

系统与amp;控制丛书 C₁₃

陈杰 方浩 辛斌 著

多智能体系统的 协同群集运动控制



科学出版社

系统与amp;控制丛书

多智能体系统的协同 群集运动控制

陈杰 方浩 辛斌 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以多智能体系统协同群集运动控制为主线,首先介绍了图论和控制器设计所用到的基础理论知识;其次,分别从拓扑结构的边保持和代数连通度两个角度介绍了连通性保持条件下的协同群集运动控制协议设计方法;进而,针对典型的轮式移动机器人非完整约束模型介绍了连通性保持条件下的协同控制策略,为简化系统复杂拓扑结构,还介绍了基于骨干网络提取的协同群集运动控制策略;书中将个体动态模型提升到高阶非线性系统模型,介绍了高阶非线性系统协同控制协议设计方法;最后,针对多智能体系统非合作行为检测与隔离进行了详细介绍,并提出了相关算法。

本书可作为系统与控制及其相关研究领域的科研工作者、工程技术人员、高等院校师生的参考书,也可作为研究生和高年级本科生的教科书。

图书在版编目(CIP)数据

多智能体系统的协同群集运动控制/陈杰,方浩,辛斌著. —北京:科学出版社,2017

(系统与控制丛书)

ISBN 978-7-03-051165-2

I. ①多… II. ①陈… ②方… ③辛… III. ①人工智能-研究
IV. ①TP18

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第310934号

责任编辑:杨向萍 裴 育 纪四稳/责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩/封面设计:蓝 正

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>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年1月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017年1月第一次印刷 印张:14 1/4

字数:268 000

定价:95.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《系统与amp;控制丛书》编委会

主 编:

郭 雷

中国科学院数学与系统科学研究院

副 主 编:

陈 杰

北京理工大学

编 委:

洪奕光

中国科学院数学与系统科学研究院

黄 捷

Chinese University of Hong Kong

姜钟平

Polytechnic Institute of New York

University, USA

Frank Lewis

University of Texas at Arlington, USA

林宗利

University of Virginia, USA

申铁龙

Sophia University, Japan

谈自忠

Washington University, USA

谢立华

Nanyang Technological University,

Singapore

殷 刚

Wayne State University, USA

张纪峰

中国科学院数学与系统科学研究院

周东华

清华大学

编者的话

我们生活在一个科学技术飞速发展的信息时代，诸如宇宙飞船、机器人、因特网、智能机器及汽车制造等高新技术对自动化提出了更高的要求。系统与控制理论也因此面临着更大的挑战。它必须能够为设计高水平的物理或信息系统提供原理和方法，使得设计出的系统能感知并自动适应快速变化的环境。

为帮助系统控制专业的专家、工程师以及青年学生迎接这些挑战，科学出版社和中国自动化学会控制理论专业委员会合作，设立了《系统与控制丛书》的出版项目。本丛书分中、英文两个系列，目的是出版一些具有创新思想的高质量著作，内容既可以是新的研究方向，也可以是至今仍然活跃的传统方向。研究生是本丛书的主要读者群，因此，我们强调内容的可读性和表述的清晰。我们希望丛书能达到这些目的，为此，期盼着大家的支持和奉献！

《系统与控制丛书》编委会

2007年4月1日

序 言

自 20 世纪 50 年代以来,控制科学不断发展,诞生了诸如最优控制、鲁棒控制、非线性控制等众多研究方向以及大量的科研成果,极大地推动了第三次工业革命的发展。但近年来,由于控制对象规模呈爆炸式增长、信息化社会生成海量数据,系统与控制科学作为一门面向应用的学科正面临着许多重大挑战;同时,计算机科学以及人工智能的兴起也为系统与控制科学的发展带来了新的机遇和启示。受到自然界广泛存在的生物种群有序运动现象的启发,多智能体的研究开始受到广大学者的关注。70 年代末期,智能体概念初现,主要研究如何通过协作方式分布式求解问题。90 年代,多智能体系统涌现出自主性、社会能力、反应性等特性,使多智能体协同成为控制领域的研究热点。目前,多智能体协同已经应用于智能机器人、交通控制、柔性制造、网络自动化和作战智能体模型等领域。毫无疑问,未来几年多智能体协同仍将吸引更多学者的广泛关注,继续在系统与控制科学的发展中扮演十分重要的角色。

多智能体协同控制所要解决的根本问题在于如何设计合理的控制协议来协调多个个体统一完成任务,这与传统基于单一对象的控制理论有很大的区别。陈杰教授团队对此进行了大量的研究工作,并取得了很好的研究成果。该书以多智能体系统协同群集运动控制为主线,结合作者在该领域多年的研究积累及国内外最新的研究成果,给出了基于代数连通度估计、基于骨干网络等多种分布式群集运动控制方法,同时考虑了系统连通性保持、模型参数不确定性、多任务约束等诸多限制条件,扩展了相应成果的应用范围。全书内容丰富,论述深入浅出,既有严谨的理论推导与证明,又有数值仿真与实物实验验证,是一本难得的介绍控制理论在多智能体协同控制方面最新研究进展的学术专著。

当前世界正在发生着深刻的变革,以互联网产业化、工业智能化、工业一体化为代表的第四次工业革命正悄然到来。该书所研究的内容顺应了当前工业发展的潮流,在民用、军用等领域有着广阔的应用前景,也非常适合相关领域的学者和工程技术人员参考阅读。

我相信，该书的出版能够对多智能体协同控制领域的研究发展有所帮助，也希望作者能够在该方向上持续研究，取得更多的高水平研究成果。

郑南宁

西安交通大学教授
中国自动化学会理事长
中国工程院院士
2016年12月

前 言

智能体的概念来源于分布式人工智能的思想,通常而言,可以把智能体定义为用来完成某类任务,能作用于自身和环境、有生命周期的一个物理的或抽象的计算实体。智能体的特点是具有自主性、局部通信/感知能力、分布式协作能力、任务分解能力、自适应性和推理能力。而多智能体系统是由多个智能体组成的具有松散耦合结构的,并且通过系统中智能体之间以及智能体与环境之间的通信、协商和协作来共同完成单个智能体 (Agent) 因能力、知识或资源上的不足而无法解决的问题的系统。多智能体系统通过相互协作,可以完成超出它们各自能力范围的任务,使得系统整体能力大于个体能力之和。鲁棒性、分散性、自组织性是多智能体系统动态行为的基本特征。多智能体协同控制是目前控制科学研究领域的一个热点课题,在许多国际期刊及会议中,每年均有大量关于多智能体系统的研究文章出现。

多智能体系统由个体的动态模型、通信网络拓扑、分布式控制律 (或者协议/规则) 三个基本要素构成。本书以多智能体系统协同群集运动控制为主线,围绕上述三个基本要素,首先介绍图论和控制器设计所用到的基础性理论等背景知识;其次面向典型应用,考虑实际约束条件,分别从拓扑结构的边保持和代数连通度两个角度介绍通信连通性保持条件下的协同群集运动控制协议设计方法;进而,从个体动态模型和拓扑结构模型两方面继续深入,针对典型的轮式移动机器人非完整约束模型介绍连通性保持条件下的协同控制策略,为简化系统拓扑结构对控制器设计的影响,介绍基于骨干网络提取的协同群集运动控制策略;书中还将个体动态模型由简单的一阶、二阶线性模型提升到高阶非线性系统模型,介绍高阶非线性系统协同控制协议设计方法;最后针对多智能体系统非合作行为检测与隔离进行详细介绍,并提出相关算法。本书内容自成体系,旨在向读者详细介绍多智能体系统协同群集运动控制的基础理论和最新研究成果。

本书由 11 个章节构成。第 1 章为基础知识部分,首先对多智能体群集运动控制、一致性控制以及非合作行为检测与补偿进行全面的综述,其次介绍在理论推导过程中所用到的代数图论的基础理论知识。第 2 章介绍在无法获取动态领航者智能体的加速度信息的条件下,进行连通性保持的有界群集运动控制方法。第 3 章从

全局连通性的角度,介绍基于代数连通度分布式估计的连通性保持控制方法。第4章针对非完整约束轮式机器人,介绍连通性保持下的多移动机器人集群控制。第5章介绍层次型骨干网络的建立方法,以及基于骨干网络提取的协同避障运动控制方法。第6章针对参数不确定的高阶非线性多智能体系统,设计分布式控制器实现系统的一致性。第7章针对 Brunovsky 型高阶非线性多智能体系统,设计分布式一致性控制器。第8章针对高阶非线性多智能体系统,设计自适应鲁棒一致性控制器,并对控制器性能进行分析。第9章在多任务约束下,设计多智能体一致性控制器。第10章介绍一阶多智能体系统的非合作行为检测、隔离与修复算法。第11章介绍基于邻居相关状态的多智能体非合作行为检测与隔离算法。

感谢中国自动化学会控制理论专业委员会、《系统与控制丛书》编委会对本书出版的大力支持。本书得到了国家杰出青年科学基金项目(60925011)、国家自然科学基金创新研究群体项目(61321002、61621063)、国家自然科学基金重大国际合作研究项目(61120106010)、国家自然科学基金项目(61573062、61304215、61673058)、北京市优秀博士学位论文指导教师科技项目(20131000704)的资助,在此表示衷心的感谢。同时,还要感谢本领域相关同行学者在本书撰写过程中给予的热心支持,以及毛昱天、黄捷、杨庆凯、李俨、尉越、卢少磊、吴楚、王雪源、商成思、开昱雄、罗明等同学对本书出版给予的大力帮助。

由于作者水平有限,书中疏漏和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2016年11月

目 录

编者的话

序言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 多智能体分布式群集运动控制	1
1.2 多智能体一致性控制概述	5
1.2.1 低阶积分器多智能体一致性	6
1.2.2 高阶线性多智能体一致性	11
1.2.3 高阶非线性多智能体一致性	17
1.3 多智能体非合作行为检测与补偿概述	21
1.4 代数图论背景知识	26
第 2 章 连通性保持条件下多智能体系统群集运动控制	31
2.1 研究背景	31
2.2 问题描述	31
2.3 领航跟随群集运动控制律	32
2.4 稳定性分析	34
2.5 仿真和实验	37
2.5.1 数值仿真	37
2.5.2 实物实验	40
2.6 结论	43
第 3 章 基于代数连通度估计的多智能体系统群集运动控制	44
3.1 研究背景	44
3.2 问题描述	44
3.3 控制律设计	46
3.4 λ_2 的分布式估计	47
3.5 稳定性分析	52

3.6	仿真和实验	55
3.6.1	数值仿真	55
3.6.2	实物实验	58
3.7	结论	60
第 4 章	连通性保持下多移动机器人群集控制	62
4.1	研究背景	62
4.2	问题描述	62
4.3	群集运动控制器设计	63
4.3.1	不带有领航者的群集运动控制	63
4.3.2	带有领航者的群集运动控制	67
4.4	仿真和实验	70
4.4.1	数值仿真	70
4.4.2	实物实验	72
4.5	结论	77
第 5 章	基于骨干网络的多智能体系统群集运动与避障控制	78
5.1	研究背景	78
5.2	预备知识	78
5.2.1	问题描述	78
5.2.2	流体力学基础	79
5.2.3	流函数	79
5.3	总体控制策略	81
5.3.1	分布式拓扑控制	82
5.3.2	分布式运动控制	86
5.4	仿真和实验	93
5.4.1	数值仿真	93
5.4.2	实物实验	98
5.5	结论	99
第 6 章	参数不确定的高阶非线性多智能体系统一致性控制	101
6.1	研究背景	101
6.2	问题描述	101

6.3	分布式控制器设计	102
6.3.1	基于邻居信息的虚拟控制	102
6.3.2	控制器设计过程	102
6.4	数值仿真	108
6.5	结论	112
第 7 章	Brunovsky 型高阶非线性多智能体系统一致性控制	114
7.1	研究背景	114
7.2	问题描述	114
7.3	分布式控制器设计	116
7.3.1	基于邻居信息的分布式虚拟控制器设计	116
7.3.2	基于邻居信息的模糊逻辑系统	116
7.3.3	控制器迭代设计过程	117
7.4	数值仿真	124
7.5	结论	128
第 8 章	高阶非线性多智能体分布式自适应鲁棒控制	129
8.1	研究背景	129
8.2	问题描述	129
8.3	自适应鲁棒一致性控制	130
8.4	主要结论和系统稳定性分析	133
8.5	自适应鲁棒一致性控制器性能分析	135
8.6	数值仿真	135
8.7	结论	138
第 9 章	多任务约束下多智能体协同编队控制	139
9.1	研究背景	139
9.2	问题描述	139
9.3	多任务约束协调与求解	140
9.4	多任务切换与编队控制器设计	141
9.5	系统稳定性分析	145
9.6	仿真和实验	149
9.6.1	数值仿真	149

9.6.2	实物实验	151
9.7	结论	152
第 10 章	一阶多智能体系统非合作行为检测与隔离	154
10.1	研究背景	154
10.2	系统模型及非合作行为建模	154
10.2.1	系统建模	154
10.2.2	非合作行为定义	155
10.2.3	非合作行为建模	156
10.3	一阶多智能体系统非合作行为检测、隔离与修复	157
10.3.1	问题描述	157
10.3.2	非合作行为检测、隔离与修复算法设计	159
10.3.3	仿真和实验	167
10.4	结论	173
第 11 章	基于邻居相关状态的多智能体非合作行为检测与隔离	174
11.1	研究背景	174
11.2	基于邻居相关状态的非合作行为检测	174
11.2.1	问题描述	174
11.2.2	非合作行为检测模型的构建	176
11.2.3	非合作行为检测算法的设计	182
11.2.4	数值仿真	186
11.3	非合作行为检测信息的交互与融合	191
11.3.1	问题描述	191
11.3.2	检测信息的交互与融合方案	191
11.3.3	数值仿真	196
11.4	结论	197
参考文献		199

第1章 绪 论

1.1 多智能体分布式群集运动控制

智能体一般是指一个物理的或抽象的实体，它能感知到自己所处的环境，并能正确调用自身所具有的知识，对环境做出适当的反应。多智能体系统并没有一个严格的定义，通常是指由多个智能体及其相应的组织规则和信息交互协议构成的，能够完成特定任务的一类复杂系统。其中，组织规则决定智能体之间的连接关系，信息交互协议用于确定及更新智能体的状态。在现实世界中存在大量多智能体系统的实例，例如，鱼群自发地聚集洄游，多只蚂蚁协作搬运食物，牛群有组织地迁徙，鸟群成群结队地飞行等(图 1.1)，这类系统往往包含数量庞大的个体，但个体本身的智能程度却极为有限。在群体的行进过程中，并没有哪个个体能够对剩余个体进行全局的控制，信息的获取与交换也局限在有限的范围内，而正是这种简单的运行方式，却创造出了纷繁复杂的群体行为。

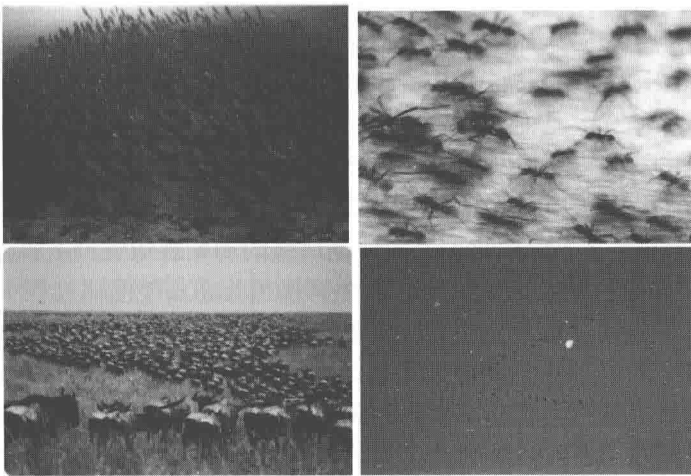


图 1.1 自然界中多智能体系统实例

受此类自然现象启发，学者提出了人工多智能体系统的概念，并从拓扑学及控制理论等角度对其进行了深入的研究。现阶段人工多智能体系统及其相关理论已经被应用在诸多领域，如无人机编队飞行、无人地面车辆自主行进与协作、电网系统的智能控制与调度等。未来，随着无人设备的不断推广及生产过程中自动化水平

的不断提高,传统的面向单一对象的控制理论将很难满足实际的控制需求,而多智能体系统因其功能强大、结构灵活、可扩展性强等特点必将得到越来越广泛的应用。

近年来,群集运动控制作为多智能体系统分布式协同控制中的典型问题受到了各领域研究人员的广泛关注。群集运动具有适应性、鲁棒性、分散性和自组织性等特点,使其有着极其重要的实际应用,如无人驾驶飞机编队、地面机器人集群作战和 underwater 机器人地形探测等。网络化多智能体系统的分布式群集运动控制的相关理论可以为编队控制、区域覆盖和探索、战场监视和侦察等空间分布式协作任务提供解决方案^[1-5]。1987年,Reynolds 首先提出了 Boids 模型,该模型由分离性、聚集性和速度校准三个启发式准则构成^[6]。受到上述模型的启发,Tanner 和 Olfati-Saber 等提出了一类基于速度一致性结合人工势场函数的群集运动控制算法^[3, 4]。特别针对具有切换拓扑结构的系统,采用集值映射和非光滑李雅普诺夫稳定性理论对系统的收敛性进行了分析^[3]。文献 [7] 对多智能体系统不施加任何连通性假设的随机框架进行了理论分析,证明了智能体在交互半径及速度不变的情况下,且群体数量足够大时系统的收敛性。文献 [8] 利用测地线控制的方法最小化势能函数来实现群集控制。其中所有智能体在一个圆周或者球面上运动,其速度大小保持不变,通过设计相应的控制规则来调整速度的方向以使所有智能体的速度矢量渐近趋同,并且使智能体之间的相对位置偏差保持不变。此外,诸如避障、到达等很多附加规则也被融入原始的群集运动算法中^[4, 9, 10]。特别地,Olfati-Saber 等提出了带有虚拟领航者的分布式群集运动控制的一般性理论框架^[4, 9],其中 β 和 γ 智能体被引入系统中,从而可有效实现智能体对障碍物的规避和虚拟领航者的精确跟踪。

正如文献 [3] 和 [4] 所述,上述群集控制策略严格依赖于网络拓扑在演化过程中的连通性。然而,在实际应用中只能保证网络的初始连通性,并不能保证网络在动态切换过程中的连通性。因此,为了避免网络拓扑在系统演化过程中发生分割从而导致任务执行失败的现象发生,应重点研究面向具体控制任务的带有连通性保持功能的系统分布式群集运动控制策略,这对于确保大规模分布式多智能体系统群集运动控制的稳定性具有非常重要的理论意义和现实意义。

为此,国内外学者针对多智能体系统群集运动中的连通性保持问题开展了深入研究,研究成果大体上可以分为局部连通性保持方法和全局连通性保持方法两大类。其中局部连通性保持方法是指在网络拓扑初始连通条件下,使网络中所有的初始通信连接都能够得到保持。其基本思想为利用通信拓扑的连通性依赖于智能体的空间位置分布的性质,考虑通过引入势场力的作用来控制个体的间距以实现网络的连通性控制,通过吸引力和排斥力的综合叠加使系统在收敛到期望的目标构形的同时实现网络的通信连通性保持。该方法的本质为通过赋予邻接智能体

之间拓扑连接一定的非线性权重 (张力作用), 使其相对距离达到通信半径时张力为无穷大来实现连通性保持。这类方法的优点为可以对连通性的保持给出严格的理论证明。然而, 实际上智能体之间的相对位置在运动过程中可能会发生变化, 从而导致总体拓扑结构的动态切换和重组, 以适应环境和任务的动态变化而具有灵活变形的能力。若要求保持网络中所有的初始拓扑连接, 将会使智能体之间的运动约束过于严格, 因而大大局限了算法的应用性和推广性。而网络拓扑的全局性控制方法可以较好地克服上述方法的缺陷, 众所周知, 网络拓扑图对应的拉普拉斯 (Laplacian) 矩阵的第二小特征值 λ_2 (代数连通度) 直接反映了整个网络的连通程度和一致性控制算法的收敛速度。因此, 可考虑从代数图论的相关理论出发, 通过控制群体通信拓扑所对应的拉普拉斯矩阵的代数连通度的方法来优化系统的通信拓扑, 即基于拉普拉斯矩阵的谱特征并运用分布式优化与控制的方法使网络的代数连通度恒为正来保证网络的连通性。这类方法的优点为不对网络中的任何拓扑连接施加约束, 可实现任意连通网络拓扑之间的切换。其中具有代表性的方法有几何约束法与谱图理论法。几何约束法首先由 Spanos 和 Murray 提出^[11], 该方法此后被 Savla 等推广至二阶系统^[12]。通过保持网络化多机器人系统的局部几何连通鲁棒性, 可以实现网络的全局连通性保持。对于谱图理论法, 相应的控制方法又可以进一步划分为两个分支。一类为通过次梯度优化和半正定规划 (SDP) 等集中式和分布式优化方法来实现网络的代数连通度 (algebraic connectivity) 的最大化, 进而实现网络的全局连通性保持与优化^[13]。另一类为采用分布式特征值/特征向量估计方法与分布式平均值估计方法相结合来使网络的代数连通度 λ_2 恒为正, 从而实现连通性保持^[14, 15]。国内方面, 对于多智能体拓扑的全局连通性控制的研究还刚刚起步, 其中具有代表性的工作为席裕庚和李晓丽等针对双积分器系统, 通过将改进分布式幂迭代特征值估计算法与全局连通性保持势场函数相结合, 有效地实现了网络全局连通性保持条件下系统的分布式群集运动控制^[16]。

据作者所知, 上述控制方法存在的共同缺陷为控制律中所采用的人工势函数为无界函数, 其实现连通性控制的基本思想为: 当初始邻接的智能体之间的距离等于邻接距离 (通信半径) 时, 无界势函数的梯度为无穷大, 从而产生无穷大的吸引力, 使得相应的通信连接不会脱离彼此的通信范围, 从而实现连通性保持。上述连通性保持的思想本质上是基于势函数梯度在通信半径处的无界性来保证的, 其在理论上无法保证网络的连通性在有限的势场力作用下能够得到保持, 当然也无法获得可以使网络连通性能够得到保持的势场力的上界。然而, 在实际应用中, 智能体本身携带的执行器仅具有有限执行能力, 如移动机器人或机械手的驱动电机无法产生无穷大的力矩, 因而导致所得到的无界控制器具有本质局限性。一方面, 尽管在文献 [17]~[20] 中, 有关作者设计出有界势函数用以产生有界的控制输入, 但是其理论结果仅对一阶积分器模型有效。不仅如此, 控制器的设计是基于系统中不

会出现多于一对的智能体发生碰撞,而且也不会出现同一个智能体同时和其他智能体发生碰撞和丧失连通性等相对保守的基本假设条件。另一方面,在现有的关于带有动态领航者的系统群集运动控制的研究结果中,往往需要对系统的信息交互施加更加苛刻的约束条件,即或者领航者的速度为恒值^[21, 22],或者领航者的加速度信息可被所有跟随者精确获知^[23-25]。

此外,目前有关多智能体群集运动控制算法中的连通性保持问题的研究往往只涉及通信网络拓扑为无向图的情形,所考虑的智能体的运动模型也多为相对简单的一阶、二阶线性积分器模型。因而,导致其存在下述固有缺陷:研究中假定智能体均不具有非线性动力学模型或者其具有的非线性动态可以完全线性化。然而实际应用中,智能体的运动学/动力学模型通常会包含本质非线性动态^[8, 26, 27]。特别地,对于工业和军事应用,当处理非完整约束轮式移动机器人和非完整约束机械手的协调与协作时,必须充分考虑其运动学/动力学模型中所包含的本质非线性动态^[28, 29]。此时,传统的仅针对线性积分器系统而设计的群集控制算法显然无法使用。大多数连通性保持群集控制算法的设计均针对无向网络^[11, 13, 30, 31]或有向平衡网络^[13]。然而实际应用中,由于各智能体所配备的通信和感知设备在功能和结构的异构性以及自身硬件信息传播和接收能力的互异性,系统的通信拓扑大多只能用有向网络描述,从而导致智能体间的信息交互关系不完全对等,因而使传统的面向无向对称网络拓扑而设计的群集控制算法在信息交互发生对称性破缺的条件下无法使用。

目前,关于多智能体系统群集运动控制中的网络连通性保持和避障控制问题,绝大多数相关算法存在如下不足:绝大多数连通性保持控制算法需要保持网络中所有现存的拓扑连接,这往往会产生很多不必要的冗余拓扑连接,因而使智能体的运动范围具有较大的局限性,这将导致网络的整体性能指标下降,严重时可能无法完成指定的任务目标。特别地,如文献 [4] 所述,保持网络当前所有的拓扑连接可能会阻碍期望群集构形的实现。在很多情形下,实际的网络拓扑结构高度复杂,很难使网络中所有的通信连接的长度彼此相等以实现理想的 α -晶格状群集几何构形。此外,绝大多数群集运动控制算法基于平面型网络拓扑结构模型,网络模型本身缺乏良好的可扩展性和对任务及环境的适应性。尽管现有文献中已有很多关于群集运动中的避障控制和连通性保持的结果,但是对于它们的研究往往人为地彼此割裂,没有形成统一的整体。对于运动控制过程中同时实现连通性保持与障碍物规避的问题至今仍然是一个开放性问题,具有很大的挑战性。尽管文献 [19] 和 [20] 中使用导航势场函数初步实现了连通性保持和障碍物规避,然而,其理论结果只适用于用一阶线性积分器模型描述的多智能体系统。而且,其相关理论结果成立的假设前提为:系统中几乎不会同时发生多于一对的智能体之间的彼此碰撞;对于同一智能体,当其即将与某一邻居智能体或某一障碍物发生碰撞时,不存在另外与其邻