

Swarm突现行为的定量评估指标

吴 渝, 周 凯, 李银国

(重庆邮电大学 网络智能研究所, 重庆 400065)

摘要: 针对目前定量观测、分析和控制Swarm突现行为研究中的困难, 在定性分析突现行为的基础上, 提出了多个可定量度量Swarm突现行为的指标, 给出了各指标的依据和计算方式. Swarm模型仿真验证了各指标的有效性, 分析了其彼此之间的相关性, 发现了各指标的变迁区域可反映Swarm行为的突现阶段, 同时, 各指标的变化从不同层面反映了Swarm中内在个体行为交互和局部环境变化情况, 而且, 彼此之间的相互关联性可有效展现整体行为的稳定程度.

关键词: 复杂自适应系统; Swarm; 突现行为; 定量指标

中图分类号: TP13; TP18 **文献标识码:** A

The evaluation metrics for Swarm emergent behaviors

WU Yu, ZHOU Kai, LI Yin-guo

(Institute of Web Intelligence, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: To deal with the difficulties in quantitatively observing, analyzing and control the Swarm emergent behaviors, we, on the basis of qualitative analysis on the emergent characteristics, propose several metrics for describing the Swarm emergent behavior along with their implications and computation. The validity of these metrics is proved by the simulation of a specific Swarm model; and the relations between them are analyzed. From the quantitative analysis, it is found that the transition region of each metric reflects the emergent phase of the Swarm behavior. Meanwhile, the change of the metric reflects the interaction between individual intrinsic behavior and the alteration of local environment in different levels. Furthermore, the correlation between metrics shows the stability of the Swarm behavior effectively.

Key words: complex adaptive system; Swarm; emergent behaviors; metrics

1 引言(Introduction)

复杂系统突现特性的研究已成为当前复杂性科学研究热点, 其中, 生物系统中集中展现突现特性的Swarm现象更受学者关注. 所谓Swarm是指自然界中由多个个体相互协调所形成的生物群体行为, 如鱼群、鸟群等, 具有高度自组织、自适应性, 表现出非线性、突现的系统特征. 对Swarm突现行为的研究, 将有助于探讨和解释复杂自适应系统本质规律.

目前, 人们虽对Swarm等复杂系统的突现现象进行了模拟研究, 找到了一些可操作的描述方法^[1], 但研究尚处现象发现、解释和归纳及行为分析上, 尚未真正触及深层次内在动力学机制的科学解释. 而系统定量作为认识系统内在的必要手段, 从宏观上合理构建突现行为定量指标成为定量研究突现机制的有效方式. 从相关突现研究文献可知, 已有部分学者开始从该角度提出如基于动力学参数等属性的定

量分析方法^[2,3], 这无论在理论还是应用上都为该领域研究开拓了崭新思路. 但目前该方面研究仅限于特定属性, 研究面单一, 不能完整诠释突现行为内在规律, 尚待开展更为深入的工作构建更佳完善的定量指标和研究方法.

基于此, 本文在定性分析影响突现行为产生的主要因素基础上, 从定量评价的角度, 结合Swarm系统和突现结构特性, 从个体属性、空间结构和系统属性等方面选取或构建了可从不同层级定量Swarm突现特性的指标, 并进行了有效性评估和关联性分析.

2 Swarm模型(Swarm model)

本文以文献[4]中的Swarm模型作为研究基础, 其强调个体飞行速度和方向由自身动力学参数和局部环境决定. 个体在 t 时刻瞬时加速度为:

$$\vec{V} = c_1 \vec{V}_1(d) + c_2 \vec{V}_2 + c_3 \vec{V}_3 + c_4 \vec{V}_4 + c_5 \vec{V}_5, \quad (1)$$

收稿日期: 2009-04-09; 收修改稿日期: 2009-11-10.

基金项目: 国家“973”计划前期研究资助项目(2008CB317111); 国家自然科学基金资助项目(60873079); 新世纪优秀人才支持计划(NCET); 重庆市自然科学基金重点资助项目(2008BB2241, 2009BA2089).

$$\vec{A} = A_{\max} \vec{V} / |\vec{V}|, \quad (2)$$

公式(1)中: 常数 c_i 是向量 $\vec{V}_i$ 的权值($i = 1, 2, 3, 4, 5$); d 是个体与邻居个体间保持的最佳距离值(拥挤半径); $\vec{V}_1$ 为指向距离差在 d 之内的所有邻居个体向量; $\vec{V}_2$ 为环境向量; $\vec{V}_3$ 为领域内所有个体速率均向量; $\vec{V}_4$ 为为邻域内所有个体中心向量; $\vec{V}_5$ 为随机单位向量; $\vec{V}$ 为加权和向量. 公式(2)中, $\vec{A}$ 为个体瞬时加速度向量($|\vec{A}| \leq A_{\max}$); $A_{\max}$ 为个体最大加速度值.

3 定性描述Swarm的突现定量问题 (Qualitative description of the emergent swarm quantitative questions)

依据Seel^[5]总结的突现行为影响因素, 结合Swarm特性, 描述了Swarm突现行为可定量问题.

1) 连接性. 制约个体间信息的可畅达, 表示相互之间的连接关系.

2) 多样性. 影响系统整体行为潜在可变性, 表示群体局部行为差异程度.

3) 信息流动性. 影响Swarm内部行为互动性, 表示个体间交互程度.

4) 抑制缺失性. 制约行为一致性, 表示局部间的权衡度.

5) 良好边界性. 决定行为可突现形式和强度, 表示个体潜在可认识能力.

6) 意向性. 决定系统宏微观间行为正负反馈程度, 表示系统内部能量流动.

7) 预警性. 体现系统对内外部环境变化敏感度, 表示系统层信息频谱跃变.

由上可知, 各影响因素在Swarm个体、群组 and 总体层间存在着相关性, 见图1. 因此, 通过定量方式可从不同层面分析Swarm突现特性.

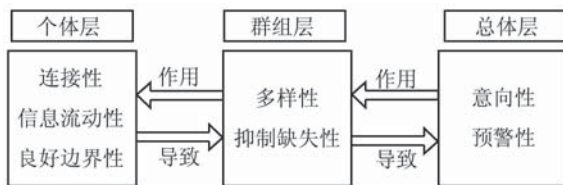


图1 各影响因素所对应的不同层面及相关性

Fig. 1 The corresponding levels for different influencing factors and their relevance

4 突现定量指标的选择 (Selection of emergent quantitative metrics)

基于上节分析, 本文选择了8个定量指标, 表1为各指标与各影响因素之间的对应关系.

4.1 平均个体聚类度(Degree of average individual cluster)

Swarm连接性体现于个体聚集, 以聚类系数^[6]为依据, 量化个体平均聚类度, 给出如下公式:

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{2E_i}{(k_i(k_i - 1))}, \quad (3)$$

其中: N 为总的个体数, E_i 为个体 i 具有 k_i 个邻域个体的实际聚类情况, $k_i(k_i - 1)/2$ 为个体 i 可能的总聚类情况. 当 $C = 0$, 系统中所有个体均孤立; 当 $C = 1$, 系统中任意两个个体相连.

表1 各影响因素与定量指标的关联性

Table 1 Relevance between influencing factors and quantitative metrics

影响因素	定量指标
连接性	平均个体聚类度、邻域个体分布指数
多样性	集群熵
信息流动性	平均个体交互度
抑制缺失性	权衡熵
良好边界性	平均个体认知度
意向性	内部能量
预警性	功率谱熵

4.2 邻域个体分布指数(Neighbourhood individual distribute index)

本指标强调群组层平均群体分布度, 结合度及度分布^[6]概念, 给出如下公式:

$$P = \sum_{k=0}^N \frac{\log 2(k \times N_k + 1)}{k \times N_k + 1}, \quad (4)$$

其中 N_k 为邻域数为 k 的个体数. P 随邻域个体规模的增大而减小.

4.3 平均个体交互度(Degree of average individual interaction)

以平均路径长度^[6]为依据, 给出如下公式:

$$L = \frac{1}{\frac{1}{2}N(N-1)} \sum_{i \geq j} n_{ij}, \quad (5)$$

其中: n_{ij} 为个体 i 和 j 间可建立交互的最少传达数, N 为总个体数. 当 $L = 1$, 任意个体间可直接交互; 当 $L > 1$, 部分个体间的交互需经过多次传达; 当 $L < 1$, 部分个体处于盲区.

4.4 平均个体认知度(Degree of average individual recognition)

结合心理学理论^[7]及Swarm特性, 得如下公式:

$$N_i = \{j : \|x_i - x_j\| \leq d, j \in N\}, \quad (6)$$

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log 2 \left(\frac{N_i}{N} + 1 \right). \quad (7)$$

其中: N 为总个体数, N_i 为个体 i 可认知个体数, $\|x_i - x_j\|$ 为个体 i 和 j 距离差, d 为认知范围. 当 $E=0$, 个体均未具备感知力; 当 $E=1$, 个体均达到最大认知度.

4.5 熵(Entropy)

信息熵是研究复杂系统的重要指标^[8], 特定属性下的熵反映了与该属性有关的宏观特征, 公式如下:

$$H_a = - \sum_{j=1}^N p_j \log p_j, \quad (8)$$

其中 p_j 为相应属性下形成的概率值. 本文分别以个体类别、个体位置和系统功率谱为属性计算 p_j 值.

4.5.1 集群熵(Colony entropy)

以个体类别为属性求取群聚熵 H_s , 公式如下:

$$D_s = \{j : j \in N_i \wedge i, j \notin D_{s-1}\}, \quad (9)$$

$$p_s = D_s / N. \quad (10)$$

其中 D_s 为集群 s 的个体集合, p_s 为任一个体存在于集群 s 的概率. 当 $H_s = \log 2(N)$, 其多样性最大化, 随着该值下降, 多样性不断弱化, 当 $H_s=0$, 集群单一化.

4.5.2 权衡熵(Balance entropy)

以个体距离差为属性求取权衡熵 H_c , 公式如下:

$$l_i = \sum_{j \in N_i} \|x_i - x_j\| / N_i, \quad (11)$$

$$p_c = l_c / \sum_{j=1}^N l_j. \quad (12)$$

其中: l_i 为个体 i 与其邻域个体的平均距离差, 视为局部权衡力, p_c 为相应概率值. H_c 处于低值状态, 系统内部可权衡力较差, 随着该值上升, 其能力增强, 当 H_c 趋于稳定, 其得到最大均衡化.

4.5.3 功率谱熵(Power spectral entropy)

功率谱为随机运动在各频率的统计特性^[9], 以该属性求功率谱熵 H_w 可展现系统预警性, 公式如下:

$$p_w = p(w_i) / \sum_i p(w_i), \quad (13)$$

其中: $p(w)$ 为经Fourier变换得到的功谱密度, p_w 为概率密度分布. H_w 越大, 信息的能量在整个频率域上分布越均匀, 系统复杂度越高.

4.6 内部能量(Internal energy)

依据Pedrami^[10]提出的Swarm Temperature构建方式, 给出用于量化Swarm内部能量的计算方式, 包括个体 i 排斥域 N'_i 、Swarm总体势能 $J(x)$ 、Swarm总体动能 $E_k(v)$ 、Swarm中心动能 $E_b(v)$ 及内部能量

$T(x, v)$, 公式如下:

$$N'_i = \{j : \|x_i - x_j\| \leq \varepsilon, \varepsilon < d, j \in N_i\}, \quad (14)$$

$$J(x) = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j \in N'_i} (x_i - x_j) + \sum_{j \in N_i} \frac{x_j}{N_i} - x_i \right), \quad (15)$$

$$E_k(v) = \sum_{i=1}^N \|v^i\|^2, \quad (16)$$

$$E_b(\bar{v}) = \sum_{i=1}^N \bar{v}^2 = N\bar{v}^2, \quad (17)$$

$$\bar{v} = 1/N \sum_{i=1}^N \|v^i\|, \quad (18)$$

$$T(x, v) = 1/M [J(x) + E_k(v) - E_b(\bar{v})], \quad (19)$$

其中 ε 为排斥域距离. 当 T 趋于低值且平稳状态, 系统宏微观层间反馈能力达到最佳.

5 定量指标的有效性评估和分析(Validity of quantitative metrics evaluation and analysis)

5.1 实验设置(Experiment setting)

Swarm个体数30个, 系统运行时长700次. 依据产生和不产生突现现象, 分别取

$$\begin{cases} c_1 = 5, c_2 = 8, c_3 = 8, c_4 = 7, \\ c_5 = 5, d = 0.14, A_{\max} = 38, \\ c_1 = 7, c_2 = 10, c_3 = 1, c_4 = 5, \\ c_5 = 5, d = 0.7, A_{\max} = 11, \end{cases}$$

并截取了特定时刻下的行为图, 见图2, 其中100, 410和590为变迁时刻. 图3为各指标数据曲线变化图.

5.2 评估与分析(Evaluation and analysis)

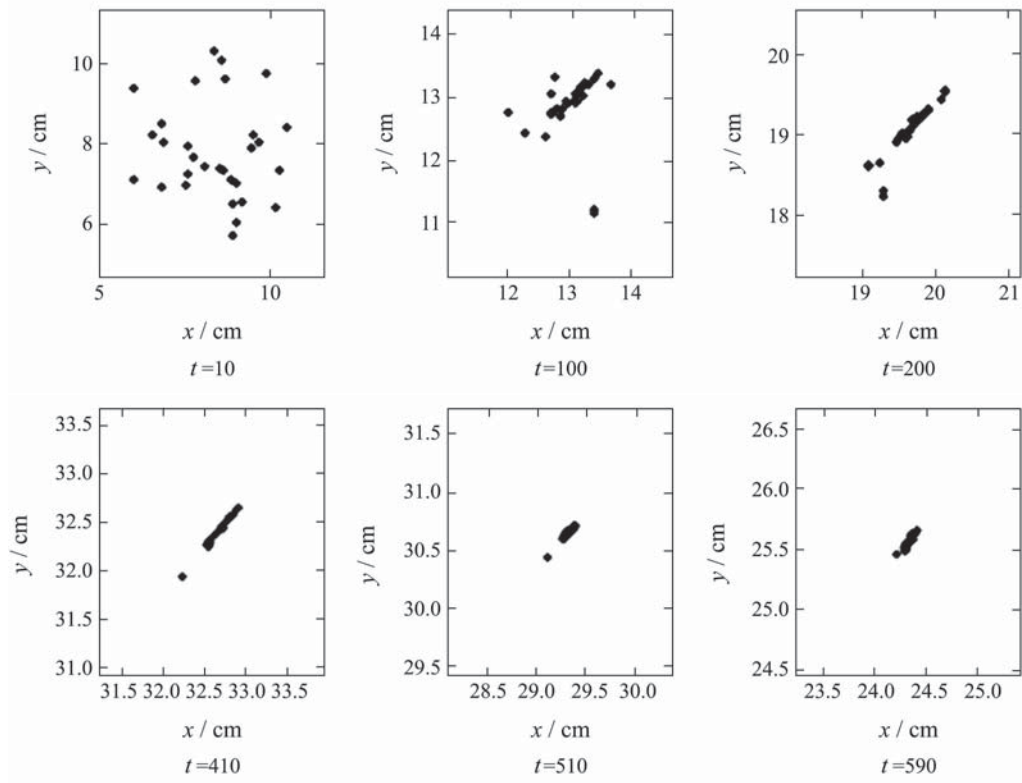
5.2.1 总体分析(General analysis)

经对比发现, 在有突现现象情况下各指标曲线展现明显变迁区域, 见图3圆圈标注处, 所对应时刻下行为具有明显差异, 见图2(a), 该区域有效诠释了Swarm行为的突变阶段. 从图2(a)可知, 行为突变主要发生于第一变迁时间段, 之后的突变主要为初始行为的深入演化, 行为保持阶段稳定性.

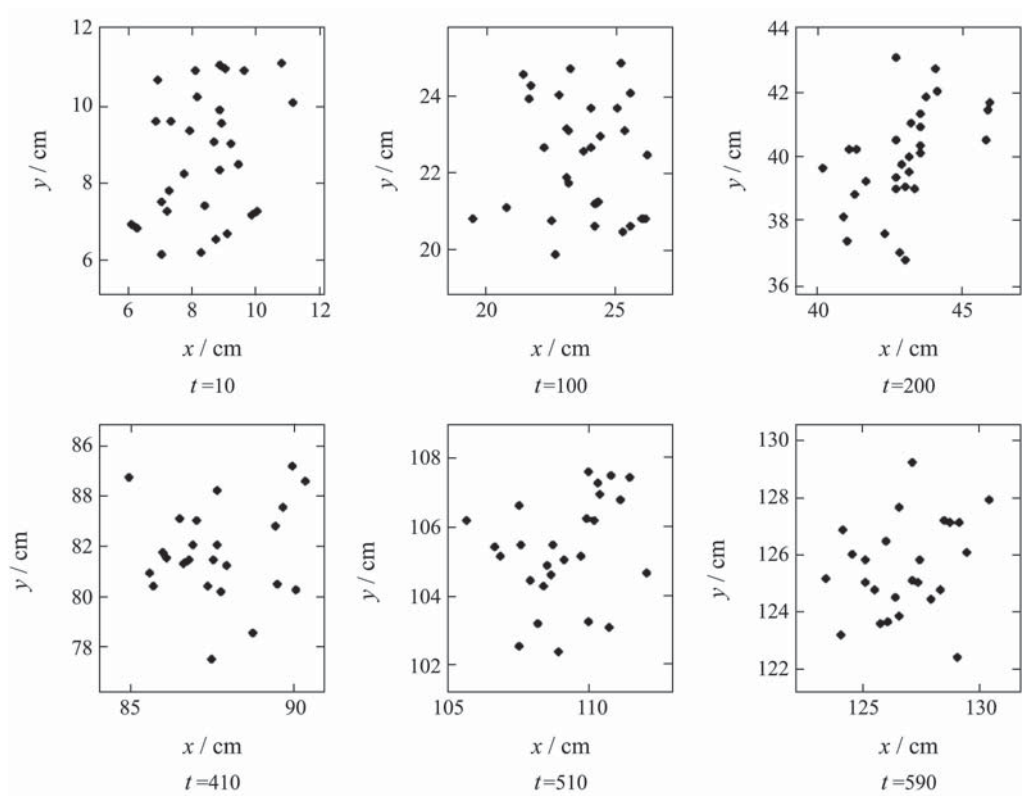
下文逐一解析各指标所诠释因素对行为演化的影响情况及指标间的相关性.

5.2.2 连接性分析(Connectivity analysis)

由图3(a), 3(b)可发现, 有突现现象时, 平均个体聚类度不断上升, 说明Swarm连接性逐渐增强. 邻域个体分布指数呈先升后降走势, 表明连接性增强主要分两阶段: 前期以具有连接能力的个体增加为主, 故其整体连接紧密度不高, 出现大量小群体, 见图2(a)中时刻为10的行为截图; 后期以邻域个体增加为主, 此时连接紧密度增强, 从而导致行为初始突现.



(a) 有突现现象时的Swarm行为截图



(b) 无突现现象时的Swarm行为截图

图 2 不同条件下特定时刻的Swarm行为截图

Fig. 2 Swarm behavior of specific times in different situations

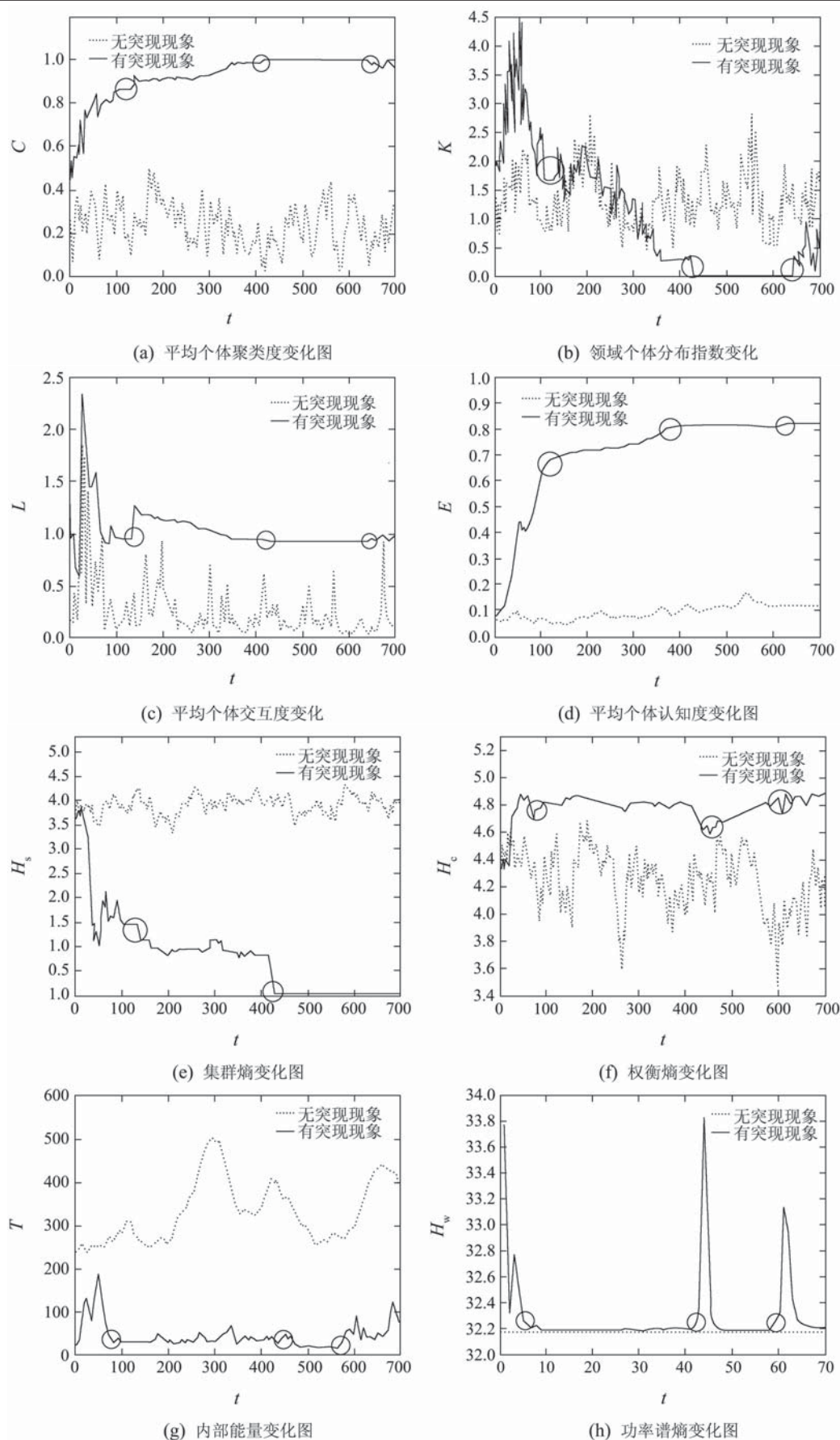


图3 有突现现象和无突现现象情况下所形成的各指标曲线变化图

Fig. 3 Metrics curve diagrams with or without emergent property

5.2.3 信息流动性分析(Rate of information flow analysis)

如图3(c), 有突现现象时, 平均个体交互度不断接近于1. 可知, Swarm中个体信息的交互是间接到直接的过程. 随着传达次数的不断减少, 局部间信息流动性得到增强, 当该值达到1, 系统整体可交互性处于最佳, 见图2(a)中时刻为590的行为截图.

5.2.4 良好边界性分析(Good boundaries analysis)

如图3(d), 有突现现象时, 平均个体认知度不断接近于1, Swarm内部个体认知度在不断提高, 随着认知力提升, 个体行为态势变得更加明确, 见图2(a)中时刻为100的行为截图.

5.2.5 多样性分析(Diversity analysis)

如图3(e), 有突现现象时, 集群熵呈阶段性下降到0的态势, 表明Swarm局部多个相互独立的个体或分群逐渐融合成规模更大、结构更单一的群体, 其阶段性变化表明集群分化使整体形态保持暂态稳定性, 见图2(a)中410和510时刻的行为截图.

5.2.6 抑制缺失性分析(Lack of inhibitors analysis)

如图3(f), 有突现现象时, 权衡熵上升表明分群间相互抑制或权益使个体行为趋于一致. 之后, 该值处于小范围内的平缓波动, 表明行为虽整体达成一致, 但部分个体仍处于权衡状态, 进而巩固和深化初始突现形态, 见图2(a)在200和410时刻的行为截图.

5.2.7 意向性分析(Intentionality analysis)

在行为突现过程中, 内部能量变化体现了系统宏微观的相互反馈程度, 见图3(g). 行为演化前期, 宏观层能量波动大, 造成微观层个体运动活跃, 故曲线变化大, 随着个体间聚集、交互, 个体活跃度相对平稳, 突现可辨识的Swarm行为, 如图2(a)在100时刻的行为截图, 宏观层能量趋于平稳, 曲线呈平缓波动态势.

5.2.8 预警性分析(Watchful anticipation analysis)

如图3(h), 有突现现象时, 功率谱熵处于敏感波动状态. 当行为从一个状态变迁到另一状态时, 对应变迁区域下曲线出现明显跃迁, 见图3(h)标注区域处.

5.2.9 关联性分析(Relevance analysis)

结合实验仿真统计数据, 见表2, 和指标关联图, 见图4, 此节系统性论述不同层级下各指标相关性.

由表2可知, 在突变过程中, 个体层个体连接性

不断增强, C 逐渐增加至1, 个体间信息流动提升, L 趋近于1, 个体认知度得到提高, E 不断接近理论值1. 个体层变化导致群组层个体领域内可交互个体数逐渐增多, K 达到全局极小值, 分群不断相互约束使行为达成一致, H_c 呈阶段性平稳变化, 分群多样性趋于单一, H_s 逐渐下降至0. 同样, 群组层行为改变导致系统总体层变化, 宏微观层的反馈机制使得 T 越低, 行为越稳定, 反之亦然. H_w 在行为的突变阶段发生显著改变, 形态变化越明显, 该值波动越大.

由图4可知, 当各指标在相应层面上出现明显越变时系统行为发生突变, 整体行为的稳定性随着指标之间平衡程度的增强而增强.

表2 对应层级下各指标在不同阶段的均值

Table 2 The average of the metrics at different stages corresponds to the levels

阶段	个体层			群组层			总体层	
	C	L	E	K	H_s	H_c	T	H_w
前期	0.71	1.19	0.31	2.88	2.23	4.70	88.42	32.53
形态1	0.85	0.98	0.63	2.19	1.53	4.81	36.75	32.18
中期	0.93	1.06	0.73	1.27	0.98	4.81	35.78	32.18
形态2	0.98	0.96	0.81	0.29	0.75	4.79	33.96	32.21
后期	1.00	0.97	0.81	0.01	0.01	4.71	25.32	32.22
形态3	1.00	0.97	0.81	0.01	0.00	4.82	50.29	32.34
末期	0.99	0.94	0.82	0.27	0.00	4.85	60.97	32.41

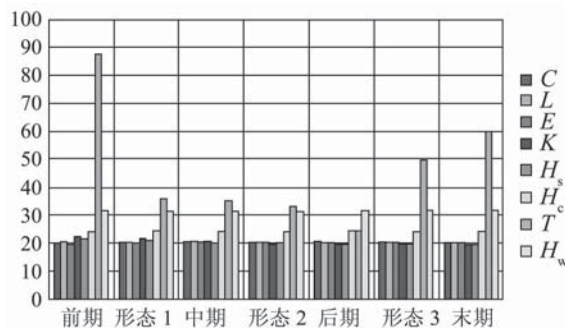


图4 不同阶段下指标关联图

Fig. 4 Relation diagrams of metrics at different stages

6 结论(Conclusion)

本文针对Swarm中的突现现象, 对其演化过程的可度量性进行了研究. 选取了一系列可度量Swarm突现行为的指标, 通过实验, 评估了各指标有效性并对行为演化过程进行了定量分析, 论述了指标间的相关性. 相比于传统偏重于从理论研究突现机制的方法, 利用该套指标实现对突现过程的定量分析更具可观测性、操作性和解释性.

参考文献(References):

- [1] 金士尧, 黄红兵, 范高俊. 面向涌现的多AGENT系统研究及其进展[J]. 计算机学报, 2008, 31(6): 881 – 895.
(JIN Shiyao, HUANG Hongbing, FAN Gaojun. Emergence: oriented research on multi-agent systems and its state of arts[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2008, 31(6): 881 – 895.)
- [2] MORRELLA L J, JAMES R. Mechanisms for aggregation in animals: rule success depends on ecological variables[J]. *Behavioral Ecology*, 2008 19(1): 193 – 201.
- [3] WU Y, ZHOU K, SU J, et al. Kinetic parameter mining of swarm behavior based on rough set[J]. *Communications of SIWN*, 2008, 4(1): 64–69.
- [4] KWONG H, JACOB C. Evolutionary exploration of dynamic swarm behaviour[C] // *Proceedings of 2003 IEEE Congress on Evolutionary Computation*. Canberra: IEEE, 2003: 367 – 374.
- [5] SEEL R. Emergence in organisations[EB/OL]. <http://www.newparadigm.co.uk/emergence-2.htm>, 2006.
- [6] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
(WANG Xiaofan, LI Xiang, CHEN Guanrong. *Complex Network Theory and Application*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.)
- [7] 唐孝威. 情绪的数学公式[J]. 应用心理学, 2001, 7(2): 50 – 51.
(TANG Xiaowei. A mathematical formula of emotion[J]. *Chinese Journal of Applied Psychology*. 2001, 7(2): 50 – 51.)
- [8] PUJOL T, FORT J. States of maximum entropy production in a one – dimensional vertical model with convective adjustment[J]. *Tellus A*, 2002, 54(4): 363 – 369.
- [9] 袁地, 侯越. 一个三维非线性系统的混沌运动及其控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(4): 395 – 399.
(YUAN Di, HOU Yue. Chaotic movement and its control of a three-dimensional nonlinear system[J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(4): 395 – 399.)
- [10] PEDRAMI R, GORDON B W. Control and analysis of energetic swarm systems[C] // *Proceedings of the 2007 American Control Conference*. New York: IEEE, 2007: 1894 – 1899.

作者简介:

- 吴 渝 (1970—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为网络智能、数据挖掘, E-mail: wuyu@cqupt.edu.cn;
- 周 凯 (1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向为网络智能, E-mail: kii.zhou@gmail.com;
- 李银国 (1955—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为人工智能、模式识别研究, E-mail: liyg@cqupt.edu.cn.

(上接第1085页)

- [7] LU P. Approximate nonlinear receding-horizon control laws in closed form[J]. *International Journal of Control*, 1998, 7(1): 19 – 34.
- [8] 郭健, 陈庆伟, 朱瑞军, 等. 一类非线性系统的自适应预测控制[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(1): 68 – 72.
(GUO Jian, CHEN Qingwei, ZHU Ruijun, et al. Adaptive predictive control of a class of nonlinear system[J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(1): 68 – 72.)
- [9] GOODWIN G C, MAYNE D Q. A parameter estimation perspective of continuous time model reference adaptive control[J]. *Automatica*, 1987, 23(1): 57 – 70.

作者简介:

- 郭 健 (1974—), 男, 工学博士, 副教授, 主要研究领域为自适应控制、预测控制等, E-mail: guoj1002@mail.njust.edu.cn;
- 陈庆伟 (1963—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为伺服系统控制、机器人技术等, E-mail: cqw1002@mail.njust.edu.cn;
- 吴益飞 (1979—), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究领域为运动控制、自适应控制等, E-mail: wuyifei@mail.njust.edu.cn;
- 姚 斌 (1969—), 男, 教授, 工学博士, 主要研究领域为高性能自适应鲁棒控制理论与应用, E-mail: Byao@purdue.edu.