演化，混沌理论研究确定性系统中的内在随机性，突变论研究连续过程引起的不连续结果，超循环理论研究生命领域中的非平衡系统的自组织问题等。②结构复杂性，是指系统在某一时刻点上的构成状态，是从系统构成的角度定义系统的复杂性。系统具有多层次、多元素的结构，各层次、各元素在多维度上存在相互关系，每一层次均成为其上一层次的组成单元，同时助力系统某一功能的实现。系统与元素之间存在着不可分解性和不可还原性，不能通过组成单元的性质来预测系统的整体性质。系统的构成状况是自演化的结果，且随时间变化。因此，结构复杂性与动态复杂性密切相关。③静态复杂性，是指研究主体对研究对象做出主观判断的复杂性，是当人们由于对所研究问题缺乏足够了解而受挫时，在人脑中产生的一种感觉。静态复杂性取决于人的思维能力，但静态复杂性从根本上来自于动态复杂性和结构复杂性，是动态复杂性和结构复杂性的主观表现。动态复杂性和结构复杂性属于本体论范畴，可称作客观复杂性；静态复杂性属于认识论范畴，可称作主观复杂性。

具有复杂性特点的系统称为复杂系统。常见的复杂系统有以下几种。①生物

系统，如神经网络及思维过程、动物种群的消长过程、受精卵胚胎的形成过程、生命起源、脱氧核糖核酸（deoxyribonucleic acid, DNA）的形成、物种的进化、免疫系统等。②经济系统，如金融系统、股市等。经济系统有不同层次，某个层次的系统一定受其他层次的系统影响。③环境系统与生态系统，如风暴的形成、河流断流、土地沙化、水土流失、厄尔尼诺现象等。④社会系统，如不同层次的管理系统，管理也是一个演化的过程。⑤工程系统，如因特网与用户组成的系统，以及其他系统，如宇宙系统、微观粒子系统等。

复杂系统的特点有：①非线性（不可叠加性）与动态性。系统的各组成部分之间存在复杂的非线性关系，组成部分（如分子）彼此相互作用后整体“突现”（emerge）一种新的特性，系统的整体大于各组成部分之和，每个层次局部不能说明整体，低层次的规律不能说明高层次的规律；系统处于不断变化发展之中，不可能达到稳定状态。②非周期性 with 开放性。系统的演变不具有明显的规律，系统在运动过程中不会重复原来的轨迹。系统在开放环境中表现出自组织能力，能通过反馈进行自我控制和调节，适应外界环境的变化。③积累效应（或称初值敏感性）。很小的初值可能导致巨大的变化。这种敏感性使人们不可能对系统做出精确的长期预测。④奇异吸引性。吸引子是一个系统在不受外界干扰的情况下最终趋向的一种稳定行为模式。稳定吸引子使系统的运行轨道趋向于单点集（点吸引子）或者极限环；不稳定吸引子使系统趋向于随机的行为模式。奇异吸引子是一种既稳定又不稳定的吸引子，处在稳定与不稳定区域之间的边界。由于具有初值敏感性，复杂系统虽然同属于一个吸引子却可能发生背离。⑤结构的自相似性（分形性）。系统的局部以某种方式与整体相似。⑥智能性。系统各组成成分具有某种程度的智能，即具有了解其所处的环境，预测其变化，并按预定目标采取行动的能力，这种智能性推动了系统的演化，如生物进化、技术革新、经济发展及社会进步等。

复杂性科学是研究复杂系统产生复杂性的机理及其演化规律的科学，其起源可以追溯到 20 世纪上叶。早期的研究主要有 von Bertalanffy 的一般系统论、Wiener 的控制论及 McCulloch 和 Pitts 的神经网络应用控制论等^[1, 2]。一般系统论来源于生物学中的有机体论，强调必须把有机体当作一个整体或系统来研究，才能发现不同层次上的组织原理。控制论主要研究在动物和机器中控制与通信的理论问题，属于科学的范围。神经网络应用控制论中的反馈机制，利用人造装置去模拟人或动物的思维过程和智能活动。这些理论主要研究复杂系统的存在，并用数学方法描述系统，其研究目标是使系统达到一种整体性的优化指标。von Bertalanffy 的一般系统论的创立标志着复杂性科学的诞生。20 世纪 50~80 年代，Prigogine 提出耗散结构理论，运用非线性微分方程以及随机过程等数学工具，对系统的宏观性质进行研究，指出复杂性是自组织的产物，在远离平衡