

群体动力学与协调控制研究中的若干问题

楚天广, 杨正东, 邓魁英, 王 龙, 谢广明

(北京大学工学院 机器感知与智能教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 群体行为是自然界和社会中常见的现象, 探讨群体合作行为的机制和工程应用具有重要的意义. 本文从系统与控制的角度讨论当前群体动力学与协调控制研究中的一些基本问题, 评述文献中常见的群体系统模型, 分析群体系统的动态行为和系统关联拓扑结构之间的关系, 时变拓扑与连通性、通信时滞、以及外部作用的影响等. 给出在非对称耦合、时滞等情况下, 系统的聚集—振荡复杂行为的数值仿真结果.

关键词: 群体行为; 协调控制; 关联拓扑; 通信时滞; 可控性; 收敛性; 集体振荡

中图分类号: TP13; TP18; O23; N941 **文献标识码:** A

Problems in swarm dynamics and coordinated control

CHU Tian-guang, YANG Zheng-dong, DENG Kui-ying, WANG Long, XIE Guang-ming

(College of Engineering, Key Laboratory of Machine Perception(Ministry of Education), Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Swarming behavior is ubiquitous in nature and society. It is of both theoretical and practical importance to investigate the underlying principles and mechanisms of coordination and cooperation emerging in swarms. This paper discusses some basic issues in swarm dynamics and coordinated control from the perspective of systems and control. Specifically, we review some typical swarm models proposed in the literature, and discuss the roles and effects of connection topology on swarm dynamics, as well as the effects of variable topologies, communication delays, and exogenous influences, etc. We also give some numerical simulation results to demonstrate the complex aggregation-oscillation behavior of swarms in the cases of asymmetric coupling and delayed communication.

Key words: swarming behavior; coordinated control; connection topology; communication delay; controllability; convergence; collective oscillation

1 引言(Introduction)

群体行为(swarming behavior)是自然界中常见的现象, 典型的例子如编队迁徙的鸟群、结队巡游的鱼群、协同工作的蚁群、聚集而生的细菌群落等等不一而足. 这种集体合作能够使生物群体在觅食生存、逃避天敌等方面获得单独个体所难以实现的优势, 完成复杂的、有一定目的或功能性的活动. 在人类社会中群体现象也随处可见, 如道路上的交通流和社会时尚潮流等等. 这些现象的共同特征是一定数量的自主个体通过相互合作和自组织, 在集体层面上呈现出有序的协同运动和行. 这种行为可以使群体系统实现一定的复杂功能, 表现出确定的集体“意向”或“目的”. 特别地, 当群体系统由结构和功能都相对简单的个体组成时(如蚁群), 这种自发形成的群体行为能使系统整体呈现出一定程度的

“群体智能”, 完成复杂的运动任务^[1,2].

群体系统的自组织动力学和协调控制是当前国际上的一个热点问题^[3~58]. 探讨群体合作行为的机制和规律对于理解自然和社会中的复杂现象具有重要的意义, 同时也能为不断出现和发展的新技术、新应用, 如多移动机器人系统、无人驾驶机/车群系统、分布式传感器阵列等复杂系统的智能自主协调控制等, 提供必要的理论基础. 群体系统的研究主要包括两个方面: 群体动力学分析和群体协调控制. 近年来, 从系统与控制的角度对群体系统的研究工作迅速增加, 出现了许多结果. 本文根据有关研究现状, 讨论群体系统协调控制研究中的一些基本问题和方法, 并给出相关的结果.

首先讨论群体系统动力学与协调控制中的基本问题和特点, 然后介绍目前文献中提出的几个重要

的群体系统动态模型和相关的主要结果. 关于群体动力学分析和协调控制, 本文着重考虑系统关联拓扑结构的作用和影响, 以及通信时滞、外部因素对群体动力学的影响. 最后给出本文的结论和对于进一步工作的展望.

需要说明, 群体系统的协调与控制是一个研究范围广阔、内容丰富的综合性课题, 近年来研究成果大量涌现. 本文无意给出这一正在迅速发展之中的研究领域的全面综述, 文末所列参考文献也仅限于与文中讨论内容直接相关的部分工作, 其它方面的研究进展请参见近期文献.

2 基本问题和特点(Basic problems)

从系统与控制理论的角度来看, 群体系统动力学和控制问题具有许多新的特点, 富于挑战性.

首先, 群体系统在结构上具有“个体动态+ 通信拓扑”的特点. 组成群体系统的每个个体都具有一定的自主能力, 包括一定程度的自我运动控制、局部范围内的信息传感、处理和通信能力等(如配置传感器和通信装置的移动机器人). 系统中个体之间通过局部信息交换相互作用, 调整自身动态行为; 系统整体动力学由每个个体的动态和个体间的通信拓扑所决定. 这一特点使通信拓扑结构在决定群体系统动态行为方面起着极其重要的作用. 同时, 由于个体的自主运动和局部信息传感能力, 当个体之间进入或离开彼此的传感区域和通信范围时, 它们之间的关联特性会发生改变, 从而导致整个系统的通信拓扑结构随时间不断变化. 这些都与以往系统结构固定不变的情况不同, 极大地增加了问题的难度, 需要发展新的理论和方法.

其次, 群体系统的动力学是由简单的个体行为规则和局部信息产生的. 由于群体系统通常包含一定数量的个体, 难以设想通过给每个个体设定具体的和全局的运动规划而实现期望的群体行为. 从自然和社会中的种种群体现象来看, 群体行为完全可以在简单个体行为的基础上, 通过系统的自组织而产生. 例如车流的形成和维持过程中, 每个司机通常只是也只能根据其前后左右的相邻车辆的运动状态(相对距离和速度)来调整自己的运动状态. 基于共同的加速或减速规则, 可以形成车流在整体上的有序运动. 在这类群体现象中, 每个个体都遵循相同或相似的简单运动规则(如加速或减速). 这些规则通常只规定个体如何根据所获得的局部信息作出相应的基本反应, 而与群体运动行为或目标一般并无直接的关系. 群体行为是所有个体通过关联合作而涌现出的自组织运动, 不同的关联方式会产生不同

的群体行为. 如何分析和设计个体行为规则和关联耦合结构, 以实现预期的群体运动是控制理论与应用中的一个新的课题.

另外, 从控制目标来看, 群体系统的协调控制的基本任务是实现期望的系统构形和整体运动方式, 如以确定的队形按照预期的速度和方向前进. 而完成这一任务的手段, 如上所述, 只能通过个体之间的相互作用规则, 以及必要和可行的外部干预(如赋予某些特定个体以特殊的规则和信息, 犹如leader-following方式)等等. 因此, 控制理论中的一些重要概念, 如稳定性、能控性等, 需要发展以充分反映这些新的特点和要求. 群体系统的稳定性不仅要刻画系统保持预期运动方式的能力, 同时还要能够体现保持特定系统构形的能力. 同样, 能控性应该同时考虑系统的期望构形及其运动方式. 值得注意的是在一般情况下, 确定系统稳态构形的个体耦合方式往往是非线性的. 因此, 无论是稳定性问题还是能控性问题的研究, 都有其固有的困难.

3 群体动力学模型(Swarm dynamics models)

迄今为止人们在群体行为的数值模拟研究方面已经做了大量的工作, 如人工生命、Boid模型、Swarm平台等. 另外如统计物理中多粒子群的聚集和相变、耦合振子系统的同步等, 也属于同类的问题. 早期的工作集中于建立简单的唯象规则并通过大规模的数值计算和仿真来模拟实现自然界中常见的群体现象, 结果充分表明简单的个体规则可以产生各种各样的复杂行为和现象. 这些研究加深了人们对群体系统的复杂行为和协调机制的认识和理解, 也为进一步的理论分析和应用提供了重要的基础. 下面简要讨论当前控制研究领域主要关心的几个模型.

3.1 Boid模型(Boid model)

1987年Reynolds报导了一个用计算机程序实现的Boid模型^[6], 可以模拟实现自然界中群鸟的集体运动行为. 模型基于3条简单的规则: 碰撞规避(collision avoidance), 即相邻个体之间避免碰撞; 速度匹配(velocity matching), 即与邻近个体的速度保持一致; 结群靠拢(flock centering), 即在空间上向邻近个体靠拢. 这些规则描述了自然界中大多数群体运动的基本特征, 也可以简单地称之为“分离、调整和聚集(separation, alignment and cohesion)”规则. 它们使大量的个体能够在没有集中指挥、缺乏全局信息的情况下, 仅仅通过个体之间的局部协调即可形成一定的空间队形并达到一致的运动速度和方

向. 由于Boid模型是以计算机程序实现的, 对群体系统的行为只能通过具体的数值模拟进行直观的了解.

3.2 粒子群模型(Particle swarm model)

在群体行为建模方面的一个重要工作是Vicsek等人在文献[7]中提出的一个多粒子群模型, 其中每个粒子都以单位速度运动, 方向取邻近粒子运动方向的平均值. 他们的数值仿真显示粒子群最终能取得一致的运动方向, 产生这一群体行为的原因是粒子间的局部作用引起粒子群运动方向的对称性破缺, 从而导致粒子群系统的运动发生相变. 之后, Toner和Tu根据流体力学和磁性理论, 建立了类似Navier-Stokes方程的群体系统连续(统)模型^[8]. 他们利用这一模型研究了群体运动的产生, 以及噪声或扰动在群体运动过程中的消弭机制. 最近, Jadbabaie等人^[9]利用切换控制系统和随机矩阵理论对Vicsek等人的模型进行了解析分析. 这方面的进一步讨论见文献[10, 11]等.

Vicsek等人的模型非常简单, 只考虑了Reynolds提出的速度匹配规则. 由于没有包含分离和聚集规则, 在理论上Vicsek的模型无法保证个体在运动中避免相互碰撞, 以及最终形成有限空间尺度的群簇. 实际上, 从Vicsek等人的数值仿真结果中可以看到不同粒子的位置重合现象和全体粒子的空间分布无界的趋势. 在许多应用问题中, 如多机器人的协作, 避免碰撞和保持运动范围都是基本的、不可忽视的要求, 因此在建模时必须考虑分离和聚集规则. 这些因素可以通过建立个体之间的吸引排斥相互作用规则实现.

3.3 吸引-排斥相互作用模型(Models based on attractive-repulsive rules)

“吸引-排斥”原则是指个体之间的相互作用具有长程吸引和短程排斥的性质. 这一相互作用特性在物理系统、生物系统和社会系统中都有普遍的意义, 具有一般性. 前述Boid模型中的分离规则可以用短程排斥性刻画, 而调整和聚集则能够统一由长程吸引来实现. 更为重要的是对于这类吸引排斥作用的建模和分析, 可以借鉴和利用物理、生物系统研究中的许多已有成果和方法.

长期以来, 许多生物学家致力于自然界中的生物群体协作行为的理解和建模工作. 例如, 在早期的文献[5]中提出了一种简单的吸引排斥数学模型, 研究鱼群的集体行为. 近年来, 在自主车辆和机器人研究领域又进一步提出和发展了“人工势场”方法. 这一方法受物体运动物理规律的启发, 通过在个体的

运动空间中人为地设置“势场”, 使个体从高“势能”向低“势能”运动. 从而完成避开危险区域, 走向运动目标的任务. 在人工势场中的群体系统动态方程可以表示为

$$\dot{\mathbf{x}}_i = -\sum w_{ij} [\nabla V_a(\|\mathbf{r}_{ij}\|) - \nabla V_r(\|\mathbf{r}_{ij}\|)]. \quad (1)$$

其中 $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^n$ 表示个体*i*的状态向量, $i = 1, \dots, N$; $w_{ij} \geq 0$ 表示个体*i, j*之间的作用强度或权值; $V_a, V_r: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ 是个体之间相互作用势函数, 规定个体之间的吸引排斥作用; ∇ 是梯度算符, $\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j$. 有关研究参见文献[13~18]等.

在模型(1)中, 权系数 $w_{ij} = 0$ 表示个体*i, j*之间没有相互作用, 通常令 $w_{ii} = 0$. 如果 $w_{ij} = w_{ji}$, 则称个体*i, j*之间的相互作用是对称的. 矩阵 $W = [w_{ij}]$ 描述了群体系统的关联/通信拓扑结构.

模型(1)只考虑了个体之间的相互作用, 如果进一步考虑个体自身动力学, 可将模型(1)修正为:

$$\dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{f}_i(\mathbf{x}_i) - \sum w_{ij} [\nabla V_a(\|\mathbf{r}_{ij}\|) - \nabla V_r(\|\mathbf{r}_{ij}\|)].$$

其中 $\mathbf{f}_i(\mathbf{x}_i)$ 描述个体*i*在与其它个体解耦情况下的动力学.

为了便于解析分析, 文献中通常采用光滑函数描述个体之间的相互作用, 特别是排斥力(如文献[13]等). 这种情况下当个体之间的距离减小时, 排斥力取有界值, 因此无法确保避免个体间发生碰撞. 文献[17]采用一种距离反比函数描述排斥力, 使得当个体之间的距离不断减小时排斥力无限增大, 从而保证避免个体碰撞.

3.4 含外部作用的模型(Models with exogenous effects)

除了个体之间的相互作用外, 群体系统的运动往往还会受到环境和外部输入的影响. 一般而言, 个体间的耦合只能确定个体在群体中的相对位置或系统的整体构形. 在没有外部干预的情况下, 群体系统的运动仅由初始条件决定, 通常是未知的. 如果希望系统以预期的方式运动, 通常需要引入外部输入作用. 这时, 模型(1)可以修改为

$$\dot{\mathbf{x}}_i = -\sum w_{ij} [\nabla V_a(\|\mathbf{r}_{ij}\|) - \nabla V_r(\|\mathbf{r}_{ij}\|)] + w_{i0} \mathbf{u}_i.$$

其中: \mathbf{u}_i 表示外部作用; 若个体*i*受外部作用影响则取 $w_{i0} = 1$, 否则 $w_{i0} = 0$.

上面方程中的 \mathbf{u}_i 可以有不同的实现方式, 如传统的控制输入, 也可以是“领航者(leader-follower)”模型中的“leader”. 对于个体数量多, 或者控制任务复杂的系统, 采用“multi-leader”方式可能更为

有效. 有关研究参见文献[9~29]等.

3.5 网络化系统与图论描述(Networked systems and graph description)

群体系统是由许多个体通过某种相互作用形成的一类网络化系统, 在数学上可以利用图论方法进行描述和研究. 具体地说, 一个群体系统可以表示为图 $G = (V, E, A)$, 其中 V 是(非空)节点集合, 由所有个体组成; E 是边的集合, 描述任意两个节点之间的连接关系, 即个体的相互作用关系; A 称为邻接矩阵, 描述图中所有节点之间的连接关系和方式, 刻画群体系统的关联拓扑结构(耦合关系和强度). 按照个体相互作用方式的不同, 群体系统对应的图可分为有向图和无向图两类. 在有向图中个体之间的作用具有方向性, 如果第 i 个节点有信息作用于第 j 个节点, 则第 i 个节点有一条边指向第 j 个节点. 在无向图中个体之间的作用是相互的, 节点间的边没有方向. 一般地, 描述 leader-following 型群体系统的图是有向的, 而描述各向同性群体系统的图是无向的. 在研究图上的群体动力学时, 描述图拓扑结构的拉普拉斯矩阵及其代数特征值性质是有力的分析工具, 其它如连通图、生成树等概念和性质在群体动力学中也具有重要的应用(参见文献[35~40]等).

3.6 非平均更新规则模型(Modeling with non-averaging update rules)

目前文献所见到的群体动力学模型, 多数采用个体邻居信息的平均来更新个体动态^[7,9]. 这种基于平均的规则在一定程度上能够定性刻画自然界中的一些群集现象, 但也存在一定的局限性. 首先, 绝大多数低级生物不一定拥有足够的能力对所获得的所有信息进行平均, 因为即使对于人类来说要做到这一点有时也并非易事. 其次, 在一些情况下对信息进行平均是没有意义的. 譬如一只蚂蚁对来自同伴之间的不同觅食方向信息是无法用平均规则处理的. 此外同样重要的是, 平均规则是一种确定性规则, 它所确定的群体动力学的行为(在任何合理的发展时间长度上)在理论上是完全可以预测的. 这一点与自然界中大多数群体动力学演化过程中所呈现的多样性和不可预测性相悖. 这些局限性表明在群体动态行为的建模方面, 依然还有很多基础性的问题有待研究解决. 尤其是需要产生新的思路和概念, 以突破目前基于平均规则的模型框架, 全面合理地描述群体动力学演化过程. 基于上述认识, 提出了一种不采用平均更新规则的群体动力学模型, 能够较好地呈现群体动态演化过程的多样性和群体一致性.

目前这方面的研究工作还在进行中.

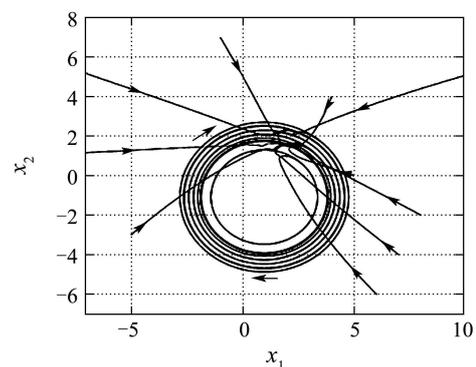
4 群体动力学分析(Swarm dynamics analysis)

群体系统的动力学是由个体动力学和系统关联结构共同决定的. 同时, 个体之间的通信时滞、外部作用等也都会影响群体系统的动态行为.

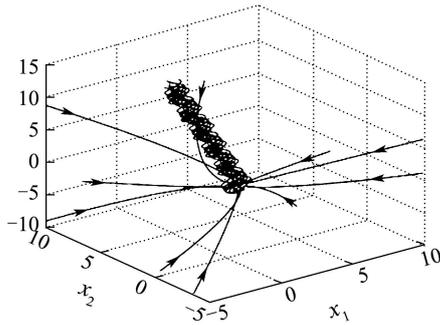
4.1 拓扑结构的作用和影响(Roles and effects of coupling topology)

拓扑结构对于群体动力学具有整体性的影响, 这首先表现在当拓扑结构确定后, 许多不同的群体系统会表现出相同或类似的整体动态行为, 如群体收敛、集体振荡等, 而这些整体行为并不依赖于群体中的个体动力学的具体形式(当然, 个体的动力学确定了它们在群体中的相对运动). 以系统(1)为例, 研究结果表明在对称相互作用和无通信时滞的情况下, 群体系统存在全局的能量/Lyapunov函数, 群体运动呈现类似梯度系统的行为, 具有全局收敛动力学. 这一性质与个体之间的相互作用势函数 V_a 和 V_b 的具体形式无关, 是由关联拓扑决定的系统整体特性. 目前文献中有关群体系统的聚集、收敛、同步一致等有序的集体行为的理论结果, 大多数都是以这类梯度型动力学为基础得到的.

从实际情况来看, 对称拓扑结构的假设无论对自然系统或人工系统都过于理想. 然而, 在非对称相互作用下, 系统通常不存在全局能量/Lyapunov函数, 解析研究的难度很大. 从目前得到的数值仿真结果可以发现, 非对称情况下群体系统可以呈现出非常复杂的动力学行为, 涉及从聚集到发散、从分岔到混沌等多种运动现象. 在许多数值仿真结果中, 都可以观察到一类稳态振荡现象, 与自然界中发现的鱼群的回旋运动和某些菌落的分布形状等极其相似, 参见图1. 这些研究有助于人们理解这些自然界的自组织现象产生的机制^[18,51].



(a) 2D情形



(b) 3D情形

图1 群体系统轨迹

Fig. 1 Swarm trajectories

在工程应用中,有时需要设计群体系统的拓扑结构使之形成并保持某种队形.研究发现对于一些常见的规则队形,如单/多排直线、环形、矩阵形等,可以利用特殊结构的耦合关联矩阵实现.并且这种方法还能使个体按照具体的顺序关系排列^[52].

拓扑结构对于群体系统的许多其它性质,如可控性等,也起着重要的作用.文献^[52]中讨论了一类具有特殊拓扑结构的群体系统的情况.进一步的研究结果表明,在一个“领航者(leader-follower)”系统中,如果“leader”以相同的信号作用于每个“follower”,则无论“follower”之间具有何种关联拓扑结构,系统整体总是不可控的.由此可知,在一个群体系统中如果个体之间的相互作用完全相同,则任何个体都无法作为“leader”使群体完全实现运动目标.一般而言,群体系统的可控性会随着个体之间连通度的提高而减弱.原因在于个体之间耦合程度的加强可能会削弱控制输入的影响,从而降低群体的可控性.参见文献^[53, 54].

4.2 时变拓扑与动态图(Variable topology and dynamic graph)

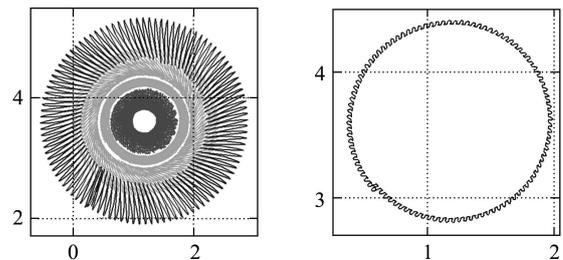
上述结果主要是考虑固定拓扑结构的情况,关于拓扑结构随时间变化的群体系统的研究相对困难,主要是缺乏合适的工具.目前文献中讨论较多的是切换拓扑结构下的一致性问题的,这实际上是一类特殊的同步性问题^[33~47].对于具有固定拓扑的群体系统,其对应图的连通性是系统实现一致性的重要条件.在时变拓扑结构系统中,这一条件被进一步推广为联合连通性(joint connectivity),即时变拓扑结构在时间历程上的并构成连通图^[9].同样,图的生成树的概念也有类似的推广和应用,例如文献^[35]和文献^[40]等.

时变拓扑对应的图是随时间变化的,是一个动态图.从物理的角度看,若将图的顶点视为空间坐标,那么联合连通性实际上是动态图在“时-空”上的连通性.对于动态图的研究和了解,将为具有时变拓扑结构的群体动力学分析提供有力的工具.

具有时变拓扑结构的群体系统的可控性等也有新的特点.譬如,在这种情况下为了使群体系统可控,并不要求每个个体是可控的^[53~56].这些特点为设计实际的群体协作系统提供了便利.

4.3 通信的影响(Effects of communication)

在群体系统中,个体之间由通信网络相互联系.通信过程中的量化、数据分包异步传输、数据丢失、以及传输时滞等因素,都会影响系统的动态行为^[57].以时滞为例,它的出现会增加系统的维度,使动态复杂.实际上,在两个原本具有完全对称相互作用的个体中间,如果出现不同的单向通信时滞,将可能导致状态相关的不对称性,进而影响系统行为.含通信时滞的群体系统模型一般由非线性时滞微分/差分方程描述,原则上可以利用Lyapunov方法分析,但实际应用时存在很多具体困难.数值研究结果显示,时滞群体系统的动态行为丰富而复杂.图2是一类“聚集-振荡”现象的仿真结果,其中图(a)是群体系统在过渡期之后的稳态振荡(可视为系统的吸引子),图(b)是相应的群体中心运动.仿真显示个体会聚集成簇并向群体的瞬时中心作往复运动、同时瞬时中心以较低的频率旋转,系统的长期行为由不同频率的运动合成.算例中取时滞参数为0.65 s,计算得到群体中心运动由频率为 5.52×10^{-3} 和 5.68×10^{-1} 的振动合成.在数值仿真中可以发现许多类似的多频振荡现象^[51].



(a) 个体轨迹

(b) 中心轨迹

图2 时滞群体系统

Fig. 2 Swarm with time delay

4.4 外部作用的影响(Effects of exogenous actions)

控制输入、环境作用、特殊的个体(如leader(s))等,在干预和调节群体系统的整体运动方面起着重

要和不可缺少的作用. 如前所述, 这些因素可以统一视为外部作用, 主要效果是引导系统实现一定的整体运动目标. 文献[20~30]中讨论了通过leader(s) 控制群体运动速度和方向, 以及快速完成具体的编队任务等问题. 最近文献[50] 中又提出和讨论了不同类型leader的作用: 一类是以往意义上的leader, 知道“往哪走”; 另一类则负责回答“如何走”的问题. 这样的leader-follower系统具有一定的适应和学习能力, 这种能力对于发展自主智能系统是必不可少的.

4.5 动力学对拓扑结构的影响(Co-evolution of dynamics and topologies)

以往的研究大多只考虑拓扑结构对于群体动力学的影响, 即在某种拓扑结构假设条件下, 讨论群体动力学. 近年来结合复杂网络研究的发展, 人们进一步讨论了具有诸如“小世界”和“无尺度”网络结构特征的群体动力学. 例如, 文献[58] 中发现“小世界”拓扑结构对于群体达成一致非常有利. 另一方面, 在大的时间尺度上, 个体动力学对于群体结构的演化过程也有重要的影响. 通常的情况是动力学与拓扑结构共同演化. 这样的例子在自然界和人类社会中都并不鲜见. 分析具体的拓扑结构对群体动力学的作用, 在工程应用中非常重要. 而研究个体动力学对于系统结构演化的影响, 则有助于了解自然和社会中的种种形态和模式的成因. 实际上, 关于“小世界”和“无尺度”等典型网络的产生, 目前虽然有一些解释(如偏好连接等), 但其动力学机制迄今仍不清楚. 从自然演化进程来看, 目前发现的如“小世界”、“无尺度”等典型结构应该是群体系统中不同层次的动力学相互作用的结果. 研究群体动力学必将有助于人们对这些问题的认识和理解.

5 结论与展望(Concluding remarks)

群体现象在自然界和社会中普遍存在, 探讨群体协作的机制和工程应用具有重要的意义. 群体动力学的研究内容涉及系统与控制、非线性科学、统计物理等多个领域, 具有学科交叉性和理论难度. 现有的研究工作中大多考虑理想和简化的情况, 如假设群体系统具有对称的拓扑结构、同一的个体、线性通信协议、即时(无迟滞)的信号传输、全局通信能力等等. 在这些条件下, 通常可以从理论上严格证明群体系统的聚集、收敛、同步一致等有序的集体行为.

对于实际中普遍存在的非对称、非线性、时滞、变结构等情况, 相应的问题研究难度大, 理论结果还很少. 数值研究表明这时群体运动会呈现多样性, 一般不再收敛到平衡态, 可能出现自组织振荡

现象和混沌行为. 对于这些问题的深入研究, 需要寻找发展新的理论和方法.

参考文献(References):

- [1] BOABEAU E, DORIGO M, THERAULAZ G. *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*[M]. Oxford: Oxford University Press, 1999.
- [2] KENNEDY J, EBERHART R C, SHI Y. *Swarm Intelligence*[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001.
- [3] 程代展, 陈翰馥. 从群集到社会行为控制[J]. 科技导报, 2004, 8: 4-7.
(CHENG Daizhan, CHEN Hanfu. From swarm to social behavior control[J]. *Science & Technology Review*, 2004, 8: 4-7.)
- [4] GUO L, LIU Z, HAN J. Multi-agent systems with local rules: towards a theory of analysis and control[C] // *Proceedings of the 25th Chinese Control Conference*. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2006, 43.
- [5] BREDER C M. Equations descriptive of fish schools and other animal aggregations[J]. *Ecology*, 1954, 35(3): 361-370.
- [6] REYNOLDS C. Flocks, birds and schools: a distributed behavioral model[J]. *Computer Graphics*, 1987, 21: 25-34.
- [7] VICSEK T, CZIROK A, BEN-JACOB E, et al. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles[J]. *Physical Review E*, 1995, 75(6): 1226-1229.
- [8] TONER J, TU Y. Flocks, herds and schools: a quantitative theory of flocking[J]. *Physical Review E*, 1998, 58: 4828-4858.
- [9] JADBABAIE A, LIN J, MORSE A S. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(6): 988-1001.
- [10] SAVKIN A V. Coordinated collective motion of groups of autonomous mobile robots: analysis of Vicsek's model[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(6): 981-983.
- [11] 唐共国, 郭雷. 线性化Vicsek模型的同步性分析[C] // 第二十五届中国控制会议论文集. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006: 379-382.
(TANG Gongguo, GUO Lei. Synchronization analysis of linearized Vicsek model[C] // *Proceedings of the 25th Chinese Control Conference*. Harbin: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2006: 379-382.)
- [12] LIN Z, BROUCKE M, FRANCIS B. Local control strategies for groups of mobile autonomous agents[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(4): 622-629.
- [13] GAZI V, PASSINO K M. Stability analysis of swarms[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(4): 692-697.
- [14] CHU T, WANG L, CHEN T. Self-organized motion in anisotropic swarms[J]. *Journal of Control Theory & Applications*, 2003, 1(1): 77-81.
- [15] WANG L, SHI H, CHU T, et al. Aggregation of foraging swarm[C] // *Lecture Notes in Artificial Intelligence*. Berlin: Springer, 2004, 3339: 766-777.
- [16] SHI H, WANG L, CHU T. Swarming behavior of multi-agent systems[J]. *Journal of Control Theory & Applications*, 2004, 2(4): 313-318.
- [17] LIU B, CHU T, WANG L, et al. Swarm dynamics of a group of mobile autonomous agents[J]. *Chinese Physics Letters*, 2005, 22(1): 254-257.

- [18] CHU T, WANG L, CHEN T, et al. Self-organized motion in a class of anisotropic swarms: convergence vs oscillation[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2006, 30(4): 875 – 885.
- [19] LIU Y, KEVIN M, PASSINO. Stable social foraging swarms in a noisy environment[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(1): 30 – 44.
- [20] TANNER H G, PAPPAS G J, KUMAR V. Leader-to-formation stability[J]. *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, 2004, 20(3): 443 – 455.
- [21] MU S, CHU T, WANG L. Coordinated collective motion in a motile particle group with a leader[J]. *Physica A*, 2005, 351(2): 211 – 226.
- [22] SHI H, WANG L, CHU T. Virtual leader approach to coordinated control of multiple mobile agents with asymmetric interactions[J]. *Physica D*, 2006, 213(1): 51 – 65.
- [23] LIU B, CHU T, WANG L, et al. Collective motion of a class of social foraging swarms[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2008, 38(1): 277 – 292.
- [24] LIU B, CHU T, WANG L. Collective motion in non-reciprocal swarms[J]. *Journal of Control Theory & Applications*, 2009, 7(2): 105 – 111.
- [25] SHI H, WANG L, CHU T. Flocking of multi-agent systems with a dynamic virtual leader[J]. *International Journal of Control*, 2009, 82(1): 43 – 58.
- [26] 李宗刚, 贾英民. 一类具有群体Leader的多智能体系统的聚集行为[J]. *智能系统学报*, 2006, 2(1): 26 – 30.
(LI Zonggang, JIA Yingmin. Aggregation behavior of a type of multi-agent system with a leader[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2006, 2(1): 26 – 30.)
- [27] HONG Y, GAO L, CHENG D, et al. Lyapunov-based approach to multi-agent systems with switching jointly connected interconnection[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(5): 943 – 948.
- [28] HONG Y, HUA J, GAO L. Tracking control for multi-agent consensus with an active leader and variable topology[J]. *Automatica*, 2006, 42(7): 1177 – 1182.
- [29] HU J, HONG Y. Leader-following coordination of multi-agent systems with coupling time delays[J]. *Physica A*, 2007, 374(2): 853 – 863.
- [30] HONG Y, CHEN G, Bushnell L. Distributed observers design for leader-following control of multi-agent networks[J]. *Automatica*, 2008, 44(3): 846 – 850.
- [31] 李韬, 张纪峰. 一类多智能体系统的渐近最优分散控制[C] //第二十五届中国控制会议论文集. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006, 346 – 351.
(LI Tao, ZHANG Jifeng. Asymptotically optimal decentralized control of a type of multi-agent system[C] //Proceedings of the 25th Chinese Control Conference. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2006, 346 – 351.)
- [32] SABER R O. Flocking for multi-agent dynamic systems: algorithms and theory[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, 51: 401 – 420.
- [33] OLFATI-SABER R, MURRAY R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49: 1520 – 1533.
- [34] MOREAU L. Stability of multiagent systems with time-dependent communication links[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(2): 169 – 182.
- [35] REN W, BEARD R W. Consensus seeking in multiagent systems under dynamically changing interaction topologies[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(5): 655 – 661.
- [36] XIE G, WANG L. Consensus control for networks of dynamic agents via active switching topology[C] //Lecture Notes in Computer Science. Berlin: Springer-Verlag, 2005, 3612: 424 – 433.
- [37] XIAO F, WANG L, WANG A. Consensus problems in discrete-time multiagent systems with fixed topology[J]. *Journal of Mathematical Analysis & Applications*, 2006, 322(2): 587 – 598.
- [38] XIAO F, WANG L. State consensus for multi-agent systems with switching topologies and time-varying delays[J]. *International Journal of Control*, 2006, 79(10): 1277 – 1284.
- [39] XIAO F, WANG L. Dynamic behavior of discrete-time multiagent systems with general communication structures[J]. *Physica A*, 2006, 370(2): 364 – 380.
- [40] XIAO F, WANG L. Asynchronous consensus in continuous-time multi-agent systems with switching topology and time-varying delays[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(9): 1804 – 1816.
- [41] XIE G, WANG L. Consensus control for a class of networks of dynamic agents[J]. *International Journal of Robust & Nonlinear Control*, 2007, 17(10/11): 941 – 959.
- [42] OLFATI-SABER R, FAX J A, MURRAY R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 215 – 233.
- [43] REN W, BEARD R W, ATKINS E M. Information consensus in multivehicle cooperative control[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2007, 27(2): 71 – 82.
- [44] LIN P, JIA Y. Average consensus in networks of multi-agents with both switching topology and coupling time-delay[J]. *Physica A*, 2008, 387(1): 303 – 313.
- [45] LIN P, JIA Y, LI L. Distributed robust H-infinity consensus control in directed networks of agents with time-delay[J]. *Systems & Control Letters*, 2008, 57(8): 643 – 653.
- [46] CAO M, MORSE A S, ANDERSON B D O. Agreeing asynchronously[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(8): 1826 – 1838.
- [47] TIAN Y P, LIU C L. Consensus of multi-agent systems with diverse input and communication delays[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(9): 2122 – 2128.
- [48] LIU B, CHU T, WANG L. Collective behavior analysis of a class of social foraging swarms[C] //Lecture Notes in Artificial Intelligence. Berlin: Springer-Verlag, 2005, 3630: 584 – 593.
- [49] SHI H, WANG L, CHU T, XU M. Flocking control of multiple interactive dynamical agents with switching topology via local feedback[C] //Lecture Notes in Artificial Intelligence. Berlin: Springer-Verlag, 2005, 3630: 604 – 613.
- [50] WANG W, SLOTINE J E. A theoretical study of different leader roles in networks[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, 51(7): 1156 – 1161.
- [51] YANG M, CHU T. *Multi-frequency Oscillations in Swarms with Delay: Numerical Results*[R]. Technical Report, COE, Peking University, 2009.
- [52] TANNER H G. On the controllability of nearest neighbor interconnections[C] //Proceedings of the 43rd IEEE Conference on Decision & Control. Paradise Island, the Bahamas: Springer Press, 2004: 2467 – 2472.

- [53] LIU B, XIE G, CHU T, et al. Controllability of interconnected systems via switching networks with a leader[C] // *IEEE International Conference on Systems, Man & Cybernetics*. Taipei: IEEE Press, 2006: 3912 – 3916.
- [54] LIU B, CHU T, WANG L, et al. Controllability of a leader-follower dynamic network with switching topology[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(4): 1009 – 1013.
- [55] JI Z, LIN H, LEE T H. Controllability of multi-agent systems with switching topology[C] // *Proceedings of the 43rd IEEE Conference on Cybernetics, Intelligent Systems, Robotics, Automation and Mechatronics*. Chengdu, China: IEEE Press, 2008: 421 – 426.
- [56] JI Z, LIN H, LEE T H. A graph theory based characterization of controllability for multi-agent systems with fixed topology[C] // *Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision & Control*. Cancun, Mexico: IEEE Press, 2008: 5262 – 5267.
- [57] YU M, WANG L, CHU T, et al. Stabilization of networked control systems with data packet dropout and transmission delays: continuous-time case[J]. *European Journal of Control*, 2005, 11(1): 40 – 49.
- [58] OLFATI-SABER R. Ultrafast consensus in small-world networks[C] // *Proceedings of the American Control Conference*. Portland, Oregon: IEEE Press, 2005, 4: 2371 – 2378.

作者简介:

楚天广 (1964—), 男, 1993年于清华大学获得博士学位, 现为北京大学教授、博士生导师, 研究方向包括非线性系统稳定性与控制、网络化系统与群体智能、多智能体系统与演化动力学等, E-mail: chutg@pku.edu.cn;

杨正东 (1980—), 男, 北京大学工学院博士研究生, 研究方向为复杂系统动力学与控制;

邓魁英 (1979—), 男, 北京大学工学院博士研究生, 研究方向为复杂系统动力学与控制;

王 龙 (1964—), 男, 1992年于北京大学获得博士学位, 现为北京大学工学院教授, 博士生导师, 长江学者, 是国家教委跨世纪人才基金、国家杰出青年科学基金获得者, 研究方向包括复杂系统智能控制、多机器人系统的协调与控制、集群行为与集群智能、演化博弈与群体决策等;

谢广明 (1972—), 男, 2001年于清华大学获得博士学位, 现为北京大学工学院副教授, 博士生导师. 研究方向包括复杂系统动力学与控制、智能仿生机器人和多机器人系统与控制.