第 31 卷 第 6 期
2008 年 6 月
计 算 机 学 报
CHINESE JOURNAL OF COMPUTERS
Vol. 31 No. 6
June 2008

面向涌现的多 Agent 系统研究及其进展

金士尧 黄红兵 范高俊
（国防科学技术大学并行与分布处理国家重点实验室 长沙 410073）
（国防科学技术大学计算机学院 长沙 410073）

摘 要 在多 Agent 系统研究领域，涌现现象越来越引起人们的注意. 面向涌现的多 Agent 系统研究正成为多 Agent 系统研究中值得注意的一个新方向. 它关注的是多 Agent 系统宏观层面的涌现性问题以及系统涌现的宏观与微观层面的联系机制，并最终希望发展出一套面向涌现的多 Agent 系统的设计和控制方法. 该文在介绍涌现的概念和特征之后，考察了多 Agent 系统宏观特征的面向涌现描述方法；然后对多 Agent 系统涌现的微-宏观机制进行了总结，比较分析了面向涌现的多 Agent 系统设计方法和设计模式；最后分析讨论了该领域研究存在的问题和进一步的研究方向.

关键词 多 Agent 系统；涌现；面向涌现；机制；复杂适应系统
中图法分类号 TP311

Emergence-Oriented Research on Multi-Agent Systems and Its State of Arts

JIN Shi-Yao HUANG Hong-Bing FAN Gao-Jun
(*National Laboratory for Parallel and Distributed Processing*, *National University of Defense Technology*, *Changsha* 410073)
(*School of Computer Science*, *National University of Defense Technology*, *Changsha* 410073)

Abstract Nowadays, more attentions are paid to the phenomenon of emergence in MASs. And emergence-oriented research on MASs becomes a new direction in the area of MAS. Emergence-oriented researches focus on the emergent characteristics of MASs and the mechanisms of emergence which correlate the macro- and micro-level characteristics. The final goal of these researches is to develop a set of methods for engineering emergence in MASs. In this paper, after an introduction of the concept of emergence, the emergence-oriented approaches for characterizing emergent behaviors of MASs are reviewed. Then the authors give an overview of the micro-macro mechanisms of emergence in MASs, and a survey of emergence-oriented engineering methodologies and design patterns of MASs. Finally, the problems and future directions in this area are discussed.

Keywords multi-agent system; emergence; emergence-oriented; mechanism; complex adaptive system

1 引 言

多 Agent 系统(MAS)[1]的广泛应用，特别是在大规模系统中的应用(如普适计算)，使得 MAS 的宏观特征越来越成为关注的焦点[2]. 一种复杂而极其重要的宏观特征也随之渐渐凸现出来，这就是“涌现现象”[3].

收稿日期：2007-07-09；最终修改稿收到日期：2007-11-13. **金士尧**，男，1937 年生，教授，博士生导师，主要研究领域为系统仿真、多 Agent 系统、分布式计算、虚拟现实等. E-mail：syjin1937@163.com. **黄红兵**，男，1977 年生，博士研究生，主要研究方向为多 Agent 系统和复杂系统仿真. **范高俊**，男，1980 年生，博士研究生，主要研究方向为多 Agent 系统和复杂系统仿真.

在这些系统中，MAS 通常无集中控制，由相互作用的自主 Agent 组成. 这样的 MAS 就成为一种人工复杂适应系统(Complex Adaptive System, CAS)[4]，其涌现现象往往不可避免. 另一方面，在 CAS 领域，人们将 MAS 作为研究自然 CAS 的天然工具[5]，揭示了它们的一部分涌现规律. 在一些研究者看来 MAS 和 CAS 描述的是同一类系统；不同的是，CAS 与高层的现象和结构相关，MAS 与系统的底层组成和元素相联系[5]. 因此，为了研究 MAS 的整体性质，一些研究者反过来将 MAS 看成 CAS，借鉴 CAS 的研究成果推动 MAS 涌现特征的研究，并将“涌现”作为 MAS 的一种分析和设计范式[6-8]. 为区别于传统的 MAS 研究，称这种研究方式为“面向涌现的 MAS 研究”.

传统的 MAS 研究主要关注微观层面的问题[9]，如 Agent 理论、Agent 体系结构等；在宏观方面也仅仅主要关注 Agent 之间的交互、协作等局部行为问题，缺少对系统宏观全局问题，特别是涌现性问题的研究. 面向涌现的 MAS 研究关注的是 MAS 的宏观层面的涌现性问题以及系统涌现的宏观与微观层面的联系机制，并最终希望发展出一套面向涌现的多 Agent 系统的设计和控制方法. 这种研究视角顺应应用的发展，采用中观或宏观观察级别来审视 MAS，设计操控 MAS 整体的宏观涌现特征，使之满足设计目标或与所在的开放系统相协调. 本文试图对目前面向涌现的 MAS 研究作相对系统总结，以促进进一步的研究.

本文第 2 节通过与相关概念的对比，介绍涌现的概念和特征；在第 3 节中考察了 MAS 面向涌现的宏观描述，从两个角度总结了目前 MAS 宏观描述的工作；第 4 节探讨了当前 MAS 面向涌现的宏-微观联系机制研究；第 5 节从工程的角度比较分析了面向涌现的 MAS 设计方面的工作；在第 6 节中分析讨论了该领域研究存在的问题和进一步的研究方向.

2 涌现的概念与特征

涌现是 CAS 系统的一个重要特征，当我们把 MAS 看成 CAS，将涌现引入 MAS 研究时，对它有一个清楚的认识是非常必要的.

对于“涌现”，不同的复杂系统研究领域有不同的认识[10-11]. 通常，人们将它用来指称这样的微-宏观效应现象——“因局部组分之间的交互而产生系统全局行为”[11]或“缘起于微观的宏观效应”[12]. 对于涌现概念，这种描述是比较模糊的. 但是，由于研究的开放性，试图给出一个精确而普适的定义不是很现实. 这里通过与几个易混淆的概念的对比，从它们的异同来把握“涌现”概念.

2.1 涌现与总成

涌现与总成(resultant)都是用来指称系统的微-宏观效应的概念，最初是穆勒为区分两种不同的组合物而提出的[13]. 在概念上，它们之间区别比较大，但是在实际认识系统时，往往难以区分，甚至会混淆.

穆勒针对涌现与总成的区别，给出了涌现的三个判据[13]：(1) 一个整体的涌现特征不是其部分的特征之和；(2) 系统涌现特征的种类与系统组分特征的种类完全不同；(3) 涌现特征不能从独立考察组分的行为中推导或预测出来. 这三个判据也称之为可加性判据、新奇性判据和可演绎性判据[13]. 穆勒的这三个判据都是从特征的微-宏观联系来展开的. 当我们说一个系统特征是涌现或总成的时候，也就隐含了这种特征的微-宏观联系的特点.

可演绎性判据往往被解释成涌现特征的不可解释性或神秘性，这对于复杂系统研究者或新涌现主义者(neo-emergentism)来说，是不可接受的[10-11,13]. 他们的重要目标之一就是要建立起涌现特征与微观机制的联系，认识并控制涌现特征. 在涌现与总成的区别上，他们往往只强调可加性判据和新奇性判据，而忽略可演绎性判据. 文献[11,14]就是从新奇性角度来定义涌现的. 文献[12]从独立描述性角度，将涌现定义为“可以独立于它的实现而加以描述的现象”，这也回避了涌现特征的微观可解释性.

我们应当承认涌现和总成都有微观可解释性，它们的不同之处在于：总成特征可以从独立组分的特征或行为推导或预测出来，而不需要考察组分之间的联系；而涌现特征必须结合组分和它们之间的关系才能得到解释. 例如，在一定意义上，我们可以说一个函数程序的代码量是总成的，而函数功能则是由指令涌现出来的.

2.2 涌现与综合

对于一些研究者来说，将程序函数功能看成是指令的涌现结果，也是不可接受的. 这就涉及涌现与综合(synthesis)的区别.

在原始意义上，综合是与分析相对的概念，指的是将组分或元素按照一定的结构组成一个整体[14]. 在这个意义上，综合表征的也是系统特征的微-宏观

效应. 如果说一个系统特征是综合的，那么它是满足不可加性和新奇性的. 这是综合与总成的区别. 综合与涌现的区别在于系统微观和宏观之间的作用.

在前面的讨论中，我们认为涌现特征只有通过组分和组分之间的关系得到解释，也就是说涌现特征是组分之间相互作用的结果. 这里并没有对这种相互作用的特点加以限定，并且也只是指出了系统的微-宏观效应，并没有说明宏-微观作用. 在涌现含义中，组分之间的作用关系是动态的，并且这种微观和宏观的关联是双向的[11,14]. 而在综合中，组分之间的关系往往是静态的（如静态的结构、时序、逻辑关系等），并且一般只有微-宏观效应，由此产生的宏观特征往往确定不变.

涌现中的微观与宏观的双向关联指的是：一方面，微观组分及其相互作用产生宏观特征（行为、结构等）；另一方面，产生的宏观特征反过来影响微观组分以及其关系，成为它们的约束或动因. 这种双向关联使得系统具有一定的动态性和鲁棒性. 也正是这种双向关联使得涌现似乎很神秘.

所以，在上面这种意义下，简单程序函数功能是指令的综合特征，而不是涌现的. 因为简单程序函数中的指令关系是静态的，并且只存在微-宏观效应.

2.3　涌现与自组织

在 CAS 系统动态性方面，需要将涌现与自组织（self-organization）在概念区分开来. 和涌现一样，自组织也是 CAS 系统的重要特征. 实际 CAS 中，涌现与自组织有着紧密的联系，但是在概念上还是存在着较大差别.

概念上，自组织和涌现的主要区别表现在以下几个方面：(1) 它们强调的是 CAS 的不同方面. 和自组织比较，涌现强调的是一致性宏观特征的产生[11,15-16]；而自组织强调的是内部结构的动态、适应、自发的变化[11,15-16]. (2) 一个自组织系统，不一定产生涌现特征[11]. 例如，一个分布式问题合作求解系统，其计算结点都有一定的自主性，系统可以自发、动态地调整自己的结构，以完成问题的求解. 但是，如果有一个控制计算结点拥有系统的全局目标，这个系统不具有涌现性，因为在问题求解这个特征上，相对于控制计算结点来说，并不是新奇的. (3) 一个具有涌现性的系统，不一定是自组织的[11]. 例如，仅由空气组成的热力学系统中，气体体积是气体分子相互作用的涌现特征，但是这样的系统不是自组织的.

虽然在概念上涌现和自组织是不同的，但是 CAS 系统中，这两个方面往往纠缠在一起，统一在同一过程当中. 所以，在实践中，对涌现与自组织的关系存在 3 种看法：(1) 自组织是涌现产生的原因[17-19]；(2) 自组织是涌现的结果[20-22]；(3) 自组织是涌现的一种特殊形式[3]. 当我们将自组织看成是微观机制和动态过程的时候，一般持第一种看法；将自组织看成是系统的一种性质或能力的时候，往往产生第二种看法；而结合前两种看法或对涌现和自组织在概念上不加区分的时候，就会得到第三种看法.

所以，由于概念上的差别和实际过程的统一性，在面向涌现的 MAS 研究中，往往只有在强调系统的不同特点时，分别使用涌现与自组织概念. 本文采用第二种看法.

2.4　涌现的特征

文献[6,11]结合诸多文献对涌现的特征作了概括，主要有以下几个方面：

(1) 微-宏观效应. 这是涌现最重要的特征，指的是系统底层微观活动产生高层宏观性质、行为、结构、模式等.

(2) 双向关联. 指的是微观与宏观的双向关联，即从微观到宏观产生微-宏观效应，从宏观到微观，微-宏观效应的结果对微观组分及其活动产生影响.

(3) 分散控制. 指的是系统没有指导其宏观行为的集中控制部分，只是利用局部的机制影响全局行为. 也就是说系统中的个体没有全局图景，其影响和作用是局部的.

(4) 完全新奇性. 这个特征指的是，相对于微观层次的个体行为，系统的全局行为是新奇的，也就是说，微观个体没有全局行为的显式表示.

(5) 一致相关性. 指的是组分之间逻辑一致的关联关系. 这种相关性约束着底层分散的组分，并使得它们相互关联起来，形成一个高层整体；从而使得涌现特征以一个和谐整体呈现出来，并表现出相对持久的模式.

(6) 此外，还有由这些特征衍生出的一些特性，如动态性、非线性、鲁棒性和柔韧性等.

涌现的这些特性在前面的讨论中都有所体现.

3　MAS 面向涌现的宏观描述

面向涌现的 MAS 研究关注的是 MAS 的宏观特征，所以面向涌现的 MAS 宏观描述必不可少. 在这一方面，虽然还没有建立完整的概念框架，但是人们对此进行了有力的探索.

3.1 基于逻辑的群体思维涌现性描述

基于意识立场的 MAS 群体思维状态，大都是通过逻辑模型描述的，主要包括联合信念、联合意图、联合承诺等. 群体思维状态的逻辑模型刻画了这些概念之间的联系，同时也揭示了群体思维状态和 Agent 个体思维状态之间的联系，在一定程度上体现了它们的涌现特征. 特别是 Dunin-Keplicz 等人给出的群体思维状态逻辑模型[23-28]，在 MAS 群体思维状态的面向涌现描述方面最为突出.

(1) 联合信念(Collective Belief)

联合信念是对 MAS 群体认知的描述，逻辑上是其它几个概念的基础. Dunin-Keplicz 等人[23-25]将模态算子 E-BEL 和 C-BEL 区分开来($\text{E-BEL}_G(\varphi)$ 表示 Agent 组群 G 中每个 Agent 都有 φ 的信念，$\text{C-BEL}_G(\varphi)$ 表示组群 G 有 φ 的联合信念). 将 $\text{E-BEL}_G(\varphi)$ 定义为

$$\text{E-BEL}_G(\varphi) \leftrightarrow \bigwedge_{i\in G} \text{BEL}(i,\varphi),$$

而将 $\text{C-BEL}_G(\varphi)$ 定义为不动点

$$\text{C-BEL}_G(\varphi) \leftrightarrow \text{E-BEL}_G(\varphi \wedge \text{C-BEL}_G(\varphi)).$$

Michael 等人[29]也将联合信念看成不动点，定义和 Dunin-Keplicz 等人的类似. 只不过他们的叫法不同，称之为“相互共同信念(mutual belief)”.

这种递归定义在逻辑上是一个无限过程，所以这种定义下，联合信念不是 Agent 信念的简单组合，体现了联合信念的涌现性. 为了快速建立起联合信念，文献[26]假设了一个发起者，再通过一个有限过程确立联合信念. 但是，如果将联合信念看成 MAS 的涌现特征，则可以将这个假定的发起者剔除出这个过程.

(2) 联合意图(Collective Intention)

联合意图为 MAS 提供了可测预动性和灵活反应性，是描述 MAS 群体思维状态的一个重要概念. Dunin-Keplicz 等人[23]区分了 3 种意图：E-INT、M-INT 和 C-INT，分别将它们定义为

$$\text{E-INT}_G(\varphi) \leftrightarrow \bigwedge_{i\in G} \text{INT}(i,\varphi),$$

$$\text{M-INT}_G(\varphi) \leftrightarrow \text{E-INT}_G(\varphi \wedge \text{M-INT}_G(\varphi)),$$

$$\text{C-INT}_G(\varphi) \leftrightarrow \text{M-INT}_G(\varphi) \wedge \text{C-BEL}_G(\text{M-INT}_G(\varphi)),$$

$\text{E-INT}_G(\varphi)$ 表示 Agent 组群 G 中每个 Agent 都有使 φ 为真的意图；$\text{M-INT}_G(\varphi)$ 表示 G 中的每个 Agent 都有使 φ 为真的意图和使每个 Agent 都有使 φ 为真的意图，可以称为“相互共同意图(mutual intention)”；$\text{C-INT}_G(\varphi)$ 则表示组群 G 有使 φ 为真的联合意图.

从这个定义可以看出 M-INT 和 C-INT 也是不动点. 和 C-BEL 类似，在一定程度上，我们可以体会出其涌现特征.

(3) 联合承诺(Collective Commitment)

联合承诺为 MAS 在建立任务规划的情况下，提供了行为上的相对确定性和持续性，也是描述 MAS 群体思维状态的一个重要概念.

为了定义联合承诺，Dunin-Keplicz 等人[24-25,27-28]首先定义了两个 Agent 之间的相互承诺(称为社会承诺，social commitment)：

$$\text{COMM}(i,j,\alpha) \leftrightarrow \text{INT}(i,\alpha) \wedge \text{GOAL}(j, done(i,\alpha)) \wedge \text{C-BEL}_{\{i,j\}}(\text{INT}(i,\alpha) \wedge \text{GOAL}(j, done(i,\alpha))),$$

其中，$\text{COMM}(i,j,\alpha)$ 表示 Agent i 对 Agent j 承诺执行动作 α；GOAL 为目标算子；$done(i,\alpha)$ 表示 Agent i 已经执行了动作 α.

在此基础上，他们给出了联合承诺定义的一般图式[27-28]. 然后针对不同的 Agent 意识，定义了几种不同的联合承诺[27-28]. 其中，常用的强联合承诺(strong collective commitment)定义为

$$\text{S-COMM}_{G,P}(\varphi) \leftrightarrow \text{C-INT}_G(\varphi) \wedge constitute(\varphi,P) \wedge \text{C-BEL}_G(constitute(\varphi,P)) \wedge \bigwedge_{\alpha\in P} \bigvee_{i,j\in G} \text{COMM}(i,j,\alpha) \wedge \text{C-BEL}_G(\bigwedge_{\alpha\in P} \bigvee_{i,j\in G} \text{COMM}(i,j,\alpha)),$$

谓词 $constitute(\varphi,P)$ 表示规划 P 确保目标 φ 能正确实现.

可见，Dunin-Keplicz 等人对联合承诺的定义是建立在联合信念和联合意图的基础上的，结构相对复杂，在一定程度上也体现了它的涌现特征.

3.2 基于统计的宏观行为涌现性描述

由于群体思维状态描述是基于逻辑的，它往往存在理论到实践上的鸿沟[30]，并且在开放环境下 Agent 思维状态往往不可测. 所以，在实践中，人们对 MAS 的宏观涌现行为通常采用的是基于统计的描述. 与基于 Agent 内部心智的群体思维状态描述不同，基于统计的 MAS 宏观涌现性描述关注的是 Agent 外部行为和属性(例如 Agent 的交互模式)，在此基础上选择合适的特征统计量，并研究其在系统中的变化规律，以刻画 MAS 的宏观行为和涌现特征.

(1) 基于熵的描述

由于宏观特征的涌现，往往伴随着系统有序性的增加，人们在宏观层面描述 MAS 时，普遍选择的统计量是“熵”.

在热力学中，熵(entropy)是系统无序性的度

量. Shannon 将它引入信息学中，作为信息量的度量，称为信息熵. 在 MAS 研究中，熵的概念一般采用 Shannon 的定义[19-20,31-32]，即若对于 MAS 中所有 Agent 的属性 A，其所有 n 个值的取值概率分别为 $p_1, p_2, \cdots, p_n$，则系统中 Agent 的属性 A 的熵为

$$H_A = -\sum_{i=1}^{n} p_i \log(p_i).$$

根据这一定义，可以知道 MAS 中的熵是就 Agent 的某个属性而言的，而不是一个笼统的概念. 这种有具体所指的熵，在某种程度上反映的是与这一属性有关联的系统某方面的宏观特征，而不是系统的同一属性. 例如，文献[31]就是将 Agent 的类型作为考察属性，来定义等级社会熵(hierarchic social entropy)，从而给出 MAS 多样性特征的定量描述. Müller-Schloer 等人已经在文献[19]中阐明了利用熵来描述系统宏观特征时，微观属性选择的重要性.

和熵的原始意义一样，MAS 中的熵在一定意义上也是系统无序性的度量，要使 MAS 宏观行为走向有序，必须降低系统的熵. Parunak 等人[20]受统计物理学中研究结果的启发，认为在 MAS 中可以通过微观层次的熵增，达到宏观层次熵的降低. 但是，他们是将信息素作为 MAS 的组成部分来考察而得出结论的. 如果将信息素作为环境的一部分，将其熵增作为 MAS 的输入熵，则也可以认为通过外部熵的输入能够达到降低宏观熵的目的. Prokopenko 等人[32]就是从以上两个角度来研究 Agent 团队的有序性的.

(2) 基于动力学的描述

基于动力学的 MAS 宏观涌现性描述是在一些统计量的基础上，利用数学工具刻画 MAS 的系统行为和宏观演化规律，进而确定系统的涌现特征. 虽然一些研究者认为涌现现象不是数学可分析的，但是随着研究的深入，渐渐被研究者所否认. MAS 的宏观动力学行为是 MAS 涌现研究的一个重要方面. 通过动力学研究，可以确定 MAS 的宏观演化规律，判断一些涌现特征发生的时机.

目前，基于动力学的 MAS 宏观描述主要针对具体的 MAS. Lerman 等人[33]给出了一个通用方法来描述满足马尔可夫性质的 MAS 的动力学过程，并用该方法分析了这类 MAS 中联盟的形成、多 Agent 合作等过程. Smolka[34]等在形式化模型的基础上，给出了大规模并行计算 MAS 的动力学过程. Johnson 等人[35]研究了由相互竞争的 Agent 构成的 MAS 的动力学过程.

MAS 具体过程的宏观动力学描述，也是目前 MAS 宏观研究的一个重要方面. Falcone 等[36]给出了 MAS 中信任产生的社会意识动力学过程；Liu 等[37]研究了粒群系统中群体智能的混沌动力学特征. 多 Agent 博弈和决策形成过程也多采用动力学形式描述. Lacko 等人[38]用动力学形式描述了 MAS 中的博弈策略的涌现过程；Tuyls 等[39]研究了重复博弈中，MAS 学习的演化动力学.

通过动力学描述，人们发现了 MAS 宏观涌现行为的一些重要特征，如全局收敛性[40-42]和相变[43-44]等. 这些特征对认识、设计和控制 MAS 宏观行为的涌现，意义非常大.

(3) MAS 中的普适性

受统计物理学启发，Parunak 等人[45]通过研究认为，MAS 的某些系统行为独立于单个 Agent 的内部心智和 Agent 之间的交互细节. 也就是说，两个拥有完全不同 Agent 的 MAS，可能具有相同的涌现特征. 他们将这种现象称之为普适性(universality). 从前面对 MAS 的熵和动力学的介绍中，可以看出其中的普适性特征.

MAS 中的普适性是 MAS 的一个重要宏观特征，是 MAS 基于统计描述的重要依据. 发现 MAS 中的普适性特征，是 MAS 涌现性研究的重要方面.

4　MAS 涌现的微-宏观机制

Holland 将涌现的微-宏观机制看成是受限生成过程(Constrained Generating Procedures，CGP)[46]. 也就是说，系统的宏观涌现特征是微观机制生成的结果，而微观机制间的相互作用和反馈“约束”或“限制”了结果的可能性. 受限生成过程是涌现研究的一个普适框架，而在具体问题或应用中，需要确定这一具体过程. 由于在 CAS 研究中对涌现的这一过程已经有一定的认识，目前 MAS 中涌现的微-宏观机制主要是受这些研究的启发而得到的，例如生物系统、社会系统、经济系统和一些人工系统等各类 CAS 涌现现象的研究[16,47-48].

4.1　受生物系统启发的机制

(1) Stigmergy 机制

Stigmergy 这个词是生物学家 Grasse 创造的，并用它来说明白蚁的筑巢行为，即工作成果本身为白蚁的进一步工作提供了刺激和指令[49]. 因此，在 Stigmergy 机制中，存在两种重要的微观机制：① 在

没有中心控制的情况下，一些 Agent 为完成某项任务而独立工作，它们之间是没有直接通信的；② 这些 Agent 能够随时感知工作结果，并以此作为自己进一步工作的指南. 在基于 Stigmergy 的 MAS 中，就是这些机制及其相互作用“生成”了 MAS 的涌现特征.

Stigmergy 机制被广泛应用于 MAS，以获得需要的涌现特征，如自组织. Brueckner 等[50]将它作为 Agent 协作机制，应用于移动自组网的管理中，使得管理具有良好的自组织特征. Karuna 等[51]等将 MAS 应用于工业自动控制，并把 Stigmergy 作为其协调和控制机制，使得整个控制系统具有涌现特征的预测能力.

(2) 信息素机制

信息素(pheromone)机制来源于对蚁群觅食这一涌现现象的观察：蚁群通过信息素传递食物的路径信息. 信息素机制主要包括 3 种机制：① Agent 按照一定的规律顺着某种信息素指示的方向行进，并在经过的路径上遗留某种类型和一定浓度的信息素；② 信息素按照一定的规律，随着时间的推移而蒸发；③ 在一些情况下，蒸发过程使得信息素散布到附近区域. 信息素的这些机制使得一些特征的涌现成为可能.

从通信的角度讲，Stigmergy 可以看成是 Agent 之间的一种间接通信机制，所有 Agent 通过作用于环境和感知环境达到默契协作. 在这种意义上，信息素机制可以看成是 Stigmergy 机制的一种特殊形式. 文献[52]就采用的是这种看法. 在一些应用中干脆就把它们等同起来[51,53].

信息素机制也应用得非常广泛. 例如，Peeters 等人[53]将信息素机制应用于基于 MAS 的车间控制系统，使得系统具有获得优化解和应对动态环境的能力. Parunak 等[54]将它应用于无人驾驶车辆和飞行器，使它们能够协调工作、完成任务. Ando 等人[55]将信息素机制应用于交通预测，以判断交通拥塞是否会发生.

(3) 强化机制

在生物学中，强化(reinforcement)机制最初是用来解释这一现象：生物系统中会分化出“专业人士”和“一般劳动力”[47]. 强化机制指出：随着 Agent 经验的增长，任务刺激对它的影响也越来越有效. 这主要通过两种机制实现[47]：① Agent 的工作效率随着经验的增长而提高；② 由于工作经验，Agent 对相关刺激的阈值的要求降低. 强化机制可以导致劳动分工和产生社会组织，这是 MAS 中非常重要的一种涌现现象.

强化机制是一种天然的学习方法，往往成为交互(反馈)学习的代名词，因此强化机制也往往在 Agent 或 MAS 学习这一语境中出现. 在学习过程中，Agent 或 MAS 尝试在其环境中产生一些作用(输出)，然后收到一个关于该作用的一个定量评价(报酬)，学习算法选择性地保留那些最大化自身报酬的输出.

强化学习通过奖惩函数来调整 Agent 或 MAS 的行为，使得系统具有较强的适应性，常常表现出一些涌现特征. 例如，文献[56]研究了基于强化学习的聚集涌现现象. Mazurowski 等[57]将强化学习用于 MAS 通信，以产生通信涌现. Dowling 等人[58]将它应用于移动自组网的路由优化，使得路由协议具有自组织特性.

(4) 免疫机制

免疫机制来自对生物免疫系统的研究. 在免疫系统中，B 细胞通过刺激/抑制链形成一个大规模细胞网. B 细胞的表面有受体，受体可以识别入侵的抗原，并能产生相应的抗体[59]. 这样，B 细胞组成的网络，使得免疫系统消灭入侵抗原是通过集体方式进行. 另外，免疫系统随着抗原的入侵或去除，自动调节抗体的数量；并且免疫系统自身结构也会随着环境的变化而改变. 这些机制相互作用使得免疫系统表现出显著的涌现特征.

就像 B 细胞网络为免疫系统提供消灭抗原的“服务”一样，免疫机制常用在组合服务的涌现上. 例如，普适计算中服务的涌现[59]和 Web 服务的涌现[60].

4.2 受经济系统启发的机制

经济系统中也存在各种宏观涌现现象，这常被比喻成是受“无形之手(invisible hand)”的控制的[61]. 经济系统的微观研究和宏观研究分别产生了微观经济学和宏观经济学，目前正致力于微观和宏观经济现象之间的联系的研究，并取得了一些重要的成果，如博弈论.

(1) 博弈机制

博弈机制的理论基础是博弈论. 博弈论是基于理性人假设，研究决策主体之间发生直接相互作用时的决策以及这种决策的均衡问题[61]. 理性人有一个很好定义的偏好，在面临给定的约束条件下最大化自己的偏好[61]. 可以看出，这些假设和研究内容与 MAS 研究有着天然的联系. 理性人就是一类典

型的 Agent，例如代理拥有者或用户的代理 Agent，它们通常被赋予自身利益（偏好），Agent 在行动中寻求自身利益的最大化. 利用博弈论，可以研究这类 Agent 的行为和由这些 Agent 组成的 MAS 的宏观行为.

博弈包括以下一些要素和机制[61]：① 博弈中选择行动以最大化自己效用的 Agent；② Agent 的决策变量，也称行动；③ Agent 选择行动的规则，也称战略；④ Agent 在博弈中的知识，特别是关于其它 Agent 的特征和行动的知识；⑤ Agent 从博弈中获得的效用水平，也称支付函数，它是所有 Agent 战略或行动的函数. 同时，可以对 Agent 行动的秩序和 Agent 关于其它 Agent 的知识做出假设，将博弈分为 4 类[61]，如表 1. 博弈中的要素和机制相互联系和作用，产生一些涌现特征，例如，在一定条件下所有 Agent 会出现最优战略或行动，称之为均衡，不同的博弈类型对应不同的均衡（表 1）.

表 1　4 种博弈类型及其对应的均衡[61]

信息	行动顺序	
	静态	动态
完全信息	完全信息静态博弈 纳什均衡	完全信息动态博弈 子博弈精炼纳什均衡
不完全信息	不完全信息静态博弈 贝叶斯纳什均衡	不完全信息动态博弈 精炼贝叶斯纳什均衡

博弈机制赋予 Agent 相互理性（mutual rationality），而使得无需通信 MAS 中就可以产生协调与合作[62-63]. 博弈机制最引人注目的应用是 MAS 中的自主协商[64-65]. 自主协商使得 Agent 为 MAS 的公共利益自动达成协议，进而引导 Agent 行动，促使 MAS 相应宏观属性和行为的涌现[41,66].

（2）拍卖机制

拍卖[1]是一种基于市场的、以显式规则（即拍卖规则）来决定资源分配和商品价格的资源分配机制，具有快速、有效、可操作性强等特点. 拍卖机制主要包括以下一些要素和机制：① 拍卖者；② 竞标者；③ 效用函数；④ 拍卖规则；⑤ 竞价策略. 拍卖者和竞标者都希望自己的效用函数最大化，拍卖者试图通过设计一个适当的拍卖规则实现这个愿望，而竞标者试图通过相应的竞价策略实现他们的愿望.

MAS 研究也试图引入拍卖机制，来解决任务分配和资源配置等问题，优化系统性能. 例如，文献[67]将拍卖机制应用于服务资源的分配，提高了服务组合的效率. 拍卖机制中各要素和机制相互作用也会产生某些涌现现象. 例如，文献[68]考察了 MAS 竞标中信任的涌现；Fatima 和 Wooldridge 等人[69]考察了不确定信息情况下，MAS 的均衡特征.

4.3　受社会系统启发的机制

社会个体的交互形成各种各样的社会网络，而它们无一例外的具有许多涌现特征. 虽然许多社会网络涌现的机制并没有完全研究清楚，但是还是能够对 MAS 的涌现机制带来一些隐喻和启发.

（1）时疫和流言机制

时疫和流言的传播机理大致相同. 传播范围达到一定程度后，时疫会大规模爆发，引发灾难；而流言也会达到“众口铄金”的效果. 时疫和流言机制，通过周期性的 Agent 个体信息交流和更新，使得 Agent 群体内全局信息聚集涌现出来.

时疫和流言机制对 MAS 中的信息传播和知识交流启发很大，例如信息的传输和路由. P2P 计算领域提出了一类传输协议，称为传染协议（epidemic protocol）[70]. 它们就是利用这种机制实现的，使得系统具有高鲁棒性和强可扩展性. 文献[71]将这一机制应用到传感器网络的路由算法，取得了很好的效果.

（2）信任和声誉机制

在社会系统中，信任与声誉是两个不同的概念. 信任表示的是社会主体之间的一种社会关系；而声誉在某种程度上是社会主体的一种社会属性. 但是它们之间又是相互联系的. 一个社会主体的声誉越高，越能得到其它社会主体的信任；而得到越多的信任，其社会声誉也往往越高.

信任和声誉机制主要有以下要素和机制：① 信任度，信任者对被信任者信任程度的度量；② 声誉值，社会主体声誉高低的度量；③ 第三方认证（引荐），相互信任基础上的信任传播；④ 信任评估，根据历史和当前信息，做出信任或不信任判断；⑤ 信任更新，在已有信息和判断的基础上，更新信任度和声誉值.

信任和声誉机制最直接的应用当然是 MAS 中的信任机制的设计[72-73]. 信任和声誉机制中的各要素和机制相互作用，也会产生一些涌现特征. 例如，Eigentrust 算法[74]便体现了局部信任到全局声誉的涌现. 文献[75]将信任和声誉机制引入 Agent 之间的交互，使得系统具有自组织特性.

5　面向涌现的 MAS 设计

由于 Agent 具有反应性、预动性、社会行为能

力，在无集中控制的情况，MAS 不可避免地产生一些涌现现象. James[76] 很早就指出，在构建一个 MAS 时，应该考虑 MAS 的涌现特征，并将涌现作为一个重要观念而引入 MAS 的分析与设计. 对此我们称之为面向涌现的 MAS 设计.

面向涌现的 MAS 设计以 MAS 的涌现性研究为基础，以面向涌现的设计方法和设计模式为指导，利用相应的开发工具和平台，来进行 MAS 设计. 它使得 MAS 具有所需的涌现特征，或避免一些涌现现象的发生.

在对 MAS 的涌现性有一定的认识的基础上，通常有两种方法使 MAS 获得期望的涌现性：① 在分析时充分考虑 MAS 的涌现性要求，并在设计时采取相应机制保证（或避免）一些涌现特征的出现；② 在系统运行时，控制相应条件，促使期望的涌现现象发生，或抑制危害性的涌现现象. 但是第二种方法也是以第一种方法为前提的，只有在分析设计时考虑到这样的控制条件，在运行时才能进行有效控制.

5.1 分析设计方法

在方法上，面向涌现的 MAS 分析与设计可以自底向上进行，或自顶向下进行，或将两者综合起来进行.

（1）自底向上的方法

从某种意义上讲，自底向上的方法是一种非正式的经验方法（Ad hoc 方法），因而不受人们重视. 但是在实际的分析设计中（特别是规模较小时），往往不自觉地采用这种方法. 这种方法不是从 MAS 涌现性目标出发一步一步得到单个 Agent 的功能结构，而是根据经验和直觉直接设计（或在已有的工作基础上修改）单个 Agent 及 Agent 之间的交互，再通过实际运行或仿真观察其涌现行为，不满足要求时修改设计，直到满意为止. 其示意图如图 1 所示.

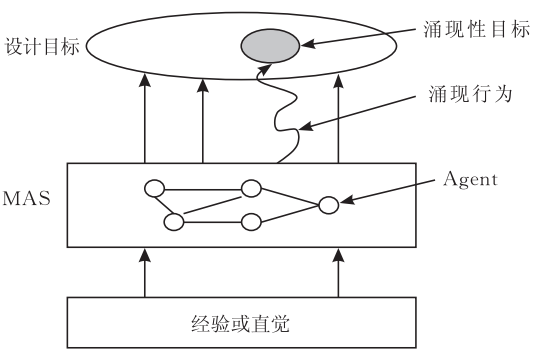

图 1 自底向上方法的示意图

（2）自顶向下的方法

自顶向下的方法是传统的软件分析和设计采用的方法，也为目前的 MAS 分析设计方法所使用，都是从目标需求出发，经过逐步精化而得到目标系统. 在自顶向下的面向涌现的分析设计方法中，涌现性目标作为系统需求的一个重要部分，而贯穿于整个分析设计过程，保证设计出的 MAS 具有期望的涌现特征. 其示意图如图 2 所示.

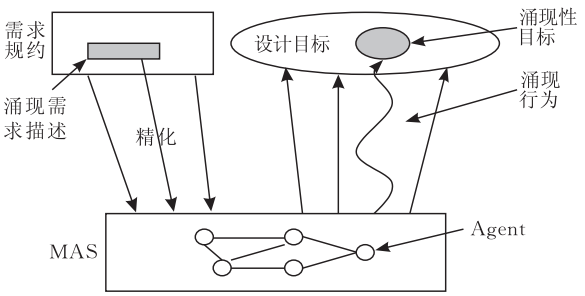

图 2 自顶向下方法的示意图

De Wolf 和 Holvoet[77] 给出的自组织 MAS 的全生命周期设计方法，就是在传统方法的各个阶段加入涌现性分析设计的方法. Gleizes 等人的 ADELFE 方法[78]，就是在 RUP 基础上扩展而得到的方法，它增加了设计适应系统的特定步骤，使得设计的 MAS 具有自组织特征.

（3）综合的方法

自底向上的 Ad hoc 方法往往带有一定的盲目性，要达到设计目标通常需要大量的实验. 自顶向下的面向涌现的分析设计方法，面临的一个重要问题是：涌现性质一般不可精化[79]. 所以单独使用这些方法很难实现设计目标. 一种折衷方案是综合这两种方法，取长补短，在自顶向下和自底向上的方法之间取得平衡. 其示意图如图 3 所示.

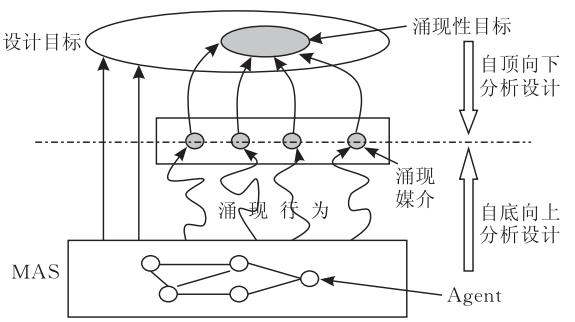

图 3 综合方法的示意图

这种综合方法，希望能够自顶向下将涌现性目标归约到“涌现媒介”，而这种“涌现媒介”又是可以通过自底向上的方法得到的. 这里，“涌现媒介”是指能够产生宏观涌现目标的中观或局部涌现特征（功能、结构、行为等等），它在规模、空间、时间等尺度上不是很大，可以方便地获得.

Poulton 等人[80-81]通过这种方法，实现了二维积木的自组装. 他们将“涌现媒介”称为“酶”. “酶”是由积木按照一定规则相互作用、通过涌现产生的、由若干积木构成的稳定结构. 分析目标结构可以确定需要什么样的“酶”，通过特定的“酶”可以获得目标积木结构. 而相应的“酶”可以通过控制作用规则，由积木自底向上涌现产生.

(4) 仿真在分析设计中的重要作用

测试与验证是保证所设计的系统满足目标的关键一环. 在面向涌现的分析设计中，测试与验证工作非常重要的一个方面，是确定是否能够获得期望的涌现特征. 由于涌现特征是在系统范围存在并动态保持的，传统的测试验证方法(单元测试、场景测试等)不能确定其是否满足目标. 另外，MAS 是一个复杂的交互计算系统，要建立起一个有效的形式化模型来验证其正确性非常困难. 正是由于这些原因，使得仿真成为一种不可或缺的测试与验证方法[77].

De Wolf 等人[82]使用基于仿真的科学分析方法，来确定 MAS 是否具有期望的宏观涌现行为. Gardelli 等[83]则直接使用仿真来发现设计缺陷，验证系统的正确性.

5.2　设计模式

设计模式[84]作为一种重要的软件重用方式而受到设计者们的青睐. 面向涌现的 MAS 设计模式，试图将 MAS 涌现性设计经验以规范化的描述记录下来，以获得成熟设计经验的重用. 这首先需要从已有的应用中甄别出一些固定的模式，然后以确定的描述框架描述出来. 这里我们主要介绍 De Wolf 等人[85-86]以及 Gardelli 等人[87]在 MAS 自组织设计模式方面的工作.

De Wolf 等人[85-86]从 MAS 自组织应用中甄别出的自组织协调模式如表 2，所使用的描述框架如表 3. 这些模式主要受显示自然、社会和人工系统的启发而得到.

表 2　De Wolf 等人给出的自组织协调模式

模式	针对问题
数字信息素路 (Digital Pheromone Paths)	空间资源的目标寻径；为完成任务而招募；关系认定；多种信息资源的整合
梯度场 (Gradient Fields)	空间运动；模式生成；结构生成；路由；上下文信息的整合
基于市场的协调 (Market-based Coordination)	一般的资源分配；资源使用或需要信息的整合
标签 (Tags)	团队形成；信任和声誉
令牌 (Tokens)	同步；资源分配

表 3　De Wolf 等人的模式描述框架

描述要素	含义
模式名/别名 (Pattern Name/Also Known As)	指称解决方案或有用隐喻的确定清晰的名称和别名
上下文/适用性 (Context/Applicability)	指出解决方案的应用场景，特别何时该自组织涌现解决方案最有前景
针对问题/意图 (Problem/Intent)	指出该模式解决什么问题. 工程师通过比较其问题来选择模式
约束(Forces)	为一个问题选择解决方案时，需要考虑的对立因素
解决方案(Solution)	描述怎样解决给出的问题
相关模式/机制 (Related Mechanisms/Patterns)	相关的一些模式以及它们的异同点
实例/已知应用 (Examples/Known Uses)	案例形式给出的已知应用的实例

Gardelli 等人认为 De Wolf 等人给出的模式是一种复杂的模式，而它们可以通过更简单更基本的模式构建出来[87]. 他们给出的 MAS 自组织设计模式及其描述框架如表 4 和表 5. 其中，描述框架采用的是 Lind 提出的框架[88].

表 4　Gardelli 等人给出的自组织设计模式

模式	针对问题
复制 (Replication)	(1) 降低信息的访问时间 (2) 在受攻击或失效时，避免信息丢失
联合分类 (Collective Sort)	在没有对信息仓库做任何显式限定时，MAS 环境查找信息的开销可能增大
挥发 (Evaporation)	MAS 环境会被 Agent 放置的过多信息所淹没
聚合 (Aggregation)	大规模的 MAS 为综合出宏观信息，必须筛选 Agent 放置的大量信息，这耗费较多资源
扩散 (Diffusion)	MAS 中 Agent 只能访问局部信息，Agent 推理缺乏关于邻居的知识

表 5　Gardelli 等人的模式描述框架

描述要素	含义
模式名(Name)	模式的名称
别名(Aliases)	模式名的别名
针对问题(Problem)	该模式所解决的问题
约束(Forces)	衡量标准之间的权衡
参与实体(Entities)	参与到该模式中的实体
动力学(Dynamics)	实体之间的交互
依赖(Dependencies)	环境需求
实例(Example)	模式使用的一个抽象例子
实现(Implementation)	对模式实现的提示
已知应用(Known Uses)	使用该模式的现有应用
影响(Consequences)	对整个系统设计的作用
参考(See Also)	给出共参考的模式

从 De Wolf 等人和 Gardelli 等人的研究可以看出，面向涌现的 MAS 设计模式是 MAS 涌现机制及其用于解决有关问题的规范描述，只不过他们是分别从不同的层次给出的. De Wolf 等人及 Gardelli 等人给出的只是 MAS 自组织的设计模式，其它涌

现特征的设计模式还有待于进一步的发掘.

6 问题与方向

面向涌现的 MAS 研究正方兴未艾,取得了一些阶段性成果,同时存在一些亟待解决的问题,在一些方向上需要更进一步的研究.

(1)基于逻辑的涌现性宏观描述的完善

从 MAS 研究开始,人们就一直偏爱用逻辑来描述 MAS. 基于逻辑对 MAS 的一些涌现特征进行描述,是一种崭新的尝试. Dunin-Keplicz 等人给出的群体思维状态逻辑模型[23-28],在 MAS 群体思维状态的涌现性描述方面进行了有用的探索,具有非常重要的意义. 因为 MAS 联合思维状态并非多个 Agent 的思维状态的简单联合,在一定程度上具有涌现性. 但是,这仅仅是一个开始. 用逻辑对其它一些涌现特征进行描述,还有待进一步研究. 并且 Dunin-Keplicz 等人研究的 MAS 群体思维状态是基于 BDI[89] 逻辑的,利用其它逻辑模型,例如 Brafman 和 Tennenholtz 的基于信念、偏好和决策策略 Agent 逻辑模型[90],会得到什么结果呢? 这也是可以进一步研究的问题.

(2)MAS 涌现性的度量

系统度量是认识一个系统的必要活动. MAS 涌现性的度量是认识、设计和控制 MAS 的涌现性的关键一环. 涌现性是针对系统的宏观特征而言的. 要在宏观层面上度量一个系统,需要引入一些综合指标,以反映系统的相关特征. 在此基础上,也能对两个系统的行为,或同一系统在不同时间、不同条件下的行为,进行比较.

用"熵"[19-20,31-32]来度量 MAS 的一些涌现特征,确实可以得到一些重要结论. 但是在原始意义上,"熵"仅是系统无序度的度量,不能反映所有的涌现特征. 所以,我们必须确定 MAS 中的哪些宏观参数需要测量,以便度量系统的涌现性以及反映系统的一般本质. 在这方面,一个比较有效的途径,是从所有涉及宏观度量的学科中获得启发和隐喻,例如,热力学、信息论、复杂网络理论等.

(3)MAS 涌现性的控制

MAS 涌现性度量的一个重要目的是对 MAS 的涌现行为进行控制,即促使建设性涌现特征出现和抑制破坏性涌现特征产生. 在 MAS 研究中,有许多不同的涌现性控制任务. 例如,在自组织 MAS 中,控制产生自组织涌现特性[16];在基于 Agent 的信息经济中,控制避免大规模的价格波动涌现发生[91].

控制论告诉我们,一旦知道所有参数和系统演化规律,控制活动就归结为改变操作参数(operational parameters). 所以,在涌现性度量的基础上,MAS 涌现性的控制,一定程度上,就是确保相关度量值在相应的范围内. 但是这并不是件简单事. 因为,在大多情况下,我们并不知道 MAS 的操作参数和支配规律;并且,即使知道这些参数和规律,有时仍然缺乏影响系统行为的 Agent 微观控制手段.

因此,要对 MAS 的涌现特征进行有效控制,还需对支配 MAS 演化的规律进行研究以及探究系统的微-宏观控制手段.

(4)MAS 涌现的微-宏观机制的动力学研究

针对 MAS 涌现性控制存在的问题,一种重要解决方案是在 MAS 中引入成熟的涌现机制. 如果我们对这些微-宏观机制产生的涌现行为有比较全面的认识,就能对 MAS 的涌现特征进行有效控制.

对 MAS 涌现的微-宏观机制进行动力学研究,能够帮助我们了解 MAS 的演化规律和发现微-宏观控制手段. 虽然受生物、经济和社会等系统的启发,人们甄别出了许多有用的涌现机制,但是在对它们进行定量的动力学研究上,还只是个案研究(如博弈机制[38,39]),有待进一步全面展开.

(5)MAS 面向涌现的设计方法和设计模式的完善

对于一些 MAS 而言,不可避免地存在一些涌现特征. 怎样化弊为利,发掘涌现的作用? 除了涌现性控制外,非常重要的一点是在分析时充分考虑 MAS 的涌现性要求,并在设计时采取相应机制保证(或避免)一些涌现特征的出现,或设计相应控制手段以便运行时控制涌现现象的发生. 这就要借助面向涌现的 MAS 设计.

MAS 面向涌现的设计方法,目前大多是在传统方法中加入涌现性设计步骤,并且主要围绕 MAS 自组织展开[77-78]. 面向涌现的设计模式也是针对 MAS 自组织的[85-87]. 这些都难以满足 MAS 的涌现性设计需求,需要进一步的完善和发展.

7 结束语

本文以 MAS 的涌现性为背景,分析归纳了涌现的概念和特征,指出了它与总成、自组织等概念的区别和联系. 考察了 MAS 面向涌现的宏观描述,归

纳出基于逻辑的群体思维涌现性描述和基于统计的宏观行为涌现性描述. 探讨了 MAS 涌现的微-宏观机制，甄别出受生物、经济和社会等系统启发的机制. 简述了面向涌现的 MAS 设计方法和设计模式. 通过研究，我们认识到面向涌现的 MAS 研究取得了一些阶段性成果，同时存在一些亟待解决的问题，如涌现性的度量与控制、微-宏观机制的动力学等，在这些方向上有待更进一步的研究.

参 考 文 献

[1] Michael Wooldridge. An Introduction to MultiAgent Systems. Chichester: John Wiley & Sons, 2002(in Chinese)
([英]伍尔德里奇. 多 Agent 系统引论. 石纯一，张伟，徐晋晖等译. 北京：电子工业出版社，2003)

[2] Zambonelli F, Omicini A. Challenges and research directions in Agent-oriented software engineering. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 2004, 9(3): 253-283

[3] Gabbai J M E, Yin H, Wright W A, Allinson N M. Self-organization, emergence and multi-Agent systems//Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks and Brain. Beijing, China, 2005: nil24-1863

[4] Holland John H. Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity. Redwood City, California: Addison-Wesley Publishing Company, 1995(in Chinese)
([美]约翰·H·霍兰. 隐秩序：适应性造就复杂性. 周晓牧，韩晖译. 上海：上海科技教育出版社，2000)

[5] Jochen Fromm. The Emergence of Complexity. Hessen: Kassel University Press, 2004

[6] De Wolf T, Holvoet T, Berbers Y. Emergence as a paradigm to engineer distributed autonomic software. Department of Computer Science, K. U. Leuven, Belgium: Report CW 380, 2004

[7] Anthony R. Emergence: A paradigm for robust and scalable distributed applications//Proceedings of the 1st International Conference on Autonomic Computing (ICAC'04). New York, USA, 2004: 132-139

[8] Palmer D, Kirschenbaum M, Seiter L. Emergence-oriented programming//Proceedings of the International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Hawaii, 2005: 1441-1448

[9] De Wolf T. Analysing and Engineering self-organizing emergent applications [Ph. D. dissertation]. Leuven, Belgium: Department of Computer Science, 2007

[10] Goldstein J. Emergence as a construct: History and issues. Emergence, 1999, 1(1): 49-72

[11] De Wolf T, Holvoet T. Emergence versus self-organization: Different concepts but promising when combined//Brueckner S, Di Marzo Serugendo G, Karageorgos A, Nagpal R eds. Engineering Self Organising Systems: Methodologies and Applications. Berlin: Springer-Verlag, 2005: 1-15

[12] Abbott Russ. Emergence explained: Abstractions: Getting epiphenomena to do real work. Complexity, 2006, 12(1): 13-26

[13] Auyang S Y. Foundations of Complex-system Theories: In Economics, Evolutionary Biology, and Statistical Physics. Oxford: Oxford University Press, 1998(in Chinese)
([英]欧阳莹之. 复杂系统理论基础. 上海：上海科技教育出版社，2002)

[14] Ueda K. Synthesis and emergence: Research overview. Artificial Intelligence in Engineering, 2001, 15(4): 321-327

[15] Paul Cilliers. Complexity and Postmodernism: Understanding Complex Systems. London: Routledge, 1998 (in Chinese)
([南非]保罗·西利亚斯. 复杂性和后现代主义. 曾国平译. 上海：上海世纪出版集团；上海科技教育出版社，2006)

[16] Serugendo G D M, Gleizes M P, Karageorgos A. Self-organisation and emergence in MAS: An Overview. Informatica, 2006, 30(1): 45-54

[17] Heyligen F. Self-organization, emergence and the architecture of complexity//Proceedings of the 1st European Conference on System Science. Paris, 1989. Paris: AFCET, 1992: 23-32

[18] Mamei M, Zambonelli F. Self-Organisation in multi-Agent systems: A middleware approach//Proceedings of the International Workshop on Engineering Self-Organizing Applications, Melbourne, Australia, 2003. Berlin: Springer-Verlag, 2004: 233-248

[19] Mnif M, Müller-Schloer C. Quantitative emergence//Proceedings of the 2006 IEEE Mountain Workshop on Adaptive and Learning Systems (SMCals 2006), Utah State University, College of Engineering, Logan, USA, 2006: 78-84

[20] Parunak H V D, Brueckner S. Entropy and self-organization in multi-Agent systems//Proceedings of the 5th International Conference on Autonomous Agents. Montreal, Canada, 2001: 124-130

[21] Halley J, Winkler D. Classification of emergence and its relation to self-organization. Complexity, 2008, 13(5): 10-15

[22] Ulieru Mihaela, Este Robert A. The holonic enterprise and theory emergence: On emergent features of self-organization in distributed virtual Agents. International Journal Cybernetics and Human Knowing, 2004, 11(1): 79-98

[23] Dunin-Keplicz Barbara, Rineke Verbrugge. Collective intentions. Fundamenta Informaticae, 2002, 51(3): 271-295

[24] Barbara Dunin-Keplicz, Rineke Verbrugge. Collective commitments//Proceedings of the 2nd International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS'96). Menlo Park, California, 1996: 56-63

[25] Dunin-Keplicz Barbara, Rineke Verbrugge. Collective motivational attitudes in cooperative problem solving//Proceedings of the 1st International Workshop of Eastern and Central Europe on Multi-Agent Systems (CEEMAS'99). St. Petersburg, Russia, 1999: 22-41

[26] Dunin-Keplicz Barbara, Rineke Verbrugge. Creating common beliefs in rescue situations//Dunin-Keplicz B, Jankowski

A, Skowron A, Szczuka M eds. Monitoring, Security and Rescue Techniques in Multiagent Systems, Series Advances in Soft Computing. Berlin: Springer-Verlag, 2005: 69-84

[27] Dunin-Keplicz Barbara, Rineke Verbrugge. A tuning machine for cooperative problem solving. Fundamenta Informaticae, 2004, 63(2-3): 283-307

[28] Dunin-Keplicz Barbara, Rineke Verbrugge. Calibrating collective commitments//Marik V, Muller J, Pechoucek M eds. Multi-Agent Systems and Applications III. Berlin: Springer-Verlag, 2003: 73-83

[29] Michael Wooldridge, Jennings Nicholas R. Towards a theory of cooperative problem solving//Proceedings of the 6th European Workshop on Modelling Autonomous Agents: Distributed Software Agents and Applications. Odense, Denmark, 1994. Berlin: Springer-Verlag, 1996: 15-26

[30] Paolo Torroni. Computational logic in multi-Agent systems: Recent advances and future directions. Annals of Mathematics and Artificial Intelligence, 2004, 42(1-3): 293-305

[31] Tucher Balch. Hierarchic social entropy: An information theoretic measure of robot group diversity. Autonomous Robots, 2000, 8(3): 209-238

[32] Prokopenko Mikhail, Wang Peter. Evaluating Team Performance at the Edge of Chaos. D. Polani et al. (eds.). RoboCup 2003: Robot Soccer World Cup VII. Berlin: Springer-Verlag, 2004: 89-101

[33] Lerman Kristina, Galstyan Aram. A general methodology for mathematical analysis of multi-Agent systems. Information Science Institute, University of Southern California: Technology Report 529, 2001

[34] Smolka M, Uhruski P, Schaefer R, Grochowski M. The dynamics of computing Agent systems//Proceedings of the Workshop on Intelligent Agents in Computing Systems. Atlanta, 2005: 727-734

[35] Johnson Neil F, Choe Sehyo C, Gourley Sean, Jarrett Timothy, Hui Pak Ming. Theory of collective dynamics in multi-Agent complex systems//Kramer B eds. Advances in Solid State Physics. Berlin: Springer-Verlag, 2004, 44: 427-438

[36] Falcone Rino, Castelfranchi Cristiano. The socio-cognitive dynamics of trust: Does trust create trust? //Falcone R, Singh M, Tan Y-H eds. Trust in Cyber-societies. Berlin: Springer-Verlag, 2001: 55-72

[37] Liu Hongbo, Abraham Ajith, Clerc Maurice. Chaotic dynamic characteristics in swarm intelligence. Applied Soft Computing, 2007, 7(3): 1019-1026

[38] Lacko Peter, Kvasnicka Vladimir, Pospichal Jiri. An emergence of game strategy in multiagent systems. International Journal of Computational Intelligence and Applications, 2004, 4(3): 283-298

[39] Tuyls Karl, Jan'T Hoen Pieter, Vanschoenwinkel Bram. An evolutionary dynamical analysis of multi-Agent learning in iterated games. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 2006, 12(1): 115-153

[40] Parunak H Van Dyke, Brueckner Sven A, Sauter John A, Matthews Robert. Global convergence of local Agent behaviors//Proceedings of the 4th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS05). Utrecht, Netherlands, 2005: 305-312

[41] Camponogara Eduardo. On the convergence to and location of attractors of uncertain, dynamic games//Bazzan A L C, Labidi S eds. Proceedings of Advances in Artificial Intelligence—SBIA 2004. Berlin: Springer-Verlag, 2004: 484-493

[42] Prokopenko Mikhail, Piraveenan Mahendra Rajah, Wang Peter. On convergence of dynamic cluster formation in multi-Agent networks//Capcarr'ere M S, Freitas A A, Bentley P J, Johnson C G, Timmis J eds. Proceedings of Advances in Artificial Life, 8th European Conference in Artificial Life. Berlin: Springer-Verlag, 2005: 884-894

[43] Brueckner Sven A, Parunak H Van Dyke. Information-driven phase changes in multi-Agent coordination//Proceedings of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS. 2003). Melbourne, Australia, 2003: 950-951

[44] Foreman Mark, Prokopenko Mikhail, Wang Peter. Phase transitions in self-organising sensor networks//Banzhaf W, Christaller T, Dittrich P, Kim J T, Ziegler J eds. Proceedings of Advances in Artificial Life, the 7th European Conference on Artificial Life. Berlin: Springer-Verlag, 2003: 781-791

[45] Parunak H Van Dyke, Brueckner Sven, Savit Robert. Universality in multi-Agent systems//Proceedings of the 3rd International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS'04). New York, USA, 2004: 930-937

[46] Holland John H. Emergence: From Chaos to Order. Redwood City, California: Addison-Wesley, 1998(in Chinese)
([美]约翰·霍兰.涌现:从混沌到有序.陈禹等译.上海:上海世纪出版集团;上海科技教育出版社,2006)

[47] Mano Jean-Pierre, Bourjot Christine, Lopardo Gabriel, Glize Pierre. Bio-inspired mechanisms for artificial self-organized systems. Informatica, 2006, 30(1): 55-62

[48] Salima Hassas, Giovanna Di Marzo-Serugendo, Anthony Karageorgos, Cristiano Castelfranchi. On self-organising mechanisms from social, business and economic domains. Informatica, 2006, 30(1): 63-71

[49] Lewis Thomas. The Lives of a Cell: Notes of a Biology Watcher. New York: Viking Penguin USA, 1974(in Chinese)
([美]刘易斯·托马斯. 细胞生命的礼赞. 李绍明译. 长沙:湖南科学技术出版社,1996)

[50] Brueckner Sven A, Parunak H Van Dyke. Self-organizing MANET management//Serugendo, Karageorgos, Rana, Zambonelli eds. Engineering Self-Organizing Applications. Berlin: Springer-Verlag, 2004: 20-35

[51] Karuna H, Valckenaers P, Saint-Germain B, Verstraete P, Zamfirescu C B, Van Brussels H. Emergent forecasting using a stigmergy approach in manufacturing coordination and control//Brueckner S et al. eds. Engineering Self-Organising Systems. Berlin: Springer-Verlag, 2005: 210-226

[52] Luca Tummolini, Cristiano Castelfranchi. Trace signals: The meanings of stigmergy//Weyns D, Parunak H V D, Michel F eds. Environments for Multi-Agent Systems III. Berlin: Springer-Verlag, 2007: 141-156

[53] Peeters P, Brussel H V, Valckenaers P, Wyns J, Bongaerts L, Kollingbaum M, Heikkila T. Pheromone based emergent shop floor control system for flexible flow shops. Artificial Intelligence in Engineering, 2001, 15(4): 343-352

[54] Parunak H Van Dyke, Brueckner Sven, Sauter John. Synthetic pheromone mechanisms for coordination of unmanned vehicles//Proceedings of the 1st International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. Bologna, Italy, 2002: 448-450

[55] Ando Yasushi, Fukazawa Yoshiaki, Masutani Osamu, Iwasaki Hirotoshi, Honiden Shinichi. Performance of pheromone model for predicting traffic congestion//Proceedings of the 5th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. Hakodate, Japan, 2006: 73-80

[56] Morihiro K, Isokawa T, Nishimura H, Matsui N. Emergence of flocking behavior based on reinforcement learning//Proceedings of the 10th International Conference on Knowledge-Based Intelligent Information Engineering Systems. Bournemouth, England, 2006: 699-706

[57] Mazurowski Maciej A, Zurada Jacek M. Emergence of communication in multi-Agent systems using reinforcement learning//Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Computational Cybernetics. Talinn, Estonia, 2006: 1-6

[58] Dowling Jim, Curran Eoin, Cunningham Raymond, Cahill Vinny. Using feedback in collaborative reinforcement learning to adaptively optimize MANET routing. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A, 2005, 35(3): 360-372

[59] Hassnaoui A, Bakhouya M, Gaber J. Towards an Agent-based approach for service emergence in pervasive computing//Proceedings of the Advanced International Conference on Telecommunications and International Conference on Internet and Web Applications and Services (AICT/ICIW 2006). Guadeloupe, France, 2006: 15- 15

[60] Ding Yong-Sheng, Sun Hong-Bin, Hao Kuang-Rong. A bio-inspired emergent system for intelligent Web service composition and management. Knowledge-Based Systems, 2007, 20(5): 457-465

[61] Zhang Wei-Ying. Game Theory and Informational Economics. Shanghai: Shanghai Sanlian Bookstore; Shanghai People's Education Press, 1996(in Chinese)
(张维迎. 博弈论与信息经济学. 上海：上海三联书店；上海人民出版社，1996)

[62] Simon Parsons, Michael Woolderidge. Game theory and decision theory in multi-Agent systems. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 2002, 5(3): 243-254

[63] Rosenschein J S, Ginsberg M, Genesereth M R. Cooperation without communication//Bond A H, Gasser L eds. Readings in Distributed Artificial Intelligence. San Mateo, California: Morgan Kaufmann Publishers, 1988: 220-226

[64] Kraus S. Negotiation and cooperation in multi-Agent environments. Artificial Intelligent Journal, Special Issue on Economic Principles of Multi-Agent System, 1997, 94(1-2): 79-98

[65] Sandholm T. Distributed rational decision making//Weiss G ed. Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence. Cambridge, MA: The MIT Press, 1999: 201-258

[66] Li Wan, Tian Sheng-Feng, Huang Hou-Kuan. Evolutionary games theory and Agent self-organizing dynamics. Journal of Computer Research and Development, 2006, 43(Supplement): 46-50(in Chinese)
(李万，田盛丰，黄厚宽. 进化博弈论及 Agent 自组织动力学. 计算机研究与发展，2006，43(增刊)：46-50)

[67] Chris Preist, Claudio Bartolini, Andrew Byde. Agent-based service composition through simultaneous negotiation in forward and reverse auctions//Proceedings of the 4th ACM Conference on Electronic Commerce(EC-2003). San Diego, California, USA, 2003: 55-63

[68] Wu D J, Sun Yan-Jun. The emergence of trust in multi-Agent bidding: A computational approach//Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences Hawaii, 2001. Washington: IEEE Computer Society Press, 2001: 1041-1048

[69] Fatima Shaheen S, Michael Wooldridge, Jennings Nicholas R. An analysis of sequential auctions for common and private value objects//Proceedings of the 7th International Workshop on Agent-Mediated Electronic Commerce. Utrecht, The Netherlands, 2005. Berlin: Springer-Verlag, 2006: 25-38

[70] Voulgaris S, Jelasity M, van Steen M. A robust and scalable Peer-to-Peer gossiping protocol//Moro G, Sartori C, Singh M P eds. Agents and Peer-to-Peer Computing. Berlin: Springer-Verlag, 2003: 47-58

[71] Braginsky D, Estrin D. Rumor routing algorithm for sensor networks//Proceedings of the 1st Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA). Atlanta, GA, USA, 2002: 22-31

[72] Ramchurn Sarvapali D, Huynh Dong, Jennings Nicholas R. Trust in multi-Agent systems. Knowledge Engineering Review, 2004, 19(1): 1-25

[73] Cahill V, Gray E, Seigneur J-M, Jensen C D, Chen Yong, Shand B, Dimmock N, Twigg A, Bacon J, English C, Wagealla W, Terzis S, Nixon P, Di Marzo Serugendo G, Bryce C, Carbone M, Krukow K, Nielson M. Using trust for secure collaboration in uncertain environments. IEEE Pervasive Computing Magazine, Special Issue Dealing with Uncertainty, 2003, 2(3): 52-61

[74] Kamvar S D, Schlosser M T, Garcia-Molina H. The eigentrust algorithm for reputation management in P2P networks//Proceedings of the 12th International World Wide Web Conference (WWW2003). Budapest, Hungary, 2003: 640-651

[75] Di Marzo Serugendo G. Trust as an interaction mechanism for self-organising systems//Proceedings of the International

Conference on Complex Systems (ICCS′04). Krakow Poland, 2004: 1-8

[76] James Odell. Agents and emergence. Distributed Computing, 1998, 10: 45-50

[77] De Wolf Tom, Holvoet Tom. Towards a methodology for engineering self-organizing emergent systems//Proceedings of the International Conference on Self-Organization and Adaptation of Multi-Agent and Grid Systems (SOAS 2005). Glasgow, Scotland, UK, 2005: 18-34

[78] Bernon C, Gleizes M-P, Peyruqueou S, Picard G. ADELFE: A methodology for adaptive multi-Agent systems engineering//Proceedings of the 3rd International Workshop on Engineering Societies in the Agents World (ESAW-2002). Madrid, Spain, 2002. Berlin: Springer-Verlag, 2003: 156-169

[79] Fiona Polack, Susan Stepney. Emergent properties do not refine. Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 2005, 137(2): 163-181

[80] Poulton G, Guo Y, Valencia P, James G, Prokopenko M, Wang P. Designing enzymes in a multi-Agent system based on a genetic algorithm//Groen F et al eds. Intelligent Autonomous Systems 8 (IAS-8). Amsterdam: IOS Press, 2004: 253-262

[81] Poulton Geoff, Guo Ying, James Geoff, Valencia Phil, Gerasimov Vadim, Li Jia-Ming. Directed self- asembly of 2-Dimensional mesoblocks using top-down/bottom-up design//Brueckner S et al eds. Engineering Self-Organizing Systems: Methodologies and Applications. Berlin: Springer-Verlag, 2005: 154-166

[82] De Wolf Tom, Holvoet Tom, Samaey Giovanni. Engineering self-organising emergent systems with simulation-based scientific analysis//Brueckner S, Di Marzo Serugendo G, Hales D, Zambonelli F eds. Proceedings of the 3rd International Workshop on Engineering Self-Organising Applications. Utrecht, The Netherlands: Universiteit Utrecht, 2005: 146-160

[83] Gardelli Luca, Viroli Mirko, Omicini Andrea. On the role of simulation in the engineering of self-organizing systems: Detecting abnormal behaviour in MAS//Proceedings of the Workshop on Objects and Agents (WOA′05). Camerino, MC, Italy, 2005: 85-90

[84] Gamma E, Helm R, Johnson R, Vlissides J. Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software. Redwood City, California: Addison Wesley Professional, 1995 (in Chinese)
(Gamma E, Helm R, Johnson R, Vlissides J. 设计模式:可复用面向对象软件的基础. 李英军,马晓星,蔡敏,刘建中等译. 北京:机械工业出版社, 2000)

[85] De Wolf Tom, Holvoet Tom. Design patterns for decentralized coordination in self-organizing emergent systems//Brueckner S, Hassas S, Jelasity M, Yamins D eds. Engineering Self-Organizing Systems. Berlin: Springer-Verlag, 2007: 28-49

[86] De Wolf T, Holvoet T. A catalogue of decentralized coordination mechanisms for designing self-organizing emergent applications. Department of Computer Science. K. U. Leuven, Belgium: Report CW 458, 2006

[87] Gardelli Luca, Viroli Mirko, Omicini Andrea. Design patterns for self-organizing multivalent systems//Proceedings of the International Workshop on Engineering Emergence in Decentralised Autonomic Systems (EEDAS 2007), ICAC 2007, Jacksonville, FL, USA, 2007. University of Greenwich: CMS Press, 2007: 61-70

[88] Lind J. Patterns in Agent-oriented software engineering//Proceedings of the 3rd International Workshop on Agent Oriented Software Engineering (AOSE 2002). Bologna, Italy, 2002. Berlin: Springer-Verlag, 2003: 47-58

[89] Rao A S, Georgeff M P. Modelling rational Agents within a BDI-architecture//James Allen, Richard Fikes, Erik Sandewall eds. Proceedings of the 2nd International Conference of Principles of Knowledge Representation and Reasoning. San Mateo, California: Morgan Kaufmann Publishers, 1991: 473-484

[90] Brafman Ronen I, Tennenholtz Moshe. Modeling Agents as qualitative decision makers. Artificial Intelligence, 1997, 94 (1-2): 217-268

[91] Kephart J. Software Agents and the route to the information economy. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2002, 99(3): 7207-7213

JIN Shi-Yao, born in 1937, professor, Ph. D. supervisor. His current research interests include systems modeling and simulation, multi-agent systems, distributed computing, and virtual realization.

HUANG Hong-Bing, born in 1977, Ph. D. candidate. His current research interests include multi-agent systems, complex systems modeling and simulation.

FAN Gao-Jun, born in 1980, Ph. D. candidate. His current research interests include multi-agent systems, complex systems modeling and simulation.

Background

In a lot of applications, MASs are identified as CASs. So, in the area of MAS, more and more attentions are paid to the phenomenon of emergence which is intrinsic in CASs. And emergence-oriented research on MASs becomes a new direction in the area of MAS. Emergence-oriented researches focus on the emergent characteristics of MASs and the mech-

anisms of emergence which correlate the macro- and micro-level characteristics. The final goal of these researches is to develop a set of methods for engineering emergence in MASs.

In this area, the concept of emergence has been debated for a long time, and is not settled yet. To study the emergent characteristics, the laws governing the evolution of MASs must be fined. This leads to the emergence-oriented description of MAS. At present, there are mainly two approaches: Logic-based and statistics-based. To engineer emergence in MASs at runtime, the proper way is to adopt relevant mechanisms for emergence and to introduce appropriate artifact for controlling. So design patterns using emergent mechanisms are very popular. Most of the mechanisms, now, are come form biology, economic and society. And the engineering methodologies are extends of the traditional software engineering methodologies.

In this paper, after an introduction of the concept of emergence, the emergence-oriented approaches for characterizing emergent behaviors of MASs are reviewed. Then the authors give an overview of the micro-macro mechanisms of emergence in MASs, and a survey of emergence-oriented engineering methodologies and design patterns of MASs. Finally, the problems of these researches are discussed; and future directions in this area are given by the authors.

Authors have done research on MAS and CAS, especially on MAS-based modeling and simulation of CASs, for many years. By these studies, they have a deep understanding of emergence in CASs. Recently, they apply their research result to emergence-oriented research on MASs. A remarkable tool, namely JCass, have facilitated their research, which is a distributed platform for Agent-based simulations developed by themselves.