

生物集群能量高效利用机制研究综述

吴晓阳^{1,2,3} 邹尧^{1,2,3} 付强^{1,2,3} 贺威^{1,2,3}

摘要 近年来,智能体集群的能量高效利用 (Energy efficient utilization, EEU) 机制已经成为多智能体系统领域的热点问题,如何使用有限的能量资源实现系统性能最优是该问题的核心研究内容. 考虑到智能体集群与生物族群的相似性,探究生物族群的能量高效利用机制对提升智能体集群节能性能有着重要的研究价值. 为此,首先介绍不同生物族群中蕴含的能量利用机制,并根据节能方式的差异分成 3 类,流体优势利用机制、流体阻碍克服机制和热量交换与扩散机制;然后对这些机制进行总结与分析,并提出一种具有一般性的能量高效利用模型;最后,探讨能量高效利用机制在多智能体系统应用中面临的挑战和发展趋势.

关键词 生物集群, 能量高效利用, 节能机制, 编队

引用格式 吴晓阳, 邹尧, 付强, 贺威. 生物集群能量高效利用机制研究综述. 自动化学报, 2024, 50(3): 431-449

DOI 10.16383/j.aas.c230161

An Overview of Energy Efficient Utilization Mechanism of Biological Colonies

WU Xiao-Yang^{1,2,3} ZOU Yao^{1,2,3} FU Qiang^{1,2,3} HE Wei^{1,2,3}

Abstract The energy efficient utilization (EEU) mechanism of agent clusters has become a hot topic in the multi-agent system field. The core research content of this topic is how to use limited energy resources to optimize multi-agent system performance. Considering the similarity between the agent clusters and the biological colonies, exploring the energy efficient utilization mechanism of biological colonies has important research value in improving the energy utilization performance of intelligent agent clusters. Firstly, this paper introduces the energy utilization mechanism of multiple biological colonies, and classifies them according to the differences in energy saving methods, fluid advantage utilization mechanism, fluid obstacle overcoming mechanism and heat exchange and diffusion mechanism. Then these mechanisms are summarized and analyzed, and a general model of efficient energy utilization is proposed. Finally, the challenges and development trends of energy efficient utilization mechanisms in multi-agent applications are discussed.

Key words Biological colonies, energy efficient utilization (EEU), energy-saving mechanism, formation

Citation Wu Xiao-Yang, Zou Yao, Fu Qiang, He Wei. An overview of energy efficient utilization mechanism of biological colonies. *Acta Automatica Sinica*, 2024, 50(3): 431-449

随着网络化技术在智能机器人应用方向的快速发展,使得由多智能机器人组成的无人集群系统的应用范围也愈发广泛. 例如,无线通讯^[1-6]、高效能感知^[7-8]、物联网系统^[9-10]、未知环境信息采集^[11-12]、搜救定位^[13-14]、森林火情监测^[15-16]、环境监测与动植物

保护^[17-19]、水文气象信息采集^[20-21]等. 多智能体系统具有的自主性、协调性和分布性等特性使其能够解决诸多实际问题,但是由于各智能体有限的能量资源,多智能体系统的应用性能也受到限制^[22-24]. 考虑到多智能体系统运动与生物族群的社会性行为存在一定的相似性,因此分析生物族群在集群运动过程中的节能行为,将是提高多智能体系统能量利用效率的有效方法.

对于生物族群而言,能量获取的渠道是有限的,而为了维持正常的生命体征和运动能力,能量消耗是不可避免的. 为了获得更大的生存几率,生物会想尽一切办法节省能量,能够实现能量高效利用 (Energy efficient utilization, EEU) 的物种才能适应残酷的生存环境. 从物理的角度来看,生物会通过保持与同类个体之间的物理距离实现节能效果,也就是组成生物集群. 组成集群就是将多个实时能量系统耦合成一个更复杂的集成体,在能量集成系

收稿日期 2023-03-28 录用日期 2023-07-27

Manuscript received March 28, 2023; accepted July 27, 2023

国家自然科学基金 (62225304, 61933001, 62073028, 62173031), 中央高校基本科研业务费专项资金 (FRF-TP-22-003C2) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (62225304, 61933001, 62073028, 62173031) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (FRF-TP-22-003C2)

本文责任编辑 杨涛

Recommended by Associate Editor YANG Tao

1. 北京科技大学智能科学与技术学院 北京 100083 2. 北京科技大学人工智能研究院 北京 100083 3. 北京科技大学智能仿生无人系统教育部重点实验室 北京 100083

1. School of Intelligence Science and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083 2. Institute of Artificial Intelligence, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083 3. Key Laboratory of Intelligent Bionic Unmanned Systems, Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083

统中相邻个体之间通过利用转换能量构建能量高效利用机制. 鸟群、鱼群中成员通过利用相邻个体为克服流体阻力而产生的流体动力学优势, 进而实现自身的节能效果^[25-30]; 帝企鹅族群、啮齿类动物幼崽通过组成拥挤团体合理利用同伴的体温减少能量的过度消耗^[31-32]; 棘刺龙虾、三叶虫等节肢动物通过合理利用其他个体为克服阻力而产生的“低阻力区”实现自身的能量高效利用^[33-34].

近年来, 多智能体技术对生物族群的借鉴主要集中在两个方面, 学习生物群体行为的启发式优化算法^[35-38]和借鉴生物集群运动模式的智能体编队控制^[39]. 虽然主流的智能体仿生技术研究大多致力于直接模仿生物族群行为, 但是仍有部分学者利用多智能体技术开展对生物族群的能量高效利用机制研究. 北京大学谢广明团队以仿生机器鱼为平台探究鱼群能量利用机制, 通过直接测量集群运动的功耗, 得出了集群节能的行为准则^[40]. 北京科技大学贺威团队以仿生扑翼机器人^[41-42]为平台探究鸟群能量高效利用机制, 从理论角度分析了构型参数对编队能耗的影响^[43-45]. 开展生物族群能量高效利用机制的研究一方面有助于揭示生物群体行为模式, 另一方面为多智能体系统编队设计和控制提供新依据和新方向, 即通过提升执行效率来满足任务需求.

基于节能方法的分类方式有助于研究人员更好地研究传统生物族群中蕴含的能量高效利用机制. 本文对当前生物族群节能机制研究领域的主要研究内容进行了回顾和分析, 整体结构安排如下: 第1节简要介绍本文提出的“能量高效利用”模型; 在第2~4节中分别使用本文提出的“能量高效利用”模型对流体¹优势利用机制、流体阻碍克服机制和热量交换与扩散机制的实现方式和适用生物族群进行讨论, 并对这些生物族群的能量高效利用机制的研究进展进行综述; 第5节介绍能量高效利用机制研究面临的挑战; 第6节总结全文并展望能量高效利用机制在多智能体系统的应用.

1 能量高效利用模型

生物族群在维持自身生存、繁衍和进化过程中, 在不断收集、转化能量的同时, 也在不断地消耗、扩散能量, 而通过个体之间能量交换的方式实现对能量的高效利用正是集群存在的意义之一. 因此, 在对集群进行能量计算时应当分为可以进行能量交换的部分 E_e 和不可以进行能量交换的部分 E_u . 根据这种能量耗散与获取的交互性, 本文提出一种具有一般性的能量高效利用 (EEU) 模型, 该模型通过对比 n 个相同个体在组成集群和单独活动时的能耗程

度, 衡量生物族群中能量高效利用机制的节能效果. EEU 模型表示如下:

$$EEU = \frac{E_u(n) + E_e(n)}{E_{\text{total}}} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{ui} + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n E_{eij}}{\sum_{i=1}^n E_{ui} + \sum_{i=1}^n E_{eii}} \quad (1)$$

其中, E_{total} 表示 n 个成员独立运动消耗的能量之和; E_{ui} 表示第 i 个成员的不可交换能量; E_{eij} 表示第 i 个成员向第 j 个成员传递的能量, E_{eii} 表示第 i 个成员的可交换能量因无法完成转移而直接耗散.

存在集群运动行为的生物族群众多, 虽然它们所处的生存环境不同, 节能实现方式也不同, 但是这些生物族群中蕴含的能量高效利用机制基本符合式 (1) 中给出的 EEU 模型. 根据生存环境和节能方式的差异, 本文将对 3 类生物族群的能量高效利用机制进行讨论, 即流体优势利用机制、流体阻碍克服机制和热量交换与扩散机制, 具体如下:

1) 流体优势利用机制. 该机制是指集群成员通过合理利用流体优势实现自身的能耗节省, 而这种流体优势通常由集群中其他成员的运动产生. 例如鸟群中鸟类利用相邻个体飞行产生的涡流降低自身能耗, 这些涡流就是机制中的可交换能量 E_e , 而鸟类在飞行中受到的阻力就是不可交换能量 E_u , 所有鸟类为维持自身运动而消耗的能量就是总能量 E_{total} .

2) 流体阻碍克服机制. 该机制是指集群成员通过维持自身在集群中的优势位置实现个体对流体阻力的减免. 同时, 由于集群中存在能耗差异, 为了保持集群运动能力不会因为个体能量消耗速度的差异而变化, 采用这类机制的集群往往伴随着位置交换机制. 例如龙虾为了降低水流阻力的影响, 会主动排成长列, 队列中靠前的位置阻力更大, 靠后的位置阻力更小, 而龙虾们会交替担任高能耗位置. 这种用部分个体高能耗换取其他个体低能耗的行为, 也是可交换能量 E_e 的具体表现.

3) 热量交换与扩散机制. 该机制是指集群通过合理利用个体能量耗散实现集群对能量流失速度的有效控制. 同样由于存在位置区别带来的能耗差异, 该机制往往也伴随着由个体运动带来的动态特性. 例如, 帝企鹅抱团取暖抵御严寒的行为, 个体散发的能够温暖相邻个体的热量就是可交换能量 E_e . 但是不是所有散发的热量都能被利用, 这些散发到环境中的能量就是不可交换能量 E_u . 而集群个体为维

¹ 本文中流体是指生物族群长期生存的液体 (海水) 和气体 (空气).

持自身状态而消耗的能量就是总能量 E_{total} .

通过上述定义和相关实例, 可以清楚地发现虽然生存环境与节能方式不同, 但是不同生物族群的能量高效利用机制具有某种相似性, 可以通过一种通用模型进行分析. 接下来本文将会结合具体事例详细介绍和分析上述机制.

2 流体优势利用机制

这种能量高效利用机制适用的生物族群满足以下条件: 生物族群的运动完全依赖同一流体, 如空气、海水等. 譬如, 鸟类飞行完全发生在空气中, 并且鸟类运动产生的升推力也完全依靠空气^[46-47]; 磷虾、鱼类的游动完全发生在水中, 维持浮力和产生推力也完全依靠水中环境^[48-54], 等等.

这些生活在流体中进行集群运动的生物族群在运动时的能量消耗主要用作克服阻力和维持相对位置两部分. 其中个体为维持相对位置而消耗的能量, 其物理表现就是依靠流体产生的有利于其他个体流体优势, 而这正是实现集群能量高效利用的关键. 譬如, 鸟类可以利用相邻鸟类扑动翅膀产生的涡流获得额外升力, 降低自身用于产生升力的能耗; 磷虾为获得浮力而产生的喷射流, 其他个体可以利用该喷射流获得部分浮力, 实现集群节能效应^[55]. 上述例子表明生物个体虽然为维持相对位置而付出了能量, 但是集群行为可以实现这些扩散能量的二次利用, 而这正是生物族群中能量高效利用机制的实现方式. 上述群体都是在空气、水等流体环境中生存, 但是在运动方式和能量利用方式上有所不同, 为此本文详细描述了鸟群、鱼群和磷虾中的流体优势利用机制.

2.1 鸟群

在自然界中大部分鸟类存在集群行为, 譬如大雁、雪鸥、鹈鹕、鸽子等. 这些集群行为中大都蕴含着能量高效利用机制, 譬如迁徙鸟群的线性编队飞行方式(如图 1 所示). 接下来, 本文将详细分析鸟群的节能机理.

2.1.1 鸟群能量利用机制研究

在很早以前, 研究人员就对鸟群行为中蕴含的能量高效利用机制产生了兴趣. 关于这一问题最早进行研究的是空气动力学专家 Wieselsberger^[25], 他首先提出鸟类组成的线性飞行编队是为了有效利用空气动力优势的群体行为. 此后研究人员对该问题开展了诸多研究. 在早期, 研究人员对该问题的研究方法主要是通过目视观察、多维成像拍摄等方式, 并且获得了许多新的发现, 譬如, 鸟类在组成“V 型”

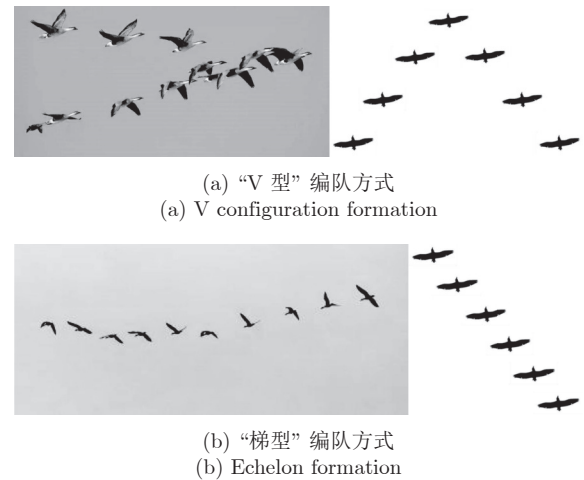


图 1 迁徙鸟群的线性编队方式
Fig. 1 Line formation of migratory birds

编队飞行时会根据不同情况实时调整“V 型”角度^[26], 相邻鸟类之间的扑翼行为存在相位关系^[27], 等等. 由于技术手段有限, 研究人员无法对实验环境和实验对象进行定量分析, 这导致很多研究结果存在争议, 多位学者就相位关系的必要性提出异议, 他们指出相位关系不是获取涡旋能量的必要条件^[27, 56]. 虽然研究人员对编队中鸟类个体实现节能效果的方式没能达成共识, 但是有一点是可以肯定的, 那就是鸟类组成线性编队进行迁徙确实是出于能量高效利用的目的.

Lissaman 和 Shollenberger 是建立鸟群线性编队能量定量分析模型的第一个研究团队^[27]. 虽然该研究在分析过程中不考虑鸟类的扑翼行为, 而且没有针对研究对象的具体参数(尺寸、重量等)进行描述, 但是所得到的定量分析结果依然具有参考价值^[27]. 该研究团队定义了一个诱导阻力比率(Induced power ratio, $1/e$)来表示单个鸟类在线性编队中与单独飞行中诱导阻力的比率, 该比率受到编队密集程度和规模影响. 当 e 增加时, 编队的航程增加 $e^{1/3}$ 倍, 而最佳巡航速度减少 $e^{-1/4}$ 倍. 图 2 给出了比率随翼尖间距 s 增大而增加的趋势. 由此他们得出由 25 只个体组成的飞行编队相对于个体单独飞行最多可以实现 70% 的节能效果. 他们还发现在“V 型”编队中个体受到的阻力较为平均, 而当鸟群组成并列队形时(翼尖与翼尖并列、个体之间不存在纵向差距), 处于中间的个体将会获得更大的流体优势, 据此他们推测幼鸟或体质较差的个体处于低功耗位置的时间可能会更长^[27]. Hainsworth^[57] 在 Lissaman 和 Shollenberger 研究的基础之上^[27], 采用一种图像重构技术测量了“V 型”编队中的翼尖间距(Wing tip spacing), 即垂直于飞行路径的相邻

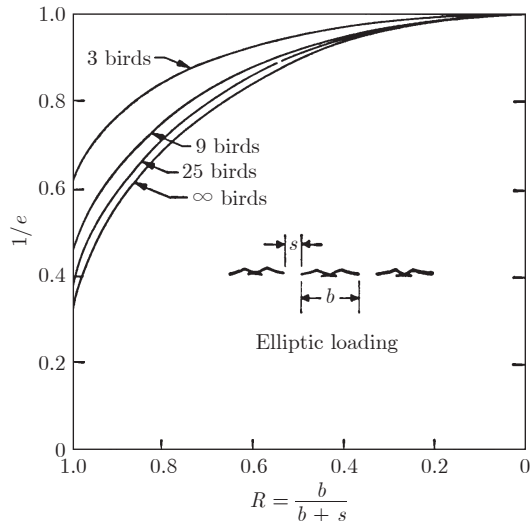


图 2 鸟群编队的诱导阻力比率^[27]

Fig.2 Induced power ratio of different formation flight^[27]

鸟类的翼尖之间的距离以及深度 (Depth), 即沿着飞行路径的相邻鸟类之间的距离 (如图 3 所示), 并通过 Lissaman 和 Shollenberger 的模型^[27] 计算了编队能耗节省效率, 计算后得出由 55 只加拿大鹅组成的编队可以实现 36% 的能耗节省. 同时, Hainsworth^[57] 还提出翼尖间距是影响节能效率的重要因素, 而鸟群在编队飞行时也会根据情况实时地调整相邻个体间的翼尖间距.

Gould 等^[26] 通过对加拿大鹅的详细观察发现, 加拿大鹅在迁徙过程中有 40% 左右的时间采用的编队方式并不完全符合 Lissaman 和 Shollenberger 的模型^[27]. 也就是说, 鸟群在飞行过程中并不是总是利用尖端涡流实现节能效果. 但是 Bent 也没有完全否认尖端涡流的作用, 而是引入“社会行为”假说解释这一现象^[58]. “社会行为”假说是指由于视觉构造的特殊性, 鸟类为保证信息收集能力, 不得不放弃最优节能位置. 因此 Gould 等^[26] 认为鸟群“V 型”编队方式是权衡节能效果和 Information 收集能力之后的结果.

Cutts 等^[59] 通过对 54 只粉红足雁进行多维成像, 计算出雁群在采用“V 型”编队飞行时的平均翼尖间距和深度, 并由此推算出相应参数的“V 型”编队可以实现 14% 的节能效果^[59]. 该结论不到 Lissaman 和 Shollenberger 的理论最大节能效果的 1/3^[27]. 他们认为实际效果与预测效果之间存在差距的主要原因是, 鸟群在实际飞行中相邻个体之间的翼尖间距总是发生变化, 这使得飞行个体无法总是保持在最优节能位置上, 最终导致实际效果相差甚远.

在上述研究成果中, 计算鸟类个体能耗程度的

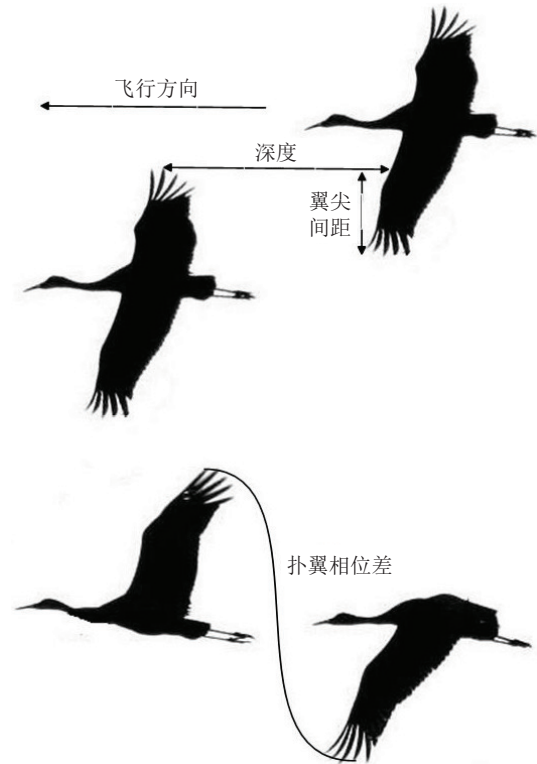


图 3 相邻鸟类间的“翼尖间距”、“深度”和“扑翼相位差”定义

Fig.3 Definitions of “wing tip spacing”, “depth” and “flapping wing phase difference”

方法主要是将鸟类飞行能耗与克服阻力做功等价, 该假设使得能耗计算可以完全依靠空气动力学, 计算简单、直观^[60]. 但是有研究表明, 鸟类在飞行过程中为满足动力需求而消耗的能量仅占总代谢消耗的 10% ~ 23%^[61]. 这说明相比于使用空气动力学计算鸟类飞行能耗, 记录心率或耗氧量更能反映能耗程度.

Weimerskirch 等^[62] 训练了 8 只能够跟随摩托艇进行编队飞行的白鹳, 分别测量了它们在编队和单独飞行时的心率和扑翼频率. 实验结果表明在编队飞行时, 白鹳的能量消耗比单独飞行时低 11.4% ~ 14.0%. 但是也有研究人员对该实验结果提出了异议, 他们指出社会性生物在单独行动时, 受到生存压力的影响心率本身就有所提高, 而该实验结果没有排除这种影响^[63]. 同时, 也有研究人员提出心率和耗氧量也无法准确反映运动能耗, 他们指出由于生物代谢过程的复杂性, 目前很难建立起心率和耗氧量与运动能量消耗之间的明确关系^[64-65].

进入 21 世纪以后, 随着计算机技术的快速发展, 流体力学仿真技术也愈发完善, 这给研究人员研究鸟类编队飞行提供了极大的便利. Maeng 等^[66]

通过构建加拿大鹅翅膀的动态模型, 采用流体力学仿真技术计算翅膀周围的气体流动速度和压力分布发现, 鸟类通过改变翅膀形态就可以节省 15% 的能耗. 而且实验表明在“领航-跟随”模型中, 两者之间的深度保持在 4 m 左右, 翼尖间距在 0 ~ -0.4 m 之间时, 跟随者能够节省约 16% 的能耗. 同时, 他们还从流体力学的角度证明了编队中相邻个体间存在相位关系, 当相邻个体的扑翼相位差保持在 90.7° 时流体优势最大.

Kshatriya 等^[67] 和 Mirzaeina 等^[68] 为研究诱导阻力对鸟群能耗的影响, 针对鸟群的“V 型”编队设计了一种能耗计算模型. 该模型提出诱导阻力 (为获得升力而产生的阻力) 具有相互性, 即诱导阻力在给跟随者带来流体优势的同时, 也可以通过跟随者反馈给领航者, 该模型称为互阻力 (Mutual drag). 互阻力的概念与能量高效利用模型 (1) 中的可交换能量 E_e 相符, 但是该模型没有考虑摩擦阻力对鸟类飞行能耗的影响.

2.1.2 鸟群能量利用机制的分析

综合上述研究结果, 可以发现鸟类集群中确实存在依靠空气实现的能量高效利用机制, 且这种机制的能量利用效率受到编队形状、规模和相对位置关系的影响. 虽然早期研究人员受限于技术水平, 对能量利用机制的研究较为模糊, 但是验证了鸟群中个体可以利用流体优势实现自身节能这一假设. 而且随着高性能相机、流体仿真等技术的发展, 对于机制原理的研究也愈发详实, 尤其是 Kshatriya 等^[67] 和 Mirzaeina 等^[68] 上标提出的互阻力的概念, 非常符合本文提出的能量可交换的观点. 为总结上述研究成果, 并验证本文提出的流体优势利用机制, 进行如下实验.

假定一个由 n 只具有相同飞行性能的鸟类组成的集群, 在以恒定速度进行水平运动. 根据能量高效利用模型 (1), 需要分别计算鸟群在飞行过程中各成员受到的摩擦阻力 (不可交换能量 E_u), 互阻力 (可交换能量 E_e) 和总能量 (所有个体的能量之和 E_{total}). 鸟类在飞行过程中受到的摩擦阻力按下式计算

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho A V^2 \quad (2)$$

其中, C_d 表示阻力系数 (无量纲), ρ 表示流体密度, A 表示受阻面积, V 表示鸟类与流体的相对运动速度. 该模型中诱导阻力对自身的影响, 通过下式计算

$$F_{Iii} = \frac{L^2}{2\pi\rho b^2 V^2} = \frac{(mg)^2}{2\pi\rho b^2 V^2} \quad (3)$$

其中, b 表示翼展长度, L 表示升力, 由于本文假定

鸟群编队处于飞行速度恒定的水平运动状态, 所以升力 L 与重力 mg 相等. 诱导阻力对集群其他成员的影响, 即互阻力采用下式计算^[67]

$$F_I(n) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n F_{Iij} = nF_{Iii} + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{4F_{Iii}}{\pi^2} \times \log \left[1 - \left(\frac{2a}{|i-j|(b+s)} \right)^2 \right] \quad (4)$$

其中, F_{Iij} 表示该模型中个体 i 产生的诱导阻力对个体 j 的影响, s 表示相邻个体的翼尖距离, a 表示涡流产生位置与鸟类中心线之间的距离, 具体情况见图 4. 根据上述分析, 结合能量高效利用模型, 即鸟群能量高效利用机制可以表示为

$$EEU = \frac{nF_d + F_I(n)}{nF_d + nF_{Iii}} \quad (5)$$

其中, 分母表示 n 个个体独立飞行时的能耗, 分子第 1 部分表示 n 个个体飞行时受到的阻力, 第 2 部分表示 n 个个体之间的流体影响. 关于式 (2) ~ (5) 中需要的参数值, 本文根据生物尺度律估算, 得到鸟类受阻面积 $A = m^{0.68}$ ^[69], 阻力系数 $C_d = 0.108$, 翼展长度 $b = m^{0.38}$ ^[70], 空气密度 $\rho = 1.293 \text{ kg/m}^3$, 个体重量 $m = 2.1 \text{ kg}$, 飞行速度 $V = 5 \text{ m/s}$ 和涡流距离 $a = \pi b/8$.

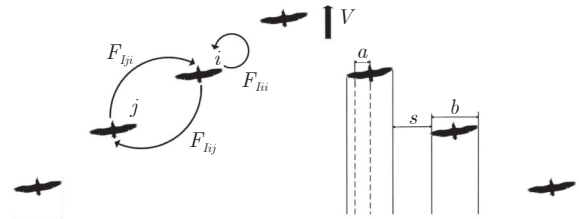


图 4 鸟群“V 型”编队示意图

Fig. 4 Bird flock with V-configuration formation

分析式 (4) 可知, 分子中第 2 项决定了集群节能效率, 在其他参数确定的情况下集群规模 n 和翼尖间距 s 具有决定性作用. 根据 Cutts 等^[71] 的研究成果, 本文分别选取 $s = 0.2b, 0.1b, 0, -0.1b, -0.2b$, 根据式 (5) 计算 EEU 随集群规模和翼尖间距的变化趋势, 实验结果如图 5 所示.

根据图 5 的实验结果可以发现, 集群能量高效利用率会随着集群规模的增加而不断增加, 这也解释了为什么迁徙鸟群会组成规模巨大的集群进行远距离飞行. 根据 Lissaman 和 Shollenberger 的实验结果^[27], 我们发现, 采用上述模型以 25 只鸟类组成

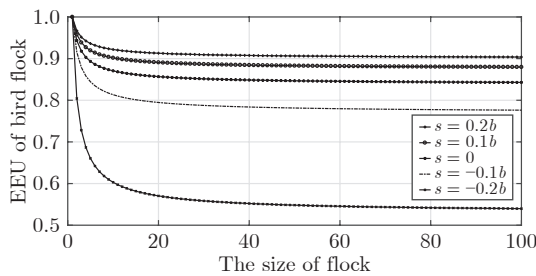


图5 鸟群能量利用机制与集群规模 n 和翼尖间距 s 的关系
Fig.5 Relationship between EEU of bird flock and the size n and wing tip spacing s

的集群即使采用最理想的翼尖间距 $s = 2a - b$, 也无法实现 70% 的节能效果, 可见 Lissaman 和 Shollenberger 的理论确实过于理想. 相比之下, 本文提出的理论更为接近 Weimerskirch 的实验结果, 即 8 只鸟类组成的集群实现 11.4% ~ 14% 的节能效果^[62]. 而且符合这种节能效果的集群在飞行过程中翼尖间距 s 应当处于 $0 \sim 0.1b$ 之间, 这说明鸟群在飞行过程中并不总是处于最优位置, 这一点也与 Cutts 等^[59] 的实验结论相符.

同时, 根据本文提出的模型, 还可以发现在“V 型”编队中不同位置的单位时间能耗也不同. 该实验结果解释了鸟类进行位置轮换的原因, 当飞行能力相同的个体组成集群时, 集群成员倾向于轮流处于高飞行成本的位置, 而当飞行能力不同的个体组成集群时, 集群成员倾向于让能力较弱的成员尽可能处于低飞行成本的位置. Andersson 等^[72] 在研究亲属关系对编队形状的影响时发现, 存在亲属关系的集群会采用对幼鸟更有利的“V 型”编队, 而当一群没有亲属关系的成年候鸟组成集群时, 则倾向于组成能耗更加均衡的“U 型”编队.

当然也并非所有的鸟类集群都能实现节能效果. 在研究线性编队的同时, 也有研究人员对小型鸟类集群这类更为复杂的编队行为产生了浓厚兴趣. Higdon 等^[73] 提出“簇型”编队是比线性编队更为复杂的编队方式. 他们发现在复杂的“簇型”编队中, 个体如果以节能为目标调整自身位置, 反而会增加能耗, 而能耗程度完全取决于集群成员在其周围的分布状况. 所以他们提出实现能量高效利用可能不是小型鸟类组成“簇型”编队的主要原因.

由于“簇型”编队的结构复杂性, 使得相应数学模型的构建非常困难. Usherwood 等^[74] 于 2011 年通过对 18 只赛鸽安装 GPS 和惯性传感器, 详细记录鸽群成员的扑翼频率和运动加速度. 数据表明与单独飞行相比, 赛鸽在集群飞行时的扑翼频率更高, 而且频率与相邻个体的频率高度相关. Usherwood

等^[74] 提出“簇型”编队实现空气动力学优势的可能性很小, 即使只是以扑翼频率作为能耗标准来计算, 集群飞行显然比单独飞行耗能更高, 而且高频扑翼行为显然是为了防止碰撞而进行的精确飞行控制. 虽然, 小型鸟类组成集群飞行的原因还未能明确, 但是“簇型”编队的形成很可能也是多种因素共同作用的结果^[75].

2.2 鱼群

作为与鸟类具有相似流体运动环境的鱼类, 鱼群游动行为中蕴含的能量高效利用机制也是颇受研究人员关注的问题. 鱼类组成集群运动的原因也与鸟类颇为相似, 除了节能目的外, 鱼群的形成还与社会因素和感官因素有关^[28, 76].

2.2.1 鱼群能量利用机制研究

Breder^[77] 是最早研究鱼群节能机制的研究人员之一, 但是他只是提出鱼群行为中存在能量高效利用机制的假说, 却没有分析鱼群采用的紧密编队是如何实现节能的. 随后, Belyayev 等^[29] 提出, 鱼群中鱼类尾巴摆动产生的涡流可能会降低相邻个体在水中的阻力, 并设计了相关实验证明其假说. 上述研究结果虽然提出了鱼群行为中存在能量高效利用机制的假说, 但是没能详细分析和讨论鱼群编队方式与节能机制之间的关系. Weihs^[28, 78] 最早提出鱼群采用“菱形”编队 (如图 6 所示) 会带来流体动力学优势, 并对这种编队形式的节能效果进行了量化. 他指出在“菱形”编队中存在着“槽道效应” (Vortex street), 即鱼群紧密游动时鱼群成员可以有效利用涡流带来的流体优势^[28, 30]. 当并排个体中心线之间的距离为个体宽度的 2 倍时, 编队末尾跟随者受到的流体优势可以高达 15%. 而当该距离为个体宽度的 1.5 倍时, 则可以达到 30%.

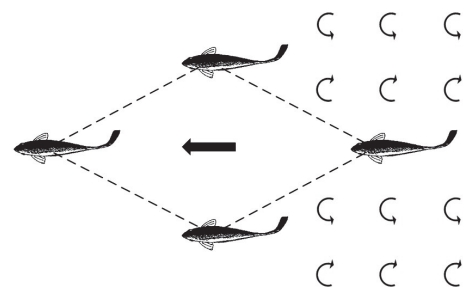


图6 有鳍鱼类的“菱形”编队
Fig.6 Diamond formation of finfishes

虽然 Weihs^[28, 78] 提出了鱼群能量高效利用机制的量化模型, 但是由于实验技术的局限性, 为验证该模型而进行的生物实验往往不能证明该模型的可

靠性. Partridge 等^[79] 在实验室中对鲱鱼、鳕鱼等多种鱼群进行观测实验发现, 在 659 组实验结果中只有 4 组满足 Weihs 提出的“菱形”编队模型, 因此他们根据实验结果得出该模型缺乏可靠性的结论. 当然, 也有研究人员对该结论提出异议, 认为实验没有排除“地面效应”^[80] 带来的影响, 同时也忽略了构成鱼群的其他因素^[81].

当然, 也有实验验证了 Weihs 模型的可靠性^[28, 78]. Zuyev 等^[82] 通过观察在水槽中游动的鲱鱼群发现, 与领先的鲱鱼相比处于跟随位置的鲱鱼尾巴摆动频率要低 15% ~ 29%. Herskin 等^[83] 通过对自然状态下的鲈鱼群进行观察, 发现处于跟随位置的鲈鱼尾巴摆动频率降低 9% ~ 14%, 耗氧量降低 9% ~ 23%. Svendsen 等设计了一种可以调节水流速度的水池, 测试了由 8 只欧洲拟鲤组成的集群在 3 种不同流速下的摆尾频率发现, 处于鱼群尾部的拟鲤, 摆尾频率随着流速的上升不断下降^[54]. 这些实验在不同程度上证明了 Weihs 的鱼群节能模型^[28, 78], 但是也有研究人员提出在这些实验中出现的摆尾频率下降现象也可能是流体回溯^[84]、墙壁效应^[85] 和涡流捕获^[28] 共同作用的结果, 因此不能充分证明“菱形”编队理论的可靠性^[86]. 然而, 在之后的研究中, Marras 等^[87] 设计了更加详细的实验方案. 通过数据处理等方式最大程度地消除了流体回溯和墙壁效应的影响, 他们发现除了领航者正后方 30° 圆锥形区域以外, 绝大部分区域对于其他个体而言都能产生一定的节能效果, 实验通过鱼类摆尾频率表征能量消耗程度, 效果如图 7 所示.

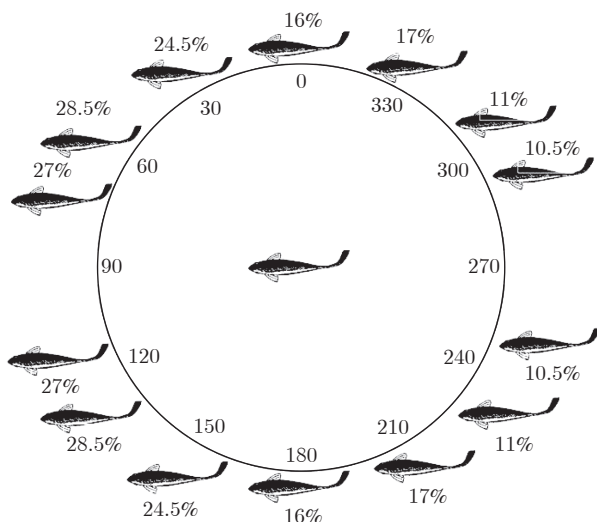


图 7 鱼群节能区域及节能效果图

Fig. 7 Energy saving zone and energy saving effect of fish school

从上述生物观察实验的结果来看, 在水槽、水池等特定实验设备中进行的鱼群节能机制研究实验, 无法得到有效证明理论可靠性的实验结果, 这一点与第 2.1 节中讲述研究人员对鸟群节能机制的研究困境很相似. 而突破这一困境的技术也是相同的, 即利用的都是流体动力学仿真技术.

Hemelrijk 等^[88] 以鲱鱼为仿真对象探究了鱼群在 4 种编队 (“菱形”、“矩形”、“方阵”和“线形”) 中的节能情况, 实验结果证明, Weihs 提出的“菱形”编队中存在节能机制, 同时他们还发现, 即使在其他个体正后方的鱼类仍然可以通过改变头部朝向来尽可能地捕获涡流实现能耗节省. Dai 等^[89] 针对不同数量 (2、3、4 条) 的鱼群设计了 14 种不同的编队方式分别进行了流体仿真实验. 实验结果表明, 无论是从个体角度还是集体角度, “菱形”编队方案并不一定是最佳编队方案, 针对不同数目的集群采用不同编队方式获得节能效果也不同.

Chen 等^[90] 通过对由 3 条鱼构成的小型编队进行流体力学仿真分析, 探究 S/L (纵向距离与个体长度的比值) 和 D/L (横向距离与个体长度的比值) 对“菱形”编队节能效果的影响, 如图 8 所示. Chen 等^[90] 通过对个体进行受力分析, 构建个体能耗模型 P_s , 即

$$P_s = \oint (pn) v_s dA \quad (6)$$

其中, p 表示个体表面受到的压力, n 表示个体表面微元法线方向的影响系数, v_s 表示个体表面微元的横向速度, dA 表示表面微元的微分. 模型通过定义个体能耗参数 C_p 表征个体能耗程度, 即

$$C_p = \frac{P_s}{\frac{1}{2}(\rho U^3 L^2)} \quad (7)$$

其中, ρ 表示流体密度, U 表示个体相对运动速度, L 表示个体长度. 实验结果表明, 当纵向距离是个体长度的一半 ($S = 0.5L$) 时, “菱形”编队中的跟随者更容易利用领航者产生的流体优势. 因此, 在 $D = 0.15L$ 和 $S = 0.5L$ 时, 编队可以获得最大 20%

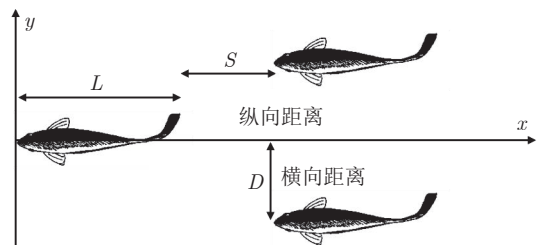


图 8 “菱形”编队参数示意图

Fig. 8 Schematic diagram of diamond formation parameters

的节能效果. 同时, Chen 等^[90]提出“菱形”编队实现节能效果的原因是, 个体在运动周期的特定时间内能够帮助个体的头部和尾部转向, 利用两条鱼之间的“槽道效应”而形成的低压区域, 实现对领航者流体优势的有效利用, 因此缩小通道宽度有助于提高节能效率. Chen 等^[90]的实验验证了 Weihs 提出的“槽道效应”^[28], 并且进一步丰富了研究人员对鱼群编队构成的认识.

除了有鳍鱼类以外, 研究人员很早以前就发现鳗鱼群会进行远距离的迁移运动, 欧洲鳗鱼和美洲鳗鱼会在产卵季成群的迁徙到马尾藻海域, 平均迁徙距离高达 2 000 km, 而且在迁徙过程中鳗鱼群不觅食, 完全依靠身体储备的能量运动^[91]. 因此, 鳗鱼群的迁徙行为受到越来越多的关注, 但是研究人员的关注重点主要集中在鳗鱼的代谢方式和储能方式上, 对于像鱼群那种通过利用集群带来的流体动力学优势的节能机制却少有学者研究^[92-95].

为了探究鳗鱼群在远距离迁徙运动中能否实现能耗减少, Burgerhout 等^[96]在可以调节流速的水槽中研究鳗鱼群游动行为. 在实验中 Burgerhout 等^[96]首先确定了鳗鱼的最大可持续游动速度, 然后以 7 只鳗鱼为一组进行实验. 实验结果表明与单独游动相比, 鳗鱼在组成集群游动时耗氧量减少了约 30%, 同时鳗鱼的游动方式与其他鱼类不同 (如图 9 所示), 鳗鱼游动时整个身体均作大幅度摆动, 而有鳍鱼类的前半身摆幅有限, 后半身才会逐渐增大. 整体摆动的方式使鱼身至少有一个完整的推进波, 进而可以抵消掉水平力, 减小鱼身的侧滑和偏荡. 所以鳗鱼群在游动时不会像有鳍鱼类一样组成“菱形”编队^[28], 而是倾向于平行游动.

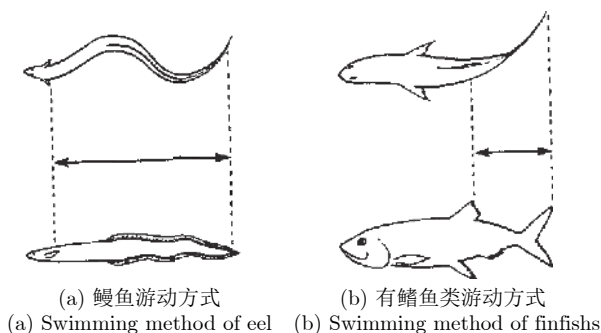


图 9 鳗鱼游动方式和有鳍鱼类游动方式^[28]

Fig.9 Swimming method of eel and finfishes^[28]

2.2.2 鱼群能量利用机制的分析

根据上述研究结果, 可以确定鱼群中确实存在依赖流体实现的集群能量利用机制. 与鸟类类似的是, 这种机制的利用效率同样受到编队形状、规模

和相对位置关系的影响. 但与鸟类研究不同的是, 由于生存环境和运动方式不同^[97-101], 针对鱼群的观察更为便捷和准确, 这使得鱼群研究的结果更加丰富和详细. 其中, Marras 等^[87]设计的极为详实的实验方案合理有效印证了本文提出的流体优势利用机制, 即集群能量是可以交换的. 为总结上述研究成果, 并在鱼群中验证本文提出的流体优势利用机制, 进行如下实验.

假定 1 个由 4 条具有相同运动性能鱼类组成的“菱形”编队, 在以恒定速度进行水平运动. 根据“能量高效利用”模型, 需要分别计算鱼类在独自游动和集群游动时的能耗. 而常见的用于计算鱼类运动能耗的方法, 如 Froude 效率^[102], 会将运动能耗分成产生推力和克服侧向力两部分. 考虑到侧向力受到运动方式和身体形状的影响, 不同种类和大小的鱼类受到的侧向力也不尽相同, 因此本文仅评估“菱形”编队带来的推力优势. 假设鱼类在稳定运动时的推力与阻力相等, 而阻力的计算通过式 (2) 得到, 其中鱼类在运动时的阻力系数 C_d 采用四圆柱体流体实验的结果进行近似估计^[103]. 本文采用“能量高效利用”模型评估“菱形”编队节能效率, 计算式为

$$EEU = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{2} (C_{di} \times \rho \times D \times U^2) \right] U}{n \times \frac{1}{2} (C_{ds} \times \rho \times D \times U^3)} \quad (8)$$

其中, C_{di} 表示第 i 个鱼类的阻力系数, ρ 表示流体密度, D 表示鱼类截面积, U 表示相对流体运动速度, C_{ds} 表示独行鱼类的阻力系数. 实验使用的“菱形”编队如图 10 所示. 该实验采用的“菱形”编队实际上是正方形编队, 实验通过改变编队边长 S , 探究编队中不同位置的能耗影响, 以及 S/D 对“菱形”编队的能耗影响, 实验结果如图 11 所示. 从实验结果可以看出, 在“菱形”编队中, 个体间距 S/D 越小, 集群节能效果也就越好. 集群中不同位置的能耗也不同, 处于编队尾部 (1 号位置) 的鱼类能耗总是最低, 说明此处鱼类可以有效利用“槽道效应”产生的流体优势实现自身能耗节省. 而处于编队头部 (2 号位置) 的鱼类能耗却不是集群中最高的, 这一点验证了 Marras 等^[87]的实验结论.

2.3 南极磷虾

南极磷虾是一种生活在南极洲海域的磷虾, 以集群方式生活, 集群密度可高达 $10000 \sim 30000/\text{m}^3$ ^[104]. 成年磷虾长度约 $45 \sim 60 \text{ mm}$, 以微小的浮游生物为食^[105], 水平方向的移动速度约为 20 cm/s ^[106],

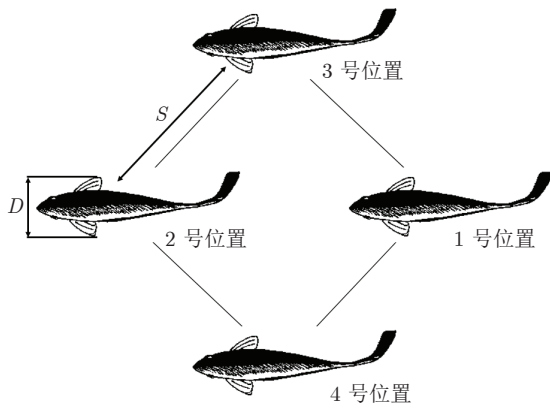


图 10 “菱形”编队示意图

Fig. 10 Diamond formation of diagram

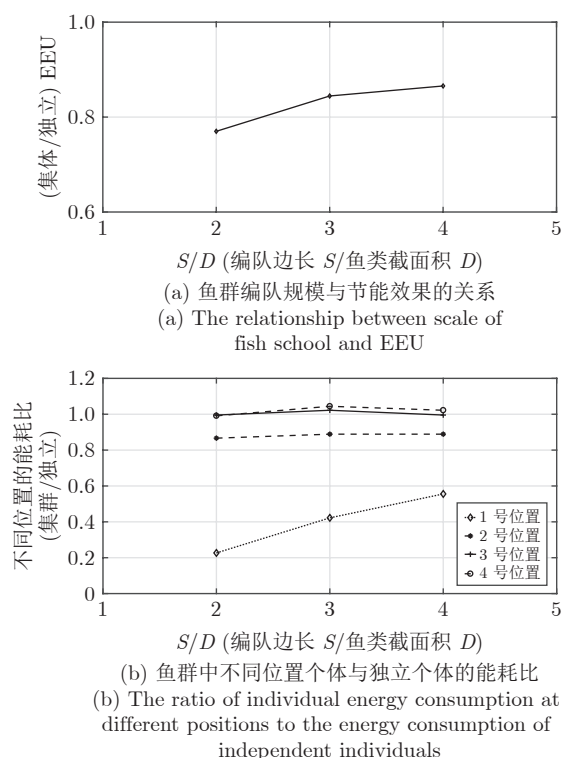


图 11 EEU 实验结果

Fig. 11 Results of EEU experiment

而且磷虾群可以在几天时间里迁移数百公里^[107]。

Ritz^[104]以类虾体 (*Paramesopodopsis rufa*) 为对象, 研究了该生物集群中蕴含的节能机制, 类虾体与南极磷虾在体型上极为相似, 体长在 9 ~ 13 mm 之间. 他通过观察不同规模的生物群体在聚集和分散情况下的耗氧量发现, 当生物群体聚集时每毫克耗氧量比非聚集情况下平均小 7.2 倍, 如图 12(a) 所示. 根据实验结果 Ritz 推测, 聚集状态下生物集群能够节省能量的部分原因是集群行为带来的流体动力学优势, 这使得生物集群的下沉率最小化. 同

时, Ritz 还通过对水流染色, 使聚集行为带来的上升水流可视化, 他指出正是这些水流的存在使得集群中的生物个体可以节省能量. 由于磷虾与鱼类不同, 没有用于产生浮力的器官, 因此用于维持水平游动的能耗很高, 所以组成集群是磷虾群实现节能的必要条件.

Ritz^[104]虽然确定了磷虾依靠相邻个体产生的流体优势实现节能, 但是没有详细阐述节能实现的过程. Yen 等^[108]以太平洋磷虾为对象, 通过粒子图像测速技术观测磷虾在运动时产生的流体影响发现, 运动产生的流体扰动范围比自身体积大 18 倍, 如图 12(b) 所示. 随后, Patria 等^[105]也研究了大西洋磷虾的流体扰动影响, 他们发现, 在“领航-跟随”模型中, 跟随者的胸肢对倾向于与领航者保持运动频率同步. 并且运动产生的流体扰动可以划分为提供浮力和推进力两个部分, 这有助于跟随者与领航者保持相对位置.

在最新的研究中, Murphy 等^[109]将南极磷虾群划分成更小的集群, 通过分析这些小型集群中成员的运动趋势, 得出磷虾群和鱼群一样具有较高组织程度的结论, 如图 12(c) 所示. 他们发现, 磷虾倾向于在领航者产生的流体扰动中运动, 但是他们提出该行为是出于集群交流和协调的目的. 虽然他们同样认同磷虾群中存在节能机制, 但是这些机制并不像鱼群的能量高效利用机制那样简单. Burns 等^[110]通过分析南极磷虾群的 3D 运动轨迹发现, 磷虾集群中存在与鱼群、鸟群类似的运动模式. 磷虾会与邻近个体保持一致的运动状态, 并且会根据同伴的位置调整自身的运动方向和速度.

根据上述分析可以发现, 与倾向于组成固定形状的鸟群和鱼群不同, 磷虾集群更倾向于组成无明确形状的团体^[111]. 这种现象主要是因为密集集群中个体运动状态受到相邻个体的影响, 集群的聚集和分散往往遵循简单的规则. 这一点在多智能体系统的行为中也多有体现, 如最近邻规则^[112]、锐角测试的交互规则^[113]等.

3 流体阻碍克服机制

在自然界中部分生物族群需要在流体中运动, 克服流体带来的阻力, 但是与鸟类、鱼类这些生物不同的是它们不需要借助流体获得维持相对位置的支持力. 由于身体形态和流体粘性使生物在流体中运动时会产生压差阻力和摩擦阻力, 为方便表述, 本文将这两种阻力统称为形态阻力^[53]. 生物族群中的成员在进行集群运动时, 形态阻力是为了实现运动必须付出的能量消耗, 它的出现导致成员运动经

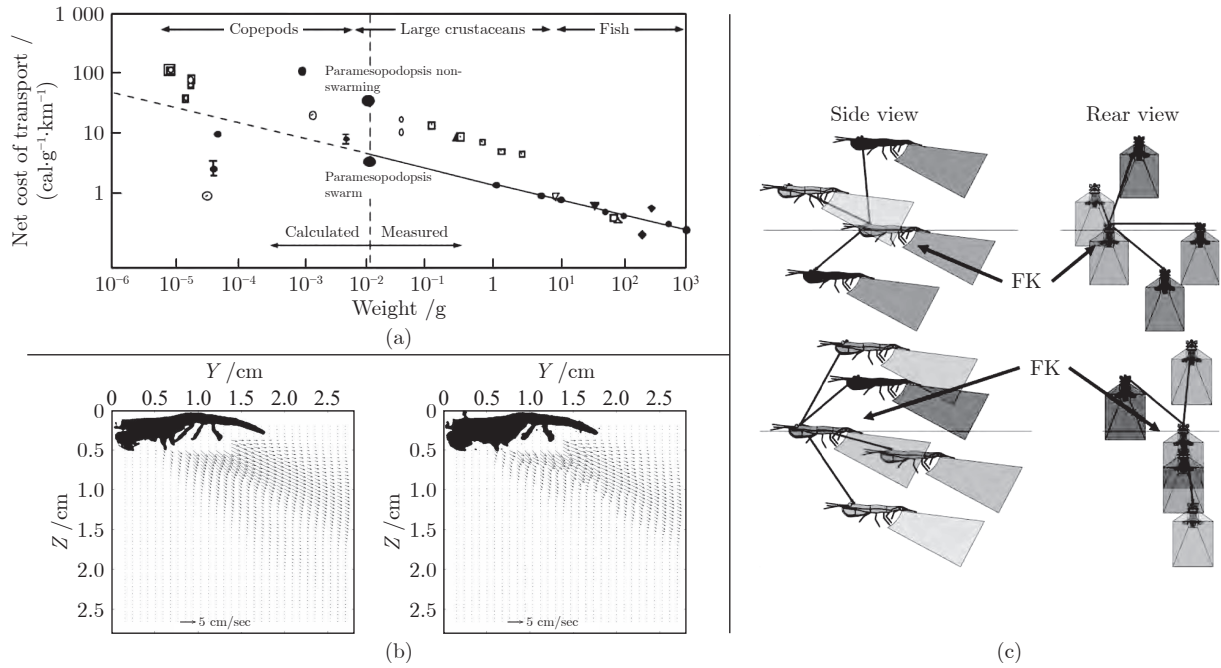


图 12 南极磷虾集群 ((a) 不同规模生物群体在聚集和分散情况下的能耗情况^[104]; (b) 磷虾运动时流体扰动的影响^[108]; (c) 磷虾群中不同的编队方式^[109])

Fig. 12 Krill swarm ((a) Energy consumption of different group in non-swarming and swarming condition^[104]; (b) Hydrodynamic disturbance from the motion of krill^[108]; (c) Different formation method of krill swarm (Focal krill, FK)^[109])

过的地方会短暂地出现低压区, 而紧随其后的成员可以有效利用该低压区降低自身形态阻力. 譬如, 棘刺龙虾、三叶虫等节肢动物在海底运动时会组成线性队列克服海水阻力, 跟随者通过领航者提供的低压区实现阻力减免, 从而实现能耗减少^[33-34, 109], 自行车运动员会在比赛中组成集团, 减免自身受到的空气阻力^[114-116]. 在这些集群运动现象中, 在速度恒定的情况下运动对象的能量消耗主要来自形态阻力, 而伴随形态阻力产生的低压区就是能量高效利用机制实现的主要方式.

3.1 节肢动物能量利用机制研究

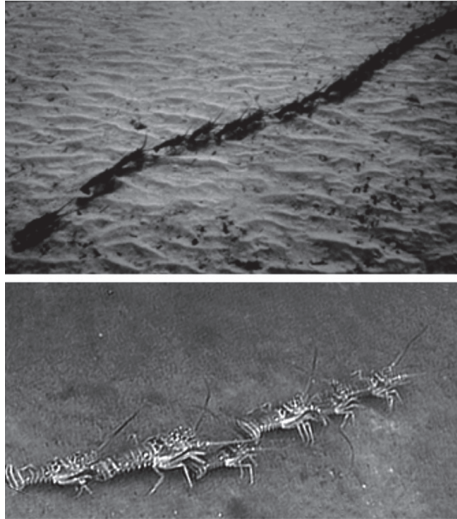
Bill 等^[117]于 1976 年发现棘刺龙虾在集群移动过程中存在单列排队行为, 他们提出棘刺龙虾采用这种方式移动是出于节能目的. 他们通过观察不同规模龙虾集群的移动速度判断阻力减免程度, 龙虾群的规模在 2 ~ 65 只之间, 移动速度在 15 ~ 35 cm/s 之间, 平均移动速度为 28 cm/s. 他们发现 1 组 19 只龙虾组成的单列线性队形可以达到最高速度 35 cm/s, 相对单独移动的龙虾而言, 龙虾编队至少实现了 65% 的阻力减免. 根据实验结果, 他们提出龙虾群通过组成编队的方式获得阻力减免的观点, 这意味着可以用有限的能耗保持更高的可持续移动速度, 同样实现了能量高效利用.

此后, Herrnkind 等^[118-119]通过整理、分析大量

棘刺龙虾集群移动现象的数据后, 对这种排队迁徙行为提出了其他的可能性, 例如觅食、防御天敌等. Herrnkind^[120]发现龙虾集群更容易在离开巢穴和在开阔地迁徙的过程中排队, 而且根据集群规模的不同聚集的目的也不相同. 当集群数量少于 5 个时, 队列中的龙虾在流体动力学效率方面并没有实质性优势. 当数量到达 20 个后才会出现明显的阻力减免效果, 而且这种减阻效果会随着队列的增长而增加. 但是长队列很容易因干扰而破坏, 例如巨浪涌动、地形分割等^[121], 所以龙虾集群更容易在沙滩和海草上排成长队, 而珊瑚礁上则没有, 如图 13 所示.

同时, Bill 等^[117]还发现, 棘刺龙虾在排队迁徙过程中会轮流担任队列的领航者, 也就是阻力最大的位置. 这种通过个体轮流承担“不利位置”实现集体能耗节省的节能机制在多种生物集群中均有体现. 譬如, 迁徙鸟群会在飞行过程中轮流担任领航者位置以实现集体能耗均衡^[72, 117]; 帝企鹅群为了过冬抱团取暖, 轮流交换外围的寒冷位置使每个成员都能公平地享受到集群带来的温暖^[31, 122-123]; 有鳍鱼类通过“O 型转弯”实现领头成员向集群尾部移动, 完成领航者与跟随者之间的交换^[79].

三叶虫是寒武纪时期就出现的最具代表性的远古节肢动物, 在二叠纪大灭绝中完全灭亡, 因此研究人员对这种生物的了解只能来自化石. 通过对化石的研究, 研究人员发现三叶虫存在聚集倾向, 与

图 13 不同规模的棘刺龙虾队列^[120]Fig. 13 Different sizes of migrating lobsters^[120]

棘刺龙虾类似, 这种倾向往往伴随迁徙、捕食等行为出现^[124-126]. 而对于三叶虫是否和其他节肢动物一样具有队列行为, 研究人员也早有研究^[127].

Radwański 等^[128] 和 Kin 等^[129] 在波兰中部的圣十字山脉中发掘出的三叶虫化石, 几乎完好无损地展示了三叶虫队列, 如图 14(a) 所示. 在这些队列中一般由较大的个体排在前部, 较小的个体处于尾部, 同时也存在完全由较小个体组成的小型队列. Radwański 等^[128] 推测这组三叶虫化石能够较为完整地保留下来, 可能是因为火山熔岩等环境变化.

Gutiérrez-Marco 等^[130] 在葡萄牙北部的阿鲁卡地质公园的化石考古现场发现了大量奥陶纪三叶虫化石, 在这些化石中研究人员发现三叶虫会组成直线型、锯齿型或波浪型的队列, 如图 14(b) 和图 14(c) 所示. 当然, 由于化石产生和保存的苛刻条件, 虽然没能找到更加详细的化石资料, 但是研究人员几乎

可以肯定三叶虫这类远古节肢动物也存在和棘刺龙虾相似的大规模队列迁徙行为. 而且由于对三叶虫队列现象的研究只能依靠化石, 所以也无法通过生物观测实验计算三叶虫通过队列行为实现的节能效果.

3.2 节肢动物能量利用机制的分析

接下来本文使用能量高效利用模型简单讨论这类队列行为实现的节能效率. 由于棘刺龙虾、三叶虫均生活在海底, 迁徙过程中能量消耗主要用于克服水流带来的阻力, 而队列行为就是为了实现阻力减免而出现的. 因此, 本文通过计算节肢动物通过队列行为实现的阻力减免来衡量节能效果, 阻力计算采用式 (2). 由于未能找到关于棘刺龙虾、三叶虫的阻力系数, 考虑到这些生物的半身形状大都近似于流线型, 且头部 (主要受阻位置) 横截面呈椭圆形, 本文采用流体力学研究中对圆柱体的阻力系数研究结果进行近似估计. 根据对多圆柱体的流体实验^[131], 本文选择队列的相对运动速度为 $V = 0.63 \text{ m/s}$, 其对应的阻力系数如表 1 所示, 海水密度选择 $\rho = 1030 \text{ kg/m}^3$, 受阻面积采用 Kin 和 Błażejowski 的研究结果 $A = 2.7 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ ^[109]. 根据能量高效利用模型, 棘刺龙虾、三叶虫等节肢动物的节能效率计算为

$$EEU = \frac{E_u(n) + E_e(n)}{E_{\text{total}}} = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{di} \times \rho \times A \times V^2)}{n \times C_{di} \times \rho \times A \times V^2} \quad (9)$$

其中, C_{di} 表示队列中第 i 个成员的阻力系数. 由于未能找到多只节肢动物的阻力系数, 本文将只计算仅由 6 只个体组成的队列, 经计算 $EEU(6) = 0.294$,

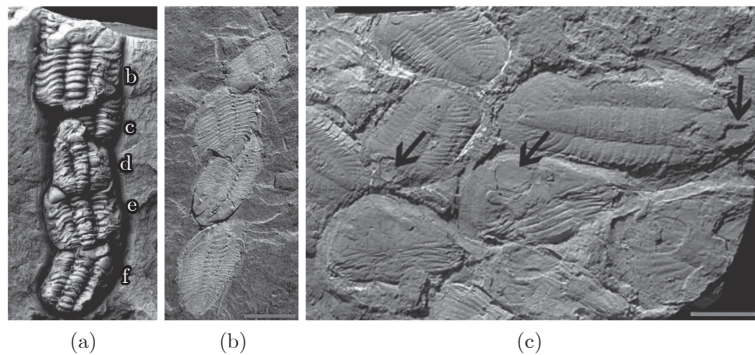
图 14 三叶虫集群 ((a) 首尾相连的三叶虫队列^[128]; (b) 线性的三叶虫队列^[130]; (c) 非线性的三叶虫集群^[130])Fig. 14 Trilobite clusters ((a) Queue with most individuals oriented head-under-tail^[128];(b) Linear autochthonous trilobite clusters^[130]; (c) Nonlinear trilobite clusters^[130])

表 1 多圆柱体阻力表

Table 1 Drag coefficients of multi circle cylinders

位置序号	阻力系数
1	1.2158
2	0.4212
3	0.2191
4	0.1069
5	0.0861
6	0.0991

这证明由 6 只个体组成的队列至少可以实现 70.6% 的阻力减免. 实验结果与 Bill 和 Herrnkind^[117] 的实验结论 (19 只编队, 65% 的阻力减免) 非常接近, 该实验结果可以证明节肢动物的队列行为能够实现能量高效利用.

4 热量交换与扩散机制

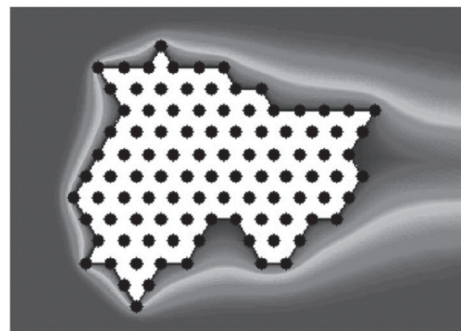
热量交换与扩散机制主要适用于在恶劣环境下需要限制能量耗散速度的生物族群, 生物出于生存能量消耗最小化的原则聚集在一起, 不断耗散能量维持正常生命体征的同时, 也在不断接收其他个体耗散的能量, 实现集群能量的高效利用. 为了减缓温度流失速度使维持生命体征的能耗最小化, 部分生物族群采用基于热交换的能量高效利用机制, 通过合理利用其他个体耗散的能量维持自身体温. 这种热量交换与扩散的过程与本文提出的能量高效利用模型相符, 生物用于维持生命体征而散发的能量可以被划分为: 通过热交换在族群中进行传递的能量 $E_e(n)$ 和不能被其他成员利用直接耗散的能量 $E_u(n)$. 譬如, 帝企鹅为了度过寒冷的冬天会组成不断运动的密集团体^[132-134], 哺乳动物幼崽为了保暖聚集在一起进行热交换^[135-137]等.

很早以前就有研究人员发现帝企鹅群会蜷缩成一团以度过寒冷的冬天, 这些密集团体始终保持运动, 而且持续时间相对较短 (大约几小时), 因此帝企鹅们总是处于“组成团体-密集运动-解散团体”的动态循环中^[31-32]. 帝企鹅必须要节省能量, 因为在过冬时期它们不得不禁食 105 ~ 115 天^[32], 它们通过组成拥挤的团体, 减少自身暴露在寒冷空气中的身体表面积借此减缓体温流失速度^[138]. 而且拥挤团体内部的温度也比较高, 可以保持在 20 ~ 35 °C 之间^[139].

研究人员通过观察帝企鹅群在不同天气状况下的表现对该现象具有了更加深入的了解. 他们发现当环境温度较低、风速较高时帝企鹅会组成拥挤团体, 但是团体的拥挤程度仅取决于环境温度^[139-140]. 同时, 他们还发现帝企鹅组成的团体虽然拥挤, 但是每个成员都有大致相等的机会进入团体内部享受

到拥挤带来的温暖^[139-142].

关于帝企鹅是如何实现这种复杂现象, 研究人员进行了大量实验. Gilbert 等^[139] 提出在帝企鹅群中每个成员具有完全相等的地位是造成该现象的重要原因, 但是他们没有阐明该现象实现的过程. Zitterbart 等^[142] 使用凝聚态物理学思想解释帝企鹅群是如何实现动态重组的. Le Maho^[31] 通过对帝企鹅群的定性观察发现, 企鹅团体的运动是由风向因素主导的. 之后, Waters 等^[123] 在 Le Maho^[31] 的基础上建立了帝企鹅群在环境因素影响下的定量模型, 详细描述了拥挤团体的运动过程, 帝企鹅群在环境因素影响下的温度分布如图 15 所示. 与帝企鹅集群为取暖而组成的密集动态团体相似, 啮齿类动物的幼崽也存在类似的行为^[134]. Alberts^[143] 和 Canals 等^[144] 通过观察发现, 在由数十只幼崽组成的拥挤团体中, 处于团体边缘的个体会主动运动到团体中心, 而每一只幼崽都在不停地进行这种“边缘-中心”的运动. 同时, 还有研究人员发现, 由于幼崽通过代谢产生的热量较少, 且缺乏保暖的皮毛和脂肪, 它们的热量流失速度要远高于成年个体^[145-146]. Richter^[147] 和 Sealander^[148] 发现啮齿类动物的幼崽会通过组成动态拥挤团体的方式来减少暴露在空气中的体表面积, 这种行为有助于减缓热量流失速度.

图 15 帝企鹅群的温度分布^[116]Fig. 15 Temperature distribution of penguins^[116]

针对于这一现象的最新研究应当是 Glancy 等^[149-150] 提出的一种自组织能量交换模型, 他们提出这种拥挤现象是幼崽们在环境温度影响下自组织完成的. 实验结论表明, 增加个体产热或保存热量的能力可以扩大集群的环境温度适应范围, 并且在该范围内集群会根据环境温度的变化自适应地调整拥挤程度. Glancy 等^[149-150] 提出的热交换模型描述如下:

$$G^i = T_b^i + k_1 \eta_i (T_b^i - T_a) + k_2 (1 - \eta_i) (T_b^i - T_c^i) \quad (10)$$

其中, η_i 表示集群中个体暴露在空气中的皮肤表面积占总面积的比例, T_c^i 表示相邻个体间接触介质的表面温度, T_b^i 表示个体体表温度, G^i 表示自发热

率, T_a 表示环境温度, k_1 和 k_2 分别是暴露区域和接触区域的热导常数. 从上述模型可以看出, 用于维持体温和与环境进行热交换的部分是无法实现能量高效利用的部分 $E_u(n)$, 而用于在拥挤团体与其他个体进行热交换的部分能量属于能够实现能量高效利用的部分 $E_e(n)$. 所以, 按照本文所提出的能量高效利用模型, 此类拥挤团体的能量利用率可以计算如下:

$$EEU = \frac{E_u(r) + E_e(r)}{E_{total}} = \frac{\sum_{i=1}^n [T_{bi} + k_1 \eta_i(r) (T_{bi} - T_a)]}{\sum_{i=1}^n [T_{bi} + k_1 (T_{bi} - T_a)] + \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [k_2 (1 - \eta_i(r)) (T_{bi} - T_{bj})]}{\sum_{i=1}^n [T_{bi} + k_1 (T_{bi} - T_a)]}} \quad (11)$$

其中, $E_u(r)$ 表示半径为 r 的团体中无法交换的能量, $E_e(r)$ 表示半径为 r 的团体中可以交换的能量, T_{bi} 和 T_{bj} 分别表示第 i 和第 j 个幼崽的体表温度, η_i 表示第 i 个幼崽的暴露面积占比. 式 (11) 中第 1 部分分子表示团体中所有个体自身温度 and 与环境交换热量的总和, 第 2 部分分子表示团队中所有个体与相邻个体的热量交换总和, 而分母表示 n 个独立个体的自身温度 and 与环境交换热量的总和.

本文采用 Glancy 等^[149-150] 的实验结果, 选取环境温度 $T_a = 25.26$ °C, 暴露区域热导常数 $k_1 = 1/(2\pi r)$ 和接触区域热导常数 $k_2 = 2.5/(2\pi r)$, 其中 r 表示拥挤团体的半径, 单位是幼崽个体, 并假设所有幼崽体积相同, 皮肤面积暴露比 η_i 和个体体表温度 T_{bi} 采用下列各式计算:

$$\eta_i = \begin{cases} 0.4, & G_i < 5 \\ 0.0857G_i - 0.0286, & 5 \leq G_i < 12 \\ 1, & 12 \leq G_i \end{cases}$$

$$T_{bi} = \begin{cases} 2.5G_i + 25, & G_i < 5 \\ 3.75, & 5 \leq G_i < 12 \\ 0.9375G_i + 26.25, & 12 \leq G_i \end{cases} \quad (12)$$

其中, G_i 服从分布 $N(AverG(r), 0.5)$, $AverG(r) = -0.0026r^2 + 0.62r - 0.8171$. 该拥挤团体由 100 只幼崽组成, 通过团体半径的大小表征团体的拥挤程度. 根据式 (11) 和式 (12) 计算 EEU 随团体半径 r 的变化趋势, 实验结果如图 16 所示. 由图 16 可以

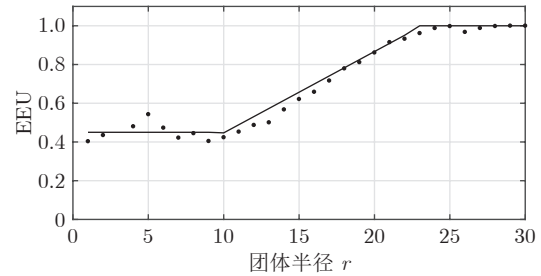


图 16 拥挤团体 EEU 随团体半径 r 的变化趋势

Fig.16 Relationship between EEU of huddling and radius r

看出, 在团体半径 r 过小时团体的 EEU 相对稳定, 这意味着幼崽群通过组成拥挤团体减少自身能耗的节能效率存在上限, 也就是说在团体中个体必须保持一定比例的暴露面积用于呼吸或进食. 同时, 当团体半径 r 大于一定数值后, EEU 趋近于 1, 这说明团体半径过大, 团体过于松散已经失去了节能效果.

5 能量高效利用机制研究面临的挑战

本文对多种不同生物族群的能量高效利用机制 (流体优势利用机制、流体阻碍克服机制和热量交换与扩散机制) 分别进行了综述. 由于生物族群的多样性、复杂性和不确定性, 在将能量高效利用机制应用到多智能体系统方面的研究较少. 因此, 能量高效利用机制的研究还面临着很大的挑战.

1) 控制精度要求极高. 研究表明, 无论是鸟群的线性编队, 还是鱼群的“菱形”编队都要求紧密队形, 个体之间的间距往往小于自身大小, 如此密集的编队对多智能体的控制精度带来极大的挑战.

2) 通讯处理能力要求高. 生物族群在编队中的信息交互方式与智能体不同, 生物族群大多依靠视觉、听觉进行信息交换, 而智能体集群依靠无线电实现机间与人机交互. 并且两者对信息的处理速度也有差别, 生物可以通过肌肉记忆完成信息反馈实现邻近个体交互, 而智能体需要依靠机载控制器才能实现集群协调控制. 处理速度的差距也会直接影响编队控制精度.

3) 生物能量利用机制是否适配智能体. 生物能量利用机制建立在生物族群特殊的运动方式上, 而相同流体环境中智能体运动方式大多不同, 如同样在空气中飞行的鸟类与固定翼, 水中游动的鱼类与潜水器, 它们的动力产生方式则完全不同. 因此, 如何将生物族群能量高效利用机制合理地应用到不同的智能体上也是目前面临的主要困难.

6 结束语

虽然多智能体系统的应用领域非常广泛, 但是

多智能体系统的整体性能却受限于单个智能体能量资源的不足,因此智能体集群的能量高效利用机制已经成为多智能体系统领域的热点问题.考虑到多智能体系统与生物族群的相似性,本文基于仿生学思想对生物族群的能量高效利用机制进行了综述,根据节能方式的差异将节能机制分为流体优势利用机制、流体阻碍克服机制和热量交换与扩散机制.在分类的基础上系统梳理了不同生物族群节能机制的研究进展.表2总结了不同生物族群的节能效果,(这些节能效果以能耗降低程度、摆动频率降低程度、耗氧量降低程度、阻力减免程度等指标描述)以及EEU模型的估计结果.从表2中我们可以发现,由于缺乏编队参数和实验数据,导致本文提出的EEU模型在应用过程中精度不足,无法有效估计生物族群的节能效果.在未来的研究中,应当进一步深化对生物族群节能机制的认识,提高EEU模型的精度.

关于生物族群能量高效利用机制如何应用于多智能体系统的问题,未来需要关注的方向可以总结为:

1) 生物节能机制的应用性研究.从现有的研究结果来看,研究不同生物族群的节能机制是出于解释自然现象的目的,由于智能体集群与生物族群的现实意义不同,针对生物族群的研究结论不能直接应用于智能体集群.但是,在生物研究中采用的研究方法仍然有极大的借鉴意义,譬如通过精密测量仪器和流体仿真从微观角度探究生物个体对集群产生的物理影响.这些研究思路和研究方法对研究智能体集群的能量高效利用机制很有帮助.

2) 基于运动机理的能量研究.从生物族群的研究过程中我们可以发现,研究人员不断探究族群中个体与个体、个体与集群之间的关系,并以此为基

础研究生物族群能量机制的实现方式.我们在智能体集群的能量研究中,也应当从个体运动学和动力学的角度出发^[151-152],建立个体运动模型^[153-155],探究个体的能量转换过程,进而研究个体对其他个体、集群和环境的影响.

3) 集群能量流动过程研究.本文为便于讨论不同生物节能机制的节能效果,通过分析集群能量转换过程,对生物集群的能量形式进行了简单分类,然后根据分类建立能量高效利用模型.但是从文中对不同生物族群的分析过程可以看出,受限于对生物节能机制认识的不足,该模型的分析结果与生物实验的结果仍有较大差异.虽然研究人员对智能体的认知程度要更加深刻,但是我们不能完全依赖微观认识构建能量模型,仍然要从能量转换与流动的角度建立宏观模型.

4) 基于任务规划的能量机制研究.生物个体出于进化与生存的目的组成集群,节能机制正是实现这一目的的有效方法,而智能体组成集群是出于任务需要,两者存在的意义不同,节能机制的实现方式也应当不同.因此,有必要进一步深入研究基于任务规划的能量高效利用机制.

5) 基于生物集群运动规则的多智能体一致性研究.一致性问题作为多智能体之间实现协调控制的基础,具有重要的研究价值和现实意义.多智能体系统的一致性是指随时间推移,系统中所有个体的某一状态(方向、速度等)趋于一致.这一点在生物集群也多有体现,如鱼群的聚集与分散、鸟群编队的结构变化等,说明生物集群中也存在某种相互作用、传递信息的规则.因此,研究生物集群维持规则对多智能体研究十分有价值.

表2 多种生物族群的能量高效利用机制总结

Table 2 Summary of energy efficient utilization mechanism in multiple biological clusters

族群种类	能量高效利用机制	实验数据	集群规模	EEU模型估计节能效果	参考文献
加拿大鹅	流体优势利用机制	能耗降低 36.0%	55	9.4% ~ 45.3% (根据编队参数的差异)	[57]
粉红足雁	流体优势利用机制	能耗降低 14.0%	54	9.4% ~ 47.4% (根据编队参数的差异)	[59]
白鹈鹕	流体优势利用机制	能耗降低 11.4% ~ 14.0%	8	7.4% ~ 28.9% (根据编队参数的差异)	[62]
鲭鱼	流体优势利用机制	摆动频率 15.0% ~ 29.0%	—	14.4% ~ 23.0% (根据编队间距的差异)	[82]
海鲈鱼	流体优势利用机制	摆动频率 9.0% ~ 14.0%	9	14.4% ~ 23.0% (根据编队间距的差异)	[83]
欧洲拟鲤	流体优势利用机制	摆动频率 7.3% ~ 11.6%	8	14.4% ~ 23.0% (根据编队间距的差异)	[54]
鳙鱼	流体优势利用机制	摆动频率 10.5% ~ 27.0%	8	14.4% ~ 23.0% (根据编队间距的差异)	[87]
鳊鱼	流体优势利用机制	耗氧量 30.0%	7	14.4% ~ 23.0% (根据编队间距的差异)	[96]
南极磷虾	流体优势利用机制	耗氧量小 7.2 倍	—	—	[104]
棘刺龙虾	流体阻碍克服机制	65.0% 阻力减免	19	70.6% (6 只组成的队列)	[117]
三叶虫	流体阻碍克服机制	—	3	30.6% (2 只组成的队列)	[129]
帝企鹅	热量交换与扩散机制	能耗降低 51.0%	—	最大节能效率不超过 55.0%	[138]
啮齿类动物幼崽	热量交换与扩散机制	—	100	最大节能效率不超过 55.0%	[148-149]

References

- 1 Saad W, Bennis M, Mozaffari M, Lin X Q. *Wireless Communications and Networking for Unmanned Aerial Vehicles*. Cambridge: Cambridge University Press, 2020.
- 2 Ding J P, Mei H Y, Chih-Lin I, Zhang H, Liu W W. Frontier progress of unmanned aerial vehicles optical wireless technologies. *Sensors*, 2020, **20**(19): Article No. 5476
- 3 Baltaci A, Dinc E, Ozger M, Alabbasi A, Cavdar C, Schupke D. A survey of wireless networks for future aerial communications (FACOM). *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2021, **23**(4): 2833–2884
- 4 Cai C W, Wu S, Jiang L Y, Zhang Z P, Yang S Y. A 500-W wireless charging system with lightweight pick-up for unmanned aerial vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, **35**(8): 7721–7724
- 5 Li Min, Bao Fu-Yu, Wang Heng. Optimization of total energy consumption for unmanned aerial vehicle-enabled wireless sensor networks. *Acta Automatica Sinica*, DOI: [10.16383/j.aas.c220914](https://doi.org/10.16383/j.aas.c220914)
(李敏, 包富瑜, 王恒. 无人机使能的无线传感网总能耗优化方法. 自动化学报, DOI: [10.16383/j.aas.c220914](https://doi.org/10.16383/j.aas.c220914))
- 6 Luo Xiao-Yuan, Yang Fan, Li Shao-Bao, Guan Xin-Ping. Generation of optimally persistent formation for multi-agent systems. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(7): 1311–1319
(罗小元, 杨帆, 李绍宝, 关新平. 多智能体系统的最优持久编队生成策略. 自动化学报, 2014, **40**(7): 1311–1319)
- 7 Shao L Y, Karci A E H, Tavernini D, Sornioti A, Cheng M. Design approaches and control strategies for energy-efficient electric machines for electric vehicles—A review. *IEEE Access*, 2020, **8**: 116900–116913
- 8 Jiang B, Huang G S, Wang T, Gui J S, Zhu X Y. Trust based energy efficient data collection with unmanned aerial vehicle in edge network. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2022, **33**(6): Article No. e3942
- 9 Boursianis A D, Papadopoulou M S, Diamantoulakis P, Liopatsakalidi A, Barouchas P, Salahas G, et al. Internet of things (IoT) and agricultural unmanned aerial vehicles (UAVs) in smart farming: A comprehensive review. *Internet of Things*, 2022, **18**: Article No. 100187
- 10 Liu Y L, Dai H N, Wang Q B J, Shukla M K, Imran M. Unmanned aerial vehicle for internet of everything: Opportunities and challenges. *Computer Communications*, 2020, **155**: 66–83
- 11 Khan M T R, Muhammad Saad M, Ru Y, Seo J, Kim D. Aspects of unmanned aerial vehicles path planning: Overview and applications. *International Journal of Communication Systems*, 2021, **34**(10): Article No. e4827
- 12 Chen J C, Ling F Y, Zhang Y, You T, Liu Y F, Du X Y. Coverage path planning of heterogeneous unmanned aerial vehicles based on ant colony system. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2022, **69**: Article No. 101005
- 13 Cho S W, Park H J, Lee H, Shim D H, Kim S Y. Coverage path planning for multiple unmanned aerial vehicles in maritime search and rescue operations. *Computers and Industrial Engineering*, 2021, **161**: Article No. 107612
- 14 Ahmed F, Mohanta J C, Keshari A, Yadav P S. Recent advances in unmanned aerial vehicles: A review. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2022, **47**(7): 7963–7984
- 15 Bouguettaya A, Zarzour H, Taberkit A M, Kechida A. A review on early wildfire detection from unmanned aerial vehicles using deep learning-based computer vision algorithms. *Signal Processing*, 2022, **190**: Article No. 108309
- 16 Saikin D A, Baca T, Gurtner M, Saska M. Wildfire fighting by unmanned aerial system exploiting its time-varying mass. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, **5**(2): 2674–2681
- 17 Neupane K, Baysal-Gurel F. Automatic identification and monitoring of plant diseases using unmanned aerial vehicles: A review. *Remote Sensing*, 2021, **13**(19): Article No. 3841
- 18 Hu H M, Kaizu Y, Huang J J, Furuhashi K, Zhang H D, Li M, et al. Research on methods decreasing pesticide waste based on plant protection unmanned aerial vehicles: A review. *Frontiers in Plant Science*, 2022, **13**: Article No. 811256
- 19 Jang G, Kim J, Yu J K, Kim H J, Kim Y, Kim D W, et al. Review: Cost-effective unmanned aerial vehicle (UAV) platform for field plant breeding application. *Remote Sensing*, 2020, **12**(6): Article No. 998
- 20 McNelly B P, Whitcomb L L, Brusseau J P, Carr S S. Evaluating integration of autonomous underwater vehicles into port protection. In: Proceedings of the OCEANS, Hampton Roads, Hampton Roads, USA: IEEE, 2022. 1–8
- 21 Al Abkal S, Talas R, Shaw S, Ellis T. The application of unmanned aerial vehicles in managing port and border security in the US and Kuwait: Reflections on best practice for the UK. *International Journal of Maritime Crime and Security (IJMCS)*, 2020, **1**(1): 26–33
- 22 Gorodetsky V, Skobelev P, Marik V. System engineering view on multi-agent technology for industrial applications: Barriers and prospects. *Cybernetics and Physics*, 2020, **9**(1): 13–30
- 23 Du Yong-Hao, Xing Li-Ning, Cai Zhao-Quan. Survey on intelligent scheduling technologies for unmanned flying craft clusters. *Acta Automatica Sinica*, 2020, **46**(2): 222–241
(杜永浩, 邢立宁, 蔡昭权. 无人飞行器集群智能调度技术综述. 自动化学报, 2020, **46**(2): 222–241)
- 24 Calegari R, Ciatto G, Mascardi V, Omicini A. Logic-based technologies for multi-agent systems: A systematic literature review. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 2021, **35**(1): Article No. 1
- 25 Wieselsberger C. Beitrag zur Erklärung des Winkelfluges einiger Zugvögel. *Motorluftschiffahrt*, 1914, **3**(5): 225–229
- 26 Gould L L, Heppner F. The vee formation of Canada geese. *The Auk*, 1974, **165**(11): 494–506
- 27 Lissaman P B S, Shollenberger C A. Formation flight of birds. *Science*, 1970, **168**(3934): 1003–1005
- 28 Weihs D. Hydrodynamics of fish schooling. *Nature*, 1973, **241**(5387): 290–291
- 29 Belyayev V V, Zuyev G V. Hydrodynamic hypothesis of school formation in fishes. *Problems of Ichthyology*, 1969, **9**(27): 578–584
- 30 Fish F E. Energetics of swimming and flying in formation. *Comments on Theoretical Biology*, 1999, **5**(35): 283–304
- 31 Le Maho Y. The Emperor Penguin: A strategy to live and breed in the cold: Morphology, physiology, ecology, and behavior distinguish the polar emperor penguin from other penguin species, particularly from its close relative, the king penguin. *American Scientist*, 1977, **65**(6): 680–693
- 32 Ancel A, Visser H, Handrich Y, Masman D, Le Maho Y. Energy saving in huddling penguins. *Nature*, 1997, **385**(6614): 304–305
- 33 Herrnkind W. Queuing behavior of spiny lobsters. *Science*, 1969, **164**(3886): 1425–1427
- 34 Chatterton B D E, Fortey R A. Linear clusters of articulated trilobites from Lower Ordovician (Arenig) strata at Bini Tinzoulin, north of Zagora, southern Morocco. *Advances in Trilobite Research. Cuadernos del Museo Geominero*, 2008, **24**(9): 73–77
- 35 Li W, Wang G G, Gandomi A H. A survey of learning-based intelligent optimization algorithms. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2021, **28**(5): 3781–3799
- 36 Liu Cheng-Han, He Qing. Golden sine chimp optimization algorithm integrating multiple strategies. *Acta Automatica Sinica*, 2023, **49**(11): 2360–2373
(刘成汉, 何庆. 融合多策略的黄金正弦黑猩猩优化算. 自动化学报, 2023, **49**(11): 2360–2373)

- 37 Li Ya-Li, Wang Shu-Qin, Chen Qian-Ru, Wang Xiao-Gang. Comparative study of several new swarm intelligence optimization algorithms. *Computer Engineering and Applications*, 2020, **56**(22): 1–12
(李雅丽, 王淑琴, 陈倩茹, 王小钢. 若干新型群智能优化算法的对比研究. *计算机工程与应用*, 2020, **56**(22): 1–12)
- 38 Yang Xu, Wang Rui, Zhang Tao. Review of unmanned aerial vehicle swarm path planning based on intelligent optimization. *Control Theory and Applications*, 2020, **37**(11): 2291–2302
(杨旭, 王锐, 张涛. 面向无人机集群路径规划的智能优化算法综述. *控制理论与应用*, 2020, **37**(11): 2291–2302)
- 39 Qiu H X, Duan H B. A multi-objective pigeon-inspired optimization approach to UAV distributed flocking among obstacles. *Information Sciences*, 2020, **509**: 515–529
- 40 Li L, Nagy M, Graving J M, Bak-Coleman J, Xie G M, Couzin I D. Vortex phase matching as a strategy for schooling in robots and in fish. *Nature Communications*, 2020, **11**(1): Article No. 5408
- 41 Wu X Y, He W, Wang Q, Meng T T, He X Y, Fu Q. A long-endurance flapping-wing robot based on mass distribution and energy consumption method. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, **70**(8): 8215–8224
- 42 Fu Q, Wang X Q, Zou Y, He W. A miniature video stabilization system for flapping-wing aerial vehicles. *Guidance, Navigation and Control*, 2022, **2**(1): Article No. 2250001
- 43 Huang H F, He W, Fu Q, He X Y, Sun C Y. A bio-inspired flapping-wing robot with cambered wings and its application in autonomous airdrop. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2022, **9**(12): 2138–2150
- 44 Huang H F, He W, Wang J B, Zhang L, Fu Q. An all servo-driven bird-like flapping-wing aerial robot capable of autonomous flight. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, **27**(6): 5484–5494
- 45 He W, Mu X X, Zhang L, Zou Y. Modeling and trajectory tracking control for flapping-wing micro aerial vehicles. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2021, **8**(1): 148–156
- 46 Pennycuik C J, Alerstam T, Hedenström A. A new low-turbulence wind tunnel for bird flight experiments at Lund University, Sweden. *Journal of Experimental Biology*, 1997, **200**(10): 1441–1449
- 47 Sachs G, Moelyadi M A. Effect of slotted wing tips on yawing moment characteristics. *Journal of Theoretical Biology*, 2006, **239**(1): 93–100
- 48 Kawaguchi S, King R, Meijers R, Osborn J E, Swadlow K M, Ritz D A, et al. An experimental aquarium for observing the schooling behaviour of Antarctic krill (*Euphausia superba*). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2010, **57**(7–8): 683–692
- 49 Hammer W M, Hammer P P. Behavior of Antarctic krill (*Euphausia superba*): Schooling, foraging, and antipredatory behavior. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2000, **57**(S3): 192–202
- 50 Catton K B, Webster D R, Kawaguchi S, Yen J. The hydrodynamic disturbances of two species of krill: Implications for aggregation structure. *Journal of Experimental Biology*, 2011, **214**(11): 1845–1856
- 51 Lopez U, Gautrais J, Couzin I D, Theraulaz G. From behavioural analyses to models of collective motion in fish schools. *Interface Focus*, 2012, **2**(6): 693–707
- 52 Viscido S V, Parrish J K, Grünbaum D. Individual behavior and emergent properties of fish schools: A comparison of observation and theory. *Marine Ecology Progress Series*, 2004, **273**: 239–249
- 53 Tian G Z, Zhang Y S, Feng X M, Hu Y S. Focus on bio-inspired textured surfaces toward fluid drag reduction: Recent progresses and challenges. *Advanced Engineering Materials*, 2022, **24**(1): Article No. 2100696
- 54 Svendsen J C, Skov J, Bildsoe M, Steffensen J F. Intra-school positional preference and reduced tail beat frequency in trailing positions in schooling roach under experimental conditions. *Journal of Fish Biology*, 2003, **62**(4): 834–846
- 55 Wiese K, Ebina Y. The propulsion jet of euphausia superba (antarctic krill) as a potential communication signal among conspecifics. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1995, **75**(1): 43–54
- 56 Berger M. Formationsflug ohne Phasenbeziehung der Flügel-schläge. *Journal für Ornithologie*, 1972, **113**(2): 161–169
- 57 Hainsworth F R. Precision and dynamics of positioning by Canada geese flying in formation. *Journal of Experimental Biology*, 1987, **128**(1): 445–462
- 58 Bajec I L, Heppner F H. Organized flight in birds. *Animal Behaviour*, 2009, **78**(4): 777–789
- 59 Cutts C J, Speakman J R. Energy savings in formation flight of pink-footed geese. *Journal of Experimental Biology*, 1994, **189**(1): 251–261
- 60 Badgerow J P, Hainsworth F R. Energy savings through formation flight? A re-examination of the vee formation. *Journal of Theoretical Biology*, 1981, **93**(1): 41–52
- 61 Ward S, Bishop C M, Woakes A J, Butler P J. Heart rate and the rate of oxygen consumption of flying and walking barnacle geese (*Branta leucopsis*) and bar-headed geese (*Anser indicus*). *Journal of Experimental Biology*, 2002, **205**(21): 3347–3356
- 62 Weimerskirch H, Martin J, Clerquin Y, Alexandre P, Jiraskova S. Energy saving in flight formation. *Nature*, 2001, **413**(6857): 697–698
- 63 Bairlein F, Fritz J, Scope A, Schwendenwein I, Stanclova G, van Dijk G, et al. Energy expenditure and metabolic changes of free-flying migrating northern bald ibis. *PLoS One*, 2015, **10**(9): Article No. e0134433
- 64 Nathan R, Spiegel O, Fortmann-Roe S, Harel R, Wikelski M, Getz W M. Using tri-axial acceleration data to identify behavioral modes of free-ranging animals: General concepts and tools illustrated for griffon vultures. *Journal of Experimental Biology*, 2012, **215**(6): 986–996
- 65 Späni D, Arras M, König B, Rütlicke T. Higher heart rate of laboratory mice housed individually vs in pairs. *Laboratory Animals*, 2003, **37**(1): 54–62
- 66 Maeng J S, Park J H, Jang S M, Han S Y. A modeling approach to energy savings of flying Canada geese using computational fluid dynamics. *Journal of Theoretical Biology*, 2013, **320**: 76–85
- 67 Kshatriya M, Blake R W. Theoretical model of the optimum flock size of birds flying in formation. *Journal of Theoretical Biology*, 1992, **157**(2): 135–174
- 68 Mirzaeinia A, Hassanalian M, Lee K, Mirzaeinia M. Energy conservation of V-shaped swarming fixed-wing drones through position reconfiguration. *Aerospace Science and Technology*, 2019, **94**: Article No. 105398
- 69 Nudds R L, Rayner J M V. Scaling of body frontal area and body width in birds. *Journal of Morphology*, 2006, **267**(3): 341–346
- 70 Pennycuik C J, Fast P L F, Ballerstädt N, Rattenborg N. The effect of an external transmitter on the drag coefficient of a bird's body, and hence on migration range, and energy reserves after migration. *Journal of Ornithology*, 2012, **153**(3): 633–644
- 71 Cutts C J, Metcalfe N B, Taylor A C. Aggression and growth depression in juvenile atlantic salmon: The consequences of individual variation in standard metabolic rate. *Journal of Fish Biology*, 1998, **52**(5): 1026–1037
- 72 Andersson M, Wallander J. Kin selection and reciprocity in flight formation? *Behavioral Ecology*, 2004, **15**(1): 158–162
- 73 Higdon J J L, Corrsin S. Induced drag of a bird flock. *The*

- American Naturalist*, 1978, **112**(986): 727–744
- 74 Usherwood J R, Stavrou M, Lowe J C, Roskilly K, Wilson A M. Flying in a flock comes at a cost in pigeons. *Nature*, 2011, **474**(7352): 494–497
- 75 Zhang Tian-Dong, Wang Rui, Cheng Long, Wang Yu, Wang Shuo. Research on energy-saving mechanism of fish schooling: A review. *Acta Automatica Sinica*, 2021, **47**(3): 475–488 (张天栋, 王睿, 程龙, 王宇, 王硕. 鱼集群游动的节能机理研究综述. *自动化学报*, 2021, **47**(3): 475–488)
- 76 Spedding G. The cost of flight in flocks. *Nature*, 2011, **474**(7352): 458–459
- 77 Breder C M. Orctices and fish schools. *Zoologica New York*, 1965, **50**(16): 97–114
- 78 Weihs D. Some hydrodynamical aspects of fish schooling. *Swimming and Flying in Nature*. New York: Springer, 1975. 703–718
- 79 Partridge B L, Pitcher T J. Evidence against a hydrodynamic function for fish schools. *Nature*, 1979, **279**(5712): 418–419
- 80 Blake R W. *Fish Locomotion*. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.
- 81 Abrahams M V, Colgan P W. Fish schools and their hydrodynamic function: A reanalysis. *Environmental Biology of Fishes*, 1987, **20**(1): 79–80
- 82 Zuyev G V, Belyayev V V. An experimental study of the swimming of fish in groups as exemplified by the horse mackerel [*Trachurus mediterraneus ponticus* Aleev]. *Journal of Ichthyology*, 1970, **10**(21): 545–549
- 83 Herskin J, Steffensen J F. Energy savings in sea bass swimming in a school: Measurements of tail beat frequency and oxygen consumption at different swimming speeds. *Journal of Fish Biology*, 1998, **53**(2): 366–376
- 84 Gerstner C L. Use of substratum ripples for flow refuging by Atlantic cod, *Gadus morhua*. *Environmental Biology of Fishes*, 1998, **51**(4): 455–460
- 85 Webb P W. The effect of solid and porous channel walls on steady swimming of steelhead trout *Oncorhynchus mykiss*. *Journal of Experimental Biology*, 1993, **178**(1): 97–108
- 86 Liao J C. A review of fish swimming mechanics and behaviour in altered flows. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2007, **362**(1487): 1973–1993
- 87 Marras S, Killen S S, Lindström J, McKenzie D J, Steffensen J F, Domenici P. Fish swimming in schools save energy regardless of their spatial position. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 2015, **69**(2): 219–226
- 88 Hemelrijk C, Reid D, Hildenbrandt H, Padding J. The increased efficiency of fish swimming in a school. *Fish and Fisheries*, 2015, **16**(3): 511–521
- 89 Dai L Z, He G W, Zhang X, Zhang X. Stable formations of self-propelled fish-like swimmers induced by hydrodynamic interactions. *Journal of the Royal Society Interface*, 2018, **15**(147): Article No. 20180490
- 90 Chen S Y, Fei Y H J, Chen Y C, Chi K J, Yang J T. The swimming patterns and energy-saving mechanism revealed from three fish in a school. *Ocean Engineering*, 2016, **122**: 22–31
- 91 Tesch F W, Thorpe J E. *The Eel*. Oxford: Blackwell Science Ltd, 2003.
- 92 Burgerhout E, Manabe R, Brittiijn S A, Aoyama J, Tsukamoto K, van den Thillart G E E J M. Dramatic effect of pop-up satellite tags on eel swimming. *Naturwissenschaften*, 2011, **98**(7): 631–634
- 93 Palstra A, van Ginneken V, van den Thillart G. Cost of transport and optimal swimming speed in farmed and wild European silver eels (*Anguilla anguilla*). *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular and Integrative Physiology*, 2008, **151**(1): 37–44
- 94 Sébert P, Scaion D, Belhomme M. High hydrostatic pressure improves the swimming efficiency of European migrating silver eel. *Respiratory Physiology and Neurobiology*, 2009, **165**(1): 112–114
- 95 van Ginneken V, Antonissen E, Müller U K, Booms R, Eding E, Verreth J, et al. Eel migration to the Sargasso: Remarkably high swimming efficiency and low energy costs. *Journal of Experimental Biology*, 2005, **208**(7): 1329–1335
- 96 Burgerhout E, Tudorache C, Brittiijn S A, Palstra A P, Dirks R P, van den Thillart G E E J M. Schooling reduces energy consumption in swimming male European eels, *Anguilla anguilla* L. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2013, **448**: 66–71
- 97 Zhou Meng-Yuan, Wu Jun-Qin, Xia Le, Huang Min. Design and implementation of intelligent bionic fish system. *Computer Engineering and Design*, 2022, **43**(5): 1467–1476 (周梦园, 吴君钦, 夏乐, 黄敏. 智能仿生鱼系统的设计与实现. *计算机工程与设计*, 2022, **43**(5): 1467–1476)
- 98 Qin Wei-Wei, Zhang Jian, Zuo Xin-Long, Tang Wen-Xian, Wang Zi-Hang. Based on the analysis of the oscillating propulsion characteristics of koi BCF. *Science Technology and Engineering*, 2023, **23**(8): 3200–3206 (秦伟伟, 张建, 左新龙, 唐文献, 王子航. 基于锦鲤 BCF 摆动推进特性分析. *科学技术与工程*, 2023, **23**(8): 3200–3206)
- 99 Li Guang-Hao, Feng Na, Liu Gui-Jie. Flat drag reduction method based on biomimetic fish-body structure. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2021, **29**(1): 80–87 (李广浩, 冯娜, 刘贵杰. 基于仿生鱼体结构的平板减阻方法. *水下无人系统学报*, 2021, **29**(1): 80–87)
- 100 Hao Tian-Ze, Xiao Hua-Ping, Liu Shu-Hai, Zhang Chao, Ma Hao. Research status of integrated intelligent soft robots. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2021, **55**(2): 229–243 (郝天泽, 肖华平, 刘书海, 张超, 马豪. 集成化智能软体机器人研究进展. *浙江大学学报 (工学版)*, 2021, **55**(2): 229–243)
- 101 Jiao Liu, Zhang Bao-Cheng, Zhang Kai-Sheng, Zhao Bo. Design and simulation of two-joint pressure-driven soft bionic fish. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, **52**(3): 817–827 (教柳, 张保成, 张开升, 赵波. 两关节压力驱动柔性仿生机器鱼的设计与仿真. *力学学报*, 2020, **52**(3): 817–827)
- 102 Borazjani I, Sotiropoulos F. Numerical investigation of the hydrodynamics of carangiform swimming in the transitional and inertial flow regimes. *Journal of Experimental Biology*, 2008, **211**(10): 1541–1558
- 103 Gonçalves R T, Hirabayashi S, Suzuki H. Experimental study on flow around an array of four circular cylinders. In: Proceedings of the Techno-Ocean (Techno-Ocean). Kobe, Japan: IEEE, 2016. 660–667
- 104 Ritz D A. Is social aggregation in aquatic crustaceans a strategy to conserve energy? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2000, **57**(S3): 59–67
- 105 Patria M P, Wiese K. Swimming in formation in krill (Euphausiacea), a hypothesis: Dynamics of the flow field, properties of antennular sensor systems and a sensory-motor link. *Journal of Plankton Research*, 2004, **26**(11): 1315–1325
- 106 Hamner W M. Aspects of schooling in *Euphausia superba*. *Journal of Crustacean Biology*, 1984, **4**(5): 67–74
- 107 Kanda K, Takagi K, Seki Y. Movement of the larger swarms of Antarctic krill *Euphausia superba* population off enderby land during 1976–1977 season. *Journal of the Tokyo University of Fisheries*, 1982, **68**(1–2): 25–45
- 108 Yen J, Brown J, Webster D R. Analysis of the flow field of the krill, *Euphausia pacifica*. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*, 2003, **36**(4): 307–319
- 109 Murphy D W, Olsen D, Kanagawa M, King R, Kawaguchi S, Osborn J, et al. The three dimensional spatial structure of Antarctic krill schools in the laboratory. *Scientific Reports*, 2019,

- 9(1): Article No. 381
- 110 Burns A L, Schaerf T M, Lizier J, Kawaguchi S, Cox M, King R, et al. Self-organization and information transfer in Antarctic krill swarms. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2022, **289**(1969): Article No. 20212361
- 111 Tarling G A, Fielding S. Swarming and behaviour in Antarctic krill. *Biology and Ecology of Antarctic Krill*. Cham: Springer, 2016. 279–319
- 112 Terushkin M, Fridman E. Network-based deployment of non-linear multi agents over open curves: A PDE approach. *Automatica*, 2021, **129**: Article No. 109697
- 113 Khan M W, Wang J. Multi-agents based optimal energy scheduling technique for electric vehicles aggregator in microgrids. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2022, **134**: Article No. 107346
- 114 Herrnkind W F, Childress M J, Lavalli K L. Cooperative defence and other benefits among exposed spiny lobsters: Inferences from group size and behaviour. *Marine and Freshwater Research*, 2001, **52**(8): 1113–1124
- 115 Heeremans O, Rubie E, King M, Oviedo-Trespalacios O. Group cycling safety behaviours: A systematic review. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2022, **91**: 26–44
- 116 Pérez-Zuriaga A M, Moll S, López G, García A. Driver behavior when overtaking cyclists riding in different group configurations on two-lane rural roads. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, **18**(23): Article No. 12797
- 117 Bill R G, Herrnkind W F. Drag reduction by formation movement in spiny lobsters. *Science*, 1976, **193**(4258): 1146–1148
- 118 Kanciruk P, Herrnkind W. Mass migration of spiny lobster, *Panulirus argus* (Crustacea: Palinuridae): Behavior and environmental correlates. *Bulletin of Marine Science*, 1978, **28**(4): 601–623
- 119 Herrnkind W F. Evolution and mechanisms of mass single-file migration in spiny lobster: Synopsis. *Contributions in Marine Science*, 1985, **27**(S1): 197–211
- 120 Herrnkind W F. Spiny lobsters: Patterns of movement. Biology and management of lobsters. *Physiology and Behavior*, 1980, **1**(12): 349–407
- 121 Briceño F A, Polymeropoulos E T, Fitzgibbon Q P, Dambacher J M, Pecl G T. Changes in metabolic rate of spiny lobster under predation risk. *Marine Ecology Progress Series*, 2018, **598**: 71–84
- 122 Voelkl B, Portugal S J, Unsöld M, Usherwood J R, Wilson A M, Fritz J. Matching times of leading and following suggest cooperation through direct reciprocity during V-formation flight in ibis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, **112**(7): 2115–2120
- 123 Waters A, Blanchette F, Kim A D. Modeling huddling penguins. *PLoS One*, 2012, **7**(11): Article No. e50277
- 124 Corrales-García A, Esteve J, Zhao Y L, Yang X L. Synchronized moulting behaviour in trilobites from the Cambrian Series 2 of South China. *Scientific Reports*, 2020, **10**(1): Article No. 14099
- 125 Mángano M G, Buatois L A, Waisfeld B G, Muñoz D F, Vaccari N E, Astini R A. Were all trilobites fully marine? Trilobite expansion into brackish water during the early Palaeozoic. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2021, **288**(1944): Article No. 20202263
- 126 Bicknell R D C, Holmes J D, García-Bellido D C, Paterson J R. Malformed individuals of the trilobite *Estiaingia bilobata* from the Cambrian Emu Bay Shale and their palaeobiological implications. *Geological Magazine*, 2023, **160**(4): 803–812
- 127 Hou X G, Siveter D J, Aldridge R J, Siveter D J. Collective behavior in an early Cambrian arthropod. *Science*, 2008, **322**(5899): 224
- 128 Radwański A, Kin A, Radwańska U. Queues of blind phacopid trilobites trimerocephalus: A case of frozen behaviour of early Famennian age from the Holy Cross Mountains, Central Poland. *Acta Geologica Polonica*, 2009, **59**(4): 459–481
- 129 Kin A, Błażejowski B. A new *Trimerocephalus* species (Trilobita, Phacopidae) from the late Devonian (early Famennian) of Poland. *Zootaxa*, 2013, **3626**(3): 345–355
- 130 Gutiérrez-Marco J C, Sá A A, García-Bellido D C, Rábano I, Valério M. Giant trilobites and trilobite clusters from the Ordovician of Portugal. *Geology*, 2009, **37**(5): 443–446
- 131 Fornarelli F, Oresta P, Lippolis A. Flow patterns and heat transfer around six in-line circular cylinders at low Reynolds number. *JP Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, **11**(1): 1–28
- 132 Gilbert C, Blanc S, Le Maho Y, Ancel A. Energy saving processes in huddling emperor penguins: From experiments to theory. *Journal of Experimental Biology*, 2008, **211**(1): 1–8
- 133 Gilbert C, Le Maho Y, Perret M, Ancel A. Body temperature changes induced by huddling in breeding male emperor penguins. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 2007, **292**(1): R176–R185
- 134 Ancel A, Gilbert C, Poulin N, Beaulieu M, Thierry B. New insights into the huddling dynamics of emperor penguins. *Animal Behaviour*, 2015, **110**: 91–98
- 135 Alberts J R. Huddling by rat pups: Group behavioral mechanisms of temperature regulation and energy conservation. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 1978, **92**(2): 231–245
- 136 Hayes J P, Speakman J R, Racey P A. The contributions of local heating and reducing exposed surface area to the energetic benefits of huddling by short-tailed field voles (*Microtus agrestis*). *Physiological Zoology*, 1992, **65**(4): 742–762
- 137 Haim A, Van Aarde R J, Skinner J D. Burrowing and huddling in newborn porcupine: The effect on thermoregulation. *Physiology and Behavior*, 1992, **52**(2): 247–250
- 138 Gilbert C, McCafferty D, Le Maho Y, Martrette J M, Giroud S, Blanc S, et al. One for all and all for one: The energetic benefits of huddling in endotherms. *Biological Reviews*, 2010, **85**(3): 545–569
- 139 Gilbert C, Robertson G, Le Maho Y, Naito Y, Ancel A. Huddling behavior in emperor penguins: Dynamics of huddling. *Physiology and Behavior*, 2006, **88**(4–5): 479–488
- 140 Gilbert C, Robertson G, Le Maho Y, Ancel A. How do weather conditions affect the huddling behaviour of emperor penguins? *Polar Biology*, 2008, **31**(2): 163–169
- 141 Ancel A, Beaulieu M, Le Maho Y, Gilbert C. Emperor penguin mates: Keeping together in the crowd. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2009, **276**(1665): 2163–2169
- 142 Zitterbart D P, Wienecke B, Butler J P, Fabry B. Coordinated movements prevent jamming in an emperor penguin huddle. *PLoS One*, 2011, **6**(6): Article No. e20260
- 143 Alberts J R. Huddling by rat pups: Multisensory control of contact behavior. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 1978, **92**(2): 220–230
- 144 Canals M, Bozinovic F. Huddling behavior as critical phase transition triggered by low temperatures. *Complexity*, 2011, **17**(1): 35–43
- 145 Conklin P, Heggeness F W. Maturation of temperature homeostasis in the rat. *American Journal of Physiology-Legacy Content*, 1971, **220**(2): 333–336
- 146 Malik S S, Fewell J E. Thermoregulation in rats during early postnatal maturation: Importance of nitric oxide. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 2003, **285**(6): R1366–R1372

- 147 Richter C P. Animal behavior and internal drives. *The Quarterly Review of Biology*, 1927, **2**(3): 307–343
- 148 Sealander Jr J A. The relationship of nest protection and huddling to survival of *Peromyscus* at low temperature. *Ecology*, 1952, **33**(1): 63–71
- 149 Glancy J, Groß R, Stone J V, Wilson S P. A self-organising model of thermoregulatory huddling. *PLoS Computational Biology*, 2015, **11**(9): Article No. e1004283
- 150 Glancy J, Groß R, Wilson S P. A minimal model of the phase transition into thermoregulatory huddling. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems. London, UK: Springer, 2013. 381–383
- 151 He Wei, Ding Shi-Qiang, Sun Chang-Yin. Research progress on modeling and control of flapping-wing air vehicles. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(5): 685–696
(贺威, 丁施强, 孙长银. 扑翼飞行器的建模与控制研究进展. 自动化学报, 2017, **43**(5): 685–696)
- 152 Yin Zhao, He Wei, Zou Yao, Mu Xin-Xing, Sun Chang-Yin. Efficient formation of flapping-wing aerial vehicles based on wild geese queue effect. *Acta Automatica Sinica*, 2021, **47**(6): 1355–1367
(尹翌, 贺威, 邹尧, 穆新星, 孙长银. 基于“雁阵效应”的扑翼飞行器机器人高效集群编队研究. 自动化学报, 2021, **47**(6): 1355–1367)
- 153 Fu Qiang, Zhang Xiang, Zhao Min, Zhang Chun-Hua, He Wei. Research progress on the wind tunnel experiment of a bionic flapping-wing aerial vehicle. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, **44**(4): 767–779
(付强, 张祥, 赵民, 张春华, 贺威. 仿生扑翼飞行器风洞实验研究进展. 工程科学学报, 2022, **44**(4): 767–779)
- 154 Wang Ting-Ting, He Xiu-Yu, Zou Yao, Fu Qiang, He Wei. Research progress on the flight control of flapping-wing aerial vehicles. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, **45**(10): 1630–1640
(汪婷婷, 何修宇, 邹尧, 付强, 贺威. 面向扑翼飞行机器人的飞行控制研究进展综述. 工程科学学报, 2023, **45**(10): 1630–1640)
- 155 Qian Chen, Fang Yong-Chun, Li You-Peng. Control oriented modeling and singular perturbation analysis in flapping-wing flight. *Acta Automatica Sinica*, 2022, **48**(2): 434–443
(钱辰, 方勇纯, 李友朋. 面向扑翼飞行控制的建模与奇异摄动分析. 自动化学报, 2022, **48**(2): 434–443)

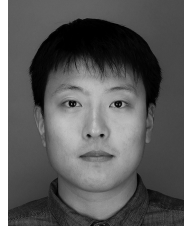


吴晓阳 北京科技大学智能科学与技术学院博士研究生。2017 年获得河北工业大学学士学位。2020 年获得北京科技大学硕士学位。主要研究方向为扑翼飞行机器人和飞行器控制。

E-mail: wxy1995_jz@163.com

(**WU Xiao-Yang** Ph.D. candidate

at the School of Intelligence Science and Technology, University of Science and Technology Beijing. He received his bachelor degree from Hebei University of Technology in 2017, and his master degree from University of Science and Technology Beijing in 2020. His research interest covers flapping-wing aerial vehicles and control of air vehicles.)



邹尧 北京科技大学智能科学与技术学院教授。2010 年获得大连理工大学学士学位, 2016 年获得北京航空航天大学博士学位。主要研究方向为飞行器控制, 多智能体系统。

E-mail: zouyao@ustb.edu.cn

(**ZOU Yao** Professor at the School of Intelligence Science and Technology, University of Science and Technology Beijing. He received his bachelor degree from Dalian University of Technology in 2010, and his Ph.D. degree from Beihang University in 2016. His research interest covers control of air vehicles and multi-agent system.)



付强 北京科技大学智能科学与技术学院副教授。2009 年获得北京交通大学学士学位, 2016 年获得北京航空航天大学博士学位。主要研究方向为视觉导航, 视觉伺服和扑翼飞行机器人。本文通信作者。

E-mail: fuqiang@ustb.edu.cn

(**FU Qiang** Associate professor at the School of Intelligence Science and Technology, University of Science and Technology Beijing. He received his bachelor degree from Beijing Jiaotong University in 2009, and his Ph.D. degree from Beihang University in 2016. His research interest covers vision-based navigation, visual servoing, and flapping-wing aerial vehicles. Corresponding author of this paper.)



贺威 北京科技大学智能科学与技术学院教授。2006 年获得华南理工大学自动化学院学士学位, 2011 年获得新加坡国立大学电气工程与计算机科学系博士学位。主要研究方向为仿生扑翼飞行机器人, 智能无人系统和智能控制。

E-mail: weihe@ieee.org

(**HE Wei** Professor at the School of Intelligence Science and Technology, University of Science and Technology Beijing. He received his bachelor degree from College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology (SCUT) in 2006, and his Ph.D. degree from Department of Electrical and Computer Engineering, National University of Singapore (NUS), Singapore in 2011. His research interest covers flapping-wing aerial vehicles, intelligent unmanned system, and intelligent control.)