

金菊良 魏一鸣 著

复杂系统广义智能 评价方法与应用

*Generalized Intelligent Assessment Methods for
Complex Systems and Applications*

 科学出版社
www.sciencep.com

复杂系统广义智能评价方法与应用

Generalized Intelligent Assessment Methods for Complex Systems and Applications

金菊良 魏一鸣 著

国家自然科学基金项目(No. 70425001, No. 50579009)资助

科学出版社
北京

内 容 简 介

本书以复杂系统评价方法论为逻辑经线,以广义智能评价方法及其在实际系统评价中的应用为逻辑纬线,开展了主观赋权法、客观赋权法、相似评价法、模式识别法、决策分析法和组合评价法等一系列基于广义智能方法的系统评价新方法的研究和应用,对提出的每一种广义智能评价方法,都提供了基本原理、实现技术和应用实例,反映了广义智能方法在复杂系统评价领域的新发展。

本书可供从事管理科学与工程、复杂性科学、系统工程、水利工程、农业工程、土木工程、环境工程、地理与资源科学以及相关专业的科研、管理和工程技术人员阅读,也可作为相关专业的研究生、本科生和教师的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

复杂系统广义智能评价方法与应用=Generalized Intelligent Assessment Methods for Complex Systems and Applications/金菊良,魏一鸣著. —北京:科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-020087-7

I. 复… II. ①金…②魏 III. 系统分析-评价 IV. N94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 150638 号

责任编辑:沈 建/责任校对:陈玉凤

责任印制:刘士平/封面设计:王 浩

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 1 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2008 年 1 月第一次印刷 印张:16 1/4

印数:1—3 000 字数:310 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(科印))

序

为了建设可持续发展、协调的和谐社会，需要根据科学发展观的指导思想，运用现代科学理论、方法和技术，研究我国社会经济、水土资源、生态环境等各领域的复杂大系统的历史和当前运行状态，进行定性与定量相结合的动态分析与综合评价，预测未来发展趋势，提出协调对策和实施方案，建立动态监测和预警信息系统，这是具有重大科学意义和广泛应用价值的课题。

魏一鸣、金菊良两教授长期密切合作，在总结多年研究成果基础上，辛勤笔耕完成了《复杂系统广义智能评价方法与应用》专著。它在学术上具有如下两方面的特色：

1) 运用复杂系统科学理论与大系统控制论的广义模型方法，建立了适用于多层次、多指标、具有多种不确定性的复杂大系统的动态分析与综合评价模型。给出了合理分解复杂大系统的方法、综合评价模型的建模机理和构建方法。

2) 运用广义人工智能的理论方法和技术，提出了基于广义智能的主观赋权法、客观赋权法、相似评价法、模式识别法、决策分析法和组合评价法等复杂系统评价的新方法。给出了上述基于广义智能的评价方法的基本原理、详细操作步骤和典型应用实例。

《复杂系统广义智能评价方法与应用》一书，内容丰富、深入浅出、理论联系实际，具有创新性、前沿性、可操作性和实用性。

我相信并希望《复杂系统广义智能评价方法与应用》的出版与发行，将为各领域复杂大系统的动态分析与综合评价，为复杂系统科学、智能科学技术的进一步发展，为我国和谐社会建设做出积极的贡献。

中国人工智能学会 荣誉理事长

涂序彦

2007年10月16日于北京科技大学

前 言

系统的复杂性,泛指系统结构特征的各种不确定性和系统行为特征的各种不确定性。例如,系统的大规模性、内在差异性、层次性、开放性、演化性、随机性、模糊性等各种定性客观特征,未确知性等各种定性主观特征,系统中各种作用关系的非线性(例如涌现性、初值敏感性、自组织、自适应、自相似),系统在时间和空间演化方面的不可逆性,这些均属复杂性。具有复杂性的系统称为复杂系统。研究复杂性和复杂系统的综合性学科称为复杂性科学,它是一门最近20年发展起来的综合性交叉科学,被认为是21世纪九大前沿性科学之一,也被誉为“21世纪的科学”。它涉及自然、工程、资源、环境、经济和社会等几乎所有领域,具有广泛的应用背景,近年来引起了国内外广泛的关注和探索。复杂系统评价就是根据复杂系统对象在总体上的相似性和差异性所进行的各种分类和排序过程,是当前复杂性科学研究的重要内容,在以全面和综合的观点判断复杂系统运行的历史轨迹和当前状态,预测系统发展的未来趋势,建立必要的评价信息,指定并实施相应对策和行动方案,促进系统协调运行等方面具有重要意义,在经济、社会、资源、环境等各个领域具有广泛的应用价值。

复杂系统评价的实质是建立评价方法,把一个多层次、多指标问题综合成单层次、单指标的形式,阐明综合评价模型的形成机理和结构形式。其中必须解决如下关键问题:①如何确定、生成评价对象?这是对评价对象的采样问题,一般要求有代表性、可比性、可测性。对评价对象进行分类排序是系统评价的总目标。②如何确定、生成评价指标?评价指标体系既是判断评价对象价值标准的方式,也是表达系统总目标及实现总目标的具体途径,因此,评价指标体系在系统评价过程中十分重要。③如何测度指标值?评价指标的涵义界定了评价对象不同方面价值的标准,据此定量或半定量地测度评价指标值的差异程度。④定性指标如何进行量化?定性指标往往具有模糊性、未确知性、随机性、粗糙性、灰色性、混沌性等不确定性,这些指标的量化方法是目前正在快速发展、但远未成熟的不确定性数学的主要研究内容。⑤如何进行指标的一致无量纲化处理?各个指标对评价结果的作用都有方向性。各指标值的量纲和数量级的差异是系统评价存在不可公度性的主要原因,指标一致无量纲化是目前处理不可公度性的主要方法之一,不同的处理方式将对评价结果产生重要影响。⑥如何确定各指标的权重?指标权重既是指标之间重要性差异程度的反映,也是评价对象之间整体价值差异程度和评价指标在各评价对象观测值之间差异程度的体现。前者定量描述评

价主体的主观偏好程度,后者定量刻画评价指标值样本数据集的客观差异。因此,合理确定指标权重的过程,就是充分挖掘评价问题所蕴含的各种客观信息和主观信息的复杂过程。⑦如何确定综合评价模型?其实质问题就是如何平衡各单指标评价价值的多样性、差异性和不相容性。复杂系统评价问题常常表现出递阶层次结构,这时系统整体的综合评价模型需逐步综合各层次的综合评价模型,因而通常表现出多次复合的显式或隐式函数。用不同综合评价模型处理同一评价问题,它们的评价结果可能不尽一致,如何选择和组合这些不同综合评价模型是一个重要问题。⑧上述7个问题的不同处理方法是否影响以及如何影响系统评价总目标的实现(综合评价模型的灵敏度分析)?⑨评价主体是如何在上述8个问题中起作用的?在有效的评价模型中应该尽可能利用和反映这些作用信息。上述9个问题已成为当前复杂系统评价研究领域的核心问题和难点问题。随着复杂系统评价理论和实践的深度与广度的不断演进,上述9个问题常常都因是动态问题而日趋复杂,甚至系统评价总目标也时常随着系统的不断演化而必须做不断调整,所有这些问题使得复杂系统评价方法的种种复杂性也日趋凸显。

常规的系统评价方法偏向于经典数学方法,处理实际复杂系统评价问题已日趋困难。例如,单一的经济评价方法存在明显缺陷,过分地依赖于运筹学所建立起来的数学决策模型容易使问题失真。这些常规的系统评价方法的主要不足是它们很难结合或利用专家和决策者在系统评价时所做选择和判断过程中所蕴含的经验、知识和智慧,很难利用系统评价过程中的思维规律和人脑的智能特征,很难进行定性分析与定量计算的综合集成。这些常规方法常常只能给处理实际复杂系统评价问题提供部分工具,但不能产生相应的智慧。而另一方面,人类利用其发达的大脑智能在各种系统综合评价的长期实践中积累了大量的理论认识、经验认识和介于理论认识与经验认识之间的各种半经验半理论认识,实际复杂系统评价的成功实践过程都是综合利用了建立在这三类评价认识基础上的、具有显著智能特征的综合评价方法,这类方法是理论与经验相互补充,定性分析与定量计算相互集成,基于形式逻辑的演绎思维与基于非形式逻辑的归纳思维和创新思维相互结合。为此,钱学森先生提出在解决复杂系统问题时,在难于或不适宜建立数学模型的场合,要利用人的知识经验和人工智能、模糊识别、知识工程等方法建立知识模型,越过数学模型的障碍,直接由知识模型转化为计算机模型,这样采用知识模型与数学模型相结合形成广义模型,便于处理复杂系统综合评价的模型化问题。目前,模拟智能方法(它又称广义智能方法,是指用符号及其运算来表达智能特征、智能过程、智能结构、智能行为的各种方法,例如目前已成为人工智能学科前沿的计算智能)已成为建立和发展这类广义模型的最有效方法之一。

近20年来国内外系统工程界已开始对擅长处理专家的经验知识和思维特征,擅长模拟智能的过程、结构和行为,以及擅长挖掘评价问题中客观信息和主观信

息的遗传算法、人工神经网络、模糊集理论、蒙特卡罗方法等模拟智能方法及其在实际复杂系统评价中的应用进行了广泛而富有开拓性的理论与应用研究, 这些研究成果已在很大程度上使得当代系统评价方法的面貌焕然一新, 并日益凸显出这些模拟智能方法在复杂系统评价中的独特价值以及对这些模拟智能方法进行深入研究的必要性。目前, 这些模拟智能方法实际上已成为以简洁而严密的形式描述实际复杂问题完整内容的有力工具, 已成为实现、应用、展开、验证、修正复杂系统评价方法的重要途径, 已成为系统评价中进行深入逻辑推演的思维方式。另一方面, 作为模拟智能系统的新兴应用数学方法, 这些模拟智能方法本身至今仍处在迅速发展之中, 它们的数学物理基础尚待完善, 而它们的应用领域和应用深度又在不断扩展, 与此时也暴露了它们的一些不足, 人们也在逐步认识它们用于系统综合评价的复杂性能, 以期予以改进或提出新的模拟智能方法。

基于以上认识, 本书旨在探讨将现今人工智能学科前沿领域中主要的模拟智能方法的基本原理、先进算法和实现技术尽可能全面而深入地应用于复杂系统评价领域, 研制适用于复杂系统评价问题的一系列新方法并进行广泛的实证检验, 以解决常规评价方法长期难以完善解决的一系列重大问题, 在系统工程领域开拓智能综合评价这一新的研究方向, 形成新的学科增长点, 特别是在处理实际复杂系统评价问题中有助于人们以更直接、更简便、更缜密、更新颖、也更宽阔的思想去研究问题, 为解决新问题开辟可操作的新途径。基于以上观点, 全书以复杂系统评价方法论为逻辑经线, 以广义智能评价方法及其在实际系统评价中的应用为逻辑纬线, 开展了主观赋权法、客观赋权法、相似评价法、模式识别法、决策分析法和组合评价法等一系列基于模拟智能方法的系统评价新方法的研制和应用。对提出的每一种智能评价方法, 都从实现技术上提供尽可能完备的评价方法的基本原理、操作步骤和应用实例, 力图反映模拟智能方法在复杂系统评价领域的新发展。

全书共分 7 章。第 1 章详细地阐述了复杂系统评价方法论、系统评价方法研究进展以及当前模拟智能的主要方法及其评价功能, 最后针对系统评价的复杂性, 提出了本书的框架。第 2 章为提取评价者和决策者经验知识中分类排序的主观信息, 探讨了基于主观赋权的智能评价方法的构造及其应用。第 3 章为提取评价指标样本数据集中分类排序的客观信息, 探讨了基于客观赋权的智能评价方法的构造及其应用。第 4 章至第 7 章, 提出了基于相似理论的智能评价方法、基于模式识别的智能评价方法、基于决策分析的智能评价方法和基于组合理论的智能评价方法等一系列基于模拟智能的系统评价新方法, 这些新方法具有一定的通用性, 它们汇集了作者近 10 年来的研究成果。

作者希望本书所提出的复杂系统评价方法论及其各种智能综合评价方法, 能给从事研究和应用复杂系统综合评价理论的人们提供新的思维方式、工作方式、

方法论框架、具体计算步骤,并通过评价实践再创新,利用这些新方法可以更自由、更客观地深入探讨本学科系统评价问题、本学科理论与实践的交叉问题以及与邻近的诸学科的交叉问题,以便做出更多更好的创新性成果;也希望这些评价新方法如同各种智能方法的演化过程一样,在未来的各种系统评价实践和理论检验中被不断“进化”,以进一步提高对各种复杂系统评价过程的内在逻辑结构和外部行为特征的认识水平,为复杂系统的有效管理提供科学依据。

本书可供从事管理科学与工程、复杂性科学、系统工程、水利工程、农业工程、土木工程、环境工程、地理与资源科学以及有关专业的科研、管理和工程技术人员阅读,也可作为相关专业的研究生参考教材。由于复杂系统评价问题涉及内容的广泛性,以及作者学术水平和能力的局限性,书中的一些观点和方法可能留有争议,恳请同行专家和读者给予批评指正。

本书参考了国内外许多学者的论著,吸收了同行们的辛勤劳动成果,我们从中得到了很多的教益和启发,在此谨向各位同行和专家表示衷心的感谢!长期以来的研究工作,得到了陈述彭院士、于景元、徐伟宣、丁晶、涂序彦、顾基发等教授和前辈的指导和帮助;涂序彦教授还在百忙之中欣然为本书作序。在此一并表示诚挚的谢意和崇高的敬意!

本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目(No. 70425001, No. 50579009)和教育部优秀青年教师资助计划项目(教人司[2002] 350)的联合资助,在此表示衷心的感谢!

作 者

2007年9月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 复杂系统与复杂性科学	1
1.1.1 基本概念	1
1.1.2 研究现状	2
1.2 复杂系统评价方法论	5
1.2.1 评价方法论的统一形式	5
1.2.2 评价方法论的关键问题	13
1.3 系统评价方法研究进展	18
1.3.1 确定评价对象生成函数的方法	18
1.3.2 确定评价指标生成函数的方法	18
1.3.3 确定指标测度函数的方法	19
1.3.4 确定定性指标量化函数的方法	19
1.3.5 确定指标一致无量纲化函数的方法	20
1.3.6 确定指标权重函数的方法	22
1.3.7 确定综合评价指标函数的方法	26
1.3.8 确定系统评价模型的其他方法	29
1.4 复杂系统广义智能评价方法的理论基础	29
1.4.1 模拟生物遗传机制的遗传算法	29
1.4.2 模拟人脑结构的人工神经网络方法	32
1.4.3 模拟模糊思维的模糊数学方法	33
1.4.4 模拟发散思维的蒙特卡罗方法	35
1.5 本书的目的与内容	39
第 2 章 基于主观赋权的智能评价方法	42
2.1 引言	42
2.2 检验判断矩阵一致性的遗传层次分析法	42
2.2.1 方法原理	43
2.2.2 在水资源开发工程环境影响评价中的应用	53
2.2.3 在废水处理方案评价中的应用	56

2.2.4	在自然灾害风险评价中的应用	57
2.3	修正判断矩阵一致性的遗传层次分析法	59
2.3.1	方法原理	59
2.3.2	在水资源可持续利用系统评价中的应用	67
2.3.3	在水资源开发工程环境影响评价中的应用	69
2.4	基于遗传算法的模糊层次分析法	70
2.4.1	方法原理	70
2.4.2	在水利工程经济评价中的应用	76
2.5	计算模糊综合评价权重的遗传算法	80
2.5.1	方法原理	80
2.5.2	在产品满意度评价中的应用	81
2.6	基于遗传算法的指数标度层次分析法	82
2.6.1	方法原理	83
2.6.2	在污水处理厂工艺方案优选中的应用	84
第3章	基于客观赋权的智能评价方法	87
3.1	引言	87
3.2	基于遗传算法的投影寻踪聚类评价方法	87
3.2.1	方法原理	87
3.2.2	在天然草地分类中的应用	93
3.2.3	在环境监测优化布点中的应用	95
3.2.4	在小流域治理效益分类评价中的应用	98
3.3	基于遗传算法的投影寻踪等级评价方法	99
3.3.1	方法原理	99
3.3.2	在水质综合评价中的应用	102
第4章	基于相似理论的智能评价方法	106
4.1	引言	106
4.2	基于遗传算法的 Shepard 相似插值评价方法	107
4.2.1	方法原理	107
4.2.2	在区域水资源可持续利用评价中的应用	108
4.2.3	在洪水灾情等级评价中的应用	112
4.3	基于遗传算法的理想区间法	113
4.3.1	方法原理	114
4.3.2	在大气环境质量综合评价中的应用	115
4.3.3	在水质评价中的应用	118
4.4	基于最优模糊等价矩阵的模糊聚类方法	120

4.4.1	方法原理	121
4.4.2	在城市环境单元分类中的应用	123
4.4.3	在水文站分类中的应用	123
4.4.4	在相似流域评价中的应用	125
4.5	基于非参数回归的系统评价方法	126
4.5.1	方法原理	127
4.5.2	在洪水灾情等级评价中的应用	129
4.5.3	在湖泊水质富营养化综合评价中的应用	131
第5章	基于模式识别的智能评价方法	133
5.1	引言	133
5.2	基于逻辑斯谛曲线的评价方法	134
5.2.1	方法原理	134
5.2.2	在洪水灾情评价中的应用	135
5.2.3	在水环境质量综合评价中的应用	136
5.3	基于BP神经网络的评价方法	139
5.3.1	方法原理	139
5.3.2	在自然灾害承灾体易损性分析评价中的应用	145
5.3.3	在洪水灾情评价中的应用	150
5.4	基于演化建模的评价方法	152
5.4.1	方法原理	153
5.4.2	在水质评价中的应用	155
5.4.3	在洪水灾情评价中的应用	158
5.5	基于遗传程序设计的评价方法	160
5.5.1	方法原理	161
5.5.2	在水质评价中的应用	164
5.5.3	在洪水灾情评价中的应用	166
第6章	基于决策分析的智能评价方法	169
6.1	引言	169
6.2	基于客观赋权法的工程方案综合评价方法	171
6.2.1	方法原理	171
6.2.2	在城市防洪标准方案优选中的应用	175
6.2.3	在灌区改造工程方案评价中的应用	177
6.2.4	在水稻节水栽培方案经济效益评价中的应用	179
6.3	基于投影寻踪的不确定型决策分析方法	180
6.3.1	方法原理	181

6.3.2 应用实例	183
6.4 基于遗传算法的城市防洪规划方案综合评价方法	185
6.4.1 方法原理	186
6.4.2 在城市防洪规划方案综合评价中的应用	186
6.5 基于遗传算法的动态多指标决策分析方法	190
6.5.1 方法原理	190
6.5.2 在城市工业企业经济效益评价中的应用	192
6.6 基于蒙特卡罗法的城市防洪工程经济风险评价方法	193
6.6.1 方法原理	194
6.6.2 应用实例	195
6.7 基于遗传算法的内部收益率经济评价方法	197
6.7.1 方法原理	198
6.7.2 在工程项目经济评价中的应用	199
6.8 基于单亲遗传算法的水资源最优分配方法	202
6.8.1 方法原理	202
6.8.2 在区域水资源合理配置中的应用	205
第7章 基于组合理论的智能评价方法	207
7.1 引言	207
7.2 基于遗传层次分析法的主客观组合赋权法	207
7.2.1 方法原理	208
7.2.2 在地下水水质评价中的应用	211
7.3 基于投影寻踪与遗传层次分析法的客观组合赋权法	215
7.3.1 方法原理	215
7.3.2 在区域开发度评价中的应用	217
7.4 基于遗传算法的赋权投影寻踪聚类评价方法	220
7.4.1 方法原理	220
7.4.2 在水土流失分区评价中的应用	222
7.5 基于群体决策的遗传层次分析法与理想区间法的组合评价方法	224
7.5.1 方法原理	225
7.5.2 在水资源可持续利用评价中的应用	228
7.6 基于遗传算法与兼容度极大化的组合评价方法	233
7.6.1 方法原理	234
7.6.2 在城市综合经济效益评价中的应用	235
参考文献	236

第 1 章 绪 论

1.1 复杂系统与复杂性科学

1.1.1 基本概念

从系统的组成角度看,系统是由两个或两个以上相互联系的要素组成的、具有整体功能和综合行为的集合(钱学森,1982;许国志,顾基发,车宏安,2000a;金菊良,丁晶,2002)。该定义规定了组成一般系统的 3 个条件:

1) 组成系统的要素必须两个或两个以上,它反映了系统的多样性和差异性,是系统不断演化的重要机制。

2) 各要素之间必须具有关联性,系统中不存在与其他要素无关的孤立要素,它反映了系统各要素相互作用、相互激励、相互依存、相互制约、相互补充、相互转化的内在相关性,也是系统不断演化的重要机制。

3) 系统的整体功能和综合行为必须不是系统各单个要素或这些要素之和所具有的,而是由各要素通过相互作用而涌现(emerge,即某种非加和的整体性突然出现)出来的(陈森发,2005)。与系统要素相关联的其他外部要素的集合称为系统的环境,它是研究对象全空间 R 中系统集合 S 与非系统集合 F 的过渡集合 E ,它们之间存在如下关系: $R=S \cup E \cup F, S \cap F = \Phi$ (空集)。系统的边界把系统与系统的环境区分开来,环境的边界把系统的环境与非系统集合区分开来。系统的边界和环境的边界具有弹性和动态性,反映了研究系统的不同时间、不同条件和不同要求,由此决定了系统的层次性,即一个系统既可以向下分解为一系列子系统,又可以向上隶属于更大的系统。

从系统的功能(系统与系统环境之间的相互作用)角度看,系统是由系统输入、系统转换和系统输出组成的集合。系统输入是环境对系统的激励,系统输出是系统对环境的响应,系统转换是以系统输入为定义域、系统输出为值域的映射。系统输入可以是物质变量、能量变量和信息变量,相应的系统输出也可以是这三类变量。根据系统与系统环境的相互作用,运用系统输入-系统输出不同的关系分析,形成了系统优化、模拟、预测、评价和决策分析等一系列处理一般系统问题的通用方法。

系统科学中的复杂性(complexity),泛指系统要素之间、要素与子系统之间、要素与系统之间、子系统与子系统之间、子系统与系统之间的关系(称为系统的结构特征)呈现的各种不确定性(uncertainty),以及系统与环境之间的关系(称为系

统的行为特征)呈现的各种不确定性。例如,系统的大规模性、内在差异性、层次性、开放性、演化性、随机性、模糊性等各种定性客观特征,未确知性等定性主观特征,系统中各种作用关系的非线性(如涌现性、初值敏感性、自组织、自适应、自相似),系统在时间和空间演化方面的不可逆性均属复杂性。

具有复杂性的系统称为复杂系统(complex system)。例如,以研究复杂性闻名于世的美国圣塔菲研究所(Santa Fe Institute)于 1984 年把复杂系统定义为:通过对一个系统的各组成部分的了解,仍不能对系统的性质做出完全的解释,这样的系统称为复杂系统。复杂系统在自然、工程、生物、经济、管理、政治和社会等科学领域中广泛存在,例如区域水安全保障系统、区域可持续发展评价系统、地理系统、人脑系统、生命系统、生态系统、社会系统、经济系统、互联网系统、中医诊断系统等。这些复杂系统的一些共同的特点有演化、涌现、自组织、自适应、自相似等(吴今培,2006)。复杂系统的智能性,即系统的组成部分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,是复杂系统的最本质特征(成思危,1999)。当人的经验、知识、思维、智慧成为系统的重要组成部分时,系统就变得极其复杂,因此凡是有人参与的系统均为复杂系统。经过长期的复杂性探索,戴汝为 1996 年指出,简单系统发展阶段的标志是控制论,复杂系统发展阶段的标志是人工智能和人机结合,从简单系统向复杂系统的发展,系统主要由数学方程描述转变为主要由计算机算法程序描述(许国志,1996)。

研究复杂性和复杂系统的复杂性科学(science of complexity),是一门最近 20 年发展起来的交叉科学,被世界科学界列为 21 世纪九大前沿性科学之一,被誉为“21 世纪的科学”,涉及自然、工程、资源、环境、经济和社会等几乎所有领域,具有广泛的应用前景,近年来引起了国内外广泛的关注和探索(成思危,1999)。

1.1.2 研究现状

从复杂性认识的发展历史看(吴彤,2000;张永光,2000):20 世纪 40~50 年代产生的一般系统论、控制论、信息论等理论首先从系统结构的存在特征方面,打破了机械的线性思维观点,建立了不同的因素相互作用的影响绝不是简单相加的观点,信息内含的多重意义、反馈作用和整体大于部分之和的思想已经真正深入人心;20 世纪 60~70 年代产生的耗散结构论、协同学、突变论和超循环论则从系统的行为特征和结构特征的演化方面,探索了复杂性产生的环境条件、动力机制、途径和耦合等问题,在一定条件下通过系统内的各个要素相互竞争并相互合作,从无序和混乱中自发、自主地产生秩序,从简单中产生出复杂性;20 世纪 70~80 年代产生的混沌理论和分形理论从系统的结构特征和行为特征的构造和模拟方面,使人们认识到,极其简单的动力学规律能够导致极其复杂的行为表现,目前已成为复杂系统思想革命的主要力量之一;20 世纪 80~90 年代以来的计算智能、人工生

命、复杂适应系统理论、复杂巨系统理论则从众多系统的结构特征和行为特征的综合和进化方面,进一步为人们提供了模拟、认识、应用和创造复杂性的重要思想和有效的实现途径。

钱居喜代治(1987)把处理复杂系统的方法归为4类:①尽可能把研究对象作为简单小规模的系统来认识,即在系统规模、复杂性与系统探讨的效果、费用之间进行平衡,不应该不必要地扩大系统的规模。②在认识系统的部分构造的基础上再认识系统的整体构造。无论多么复杂的系统,一定存在着可被认识的部分,根据使其可被认识的范围逐步扩大,就可逐步认识整体系统。③把大规模、复杂的系统分解为能处理的小规模、简单的系统,通过对子系统的处理和变换来实现对全体系统的处理。大规模系统中要素的结合程度不是一样的,大多存在相互紧密结合的部分和结合松散的部分。把结合紧密的部分作为子系统,根据各子系统的处理和子系统间的联系来实现对整个系统的处理。④把大规模、复杂的系统的各子系统简化为系统要素,再对全体系统进行处理。

钱学森等(1990)提出了用从定性到定量综合集成方法论来处理复杂系统,即把专家体系、数据和信息体系以及计算机体系有机结合起来,把各学科的知识 and 人的经验结合起来,构成一个高度智能化的人-机(计算机)结合、人-网(计算机网络)结合的体系,发挥这个体系的综合优势、整体优势和智能优势,把人的思维、思维的成果,人的经验、知识、智慧以及各种情报、资料和信息有机结合起来,由专家体系对复杂性问题进行多学科交叉研究,通过定性综合集成提出经验性判断,利用人、机结合的定性定量相结合得到定量描述,再经过从定性到定量综合集成获得系统的整体定量认识,经过这些定性描述、定量描述、定性推理、定量推理,从多方面的定性认识上升到定量认识,去解决复杂系统问题(戴汝为,1991)。例如,有的是将一些成熟的专业理论和方法综合集成到复杂系统方法论框架中,有的将长期积累的经验和认识融合于综合集成体系中,有的提出了可操作的创新的综合集成方法(曾珍香,顾培亮,2000)。顾基发等(2006)提出了物理-事理-人理系统方法论,认为处理复杂系统问题时既要考虑对象的物的方面(物理),又要考虑这些物如何更好地被利用的事的方面(事理),而认识问题、处理问题和实施管理与决策都离不开人的方面(人理)。

成思危(2000;2001)归纳了复杂性科学的如下主要特点:所研究的对象是复杂系统;所采用的研究方法是定性判断与定量计算相结合、微观分析与宏观综合相结合、还原论(reductionism)与整体论(holism)相结合、科学推理与哲学思辩相结合的方法;所用的工具主要有微分方程、形式逻辑、不确定条件下的决策技术(如数据挖掘、知识发现、智能挖掘)、综合集成技术(包括系统的结构化、系统与环境的集成、人的经验与数据的集成、各种模型的集成、从定性到定量的综合集成技术)、整体优化技术、计算智能、非线性科学、数理逻辑和计算机模拟、后现代主义分析、语

义学、符号学等;研究目的不是限于对客观事物的描述,而是更着重于揭示客观事物构成的原因及其演化的历程,并力图尽可能准确地预测其未来的发展。

遗传算法的创始人霍兰德(2000)提出了复杂适应系统(complex adaptive system, CAS)理论,其基本思想是,系统的要素在与环境以及其他要素进行持续不断的交互作用的过程中,不断地“学习”或“积累经验”,并且根据学到的经验改变自身的结构、行为方式和规则描述,该理论由于具有思想独到之处,目前已在许多领域得到了应用。王安麟(2004)以工业工程管理为主要应用背景,较为一般地论述了分形理论、元胞自动机、遗传算法、神经网络、人工生命等多种自下而上的自组织、自适应、自优化的当代先进的复杂系统分析与建模方法。

目前复杂性科学研究中存在的主要问题有(章红宝,江光华,2006;宋学锋,2005;曾珍香,顾培亮,2000):①复杂性和复杂系统的内涵分析问题。复杂性概念是现代科学面对的最复杂的概念之一,复杂性的各种定义差别很大,在短期内很难形成一个统一的、严格意义的复杂性概念。②复杂性科学的可操作性问题。复杂性科学属于软科学性质,许多复杂性问题的研究,尤其是社会科学领域,目前还主要在定性思辨、理论探讨的方法论层面,对解决实际问题,可操作性不强。③方法论转换问题。复杂性研究和复杂性科学是一种认识问题的新方式,这需要进行研究方法论的转换,需要还原论与整体论之间的综合集成,寻求描述和分析复杂系统演化的方法。复杂性问题需要用复杂性方法论进行思考、处理,而目前十分缺少实现复杂性方法论的具体方法和可操作的定量分析与建模技术,针对真实复杂系统的研究偏少。对此,王飞跃(2004)提出可通过利用人工系统、计算实验、平行系统等理论和方法,结合从定性到定量的综合集成方法和并行分布式高性能计算技术,建立复杂系统研究的理论和方法体系。④具体研究策略问题。不断创新复杂性科学的理论成果,揭示产生具体复杂性特征的机理,扩展这些理论成果的应用范围,实现这些理论与实际的有机结合,将是复杂性科学的一项长期任务。需要在大量具体复杂系统(例如生态系统、社会系统、流域水资源系统等开放的复杂巨系统,人体免疫系统、生物神经系统、经济系统等基于规则支配的复杂适应系统,沙滩模型等非平衡系统)的实证研究成果的基础上进行理论上的归纳、总结和提炼。⑤复杂系统模型及其构造方法、复杂系统的综合评价与决策方法的具体实现问题。例如复杂系统的综合评价是自然科学、工程技术、经济学、管理科学、社会科学、人文科学的交叉、综合性研究领域,目前虽然得到了比较零碎的研究,但在学术界尚未从方法论层次上对复杂系统的综合评价理论进行系统归纳、总结和提提高,其主要原因有(曾珍香,顾培亮,2000):①复杂系统往往涉及众多半定性半定量因素。②由不同决策者和专家确定的评价目标一般呈递阶结构形式。③复杂系统的评价过程是一个在评价者维、评价目标维、评价指标体系维和评价对象维四维空间中求解的复杂过程。

1.2 复杂系统评价方法论

1.2.1 评价方法论的统一形式

“工程”的本义是指服务于特定目的的工作程序(钱学森,1982)。系统工程(systems engineering)就是寻求一般系统最优化的开发设计、组织建立和运行管理的各种工作程序的一门工程技术学科,它包括运筹学、系统分析、系统研究、费用效果分析和科学管理等中可用于工程实践的各种定量方法和定性定量集成方法(钱学森,1982)。系统工程的研究对象可以是任何一种物质系统、概念系统或物质与概念复合系统。在现代科学技术体系结构中,系统工程属于工程技术(也称工程科学)层次,它的科学实践就是系统工程方法在处理各种实际复杂系统中的应用、实践和创新,它的技术科学是运筹学、一般系统论、信息论、控制论等,它的基础科学是尚在建设中的系统学,它的哲学是科学哲学(钱学森,1982)。

方法论的内涵就是处理某类问题的一般方法,它通常以框架形式把一般方法展开为处理某类问题的一般步骤序列(金菊良,王文圣,洪天求等,2006)。在实际应用方法论时对其中的任一步骤都可以进行具体化、改造甚至创新。方法论的外延既包括处理某类问题的所有具体方法,也包括能适用于多种问题的某具体方法。称从方法论到具体方法的展开过程为方法的模型化过程,称从具体方法到方法论的抽象过程为方法的框架化过程。方法论的主要特点就是它的通用性。方法的模型化过程和框架化过程在协调系统工程应用研究与理论研究中具有重要作用,并随应用研究与理论研究的不断深入而逐步深化。例如,遗传算法(genetic algorithm, GA)就是处理优化问题的一般方法,它的一般步骤由解的编码、群体的初始化、群体的适应度评价、个体的选择操作、个体的杂交操作、个体的变异操作和群体更新迭代共7个步骤组成,因此遗传算法就是一种处理优化问题的方法论,它包括一类新的优化方法。实际上遗传算法已发展为现代人工智能领域最具活力的分支学科之一(许国志,顾基发,车宏安,2000a;徐宗本,张讲社,郑亚林,2003)。系统工程就是介于哲学方法论和专门科学方法论之间的一般科学方法论,它一端与哲学方法相联接,另一端又与其他专门科学方法紧密结合,沟通了哲学与各专门科学,推动了科学方法论向整体性、深刻性和普适性方向不断发展。系统工程思考问题的一般方式,即系统观点就是,任何研究问题都可作为一个系统,必须从时间上动态长期的、空间上普遍联系的和属性上整体协调的观点来最佳地分析、设计、组织和管理该系统。系统工程方法论就是系统工程处理问题的一般方法,目前主要有两类方法论:一类是基于“优化”的霍尔(A. Hall)方法论,主要适用于各种复杂工程技术系统;另一类是基于“比较学习与协调”的切克兰德(P. Checkland)方法论,主要适用于各种复杂经济社会系统和复杂工程技术系统与经济社会系统的复合大