

# 基于群体智能的 无人机集群自主控制

Unmanned Aerial Vehicle Swarm Autonomous Control  
Based on Swarm Intelligence

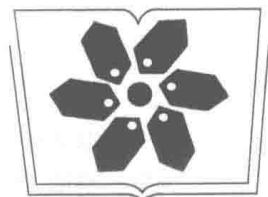
| 段海滨 邱华鑫 © 著 |



非  
外  
借



科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

# 基于群体智能的无人机 集群自主控制

Unmanned Aerial Vehicle Swarm Autonomous Control  
Based on Swarm Intelligence

段海滨 邱华鑫 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统深入地论述了基于群体智能的无人机集群自主控制的原理、模型、理论、仿真及验证。全书共 11 章, 首先概述了群体智能和无人机集群自主控制的新进展, 在分析自然界中的生物群体特性基础上, 建立了鸽群、雁群、狼群等典型生物群体智能模型, 研究了从群体智能到无人机集群控制的映射机理, 设计了基于群体智能的无人机集群自主控制框架。针对自主编队、任务分配、目标跟踪、资源分配等关键技术难题, 提出了基于群体智能的无人机集群自主控制方法, 并通过无人机集群飞行平台验证了相关技术。本书突出前沿学科交叉, 强调工程应用背景, 力求使广大读者能快速掌握和应用无人机仿生集群自主控制的理论、方法和技术。

本书可作为控制科学与工程、智能科学与技术、计算机科学与技术、系统科学、航空宇航科学与技术等相关学科领域科研工作者、工程技术人员、高等院校师生的参考书, 也可作为相关专业研究生和高年级本科生的教科书。

### 图书在版编目 ( CIP ) 数据

基于群体智能的无人机集群自主控制 / 段海滨, 邱华鑫著. —北京: 科学出版社, 2018.12

ISBN 978-7-03-059938-4

I. ①基… II. ①段… ②邱… III. ①无人驾驶飞机-集群-自动飞行控制 IV. ①V279

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 274984 号

责任编辑: 钱 俊 陈艳峰 / 责任校对: 杨 然  
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 有道文化

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>

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018 年 12 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2018 年 12 月第一次印刷 印张: 24 插页: 4

字数: 470 000

定价: 168.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## 序

随着信息技术特别是人工智能技术的飞速发展，作为“平台无人、系统有人”的无人机系统，在军事领域使现代战争模式正在发生重大变革，在民用领域催生了庞大的产业链，是社会经济发展的新动力。任务复杂以及动态不确定环境决定了无人机系统势必朝着集群化、自主化和智能化方向发展。无人机集群自主控制是当今无人系统领域的瓶颈性关键技术和研究热点。

“一骑初来只又双，全军突出阵成行。”自然界中的飞禽、走兽、游鱼等生物群体中，个体的感知、决策和行动能力有限，但能遵循简单规则，通过相互协作完成迁徙、觅食、筑巢、栖息、社群、御敌等复杂行为，在群体层面上呈现出有序的自组织协调模式。这种生物群集的智能涌现行为与无人机集群本质上十分吻合。通过研究生物群体智能，并将其映射到无人机集群控制领域中，可提高其在复杂环境条件下的智能决策、高效协调和自主控制能力，使集群系统中的无人机平台仅在局部感知能力下，通过与其他无人机及环境的相互作用来实现复杂任务。这是一条“换道超车”实现无人机集群飞行的新技术途径。

北京航空航天大学段海滨教授长期从事基于仿生智能的无人机自主控制研究，且成绩显著，形成了较为丰厚的研究积累，在国内外学术界和工业部门有较高认可度。该书正是作者及其研究组成员最近十多年来的部分创新成果总结，是一本难得的系统介绍无人机集群自主控制最新进展的学术专著。

该书遵循建模、理论、方法、仿真、集成和试飞的逻辑思路，在对生物群体特性分析和群体智能建模基础上，研究了从生物群体智能到无人机集群自主控制的映射机理，给出了基于群体智能的无人机集群自主编队、任务分配、目标跟踪、动态资源分配等技术，并进行了飞行验证。全书学科交叉性强，立题新颖，前瞻性强，结构严谨，内容阐述深入浅出，理论联系实际，对工程应用也具有重要参考价值。

我相信，该书的出版能够对无人机集群领域的研究发展有所帮助，对新一代人工智能颠覆性技术在无人机集群系统中的应用必将起到重要的推动作用。



中国工程院院士

2018年10月

## 前 言

无人化、智能化和集群化是现代飞行器技术发展的必然趋势。在拥有一定智能水平的低成本无人机集群系统中，具备部分或完全自主能力的无人机可在高级操作员监控下，通过分布式智能决策，以低成本、高分散的组织形式满足集群功能需求，以去中心化自组网提升系统高效信息共享、抗故障与自愈能力，以功能分布化提高体系生存率和效率交换比，引发了集群代替机动、数量倍增能力、成本创造优势的颠覆性变革。

生物群集行为是一种普遍存在的自然现象，鸟类、兽类、鱼类等群居性生物为适应生存环境，历经长期演化后，涌现出高度协调一致的群集运动。生物群体中的个体利用简单的规则、局部的交互，形成了鲁棒性强、自适应度高、可扩展性好的自组织行为，在系统层面体现为群体智能的涌现。这种具有无中心、共识主动性、简单性和自组织性等“散而不乱”的群体智能特点与无人机集群飞行的自主控制需求本质上十分吻合。通过借鉴自然界中的生物群体智慧，采用分布式策略设计自主控制算法，可为实现无人机集群自主控制提供一条新的技术途径。

自 2006 年起，作者在国家杰出青年科学基金(61425008)、国家自然科学基金重点项目(61333004)、国家自然科学基金重大研究计划(91648205)、国家自然科学基金面上项目(60975072、61273054)、国家自然科学基金青年基金(60604009)、中央军委科技委国防科技创新特区项目、国家 863 计划、武器装备预研、空军装备预研、海军装备预研、陆航装备预研、航空科学基金等课题持续支持下，对群体智能及无人机集群自主控制的机制原理、系统设计、关键技术进行了系统研究，并通过基于群体智能的无人机集群自主协调集成验证平台进行了大量飞行验证，形成了一定的研究积累。本书系统总结了依托上述课题所取得的部分研究成果，旨在为读者提供一部关于无人机仿生集群自主控制理论与技术方面较为全面系统的学术专著，为进一步提高无人机集群自主控制水平，促进相关领域的跨学科交流和发展抛砖引玉。

本书由 11 章构成。第 1 章一方面从无人机自主性入手简要论证了发展无人机集群的必然性，列举了国内外在无人机集群方面取得的最新进展；另一方面着眼于鸽群、雁群、狼群三种典型生物群体的机制研究，总结了群体智能的特点，归纳了现有群体运动模型，进而初步探讨了基于群体智能的无人机集群自主控制框架；第 2 章在回顾群集运动经典 Vicsek 模型的基础上，根据最新生物群集特性研

究成果,提出了三种改进 Vicsek 模型;第 3 章在第 2 章所建立的生物群集运动广泛模型基础上,对鸽群、雁群和狼群三种典型生物群体的突出特点进行建模;第 4 章给出了生物群体智能的行为到无人机群自主控制的典型映射机制;第 5 章至第 9 章在以上工作基础上,阐述了基于鸽群、雁群、狼群行为机制的集群编队和任务分配以及基于生物群集自组织的集群目标跟踪、动态资源分配等理论、方法和技术;第 10 章分别对第 5 至 9 章的部分关键技术进行外场飞行验证;第 11 章从发展趋势、关键技术、应用领域、发展战略等角度对群体智能与无人机集群自主控制的未来研究方向进行了展望。本书第二作者是我指导的博士,协助完成了本书部分章节的工作。本书内容自成体系,覆盖面较广,取材新颖,撰写过程中力求以点带面,并注重系统性。

衷心感谢无人机侦察技术专家、中国工程院樊邦奎院士在百忙之中认真审阅了书稿,给予了宝贵意见和建议,并为本书作序。感谢本领域相关同事和国内外同行专家、学者在本书撰写过程中给予的热心指导和宝贵建议。感谢北京航空航天大学仿生自主飞行系统研究组全体成员,特别感谢我的博士研究生邓亦敏、李沛、罗琪楠、孙昌浩、张祥银、张岱峰、孙永斌、申燕凯、徐小斌、辛龙、霍梦真、陈琳和硕士研究生马冠军、刘森琪、李霜天、周子为、朱威仁、张天捷、杨庆等同学的贡献和帮助。本书出版得到了中国科学院科学出版基金和中国航空学会“学术活动质量提升计划”学术专著出版项目的资助,在此表示感谢。

非常希望能献给大家一本无人机集群方面既有前沿理论又重视工程实践的好书,但囿于作者水平,书中难免存在疏漏和不妥之处,恳请各位专家、学者和广大读者不吝指正。

段海滨

Email: hbduan@buaa.edu.cn

2018 年 9 月于北京航空航天大学

# 目 录

序	
前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 无人机集群系统	5
1.2.1 无人机自主性	5
1.2.2 无人机集群特点	7
1.2.3 典型无人机集群系统	8
1.3 生物群体行为机制及模型	13
1.3.1 典型生物群体行为机制	13
1.3.2 群体智能行为特点	17
1.3.3 典型群体运动模型	18
1.4 仿生物群集行为的自主集群	21
1.4.1 生物群集与无人机集群的映射机制	21
1.4.2 基于生物群集行为的集群自主控制	22
1.5 本书体系结构	24
1.6 本章小结	25
参考文献	25
第 2 章 生物群体运动模型	30
2.1 引言	30
2.2 Vicsek 模型	32
2.2.1 模型描述	32
2.2.2 性能参数	33
2.2.3 个体分布图	35
2.3 基于随机视线方向的 Vicsek 模型	36
2.3.1 模型描述	36
2.3.2 随机视线方向对邻域范围的影响	38
2.3.3 同步性能分析	39
2.3.4 仿真实验分析	44

2.4	基于改进拓扑规则的 Vicsek 模型	49
2.4.1	拓扑距离规则	49
2.4.2	对拓扑距离规则的改进	50
2.4.3	仿真实验分析	52
2.5	基于分数阶微积分的 Vicsek 模型	55
2.5.1	分数阶微积分	55
2.5.2	分数阶 Vicsek 模型	55
2.5.3	仿真实验分析	56
2.6	本章小结	61
	参考文献	61
<b>第 3 章</b>	<b>典型生物群体智能建模</b>	<b>64</b>
3.1	引言	64
3.2	鸽群层级引领机制建模	66
3.2.1	基于改进拓扑交互规则的层级引领网络模型	66
3.2.2	鸽群交互行为规则建模	71
3.2.3	稳定性时延条件	80
3.2.4	仿真实验分析	83
3.3	雁群线性编队机制建模	85
3.3.1	大雁空气动力学模型	85
3.3.2	雁群群体行为规则	90
3.3.3	拓扑稳定性分析	92
3.3.4	仿真实验分析	95
3.4	狼群协同围捕机制建模	97
3.5	本章小结	102
	参考文献	102
<b>第 4 章</b>	<b>从生物群体智能行为到无人机集群控制</b>	<b>106</b>
4.1	引言	106
4.2	编队控制	107
4.2.1	模型及约束条件	107
4.2.2	姿态及位置控制	110
4.2.3	引领-跟随编队控制	112
4.2.4	基于鸽群优化的控制参数整定	115
4.3	无人机紧密编队控制	118
4.3.1	编队模型	119
4.3.2	长机尾流模型	120



4.3.3	长机尾流引起僚机气动力的变化	124
4.3.4	长机尾流干扰下的紧密编队模型	125
4.3.5	基于改进鸽群优化的紧密编队控制	128
4.4	仿鸽/雁群的无人机实时避障	133
4.4.1	仿鸽子飞行的无人机实时避障	133
4.4.2	仿雁群飞行的无人机实时避障	137
4.5	本章小结	142
	参考文献	142
<b>第 5 章</b>	<b>基于鸽群行为机制的无人机集群编队</b>	<b>146</b>
5.1	引言	146
5.2	基于鸽群行为机制的紧密编队及重构	147
5.2.1	基于鸽群智能的紧密编队控制方法	147
5.2.2	捕食逃逸鸽群优化测试	152
5.2.3	仿真实验分析	154
5.3	基于鸽群行为机制的集群编队及避障	168
5.3.1	基于鸽群层级引领的集群编队控制方法	168
5.3.2	鸽子飞行避障导引及改进人工物理避障测试	171
5.3.3	仿真实验分析	185
5.4	本章小结	190
	参考文献	191
<b>第 6 章</b>	<b>基于雁群行为机制的无人机集群编队</b>	<b>193</b>
6.1	引言	193
6.2	基于雁群行为机制的编队保持	195
6.2.1	基于雁群行为机制的编队构型设计	195
6.2.2	仿真实验分析	196
6.3	基于雁群行为机制的编队重构	201
6.3.1	基于头雁变换的队形变换	201
6.3.2	基于局部通信的队形变换	203
6.3.3	仿真实验分析	205
6.4	本章小结	219
	参考文献	219
<b>第 7 章</b>	<b>基于狼群行为机制的无人机集群任务分配</b>	<b>221</b>
7.1	引言	221
7.2	基于狼群劳动分工的集群静态目标分配	223
7.2.1	无人机集群静态目标分配建模	223

7.2.2	仿狼群劳动分工的目标分配	226
7.2.3	仿真实验分析	229
7.3	基于狼群游猎的集群动态任务分配	234
7.3.1	无人机集群动态任务分配建模	234
7.3.2	基于狼群游猎的动态任务分配	236
7.3.3	仿真实验分析	242
7.4	本章小结	248
	参考文献	248
<b>第 8 章</b>	<b>基于生物群集自组织的无人机集群目标跟踪</b>	<b>250</b>
8.1	引言	250
8.2	生物自组织运动群集模型	251
8.2.1	虚拟力框架下的群集模型	251
8.2.2	基于注意力机制的群集运动模型	254
8.3	集群协同目标跟踪控制	258
8.3.1	集群协同目标对峙跟踪	258
8.3.2	基于滚动预测的障碍物规避	269
8.3.3	仿真实验分析	274
8.4	本章小结	282
	参考文献	283
<b>第 9 章</b>	<b>基于群体智能的无人机集群动态资源分配</b>	<b>286</b>
9.1	引言	286
9.2	基于群体智能的合作进化动力学	287
9.2.1	网络进化博弈软控制	287
9.2.2	模型描述	288
9.2.3	动力学特性分析	292
9.3	基于群体动力学的无人机连续资源分布式优化	298
9.3.1	问题描述	298
9.3.2	基于进化博弈群体动力学的协调算法	302
9.3.3	仿真实验分析	314
9.4	本章小结	326
	参考文献	327
<b>第 10 章</b>	<b>基于群体智能的无人机集群自主协调集成飞行验证</b>	<b>329</b>
10.1	引言	329
10.2	基于群体智能的无人机集群飞行综合验证平台	331
10.2.1	硬件平台搭建	331

10.2.2 软件系统设计	333
10.3 集群自主协调飞行验证	335
10.3.1 基于鸽群行为的编队	335
10.3.2 基于雁群行为的编队	338
10.3.3 基于狼群行为的目标分配	344
10.3.4 基于群体智能的协同跟踪	351
10.4 本章小结	355
参考文献	355
<b>第 11 章 研究前沿与展望</b>	<b>357</b>
11.1 引言	357
11.2 发展趋势	358
11.3 关键技术	362
11.4 应用领域	365
11.5 发展战略	367
11.6 本章小结	368
参考文献	369

## 彩图

# 第1章 绪 论

## 1.1 引 言

从明朝万户飞天,到达芬奇扑翼机草图,再到莱特兄弟“飞行者1号”,人类的飞天梦想经过一代代人的大胆设想与不懈努力已最终实现<sup>[1]</sup>。随着数字时代的到来,无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)应运而生,它打破了曾经仅有少数人可以征服天空的固有格局。无人机,作为一种“平台无人,系统有人”的无人驾驶飞行器<sup>[2]</sup>,在执行枯燥、恶劣和危险(the Dull, the Dirty and the Dangerous, 3D)任务时,相比于有人机具有更大的优势<sup>[3]</sup>。

无人机的发展历史可以追溯到1914年,一项名为“AT计划”的军事绝密实验在英国悄然展开(如图1-1),该项计划的前期实验虽未取得成功,却掀起了航空发展史上的无人机热潮。三年后,美国成功使用自动陀螺稳定器改装Curtis N-9型教练机实现对其的无线电控制,第一架无人机就此诞生。1985年,中国第一架无人机——北京5号,历经坎坷终于在北京航空航天大学问世。中国无人机发展虽然起步较晚,但发展迅速,如今中国生产的各型无人机,如图1-2所示的被称为中国版“收割鹰”无人机的“彩虹四号(CH-4)”、“翼龙II”中空长航时察打一体无人机、中高空远程无人侦察机(BZK-005)、大疆公司推出的定位于专业级航拍的精灵(Phantom)系列无人机,在国际市场得到广泛认可,销量不断增加。



(a) 英国 AT 计划



(b) 美国 Curtiss N-9 遥控



(c) 北京 5 号

图 1-1 无人机起源



(a) 军用 CH-4



(b) 军用 BZK-005



(c) 民用 Phantom-2

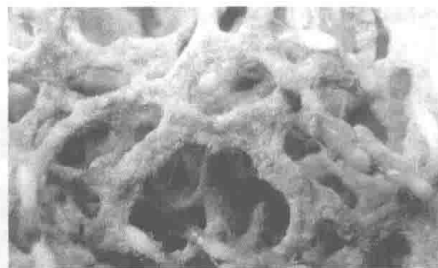
图 1-2 中国典型无人机

未来战场环境瞬息万变,随着电子信息技术的迅猛发展,飞行器在执行情报侦察与监视、攻防对抗等作战任务时所面临的情况越来越复杂,特别是在强干扰、高动态的对抗性拒止环境下,有人机的生存能力面临极大挑战。以战场上的无人作战飞机为例,单架无人机平台载荷相对较小,信息处理能力相对较弱,执行任务时仍存在很多问题。如执行侦察任务时,单架无人机可能会受到传感器的角度限制,不能从多个不同方位对目标区域进行观测,当面临大范围搜索任务时,不能有效地覆盖整个侦察区域。执行攻击任务时,单架无人机在作战范围、杀伤半径、摧毁能力、攻击精度等方面均受到限制,会影响整个作战任务的成功率。另外,一旦单架无人机中途出现故障,必须立即中断任务返回,在战争中有可能贻误战机而破坏整个作战计划。在作战环境日益复杂、作战任务日渐多样、作战范围日趋扩大的趋势下,需要多无人机进行协同作战,以扩展其任务能力、提高执行效率。这些无人机通过共享信息和分工合作来达成一个或多个共同目标。在这一协同系统内,通过对信息的高度共享以及资源的优化调度,可产生远远超出一架无人机单独完成任务时的效果。执行任务的复杂性以及动态不确定环境决定了无人机系统势必朝着集群化、自主化和智能化的方向发展。

集群概念最早源于生物学研究。法国动物学家 Grassé 基于白蚁筑巢行为(如图 1-3),首次提出了共识自主性(Stigmergy)概念<sup>[4]</sup>:一种个体间间接协调的机制,即无需任何集中规划以及直接通信完成复杂智能活动。这是自主集群概念开始走入人类视野并逐步发展的开端。从生物延展到无人机,自主集群的概念亦在不断演化与丰富。无人机自主集群是大量自驱动系统的集体运动,集群内的无人机间通过信息的传输与合作突现出智能,具备一定程度的共识自主性。具体来说,无人机自主集群飞行,就是大量具有自主能力的无人机按照一定结构形式进行三维空间排列,且在飞行过程中可保持稳定队形,并能根据外部情况和任务需求进行队形动态调整,以体现整个机群的协调一致性。无人机自主集群的内涵在“数”“质”“变”三个方面有别于传统的多架无人机协同:“数”是指二者数量规模不在一个量级,集群一般指几十架甚至上百架无人机;“质”是指二者技术水平差距大,二者在智能传感、环境感知、分析判断、网络通信、自主决策等方面均不在一个



(a) 法国动物学家 Grassé



(b) 白蚁筑巢

图 1-3 共识自主性提出者

层次, 无人机自主集群具有很强的智能涌现的共识自主性; “变”是指二者适变和应变能力差距大, 无人机自主集群可针对威胁等突发状况进行复杂协作、动态调整以及自愈组合。虽然无人机集群飞行可提高系统性能, 但多个飞行器并存也导致了一些新的问题, 比如系统协调管理的难度提升, 系统整体状态的不确定性增加, 系统对通信的依赖性加大, 因此设计合理高效的无人机集群自主控制算法至关重要<sup>[5]</sup>。

自然界中大量个体聚集时往往能够形成协调、有序, 甚至令人感到震撼的运动场景<sup>[6,7]</sup>(如图 1-4)。比如宏观上, 恒星、行星、星云等天体之间聚集形成的星系运动, 大气中水汽的聚集形成的大气运动。生物界中, 水中成群游动的鱼, 纷乱而有序地随着洋流和食物忽东忽西, 整齐划一的行进, 而当遇到攻击的时候, 鱼

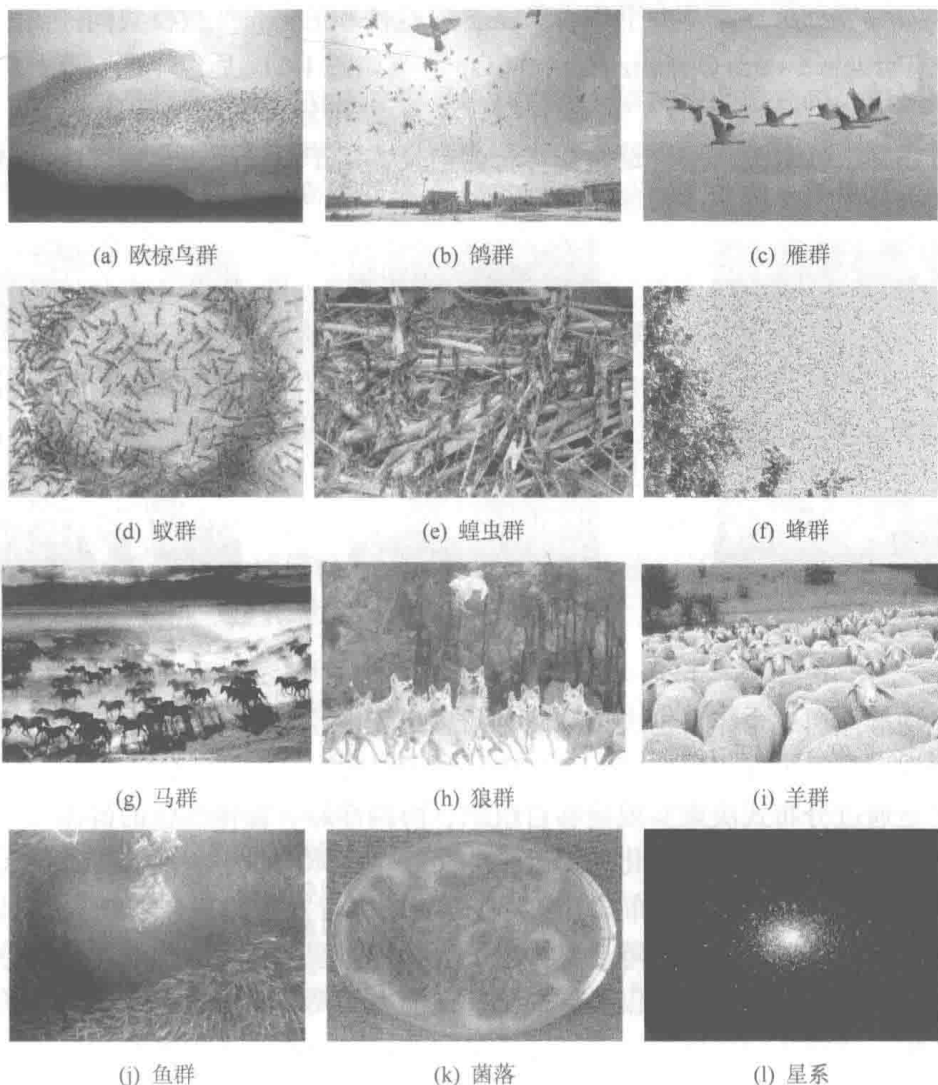


图 1-4 自然界中典型的群体行为(后附彩图)

群倏忽聚散,展现出十分严密的分工协作;欧椋鸟在迁徙过程中往往会聚集形成巨大的群体,有时甚至会包含上百万只鸟,庞大的鸟群集体翱翔,在空中形成动态激荡又迷幻的场景。微观上,细菌等微生物以及人类的黑色素细胞也会进行群集运动。实际上,无论是在生命体,还是在非生命体的世界中,都广泛存在着类似的大规模群体运动场景。这些群体现象表现出了分布、协调、自组织、稳定、智能涌现等特点,而群体智能(Swarm Intelligence, SI)的概念正是来自对自然界中生物群体的观察<sup>[8]</sup>。群体智能最早被应用于设计优化算法,比如国际群体智能会议(International Conference on Swarm Intelligence, ICSI)<sup>[9]</sup>创办者(北京大学谭营教授于2010年也创办了同名会议<sup>[10]</sup>)及 *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*<sup>[11]</sup>一书作者 Dorigo 提出的蚁群优化(Ant Colony Optimization, ACO)<sup>[12]</sup>,以及 *Swarm Intelligence*<sup>[13]</sup>一书作者 Kennedy 教授和 Eberhart 教授共同提出的粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)<sup>[14,15]</sup>(如图 1-5)。后经不断探索,群体智能逐渐发展成为两个分支:群体智能优化算法和分布式群体智能系统。正如 Dorigo 所述,任何受群居性动物集体行为启发,用于设计问题求解算法和分布式系统的理论与方法都属于群体智能<sup>[11]</sup>。

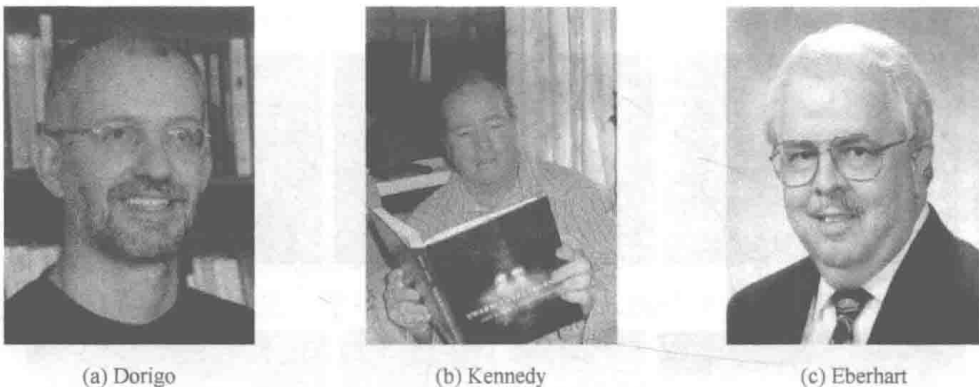


图 1-5 群体智能奠基人

生物群体通过个体自主决策和简单信息交互,经过演化,最终使整个群体宏观上涌现出自组织性、协作性、稳定性及对环境的适应性<sup>[16]</sup>。无人机自主集群的目的则是通过分布式决策实现能够自组织、协调性好、鲁棒性强的群体飞行。由于生物群体群集行为去中心化的邻近个体交互、整体的自组织性等特点与无人机集群自主控制的局部性、分布式、鲁棒性等要求有着紧密的契合之处<sup>[17-19]</sup>,因此,通过模拟鸽群、雁群、狼群等自然界中的生物群体智能行为,形成多平台分布式自组织控制方面的研究,将仅具有局部感知能力的简单平台对象聚成复杂的人工群体系统,通过平台主体的协调合作来实现群体系统的全局智能行为,使之具有生物群体那样协调、鲁棒等优势,是一条构建具有“平台简单、高度协调、完全自主、群体智能”特点的无人机集群系统的切实可行新途径。

## 1.2 无人机集群系统

### 1.2.1 无人机自主性

日益复杂的任务与环境决定了无人机系统必须具备很高的自主性<sup>[20-23]</sup>。无人机的自动控制与自主控制的主要区别就在于：自动控制是系统按照指令控制执行任务，而系统本身并没有决策与协调能力；而自主控制则需要无人机自身在必要的时刻做出决策。因此，无人机自主控制应该使无人机具有自治的能力，必须能够在不确定对象和环境条件下，在无人参与的情况下，持续完成必要的控制功能。自主性、机载信息获取、传输及其应用能力将是未来无人机在动态战场环境下完成复杂任务的关键。

美国致力于打造无人机自主集群系统，力保军事技术全球领先。美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)、海军研究局等组织机构，在无人机集群高风险/高回报的概念验证研究方面成果显著。2005年8月，美国国防部发布的《无人机系统路线图 2005—2030》(如图 1-6)将无人机自主控制等级分为 1 至 10 级，包括单机自主(遥引导、实时故障诊断、故障自修复和环境自适应、机载航路重规划)、多机自主(多机协调、多机战术重规划、多机战术目标)、集群自主(分布式控制、群组战略目标、全自主集群)三个层面，并指出“全自主集群”是无人机自主控制的最高等级，预计 2025 年后无人机将具备全自主集群能力<sup>[24,25]</sup>。2016 年 5 月，美空军发布了《小型无人机系统飞行规划 2016—2036》(如图 1-7)，从战略层面肯定了小型无人机系统的前景和价值<sup>[26]</sup>，规划中对“蜂群”、“编组”和“忠诚僚机”三种集群作战概念进行了阐述，其中“编组”是人对人，“忠诚僚机”是人对机，“蜂群”是机对机，从侧面印证了无人机集群发

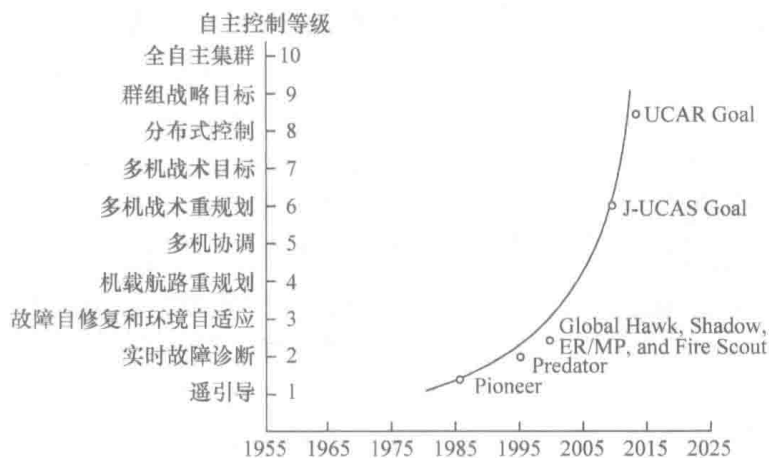


图 1-6 无人机系统路线图(2005—2030)



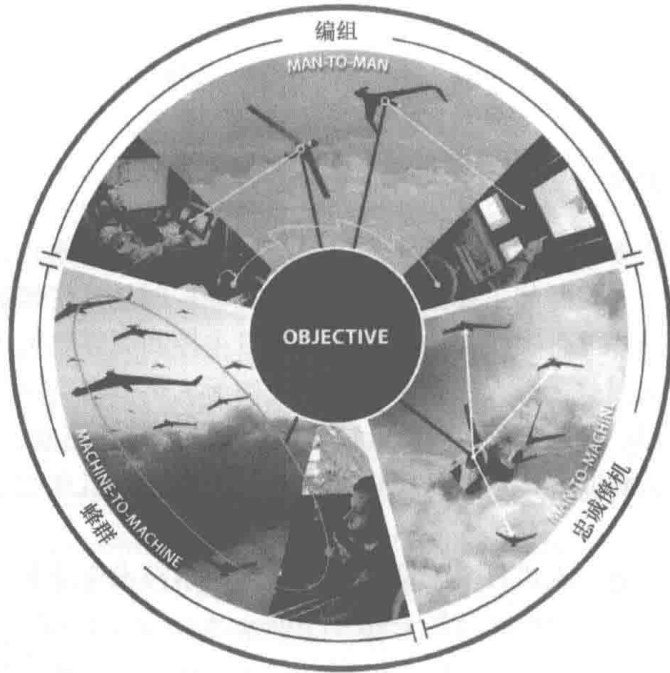


图 1-7 小型无人机系统飞行规划(2016—2036)

展的重要性。2018年8月,美国国防部发布了《无人系统综合路线图 2017—2042》,在新版路线图中再次强调了自主性对于加速无人系统领域进步的重要作用,即自主性技术的发展可极大提高人和无人系统的效率和效能<sup>[27]</sup>。

关于无人机自主性评价的方法除《无人机系统路线图 2005—2030》中采用的等级法外,还有双坐标轴法、三坐标轴法、查表法、公式法等。评定无人机的自主等级,实际上是评估无人机在完成特定任务过程中所呈现的自主能力<sup>[28]</sup>。因此,可以将无人机的关键技术作为其自主性的评价项目,构建图 1-8 所示的蛛网模型:从原点往外辐射出代表评价项目或关键技术的若干条轴,每个项目都有若干个表征技术成熟程度的等级,对于每一个无人机系统,将其在每条轴上对应的等级依次连接起来,即可用类似蛛网的纬线评价该无人机系统的自主性。

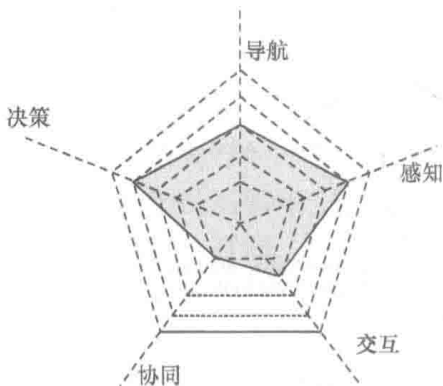


图 1-8 自主性评价的蛛网模型

通过探讨无人机自主性的内涵和评价方法可知,自主表达的是行为方式,由自身决策完成某行为<sup>[29]</sup>。自主不同于智能,智能是实施行为的能力,行为过程符合自然规律。二者间存在紧密关联:首先,自主在前,智能在后,二者相辅相成;其次,自主未必智能,但自主希望有智能;最后,智能依赖自主,智能的等级取决于自主的高低。无