

文章编号: 1001-0920(2004)05-0485-05

## 平行系统方法与复杂系统的管理和控制

王飞跃

(中国科学院 复杂系统与智能科学重点实验室, 北京 100080)

**摘 要:** 提出平行系统方法的基本思想、概念和运行的基本框架, 并讨论了控制系统与平行系统的关系和异同之处。平行系统是控制系统和计算机仿真随着系统复杂程度的增加以及计算技术和分析方法的进一步发展而必然迈上的一个更高的台阶, 是弥补很难甚至无法对复杂系统进行精确建模和实验之不足的一种有效手段, 也是对复杂系统进行管理和控制的一种可行方式。

**关键词:** 平行系统; 计算实验; 人工社会; 人工生命; 复杂系统; 涌现方法

**中图分类号:** TP18      **文献标识码:** A

## Parallel system methods for management and control of complex systems

WANG Fei-yue

(Key Laboratory of Complex Systems and Intelligence Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China. E-mail: tsm19@vip.sina.com)

**Abstract:** The basic idea, concepts, and framework of management and control for complex systems based on parallel systems methods are presented. The relationship of control systems and parallel systems is discussed. Parallel system methods are a further development and natural extension of control systems and computer-based modeling and simulation, resulting from new and recent advances in computing structure, algorithms, and technology. Parallel system methods might provide effective tools for control and management of complex systems that can not be modeled precisely or experimented repeatedly.

**Key words:** parallel systems; computational experiments; artificial societies; artificial life; complex systems; emergence

### 1 引 言

平行系统是指由某一个自然的现实系统和对应的一个或多个虚拟或理想的人工系统所组成的共同系统。自有文字的人类社会产生以来, 便有利用平行系统引导、管理和控制人类活动的记录。然而, 平行系统的科学化、系统化的应用, 却是最近 100 多年的事情, 尤其在计算机技术出现之后。从数学建模, 计算机仿真模拟, 到现在的虚拟现实, 实质上都是应用

平行系统方法进行设计、分析、控制和综合的实例。随着现实系统的规模 and 需求的不断复杂化, 科技水平的不断发展和提高, 这些方法技术的出现是必然的。大多情况下, 这些平行系统方法都是以离线、静态、辅助的形式应用于现实系统的管理和控制。

在一定程度上, 现代控制理论是成功应用平行系统理念的典范。从经典的传递函数方法, 到状态空间方法, 从最优控制理论, 到参数识别和变结构自适应

收稿日期: 2004-01-05; 修回日期: 2004-04-10

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目 (60125310); 中国科学院海外杰出人才引进计划后续基金资助项目 (0359); 国家自然科学基金重点资助项目 (60334020)。

作者简介: 王飞跃 (1961—), 男, 浙江东阳人, 教授, 博士, 从事智能系统和复杂系统的建模、分析和控制的研究。

应控制,特别是基于参考模型的自适应控制(MARC)<sup>[1]</sup>,其实质都是某种特殊的平行系统方法。然而,在一般的控制系统中,控制决策和实施都是针对现实系统的,很少或根本没有对相应的人工系统进行控制,这是因为绝大多数情况下根本没有这种必要。实际上,因为控制所用的模型或目标(即相应的人工系统)是被动地用于现实系统的控制,所以不存在对人工系统进行控制的可能。在通常的控制理论中,平行系统的人工或虚拟部分萎缩到不起主动作用,不能变化的角色。Fel'dbaum 所提出的对偶控制概念<sup>[2]</sup>,参数或结构的自适应变化在这方面有所突破,但在理念和规模上都未能改变人工系统的非主导作用。因此,平行系统方法的作用并没有得到充分的发挥。

造成上述现象的根本原因是没有主动利用人工系统的需要。首先由于多数情况下,人们可以建立实际系统足够精确的数学模型,进而分析其特性、预测其行为、控制其发展,此时根本没有主动在线利用模型的必要;其次,找到实际系统的精确模型较为困难,人们可利用参数识别、结构变化或非参数回归、神经网络等方法在线分段建立短期但足够精确的系统模型。然而,此时模型的角色在本质上仍是被动的:尽管控制同时用于实际系统和人工系统,但不是为了控制人工系统,两个系统的行为都是可预测的,而且实际与人工系统的行为和结果应是一致的。

总之,对于复杂系统的研究,多数情况下既没有系统的足够精确的模型,也不能建立可以解析地预测系统短期行为的模型。由于无法或难以对复杂系统的行为进行解析分析和预测,同时也无法或难以对复杂系统进行实验研究,大多时间只能试探性一步步地对复杂系统进行决策和控制。然而,随着信息技术的发展、网络化的普及和数字社会及数字政府进程的加快,这种对复杂系统进行管理控制的方式暴露出越来越多的问题。在这种情况下,必须设法挖掘平行系统中人工系统的潜力,使其角色从被动到主动,静态到动态,离线到在线,以至最后由从属地位提高到相等的地位,使人工系统在实际复杂系统的管理与控制中充分发挥作用,这就是本文的核心思想。而人工生命<sup>[3]</sup>,人工社会<sup>[4,5]</sup>以及计算实验等研究方法<sup>[6]</sup>的提出,为这一思想的实施奠定了基础。

## 2 从单一世界到多重世界

对于多数物理和工程系统,模型所起的作用都是刻画系统的实际行为,用于系统的设计、分析、控制和综合。所研究的实际系统是唯一的现实存在,其

模型必须尽可能真实准确地逼近其实际行为,这是任何建模方法都应遵守的基本理念。实际系统成了唯一的参考和标准,即所谓的“单一世界”观。显然,对于绝大多数物理和工程系统,只要其行为可预测,这一“单一世界”观就必须遵守,并在实际系统的管理与控制上加以应用。然而,对于许多复杂系统,特别是涉及社会与人的复杂系统,迄今为止,人们尚无法建立描述其行为的有效方法和模型。在一定意义上,一旦能够找到一套行之有效的将复杂系统分解成简单系统,并在此基础上建立复杂系统的精确模型,就不存在原来意义下真正的复杂系统的研究,从而使问题变成了没有认清的简单系统的研究问题。基于这一考虑,人们应当接受真正复杂系统的行为实际上就是不可精确或不能完全预测的理念。这一理念的第1个推论就是“单一世界”观无法在复杂系统的研究中得以实施,因为实际复杂系统的行为都不能预测,就更没有办法用来作为检验模型成立与否的唯一参照和标准,甚至这样作的逻辑基础都不存在。

人工生命中关于生命是“多重现象”的观点<sup>[7]</sup>,人工社会中“多重社会”的观点<sup>[5]</sup>,甚至现代的天文宇宙理论和实验观察所支持的“平行宇宙”假说<sup>[8]</sup>,都从各个方面说明了研究复杂系统时应采用“多重世界”的观点,即对复杂系统进行建模时,不再以逼近某一实际的复杂系统的程度作为唯一标准,而将模型认为是一种“现实”,是实际复杂系统的一种可能的替代形式和另一种可能的实现方式,而实际复杂系统也只是可能出现的现实中的一种,其行为与模型的行为“不同”但却“等价”。尽管这一思想可能在哲学上存在许多值得研究的问题,但在实际应用上,可能是恰当和有效的。比如研究某一经济决策对城市社会经济发展的作用时,人们完全没有必要建立针对某一实际城市的精确的社会经济模型。因为社会经济系统相当复杂,理论上一个城市的结果难以直接推广到另一个城市,而且一个合理的社会经济模型,尽管它并未代表某一现实城市的情况,但它却能描述某一“可能城市”的社会经济的“现实”。因此,一项合理有效的经济决策,必须在一个合理的社会经济模型中产生良好的结果,否则该项决策就需要改进。

城市交通管理与控制的研究是支持“多重世界”观的另一个复杂系统。例如国家建设部于2003年颁发的关于优先发展城市公共交通的通知中,对优先发展城市交通的主要任务和工作目标作了具体的规

定。显然, 对此类政策的效果进行分析和评估不需要建立与某个现实城市交通系统一样的精确模型, 这是因为一个城市的结果不能直接转移到另外一个城市。同样, 一个合理的交通模型尽管不描述任何一个现实城市的交通情况, 但它却能代表某一“可能城市”的交通“现状”。因此, 一项有效的城市公共交通发展决策也应在一个合理的交通模型中产生良好的效果, 否则至少在理论上应该对该决策进行修正。这就是为什么要提出人工交通系统概念的原因之一<sup>[9]</sup>。

简单系统不存在上述问题, 因为它们具有统一的模型。只要能够控制统一的模型, 便控制了模型所代表的所有系统。而复杂系统没有统一的模型, 甚至连比较相近的模型都没有, 所以必须面对这些问题。因此, 在利用平行系统研究复杂系统的管理与控制时, 可采用“多重世界”的观点, 不必苛求人工系统与实际系统的完全相同或高精度逼真, 而只要求它们在规模、行为方式和系统特性等方面具有一致性。

### 3 从单个优化解到多个有效解决方案

复杂程度的提高, 导致了从“单一世界”到“多重世界”的观念转变, 进而从单个优化解到多个有效解的过渡。

对于可用解析模型描述的常规系统, 至少在理论上可以得到针对某一指标的最优解, 而且解往往是唯一的。即使有时最优解很难解析确定, 人们仍然可以分析最优解的特性, 找到其数值形式, 或退而求之, 寻求各种次优解。此时, 系统的最优或优化解一般是十分清楚的。然而, 对于复杂系统, 什么是系统的最优解则相应地变得复杂。首先, 简单解的概念不再适合, 更恰当的名称应该是解决方案; 其次, 由于此时一般不存在单一的优化指标, 多层次多目标优化往往导致多个甚至无数个解决方案, 采用解析模型的多目标优化也是如此, 例如 Pareto 解的概念<sup>[10, 11]</sup>。对于复杂系统, 有时甚至确定一个量化的优化指标也有困难。此外, 由于复杂系统行为的不可预测特性, 试图求解其某一最优解决方案的本身是行不通的。因此, 我们应当接受有效解决方案的概念, 以及同时存在多个有效解决方案的事实。当然, 如何确定什么是有效解决方案不是一件容易的事情。一般而言, 决定什么是复杂系统的有效解决方案时, 应遵守下述原则:

- 1) 可行性原则, 即方案是可执行的;
- 2) 有效性原则, 即方案是有效果的;
- 3) 经济性原则, 即方案实施的成本是能够承担

的;

- 4) 实时性原则, 即方案能在指定时间内取得有效结果

此外, 对于具体复杂系统问题, 还可考虑其他原则, 如安全性、可靠性、鲁棒性等。

### 4 平行系统的框架与人工系统的构造

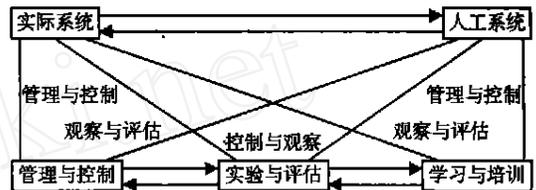


图1 平行系统运行的基本框架

图1为平行系统的基本框架, 主要包括实际系统和人工系统。通过二者的相互作用, 完成对实际系统的管理与控制, 对相关行为和决策的实验与评估, 对有关人员和系统的学习与培训等。平行系统的主要目的是通过实际系统与人工系统的相互连接, 对二者之间的行为进行对比和分析, 完成对各自未来的状况的“借鉴”和“预估”, 相应地调节各自的管理与控制方式, 达到实施有效解决方案以及学习和培训的目的。主要过程如下:

1) 实验与评估: 人工系统主要用来进行计算实验, 分析了解各种不同的复杂系统的行为和反应, 并对不同的解决方案的效果进行评估, 作为选择和支持管理与控制决策的依据。

2) 学习与培训: 人工系统主要用来作为一个学习、培训管理及控制复杂系统的中心。通过对实际与人工系统的适当连接组合, 可以使管理和控制实际复杂系统的有关人员迅速掌握复杂系统的各种状况以及对应的行动。在条件允许的情况下, 应以与实际相当的管理与控制系统来运行人工系统, 以期获得最佳的真实效果。同时, 人工系统的管理与控制系统也可以作为实际系统的备用系统, 增加其运行的可靠性和应变能力。

3) 管理与控制: 人工系统试图尽可能地模拟实际系统, 对其行为进行预估, 从而为寻找对实际系统有效的解决方案或对当前方案进行改进提供依据。进一步, 通过观察实际系统与人工系统评估的状态之间的不同, 产生误差反馈信号, 对人工系统的评估方式或参数进行修正, 以减少差别, 并开始分析新一轮的优化和评估。

应当指出的是: 过程1)类似于目前系统仿真软件的应用情况, 但在实验方面迈进了一大步; 过程

2) 已在城市交通系统中得到应用, 目前德国的一些城市交通管理已利用与实际交通管理和控制中心几乎相同的设施控制大规模的交通仿真软件, 而且这些交通仿真系统部分采用了实时的实际现场交通数据; 过程 3) 则十分类似于基于滚动时段 (Rolling horizon) 和仿真的优化方法, 以及“硬件在环内的仿真 (Hardware-in-the-loop simulation)”的思想

显然, 在平行系统的运行框架中, 各种反馈控制方法, 特别是自适应控制的思想都能够得到应用, 这方面工作的具体化将是平行系统的一个主要研究方向, 而且目前用于常规系统建模的许多方法都可以在人工系统的构造中得到直接应用。但是, 根据人工社会目前所采用的方法<sup>[4,5]</sup>, 构造人工系统的主要手段应是代理方法和相应的面向对象的编程技术。代理的主要特征是其自主、社交、学习和进化以及自适应能力等。利用代理构造人工系统, 主要由 3 部分组成, 即代理本身、代理的环境和社交规则的描述。通过基于自下而上的代理方法, 产生人工对象, 然后通过这些对象的交互产生复杂系统的行为。这种构造人工系统的基本想法是“简单的一致”原理, 即人们对简单事物往往会有一致的看法。进一步, 尽管人们容易对复杂系统整体行为的认识产生分歧, 但对简单的人工对象的局部行为和模型的认识往往能够取得一致, 从而对基于这些认识较为一致的局部行为所产生的复杂整体行为也能理解和接受。因此, 利用代理方法构造与复杂系统对应的人工系统, 对其行为进行“借鉴”和“预估”是一种可行的方法。

人工生命的提出者之一 Langton 曾就人工生命研究的目的指出: Behaviors themselves can constitute the fundamental parts of nonlinear systems — virtual parts, which depend on nonlinear interactions between physical parts for their existence. (...) It is the virtual parts of living systems that artificial life is after: the fundamental atoms and molecules of behavior<sup>[12]</sup>。这段话完全可以套用到平行系统的研究目的, 即行为本身构成了复杂系统的本质部分——虚拟部分, 其存在取决于系统组成部分之间的非线性相互作用。平行系统方法追求和利用的就是复杂系统的虚拟部分, 即行为的基本“原子”和“分子”。此外, 实际系统和仿真系统研究中所有的分析手段和应用领域都可以直接纳入平行系统的分析与应用中, 只是平行系统具有更加灵活、方便和广泛的特性。

图 2 为借助于人工系统进行计算实验, 利用涌

现方法及各种统计手段分析评估复杂系统解决方案的有效性, 并对其进行相应修改的粗略过程和步骤。涌现 (Emergence) 的概念将在平行系统的分析中起核心作用, 本质上它是一个实验、观察和描述性的方法<sup>[13-15]</sup>。通过涌现的方法, 人工系统可以方便地“生长”出各种复杂现象, 如自学习、自适应、自组织等, 以及人工系统与实际系统的相互影响。

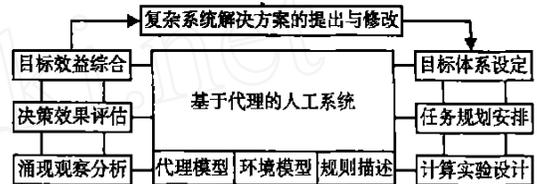


图 2 基于人工系统的计算实验和系统行为分析及决策评估

通过对人工系统设计不同的“实验”方案, 并在必要时进行多次大量的重复, 就可以全面、准确、及时、量化地对各种复杂系统解决方案按不同指标体系进行分析评估。大多因缺乏足够的观察时间和充足的数据, 很难对这些指标在现实系统中进行准确可靠的量化分析与评估, 但可以在人工系统中方便地完成。特别是, 人工系统不仅是对现实系统的仿真, 而且还可以提供现实系统的替代版本, 从而扩大了量化分析的适用范围及其结果的可靠性和鲁棒性。

此外, 利用人工系统“计算实验”的可设计性以及可反复进行的特点, 我们还可以对实际系统解决方案进行各种关于性能可靠性和质量等的“加速”实验、“压力”实验以及“极限”实验等, 如同目前针对软件系统所进行的一样<sup>[16,17]</sup>。对于复杂系统问题, 这些“实验”一般无法用于实际系统, 特别是正在运行的实际系统。

## 5 应用与展望

平行系统方法可以在许多非工程领域的复杂系统中得到应用, 比如:

1) 交通物流系统: 通过建立人工交通系统构造交通平行系统, 对城市交通物流进行管理和控制<sup>[9,18]</sup>;

2) 农业制造系统: 通过建立植物生长的人工模型构造植物生长的平行系统, 将控制方法用于植物栽培, 在制造化受控环境下进行农业生产的制造化, 并与市场需求相结合, 进行生产的安排和调度;

3) 人口动态管理和控制系统: 通过构造人工人口系统描述人口的动态变化以及个体和整体人口的

状态, 构造人口平行系统, 用于国家人口综合规划和人口政策研究, 并对人口进行动态管理和控制;

4) 社会经济系统: 国外已有大量关于各种人工经济系统的研究<sup>[19, 20]</sup>, 通过平行系统方法, 可进一步利用这些成果, 深入研究社会经济系统的动态行为, 并评估各种不同经济政策的效果;

5) 模拟战争系统: 通过人工军事系统和相应的平行系统方法, 可提供更有效和逼真的战争模拟, 并对不同军事战略的效果、应变能力、社会经济影响以及国内外政治影响进行评估;

6) 通过建立各种人工系统构造相应的平行系统, 为“全面、综合、可持续发展的科学发展观”提供一种可行的分析和评估方法, 并应用于实际复杂社会系统的管理与控制, 为将来的数字化社会和数字化政府管理奠定基础

## 6 结 语

将平行系统应用于复杂系统的管理与控制, 目前还只是一种设想, 要实现其体系化、科学化和实用化还有很大差距。相信随着网络化的不断普及, 通信和信息技术的不断提高, 复杂系统的范围和规模不断增大, 人们对类似于平行系统方法的分析、管理和控制手段的需要将更加迫切。因此, 加强对平行系统方法的研究, 并与常规的系统分析方法相结合, 特别是融合我国学者提出的复杂系统的综合集成法和综合集成研讨厅体系<sup>[21, 22]</sup>, 建立“水晶球(Crystal balls)”的科学版本, 将是一项重要而有意义的工作。

## 参考文献(References):

- [1] Saridis G N. *Self-organizing Control of Stochastic Systems* [M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1977.
- [2] Feldbaum A A. *Optimal Control Systems* [M]. New York: Academic Press, 1965.
- [3] Langton C G. Studying artificial life with cellular automata, evolution, games, and learning: Models for adaptation in machines and nature [A]. *Elsevier Science* [C]. Amsterdam, 1987.
- [4] Epstein J M, Axtell R L. *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom up* [M]. New York: Brookings Institute Press and the MIT Press, 1996.
- [5] 王飞跃, 史帝夫·兰森. 从人工生命到人工社会——复杂社会系统研究的现状和展望 [J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2004, 1(1): 33-41.  
(Wang F Y, Lansing J S. From artificial life to artificial societies — New methods for studies of complex social systems [J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004, 1(1): 33-41.)
- [6] 王飞跃. 从一无所有到万象所归: 人工社会与复杂系统研究 [N]. *科学时报(纵横版)*, 2003-03-17.  
(Wang F Y. Artificial societies and research in complex systems [N]. *Science Times*, 2003-03-17.)
- [7] Emmeche C. Is life as a multiverse phenomenon? [A]. *Artificial Life III* [C]. MA: Addison-Wesley, 1993. 553-568.
- [8] Tegmark M. Parallel Universes [J]. *Scientific American*, 2003, 288 (5): 40-51.
- [9] 王飞跃, 汤淑明. 人工交通系统的基本思想与框架体系 [J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2004, 1(2): 100-109.  
(Wang F Y, Tang S M. Concepts and framework of artificial transportation systems [J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004, 1(2): 100-109.)
- [10] Hwang C L, Masud A S D. *Multiple Objective Decision Making, Methods and Applications: A State-of-the-Art Survey* [M]. New York: Springer-Verlag, 1979.
- [11] Goicoechea A, Hansen D R, Duckstein L. *Multiobjective Decision Analysis with Engineering and Business Applications* [M]. New York: John Wiley and Sons, Inc, 1982.
- [12] Langton C G. Artificial life [A]. *Artificial Life (Santa Fe Institute Studies in the Science of Complexity, Vol V I)* [C]. Redwood CA: Addison-Wesley, 1989. 1-47.
- [13] Crutchfield J P. The calculi of emergence: Computation, dynamics, and induction [A]. *Proc of the Oji Intl Seminar Complex Systems — From Complex Dynamics to Artificial Reality* [C]. Numazu, 1993. 1-54.
- [14] Baas N A, Emmeche C. On emergence and explanation [J]. *Intellectica*, 1997, 2(25): 67-83.
- [15] 王飞跃. 关于涌现、观察和解释的研究 [J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2004, 1(3).  
(Wang F Y, On emergence, observation, and explanation [J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004, 1(3).)
- [16] Lyu L R. *Handbook of Software Reliability Engineering* [M]. NJ: IEEE Computer Society Press, 1996.
- [17] Blichke W R, Murthy D N P. *Reliability: Modeling, Prediction, and Optimization* [M]. Wiley and Sons, Inc, 2000.

(下转第 514 页)

表1 算例中决策单元及其子过程的有效性指标计算结果

	有效性指标						
	DMU 1	DMU 2	DMU 3	DMU 4	DMU 5	DMU 6	
网络DEA	0.5708	1.0000	0.5833	0.5987	0.4269	0.5721	
DEA (C <sup>2</sup> R)	0.5372	1.0000	0.5833	0.5747	0.4129	0.5854	
子过程	$P_1$ (DEA (C <sup>2</sup> R))	0.5102	1.0000	0.5750	0.5278	0.4167	0.5833
	$P_2$ (DEA (C <sup>2</sup> R))	0.9036	1.0000	1.0000	1.0000	0.9810	1.0000
	$P_3$ (DEA (C <sup>2</sup> R))	1.0000	1.0000	0.9593	0.9495	0.9630	0.9187

有效(C<sup>2</sup>R),单元的3个子过程也均为有效。该结果与定理5和定理6相符。另外,NET-DEA模型可以对无效单元的资源在各子过程的分配及各子过程之间的关联输入、输出进行优化。

## 6 结 论

利用网络DEA技术对包含内部子过程的经济实体的有效性进行评价,不仅可以对经济实体的总体有效性进行评价,而且还评价了其内部子过程的有效性水平,所以该方法较传统DEA(C<sup>2</sup>R)模型更为严格、实用。NET-DEA模型还可以对无效决策单元的内部资源分配作出优化,使管理者更为详细、准确地了解经济实体的运行状况,对低效单元给出更确切的管理措施。另外,NET-DEA模型对于节点间具有网络结构的供应链集结与分解评价时,更具有普遍意义。

## 参考文献(References):

- [1] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. *European J of Operational Research*, 1978, 3 (4): 429-444
- [2] Fare R, Grosskopf S. Network DEA [J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2000, 34(1): 35-49
- [3] Yang Y S, Ma B J, Koide M. Efficiency measuring DEA model for production system with  $k$  independent subsystems[J]. *J of the Operations Research Society of Japan*, 2000, 43(3): 343-354
- [4] Fare R, Grabowski R, Grosskopf S, et al. Efficiency of a fixed but allocatable input: A non-parametric approach[J]. *Economics Letters*, 1997, 56(2): 187-193
- [5] Mickael L, Magnus T. Productivity and customer satisfaction in Swedish pharmacies: A DEA network model[J]. *European J of Operational Research*, 1999, 115(3): 449-458

(上接第489页)

- [18] 王飞跃,戴汝为,张嗣瀛,等.关于城市交通、物流、生态综合发展的复杂系统研究方法[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2004, 1(2): 142-148

(Wang F Y, Dai R W, Zhang S Y, et al. A complex system framework for studying sustainable and integrated development of metropolitan transportation, logistics, and ecosystems[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004, 1(2): 142-148)

- [19] Zimmernan G, Neuneier R, Grothmann R. Multi-agent market modeling of foreign exchange rates[J]. *Dalam Advances in Complex Systems*, 2001, 4(1): 29-43
- [20] Tesfatsion L. *Agent-based Computational Economics: Growing Economics from the Bottom up*, ISU

*Economic Working Paper No. 1* [M]. Ames, Iowa: Iowa State University, 2002

- [21] 戴汝为,王珏.关于智能系统的综合集成[J]. *科学通报*, 1993, 38(4): 1249-1256  
(Dai R W, Wang J. On the meta synthesis of intelligent systems [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(4): 1249-1256)
- [22] 李耀东,崔霞,戴汝为.综合集成研讨厅的理论框架、设计与实现[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2004, 1(1): 27-32  
(Li Y D, Cui X, Dai R W. The framework, design & implementation of hall for workshop of meta-synthetic engineering [J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004, 1(1): 27-32)