

墨香财经学术文库

“十二五”辽宁省重点图书出版规划项目

Applications of Swarm

Intelligence in
Distributed Network Systems

群体智能在分布式 网络系统中的应用

王宗尧 著

FE 东北财经大学出版社
Dongbei University of Finance & Economics Press



墨香财经学术文库

“十二五”辽宁省重点图书出版规划项目

Applications of Swarm

Intelligence in
Distributed Network Systems

群体智能在分布式 网络系统中的应用

王宗尧 著

© 王宗尧 2015

图书在版编目 (CIP) 数据

群体智能在分布式网络系统中的应用 / 王宗尧著. —大连: 东北财经大学出版社, 2015.6

(墨香财经学术文库)

ISBN 978—7—5654—1935—5

I. 群… II. 王… III. 人工智能—应用—分布式计算机—网络系统—研究

IV. ①TP18 ②TP338.8

中国版本图书馆CIP数据核字 (2015) 第099353号

东北财经大学出版社出版发行

大连市黑石礁尖山街217号 邮政编码 116025

教学支持: (0411) 84710309

营 销 部: (0411) 84710711

总 编 室: (0411) 84710523

网 址: <http://www.dufep.cn>

读者信箱: dufep@dufe.edu.cn

大连图腾彩色印刷有限公司印刷

幅面尺寸: 170mm×240mm 字数: 171千字 印张: 12 插页: 1

2015年6月第1版 2015年6月第1次印刷

责任编辑: 李 季 石建华 责任校对: 王 娟 毛 杰

封面设计: 冀贵收 版式设计: 钟福建

定价: 38.00元

本书受到国家自然科学基金项目(61304180, 71272052)、教育部人文社会科学研究青年基金项目(12YJCZH211)、中央财政支持地方高校发展专项资金项目(DUFE2014R12)的资助, 特此表示感谢!

前言

本书作者自 2003 年至 2008 年，就读于英国埃塞克斯大学，获得英国电子工程学硕士学位，以及英国群体人工智能学博士学位。期间发表多篇具有学术影响力的论文，并被 SCI 收录。本书的撰写就是基于这些论文的观点和成果而成的。期望该书的出版能够对国内信息管理专业的研究起到积极的推动作用。

群体智能理论起源于意大利学者道瑞格提出的蚁群优化算法。道瑞格发现，自然界中某些低等生物可以依靠群体的力量获得优势。在这些群体生物中，单个个体没有很高的智能，但个体之间通过分工合作、相互协调，能够完成复杂的任务，并且表现出比较高的智能。而且，当群体之间相互合作或竞争时，一些以前不存在于任何单独个体中的智慧和行为会很快出现。群体智能概念的提出引起了多个学科领域研究人员的关注，并成为人工智能以及经济、社会、生物等交叉学科的热点和前沿领域。

群体智能的出现还促进了分布式系统的发展。分布式系统将一个需

要非常巨大的处理能力才能解决的问题分成许多小的部分，然后把这些部分分配给子系统进行处理，最后把处理结果综合起来得到最终的结果。分布式系统不但解决了传统集中式系统的计算瓶颈问题，还提高了系统的可靠性、可用性和扩展性。

本书以群体智能系统为基础，从机器人自由式群体、分布式交通网络和金融系统网络的角度阐述了基于协商式算法的分布式网络系统控制策略，详细阐述了这些控制方法的理论依据和性能指标，并深入探讨了将群体智能应用于工程问题的可行性和实用性。

本书以群体智能与分布式网络系统相结合为特色，以群体智能模型为研究对象，以生物群体的行为作为应用导向，研究群体智能产生的动力学特征和机理，可为复杂网络信息系统、大型分布式控制系统等提供重要的理论技术和实践方法。

本书适合正在或即将从事复杂系统、网络行为学、群体智能和人工智能研究的学者参考，也适合网络和计算机智能相关领域的本科生、硕士生、博士生、教师作为教材使用。

作 者

2015 年 5 月

目录

第 1 章 概述 / 1

- 1.1 群体智能简介 / 1
- 1.2 群体智能的发展和应用 / 5
- 1.3 群体智能系统的研究难点 / 7
- 1.4 群体智能的研究方法 / 8
- 1.5 本书结构 / 11

第 2 章 群体智能的研究历史 / 13

- 2.1 群体智能的起源和发展 / 13
- 2.2 机器人自由式群体的一致性控制 / 14
- 2.3 机器人自由式群体的分离控制 / 16
- 2.4 机器人自由式群体的凝聚控制 / 17
- 2.5 机器人自由式群体的领导者—跟随者策略 / 19
- 2.6 群体智能系统的合作式决策 / 20

- 2.7 基于群体智能的交通网络研究 / 22
- 2.8 基于群体智能的金融系统研究 / 24
- 2.9 结论 / 25

第 3 章 自由式群体分离控制 / 27

- 3.1 机器人模型 / 28
- 3.2 自由式群体模型 / 30
- 3.3 系统稳定性 / 33
- 3.4 自由式群体性能评估参数 / 34
- 3.5 模糊逻辑势能方程 / 35
- 3.6 模糊逻辑控制器设计 / 39
- 3.7 真实机器人控制器 / 46
- 3.8 机器人实验 / 48
- 3.9 结论 / 57

第 4 章 自由式群体的凝聚控制 / 58

- 4.1 群体中心位置估计 / 59
- 4.2 自由式群体控制器 / 62
- 4.3 控制器特性 / 64
- 4.4 模拟实验 / 67
- 4.5 机器人实验 / 71
- 4.6 结论 / 85

第 5 章 自由式群体目标跟踪 / 86

- 5.1 卡尔曼滤波器 / 87
- 5.2 协商式卡尔曼滤波器 / 88
- 5.3 模拟实验 / 90
- 5.4 实验 / 95
- 5.5 三维空间中的自由式群体 / 105
- 5.6 结论 / 111

第 6 章 基于群体智能的交通网络控制 / 113

- 6.1 交通网络模型 / 113
- 6.2 NaSch 车辆运动模型 / 116
- 6.3 智能交通网络控制机制 / 117
- 6.4 模拟实验 / 121
- 6.5 随机路网模拟实验 / 130
- 6.6 结论 / 136

第 7 章 基于群体智能的金融网络管理系统 / 138

- 7.1 金融系统的模型化 / 138
- 7.2 单个金融机构的风险预警 / 141
- 7.3 分布式的金融风险传染预警策略 / 142
- 7.4 协商式资金分配 / 146
- 7.5 风险预测模拟实验 / 148
- 7.6 资金控制模拟 / 156
- 7.7 结论 / 160

第 8 章 研究结论及展望 / 161

- 8.1 机器人自由式群体系统 / 161
- 8.2 智能交通网络控制系统 / 162
- 8.3 金融网络管理系统 / 163
- 8.4 未来发展方向 / 163

主要参考文献 / 165

索引 / 181

第 1 章 概述

1.1 群体智能简介

自然界中生物群体的聚集和协作行为可以帮助群体中的个体获得更多的生存机会。例如，鸟类借助同伴挥动翅膀产生的气流来节省能量（图 1-1（a）），鱼群借助群体行为来躲避猎食者（图 1-1（b）），兽群通过集体狩猎的方式增加获取猎物的机会（图 1-1（c））[1]。通过对生物群体的观察，生物学家发现了很多有价值的群体行为规律，并试图利用数学方法建立群体智能模型来模拟生物的群体行为[2]。

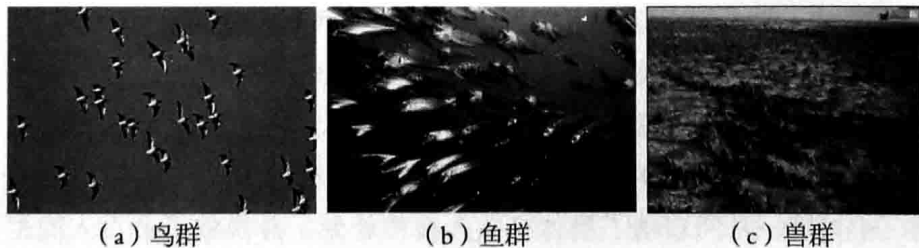


图 1-1 生物群体行为

群体智能系统可以定义为多个人工智能体通过相互沟通合作实现单

个智能系统无法完成的任务。作为一套复杂的人工智能系统，群体智能系统具有绝佳的鲁棒性、灵活性和延展性[3]，因此群体智能系统在机器人、交通控制、金融系统等领域得到了广泛的应用。

1.1.1 群体智能在机器人领域中的应用

最早的军用机器人在第二次世界大战期间就被用来扫雷和侦查[4]。随着机器人技术的发展，群体机器人系统也应用在现代战场上。BAE 公司刚刚推出了“群体军用机器人”，该系统的主要作用是提高军事侦察效率。该系统包含一群装备无线通信设备的微型机器人，机器人通过合作的方式对敌方战场进行全面侦查。GRASP 实验室也在最近提出了“MARS”计划，该项目的主要目的是控制一群小型机器人对危险环境下的地形进行勘测。该系统还被应用于反恐（侦查恐怖分子行动或探测危险化学药品泄漏源）。群体机器人系统在军事领域的应用还包括自主无人机编队控制[5]、军事集结[6]以及协同攻击[7]。

群体机器人系统在地外行星探索方面的作用也不容小觑。类似于军事上的应用，群体机器人系统在外星探索方面的主要作用是在极端环境下勘测地形和探索。在该领域比较著名的研究项目是 NASA 喷气动力学实验室发起的 CAMPOUT 计划[8]，该项目的主要目的是利用群体机器人在地外行星进行初步的勘测，建立前哨站，为后续的人类登陆奠定生存基础[9]。

群体机器人系统的另一个重要应用是执行危险环境下的救援任务。与传统搜救人员（人类）不同，机器人不会感到恐惧，而且微型机器人可以穿梭于微小的废墟缝隙之间。如果将一大群微型机器人分散到灾难现场，可以极大地提高搜救效率，增加幸存者的生存概率[10]。群体机器人可以为幸存者传递食品和药物，清除瓦砾，并侦测受害者在废墟中的位置[11]。在“9·11 世贸大厦倒塌”事件发生后，美国机器人搜救中心[12]第一时间启动了群体机器人搜救计划，并挽救了上百人的生命。该计划的主要任务包括：搜寻遇难者、寻找救援的最佳路径、结构检测和危险材料检测。为了发展群体机器人救援系统，Robocup 每年都会举行“RoboCup 救援比赛”，主要目的是提高多机器人救援系统的

研究与开发环境。

由于纳米技术和微观机械的发展,纳米机器人也成了群体机器人系统发展的重要基石。创建一个微观群体机器人已经不再是科学幻想。在文献[13]中,作者讨论了如何利用一群纳米机器人杀死残留在人体中的肿瘤细胞。“Swarm Intelligent Systems Group”利用一组超小型机器人“Alice”检查大型发电机组内部的裂缝[14]。另外一些项目使用控制群体机器人的方法来控制大型的分布式系统。例如,控制机场航班起降、控制公路交通网络流量[15]、控制无线网络通信[16]、创建动画[17]和管理金融系统[18]等。

1.1.2 群体智能在交通控制中的应用

随着经济的快速发展和城市化进程的加快,城市车辆快速增长,大中城市的交通拥堵问题日趋严重。各大城市都在努力拓展交通网络,同时也推出各种限制车辆出行的政策和方法来缓解交通拥堵。然而这些方法的作用都是有限的。第一,车辆的增长速度远高于交通网络的建设速度。第二,城市的格局是固定的,一定程度上限制了路网的建设。因此,利用智能交通控制技术解决交通拥堵问题已成为一个重要的研究领域[19]。智能交通控制技术的目的是最大化利用道路资源,而不是建设新的道路。众所周知,道路交叉口阻塞是造成交通拥堵的主要原因,因此,在智能交通控制领域中,对交通信号灯的优化控制是研究的重点[20]。

传统的交通信号灯控制大多采用固定时序。也就是说,交叉路口的红绿灯控制时间是固定不变的。由于车流量变化并不是随机过程,而是一种伪随机过程[21],所以很难根据交叉路口的车流量状况,建立一个准确的数学模型来控制红绿灯时间。而且,固定时序的交通灯控制方法无法实现相邻路口的相互沟通协调,因此很容易导致车辆的排队现象发生。为了解决固定时序控制方法的诸多限制,出现了很多智能化的交通控制策略。这些智能化控制策略通常被应用于单个或少量的交叉路口[22][23]。对于包含多个交叉路口的大型交通网络,它们之间的相互依存性使其很难设置适当的信号。解决这个复杂系统问题的最佳方案就是

采用群体智能技术实现智能化的分布式交通网络控制。

群体智能技术是开发大型分布式控制系统的有力工具。群体智能非常适用于交通网络一类的大型动态分布式系统[24]，它可以把大型的分布式动态系统分成若干由智能体控制的子系统，这些智能体之间互相沟通协作，从而共同实现一个全局任务。基于群体智能的交通网络控制系统是将交通网络中的控制器（通常是交通信号控制器）视为智能体。智能体之间相互沟通合作，并根据实时交通状况进行交通控制管理。

1.1.3 群体智能在金融系统中的应用

随着同业间市场的迅速发展，金融机构间债务已将众多金融机构紧密联系在一起形成了一个复杂的金融网络。金融网络在推动金融机构发展的同时也给金融业带来一些问题[25]。在金融网络中，金融机构可以快速的借入或借出大量资金，方便了金融机构的流动性管理，形成了金融机构之间的相互保护。然而，在金融危机时期，金融网络的相互保护机制会失灵，相反转向了相互传染。仅仅一个金融机构受到冲击，可能导致风险在整个网络中的蔓延，甚至引发全球金融危机[26]。2008年的美国次贷危机和2010年的欧债危机都已证明金融网络的高度复杂性和不稳定性，而越来越多的群体智能理论被应用到金融网络的风险传染研究中。

尽管群体智能在其他领域已经得到了广泛的应用，但在金融领域的应用却刚刚起步。在1983年，戴蒙德-戴威格提出了以群体智能为基础的金融网络模型（简称D-D模型）[27]。以D-D模型为基础，出现了大量基于群体智能的金融系统研究。2000年，艾伦-格雷以D-D模型为基础，建立了银行间市场的群体网络模型[28]。该模型致力于研究流动性冲击对银行网络的影响。海德瑞克在文献[29]中采用D-D模型对现有的金融市场做出分析和研究，海德瑞克利用群体网络模型详尽分析了金融系统从繁荣到衰退的演化过程，并再现了经济泡沫破裂后，企业与家庭破产等现象与相应的机制。布鲁索-卡斯汀格雷在D-D模型的假定条件中加入金融机构的信用风险机制[30]，该项研究描述了银行

财务状况恶化时会减少对外贷款，导致其他银行出现融资困境，从而导致金融危机在金融网络的快速传染和传播。

1.2 群体智能的发展和应用

群体智能系统的研究历史只有短短的 20 年，辛勤的研究人员经过不懈努力，研发出了大量基于群体智能技术的分布式系统控制方法。本书将深入研究群体智能算法，并探讨如何利用群体智能建立机器人自由式群体系统、分布式智能交通网络管理系统和群体智能金融管理系统。

1.2.1 基于群体智能的群体机器人系统

在生物群体中，群体跟随某一个经验丰富的领导者进行迁徙活动是一种常见的自然现象。作为进化的必然结果，生物群体系统的“领导者—跟随者”策略已经发展为一个几乎完美的生存机制。生物群体的行为给了我们一个很好的启示：群体中的少数领导者的行为能够影响整个群体的行为（例如：移动方向），而跟随者甚至不需要知道哪些个体是领导者[31]。根据生物群体的特性，在本书中我们将开发一套包含少数领导者的机器人自由式群体系统，简称自由式群体。该系统中，机器人之间的交互可以被视为相邻机器人之间的信息传输或传感器之间的相互探测。为了分析自由式群体系统，我们利用图论对自由式群体进行建模[32]。群体中的机器人可以视为图的节点，机器人之间的互动关系可以视为节点之间的连线。由节点和连线组成的拓扑图称为自由式群体网络。

本书提出的自由式群体系统具有以下特征：

1. 相邻机器人（邻居）保持特定的相对距离。
2. 机器人只使用本地交互实现自由式群体控制（本地交互是指机器人通过传感器或通信机制与邻居进行沟通）。
3. 自由式群体可以追随领导者或者虚拟领导者。
4. 只有领导者才能获得虚拟领导者的状态信息，而跟随者无法获知哪一个机器人是领导者。

- 5. 自由式群体能够探测和躲避障碍。
- 6. 自由式群体可以检测并跟踪特定的实体目标。

1.2.2 基于群体智能的分布式智能交通网络管理系统

本书还介绍如何利用群体智能建立分布式智能交通网络管理系统。该系统采用群体智能技术构建交通网络的车流量预警机制和控制机制。该机制利用拉普拉斯矩阵的收敛性，将车流量均衡地分配给各条道路，从而缓解道路资源分配不合理所造成的交通阻塞。智能交通网络控制系统由一组智能体组成，每个智能体负责控制一个交叉路口信号灯。智能体仅需要和相邻路口的智能体交换少量的信息就可以实现分布式控制。该智能交通系统不需要借助任何中央控制系统，每个智能体可以实时预测整个交通网络车流量变化，并快速调整相连路网中各条道路的车流量。这种分布式的控制方式不但提高了智能交通系统的鲁棒性和延展性，而且降低了建设成本。本书采用理论分析以及模拟实验等方式来测试系统性能，并通过车流量和车速等参数衡量系统的稳定性和灵活性。

1.2.3 基于群体智能的金融网络管理系统

金融机构间的风险传染已经成为了金融领域的热点话题。最近的研究主要集中在利用群体智能方法分析风险传染的破坏力，但还没有对这类风险的预警方法。这是因为中央系统的方法不能及时获得金融网络全部信息，无法实现风险预警。本书提出了一种基于群体智能的金融风险预警策略，来解决金融网络中风险传染的预警问题。首先，金融机构间的风险传染是群体特征，本书利用群体智能系统中的协商式算法作为其预警算法。在协商式算法控制下，金融机构可以实时获得金融系统整体风险预警信息。它能够解决中央式系统不能预警的问题。其次，本书在传统协商式算法中嵌入卡尔曼滤波器，保证了协商式算法在非稳定系统中能够收敛。在金融网络中，嵌入卡尔曼滤波器的协商式算法能够获得稳定的风险传染预警结果。最后，模拟实验表明分布式预警策略可以有效预测金融网络中的传染风险，同时，该策略在不同危机影响下、不同网络结构下都具有稳健性。

1.3 群体智能系统的研究难点

群体智能系统的研究重点集中在分布式控制器的设计上。“分布式”意味着没有中央控制机制,智能体仅仅依靠与相邻智能体之间的互动获取信息,并由此决定它们的控制行为。另外,一些大型的动态群体系统采用非固定的系统网络结构,邻居之间的互动关系不停变化。建立这样的高度智能化复杂系统将会遇到很多难点。

1.3.1 群体交互

如前所述,智能体只能通过邻居间的交互实现群体控制。无线通信可用于实现本地交互,因此需要建立一个连通的通信网络。然而通信延迟和丢包现象可能会极大地影响群体的控制性能,尤其是在大规模动态网络系统中,这种影响会愈加明显。使用本地传感器等非通讯方法能够克服通信延迟等问题,但使用本地传感器同样存在测量误差等问题。在设计群体系统的过程中,我们不得不使用模糊逻辑控制器、卡尔曼滤波器等工具降低噪声或者误差的干扰。

1.3.2 群体的凝聚控制

群体系统面临的另一个挑战是如何保持群体网络的连通性。处在群体中不同位置的智能体可能由于通讯网络延迟或者网络结构改变而与群体分裂。这种行为的结果是群体系统可能会分裂成几个单独的小群体。类似的现象在生物群体中经常出现[31],所以避免群体系统的分裂也是研究的难点。在分布式群体系统中,单个智能体无法获知交互网络的整体结构,也无法感知群体的分裂,因此,分布式网络凝聚控制机制是建立群体系统中极具挑战性的任务。

1.3.3 群体决策

在群体系统中,每个智能体都需要做出决策。智能体之间的决策结果可能不尽相同,这些决策分歧可能会给群体造成极大的负面影响。例

如，在机器人群体中，不同的决策结果可能造成群体分裂。交通系统中，智能体之间的分歧可能造成交通阻塞。金融系统中，智能体之间的分歧可能造成机构破产甚至金融危机。因此，使智能体之间做出一致性决策也是建立群体系统的难点。

1.4 群体智能的研究方法

1.4.1 机器人自由式群体系统

在自由式群体研究中，首先要实现机器人之间的距离控制。我们采用传感器实现机器人之间的交互。这种方法的优点是机器人仅仅依靠本地传感器就可以实现群体控制。机器人只使用机载传感器来测量邻居的相对位置，而不需要任何其他的全局信息。为了消除传感器的测量误差，我们采用模糊逻辑控制器实现群体的模糊控制。我们将带有误差的数据作为模糊逻辑控制器的输入，而模糊输出作为邻居之间的距离控制反馈。理论分析表明，基于模糊逻辑的自由式群体系统是一个稳定的系统，每个机器人都可以渐近达到一种稳定的平衡状态。我们利用 Matlab 模拟实验验证该方法的可行性，并采用真实的“Pioneer”机器人对系统的实用性进行验证。

本书中介绍的自由式群体系统，包含少数的领导者机器人和多数的跟随者机器人。只有领导者可以获得移动路径的全局信息，而跟随者有可能向错误方向移动并造成群体分裂。为了解决这个问题，我们提出了一种群体中心位置估计策略。每个机器人都可以利用该策略估计群体中心位置，并通过向群体中心位置移动保持群体的凝聚力。很显然，群体中心是一个全局信息，而计算群体中心的最简单方法是采用中心控制机制收集所有机器人的位置信息并进行平均计算。本书中提出的自由式群体系统是一个没有中心控制机制的分布式系统，因此我们采用协商式算法来估计群体的中心位置。该机制只要求群体成员与邻居进行信息沟通，因此它是一个完全分布式的算法。我们将采用控制理论和模拟实验对系统的稳定性进行分析，并利用一组 Wifibots 机器人对该系统的可行