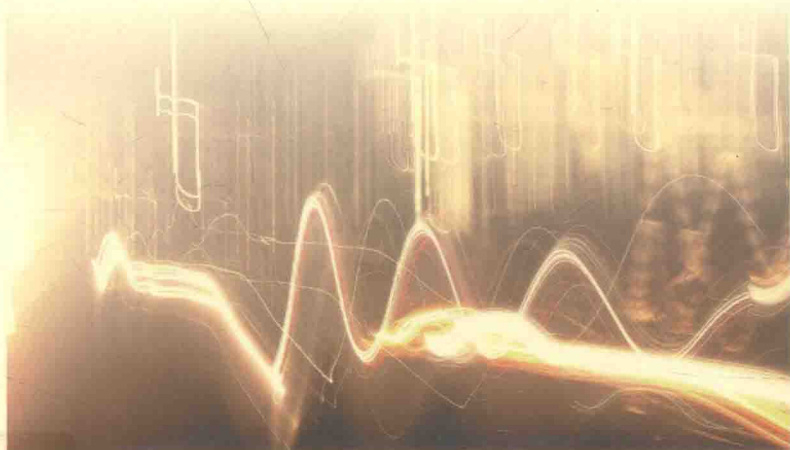


Dynamic analysis and
design of multi-agent system

多智能体系统的 动力学分析与设计

徐光辉 陈 洁 著
付 波 权 轶



科学出版社

多智能体系统的动力学分析与设计

徐光辉 陈 洁 著
付 波 权 轶

国家自然科学基金青年项目(61603127 61503129)资助



科学出版社

北 京

内 容 简 介

多智能体系统的信息传输主要是通过网络进行的,网络通信的限制引发了许多新的问题,给多智能体系统的动力学分析和设计带来了挑战。目前大量研究工作都是从网络拓扑结构和节点动力学的角度研究多智能体系统的建模以及动力学分析和协调性能的问题,而多智能体系统的性能不仅与网络拓扑和节点动力学有关,还与网络运行质量有关。本书主要从控制和通信角度研究多智能体系统的动力学分析与设计问题,重点介绍基于采样信息、输入时滞、非线性项、不确定性干扰的多智能体系统的协调控制问题。运用控制理论、稳定性理论、代数图、矩阵理论等知识,系统、深入地研究复杂环境下动态多智能体系统的协调控制问题,定量地揭示协调性能与通信网络参数和多智能体系统的固有特性间的内在联系,为多智能体系统的开发和设计提供理论指导。

本书可作为从事网络控制和复杂网络工作的科研人员、工程技术人员,以及高等院校自动化及其相关专业教师、高年级本科生和研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

多智能体系统的动力学分析与设计/徐光辉等著. —北京:科学出版社, 2017.12

ISBN 978-7-03-055807-7

I. ①多… II. ①徐… III. ①网络通信—研究 IV. ①TN915

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 300711 号

责任编辑:余 江 张 帆/责任校对:郭瑞芝

责任印制:吴兆东/封面设计:迷底书装

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 12 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017 年 12 月第一次印刷 印张:10

字数:201 600

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着网络通信、控制和计算技术之间的相互渗透和发展,网络系统已广泛应用于各个领域之中。多智能体系统(multi-agent systems, MASs)作为复杂网络和网络系统中一类比较典型的系统,由于其在智能机器人、分布式预测与诊断、交通控制、分布式计算与智能决策、网络化计算机辅助教学及医疗等科学和工程领域的广泛应用而受到国内外科研工作者的极大关注。MASs 作为 21 世纪国际人工智能的前沿学科,集中体现了分布式人工智能的思想,其可以解决超出单个智能体能力的大型复杂系统的现实问题。MASs 具有自治性、模块性、分布性、协调性、易于扩展和设计灵活等诸多优点,而且还有一定的自组织能力、学习能力和推断能力。智能体之间的相互通信是实现 MASs 协调的基础,而网络的介入带来如时延、量化、丢包、噪声等一系列通信约束问题,这就迫切需要新理念和新方法来研究网络环境下 MASs 的协调控制问题。

MASs 的协调控制主要针对系统的动力学行为进行分析,不仅可以揭示自然界中许多自然现象的内在规律,更重要的是通过获得的对其内在规律的认识,更好地指导我们的工作生活,更好地为人类社会服务。本书的作者及团队近年来主要从事 MASs 的动力学分析与设计的研究,特别考虑了网络因素对 MASs 的动力学行为和性能的影响。在已有研究工作的基础上,综合运用系统稳定性理论、代数图论、矩阵论、随机过程、数值分析的相关知识,揭示了 MASs 的动力学行为及性能与系统固有特性(节点的动力学方程、网络的拓扑结构)和网络通信参数之间的内在联系,这将为 MASs 的设计提供重要的理论指导。

本书共 10 章。第 1 章介绍 MASs 的特点和基本问题,以及当前国内外的研究现状。第 2 章介绍带有时延位置信息的二阶离散 MASs 的一致性问题,讨论网络拓扑结构、采样周期及控制增益对一致性的影响。第 3 章介绍采样环境下带有领航者的二阶 MASs 的一致性,并且分别讨论在固定拓扑和随机切换拓扑下的一致性条件。第 4 章介绍带有事件驱动控制的分数阶 MASs 的一致性,分别讨论集中式和分布式两种事件触发策略下的一致性条件。第 5 章介绍基于采样位置信息的二阶 MASs 的多一致性,讨论系统达到多一致性的条件。第 6 章介绍基于间歇控制的非线性 MASs 的多一致性,讨论间歇控制策略下非线性系统达到多一致的条件。第 7 章介绍不确定条件下的分数阶 MASs 的多一致性,讨论不确定性对分数阶 MASs 多一致性的影响。第 8 章介绍带有输入时滞的二阶 MASs 的多一致性,讨论输入时滞对系统达到多一致性的影响。第 9 章介绍带有不确定性的分数阶 MASs

的包含控制,讨论不确定性对系统达到包含控制的影响。第10章介绍带有分层领航者的MASs的混杂协调控制问题,讨论带有静态主领航者的混杂协调问题,并进一步讨论带有动态主领航者和时变时延的混杂协调问题。

本书由湖北工业大学的徐光辉、陈洁、付波、权轶共同撰写完成。徐光辉负责撰写第2~4章和第10章,陈洁负责撰写第5~9章,付波和权轶负责撰写第1章。此外,在本书撰写过程中得到加拿大维多利亚大学施阳教授、日本芝浦工业大学翟贵生教授和华中科技大学王燕舞教授的大力帮助,湖北工业大学廖冬初、赵熙临、潘健、何莉等对本书也给予了指导和帮助。研究生徐梦、余蒙也参与了文字的编辑整理等大量工作。本书介绍的研究工作得到多个国家自然科学基金项目的资助,包括国家自然科学基金青年项目“基于角色切换的混杂多智能体系统的协调控制”(编号:61603127)、“分数阶多智能体系统的有限时间的多协同控制研究”(编号:61503129),在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免有不足之处,恳请广大读者予以批评指正。

作 者

2017年6月于湖北工业大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 多智能体系统的群集动力学	3
1.3 多智能体系统的特点及基本问题	5
1.3.1 多智能体系统的特点	5
1.3.2 多智能体系统的基本问题	6
1.4 国内外研究现状	7
1.5 本书的主要内容	10
参考文献	11
第 2 章 带时延位置的离散多智能体系统的一致性	16
2.1 引言	16
2.2 预备知识和问题的提出	17
2.3 二阶多智能体系统一致性分析	19
2.4 数值仿真	23
2.5 本章小结	25
参考文献	26
第 3 章 采样环境下带有领航者的二阶多智能体系统的一致性	28
3.1 引言	28
3.2 预备知识和模型的建立	29
3.3 二阶多智能体系统在固定拓扑下的一致性分析	31
3.4 二阶多智能体系统在随机切换拓扑下的一致性分析	35
3.5 数值仿真	37
3.5.1 固定拓扑下的 Leader-following 一致性	37
3.5.2 马尔可夫切换拓扑下的均方一致性	39
3.6 本章小结	41
参考文献	41
第 4 章 带有事件驱动控制的分数阶多智能体系统的一致性	43
4.1 引言	43
4.2 预备知识与系统模型描述	44

4.2.1 Caputo 分数阶运算	44
4.2.2 系统模型	45
4.3 集中式事件触发策略	46
4.4 分布式事件触发策略	48
4.5 数值仿真	51
4.6 本章小结	53
参考文献	53
第 5 章 基于采样位置信息的二阶多智能体系统的多一致	55
5.1 引言	55
5.2 问题描述	56
5.3 离散二阶多智能体系统的多一致分析	57
5.3.1 离散二阶多智能体的多一致	57
5.3.2 离散二阶多智能体系统的多一致跟踪	63
5.4 数值仿真	64
5.5 本章小结	69
参考文献	69
第 6 章 基于间歇控制的非线性多智能体系统的多一致	71
6.1 引言	71
6.2 预备知识与模型描述	71
6.3 间歇控制下的非线性多智能体系统的多一致	72
6.4 仿真模拟	78
6.5 本章小结	82
参考文献	82
第 7 章 不确定分数阶系统的多一致	84
7.1 引言	84
7.2 问题描述	85
7.3 不确定分数阶系统的多一致分析	86
7.3.1 输出反馈控制器下的多一致	86
7.3.2 状态反馈控制器下的多一致	91
7.4 仿真模拟	93
7.5 本章小结	97
参考文献	97
第 8 章 有输入时滞的二阶多智能体系统的多一致	98
8.1 引言	98
8.2 问题描述	99
8.3 输入时滞影响下的二阶多智能体系统的多一致	100

8.3.1	无输入时滞的二阶多智能体系统的多一致	100
8.3.2	带输入时滞的二阶多智能体系统的多一致	106
8.4	仿真模拟	109
8.4.1	无输入时滞的二阶多智能体系统的多一致仿真	109
8.4.2	有输入时滞的二阶多智能体系统的多一致仿真	113
8.5	本章小结	119
	参考文献	119
第9章	不确定分数阶系统的包含控制	121
9.1	引言	121
9.2	问题描述	122
9.3	不确定分数阶多智能体系统的包含控制分析	122
9.3.1	基于状态控制器的包含控制	122
9.3.2	基于输出反馈控制器的包含控制	126
9.4	数值仿真	130
9.5	本章小结	135
	参考文献	135
第10章	带有分层领航者的多智能体系统的混杂协调	137
10.1	引言	137
10.2	预备知识与系统模型	138
10.3	带有静态主领航者的混杂协调	139
10.3.1	带有非耦合跟随者群组的分层领航者	139
10.3.2	带有耦合跟随者群组的分层领航者	141
10.4	带有动态主领航者和时变时延的混杂协调	143
10.5	数值仿真	145
10.5.1	带有静态主领航者和非耦合跟随者群组的多智能体系统的混杂协调	145
10.5.2	带有静态主领航者和耦合跟随者群组的多智能体系统的混杂协调	147
10.5.3	带有动态主领航者和时变时延的多智能体系统的混杂协调	149
10.6	本章小结	149
	参考文献	150

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

在现实生活中，以网络系统形式存在的自然和人工系统随处可见，这些系统都可以用网络的形式来建模进行描述和分析，如生物群落、食物链、互联网、社会关系网络、交通运输网络和输电网等。在自然界中，很多动物都通过群居的方式进行活动，天空中的鸟群以“人”字形或“一”字形飞行，如图 1.1 所示；海底的鱼群也以特定的队形游动，即使遇到障碍物它们也能规避冲突保持某种特定的编队，如图 1.2 所示。不仅如此，在飞行或游动过程中它们的速度也惊人地匹配，这些原本单一弱小的个体在通过与其他个体形成群体活动后，在觅食、躲避天敌和迁徙中形成很强的力量，从而使得该种群的繁衍生息得到很好的延续。

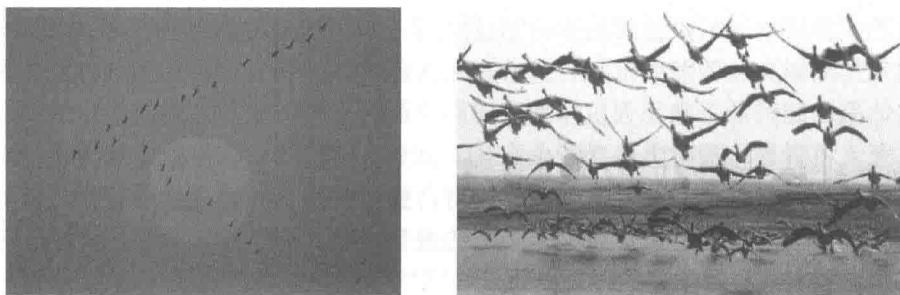


图 1.1 鸟类的迁徙

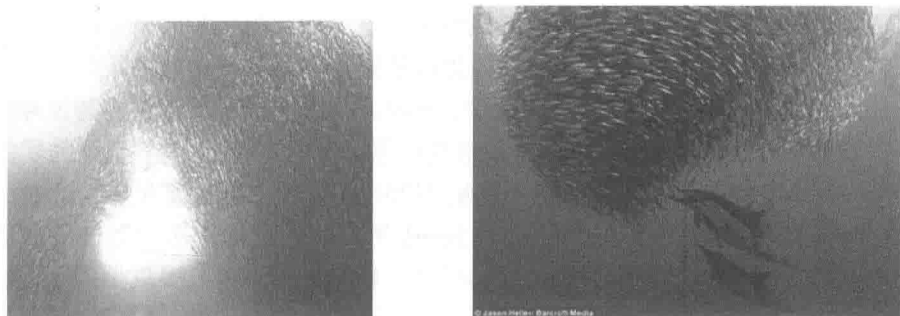


图 1.2 鱼群的聚集

人们经过对这类自然现象的长期观察、分析和总结,将这种由许多单个个体组成,个体之间通过相互协调而共同完成一个复杂任务的系统称为多智能体系统。如果将多智能体系统中的个体看作网络中的节点,个体与个体之间的交互行为当作网络中的连接边,我们也可以将这样的系统称为多智能体系统。多智能体系统中的个体通过网络相互连接,不能获取全局的信息和资源,只能感知局部信息并完成部分任务,这就需要自主体之间的协调合作,从而完成整体复杂的群体行为。

多智能体系统是由多个独立智能体构成的网络化系统,智能体之间通过相互交互在指定环境中完成规定任务。自主性是智能体的核心特征。智能体依靠灵活的移动能力,通过自身携带传感器、无线电设备以及通信装置获知邻近智能体的信息,从而实现复杂动态环境中的目标监测,同时依靠由多个智能体组成的连通通信网络实现信息的交互与传递。实际工程应用中的很多具有自主性、交互性和反应性的物理实体都可构成多智能体系统,如无人驾驶飞行器、无人驾驶汽车、移动传感器等。研究多智能体系统的主要目的就是期望通过大规模的智能体之间的合作协调来代替昂贵的单个系统(卫星、机器人、无人驾驶飞行器、自治水下潜艇等)完成复杂的任务。在第十一届中国国际航空航天博览会上,我国第一个固定翼无人机集群飞行试验以 67 架飞机的数量打破了之前由美国海军保持的 50 架固定翼无人机集群飞机数量的纪录。“集群智能”作为一种颠覆性技术,一直被军事强国视作军用人工智能的核心,是未来无人化作战的突破口。把无人机群作为一个整体来控制,对未来无人机作战及应用方面有广阔的前景。与单机作战平台相比,无人机群在作战时具备功能分布化、体系生存率高、作战成本低等优势,在对抗过程中,当部分个体失去作战能力时,整个集群仍可以继续执行作战任务。随着人工智能、网络信息、微纳电子、先进平台、增材制造五大新兴技术的迅猛发展,智能无人集群将呈现系统智能化、网络极大化、节点极小化、平台多样化、成本低廉化五大特点,并加速推进智能无人集群向装备系列化、应用多样化、覆盖全域化快速发展。

多智能体分布式协调控制问题已经引起了很多学者的关注。研究的关键问题之一就是怎样设计各智能体之间的局部作用规则,使得整个集群系统向某种需要的形式或行为演化,即所谓的“一致性”问题。一致性问题,就是多智能体中的个体按照某种控制规律,通过之间的相互作用、相互影响,每个个体的状态达到一致或共享。多智能体系统分布式协同控制的一个关键问题在于设计合适的协议和算法,使得系统中所有的个体可以达到一致。多智能体一致性问题的研究已广泛应用于群集控制^[1-7]、蜂拥控制^[8-16]、集结问题^[17-21]、多机器人系统的编队控制^[22-30]、传感器网络信息融合^[31-36]、耦合振子的同步问题^[37-43]等实际科学和工程问题中。

目前国内外学者主要从事多智能体系统的建模和动力学收敛性分析方面的研究,已经取得了丰硕的研究成果。然而,对于一个实际网络系统,如何更好、更

精确地对其进行建模和动力学分析？多智能体系统的拓扑结构对动力学行为有何影响？数据通信网络中的通信约束(如采样、量化、时延、噪声、数据丢包等)对多智能体系统的动力学行为有什么样的影响？多智能体系统的动力学会呈现怎样的多样性行为？这些都需要进一步深入研究并将理论分析结果用于指导实际多智能体系统中的协调控制问题。

1.2 多智能体系统的群集动力学

复杂多智能体系统的动力学研究主要分析整个系统在动力学演化过程中的一致、聚集、编队等行为。一致性问题是多智能体协调运作的基础，只有智能体个体间状态达到一致，才能作进一步的群集协同。聚集行为是在一致性的基础上，多智能体之间相互聚集，在彼此间不发生物理碰撞的前提下，聚拢成团共同运作的一种方式。聚集解决了多智能体由杂乱无章的状态到成群而有序的网格组织问题，但是群集控制下的多智能体形成的队形是有规律但不规则的形体。进而，多智能体的编队问题解决了多智能体组织规则的、设定的队形问题。编队是一组多智能体通过局部的相互作用(合作、竞争)，使它们在运动过程中保持预先指定的几何图形，向指定的目标运动，要求每个智能体在运动的过程中，各智能体之间保持一定的距离避免发生碰撞，在运动的道路上能绕过障碍物。其编队方式多种多样，但多数均通过问题转化，将编队问题变为有限时间的目标跟随问题。

多智能体系统群集行为是复杂性科学的一个重要研究问题。其源于自然界生物群体运动的行为，如候鸟在迁徙过程中，为了躲避敌人的攻击，它们会自动排成一行或者有序队列；蚂蚁在搬运食物的过程中，蚁群在聚居地与食物区形成一条“高速公路”，当遇到障碍物时，它们会选取最优的路径绕过；动物群在遇到其他生物攻击时为了躲避暂时出现的混乱现象，形成一个合理的编队逃跑。为了更为真实地刻画这种生物群体的群集运动，Reynolds 用计算机仿真模拟了这种群集运动并提出了一个著名的动画模型，并用三个简单的规则来描述这种生物群集行为：①避免发生碰撞，避免相邻个体之间发生碰撞；②速度、方向匹配，与相邻个体的速度、方向达到渐近一致；③中心聚集，每个个体改变当前位置并向其邻居的平均位置靠拢。

多智能体系统的队形问题与多智能体系统的群集问题的区别是，队形问题要求智能体之间在运动的过程中保持预先给定的几何图形。多智能体系统的队形控制主要解决的是以下问题。

- (1) 各智能体之间如何相互作用，才能生成指定的队形。
- (2) 在队形移动的过程中，智能体之间如何相互作用才能保持指定队形。
- (3) 在运动的过程中，队形中的个体如何才能躲避障碍物。

(4) 当外界环境突然改变时, 如何自适应地改变队形以适应环境。
典型的多智能体网络拓扑图如图 1.3 所示。

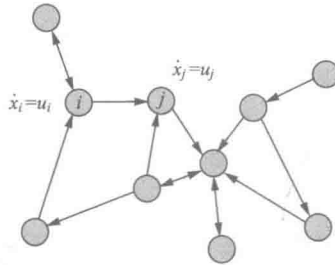


图 1.3 典型的多智能体网络拓扑图

网络的拓扑结构通常用有向图来描述, 可表示为 $G=(V, E, \mathcal{A})$, 其中 $V=\{1, 2, \dots, N\}$ 是图的节点集, $E \subseteq \{(i, j): i, j \in V\}$ 是相应的边集。多自主体网络中, 自主体之间的通信连接用边来表示, 网络的邻接矩阵(adjacency matrix) $\mathcal{A}$ 可表示为

$$\mathcal{A}=[a_{ij}], \quad a_{ij}=\begin{cases} 1, & \text{节点 } i \text{ 与节点 } j \text{ 相连} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

其相应的拉普拉斯矩阵(Laplacian matrix) L 为

$$L=[l_{ij}], \quad l_{ij}=\begin{cases} -a_{ij}, & i \neq j \\ \sum_{j \in N_i} a_{ij}, & i = j \end{cases}$$

多智能体网络由异质异构的节点组成, 通过分析网络的拓扑结构特点和节点的动力学特性, 基于代数图论、矩阵论、微分动力学相关理论, 可以建立如下一般形式的混杂多智能体网络动力学模型:

$$\dot{x}_i(t)=f(x_i, t)+c \sum_{j=1}^N b_{ij}(\varpi(t)) \Gamma x_j(t)+u_i(t)$$

其中, $i=1, 2, \dots, N$; $x_i(t)=(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})^T \in \mathbb{R}^n$ 是第 i 个节点的状态变量; $f(x_i, t) \in \mathbb{R}^n$ 表示节点的内在动力学; 常数 $c>0$ 表示耦合强度; $\Gamma \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 表示网络的内耦合矩阵; $u_i(t)$ 是节点 i 的控制输入; 加权连接 b_{ij} 定义为: 如果一条边从节点 j 到节点 i ($j \neq i$), 那么耦合强度 $b_{ij}>0$; 否则 $b_{ij}=0$ 。当 $i=j$ 时, b_{ij} 定义为 $b_{ii}=-\sum_{j=1, j \neq i}^N b_{ij}$; $\varpi(t)$ 为通信参量, 其直接影响耦合强度 b_{ij} 。由于节点的异质异构特性, 状态变量 $x_i(t)$ 的维数不尽相同, 其内在的动力学 $f(x_i, t)$ 也可能不同。当节点 l 为领航者时, 其动力学方程为

$$\dot{x}_l(t) = f(x_l, t), \quad l \in \{1, 2, \dots, N\}$$

其中, $f(x_l, t) \in \mathbb{R}^n$ 表示节点的内在动力学。

基于建立的各种多智能体系统的动力学模型, 通过设计合适的控制协议, 将复杂的多智能体网络的协调控制问题转化为系统的稳定性问题, 利用现有的丰富的稳定性理论和矩阵理论进行分析, 从而使得系统达到期望的群集动力学行为。

1.3 多智能体系统的特点及基本问题

1.3.1 多智能体系统的特点

多智能体系统是多个智能体组成的集合, 它的目标是将大而复杂的系统建设成小的、彼此互相通信和协调的易于管理的系统。它的研究涉及智能体的知识、目标、技能、规划以及如何使智能体采取协调行动解决问题等。研究者主要研究智能体之间的交互通信、协调合作、冲突消解等方面, 强调多个智能体之间的紧密群体合作, 而非个体能力的自治和发挥, 主要说明如何分析、设计和集成多个智能体构成相互协作的系统。多智能体系统在表达实际系统时, 通过各智能体间的通信、合作、协调、调度、管理及控制来表达系统的结构、功能及行为特性。

多智能体系统是智能体技术应用及研究上的一个质的飞跃, 不同行业的专家学者对它进行了深入的研究并从多个角度阐述了多智能体系统用于解决实际问题的优势。采用多智能体系统解决实际问题, 具有很强的鲁棒性和可靠性, 并具有较高的问题求解效率, 归纳起来主要有以下几个特点。

(1) 自主性。

在多智能体系统中, 每个智能体都具有独立性和自主性, 能够根据给定的任务独立自主地完成决策, 自主地推理和规划并选择适当的方案与策略, 并能以特定的方式独立通信获取局部信息。每个智能体都有自己的进程, 按照自己的运行方式异步进行, 处理问题更加灵活。

(2) 分布性。

受空间分布、传感器探测范围等因素的限制, 传统的集中控制策略无法应用于多智能体系统, 而采取基于局部信息的分布式协调控制。采用分布式控制的优势是不会因为个别智能体的通信故障而造成整个系统的瘫痪。同时, 多智能体系统支持分布式应用, 所以具有良好的模块性、易于扩展性并且设计灵活简单, 克服了建设一个庞大的系统所造成的管理和扩展的困难, 从而能有效降低系统的总成本。

(3) 层次性。

在多智能体系统的实现过程中, 智能体可以是不同的个体或组织, 采用不同的设计方法和计算机语言开发而成, 这种异质性使得系统具有不同的层次。不追

求单个庞大复杂的体系，而是按面向对象的方法构造多层次、多元化的智能体，其结果是降低了系统的复杂性，也降低了各个智能体问题求解的复杂性。

(4) 协调性。

多智能体系统是一个讲究协调的系统，各智能体通过互相协调解决大规模的复杂问题。多智能体系统也是一个集成系统，它采用信息集成技术，将各子系统的信息集成在一起，完成复杂系统的集成。在多智能体系统中，各智能体之间互相通信，彼此协调，并行地求解问题，因此能有效地提高问题求解的能力。

1.3.2 多智能体系统的基本问题

多智能体系统的协调控制指的是在没有中央控制和全局通信的情况下，仅靠空间分布的个体之间局部相互通信协调来实现各种集体行为。对于多智能体系统协调控制的研究，国内外研究者作出了巨大的贡献，并得到了许多有价值的结果。当然也凸显了许多问题。

节点运动机制改变问题：随着网络的演化，多智能体网络中的节点运动机制并不是一成不变的，而是可能发生改变。在一个带有领航者的多智能体网络中，当领航者的节点运动机制发生改变时，跟踪者的运动机制也可能发生相应的改变，则此时新的领航者 $\bar{l}$ 的动力学方程为

$$\dot{x}_{\bar{l}}(t) = f_{\bar{l}}(x_{\bar{l}}, t)$$

其中， $f_{\bar{l}}(x_{\bar{l}}, t)$ 表示新的领航者的内在动力学。

跟踪者的动力学行为可以描述为

$$\dot{x}_{\bar{i}}(t) = f_{\bar{i}}(x_{\bar{i}}, t) + c \sum_{j=1}^N b_{ij}(\varpi(t)) \Gamma x_j(t) + u_{\bar{i}}(t)$$

其中， $f_{\bar{i}}(x_{\bar{i}}, t)$ 表示新的跟踪者的内在动力学； $u_{\bar{i}}(t)$ 表示新的控制输入。

网络拓扑结构切换问题：在智能体的演化过程中，整个网络的拓扑结构也可能发生改变，则此时新的领航者 $\bar{l}$ 的动力学方程为

$$\dot{x}_{\bar{l}}(t) = f_{\bar{l}}(x_{\bar{l}}, t)$$

其中， $f_{\bar{l}}(x_{\bar{l}}, t)$ 表示新的领航者的内在动力学。

跟踪者的动力学行为可以描述为

$$\dot{x}_{\bar{i}}(t) = f(x_{\bar{i}}, t) + c' \sum_{j=1}^N (b_{ij}(\varpi(t)) \Gamma)_{\sigma(t)} x_j(t) + u_{\bar{i}}(t)$$

其中， c' 表示新的耦合强度； $\sigma(t): \mathbf{Z}^+ \rightarrow \{1, 2, \dots, k\}$ 表示网络的动态切换过程； $f(x_{\bar{i}}, t)$ 表示新的跟踪者的内在动力学； $u_{\bar{i}}(t)$ 表示新的控制输入。

模型参数不确定问题：实际复杂网络环境中可能存在噪声干扰、信息传输延迟、网络拓扑结构变化以及系统自身的结构和参数不确定性等多种不确定性因素。模型参数不确定主要反映在系统动力学方程中，可以描述为如下微分方程：

$$\dot{x}_i(t) = (A + \Delta A)x_i(t) + (B + \Delta B)u_i(t) + (C + \Delta C)\omega_i(t)$$

其中, $x_i(t) = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})^T \in \mathbb{R}^n$ 是系统的状态变量; $u_i(t)$ 是系统的控制输入; $\omega_i(t)$ 是系统受到的外部扰动, 可以使用高斯噪声或者有界扰动来建模; A 、 B 、 C 为已知的具有适当维数的常数矩阵; 反映系统不确定性的 ΔA 、 ΔB 、 ΔC 是具有适当维数的时变矩阵, 满足 $\Delta A = D_A \Delta(t) E_A$, $\Delta B = D_B \Delta(t) E_B$, $\Delta C = D_C \Delta(t) E_C$, D_A 、 D_B 、 D_C 和 E_A 、 E_B 、 E_C 是具有适当维数的已知矩阵, 时变矩阵 $\Delta(t)$ 满足 $\Delta(t)\Delta(t)^T \leq I$ 。

在实际网络系统中, 信息之间的交互通过有线网络或无线网络进行, 通信信道中不可避免地会存在单个或多个共存的通信约束, 如时延、噪声、丢包等, 特别是数字信道中还存在着采样、量化、编码、解码等因素的影响, 这些因素都会直接或间接地影响节点之间信息传递的实时性、准确性, 从而影响到智能体之间的协调控制, 使得系统的性能下降, 甚至无法工作。我们拟考虑的影响系统动态演化的典型不确定因素有噪声、时延、丢包三个方面。

噪声问题: 智能体之间进行信息交互时受到噪声干扰, 动力学模型描述为

$$\dot{x}_i(t) = f(x_i, t) + c \sum_{j=1}^N b_{ij}(\varpi(t)) \Gamma(x_j(t) + \eta_i(t)) + u_i(t)$$

其中, $\eta_i(t)$ 为智能体受到的噪声干扰, 通常表示为高斯白噪声过程。

时延问题: 同时考虑通信时延和输入时延的动力学模型为

$$\dot{x}_i(t) = f(x_i, t) + c \sum_{j=1}^N b_{ij}(\varpi(t)) \Gamma(x_j(t - \tau_{ij})) + u_i(t - T)$$

其中, τ_{ij} 为智能体之间的通信时延; T 是智能体的输入时延。

丢包问题: 数据丢包可用随机过程描述, 此时的动力学模型为

$$\dot{x}_i(t) = f(x_i, t) + c \sum_{j=1}^N b_{ij}(\varpi(t)) \Gamma x_j(t) \delta(t) + u_i(t)$$

其中, $\delta(t) = 1$ 表示在 t 时刻发生数据丢包, $\delta(t) = 0$ 表示在 t 时刻未发生数据丢包, 并且数据丢包的发生服从一定的概率分布, $P\{\delta(t) = 1\} = \zeta$, $P\{\delta(t) = 0\} = 1 - \zeta$, $\zeta \in (0, 1)$ 。

以上各种问题表明, 多智能体系统的群集动力学行为主要与系统中个体的运动机制、网络的拓扑结构以及个体之间进行信息交互时受到的通信约束有关, 因此在设计控制协议时需要充分考虑这些因素的影响。

1.4 国内外研究现状

随着相关学科的进一步完善和发展, 单个智能体的性能变得更加灵活, 不但

能在普通环境中作出反应,特殊智能体还具备自学习的能力,以适应更加复杂的作业环境。然而单个智能体所发挥的作用始终有限,其所能感知的环境信息,以及对信息进行处理和控制的能力也有局限性。特别是在一些大区域范围内的科研、调查及勘探的作业过程中,单个智能体所携带的存储、能量等机构的规模有限,根本无法胜任既定的作业任务。现代社会中智能体在各种实际工作的广泛应用为智能体的技术应用提出了新的研究要求和研究课题,多智能体系统的协调控制研究应运而生。

早在 20 世纪 90 年代, Vicsek 等^[44]就提出了一个经典的离散时间模型,该模型模拟了多智能体作为节点通过自身信息和相邻智能体进行信息交换而达到协调一致的情况。随后, Jadbabaie 等^[45]利用图论与矩阵理论对 Vicsek 等的模型进行了动力学收敛分析,得到了系统收敛一致时所需的拓扑条件。Olfati-Saber 和 Murray^[46]通过应用代数图论、矩阵理论和控制理论,分别在固定拓扑和切换拓扑下研究了动态多智能体网络达到一致性的条件。Lin 等^[47]基于复数拉普拉斯矩阵方法研究了多智能体系统达到任意形状的编队控制问题。Dong 等^[48]研究了无人机集群系统在切换拓扑情况下的时变编队控制问题,基于共同李雅普诺夫函数和代数里卡蒂方程方法得到了系统取得期望的时变队形的充要条件。Zhang 等^[49]研究了二阶多智能体系统在输入约束情况下的模型预测聚集控制问题。Yu 等^[50]研究了带有领航者的多智能体系统的聚集控制问题,提出了一种基于事件触发机制的分布式混杂控制算法。Li 等^[51]研究了混杂多智能体系统在有领航者匹配不确定情况下的鲁棒一致性问题。当系统中存在一个领航者的控制输入有界未知时,提出了分布式自适应一致性协议。Zhu 等^[52]提出了一种采用均匀和对数量化的分布式控制协议,基于图论和非光滑分析的方法,研究了混杂多智能体系统在量化不确定时的一致性问题。

早期的大量研究都假定自主体之间的信息交换是通过一个理想的通信信道进行的,也就是每个节点都能及时、准确无误地完整接收邻居节点的信息。无论如何,这在实际网络中是很难实现的。近年来,许多学者开始关注通信约束下的多自主体一致性问题。在实际的人工网络系统中,信息之间的交互要通过有线网络或无线网络进行,通信信道中不可避免地会存在单个或多个共存的通信约束,如时延、噪声、丢包等,特别是数字信道中还有着采样、量化、编码、解码等因素的影响,这些因素都会直接或间接地影响节点之间信息传递的实时性、准确性,从而影响到自主体之间的协调控制,使得系统的性能下降,甚至无法工作。

时延是通信约束中最常见的一个,目前已有大量的文献研究了多自主体的时延问题。时延可分为通信时延和输入时延,即在通信过程中由于线路传输或经过通信节点而产生的时延和外部信息输入引起的时延,目前大多文献主要考虑的是这两种时延。带有时延的一致性的主要问题是研究时延是否影响最终一致性的达到,也称为可一致性。Xiao 和 Wang^[53]研究了离散时间多自主体系统在有界时变

通信时延影响下的状态一致性问题。基于非负矩阵理论,分别得到了固定拓扑和切换拓扑达到状态一致的充要条件与充分条件。文献[54]基于频域分析的方法研究了通信时延和输入时延同时存在对系统达到一致性的影响,结论表明通信时延不影响一致性,而输入时延对一致性有影响。Moreau 在文献[55]中基于不对称算法,研究了固定及切换有向拓扑网络中的带时延一致性问题。其结果表明,只要网络连通,时延不会影响系统趋于一致。

噪声作为通信约束中另外一种重要的因素,也受到了研究者的广泛关注。在实际网络中,信息的发送、传输和接收都可能受到噪声的干扰,在某种程度上来说,噪声干扰是无处不在和无法避免的。早在 20 世纪末, Vicsek 等^[56]就基于粒子的自驱动模型研究了噪声影响下的一致性,结果表明当噪声很小时,整个系统的一致性将不受影响。Huang 和 Manton^[57]研究了每个自主体可以得到邻居自主体的量测状态的一致性控制问题,提出了随机接近型算法,引入了均方一致性和强一致性概念。Xiao 等^[58]利用最小均方误差的方法研究了多自主体的分布式平均一致性问题,节点在更新其邻居节点的加权平均时受到均值为零的噪声的影响。Li 和 Zhang^[59]考虑了连续时间多自主体系统在固定有向拓扑下的平均一致性问题。自主体与邻居自主体之间传输信息时会受到白噪声的影响,为了削弱量测噪声的影响,而在一致性协议中引入时变控制增益。通过代数图论和随机分析的方法,得到了系统取得均方平均一致的充要条件。

随着数字信号的发展,由实际物理环境获得的模拟信号都需要经过转化处理为数字信号,然后经由数字信道进行传输,而由模拟信号到数字信号的转化就需要进行采样。在采样数据环境下的一致性,也称为采样数据一致性,近来成为研究的热点。其原因在于系统的动力学方程通常是连续的,而量测和控制输入只能在离散时间环境中进行,因此必须进行采样。Xie 等^[60]考虑了一阶动态系统在采样数据环境下分别基于固定和切换拓扑的一致性问题,分别得到了达到一致性的充要条件和充分条件。而文献[61]进一步研究了二阶动态多自主体系统在采样数据环境下分别基于固定和切换拓扑的一致性问题。Tang 等^[62]研究了在采样数据环境下带有领航者的多自主体系统的跟踪一致,提出了一种基于采样数据的分布式算法,利用 M 矩阵理论得到了使得多自主体系统达到跟踪一致的采样周期和控制增益参数必须满足的条件。目前基于采样数据环境研究一致性的文献普遍采用李雅普诺夫理论、矩阵理论、行随机矩阵的无穷积、线性矩阵不等式等方法。

除了以上讨论的常见通信约束,影响多自主体系统取得一致性的通信约束还有很多,如丢包、带宽容量受限、有限通信数据率等。Fagnani 和 Zampieri^[63]基于分布式估计协议研究了丢包情况下的平均一致性问题,分析表明丢包会造成估计性能的恶化,从而影响系统平均一致性的取得。Wang 等^[64]研究了统一丢包情况下的平均一致性问题,通过有记忆一致性协议和无记忆一致性协议的比较,说明在丢包越大的情况下,有记忆一致性协议比无记忆一致性协议具有更好的收敛性