

# 基于社区划分的多智能体网络快速蜂拥控制

陈世明<sup>†</sup>, 邱 昀, 刘俊恺, 聂 森

(华东交通大学 电气与自动化工程学院, 南昌 330013)

**摘要:** 针对复杂网络社区特性对多智能体系统协同控制效率的影响, 面向具有 ER(Erdos-renyi) 网络或 BA(Barabasi-albert) 网络性质的多智能体系统, 提出一种基于社区划分的快速蜂拥控制算法. 该算法充分考虑社区内个体的相对密集特性, 通过在社区间引入虚拟领导者作用, 避免系统在演化过程中因通信受限而导致的“分块”现象, 可有效提高系统拓扑的代数连通度. 仿真结果表明: 具有相应性质的多智能体系统蜂拥行为的收敛速度与 ER 和 BA 网络的平均度以及 BA 网络度分布的幂指数正相关; 优化社区个数有利于提高蜂拥收敛速度.

**关键词:** 复杂网络; 快速蜂拥控制; 社区划分; 收敛特性

**中图分类号:** TP273

**文献标志码:** A

## Fast flocking algorithm of multi-agent network via community division

CHEN Shi-ming<sup>†</sup>, QIU Yun, LIU Jun-kai, NIE Sen

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Aiming at the effect of community characteristics of complex networks on collaborative control of multi-agent systems, a fast flocking control algorithm based on community division is proposed for the multi-agent system with the characteristic of the Erdos-renyi(ER) random network and Barabasi-albert(BA) scale-free network, which considers the relative concentration characteristics of agents in every community and incorporate attractive force of virtual leader between different communities, so the "block" phenomenon in evolution process because of communication constraint can be avoided and algebraic connectivity of the system is improved. Simulation results show that the convergence characteristics of the flocking behavior of the multi-agent system with complex networks are affected by the average degree of ER and BA networks and the power exponent of the degree of BA network distribution, and optimizing the number of partition communities is beneficial to improve the convergence speed.

**Keywords:** complex network; fast flocking control; community division; convergence characteristics

## 0 引言

近年来,随着复杂网络研究的不断发展,人们发现计算机网络、交通网络和电力网络等大多具有明显的社区特性,促使众多学者针对社区检测问题展开相关研究,并取得了诸多成果<sup>[1-4]</sup>.

由于实际智能体受通信能力约束,通信网络拓扑易出现时变切换现象,有些情况下可能会导致整个系统通信拓扑不连通,迫使人们开始从网络拓扑性质出发,研究复杂网络结构对大规模多智能体系统协同控制的影响. 周漩等<sup>[5]</sup>提出了一种基于网络效率和平均连接度的网络连接优化控制算法. Zhou 等<sup>[6]</sup>利用避碰原则研究了多个智能体的蜂拥和协调控制问

题,通过添加新路径和设计新的人工势函数避免网络分裂. 人们从提高网络拓扑连通性出发,研究了优化的牵制蜂拥控制策略,并将社区划分思想引入蜂拥控制律中<sup>[7-8]</sup>. 本文将进一步以 ER(Erdos-renyi) 网络和 BA(Barabasi-albert) 网络为对象,研究融入社区划分的快速蜂拥控制算法,通过数值仿真给出网络特性与系统蜂拥控制速度的关联结果.

## 1 模型和问题描述

在数学上可以用图论方法对多智能体系统进行描述和研究. 具体而言,一个多智能体系统可表示为图  $G = (V, E, A)$ . 其中:  $V = \{1, 2, \dots, N\}$  表示个

收稿日期: 2017-04-20; 修回日期: 2017-08-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(11662002); 江西省创新驱动“5511”优势科技创新团队项目(20165BCB19011); 江西省自然科学基金项目(20171BAB202029); 江西省重点研发计划项目(20161BBE53008).

责任编委: 郭雷.

作者简介: 陈世明(1977—), 男, 教授, 博士, 从事复杂网络理论、多智能体系统、优化算法等研究; 邱昀(1990—), 男, 硕士生, 从事多智能体协调控制的研究.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: c1977318@hotmail.com

体的集合;  $E = \{e_{ij} = (i, j) : i, j \in V\}$  描述智能体之间的链接关系; 邻接矩阵由  $A = (a_{ij})_{N \times N}$  描述, 若  $(i, j) \in E$ , 则  $a_{ij} = 1$ , 否则  $(i, j) \notin E, a_{ij} = 0$ .  $N_i(t) = \{j \in V : (i, j) \in E\}$  表示个体  $i$  的邻居集合,  $L = D - A$ , 其最小非零特征值对多智能体系统的收敛速度有一定影响,  $D$  是度矩阵.

考虑  $N$  个智能体, 智能体  $i$  的动力学模型为

$$\begin{cases} \dot{q}_i = p_i, \\ \dot{p}_i = u_i, \end{cases} \quad i \in V. \quad (1)$$

其中:  $q_i, p_i \in R^{(2)}$  分别为智能体  $i$  的位置和速度,  $u_i \in R^{(2)}$  为控制输入. 虚拟领导者的动力学模型为

$$\begin{cases} \dot{q}_\gamma = p_\gamma, \\ \dot{p}_\gamma = 0, \end{cases} \quad (2)$$

其中  $q_\gamma, p_\gamma \in R^{(2)}$  分别为虚拟领导者的位置和速度.

## 2 基于社区划分的快速蜂拥控制协议

在 Olfati-Saber<sup>[9]</sup> 提出的蜂拥控制算法的基础上, 结合 FN 社区划分算法<sup>[10]</sup> 设计智能体之间的交互规则, 本文提出的蜂拥控制算法如下:

$$u_i = - \sum_{j \in C_i} a_{ij} (p_i - p_j) - \sum_{j \in C_i} \nabla_{q_i} \psi_\alpha(\|q_i - q_j\|_\sigma) - k_i [c_1 (q_i - q_\gamma) + c_2 (p_i - p_\gamma)], \quad (3)$$

其中  $C_i$  表示智能体  $i$  所在的社区.

定义如下的能量函数:

$$H(q, p) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (p_i - p_\gamma)^T (p_i - p_\gamma) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in C_i} \psi_\alpha(\|q_i - q_j\|_\sigma) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j \notin C_i} \psi_\alpha(\|q_i - q_j\|_\sigma) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N k_i c_1 (q_i - q_\gamma)^T (q_i - q_\gamma). \quad (4)$$

其中: 等式右边第1项表示所有智能体与虚拟领导者之间的相对动能; 第2项表示社团内智能体之间的势能; 第3项表示与其他社团内智能体之间的势能; 第4项表示所有智能体与虚拟领导者之间的相对势能.

**定理1** 考虑如式(1)和(2)所描述的二阶系统, 在每个社区中随机选择一个个体作为可获知虚拟领导者信息的牵制节点. 假设所有个体的初始速度不同, 整个系统的初始能量  $H_0$  有界, 在控制协议(4)的作用下系统渐近稳定, 所有个体的速度会渐近收敛至虚拟领导者的速度, 且任意两个个体在演化过程中都不会发生碰撞.

**证明** 在文献[8]的基础上, 对 Lyapunov 函数求导并化简, 可得

$$\begin{aligned} \dot{H} = & - \sum_{i=1}^N \tilde{p}_i^T \left[ \sum_{j=1}^N l_{ij} + k_i c_2 \right] \tilde{p}_i = \\ & - \tilde{p}^T [(L + c_2 K) \otimes I_2] \tilde{p}. \end{aligned}$$

其中:  $\tilde{p} = \text{col}(\tilde{p}_1, \tilde{p}_2, \dots, \tilde{p}_N)$ ,  $K = \text{diag}(k_1, k_2, \dots, k_N)$ .  $L$  和  $K$  皆为正半定的, 则  $L + c_2 K$  正半定, 所以  $\dot{H} \leq 0$ . 对于任意的  $t \geq 0$ , 都有  $H(t) \leq H_0$ , 则存在不变集  $\Omega = \{(\tilde{p}^T, \tilde{q}^T)^T \in R^{2 \times 2N} : H \leq H_0\}$ , 说明系统渐近稳定. 由 LaSalle 不变集原理可知, 存在最大不变集  $\Omega_1 = \{(\tilde{p}^T, \tilde{q}^T)^T \in R^{2 \times 2N} : \dot{H} = 0\}$ . 由  $\dot{H} = 0$  可得  $\tilde{p} = \text{col}(\tilde{p}_1, \tilde{p}_2, \dots, \tilde{p}_N) \equiv \text{col}(0, 0, \dots, 0)$ , 因此,  $\tilde{p}_1 = \tilde{p}_2 = \dots = \tilde{p}_N, p_1 = p_2 = \dots = p_N$ , 表明个体速度渐近收敛到虚拟领导者的速度  $p_\gamma$ . 若存在某时刻  $t \geq 0$  时至少有两个个体发生碰撞, 则表明在  $t$  时刻系统的总能量大于  $H_0$ , 与  $H(t) \leq H_0$  矛盾. 所以系统在演化过程中不会发生个体间的碰撞.  $\square$

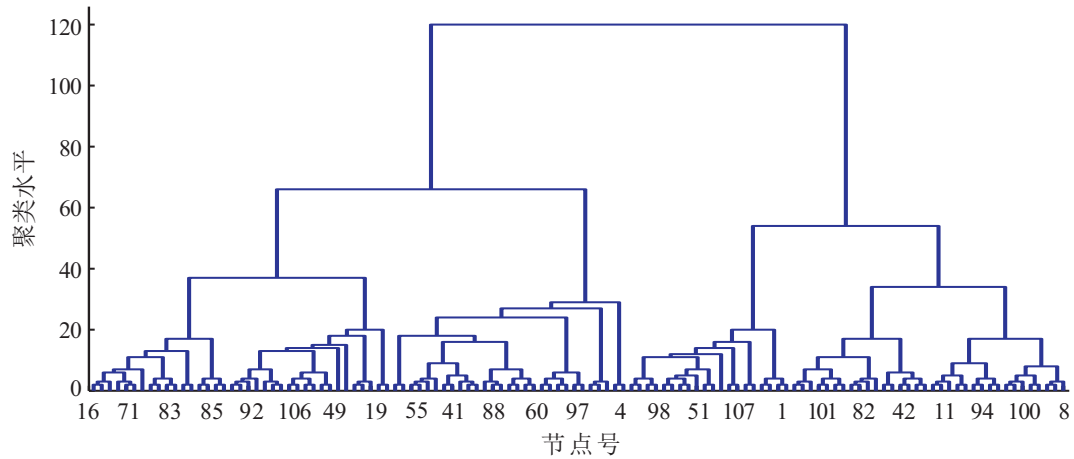
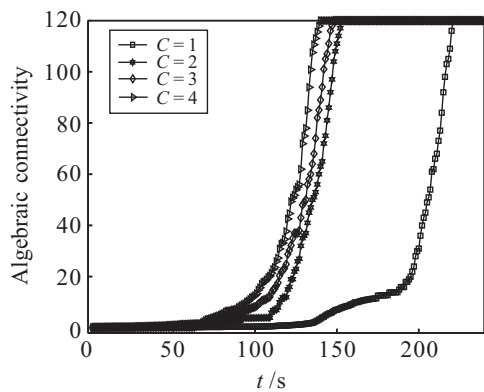
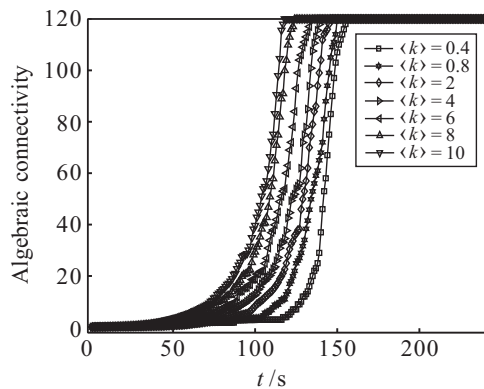
## 3 仿真分析

基于 Matlab 仿真平台对所提出算法进行验证. 假定网络中包含  $N = 120$  个智能体, 针对具有 ER 和 BA 两类典型的复杂网络性质的多智能体系统, 个体的初始位置、速度和方向角分别在  $[0, 240] \times [0, 120]$ 、 $[1, 2] \times [1, 2]$  和  $(-\pi, \pi)$  范围内随机生成. 虚拟领导者的位置  $q_\gamma(0) = [120, 60]$ , 速度  $p_\gamma(0) = 0.25 \times [1, \sqrt{3}]$ ; 期望距离  $d = 7$ , 感知半径  $r = 1.2d$ ;  $a = 5, b = 20$ , 反馈系数  $c_1 = 0.6, c_2 = 0.4$ ;  $\varepsilon = 0.1, h = 0.9$ .

首先分析 ER 随机网络 and BA 无标度网络的社区特性. 以平均度  $\langle k \rangle = 4$  的 ER 网络为例, 通过 FN 算法得到相应的树状结构, 如图1所示, 可以看出该网络结构具有明显的社区特性. 同样, 选择  $m = 6, m_0 = 10$  的 BA 网络. 其中:  $m_0$  为开始节点个数,  $m$  为循环一次增边个数. 同样可得类似明显的社区结构.

然后, 分析社区数目和网络平均度对蜂拥行为收敛速度的影响. 具有 ER 网络性质的多智能体系统在蜂拥控制算法(4)的作用下, 连通度仿真结果如图2所示. 可以发现, 系统的代数连通度在社区个数  $C = 4 (Q_4 > Q_3 > Q_1)$  时会较其他划分个数时更快达到极大值, 这就意味着蜂拥收敛速度更快, 并且相对于未划分时的蜂拥收敛速度可以提高 30% 以上.

在社区划分个数  $C = 4$  时, 具有 ER 网络性质的多智能体系统在不同度分布下的代数连通度曲线如图3所示.

图1  $\langle k \rangle = 4$ 下的ER网络的树状结构图2  $\langle k \rangle = 4$ 且不同社区个数时的代数连通度图3  $C = 4$ 且ER网络在不同度分布时的代数连通度曲线

分以下两种情况对BA网络中平均度对多智能体蜂拥行为收敛速度的影响展开分析: 1)  $m_0$  确定,  $m$  递增, 平均度  $\langle k \rangle$  递增; 2)  $m$  确定,  $m_0$  递增, 平均度  $\langle k \rangle$  递减.  $C = 4$  时, 两种情况下所得的代数连通度曲线分别如图4(a)和图4(b)所示. 表明两种网络的平均度与蜂拥行为的收敛速度正相关, 并且相对于具有同等初始分布未划分时, 两种网络的蜂拥收敛速度均有明显提升.

最后, 当  $\langle k \rangle = 6$  时BA网络在不同幂指数下的连通度曲线如图5所示. 显然, 蜂拥行为的收敛速度与幂指数  $\gamma$  正相关.

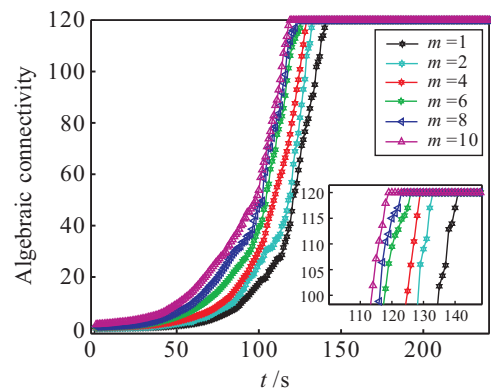
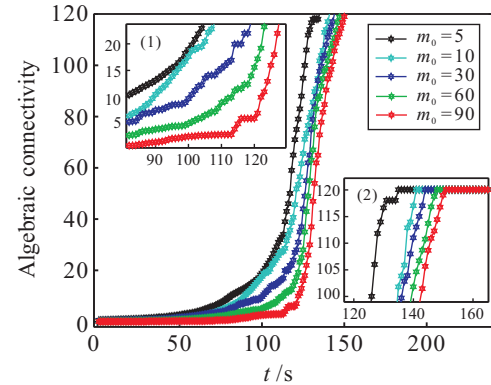
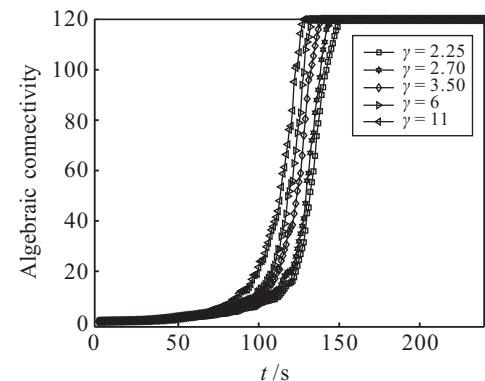
(a) 增加不同的边  $m$ (b) 不同的初始节点数  $m_0$ 

图4 划分4个社区时BA网络的代数连通度曲线

图5  $C = 2, \langle k \rangle = 6$ , BA网络在不同幂指数下的代数连通度曲线

## 4 结 论

以具有ER网络和BA网络性质的多智能体系统为研究对象,结合社区划分算法,本文提出了适用于该类性质的大规模多智能体系统的快速蜂拥算法.通过数值仿真发现,ER和BA两种网络的平均度、BA网络的幂指数和划分社区的模块度值与蜂拥行为的收敛速度正相关.

### 参考文献(References)

- [1] Newman M E J, BGirvan M. Finding and evaluating community structure in networks[J]. Physical Review E, 2004, 69(2): 026113-1-16.
- [2] Shang R H, Bai J, Jiao L C, et al. Community detection based on modularity and an improved genetic algorithm[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2013, 392(5): 1215-1231.
- [3] Atzmueller M, Doerfel S, Mitzlaff F. Description-oriented community detection using exhaustive subgroup discovery[J]. Information Sciences, 2016, 329(C): 965-984.
- [4] Jia H C, Ratnavelu K. Detecting community structure by using a constrained label propagation algorithm[J]. Plos One, 2016, 11(5): e0155320-1-21.
- [5] 周璇, 杨帆, 张凤鸣, 等. 复杂网络系统拓扑连接优化控制方法[J]. 物理学报, 2013, 62(15): 150201-1-7.  
(Zhou X, Yang F, Zhang F M, et al. Control method for complex network topological connection optimization[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(15): 150201-1-7.)
- [6] Zhou H, Zhou W, Zeng W. Flocking control of multiple mobile agents with the rules of avoiding collision[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015(8): 1-9.
- [7] 陈世明, 李慧敏, 谢竞, 等. 基于局部估计的功率驱动多智能体网络牵制蜂拥控制算法[J]. 控制与决策, 2013, 28(8): 1190-1194.  
(Chen S M, Li H M, Xie J, et al. Pinning flocking control algorithm for power-driven multi-agent networks based on local estimation[J]. Control and Decision, 2013, 28(8): 1190-1194.)
- [8] 陈世明, 化俞新, 祝振敏, 等. 邻域交互结构优化的多智能体快速蜂拥控制算法[J]. 自动化学报, 2015, 41(12): 2092-2099.  
(Chen S M, Hua Y X, Zhu Z M, et al. Fast flocking algorithm for multi-agent systems by optimizing local interactive topology[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(12): 2092-2099.)
- [9] Olfati-Saber R. Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2006, 51(3): 401-420.
- [10] Clauset A, Newman M E J, Moore C. Finding community structure in very large networks[J]. Physical Review E, 2004, 70(6): 066111-1-6.

(责任编辑: 李君玲)

## 张嗣瀛优秀青年论文奖、《控制与决策》2017年度优秀论文奖以及 2018年度张嗣瀛教育基金优秀博士生奖颁奖仪式在沈举行

**本刊讯** 第30届中国控制与决策会议(2018 CCDC)于2018年6月9日~11日在沈阳玛丽蒂姆酒店召开. 在6月10日举行的第30届中国控制与决策会议颁奖仪式上, 共颁发了3个奖项: 张嗣瀛优秀青年论文奖、《控制与决策》2017年度优秀论文奖、2018年度张嗣瀛教育基金优秀博士生奖.

首先颁发的是“张嗣瀛优秀青年论文奖”. 国际程序委员会主席、美国纽约大学的姜钟平教授介绍评奖过程, 并宣布获奖者名单, 有5位学者获得该项提名. 最终, 香港城市大学的吕茂斌和同济大学的马志勋凭借其高质量论文和出色的报告共同赢得此奖项. 张嗣瀛院士向获奖者和提名奖获

得者颁发了证书和奖金.

第2项颁发的是“《控制与决策》2017年度优秀论文奖”. 经过评奖委员会评审, 有4篇文章获奖, 作者分别为: 北京航空航天大学的邵星灵教授, 中国科学技术大学的廖飞博士, 清华大学的王凌教授, 中南大学的许民利教授. 期刊主编东北大学王福利教授为获奖者颁发证书和奖金.

第3项颁发的是“2018年度张嗣瀛教育基金优秀博士生奖学金”. 东北大学信息科学与工程学院的4位博士生以其突出的研究成果获奖, 张嗣瀛院士为获奖者颁奖, 并鼓励学生要为祖国科研事业不懈努力.