

群系统一致性

席建祥 钟宜生 刘光斌 著



科学出版社

群系统一致性

席建祥 钟宜生 刘光斌 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书研究高阶线性群系统的状态和输出一致性分析与协议设计问题,同时考虑了信息延迟、外部扰动及切换拓扑等因素的影响。状态空间分解方法是贯穿全书的主线,可以同时确定主体间的相对运动和群系统的整体运动。对于存在信息延迟和外部扰动的情况,主要采用线性矩阵不等式来处理;对于切换拓扑的情况,主要采用 Riccati 方程方法来设计控制协议的增益矩阵。

本书可以作为控制理论与工程、系统工程以及相关工程与应用专业研究生的教材或教学参考书,也可以作为从事群系统相关研究的科研人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

群系统一致性. 席建祥, 钟宜佳, 刘光斌著. —北京: 科学出版社, 2014

ISBN 978-7-03-039699-0

I. 群… II. ①席…②钟…③刘… III. 系统理论—研究 IV. N94

中国版本图书馆(CIP)数据核字(2014)第 020112 号

责任编辑:魏英杰 / 责任校对:宣 慧

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 2 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014 年 2 月第一次印刷 印张:9 1/2

字数:189 000

定价:50.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

前 言

群系统在军事和民用领域均广泛存在,如多运动体编队、传感器网络、多主体支撑系统及协同作业多机器人系统等。因为信息一致是群系统中主体间协同合作的基础,所以一致性问题为群系统研究的一个基本问题。早期的研究者主要对一阶群系统和二阶群系统的一致性问题展开研究,取得了丰硕的研究成果,形成了比较完整的理论体系。因为一阶群系统和二阶群系统的动力学模型具有特定结构,所以系统的分析和设计相对简单。

近年来,许多研究者把注意力转移到了高阶群系统的一致性问题。本书讨论高阶线性群系统的一致性分析和协议设计问题,主要包括两大部分:状态一致性和输出一致性,并考虑了信息延迟、外部扰动及切换拓扑等因素的影响,尽可能地包含目前群系统研究的一些热点问题。为了使本书自成体系,书中包括了图论、线性代数、线性系统理论和部分稳定理论的一些基本概念和基本结论。第一章详细介绍书中各章的主题和主要结论。作者期望为同行提供一个进一步从事群系统理论和应用的基础。

全书的写作由席建祥博士完成,主体内容为席建祥攻读博士期间取得的研究成果。这些成果的取得,得到了第二炮兵工程大学刘光斌教授、清华大学自动化系钟宜生教授和邹红星教授的指导、关心和帮助。这都为本书的写作打下了坚实的基础。同时,第二炮兵工程大学的领导和机关也一直关心和支持着席建祥博士的课题研究和本书的出版。在本书出版之际谨向他们表示衷心的感谢。

在本书的写作过程中,得到了很多朋友的帮助,杨小冈博士和郭金库博士对本书的结构安排和组织形式提出了很多宝贵的意见和建议,博士生董希旺、孟繁林、王忠和侯博在书稿的整理和校对中做了很多工作,在此表示衷心的感谢。此外,还要感谢国家自然科学基金

主要符号表

| | |
|----------------------|---|
| G | 图 |
| L | 图的拉普拉斯矩阵 |
| \mathbb{R}^{Nd} | $N \times d$ 维实空间 |
| \mathbb{C}^{Nd} | $N \times d$ 维复空间 |
| $\mathbf{1}$ | 元素均为 1 的列向量 |
| \mathbf{e}_i | 第 i 个元素为 1, 其余元素为 0 的列向量 |
| \otimes | Kronecker 积运算符 |
| \mathbf{A}_K | 对角线元素为 K 的对角阵 |
| $\text{Re}(\lambda)$ | 复数 λ 的实部 |
| $\text{Im}(\lambda)$ | 复数 λ 的虚部 |
| \mathbf{T}_λ | 矩阵 $\mathbf{T}_\lambda = \begin{bmatrix} \text{Re}(\lambda)\mathbf{I} & -\text{Im}(\lambda)\mathbf{I} \\ \text{Im}(\lambda)\mathbf{I} & \text{Re}(\lambda)\mathbf{I} \end{bmatrix}$ |
| \mathbf{A}^H | 矩阵 \mathbf{A} 的共轭转置 |
| \mathbf{A}^T | 矩阵 \mathbf{A} 的转置 |
| $*$ | 对称项 |
| \mathbf{I}_d | $d \times d$ 的单位矩阵 |
| \mathbf{I} | 适当维数的单位矩阵 |

目 录

前言

主要符号表

| | |
|----------------------|----|
| 第一章 绪论 | 1 |
| 1.1 群系统的研究背景 | 1 |
| 1.2 一致性问题描述及其应用 | 5 |
| 1.3 一致性问题的研究现状 | 8 |
| 1.3.1 一阶群系统的一致性问题研究 | 9 |
| 1.3.2 二阶群系统的一致性问题研究 | 13 |
| 1.3.3 高阶群系统的一致性问题研究 | 16 |
| 1.4 本书的主要内容及重点 | 20 |
| 第二章 图论、线性代数及系统理论 | 24 |
| 2.1 图论 | 24 |
| 2.2 线性代数 | 28 |
| 2.2.1 线性子空间 | 28 |
| 2.2.2 特征值和特征向量 | 30 |
| 2.2.3 矩阵的求逆公式 | 31 |
| 2.2.4 Kronecker 积 | 32 |
| 2.2.5 不变子空间 | 32 |
| 2.3 线性系统理论 | 33 |
| 2.4 部分稳定理论 | 34 |
| 第三章 无延迟固定拓扑条件下的状态一致性 | 37 |
| 3.1 问题描述 | 37 |
| 3.2 一致性分析与协议设计 | 38 |
| 3.3 在多主体支撑系统协同控制中的应用 | 44 |
| 第四章 时变延迟条件下的状态一致性 | 48 |
| 4.1 问题描述 | 48 |
| 4.2 问题转化 | 49 |
| 4.3 一致性分析与协议设计 | 52 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 4.4 | 在多主体支撑系统协同控制中的应用 | 57 |
| 第五章 | 延迟条件下的 L_2 一致性 | 60 |
| 5.1 | 问题描述 | 60 |
| 5.2 | L_2 一致性分析与协议设计 | 62 |
| 5.3 | 数值仿真 | 70 |
| 第六章 | 切换作用拓扑条件下的领导者-跟随者状态一致性 | 73 |
| 6.1 | 问题描述 | 73 |
| 6.2 | 领导者-跟随者一致性分析与协议设计 | 74 |
| 6.3 | 数值仿真 | 78 |
| 第七章 | 静态输出反馈条件下的输出一致性 | 82 |
| 7.1 | 问题描述 | 82 |
| 7.2 | 输出一致性分析和输出一致函数 | 83 |
| 7.3 | 可一致控制器设计 | 89 |
| 7.4 | 数值仿真 | 92 |
| 第八章 | 动态输出反馈条件下的输出一致性 | 94 |
| 8.1 | 问题描述 | 94 |
| 8.2 | 输出一致性分析 | 95 |
| 8.3 | 输出一致协议设计 | 101 |
| 8.4 | 数值仿真 | 103 |
| 第九章 | 时变延迟条件下的稳定协议输出一致性 | 107 |
| 9.1 | 问题描述 | 107 |
| 9.2 | 稳定协议输出一致性分析 | 109 |
| 9.3 | 稳定协议输出一致协议设计 | 112 |
| 9.4 | 输出一致函数 | 115 |
| 9.5 | 仿真实例 | 116 |
| 第十章 | 切换作用拓扑条件下的稳定协议输出一致性 | 120 |
| 10.1 | 问题描述 | 120 |
| 10.2 | 稳定协议输出一致性分析 | 122 |
| 10.3 | 稳定协议输出一致协议设计 | 127 |
| 10.4 | 数值仿真 | 131 |
| 参考文献 | | 135 |

第一章 绪 论

本章首先从哲学、自然科学和技术科学等三个方面简要介绍群系统的研究背景。然后,给出群体一致性的问题描述,讨论一致性问题潜在的实际应用,并分别综述一阶群系统、二阶群系统和高阶群系统一致性问题的研究现状。最后,介绍本书的主要内容及章节安排。

1.1 群系统的研究背景

群系统(swarm system),又称为多主体系统(multi-agent system),是指由分布配置的大量自治或半自治的子系统(主体)通过网络互联所构成的系统。相对于孤立系统,群系统具有如下典型特性:

① 每个主体信息处理和任务执行能力较为有限,不足以独立完成复杂任务。

② 每个主体均具有一定程度的自主能力,但是仅具有有限的局部感知和通信能力。

③ 主体间相互作用是分布式的。这使系统更具有鲁棒性,不会由于某一个或者几个主体的故障而影响整个系统的运行。

这些特性使群系统的建模、分析和设计更加具有挑战性。此外,群系统在生物、物理、控制和通信等领域均有着广泛的应用。因此,受到了这些领域研究者的广泛关注,已经成为一个重要研究课题。下面,我们从哲学、自然科学和技术科学等三个方面分析群系统的研究背景。

回顾人类的科学思想发展史,从宏观到微观,又从微观到宏观,还原论和系统论之间的辩证关系一直存在。几个世纪以来,在科学研究的方法论中,还原论占据了主导地位^[1]。为了了解一个对象,将其作为一个整体,分门别类地研究,如在物理学、化学领域,研究者分别致

力于物质结构与化学成分的研究,深入到分子、原子和电子,一直到基本粒子的性质与运动规律的研究。在生命科学领域,将不同的生物依进化过程中的亲缘关系按照门、纲、目、科、属、种分类。在人体科学领域,将人体解剖,分别研究运动系统、神经系统、内分泌系统、循环系统、呼吸系统、消化系统、泌尿系统、生殖系统等。到 20 世纪,研究的对象已达到基因层次,力图破解脱氧核糖核酸(DNA)的结构。还原论推动了近代自然科学的发展,但是人们对还原论所具有的局限性也早已有所认识。到 20 世纪中期,系统科学作为一门独立学科出现并迅速发展,越来越多的人开始关注群体的整体行为。从方法论的角度来讲,对群体整体行为的研究反映了人类突破还原论思维模式的一种努力。

集群行为(swarming behavior)是自然界中常见的现象。例如,大雁能够排成一字形或者人字形在天空中飞翔,鱼群能聚集在一起有序地在江海湖泊中休养、生息、繁衍生殖,狼通常是成群结队地围捕猎物^[2]。生物学研究发现,相对于单个生物主体,群体具有更为有效、更为强大的活动能力和战斗力,从而可以保证族群在恶劣的自然环境和与其他种群的争斗中繁衍生息。群体相对于单个主体的主要优势在于以下几个方面:

① 提高生存概率。例如,很多海洋的生物通常依靠声呐来判断猎物的大小和位置,成群的鱼可能被误判为一个庞然大物,从而使捕食者望而生畏。

② 减小运动阻力,降低体能消耗。以大雁南飞为例,编队飞行可以改变气流的结构,使得空气阻力减小,进而减少体能消耗。

③ 通过相互协作,完成复杂任务。例如,每个蚂蚁的智力和能力都是非常简单的,但是通过蚂蚁之间的相互协作,蚁群可以完成筑巢、觅食及清扫巢穴等复杂任务。

人们希望通过对群系统的研究来解释生物集群行为产生的原因,揭示生物群体之间相互协调、分工和合作的秘密。

在工程应用中,用群系统代替孤立系统可以极大地降低生产成本,而且更加安全可靠。此外,一些任务不能由单个主体完成,需要很多主

体协同配合。对于这种情况,人们通常需要对任务进行拆解,使不同的主体互相配合,相互协作,共同完成任务。下面列举几个工程应用的实例。

(1) 多无人机系统 (multiple unmanned aerial vehicle systems)

相对于有人飞机而言,无人机具有隐身性好、成本低、维护方便等特点。同时,因为无人机不需要飞行员来驾驶,所以可以极大地避免人员伤亡。因此,无人机受到了很多研究机构和各国军方的广泛关注,并在过去几十年内取得了长足的发展。随着越来越多的无人机进入战场和民用领域,无人机协同控制问题受到了研究者广泛的关注。协同控制技术如何有效地协调和组织编队中的每个无人机,以便在一个高度非结构化环境中成功地完成任务^[3]。例如,如果某一个区域内存在放射源,拟利用多个无人机搜索这一区域以发现放射源。一个很有意义的问题是如何对这些无人机进行编队以便准确高效地定位放射源。图 1.1 所示为一个多无人机系统。

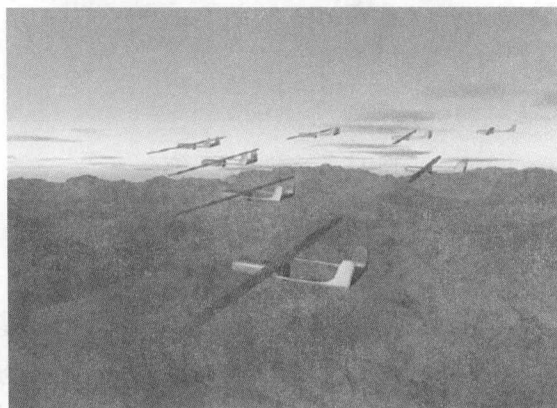


图 1.1 多无人机系统

(2) 多机器人系统 (multi-robot systems)

1954 年,美国人乔治·德沃尔制造出世界上第一台可编程的机器人。这种机器人能按照不同的程序从事不同的工作,具有良好的通用性和灵活性。在此之后,机器人的研发得到了广泛的关注。经过了半个多世纪的发展,从第一代工业机器人、第二代带有“感觉”的机器人到

第三代智能机器人,机器人的体积越来越小,功能越来越强大。因为机器人具有通用性强、工作效率高、速度快、稳定可靠、重复精度高等优点,所以在工业生产中得到了广泛应用。但是,一些任务单个机器人无法完成,需要多个机器人进行协同才能完成。一个典型的例子是足球机器人(soccer robots)系统,如图 1.2 所示。每支球队的机器人之间需要进行任务分配、轨迹规划及相互配合才能突破对方的防守,将足球踢入球门。

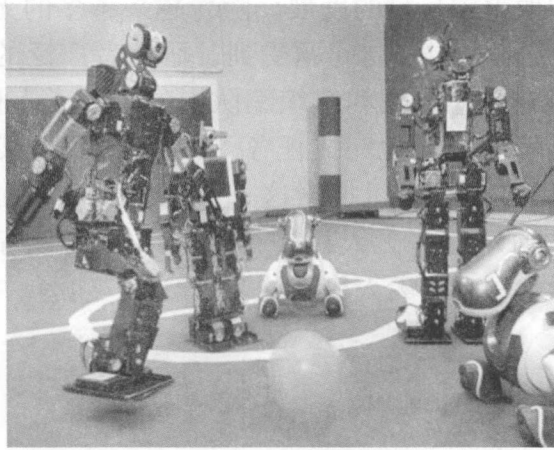


图 1.2 多机器人系统

(3) 多主体支撑系统 (multi-agent supporting systems)

Ma 等^[4]提出了多主体支撑系统的模型,主要应用于防震建筑、海上作业平台及大尺寸曲面天线等,如图 1.3 所示。防震建筑可以在地震中保持平衡,避免倾倒,保护用户的生命财产安全。海上作业平台可以保证整个平台在海浪的扰动下保持平衡,避免不必要的损失,为作业人员提供良好的工作环境。多个支柱所支撑的曲面天线可以在外部扰动下保持天线的精确形状,确保观测质量。多主体支撑系统的一个显著特点是每一个支柱都由本地驱动装置驱动,没有全局控制器,每一主体都根据其邻居的位置信息和自身位置信息确定本地控制策略以实现全局控制目标。

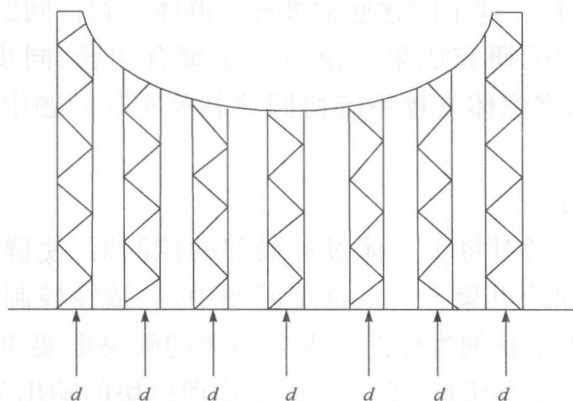


图 1.3 多主体支撑系统

1.2 一致性问题描述及其应用

群系统可以利用图来建模。图的每一个节点代表一个主体，边表示主体之间存在相互作用，边的权值代表相互作用的强度。图 1.4 表示一个由六个主体构成的群系统，六个节点代表六个主体，并对每个主体进行了编号。可以看到，主体 2 以强度 0.60 对主体 1 产生影响，但是主体 1 不会对主体 2 产生影响。

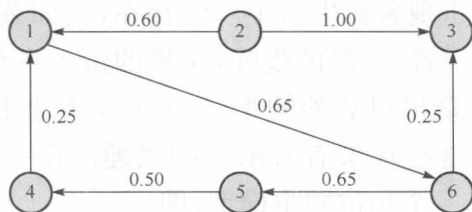


图 1.4 群系统示意图

群体一致性问题是在群系统协同控制的一个基本问题。在群系统协同控制中，协作所需要的信息通过特定方式在系统主体之间传播和共享。在一群主体执行任务的过程中，环境可能改变或者突发情况可能会出现，因此需要根据邻近主体的信息设计出相应主体的协作策略(控制律)，使主体在环境变化条件下仍然能够就某些共同关注的变量(协

调变量)实现一致。这个问题通常被称作群体一致性问题。

一致性问题的研究成果广泛应用于聚合问题、同步控制、编队控制、集群控制和多主体支撑系统协同控制等实际问题中^[5,6],下面分别概述。

(1) 聚合问题

聚合问题是指对每个主体设计局部的控制器,使群系统中所有主体在同一时间和地点聚合。在这个问题中,一致性控制协议可以增强群系统对于外部干扰的鲁棒性。聚合问题的解决框架通常由一致性管理模块和局部控制器组成,即以一致性管理模块的输出为参考,使用局部控制器控制每个主体的运动,最终完成聚合。文献[7]研究了多无人飞行器的聚合问题,其中每个主体的运动分为传感周期和运动周期。在传感周期中,主体根据传感器的信息估计相邻主体的位置。在运动周期中,主体根据相邻主体位置的估计值来移动。文献[8]研究了无人飞行器构成的群系统如何在同一时间聚合到敌方雷达探测区域边界的问题。无人飞行器群同时到达敌方雷达探测区域边界,雷达探测结果是一个巨型的飞行器,这可以恐吓对手并使其做出错误判断和决策。

(2) 同步控制

多个主体的同步现象在生活中广泛存在,例如黄昏时分,田野中的蟋蟀会同步地发出声音;宁静的夜晚,飞舞的萤火虫会以同样的频率闪烁;演出结束后,观众报以热烈的掌声,并且会从起初的凌乱变得协调一致。很多学者对这些现象有着浓厚的兴趣。在一定的假设条件下,Kuramoto^[9]提出了一个相位同步模型,即

$$\dot{\theta}_i(t) = \omega_i(t) + \kappa \sum_{j=1}^N \sin(\theta_j(t) - \theta_i(t))$$

从这个模型可以看出,在某种程度上,同步问题是一致性问题的一个非线性扩展。基于对观众掌声规律的观察,Neda等^[10]从非线性动力学的角度给出了掌声同步的一种解释。Czirók和Vicsek^[11]提出的粒子群运动模型也可以看作是一个同步模型,即系统中的粒子运动方向在系统演化的过程中逐渐趋于一致,达到同步。

(3) 编队控制

近年来,编队控制问题在军事、工业领域得到广泛的应用,也引起了学术界的极大关注,如无人机编队飞行、卫星群编队、水下舰艇编队等^[12-15]。在编队控制中,因为每个主体只能获取相邻主体的信息而无法获得群体的全局信息,所以通常使用分布式的控制来实现编队。Fax 和 Murray^[13]通过在一致性控制协议中加入了一个偏差项来构造系统所需要的编队,并利用代数图论和矩阵理论证明所提供的方法可以实现特定编队。利用一致性控制协议,Lin 等^[14]研究了多个机器人系统的编队控制问题,成功地实现了点、线以及其他一些常见的编队队形。Lafferriere 等^[15]利用主体之间的相对信息,提出了实现编队队形所需要的反馈控制律。李向舜^[16]考虑无向和有向两种作用拓扑结构、主体模型为一般的线性系统及线性控制协议的情形,采用了线性矩阵不等式方法和频域 Nyquist 稳定判据分析有延迟的网络化群系统的编队稳定性。赵小方等^[17]利用一致性控制策略实现了多个卫星的姿态同步与跟踪。基于一致性的策略,文献[18]-[24]研究了编队可控性问题。利用一致性策略,Ren^[25]成功实现了自动小车系统的编队控制。

(4) 集群控制

集群现象是自然界中常见的现象,对集群现象的研究可以使人们更加深入地认识集群现象的本质规律,更好地揭示自然界的奥秘。1987年,Reynold^[26]建立了一个鱼群、鸟群和兽群的分布式行为模型,即 Boid 模型。该模型给出了实现群体行为的三个基本要求:

- ① 分离(separation),避免与自身的邻近主体发生碰撞。
- ② 聚合(cohesion),避免与自身的邻近主体分离。
- ③ 速度一致(velocity consensus),与自身的邻近主体实现速度一致。

Reynold 仅给出了计算机仿真结果,并没有给出精确的数学描述,因此无法对这个问题进行系统的理论分析。针对 Boid 模型,Olfati-Saber^[27]提出一种基于人工势能函数的控制方法,实现了所有主体的速度一致。此外,该文还使用带有虚拟领导者的控制结构来防止群系统

分裂。Tanner 等^[28,29]考虑主体之间的位姿匹配问题,使用一致性控制协议讨论了集群控制的实现,并分别讨论了固定及时变拓扑条件下集群控制的稳定性问题。Tanner^[30]考虑具有多个静态障碍物环境中的集群控制问题,每个主体在完成集群任务的同时也要避开障碍物。该文采用了不连续的控制协议实现主体速度的一致性,并在避开障碍物和主体碰撞的同时实现集群控制。文献[31]考虑了对主体速度的控制,使得主体能够保持一个定常的距离并以期望的速度实现集群行为。Gu 和 Wang^[32]研究 leader-following 集群控制问题。

(5) 多主体支撑系统协同控制

多主体支撑系统可应用于防震建筑、海上作业平台及大尺寸曲面天线等系统的控制中。Ma 等^[4]将多主体支撑系统每个主体建模为一个二阶系统。Ma 等采用集中式的方法来控制多主体支撑系统,在系统规模较大时,该方法无法实现有效的控制。采用一致性控制策略,文献[5]研究了无延迟条件下的多主体支撑系统的协同控制问题。其中,根据不同的系统,一致函数是可以设计的。例如,对于防震建筑,地震以后建筑物应该恢复静止,因此一致函数应该是时不变的。然而,对于海上作业平台,因为海水对平台的扰动作用总是存在的,所以一致函数通常是时变的。文献[33]研究了时变延迟条件下的多主体支撑系统的协同控制问题,并证明一致时变的延迟不对一致函数产生影响。在每个主体的体积和重量很大时,每个主体通常需要多个柱子来支撑,此时主体的动力学特性必须建模为奇异系统。文献[34]研究了每个主体由奇异系统来描述的多主体支撑系统的协同控制问题。

1.3 一致性问题的研究现状

在 1995 年, Vicsek 等^[35]提出一个粒子群的运动模型(Vicsek 模型)。在这个模型里,所有的粒子位于同一个平面,每个粒子的运动速率相同但方向不同。利用计算机数值仿真, Vicsek 等展示了一个非常有趣的结果:当主体密度比较大且运动方向的噪声比较小时,所有粒子能够实现运动方向的一致。利用代数图论和矩阵理论等工具,文献

[36]-[38]对 Vicsek 模型进行了理论分析,将 Vicsek 模型中非线性协议用线性协议来近似,并指出群系统能否获得一致取决于以下三个要素:主体之间的作用拓扑、控制协议和主体的动力学特性。控制协议描述了每个主体如何利用其接收到的信息。控制协议设计是群体一致性问题中的一个研究重点,不同的控制协议往往需要不同的分析方法,所得到的判据也不尽相同。根据每个主体的动力学特性,群系统可以分为一阶群系统、二阶群系统和高阶群系统。下面将以这样一个分类为主线综述一致性问题的研究现状。

1.3.1 一阶群系统的一致性研究

在一致性问题研究的初期,研究者主要关心某一个孤立的协调变量实现一致。例如,多个主体要在某一个地点聚集,则需要关于目标位置实现一致。在这种情况下,一个由 N 个主体组成的群系统可以描述为

$$\dot{x}_i(t) = u_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1.1)$$

其中, $x_i(t) \in \mathbb{R}$ 是一维协调变量; $u_i(t)$ 是控制输入,即控制协议。

因为每个主体的动力学特性由一阶积分器来描述,所以将这类群系统称为一阶群系统。如果 $\lim_{t \rightarrow \infty} (x_i(t) - x_j(t)) = 0 (i, j = 1, 2, \dots, N)$, 那么称系统(1.1)获得一致。很多学者深入研究了一阶群系统的一致性问题,并取得了很多重要的研究成果。根据控制协议的不同,下面从四个方面概述一阶群系统的研究现状,即固定拓扑的控制协议、变拓扑的控制协议、延迟条件下的控制协议及其他控制协议。

对于作用拓扑是固定的情况,文献[37],[39]采用如下控制协议,即

$$u_i(t) = \sum_{j \in N_i} w_{ij} (x_j(t) - x_i(t)) \quad (1.2)$$

其中, N_i 表示第 i 主体的邻居集; w_{ij} 表示第 j 主体对第 i 主体的作用强度。

令 $\mathbf{x}(t) = [x_1^T(t), x_2^T(t), \dots, x_N^T(t)]^T$, 那么这个群系统的动力学特性可描述为如下一个线性时不变系统,即