

“共融机器人基础理论与关键技术研究著作丛书”序

纵观科技发展史，机械放大了人的四肢能力，计算机拓展了人脑功能的边界，机器人则通过模仿人的综合能力，将人类智慧具象化于机器中并形成一种智能系统，极大地延伸了人类能力的边界，进而提升了生产力。在过去 70 年的发展历程中，机器人已在解决经济与社会发展面临的产业升级、社会老龄化、医疗/健康服务、国防安全、科学探测与资源开发等众多挑战性问题中发挥了重要作用。

在当今世界由“工业经济”向“知识经济”转变的重要历史时期，布局下一代机器人研究正成为世界各国在高科技竞争中的焦点、热点和战略制高点。考虑到未来机器人将是能够实现与作业环境、人和其他机器人之间自然交互，自主适应动态环境和协同作业的“共融机器人”，2016 年，国家自然科学基金委员会适时启动了为期 8 年的重大研究计划“共融机器人基础理论与关键技术研究”，系统研究共融机器人结构、感知与控制等基础理论与关键技术。这对于我国机器人技术和产业取得源头创新成果、实现跨越式发展具有重大的理论和工程意义。随着重大研究计划的逐步推进，在基础理论和关键技术上取得了一系列突破，成果斐然。

“共融机器人基础理论与关键技术研究著作丛书”正是依托此计划，充分展示我国学者在共融机器人基础难题和关键技术研究中所取得的主要创新成果，内容包括：刚-柔-软体机器人的运动特性与可控性，如构型设计及力学行为解析、人-机-环境交互动力学与刚度调控机制等；人-机-环境多模态感知与自然交互，如非结构化环境中的多模态感知与情景理解、基于生物信号的行为意图理解与人机自然交互等；机器人群体智能与操作系统架构，如机器人个体自主与机器人群体智能涌现机理、群体机器人操作系统的多态分布架构等。

本丛书力争起点高、内容新、导向强。丛书作者都主持过“共融机器人基础理论与关键技术研究”重大研究计划项目或国家自然科学基金其他相关研究项目。本丛书反映了共融机器人研究领域的创新思想和前沿技术，形成了独特的研究思路和方法体系，为我国共融机器人持续深入研究积累了丰富的经验，具有创新性、实用性和针对性。

作为国家自然科学基金委员会重大研究计划“共融机器人基础理论与关键技术研究”项目指导专家组组长，我深信“共融机器人基础理论与关键技术研究

著作丛书”的及时出版，必将推动我国机器人基础研究的深入发展，在理论突破、难题攻克、人才培养、技术推动等方面发挥显著作用。同时，希望广大读者提出建议和指导，以促进丛书的出版工作。



中国科学院院士

2022年11月18日

序

随着大国竞争军事需求与人工智能技术变革的推动，无人机集群的形态和作用不断演进，但其自主性尚未取得关键突破，难以成为决定战争走向的关键力量。面向集群自主化、智能化、协同化的任务需求，有人/无人机集群融合有人机“高智能”与无人机集群“低智能”，将在未来相当长一段时间内成为适应强对抗、高动态、弱通信等挑战的新质作战力量。

纵观人类想象或实践飞行的历程，对自然界中鸟类飞行进行学习一直是不可或缺的灵感源泉。鸟类历经近亿年的自然选择进化至今，通过群体间的局部交互与个体的简单行为，在空中涌现出高度协调与复杂多变的壮观景象。鸟类群体智能成为生物学、物理学、机械学、控制科学、人工智能、航空航天等多领域跨学科研究的灵感源泉，相关仿生学成果获 2021 年诺贝尔物理学奖，并发表于 *Nature*、*Science* 等顶级刊物。对自然界中鸟群(如鸽群、雁群等)的飞行模式、交互模式等智能行为进行研究，为解决有人/无人机集群共融的人机交互、协同运动、协调决策和集群组网等人-机-物难题提供了一条新质技术途径。

北京航空航天大学仿生自主飞行系统研究组段海滨教授长期从事仿生集群自主飞行控制研究，从自然界中鸟群“散而不乱”的智能飞行机制出发，在仿鸟群智能的有人/无人机共融自主控制模型、理论、技术及验证方面开展了系统性原创探索，形成了开创性跨学科研究积累，成果令人耳目一新。《仿鸟群智能的有人/无人机共融自主控制》一书是作者团队在有人/无人机共融自主控制相关研究领域部分创新成果的系统总结，撰写上遵循了机理、模型、理论、方法和验证的逻辑思路。全书聚焦前沿学科交叉，立题新颖；理论联系工程实际，深入浅出。

有人/无人机共融集群对我国先进飞行器装备智能化、网络化和一体化能力提升具有重要理论意义，应用前景广阔。该书的出版必将对有人/无人机集群协同的领域发展和工程应用起到重要引领与促进作用，我向相关学科领域学者、教师、研究生和工程技术人员推荐这本专著，相信读者一定会受益匪浅。



中国科学院院士/IEEE Fellow/IFAC Fellow

2025 年 8 月

前 言

无人机集群以其资源配置机动灵活、任务执行成本低、作战规模可拓展性强等优势成为现代飞行器发展的热点与重点，其通过数据通信手段与地面监控站和地面操作员等共同构成“平台无人、系统有人”的综合性系统。受现有技术发展水平的限制，无人机集群目前还存在“有智无慧、有感无情、有专无通、有协无同”的瓶颈，自主完成复杂任务的能力仍待提高。目前无人系统集群技术在认知、推理、决策与极限操作等方面的表现还无法追赶人类智能，在未来一段时间内仍无法满足高动态、对抗性任务场景下的态势感知、实时决策、毁伤自愈等需求。有人/无人集群协同是适应无人机快速发展、提升复杂作战条件下无人机集群实战化能力的必由之路，是未来信息化战争的一个重要作战模式。

无人飞行器与鸟类在飞行动力原理上具有相似性，因此对自然界中鸟类智能的探索一直是其发展与进步的创新源泉。在自然选择进化的作用下，不同的生存环境促使不同鸟类形成了具有自适应性、自组织性、稳定性等优势的独特飞行机制，鸟群对动态自然环境的适应既不依赖全局交互网络，也无需个体的强机动能力，这得益于其长期进化形成的群集交互模式、协同运动规律、智能决策机制，与动态、复杂、对抗环境下有人/无人机集群任务的自适应性、协作性、鲁棒性等需求相契合。将鸟群智能行为机制应用于复杂任务场景下的有人/无人机集群自主控制，能够实现有人/无人机集群从运动层面到交互层面再到系统层面的深度融合，是提升有人/无人机集群整体任务效能的一条切实可行的新技术途径。

自2006年起，作者在国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目(91948204)、国家自然科学基金原创探索计划项目(62350048)、国家自然科学基金创新研究群体项目(T2121003)、国家自然科学基金企业创新发展联合基金重点支持项目(U20B2071)、国家杰出青年科学基金项目(61425008)、国家自然科学基金重点项目(61333004)、国家自然科学基金联合基金-“叶企孙”科学基金项目(U2541218)、国家自然科学基金面上项目(60975072、61273054)、国家自然科学基金青年科学基金项目(62403025)、北京市自然科学基金-海淀原始创新联合基金资助项目(L252094)、军委科技委创新特区项目以及国家863计划、武器装备预研、空军装备预研、陆航装备预研、航空科学基金等课题的持续支持下，对生物群体特别是鸟群智能行为及有人/无人机集群自主控制的机制原理、创新方法、关键技术进行系统的研究，并通过基于鸟群智能机制的有人/无人机集群自主控制综合验证平

台开展了集成飞行验证,形成一定的研究积累。本书系统总结了作者团队所取得的部分创新研究成果,旨在为读者提供一部在有人/无人机仿生集群自主控制与技术方面较为全面系统的学术专著,为进一步推动有人/无人机集群自主控制技术发展、促进相关领域的交流和发展抛砖引玉,并为从事无人系统技术研究的科技人员 and 高校师生提供理论基础、技术支撑和应用参考。

本书共 11 章。第 1 章介绍有人/无人机协同控制的国内外发展现状,并总结分析自然界中鸟群的智能涌现行为机制,阐述从鸟群智能到有人/无人机集群自主控制的可行性和映射框架;第 2 章在对雁群飞行数据进行分析的基础上,建立雁群迁徙过程中的 V 形编队模型、复合 V 形编队模型与互惠合作机制模型;第 3 章基于自然界中鸽群飞行数据建立鸽群归巢盘旋行为模型,在此基础上开展人工干预下的鸽群躲避捕食者行为实验,建立鸽群避障逃逸过程中的群体转向、群体分裂行为模型;第 4 章设计并分析有人/无人机共融集群的交互结构,构建五种不同的人机共融模式,建立有人机飞行员工作负荷评估模型和自动化信任度评估模型,在此基础上实现基于有限状态自动机的人机共融模式自适应切换;第 5 章通过分析自然界中鸟群捕食-逃逸行为机制,构建从鸟群运动机制到有人/无人机共融集群任务的映射框架,提出在不同人机共融模式下的有人/无人机共融集群动力学模型;第 6~9 章系统地给出基于雁群、鸽群、鹰群等典型鸟群智能行为机制的有人/无人机共融集群编队、避障、对抗等理论、方法和技术;第 10 章分别对第 6~9 章的部分关键技术进行仿真综合验证与外场集成飞行验证;第 11 章从发展趋势、关键技术和应用领域等角度对鸟群智能与有人/无人机集群自主控制的未来研究方向进行展望。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。

衷心感谢中国科学院院士、IEEE Fellow、IFAC Fellow、哈尔滨工业大学段广仁教授百忙之中审阅了书稿,并为本书作序。感谢本领域相关同行专家、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在相关领域二十余年的共同努力和创新贡献,也向本书引用文献的作者表示诚挚谢意。

由于作者水平有限,不少内容还有待完善和深入研究,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。



2025 年 8 月于北京航空航天大学

目 录

“共融机器人基础理论与关键技术研究著作丛书”序

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 有人/无人机协同	5
1.3 鸟群智能启发	9
1.4 技术挑战	16
1.5 本书结构	17
1.6 本章小结	18
参考文献	18
第 2 章 鸟群智能行为机制建模	25
2.1 引言	25
2.2 雁群同构 V 形编队建模	26
2.3 鸟群复合 V 形编队建模	29
2.4 雁群互惠合作机制建模	36
2.5 仿真分析	41
2.5.1 V 形编队机制仿真分析	41
2.5.2 互惠合作机制仿真分析	44
2.6 本章小结	48
参考文献	49
第 3 章 人工干预下的鸟群智能行为机制建模	51
3.1 引言	51
3.2 鸽群归巢圆形盘旋建模	52
3.2.1 鸽群盘旋行为运动学建模	52
3.2.2 鸽群盘旋交互拓扑建模	53
3.3 人工干预下鸽群避障行为建模	61
3.3.1 人工干预下的鸽群避障逃逸行为实验	62
3.3.2 人工干预下的鸽群转向机制建模	69
3.3.3 人工干预下的鸽群分裂机制建模	73

3.4 仿真分析	75
3.4.1 鸽群避障行为数据统计及分析	75
3.4.2 人工干预下鸽群避障行为仿真分析	79
3.5 本章小结	81
参考文献	82
第4章 有人/无人机共融集群交互建模	86
4.1 引言	86
4.2 有人/无人机共融模式设计	86
4.3 有人/无人机共融模式切换	92
4.3.1 飞行员工作负荷评估建模	93
4.3.2 有人/无人自动化信任度建模	95
4.3.3 人机共融模式自适应切换方法	99
4.4 基于模仿学习的交互技术	103
4.4.1 有人/无人机集群信任度模仿学习	104
4.4.2 有人/无人机信任度学习仿真分析	107
4.5 本章小结	108
参考文献	108
第5章 有人/无人机共融集群动力学建模	113
5.1 引言	113
5.2 有人/无人机动力学建模	114
5.2.1 基于鸟群捕食-逃逸行为的动力学建模	119
5.2.2 不同人机共融模式下的动力学建模	122
5.3 仿真分析	126
5.3.1 参数指标	126
5.3.2 仿真实验	127
5.4 本章小结	136
参考文献	136
第6章 仿鸟群有人/无人机共融集群编队控制	140
6.1 引言	140
6.2 有人/无人机共融集群编队队形库设计	141
6.3 有人/无人机共融集群变拓扑重构控制	145
6.4 仿雁群智能的有人/无人机集群编队控制	148
6.4.1 有人/无人机集群空间编队控制	148
6.4.2 基于有人机指令的无人机集群控制	152
6.4.3 仿雁群编队的有人/无人机编队控制	155

6.5 仿真分析	157
6.5.1 有人/无人机编队控制方法仿真分析	157
6.5.2 有人/无人机编队变拓扑控制仿真分析	163
6.5.3 仿雁群智能的有人/无人机编队变拓扑仿真分析	167
6.6 本章小结	174
参考文献	174
第7章 仿鸟群有人/无人机共融集群避障控制	176
7.1 引言	176
7.2 仿鸽群智能的共融集群盘旋控制	177
7.2.1 盘旋问题描述	177
7.2.2 盘旋控制方法设计	178
7.2.3 盘旋控制收敛性分析	181
7.3 仿鸽群智能的有人/无人机避障控制	186
7.3.1 非转弯段有人/无人机共融集群协同运动控制	187
7.3.2 转弯段有人/无人机共融集群协同运动控制	194
7.4 仿真分析	195
7.4.1 仿鸽群智能的集群盘旋仿真分析	195
7.4.2 仿鸽群智能的集群避障仿真分析	201
7.5 本章小结	204
参考文献	204
第8章 仿鸟群有人/无人机共融集群进化博弈	206
8.1 引言	206
8.2 网络进化博弈模型	207
8.2.1 基本博弈模型	209
8.2.2 个体适应度与更新规则	209
8.3 集群对抗态势评估算法	210
8.3.1 个体态势评估	211
8.3.2 集群态势评估	212
8.4 基于网络进化博弈的集群对抗战术决策	214
8.4.1 战术任务序列分解	214
8.4.2 战术决策协同生成	219
8.5 仿真分析	221
8.6 本章小结	228
参考文献	228

第 9 章 仿鸟群有人/无人机共融群组博弈对抗	230
9.1 引言	230
9.2 鹰鸽空间演化机制	231
9.2.1 鹰群协同狩猎策略	231
9.2.2 鸽群协同防御策略	234
9.2.3 空间演化机制建模	236
9.3 仿鹰鸽智能的群组博弈控制	240
9.3.1 仿鹰鸽群组博弈建模	240
9.3.2 仿鹰狩猎机制的目标选择战术	243
9.3.3 仿鹰攻击机制的自适应拦截控制	246
9.3.4 仿鸽群逃逸机制的群组协同控制	247
9.4 基于鹰鸽博弈的无人机群组控制策略	249
9.4.1 鹰鸽博弈拦截时间推导	249
9.4.2 鹰鸽博弈获胜区域估计	251
9.5 仿真分析	256
9.5.1 基地四周分散交战仿真分析	257
9.5.2 基地一侧密集交战仿真分析	263
9.6 本章小结	270
参考文献	270
第 10 章 仿鸟群有人/无人机共融集群集成验证	272
10.1 引言	272
10.2 三维视景仿真环境构建	273
10.3 仿鸟群有人/无人机集群仿真验证	282
10.4 仿鸟群有人/无人机集群飞行验证	285
10.5 本章小结	289
参考文献	289
第 11 章 研究前沿与展望	291
11.1 引言	291
11.2 发展趋势	293
11.3 关键技术	295
11.3.1 鸟群智能理论与方法	295
11.3.2 有人/无人机共融集群自主控制	296
11.4 应用领域	298
11.5 本章小结	299
参考文献	299

Contents

Foreword to the Series of Works on the Basic Theory and Key Technologies of Tri-Co Robots

Foreword

Preface

Chapter 1 Exordium	1
1.1 Introduction	1
1.2 Manned/Unmanned Aerial Team Coordination	5
1.3 Biological Inspiration of Bird Flocks	9
1.4 Technical Challenges	16
1.5 Organization of This Book	17
1.6 Summary	18
References	18
Chapter 2 Intelligent Bird Behavior Model of Bird Flocks	25
2.1 Introduction	25
2.2 Homogeneous V-Formation Model of Geese	26
2.3 Heterogeneous V-Formation Model of Birds	29
2.4 Reciprocal Cooperation Model of Geese	36
2.5 Simulation Analysis	41
2.5.1 Simulation of V-Formation Model	41
2.5.2 Simulation of Reciprocal Cooperation Model	44
2.6 Summary	48
References	49
Chapter 3 Intelligent Bird Behavior Model under Human Intervention	51
3.1 Introduction	51
3.2 Circling Model of Homing Pigeon	52
3.2.1 Kinematic Model of Pigeon Circling Behavior	52
3.2.2 Topology Model of Pigeon Interaction	53
3.3 Obstacle Avoidance Model under Human Intervention	61
3.3.1 Obstacle Avoidance and Escaping Experiments under Human Intervention	62
3.3.2 Steering Mechanism Model under Human Intervention	69

3.3.3	Division Mechanism Model under Human Intervention	73
3.4	Simulation Analysis	75
3.4.1	Statistical Analysis of Pigeon Flock Data	75
3.4.2	Simulation Analysis of Pigeon Obstacle Avoidance	79
3.5	Summary	81
	References	82
Chapter 4	Interaction Model of Tri-Co Manned/Unmanned Aerial Team	86
4.1	Introduction	86
4.2	Cooperation Mode of Tri-Co Manned/Unmanned Aerial Team	86
4.3	Mode Switching of Tri-Co Manned/Unmanned Aerial Team	92
4.3.1	Evaluation Model of Pilot Workload	93
4.3.2	Autonomy and Trust Model of Manned/Unmanned Team	95
4.3.3	Adaptive Switching Method for Manned/Unmanned Tri-Co Modes	99
4.4	Interaction Method Based on Imitation Learning	103
4.4.1	Imitation Learning for Human-Swarm Trust	104
4.4.2	Simulation Analysis of Human-Swarm Trust	107
4.5	Summary	108
	References	108
Chapter 5	Dynamic Model of Tri-Co Manned/Unmanned Aerial Team	113
5.1	Introduction	113
5.2	Dynamic Models of Manned/Unmanned Aircrafts	114
5.2.1	Dynamic Model Based on Predation-Escape Behavior	119
5.2.2	Dynamic Model under Different Cooperation Modes	122
5.3	Simulation Analysis	126
5.3.1	Parameters and Indicators	126
5.3.2	Simulation Experiments	127
5.4	Summary	136
	References	136
Chapter 6	Bird-Inspired Tri-Co Manned/Unmanned Formation Control	140
6.1	Introduction	140
6.2	Formation Library of Tri-Co Manned/Unmanned Aerial Team	141
6.3	Formation Reconfiguration Control of Tri-Co Team	145
6.4	Geese-Inspired Manned/Unmanned Formation Control	148
6.4.1	Cluster Space Formation Control Method	148
6.4.2	Cluster Control of Swarm under Human Command	152

6.4.3	Formation Control Method Inspired by Geese	155
6.5	Simulation Analysis	157
6.5.1	Simulation of Formation Control Method	157
6.5.2	Simulation of Formation Reconfiguration Method	163
6.5.3	Simulation of Geese-Inspired Formation Reconfiguration Method	167
6.6	Summary	174
	References	174
Chapter 7 Bird-Inspired Tri-Co Manned/Unmanned Obstacle		
	Avoidance Control	176
7.1	Introduction	176
7.2	Swarm Circling Control Based on Pigeon Intelligence	177
7.2.1	Model Description of Circling Control Problem	177
7.2.2	Design of Circling Control Method	178
7.2.3	Convergence Analysis of Circling Control	181
7.3	Obstacle Avoidance Based on Pigeon Intelligence	186
7.3.1	Cooperative Control in Non-Turning Period	187
7.3.2	Cooperative Control in Turning Period	194
7.4	Simulation Analysis	195
7.4.1	Simulation of Circling Control Method	195
7.4.2	Simulation of Obstacle Avoidance Method	201
7.5	Summary	204
	References	204
Chapter 8 Bird-Inspired Tri-Co Manned/Unmanned Evolutionary Game		
8.1	Introduction	206
8.2	Model of Network Evolutionary Game	207
8.2.1	Description of Network Evolutionary Game	209
8.2.2	Individual Fitness and Renewal Rules	209
8.3	Situation Evaluation Method of Team	210
8.3.1	Situation Evaluation of the Agent	211
8.3.2	Situation Evaluation of the Swarm	212
8.4	Adversarial Tactical Based on Evolutionary Game	214
8.4.1	Simulation of Tactical Task Sequence Decomposition	214
8.4.2	Simulation of Collaborative Generation of Tactical Decisions	219
8.5	Simulation Analysis	221
8.6	Summary	228
	References	228

Chapter 9 Bird-Inspired Tri-Co Manned/Unmanned Game Confrontation	230
9.1 Introduction	230
9.2 Spatial Evolution Mechanism of Hawk-Pigeon	231
9.2.1 Cooperative Hunting Strategy of Hawks	231
9.2.2 Cooperative Defense Strategy of Pigeon Flocks	234
9.2.3 Model of Spatial Evolution Mechanism	236
9.3 Group Game Model Based on Hawk-Pigeon	240
9.3.1 Group Game Model Inspired by Hawk-Pigeon	240
9.3.2 Target Selection Strategy Inspired by Hawk	243
9.3.3 Adaptive Interception Strategy Inspired by Hawk	246
9.3.4 Group Cooperation Strategy Inspired by Pigeon	247
9.4 Group Control Strategy Based on Hawk-Pigeon Game	249
9.4.1 Interception Time Derivation of Hawk-Pigeon Game	249
9.4.2 Winning Areas Estimation of Hawk-Pigeon Game	251
9.5 Simulation Analysis	256
9.5.1 Simulation of Scattered Fighting Around the Combat Base	257
9.5.2 Simulation of Engagement on One Side of the Combat Base	263
9.6 Summary	270
References	270
Chapter 10 Integrated Verification of Bird-Inspired Tri-Co Manned/Unmanned System	272
10.1 Introduction	272
10.2 Construction of 3D Visual Simulation Environment	273
10.3 Simulation Verification of Bird-Inspired Manned/Unmanned Team	282
10.4 Flight Verification of Bird-Inspired Manned/Unmanned Team	285
10.5 Summary	289
References	289
Chapter 11 Frontier and Prospect	291
11.1 Introduction	291
11.2 Development Tendency	293
11.3 Key Technology	295
11.3.1 Intelligent Theory and Method of Bird Flocks	295
11.3.2 Autonomous Control of Manned/Unmanned Aerial Team	296
11.4 Application Field	298
11.5 Summary	299
References	299

第1章 绪 论

1.1 引 言

在未来信息化、网络化、智能化、体系化的对抗作战环境下,无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)集群具有资源配置机动灵活、任务执行成本低、作战规模可拓展性强等优势,其通过数据通信,与地面监控站和地面操作员等共同构成“平台无人、系统有人”的无人机系统(unmanned aircraft system, UAS)^[1]。由于当前无人系统集群技术成熟度的限制,无人机集群在态势感知、实时决策、毁伤自愈等方面均不能满足高动态、对抗性作战任务需求,在相当长一段时间内仍无法实现完全自主作战。与无人机强计算能力的“低智能”相比,操作员具有丰富的实战经验,在认知、推理、决策与极限操作等方面具有“高智能”,人机之间进行互联互通互操作,可使无人机集群执行任务能力倍增。因此,有人/无人集群协同是适应无人机快速发展、提升复杂作战条件下无人机集群新质能力的必由之路,是未来信息化战争的重要作战模式^[2]。

美国陆军 2010 年发布的《美国陆军无人机系统路线图 2010—2035》中将 2010~2035 年分为三个时间段:近期发展阶段(2010~2015 年)、中期发展阶段(2016~2025 年)和远期发展阶段(2026~2035 年),远期规划强调有人系统和无人系统在通用性与能力方面的大幅提升,为人机协同奠定基础^[3]。美国国防部 2014 年提出的“第三次抵消战略”中明确了驱动该轮“抵消战略”的五个关键技术领域:具有自主学习能力的机器、人机协作、人类作战行动辅助系统、先进有人/无人作战编组、针对网络(攻击)和电子战环境进行加固的网络赋能自主武器等。美国空军 2016 年发布的《小型无人机系统飞行计划 2016—2036》中提出“忠诚僚机”概念,突出了人机协同方向^[4]。之后美国国防部在发布的新版《无人系统综合路线图 2017—2042》中将互操作作为四个主题之一,旨在实现无缝、灵活、自主的人机协同和机机协同,压缩操作员的决策时间以降低生命威胁^[5]。我国国务院 2017 年印发的《新一代人工智能发展规划》中 8 次提到“人机协同”,旨在通过人机交互(human-robot interaction, HRI)和协同推动混合增强智能的快速发展与实际应用^[6]。由于无人系统在投入使用前期暴露出自组织性差、抗干扰能力弱、智能化程度低等严重问题,采用有人系统与无人系统协同,实现跨域平台系统任务能力的倍增甚至指数增长已成为未来无人系统发展的重要趋势。

有人/无人自主协同是指有人系统与无人系统之间在组织、决策、规划、控制、

感知等方面既各自进行独立的计算、存储、处理,又通过自发且平等的交互共融,完成共同目标的群体行为^[7]。有人/无人机共融的核心不仅是技术集成,更是认知、决策与行动的融合,以优势互补实现超越单一操作员或机器能力上限的协同效能最大化。人机共融系统发展将重构从“主从控制”到“伙伴共生”的人机关系,建立互相理解意图、预测需求、自主互信的协作模式,形成体系智能共生、能力涌现演进的发展趋势。

有人/无人机协同方式可根据无人系统的自主权限由低到高分为人环中、人环上和人在环外三种,均需要操作员对系统运行状态及结果进行监控。在高动态的复杂战场环境中,操作员通过地面站对无人系统进行远程操控存在指挥控制时延长、通信链路不稳定、环境态势感知不同步等严峻问题,难以实现快速、精准、稳定的协同控制。另外,无人机在平台能力(隐身性、机动性、滞空时间和作战半径等)及机载传感器性能、机载武器性能等方面与有人机存在明显差距。因而在未来空中战场环境下,采用有人/无人机集群进行协同任务,能够充分发挥操作员的智慧、有人机的平台优势及无人机集群的群体智能涌现能力,可极大增强有人/无人机集群的作战效能与生存能力,是未来空中作战模式创新发展的重要方向^[2]。

有人/无人机集群系统与环境可在共存-协作-认知(coexisting-cooperative-cognitive, Tri-Co)框架下实现人-机-环境共融,完成由系统指挥控制指令(command and control entity, C2)规定的特定任务目标^[8]。平台传感器将感知到的环境要素作为有人系统和无人系统的输入,提供环境态势评估信息。共融集群中不同平台具有不同任务角色,操作员具有最高权限,通过与操作系统和辅助决策系统(assisted decision-making system, ADS)交互完成决策^[9]。无人系统基于任务控制器中的自主控制算法,结合有人系统的指令和当前态势进行实时决策、任务规划与运动控制。在 Tri-Co 框架下,操作员能够在可承受的工作负荷下实现对多个无人系统的监督和控制。

在有人/无人机集群系统中,有人系统的作用可概括为三点:发现并弥补无人系统的能力局限性、获取无人系统无法得到的关键信息、及时发布任务目标的变化。操作员作用在无人系统上的控制方式可概括为四类:①当无人系统具有较高的自主程度时,操作员进行算法或行为选择;②在大多数情况下,操作员通过设置算法参数间接影响无人系统特性;③操作员通过直接或虚拟的环境信息影响无人系统;④操作员通过控制无人系统中的部分领导个体降低控制复杂度。因而,有人/无人机集群控制亟须构建有效的人在回路智能控制范式(图 1-1),以解决人机交互模式、人机协同运动、人机决策融合等关键问题^[10]。

自然界中的鸟群在飞行过程中表现出高度的自组织性、协调一致性、环境适应性和强鲁棒性等“适者生存”的本领^[11],是有人/无人机集群系统设计的重要灵

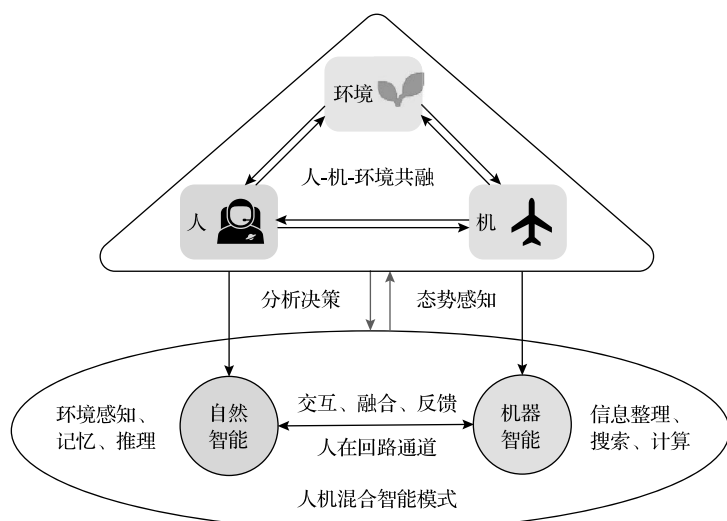
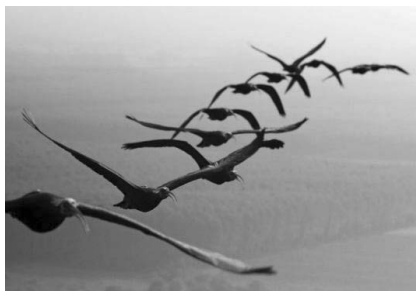


图 1-1 人机混合智能模式

感来源。中国科学院院士、北京航空航天大学郭雷教授曾指出，“鸟工智能、鱼工智能可以让无人系统模仿鸟和鱼，具有仿生智能的能力，从而实现心灵、手巧、眼明、身健，这个过程不比人工智能容易”。在大型迁徙鸟类的编队飞行过程中，个体储存的能量多少是制约其迁徙距离的关键因素。为了能够迁徙到距离更远但气候适宜的栖息地，雁群和滨鸟等采用编队模式捕获前方个体的上洗气流(图 1-2(a)和(b)^[12,13])，从而降低自身所需要提供的升力以节约体能^[12]。基于固定翼空气动力学理论的计算表明，雁群中的个体相比单飞的个体可节省超过 50% 的能量消耗^[14]。与大型迁徙鸟类相比，小型鸟类更倾向于采用分布式的“散而不乱”集群模式，通过局部交互实现复杂多变的群集行为(图 1-2(c)和(d)^[14,15])。厄特沃什·罗兰大学 Nagy 等^[16]通过对鸽群自由飞行和归巢盘旋过程进行研究发现，鸽群中存在稳定的层级交互网络，鸽群飞行看似杂乱无章却能始终保持安全距离不发生碰撞^[17]，表明层级交互网络机制相比平等交互机制更有助于保持群体的凝聚力、



(a) 隐鹳群V形编队



(b) 反嘴鹬群编队



图 1-2 自然界鸟群飞行

自组织性与机动性。欧椋鸟通常以大规模的集群方式飞行，实验发现欧椋鸟群个体间采用拓扑交互模式而不是距离交互模式，这一机制可使欧椋鸟群在受到外部扰动时实现快速转向行为的智能涌现^[18]。布里斯托大学 Hogan 等^[19]通过三维重建欧椋鸟群躲避捕食者的过程(图 1-2(d))，得到欧椋鸟群通过增加群体密度产生混淆效应来应对捕食者攻击这一结论。通过鸟群观测实验研究发现，自然界中的鸟群对动态自然环境的适应既不依赖全局交互网络，也无需个体的强机动能力，却具有较强的生存适应能力，这得益于其长期进化形成的群集交互模式与协同运动规律。

对生物智能的探索一直是人类社会发展与进步的创新源泉，2021 年的诺贝尔物理学奖颁发给乔治·帕里西(Giorgio Parisi)，以表彰他对复杂系统理论的创新性贡献，特别是发现了从原子到行星尺度的物理系统中无序和波动的相互作用。帕里西对原子和宇宙的研究受到了自然界中鸟群波动现象的启发，故事源于有一天他在罗马特米尼(Termini)火车站上空看到了成千上万只鸟儿成群结队地飞翔，它们没有统一的指挥却能如同一个整体般自由变换形状，这一现象让他着迷。于是，帕里西等拍摄记录了大量的鸟群飞行数据，在此基础上用统计物理方法计算分析数十万只鸟如何形成一个整体，激发了他们在原子和宇宙领域中的思想火花^[20]。2024 年的诺贝尔物理学奖授予了两位在机器学习领域作出开创性贡献的科学家约翰·霍普菲尔德(John Hopfield)和杰弗里·辛顿(Geoffrey Hinton)，以表彰他们“为推动利用人工神经网络进行机器学习做出的基础性发现和发明”，这项技术最初是受到大脑结构的启发^[21]。从原子物理、天体物理到凝聚态物理等领域的突破性研究，多处都体现了生物智能启发的灵感。

在自然选择进化的作用下，不同的生存环境促使不同鸟类形成了具有自适应性、自组织性、稳定性等优势的独特飞行机制，与有人/无人机集群任务的自适应性、协作性、鲁棒性等需求相契合。本章首先介绍有人/无人机集群协同国内外研究新进展，进一步阐述不同自然条件下鸟群适应环境而涌现的群体智能行为机制，并给出本书的体系结构。将鸟群智能行为机制应用于复杂任务场景下的有人/无人机集群自主控制，可实现有人/无人机集群从运动层面到交互层面再到系统层面的深度融合，是提升有人/无人机集群整体任务效能的新技术途径。

1.2 有人/无人机协同

有人/无人异构协同作战源于有人/无人集群思想,根据美国国防部在《无人系统综合路线图 2013—2038》中的定义,有人/无人集群是指有人系统与无人系统为执行相同任务而建立的整体编队,通过平台互操作和资源共享控制,来完成共同的任务目标^[22]。现代战争正从信息化战争向智能化战争转化,对有人/无人机协同作战的交互模式、控制方法及决策机制进行系统性深入研究是提高和促进新作战模式形成的重要技术与试验支撑。

1. 有人/无人机协同控制飞行试验

以美国为首的西方发达国家及俄罗斯较早提出并开展了一系列有人/无人机集群军事项目,进行了多次有人/无人机协同概念演示和综合飞行试验,逐渐体现出这一领域的发展前景和重要程度。

美国陆军开展了多次有人机与无人机的协同作战演练,有人机包括阿帕奇、奥基瓦勇士等陆军主力战机。1996 年启动了机载有人/无人系统技术 (airborne manned/unmanned system technology, AMUST) 项目; 2006 年开展了猎人远距杀手编队 (hunter standoff killer team, HSKT) 演示验证, 演示中 AH-64D 阿帕奇直升机控制一架 RQ-5B 猎人无人机。2011 年阿帕奇直升机 Block III 在飞行中实现机舱内控制 MQ-1C 灰鹰无人机的载荷和飞行路径, 达到四级协同能力 (图 1-3)^[23]。



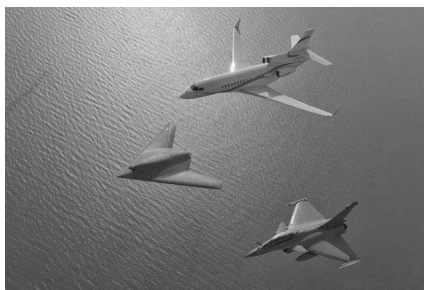
图 1-3 美国陆军有人直升机/无人机协同演示验证

2007 年 4 月, 英国国防部与 QinetiQ 公司共同完成了一架狂风战斗机同时指挥控制四架 BAC 1-11 无人机替代机的协同编队试验 (图 1-4(a)), 无人机替代机从起飞到目标探测、信息传输等工作均自主完成, 在有人机的控制管理下完成打击动作, 实现了战斗机对无人机编队战术层次的协调和控制。2014 年 4 月, 法国达索航空公司完成了神经元无人机与阵风战斗机和猎鹰 7X 商务喷气机的编队飞

行(图 1-4(b)), 飞行时间为 110min, 在地中海上空飞行数百千米。2020 年, 法国对一架神经元无人机与五架阵风战斗机和一架预警机进行了战术配合作战测试^[24]。该测试结果将服务于法德未来空中作战系统(Franco- German future combat air system, FCAS), 为有人战斗机配备具有侦察和打击等功能的无人机。



(a) 英国



(b) 法国



(c) 俄罗斯



(d) 美国

图 1-4 有人/无人机协同编队飞行试验

2019 年 9 月 27 日, 俄罗斯国防部和苏霍伊公司首次实现了 S70 Okhotnik-B 猎人无人机与苏-57 第五代战斗机的编队演示飞行, 飞行时间超过 30min(图 1-4(c))^[25]。猎人无人机配置了完整的机载电子设备, 在 1600m 左右飞行高度以自动模式进行空中机动。猎人无人机为苏-57 战斗机提供了传感器增强辅助, 通过扩大战斗机雷达覆盖区域使其能获取自身雷达覆盖范围之外的目标, 并处于敌方导弹和防空攻击区域之外, 演示了有人/无人机编队技术的关键功能。目前俄罗斯研发的双座指挥型苏-57 战斗机, 以实现操作员同时协调四架最新型“猎人”重型攻击无人机执行空中和地面打击任务。

2020 年 12 月, 美国空军研究实验室 XQ-58A 女武神无人机首次成功与 F-22 战斗机和 F-35 II 战斗机一起进行了半自主飞行试验(图 1-4(d)), 目标是演示网关 1 号有效载荷与第五代战斗机通信能力^[26]。测试期间, 两架战斗机成功通过网关 1 号共享了数据, 但在实际起飞后失去了连接。2021 年 3 月, XQ-58A 完成第六次飞行试验, 并首次完成了机内武器舱释放微型无人机的试验。美国空军正加速

推进“协同作战飞机”(collaborative combat aircraft, CCA)项目,该计划已成为“下一代空中优势”(next generation air dominance, NGAD)战略的关键一环,旨在通过引入大量低成本且配备人工智能技术的无人战斗机,来显著提升空中作战能力。自2024年启动以来,该项目已进入关键阶段,预计将在2030年前完成部署,并力求实现至少1000架协同作战飞机的规模。

我国正在积极发展并验证有人机与无人机的协同作战模式,率先研发并且生产了三架歼-20战斗机的双座改进版本歼-20AS战斗机,并设计了与攻击-11无人机的协同编队想定场景(图1-5)。相比歼-20战斗机,歼-20AS战斗机增强了整机的态势感知能力,同时升级航电系统,使战机更加适应现代化战场^[27]。增加的第二位飞行员将作为指挥无人机群的专职飞行员,有人/无人机协同将大幅度扩大歼-20AS战斗机的侦察范围和控制范围。

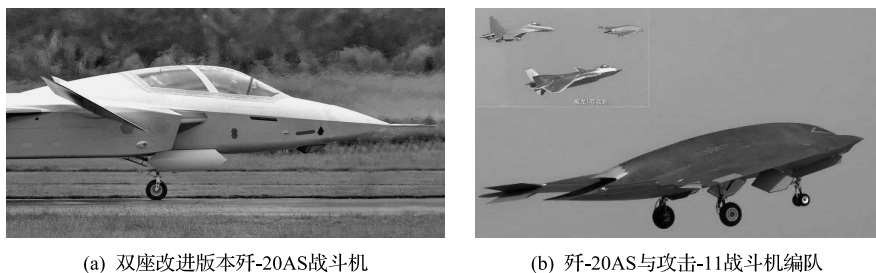


图1-5 我国改进歼-20AS战斗机

国外在有人/无人机协同作战模式、系统集成和通信交互等方面都已开展了大量理论与试验验证,逐步推动有人/无人机混合编组走向实战化应用。尽管国内已逐渐加大对有人/无人机集群控制理论与试验应用的研究力度,但是在面向实战化应用的模式探索、人机交互、集成验证等方面仍存在一定的差距,需要进一步开展针对高动态、强干扰等复杂环境的有人/无人机集群自主控制理论和技术的研究,加速实现其在异构集群平台上的应用。

2. 有人/无人机协同控制理论与方法

有人/无人机协同控制前期发展主要聚焦于人机交互技术,通过对操作界面与接口进行设计来减轻操作员监督控制无人系统的工作负荷。慕尼黑联邦国防军大学 Das 等^[28]提出了一个在动态环境中能够快速部署并应用有人/无人集群的系统框架,可将控制、通信、人工智能、平台和可视化五个关键要素融合在一个整体中,为有人/无人集群提供快速态势感知和开发的能力。为了实现系统对操作员的自适应辅助,Schulte 团队提出了一种用于有人/无人集群任务的认知状态估计框架,实时评估操作员的注意力分配和安全状态,同时在性能下降的情况下确定可

能的故障问题；通过战斗机模拟驾驶舱(图 1-6)进行人在环内仿真实验，评估单操作人员同时管理多达三架无人机时的自动化水平^[29]。

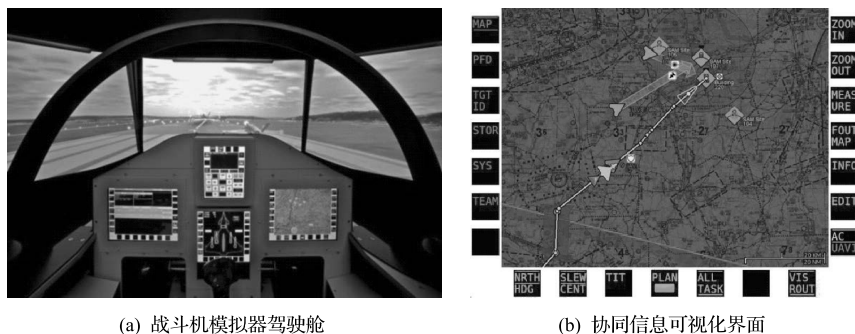


图 1-6 慕尼黑联邦国防军大学有人/无人集群模拟系统

卡内基梅隆大学 Sycara 团队通过设计可视化界面和算法来支持操作员与无人集群的协同任务，初期工作集中在利用动态选定的无人集群领导者来引导其他个体进行运动^[30]；进而建立操作员信任模型，使用逆强化学习算法从操作员的行为中获取其决策机制，用于实时预测操作员对无人集群的信任度^[31,32]。针对操作员信任度下降的情况，Sycara 团队提出了一种操作员信任修复算法，可通过纠正令操作员信任度降低的集群行为来将群体性能与操作员信任度恢复到适当的水平^[33]。

圣塔克拉拉大学 Mas 等^[34]提出了一种集群空间控制技术，简化了操作员对无人集群进行监督和控制的方法。操作员可从集群角度发布集群系统运动指令，无须对单架无人机进行依次操作，能够实现单名操作员轻松监督和无忧控制无人机集群运动^[35,36]。麻省理工学院 Cummings 等^[37]设计了在多机协同执行任务过程中的操作员监督控制模型，该模型允许单名操作员同时控制多架无人机。研究指出，单名操作员能够同时控制的无人机最大数量不仅取决于无人机智能程度，还与任务环境和任务需求相关。当有人/无人集群执行摧毁地面防空火力以压制敌方的作战任务时，考虑作战速度和任务量，可以预测单名操作员能够同时控制五架无人机^[38]。

目前，国内在有人/无人机异构协同控制技术研究领域主要处于理论研究阶段，但有人/无人机异构协同作战技术的研究已经受到广泛重视。在有人机与无人机协同作战方式与流程、作战平台能力需求分析、编队队形控制、协同任务管理决策等方面都取得了可喜的研究进展。空军工程大学王文飞等^[39]利用元模型高层次抽象的建模方法，从作战概念、控制过程和作战任务活动三个角度对任务构想、作战体系架构设计和作战运用模式进行了深入的研究，为设计构建有人/无人机协同作战体系提供参考。西北工业大学学喆等^[40]提出无人/有人机混合主动式交互决策模型方法，可实现从无人机决策任务选择到无人机协同决策需求推理，再到其

与有人机交互方式决策的全过程,能够减少无人机与有人机的频繁交互,降低飞行员任务负荷。海军航空大学吴立尧等^[41]针对集结控制问题设计了一种基于航迹规划-跟踪的有人/无人机编队集结控制策略,考虑了集结边界约束条件与防碰撞约束条件。北京航空航天大学段海滨等提出了一种基于集群空间架构的有人/无人机集群编队变拓扑控制方法,通过有人机操作员的单个指令即可实现对无人机集群在三维空间的编队拓扑切换^[42]。文献[43]和文献[44]针对有人/无人机协同作战需求,为有人机操作员设计了指挥控制无人机的指挥界面,可有效融合无人机的战场信息并辅助有人机进行战场态势决策。文献[45]基于 MATLAB/Simulink、微软基础类库(Microsoft foundation classes, MFC)和 FlightGear 建立了有人/无人机协同空战三维视景仿真平台,生动直观地演示了编队飞行和空战过程,为未来研究有人/无人机混合编队协同作战中的相关技术提供了有效的验证平台。

与美、德等发达国家相比,我国在有人/无人机集群协同理论研究方面具有一定的研究水平,但在操作员决策辅助、人机交互手段设计、人机协同决策和可视化软件平台开发等方面仍存在一定的差距。因此,研究有人/无人机集群协同控制技术对于提升我国信息化、智能化和体系化作战水平具有重要意义^[46]。

1.3 鸟群智能启发

鸟类是体表被覆羽毛、有翼、恒温 and 卵生的高等脊椎动物。从生物学观点来看,鸟类具有的旺盛新陈代谢与飞行运动是其与众不同的进步性特征^[47]。旺盛的新陈代谢保证了其飞翔所需要的高能量消耗,飞行运动使其能够迅速而安全地寻觅适宜栖息地或躲避天敌及恶劣自然条件的威胁。飞翔使鸟类在生物进化的生存竞争中拥有较大的优势,能够迅速扩展和占据世界的各个角落,再通过辐射适应形成许多新物种。因而,鸟类是陆生脊椎动物中分布最广、种类最多的一个类群。同时这种专化的运动方式,也使鸟类躯体结构的一致性强于其他动物类群。鸟类种间区分的依据,通常是喙、腿、脚、羽毛及一些内部器官的细微差别。随着功能形态学与生态形态学的发展,鸟类成为研究物种形成、生存、进化等问题的理想对象。

德国巴伐利亚州索伦霍芬附近的石灰岩采石场有丰富的化石标本,在 1961 年加工石料过程中意外第一次发现了始祖鸟化石,虽然标本的形态具有微小差异,但是经反复研究确认开采过程中发现的化石都属于同一物种,研究人员将其命名为印石板始祖鸟^[48](图 1-7)。对化石的研究证明,始祖鸟是体型类似乌鸦的一种鸟类,其上下颌有成排牙齿,头骨颞部两侧各有两个穿洞(颞窝),前肢有分离的掌骨,指端具爪,20 余节椎骨组成长尾,和爬行类动物十分相似。但始祖鸟具有羽毛和翅膀,脑和感官发达,体温恒定,具有鸟类的独特特征。因此,一种观点

认为，始祖鸟是由爬行类到鸟类的过渡物种，是一种过渡动物，生动地证明了鸟类是从爬行动物演化而来的。



(a) 始祖鸟伦敦标本



(b) 始祖鸟柏林标本

图 1-7 始祖鸟标本

鸟类进化发展至今存在 252 个科、一万余种 (AviList Checklist v2025)，关于鸟类起源主要有槽齿类起源假说、鳄类的姊妹群假说、兽脚类恐龙起源假说等，目前比较流行的观点是鸟类起源于兽脚类恐龙中的腔骨龙类。最先提出鸟类恐龙起源假说的学者是英国赫胥黎，早在 19 世纪 70 年代，赫胥黎对比了一种兽脚类恐龙 (即巨齿龙) 和鸵鸟的后肢，发现两者非常相似，因此他认为兽脚类恐龙与鸟类具有很近的血缘关系，后者可能由前者演化而来，但一直缺少有力证据。直至 20 世纪 60 年代，生物学家奥斯特罗姆在深入研究了一种较为进步的兽脚类恐龙后，发现其与鸟类之间确实存在十分亲近的链痕。与此同时，出现了新的化石证据，从 1996 年到 1997 年，中国地质博物馆的专家在辽宁发现了一组原始鸟类化石标本，分别定名为中华龙鸟和原始祖鸟。经过研究发现它们其实并不是鸟类，而是两种小型兽脚类恐龙，只是在形态构造上具备许多鸟类才具有的特征而已。例如，原始祖鸟的身体表面已经存在一些较短的羽毛，尾部发育了构造类似的较长羽毛。这种羽毛的形态与鸟类羽毛非常相似，但这些羽毛是对称的，与始祖鸟的非对称结构不同，缺乏对于飞行非常重要的非对称性。部分观点称中华龙鸟是始祖鸟的始祖，介于爬行类和鸟类之间的过渡类型，耶鲁大学教授奥斯特龙评论：中国辽西长羽毛恐龙化石的发现，是自达尔文提出进化论学说以来，演化科学研究中最重大的事件之一。

鸟类的起源包含两个互相关联的内容，即羽毛的起源和飞行的发生。

鸟类羽毛是地球上生存的动物中结构最复杂的皮肤衍生物，在鸟类不同结构